



[小特集]

便利な世の中を支える 知られざる標準化の裏側

- 標準化がなぜ必要か?
- 標準化会合とは
- 国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) における標準化活動
- 3GPPにおける標準化活動と経験談
- IEEE 802.11ac 標準化の舞台裏
- Bluetooth®の標準化に向けた取り組みと
標準化活動参加に関するお願い
- 電波法上での新参者
WPTシステムの制度化の実際

Facebook, f
Twitter
も見てね



電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン

電子情報通信学会知識ベース「知識の森」 一般公開中！

URL: <https://www.ieice-hbkb.org/portal/>

総合版ハンドブックの Web 化 (知識ベース) は、本会が担うべき学術分野における知識の体系的な保持・記録、及びデータベース検索機能による知識活用を可能にしました。

知識ベースは、第一線で活躍する多様な研究者及び技術者が執筆し、広く世の中で活用されて科学技術向上に資するとともに、学会として求められる社会貢献をより充実させるためにも、必要不可欠と考えられます。

本知識ベースは 2011 年 3 月から一般向けに公開を開始しており、現在までの総アクセス数は約 756 万と大好評を頂いております (2023 年 9 月時点)。今後更にコンテンツの充実を図り進化させていく予定です。

是非上記 URL にアクセスして頂き、体系化された知識を御活用下さい。

2023 年 4 月号からは会誌にも記事が掲載されております。是非御覧下さい。

- | | | | |
|------|--------------|------|-------------------|
| S1 群 | 情報環境とメディア | 6 群 | コンピュータ基礎理論とハードウェア |
| S2 群 | ナノ・量子・バイオ | 7 群 | コンピュータ ソフトウェア |
| S3 群 | 脳・知能・人間 | 8 群 | 情報入出力・記録装置と電源 |
| S4 群 | 宇宙・環境・社会 | 9 群 | 電子材料・デバイス |
| 1 群 | 信号・システム | 10 群 | 集積回路 |
| 2 群 | 画像・音・言語 | 11 群 | 社会情報システム |
| 3 群 | コンピュータネットワーク | 12 群 | 電子情報通信基礎 |
| 4 群 | モバイル・無線 | 13 群 | 標準・知財・法規 |
| 5 群 | 通信・放送 | 14 群 | 歴史・年表・資料 |

The image displays the IEICE Knowledge Base 'Forest of Knowledge' (知識の森) portal and a sample article page. The portal interface includes a search bar, a sidebar with category lists (S1-S4 groups and 1-14 groups), and a main content area. A sample article page is shown for the 'S3 群 脳・知能・人間' (S3 Group: Brain, Intelligence, and Human) category, specifically for the '2 編 感覚・知覚・認知の基礎' (Volume 2: Fundamentals of Sensation, Perception, and Cognition). The article text discusses the history of research on the mechanisms of sensation and perception, starting from the 1960s and moving towards the 1990s. It mentions the use of PET and MRI for brain activity imaging and the development of models for cognitive functions. The article is authored by 西村 英一 (Hirofumi Nishimura) and published in 2023.

編集チームリーダー 内田大輔
Daisuke Uchida

便利な世の中を支える 知られざる標準化の裏側

標準化と聞くとやや堅苦しいイメージを思い浮かべるかもしれません。あるいは、余りなじみがないワードかもしれません。普段余り意識していないのですが、標準化は、実は私たちの生活に関わりの深いものです。例えば多くの方がスマートフォンを使用していると思います。スマートフォンはいつでもどこでも使えて便利です。このスマートフォンは近くの基地局とつながることによって使えます。仮に、その通信が標準化されていなかったら、あなたが持っているスマートフォンは家の近くでは使えますが、勤務先や通学先では使えません、なんてことになってしまうかもしれません。このように、標準化の結果、いろいろなものがスムーズにつながり、サービスが普及し、私たちの世界は便利になっているのです。私たちはこの結果を享受しているわけですが、その裏側には秘められたストーリーがあります。どのように決めたのか、どのような苦悩があったのか、なぜそのような決まりになったのか、そんなドラマを知りたくないでしょうか。技術者の方も、仕様書で決定事項を把握することはあっても、その経緯まで知っている方は少ないのではないのでしょうか。

本小特集では、こうした背景の下、各専門家の方々に標準化の裏側について解説頂きました。初めに、標準化に余りなじみのない方々でも理解しやすいよう、「そもそも標準化とは何か」や標準化が行われているミーティングに関して分かりやすく解説頂きます。その後、携帯電話（セルラシステム）や無線 LAN、Bluetooth® といった具体的な標準化を例に、その裏側について解説頂きます。そして、無線給電に関して、標準化と関連付けて実用に向けた法制化の裏側を解説頂きます。なお、本小特集は「子どもに教えた通信のしくみ」、「技術と制度のおはなし」と連動企画になっており、双方を読むことで、より理解が深まると思います。編集チームとしては、読者の方々が記事を読んで興味を抱き、場合によっては自らが標準化活動に参加するような、「つなぎ」になっていければと考えております。各執筆者の方々には、今後標準化に携わる方へ向けたメッセージも記載頂いています。

最後に、本小特集の発行に当たり、御執筆の皆様、編集委員の皆様、査読、校閲に御協力頂いた皆様に感謝申し上げます。

小特集編集チーム

内田大輔、磯崎裕臣、伊藤暢彦、小南大智、沢田健介、
関 裕太、松本和人、山ヶ城尚志、山本 嶺

■標準化に関する過去の記事のリストです。併せて御覧下さい。

- (1) 解説：ICT を活用した災害対応と ICT の耐災害性に関する国際標準化動向 【2021 冬号 No.59】
長妻 努／今中秀郎／井上真杉
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/15/3/15_228/_pdf
- (2) 技術と制度のおはなし：ICT における新たな標準化の推進方策 【2021 夏号 No.57】
渡邊修宏
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/15/1/15_89/_pdf
- (3) 開発物語：LTE の標準化と開発 【2021 春号 No.56】
中村武宏
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/14/4/14_323/_pdf
- (4) 解説論文：高効率無線 LAN の標準化規格と研究開発動向 【2019 冬号 No.51】
石原浩一／井上保彦／アベセカラ ヒランタ／村上友規
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/13/3/13_186/_pdf
- (5) 解説：ITU-T におけるマルチメディア関連の標準化動向 【2019 夏号 No.49】
山本秀樹
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/13/1/13_6/_pdf
- (6) 解説：60GHz アンライセンス帯を用いたミリ波非接触高速転送システムの標準化と研究開発の動向 【2016 秋号 No.38】
平賀 健／坂元一光／俊長秀紀／中川匡夫／赤羽和徳
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/10/2/10_107/_pdf
- (7) 解説：ミリ波帯無線 LAN システムの標準化動向と要素技術 【2016 秋号 No.38】
滝波浩二／白方亨宗／入江誠隆／高橋和晃
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/10/2/10_100/_pdf
- (8) 解説：無線 LAN 関連システムの国際標準化動向 【2016 秋号 No.38】
山田 暁／野島大輔／浅井孝浩
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/10/2/10_74/_pdf
- (9) 開発物語：日本発の光コネクタ技術（SC コネクタ）が世界標準に 【2015 秋号 No.34】
杉田悦治
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/9/2/9_116/_pdf
- (10) 第 3 世代移動通信システムの国際標準化への取り組み 【2014 秋号 No.30】
秦 正治／佐藤孝平
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/8/2/8_91/_pdf
- (11) 移動通信の国際標準化よもやま話 【2014 秋号 No.30】
語り手：秦 正治／渡辺文夫／佐藤孝平
B-plus インタビューチーム：平松勝彦／大橋正良／西本 浩／阿野茂浩
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/8/2/8_95/_pdf
- (12) 解説：M2M 技術のアーキテクチャ及び oneM2M 標準化動向 【2014 夏号 No.29】
山崎徳和
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/8/1/8_46/_pdf
- (13) 街 plus 探訪 番外編：ジュネーブガイドーレストランと国際標準化ー 【2012 夏号 No.21】
山崎克之
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/6/1/6_44/_article/-char/ja
- (14) 小特集：標準化で世界を歩く！ 【2013 春号 No.24】
https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/ieice/alldata/Bplus24_all.pdf
- (15) 開発物語：ISDN の標準化～パイオニアとしての先駆的な役割とその限界～ 【2011 夏号 No.17】
加納貞彦／北見憲一
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/5/1/5_1_63/_article/-char/ja

- (16) 開発物語：空中衝突を防げ！航空機衝突防止装置の開発，標準規格化へ挑戦と苦戦～フライト試験で実証することが最大の武器！！～【2011 秋号 No.18】
平田俊清
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/5/2/5_2_154/_article/-char/ja
- (17) 解説論文：グリーンビルディングと設備情報アクセスプロトコル：その設計と標準化【2011 秋号 No.18】
落合秀也／江崎 浩
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/5/2/5_2_119/_article/-char/ja
- (18) 開発物語：MPEG 開発物語～ De-Facto と De-Jure 標準～【2010 夏号 No.13】
村上篤道
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2010/13/2010_13_13_68/_article/-char/ja
- (19) 開発物語：日本発国際標準：地球規模で普及するデジタルファクシミリ～電話網ファクシミリの研究開発と国際標準化～【2010 秋号 No.14】
山崎泰弘／若原 恭
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2010/14/2010_14_14_70/_article/-char/ja
- (20) 解説：ネットワーク映像配信技術及び標準化動向【2010 秋号 No.14】
宮地悟史
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2010/14/2010_14_14_31/_article/-char/ja
- (21) 技術と制度のおはなし：情報通信分野における標準化活動【2011 春号 No.16】
杉野 勲
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2011/16/2011_16_16_69/_article/-char/ja
- (22) 解説：高出力電磁波問題に関する国際標準化動向【2009 秋号 No.10】
古関隆章／木本 徹
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2009/10/2009_10_10_36/_article/-char/ja
- (23) 開発物語：IEEE 802.11a 無線 LAN の研究開発と標準化【2010 春号 No.12】
守倉正博
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2010/12/2010_12_12_66/_article/-char/ja
- (24) 報告：コグニティブ無線の標準化動向【2008 夏号 No.5】
原田博司
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2008/5/2008_5_5_46/_article/-char/ja
- (25) 標準化解説：IMT-Advanced 無線インタフェースの標準化動向【2009 春号 No.8】
吉野 仁／中村 元／藤井輝也
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2009/8/2009_8_8_66/_article/-char/ja
- (26) 解説・報告：無線ボディエリアネットワークの医療分野における利活用と標準化動向【2008 春号 No.4】
滝沢賢一／李 還幫／原 晋介／浜口 清／河野隆二
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2008/4/2008_4_4_62/_article/-char/ja
- (27) 解説論文：パーソナルエリアネットワークを進化させるミリ波技術と標準化活動【2007 秋号 No.2】
莊司洋三／原田博司／加藤修三／豊田一彦／高橋和晃／川崎研一／池田秀人／大石泰之／丸橋建一／中瀬博之／安藤 真
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2007/2/2007_2_2_92/_article/-char/ja
- (28) 解説・報告：IEEE 802.15 ワーキンググループにおける標準化動向【2007 秋号 No.2】
原 晋介
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2007/2/2007_2_2_103/_article/-char/ja
- (29) 標準化解説：第3世代移動体通信システムの標準化 IMT2000 から 3GPP の活動経緯と今後の展開【2007 夏号 No.1】
古谷之綱
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/2007/1/2007_1_1_30/_article/-char/ja



021



090



096



099

【小特集】

便利な世の中を支える 知られざる標準化の裏側

001

巻頭言

編集チームリーダー
内田大輔

009

— 解説 —

標準化がなぜ必要か？

成澤 慶

015

— 解説 —

標準化会合とは

守倉正博

021

— 解説 —

国際電気通信連合無線通信部門（ITU-R）
における標準化活動

新 博行

028

— 解説 —

3GPP における標準化活動と経験談

鈴木秀俊

034

— 解説 —

IEEE 802.11ac 標準化の舞台裏

浅井裕介／鷹取泰司

041

— 解説 —

Bluetoothの標準化に向けた取り組みと
標準化活動参加に関するお願い

足立克己

048

— 解説 —

電波法上での新参者WPTシステムの
制度化の実際

庄木裕樹

006 ー子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページー

通信における標準化の目的とその役割

江藤 学

056 解説：技術と制度のおはなし

国際電気通信連合（ITU）と国際的な周波数管理について

～世界無線通信会議（WRC）を例に～

林 祐二郎

064 ー開発物語ー

エコキュート開発物語

齋川路之

071 ー解説論文ー

電波の不思議探検 ～静電磁界におけるエネルギー流動の一描像～

唐沢好男

080 ー街 plus 探訪ー

半導体の工場誘致と研究教育で盛り上がる「熊本」

瀬戸謙修

084 ーこんなツール、使っていますー

オープンソースLANアナライザWiresharkとハードウェアキャプチャ

竹下 恵

090 ー若者よ、世界に出よう！ー

研究者になるきっかけとなった研究者のところの研究者になってみて（前編）

村田健太郎

096 ー科学館・博物館めぐりー

つくばエキスポセンター

千川尚人

099 ー私の研究者歴ー

原点は電気少年 遊びが仕事に

田中良明

109 ー巻末言ー

安全で豊かな未来社会の創成に向けて

2024年度通信ソサイエティ会長

中尾彰宏

110

編集後記



通信における標準化の目的とその役割

一橋大学 江藤 学
Manabu Eto

1. はじめに

本号の小特集は標準化です。では標準化とはどのような活動でしょうか。まずは標準化という活動の目的と効果について考えてみます。

標準化活動とは何をするのでしょうか。言葉を見ると「標準」＋「化」ですから、「標準」にしようとする活動です。では、「標準」とは何でしょう。この言葉は日本ではいろいろな意味を持っているので、定義しにくい言葉です。一番混乱しやすいのが「規格」という言葉との違いです。英語に訳すときには標準も規格も standard と訳されることが多いのですが、実はこの二つは大きく意味が異なります。

「規格」は、誰でも作ることができます。個人でも、会社でも、国でも、それを作った人たちが自分で使うために整理した決まり事が規格です。法律も国が作る規格の一種です。ですから、規格の英訳としては standard だけではなく、criteria, specification, rule, protocol, regulation といった単語を使う方が正しい場合があります。

規格とは、二者間で情報のやり取りをするための決まりと考えることもできます。図1を見て下さい。人と人、機械と機械がコミュニケーションするために、様々な規格が必要です。言語、文字といった自然発生的に規格化されたものもあれば、法律や通信プロトコルのように人工的に作られたものもあります。そして、人が機械を使うためにも、機械の状況を理解するためにも様々な規格が必要です。

そして、その「規格」が普及し、多くの人が使っていると、その規格は「標準」(standard)と呼ばれるようになります。つまり、「標準化する」とは、規格をみんなで使いましょうと約束をしてその規格を普及する活動です。規格は普及して初めて標準と呼べるものになります。このような状態になった規格を、「標準規格」と呼

ぶこともあります。これを英語に訳すと Standard standard となってしまうのですが、Standard rule とか、Standard protocol と言われると、普及した規格のことだな、と分かると思います。

通信の国際標準化を担っている国際連合の機関の一つである ITU (国際電気通信連合) では、各国の様々な企業や研究者が生み出した通信技術の中からみんなで共通に使うことに向いた技術を選び出し、それを ITU-T の勧告 (Recommendation) として公表しています。まさに、全世界の国や企業にその規格を使うように勧めているのです。これが標準化 (standardization) です。

2. 標準化の役割

では、なぜ標準化をするのでしょうか。標準化の基本機能は「情報の非対称性の解消」です。規格を通じてつながろうとする両者が同じ情報を持つように規格情報を開示することが標準化の基本機能です。開示された規格が有用だと市場が判断すれば、その規格の利用者が増加します。そして、多くの人が同じ規格を使うようになると、様々なメリットが生まれます。

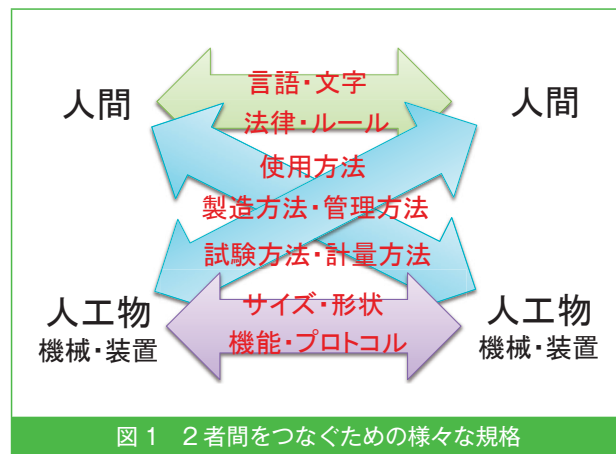
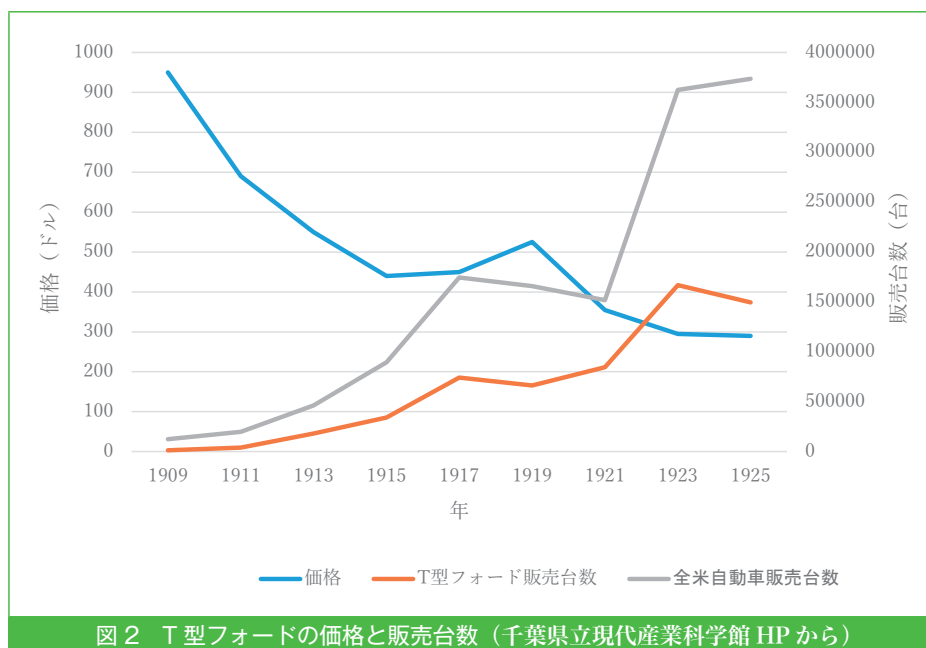


図1 2者間をつなぐための様々な規格



例えば、作り方を標準化すれば誰でも簡単に作れるようになるので、安く大量に物を作ることができます。図2は自動車を初めて大衆の乗り物として普及させたフォード社のT型フォードという車種の価格と販売台数のグラフです。フォード社はT型フォードという車を開発し、1908年に販売を開始すると同時に、この一車種だけを大量に生産するために社内の製造方法を標準化しました。その結果、1915年までの間にT型フォードの価格が半額以下に下がり、多くの人が自動車を購入できるようになりました。一時は全米で販売されている車の半数がT型フォードという時代もありました。しかし、この過程で自動車の運転の仕方なども標準化され、フォード社以外の車も売れるようになり、フォード車のシェアが下がり始めました。このためフォード社は再度値下げを行いシェアの回復を図ろうとしましたができませんでした。

この自動車は、米国だけでなく世界中に輸出されるようになりました。自動車の運転方法は世界全体で標準化されていて、世界のどこでも同じ方法で車が運転できるため、自動車の市場は急速に拡大しました。このように標準化は、コストを下げるだけでなく、市場を拡大する上でも、貿易を拡大する上でも大きな役割を果たしているのです。

ただし、世界には右側通行の国と左側通行の国があるのは皆さんも知っていると思います。世界の多くの国で車は右側通行ですが、日本やイギリスなどでは左側通行です。この通行方式は標準化できなかったため、世界には左ハンドルの車と右ハンドルの車の二機種が必要になってしまいました。

でも、このような交通規則も国単位で見れば標準化されています。これが標準化されていないと、同じ路上に右を走る車と左を走る車が現れ、事故が多発してしまうからです。このように、安全を守る上でも標準化は大きな役割を果たしています。

3. 通信の標準化

通信の標準化は、標準化の中でも最もその必要性が分かりやすい標準化と言えるでしょう。

通信とは離れた2点間で情報を交換するための技術です。情報を正しく交換するためには、情報を出す側と情報を受け取る側が同じ規格を使っていなければなりません。このために両者が同じ規格を使うように標準化するのはのです。

ちなみに、通信機などを使わず、人と人が対面でコミュニケーションする場合でも、標準化は必要です。英語しか話せない人と日本語しか話せない人が対面で会話してもコミュニケーションをとることはできません。言葉は規格の一種です。同じ言葉（規格）を使っている人同士であればコミュニケーションができます。もし世界中の人が同じ言葉を使っていれば、世界中で通訳なしでコミュニケーションをすることが可能だったでしょう。

残念ながら、人間が長い年月をかけて標準化してきた「言葉」は世界で一つにはなりませんでした。しかし、今の時代の技術的な規格は世界で一つの「標準」にすることができます。通信はつながってコミュニケーションできる人が多ければ多いほど、価値が高まります。その利便さは、同じネットワークに参加している人の二乗で

大きくなります。この効果を「ネットワーク外部性」と言います。

もちろん、この規格は標準化して誰でも使えるようにしなくてはならないわけではありません。逆に盗聴などを防ぐために規格を公開せず、通信内容を暗号化することもあります。

とは言え、通信はできるだけ多くの人に参加すると、情報交換可能な相手が増えるので、利用者全体が便利になります。お互いに同じ規格を使おうね、とみんなで規格を作成し、使うことを約束するのが「標準化活動」です。通信の世界では、標準化された規格を使用していることが、ネットワークに参加する上での必須条件ですから、みんなが標準化を待ち望んでいます。このために様々な国や企業の人が集まって、みんなで共通に使う技術を選び、それを整理します。通信にとって標準化は、みんなで使うのに適した技術を選ぶ「技術選択過程」なのです。

なお、多くの産業において標準化活動の最も重要な目的は規格の普及です。しかし、通信の世界では、標準化がこの目的を持っていない場合があります。例えば第1世代から第5世代まで何年かごとに新しい規格が作られている携帯電話の規格では、みんなで使う標準規格が必要であることが明確で、参加者全てが標準化を待ち望んでおり、規格が完成すると特に普及活動をしなくても、その規格が世界中に普及します。このように、通信では標準化が技術を利用する上で必須となることが多いので、規格の普及活動をする必要がない分野が多く存在するのです。別の言い方をすれば、通信の標準化は、国による立法と同じで、まとまったら必ずそれを使わなければならない強制力の強いものが多いのです。このため通信分野では、規格を作成することと標準化することを区別しないで議論することがよくありますし、規格技術に特許を包含させることにも躊躇がありませんが、これは通信分野における独特の環境であり、他産業の標準化とは異なっていることを認識しておく必要があります。



4. さいごに

ビジネス環境の変化に伴い、標準化の目的や効果も大きく変化しています。元々、標準化はコストダウンと市場拡大のツールとして使われるものでした。通信の世界ではつながるために標準化は必須の活動でした。

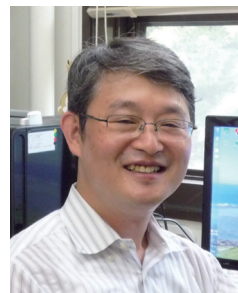
しかし、昨今のビジネスは、ビジネスエコシステム全体を見て戦略を構築することが必要となり、標準化はエコシステムにおける「間接ネットワーク外部性」を生み出すツールとして重要性が拡大しています。間接ネットワークとは、前述のネットワーク外部性の効果の一種で、みんなが同じ舞台（プラットフォーム）の上でビジネスをすると、お互いのビジネスが他社のビジネスに間接的にプラスの効果を与える効果のことです。

更にルール作りのためのツールとしての標準化の役割も拡大しています。日本は欧米先進国が作ったルールにいち早く適応し、そのルールの中で市場を拡大するビジネスを行ってきましたが、現代ではルールを自ら作らなければ市場を獲得できない時代になってきました。そのためのツールとして標準化が使えることが注目を集めています。

通信の世界でも、ビジネスを拡大していく上で、ビジネスエコシステムの視野を鍛え、ルール作りに参入していくことは必須です。これまでの、単なるつながるための標準化ではなく、ビジネスエコシステムにおける間接ネットワーク外部性を拡大し、エコシステムの中での自らの利益を拡大するためのルール作りのツールとして、標準化を積極的に利用していく視点が必要でしょう。

江藤 学

1985通商産業省入省。産業技術総合研究所標準部長、経済産業省産業技術環境局認証課長などを歴任。2008一橋大イノベーション研究センター教授。博士(工学)。著書に「標準化ビジネス戦略大全」(日本経済新聞出版、2021年)など。



標準化がなぜ必要か？

成澤 慶 Kei Narisawa 総務省国際戦略局通信規格課

1 はじめに

インターネットに接続する、ブラウザで Web サイトを閲覧する、携帯電話を活用する、テレビを見る。これら ICT（情報通信技術：Information and Communication Technology）を活用したサービスは、有線系、無線系を問わず、日々の暮らしや社会経済活動に必須のものとなっている。このような ICT サービスの導入や普及に当たっては、標準化は必要不可欠である。本稿では、標準化とは何か、標準の分類、ICT 分野の標準化とその意義といった基本的な内容について解説する⁽¹⁾。

2 標準化とは

標準化とは、「実在の問題又は起こる可能性がある問題に関して、与えられた状況において最適な秩序を得ることを目的として、共通に、かつ、繰り返して使用するための記述事項を確立する活動」である⁽²⁾。つまり、標準化は、あらかじめ決められた‘もの’の製造、サービスの提供に関する手法について、複数の国家あるいは法人等の間で合意することにより、共通の手法を確立する活動を意味する。標準化を行わない場合、様々な手法が乱立し、利便性・効率性等が限定的になってしまう。

標準化が行われた結果、「標準」「基準」「規格」と呼ばれる「standard」が生まれ、それらにより共通化が図られる。標準化の対象項目は、製品、プロセス、システム、サービス、構成要素、装置、手法など多岐にわたる。また、標準化の対象分野は、工学、農業、情報通信などの産業分野にとどまらず、計測やデータ表記に使われる「単位」も含まれる。

3 標準と標準化機関の分類

標準化の意義を詳しく解説する前に、標準にはどのようなものがあるか述べる。

3.1 組織的特徴からの分類

標準化は、図 1 に示すとおり、標準化を担う主体の組織的特徴から、デジュール標準、フォーラム標準、デファクト標準に分類される。

デジュール標準は、公的な位置付けの標準化機関において定められた手続きに従い、関係者の合意で制定される標準のことである。“De jure”とは古典ラテン語で「法律上の」という意味である。例としては、ITU（国際電気通信連合：International Telecommunication Union）、ISO（国際標準化機構：International Organization for Standardization）、IEC（国際電気標準会議：International Electrotechnical Commission）等が定める標準が挙げられる。

フォーラム標準は、複数の企業によって構成される「フォーラム」と呼ばれる組織が、公的ではないものの、開かれた標準化手続きにより策定する標準のことである。IETF（インターネット技術特別調査委員会：The Internet Engineering Task Force）や IEEE（電気電子学会：Institute of Electrical and Electronics Engineers）が定める標準が代表的である。

デファクト標準は、オープンなプロセスを経ず、製品が市場に広く受け入れられることにより、結果的に事実上の標準的規格となったものである。“De facto”とは「事実上の」という意味である。例としては、マイクロソフト社の OS（Operating System）である MS-Windows やアップル社の OS である iOS などが挙げられる。

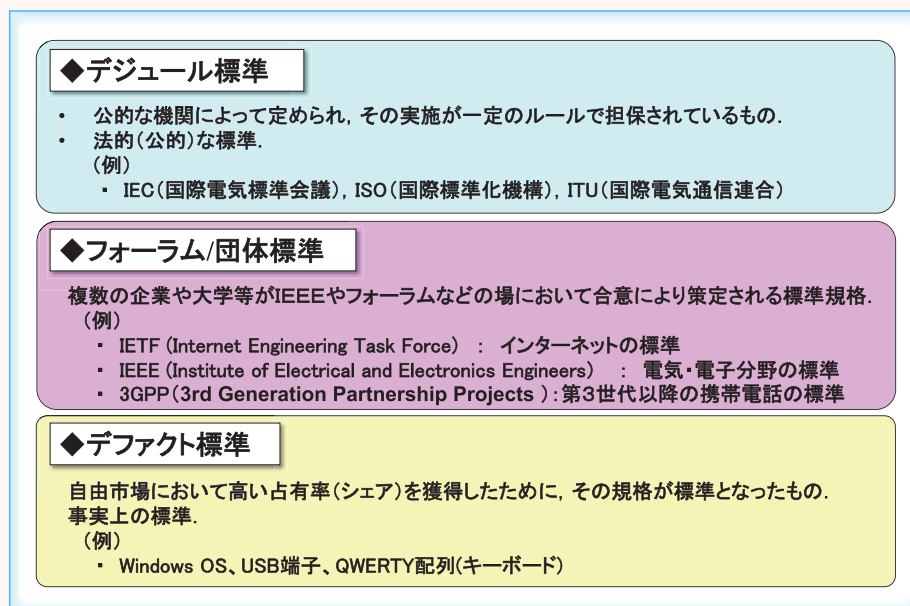


図1 標準の種類

3.2 地理的範囲に応じた分類

標準化は、標準が適用される地理的な範囲に応じて、国際的に広く適用される国際標準、複数の国やエリアなどにまたがる特定の地域内で適用される地域標準、そして国内のみに適用される国内標準に分類される。

国際標準としては、先述したITU, ISO, IECのほか、ICAO(国際民間航空機関: International Civil Aviation Organization)やIMO(国際海事機関: International Maritime Organization)等が策定している規格が該当する。地域標準としては、地域標準化機関が策定している規格が該当する。ICT分野の地域標準化機関には、欧州のETSI(欧州電気通信標準化機関: European Telecommunications Standards Institute)、米国を含む米州のCITEL(米州電気通信委員会: Inter-American Telecommunication Commission)、アジア・太平洋地域のASTAP(アジア・太平洋電気通信標準化機関: APT Standardization Program)がある。また、電気機器分野では、欧州のCEN(欧州標準化委員会: Comité Européen de Normalisation)がある。なお、ASTAPはAPT(アジア太平洋電気通信共同体: Asia Pacific Telecommunity)における電気通信の標準化を検討するグループである。ETSIが標準作成に積極的であるのに対して、ASTAPは標準技術を普及促進するための人材育成の場や、ITU全権委員会議などのハイレベル会議へアジア・太平洋地域として政策を提案するための連携の場として活用されている。

国内標準は、各国の標準化機関が策定している規格が該当する。我が国には、ネットワーク分野にTTC(情報通信技術委員会)、電波利用分野にARIB(電波産業

会)、有線放送分野にJCTEA(日本CATV技術協会)等がある。

4 ICT分野の標準化とその意義

ICTサービスの基本は、誰とでも何とでもつながり、距離に関係なく利用できることであり、国内・国際ネットワークで多種多様な端末が通信できることが肝要となる。このため、図2に示すとおり、端末機器やネットワークを接続するための接点(物理インタフェース)、接続手順(通信プロトコル)、情報の形式(符号化)などの標準化が必要不可欠である。

ICT分野ならではの標準化の意義は、利用者視点での意義、企業視点での意義に分けられる。

また、ICTビジネスでは、プレーヤとして複数の立場があることに着眼し、利用者や企業に加えて主管庁といった主要プレーヤの相互関係から標準化の意義を整理する。その際、国際貿易での標準化の役割が増大していることから、その重要性について補足する。

4.1 利用者視点での意義

4.1.1 相互接続性の向上

ICTは、通信相手が増加すれば、ネットワーク効果により利用機会や利用価値が劇的に増加するという性質を有する。相互接続性の向上を目指して標準化を進め、標準インタフェースや接続プロトコルが提供できるようになれば、ICTサービスを通じて世界80億人の人々やその周辺端末とつながることも不可能ではない。近年はモニタやセンサ機器などのデバイス間の相互接続性も課題となっている。

ICT端末やネットワークをつなげるための規格の標準化が重要

ICT (Information and Communications Technology) サービスは、自動車等の他の産業と異なり、国内外の多種多様なネットワークや端末が、相互につながって初めてサービスが成り立つ

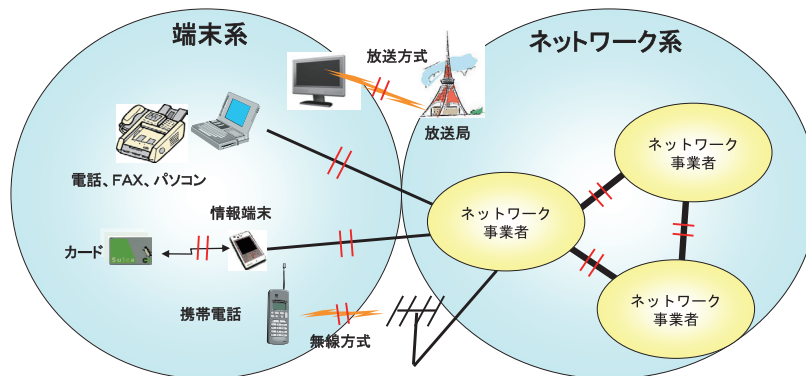


図2 ICT分野における標準化の重要性

4.1.2 品質、性能、安全性の確保

標準化により、一定の品質、性能、安全性の確保が可能となる。標準化機関であらかじめ検証を行った上で決定された仕様を満たす製品とサービスが提供されることで、消費者・利用者保護につながる。

4.1.3 通信コストの低減

標準化により、通信コストの低減が期待できる。標準化によりインタフェースがオープン化されることで、ICTを活用した様々なビジネス市場が拡大するとともに、多様な事業者の参入による国際レベルの競争が活発になる。更に、標準の普及によるコスト削減も可能となる。これらの結果として、サービス料金の低下がもたらされる。

4.1.4 選択肢の多様化

標準化により、利用者が多様な選択肢を確保することが可能となる。通信機器間のインタフェースが標準化されることで、マルチベンダ環境が実現され、特定ベンダに依存しないネットワーク構築や貿易障壁の少ないスムーズな調達が可能となる。

4.2 企業視点での意義

4.2.1 経済活動への貢献

標準化は、製品とサービスの適切な品質設定や情報の提供、技術の普及・発展、生産効率の向上、競争環境の整備、互換性やインタフェース整合性の確保といった観点から経済活動に貢献する。

なお、調達時に特定ベンダへの依存（ベンダロックイン）を回避できることは、通信インフラを構築する

ために通信機器を購入するネットワーク事業者にとって、コスト低減や選択肢の多様化の観点からも重要である。

4.2.2 社会的目標達成への貢献

標準化は、産業競争力の強化、環境・安全・権利の保護、省エネルギー・省資源の推進等の社会的目標の達成に向けた遂行手段として、企業、消費者双方の主體的な行動を促進する。

4.2.3 社会秩序への貢献

標準化は、製造業者、流通業者、使用者、消費者、研究者等の関係者間で、技術的要求事項、技術データ等を相互に伝達する手段となる。用語、記号、計量単位、試験評価方法、生産方法、品質、安全度、仕様書のフォーマット表示等について技術基盤が統一されることで、関連する社会活動の複雑化を抑制し、秩序形成を促進する。

4.2.4 自由貿易促進への貢献

標準化は、障壁の少ない円滑な貿易の維持と発展を図る目的でも活用されている。各国の国家規格等は、国際標準化機関が国際的なコンセンサスに基づいて制定する国際規格を基礎とすることが、国連機関であるWTO（世界貿易機構：World Trade Organization）のTBT（Agreement on Technical Barriers to Trade）協定で強制法規として定められている。

4.3 ICTビジネスに関わる各プレーヤの視点

ICTビジネスの主要プレーヤを、図3に示すとおり、

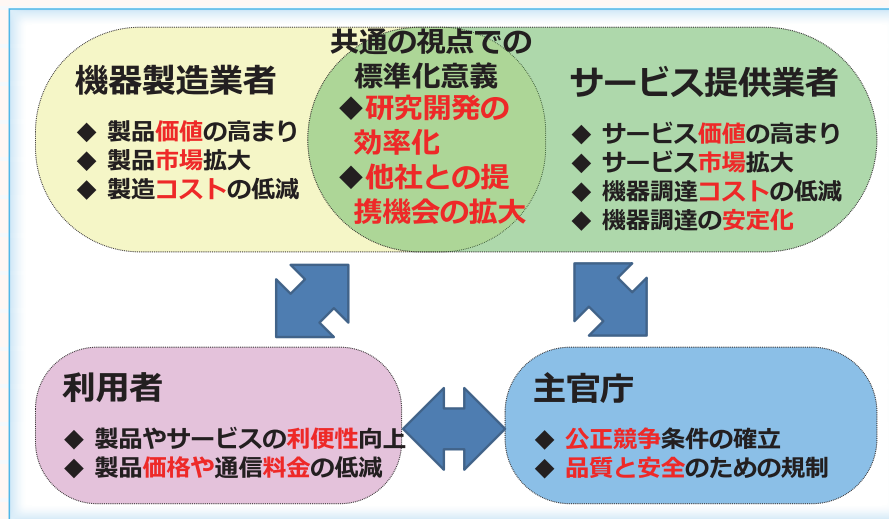


図3 ICTビジネスに関わる各プレーヤーの視点

主管庁、利用者、そしてICT機器などの製造業者とサービス提供者に分類し、それぞれの視点で標準化の意義を分析する。

主管庁は、標準を活用して規制やガイドラインを示すことにより、公正競争の確保、一定の品質と安全の確保が可能となる。

利用者は、製品とサービスの利便性の向上、製品価格と通信料金の低減の恩恵を受けることができる。

製造業者は、標準仕様との整合により、製品価値の向上、市場の拡大、製造コストの低減が期待できる。

サービス提供者は、標準の普及や規制の明確化により、サービス価値の向上、市場の拡大、機器調達コストの低減と調達の安定化を図ることができる。

更に、標準化活動を通じて、製造業者とサービス提供者の両方が、開発方針の共通化や最新技術動向の共有の機会が得られ、研究開発の効率化や他社との提携機会が拡大するといった意義も考えられる。

以上のとおり、標準化を通じて、主管庁、利用者、そして製造業者とサービス提供者を含む企業が、それぞれの視点で相互に連携しつつ社会経済活動に貢献している。このことから、ICTビジネス全体としての健全な発展のために標準化が重要な役割を担っていると言える。

4.4 国際貿易における標準化の重要性

標準化の意義として、先述のとおり、自由貿易促進への貢献が最も重要なものの一つに挙げられることから、この点を補足しておきたい。

4.4.1 WTO TBT 協定について

1995年に制定されたWTO TBT協定は、WTO加盟国に対して国内の強制規格及び任意規格並びにそれら

規格の適合性評価手続きの作成において、原則として、国際標準を基礎とすることを義務付けている。

そのため、国際標準が各国の国内市場でも採用されることになった。2001年に中国がWTOに加盟したことを契機として、欧米先進国は、中国などの新興国市場にもらみ、自国産業の国際競争力強化の観点から活発な国際標準化活動を実施している。

WTO TBT協定における国際標準とは、「WTOに加盟する国家が構成員として標準化に関与する国際機関により採択され、一般の人々が入手できる規格」を指すと解釈される。全ての国の国家を代表する関係組織体が会員資格を持てる標準化機関として該当するのは、デジュール標準化機関であるITU、ISO、IECなどである。

また、WTO「TBT協定の国際標準、指針及び勧告の制定のための原則に関する委員会」は、国際標準、指針及び勧告の制定に当たって「国際標準」であるべき六つの原則を次のとおり規定している。

- ・透明性 Transparency,
- ・開放性 Openness,
- ・公平性と合意性 Impartiality and Consensus,
- ・効率性と市場適合性 Effectiveness and Relevance,
- ・一貫性 Coherence
- ・途上国配慮 Development dimension

標準化機関が「国際標準」を制定する際には、上記原則が考慮されなければならない。

4.4.2 WTO 政府調達協定について

WTO政府調達協定（Agreement on Government Procurement）では、政府及びその関連機関が調達する物品やサービスの性能に関する技術仕様には、既に

それが存在する場合、国際標準に基づかねばならないと規定されている。

更に、この協定が適用される調達機関には、中央政府及び地方政府機関のみならず、関連機関も含まれており、それらの一覧が協定の附属書I付表3にリストされている。我が国では、関連機関として、NTT、NTT東日本、NTT西日本、各地域のJRや高速道路会社などが含まれている。

WTO加盟国はWTO政府調達協定に従って国際調達を行うので、国際標準に適合していない物品やサービスは、政府等に購入してもらえないし、売り込むこともできないことになる。

他国が政府調達等を行う際には国際標準に基づくことを踏まえ、標準化の早い段階から国内技術を基にした技術規格を国際標準に反映させていくことが重要である。これにより、国内技術の海外市場への展開が促進されるとともに、結果として、他国の技術による国内市場の席けんを防止できる効果も十分認識すべきである。

5

Beyond 5G (6G) の国際標準化をめぐる政策動向

2030年代の導入が見込まれている次世代通信インフラ Beyond 5G (6G) について、我が国の国際競争力の

強化や経済安全保障の確保を図るため、社会実装や海外展開を見据えた研究開発や国際標準化などに官民を挙げて取り組むことが必要である。昨今の政府戦略⁽³⁾や与党提言⁽⁴⁾でも、このようなBeyond 5G (6G)を含めたICTに関する国際標準化の推進等について触れられるなど、国際標準化を市場獲得に結び付けていく戦略的な取組みの重要性がますます高まっていることが確認できる。

今後、Beyond 5G (6G)の国際標準化が本格化し、世界各国の主要企業が注力していく見込みである。このような中、我が国が世界と伍していくためには、まず研究開発プロジェクトの実施者である民間企業等には、自らの投資や経営コミットメント等を含め、事業戦略と覚悟を持った取組みが求められる。更に、民間企業等は、研究開発成果を通じて生み出された戦略商材の社会実装や海外展開に重要となる国際標準化活動に、早い段階から取り組んでいく必要がある。このような民間企業等の取組みに対して国が重点的な支援を行うことで、研究開発と国際標準化活動が一体となった取組みを戦略的に推進していくことが重要となる。

このため、総務省では、令和5年度補正予算により革新的情報通信技術(Beyond 5G (6G))基金事業を拡充し、研究開発に加えて国際標準化活動への支援を行うメニューを新設している(図4)。

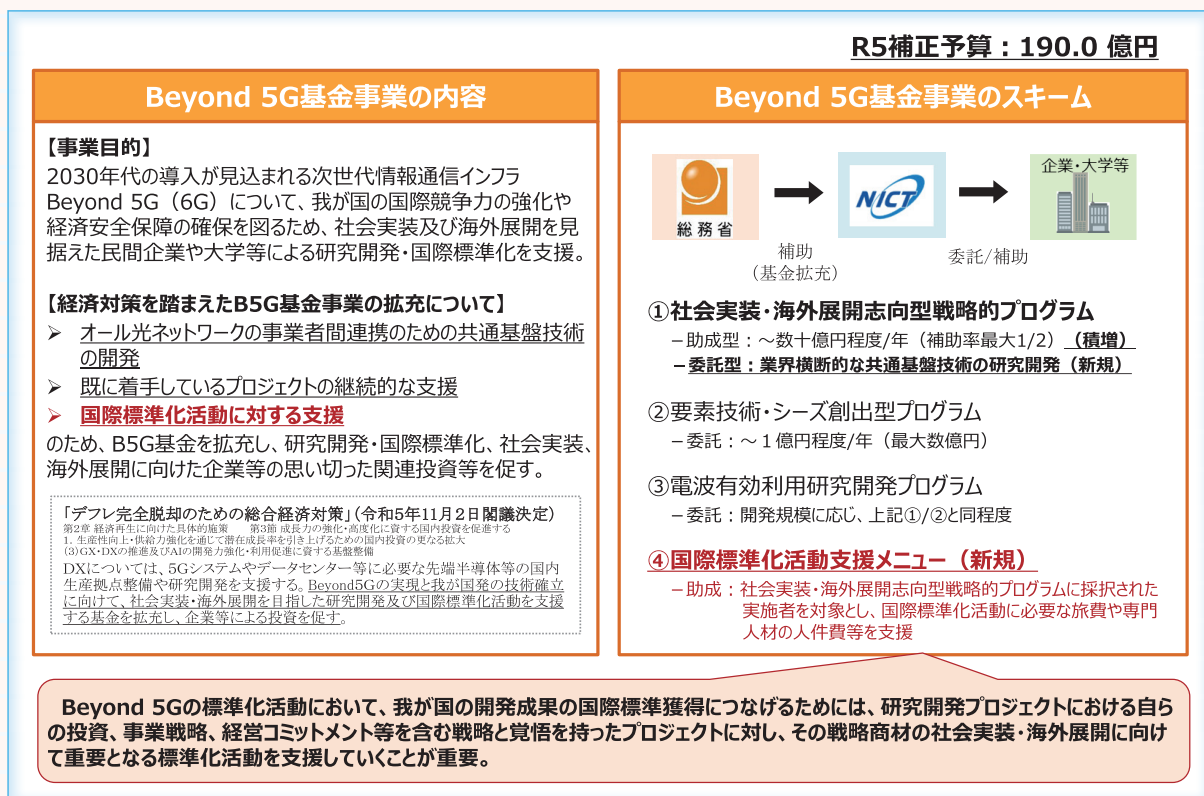


図4 Beyond 5G 基金による新たな標準化支援

6 おわりに

標準化の基本的事項，とりわけ標準の分類や ICT 分野の標準化の意義について解説するとともに，最新の政策動向についても紹介した。

本稿を通じて，読者が標準化活動を通じたルールメイキングの重要性に関心を深め，標準化の担い手不足の解消，ひいては，「我が国発」の技術による国際標準の獲得や社会経済の発展への一助となることを祈念する。

■ 文献

- (1) 一般社団法人情報通信技術委員会，“標準化教育テキスト（入門編）第9版（2023年3月）.” https://www.ttc.or.jp/activities/sdt_text
- (2) Z8002：2006 ISO/IEC Guide 2：2004
- (3) 知的財産戦略本部，“知的財産推進計画 2023（2023年6月9日）.” <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/>

- (4) titeki2/kettei/chizaikeikaku_kouteihyo2023.pdf
自由民主党政務調査会，“知的財産戦略調査会提言（令和5年5月23日）.” https://storage2.jimin.jp/pdf/news/policy/206008_2.pdf

成澤 慶

総務省国際戦略局通信規格課。2006 総務省入省後，4G の国際標準化・研究開発支援，ASEAN への ICT 海外展開，人工衛星の周波数調整（ITU への出向），準天頂衛星の開発・運用，NTT 東西の接続料認可等を担当。現職では，Beyond 5G（6G）の国際標準化・国際共同研究等を担当。



標準化会合とは

守倉正博 Masahiro Morikura NTT

1 はじめに

本稿では無線 LAN の標準化会合について、過去の経験から現在の研究開発者に伝えるべき解説記事の依頼を受け、筆者が経験した無線 LAN の標準化団体である IEEE 802.11 WG (Working Group) について述べる。筆者は 1997 年から 2002 年に及ぶ期間、802.11a 規格策定に直接的に参加し^{(1)・(2)}、2013 年以降は一般社団法人電波産業会 (ARIB) の無線 LAN システム開発部会の委員長として間接的に標準化活動に関係してきた。本稿では、主に無線 LAN 標準化のれい明期における標準化活動を通じて得た知見から、無線 LAN の標準化会合でどのように規格が決まるのかを述べることにする。

イーサネット系ネットワークとしての標準化会合である IEEE 802 委員会は、1980 年の発足時には有線系ネットワークが主な標準化対象であり、無線 LAN の標準化グループである 802.11 WG が設立されたのは 1990 年 7 月である。本標準化が開始される前の無線 LAN の始まりは米国で、1985 年に連邦通信委員会 (FCC: Federal Communications Commission) が ISM (Industrial, Scientific and Medical) バンドを用いて無線 LAN を実現することを許可したことによる。その結果、無線 LAN の標準化がなされる前に様々な非標準規格の無線 LAN 製品が市場に出回り、混々とした状況となった。最初に標準化された無線 LAN 規格である 802.11 では主に直接拡散方式と周波数ホッピング方式の規格が 1997 年 6 月に成立したが、当時の無線 LAN 製品は 1~2 Mbit/s しか伝送できず、オフィス内の有線系イーサネットが 10 Mbit/s から 100 Mbit/s の時代になっている状況で、無線 LAN の更なる伝送速度の向上が求められていた。

1997 年当時、有線系アクセス技術では ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) や光ファイバを各家庭に導入すべく研究開発が進められていた。当時

の無線 LAN に求められたミッションは、家庭やオフィスまでブロードバンド回線が普及したときに部屋の中で顕在化する配線問題を解決することにあった。

一般家庭でイーサネットケーブルを部屋中に露出させて配線することは、美観上だけでなく安全上も好ましくない。一方、一般住居の壁を工事してイーサネットケーブルを各部屋間に敷設するというのはコスト上も課題があった。

また、無線 LAN のサービスとしては、ラップトップ PC を家庭内から、職場、コーヒーショップ、大学など様々な場所に持ち出してネットワークにつながるようにする公衆無線 LAN サービスの実現を目指していた。

国内での標準化活動として 2000 年当時は電波産業会が事務局となって運営されていたマルチメディア移動アクセス (MMAC: Multimedia Mobile Access Communication Systems) 推進協議会において、日米欧の 5 GHz 帯無線アクセス標準化団体が図 1 に示すような体制で無線 LAN を含む標準化に取り組んでいた。本稿では、5 GHz 帯 802.11a 準拠無線 LAN 標準化の舞台裏について述べる。

2

5 GHz 帯高速無線 LAN の周波数割当

802.11 WG が 1990 年 7 月に設立されて以来、1997 年 6 月に標準化規格が成立するまでに、相互接続性が保証されていない製品が多く出回り、ISM バンドである 2.4 GHz 帯は無線 LAN 以外の様々な無線システムと共存しなければならず、新たな無線周波数の確保が望まれていた。無線 LAN への新たな無線周波数を 1990 年代に米国では Apple 社と WINForum (Wireless Information Network Forum) が共に 5 GHz 帯で 20 Mbit/s 相当の無線 LAN システムを要望し、FCC に新たな周波数割当を求めて請願を行った結果、5 GHz 帯

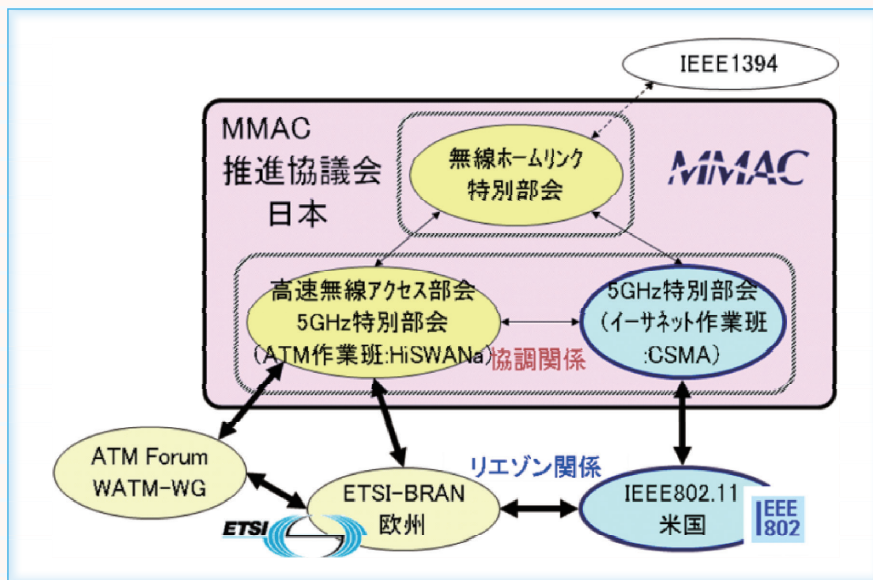


図1 5 GHz 帯無線アクセス標準化の国際協調体制

の U-NII (Unlicensed -National Information Infrastructure) バンドとして割り当てられた。一方、国内では当時 2.4 GHz 帯に加えて、19 GHz 帯の無線 LAN⁽³⁾ 利用が進められていた。しかし、装置コストやサービスエリアの関係から市場への浸透が十分でない状況であった。このような状況下で 5 GHz 帯、U-NII バンドの無線 LAN への開放は米国だけでなく、欧州、日本も 5 GHz 帯次世代無線 LAN の実現に向けて、検討を加速させた。1997 年当時は、現在とは異なり、中国・韓国からの無線 LAN への技術提案はほとんどなく、日米欧で国際標準化技術の合意が取れば、事実上の世界標準になるという時代であった。

3 802.11a 規格の成立過程

1997 年には、2.4 GHz 帯無線 LAN は 802.11 規格成立がほぼ見え、米国では 5 GHz 帯の U-NII バンドの割当も決まった状況で、2.4/5 GHz 帯における次世代無線 LAN 規格の制定に向けて、議論が始まった。具体的には無線 LAN 規格の制定目標である PAR (Project Authorization Request) の議論であり^{(4), (5)}、802.11a/b 双方の PAR は 1997 年 9 月と 12 月にそれぞれ承認され、各 TG (Task Group) で具体的な技術審議の段階に入った。5 GHz 帯の TGa では目標伝送速度が 20 Mbit/s 以上であり、2.4 GHz 帯の TGb の周波数ホッピング方式では 3 Mbit/s 以上、直接拡散方式では 8 Mbit/s 以上に目標を設定された。1998 年 5 月会合までに TGa/b ではそれぞれ標準化技術提案を受け入れ、複数提案から一つの提案に絞り込む作業に入った。



図2 1999 年 5 月会合（日本・千葉県）の風景

3.1 会議運営

802.11 WG の組織は IEEE SA (Standards Association) 配下であり、2 か月（奇数月）に 1 回、1 週間開催される。3, 7, 11 月は有線/無線を含めた全体会合で、1, 5, 9 月は無線関係の中間会合という位置付けである。IEEE という学会が主催する標準化会合であることから、標準化会合への参加は個人の資格で参加費を払えば可能である。また会議で動議に対する投票権を得るためには、年間 3 回以上の会議に出席することが必要で、会議中の週は 75 % 以上の出席率が求められる。寄書の管理は、文書管理担当者が行い、発表の前に電子ファイルを担当者に送る。802.11b の無線 LAN カードが普及するまでは、会議が行われている会場では事前送付された電子ファイルを記憶したメモリーカードから各自のラップトップ PC にコピーをしていた。会議中

は会場のどこにメモ리카ードがあるのか示すために、メモ리카ードにひもでヘリウムガス入りの風船を付けて目印としていた。この様子を図2に示す。2000年以降、802.11bの無線LANカードが普及することにより会議中は風船ではなく、無線LANにより寄書のダウンロードが可能となった(図3)。2.4 GHz帯無線LAN製品は1990年代には市場に出回っていたが、互換性がなく、このような標準化会合では使えないという典型例について身をもって知ることになった。

会議の運営には、ロバートルール(Robert's Rules of Order)が用いられている⁽⁶⁾。一般の日本人にはなじみの薄い会議運営法であるが、米国では一般的な会議運営法である。ロバートルールは1876年、米国陸軍のヘンリー・ロバート将軍が英米議会の運営規則を基に、民間団体に適応できる会議運営のルールブックとして作成したものである。主なルールは常識の範囲内であるが、議事の動議を修正する場合の手順等は詳細に決められており、議長がルールを逸脱した会議運営を行った場合は、逸脱以降の議事進行結果は破棄される場合があるので、標準化会合の議長等の役員に選出された場合にはロバートルールに目を通すことをお勧めする。

3.2 802.11a 規格選定の準備

1997年11月にTGaのPARに対する骨子提案が始まり、各提案の良否を判定するための判断基準(Criteria for Comparison of 5 GHz High Speed PHY Proposals)について審議が行われた。

提案としては当時二つのグループに分かれており、一つは最終的に802.11a規格となったパケットモードOFDM方式であり、二つ目はシングルキャリア+等化器方式であった。

以下に当時の判断基準の一例を述べる。

- ・伝送速度(PARで要求される20 Mbit/s以上)
- ・送受信機の構成(複雑さ)
- ・耐マルチパス干渉特性(0~150 ns以上)
- ・パケットのプリアンプル構成と長さ
- ・周波数安定度
- ・周波数利用効率
- ・チャンネル間隔、隣接チャンネル干渉特性、同一チャンネル干渉特性
- ・送信アンプの所要バックオフ

基本的にTGaのPARを満足する最良の方式を選択するために、判断基準を決めるのであるが、自陣営に有利で他陣営にとって不利となる判断基準を互いに提案することになる。しかし余り極端な判断基準を提案すると、投票権のある第三者が警戒することになるので注意が必要である。OFDM方式にとっては、送信アンプの非線



図3 2001年3月会合
(米国・サウスカロライナ州)の風景

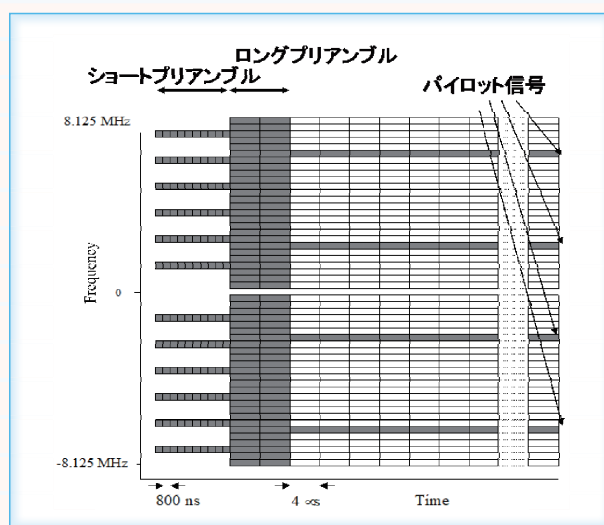


図4 802.11aのパケット信号構成

形特性についてや、無線LANでのCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)プロトコルを実現できるようなパケットモードで安定した同期特性が実現できるかが鍵となった。

判断基準の審議で大きく影響を受けた事項について述べる。OFDM方式を提案するグループ(NTTとルーセント社)では、技術比較の判断基準として無線周波数の安定度を当初 ± 5 ppm程度と見込んでおり、ロングプリアンプルでも周波数オフセットに対して十分対処可能と考えていた。しかし判断基準を議論する上で、周波数安定度の見直しが行われ、 ± 20 ppmとすることが必要となった。その結果パケットモードOFDM方式のプリアンプル構成を見直すこととなり、周波数多重方式であるOFDM方式のサブキャリア間隔を広げるため、ショートプリアンプルが挿入されることとなった(図4)。ショートプリアンプルを構成する連続する800 nsのシンボルから検出可能な最大周波数オフセットは625 kHzである⁽⁷⁾。一方、送信側と受信側でそれぞれ

20 ppm の周波数オフセットがあると、合計 40 ppm の周波数オフセットに対して受信できなければならない。5.8 GHz 帯まで考えると 232 kHz であるから要求条件を満足する。

この無線周波数安定度の ± 20 ppm はこれ以降の無線 LAN 規格でも踏襲されている。

3.3 802.11a 規格選定の投票

期日までに提案を終えた各方式に対して、投票権のある出席者により投票され、最終的に一つの方式に決まる。各種方式はダウンセクションという方法で絞り込みが行われる。このダウンセクションとは具体的には投票を複数回行い、毎回最下位の方式を除去し過半数 (50 % は含まない) を得た方式が選ばれた時点で投票を終了する。場合によっては 1 回で過半数が取ればそこで終了する。過半数を得た方式はそのまま承認というのではなく、802.11 WG における投票権のある参加者で賛同者が 75 % 以上を得る必要がある。

1998 年 5 月に開催されたオランダのユトレヒト会合では、記名投票が行われ、ダウンセクションの投票のたびに途中で誰が投票先を変えたかが分かる方法が取られた。ダウンセクションで最下位になった方式を支持していた投票権者が、次にどの方式に投票するかが最大の関心事である。投票と投票の間に、残った方式提案者は自分たちの提案をサポートするよう様々な活動を行う。ダウンセクションはユトレヒト会合中に最終決定までいかずに時間切れとなり、2 か月後の 1998 年 7 月、米国のサンディエゴ会合で継続してダウンセクションが行われた。図 5 にユトレヒト会合における方式選定のための第 1 回と第 2 回の投票結果を示す⁽⁸⁾。第 1 回投票ではパケットモード OFDM 方式は 2 位という結果であり、1 位はシングルキャリア+等化器方式であった。50 % のサポートであり、過半数でなかったため、ダウンセクションのルールとして、この方式に一本化されなかったのは無線 LAN 技術史の偶然である。このような状況となった要因を考えるに、当時はシングルキャリア+等化器方式を北米の企業が比較的多くサポートしており、OFDM 方式は欧州と日本の一部がサポートしている状況であったことが考えられる。更に重要な点はこの方式提案で OFDM 方式を推進するルーセント社が 2.4 GHz 帯の TGb でも別提案をしており、802.11a, b 両規格をルーセント社が主導するのをけん制する意見も会場で聞かれた。

TGa 投票では、辛うじてダウンセクションで生き残った OFDM 方式であるが、第 2 回投票が始まるまでのコーヒブレイクの時間を利用して、OFDM 方式サポーターは第 1 回投票で最下位となった PPM (Pulse

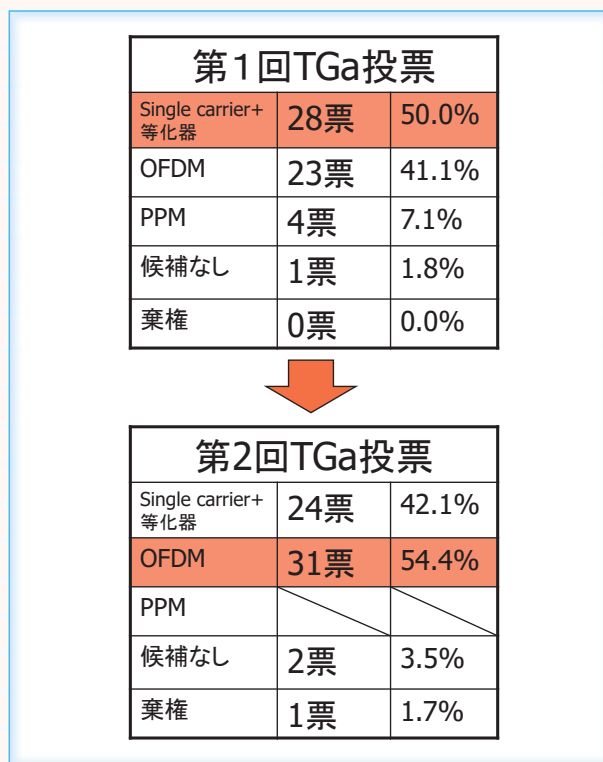


図5 ユトレヒト会合 (1998 年 5 月) における TGa の投票状況⁽⁸⁾

Position Modulation) 方式サポーターやシングルキャリア+等化器方式サポーターの切崩しを行うため、積極的に活動した。その結果、第 2 回投票で過半数の支持をようやく得る状況であった。

2.4 GHz 帯の TGb ではハリス社とルーセント社がそれぞれ 1, 2 位の支持を得ていたが、単独で過半数を得る状況ではなく、2 か月後の 1998 年 7 月に開催されたサンディエゴ会合で投票となった。この 2 か月の間に両社は方式提案を統一し、現在も使われている 802.11b 方式により多数の支持を得て採択された。このとき、TBg でルーセント社をけん制していた投票者も多くが統一案の支持に回り、その結果 TGa でもルーセント社をけん制する投票者は支持に回ることとなった。

筆者らは公衆無線 LAN サービスや家庭/オフィスにおける無線 LAN 環境実現を主に考えていたため、802.11a での必須伝送レートが TGa の PAR である伝送レート 20 Mbit/s 以上という目標を達成するために、16 QAM を用いた符号化率 1/2 の誤り訂正による 24 Mbit/s を必須伝送レートとして規格を策定した。数十 m 以上のセル半径を実現するためにも、24 Mbit/s の伝送レート技術を用いるのが妥当という判断であり、数 m 程度のセル半径を有する無線 LAN を主眼とするという意識は余りなかった。

1999 年に Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA) という団体が発足し、その後 2002 年に Wi-

Fi Alliance と名称変更し、現在に至っている。WECA は 802.11 WG とは別組織であり、製品間の相互接続性等に主眼が置かれていた。既に 2.4 GHz 帯で非標準ではあるが、当該無線周波数帯のアナログデバイスも比較的安価に製品化されていて、11 Mbit/s の伝送レートを有する 802.11b 規格に準拠する無線 LAN が実現されつつあった。その一方で標準化協議の参加者の中から 802.11b が 11 Mbit/s であることに対して、「これから無線 LAN デバイスとして 5 GHz 帯で製品を出すに当たっては、必須伝送レートが高々 2 倍の 24 Mbit/s では無線 LAN 製品を販売する上で魅力に乏しく売れない製品になる」という意見が出てきた。そこで、標準化会議中の夕食時に TGa の議長とルーセント社のエンジニア及び筆者がレストランのテーブルでペーパーナプキンを使って、伝送レートの問題について相談を始めた。当時の日本では家電メーカから屋内でのビデオ伝送として無線 LAN を使いたいが、伝送レートが IP レイヤで 32 Mbit/s が欲しい。CSMA/CA プロトコルを用いた場合の伝送効率を約 60 % と仮定し、54 Mbit/s という数字が出てきた。筆者としては数十 m のセル半径をイメージしており、この 64 QAM による 54 Mbit/s という伝送レートは短距離しか実現できない限られた用途の存在と思われたので、翌日、標準化会合で伝送レート向上で 54 Mbit/s を目指すということが告げられた際に、会場が大きく沸いたことに驚いた。「これで 802.11a の無線 LAN 製品を市場に出すことができる」という声を聞いた。802.11a では 24 Mbit/s までは必須伝送レートであり、36, 48, 54 Mbit/s の伝送レートはオプションで実装しなくてもよい規格であったが、Wi-Fi の相互接続試験に用いられる条件としては 54 Mbit/s も採用された。

4 標準化とパテントポリシー⁽⁹⁾

802.11 WG におけるパテントポリシーとしては当時以下ようになっていた。

- ・標準化する予定の技術に特許が存在する場合には、802.11 WG で宣言をすること (IP Statement)⁽¹⁰⁾
- ・特許を有する者は規格文書が成立した場合に、RAND (On Reasonable and Non-Discriminatory) 条件で特許を提供する
- ・802.11 WG 内では特許に関するライセンス契約等の金銭的なことに関知しない

図 6 に必須技術とオプション技術の関係例を示す。無線 LAN システムの物理レイヤと MAC レイヤを標準化の対象にする 802.11 WG の規格では送受信機における装置構成及びその処理方式が特許の対象となる。特許

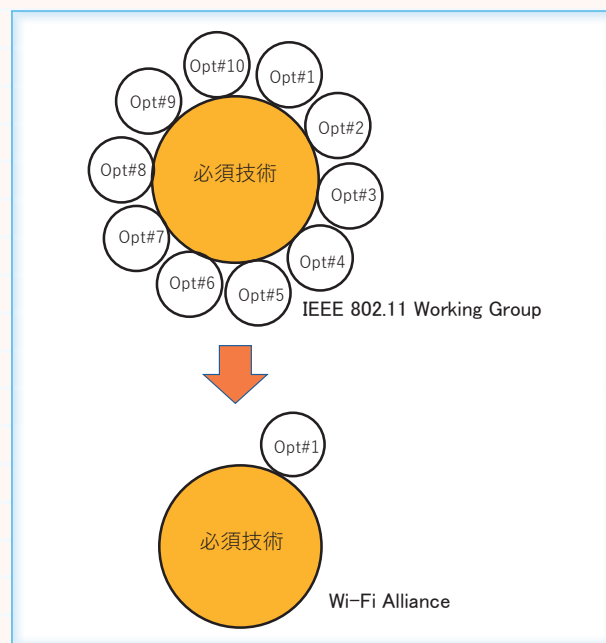


図6 必須技術とオプション技術の関係例

の種類でも標準必須特許 (SEP: Standard Essential Patent) と必須ではないオプションの特許に分類される。当然のことながら SEP の取得を目指して標準化会合が始まる前から準備段階で特許申請を強化する。オプションの特許は、利用する方からすれば特許料を支払って実装してもよいし、自分たちで当該特許を回避することでもよい。一般的に送信側の信号形式は標準化規格に準拠しなければならないが、標準必須特許となりやすく、802.11a の規格策定の段階でも、伝送特性が少し良くなるという触れ込みで様々なプリアンブルパターンの提案がなされた。その一方、受信機側での特許は、ほかの技術で代替可能な場合も多い。

5 若手に向けた提言

大学の教員時代に「国際標準化はどのような動機で策定されるのか?」と学生に質問したことがある。ある学生の意見は「世界の優秀な技術者・研究者がアイデアを持ち寄り、世界最高の技術標準を策定することを動機としている」というものがあつた。筆者の意見からすれば抜けている部分がある。すなわち、国際標準化を通じて、自分たちの属する組織の価値を高め、事業展開を有利に進めることができるようにすることと言える。

また提案技術を標準化会合で発表することにより、自分たちが目指している方向性を会合出席者と共有したり、修正したりする。そのためコーヒブレイクや食事の場で意見交換したり、率直なコメントや疑問点を質問することができる。このような状況を作り出すためには、標準化会合の場で、まず自分たちの意見をまとめた

発表を行い、興味を抱かせることが重要である。一方、反対意見の人たちとは、何が反対の理由なのか知ることから始まる。また食事に誘ってくれる場合、毎回標準化技術の話題ばかりしているのも考えものである。標準化会合は 802.11 WG の場合、1 週間が基本であり、ホテルに缶詰めになっているため、楽しみは食事くらいしかない。そのときに、仕事の話以外に、多種多様な話ができることが望ましい。例えば、スポーツ、経済、音楽、文学、歴史何でもよいので、日本から見たコメントができれば、再度誘ってもらえる機会が増える。必ずしも流ちょうな英語を話せる必要はない。その人物の背景にある素養を磨くことを勧める。標準化会合の場合は基本的に技術を軸にしたビジネスの場であり、大学の研究者にとって関係が疎遠な印象を受けるかもしれないが、次期標準化技術として何が候補となるかは重要な技術情報である。

6 まとめ

本稿では、無線 LAN の国際標準化会合である 802.11 WG の 1997~2002 年頃の経験を基に、5 GHz 帯初の無線 LAN 規格 802.11a の成立に関係した当時の状況を述べ、これから標準化会合に参加しようという若手に向けた提言を述べた。無線 LAN という形態から世界中どこでも持ち運びでき、行った先で通信可能となることが必須となることから国際標準化は避けて通れない。各事業主体によって、目指すべき技術が異なるかもしれないが、標準規格に関係しない技術が生き残るのは困難である。

文献

- (1) R. van Nee, G. Awater, M. Morikura, H. Takanashi, M. Webster, and K. W. Halford, "New high rate wireless LAN standards," IEEE Commun. Mag., pp. 82-88, Dec. 1999.
- (2) 守倉正博, 松江英明, "IEEE 802.11 準拠無線 LAN

の動向," 信学論 (B), vol. J84-B, no. 11, pp. 1918-1927, Nov. 2001.

- (3) RCR STD-34, "構内無線局 19 GHz 帯データ伝送用無線設備." https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku_tushin/desc/std-34.html
- (4) V. Hayes, "PAR 802.11a as approved." https://www.ieee802.org/11/Documents/DocumentArchives/1998_docs/80052W_PAR_dot11a.PDF
- (5) V. Hayes, "PAR 802.11b as approved." https://www.ieee802.org/11/Documents/DocumentArchives/1998_docs/80062W_PAR_dot11b.PDF
- (6) H. M. Robert III, D. H. Honemann, T. J. Balch, D. E. Seabold, and S. Gerber, Robert's Rules of Order Newly Revised in Brief, 3rd Edition, PUBLICAFFAIRS, 2020.
- (7) R. van Nee and R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.
- (8) D. Kawaguchi, "TGa report." https://www.ieee802.org/11/Documents/DocumentArchives/1998_docs/82182A-Report-Utrecht.PDF
- (9) 江藤 学, 標準化ビジネス戦略大全, 日本経済新聞出版, 東京, 2021.
- (10) M. Morikura, "IP Statement." https://www.ieee802.org/11/Documents/DocumentArchives/1998_docs/81972W-IP-statement-NTT.pdf

守倉正博 (名誉員:フェロー)

1981 京大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社横須賀電気通信研究所入所。以来、衛星通信用 TDMA 装置、無線 LAN 装置の研究開発に従事。1988~1989 カナダ政府通信研究所客員研究員。2007~2021 京大大学院情報学研究科教授。現在、京大名誉教授、NTT アクセスサービスシステム研究所リサーチプロフェッサー。



国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) における標準化活動

新 博行 Hiroyuki Atarashi (株)NTTドコモ

1 はじめに

国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) は、1865年に創設された万国電信連合 (International Telegraph Union) を前身とし、1947年に国際連合 (United Nations) が設立された後は、国際連合の専門機関の一つに位置付けられている (表1)。これらの専門機関の中には、ニュースや学校の授業等を通じて、読者にもなじみのある名称もあると思われる。

ITUの組織構成は、全権委員会、理事会、事務総局に加えて、無線通信関連の検討を担当する無線通信部門 (ITU-R: ITU Radiocommunication sector)、電気通信技術の標準化を担当する電気通信標準化部門 (ITU-T: ITU Telecommunication sector)、開発途上国に対する技術支援を担当する電気通信開発部門 (ITU-D: ITU Development sector) の3部門体制が取られている。ITU本部は、スイスのジュネーブに設置 (図1) されており、日本を含む193か国が加盟している。

本記事では、ITU-Rにおける無線通信関連の標準化について、筆者の経験などを踏まえて解説する。

2 ITU-Rの概要

ITU-Rの任務は、無線通信に利用する周波数や衛星軌道が有限な資源であることを踏まえ、無線通信に関する技術・運用について研究を行うとともに、各国の無線局間の有害な混信を避けるため、周波数の分配や周波数割当の登録等を行うことにより、無線通信に関するITUの目的を達成することを任務としている。現在の無線通信部門の体制は事務局に加え、六つの研究委員会 (Study Group) などから成り、ITU-Rの総会である無線通信総会 (Radiocommunication Assembly) において、適宜体制の見直しが図られている。

六つの研究委員会は、表2に示す任務を担っている。なお、研究委員会の番号に欠番があるのは、過去の体制の見直しにより、生じたものである。

各研究委員会の中には、作業部会 (Working Party) が設置され (Study Group 1から7を合わせると合計で21部会が設置)、研究委員会や無線通信総会で採択

表1 国連の専門機関の一例

英語名称	日本語名称
ILO (International Labor Organization)	国際労働機関
IMF (International Monetary Fund)	国際通貨基金
ITU (International Telecommunication Union)	国際電気通信連合
UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)	国際連合教育科学文化機関
UPU (Universal Postal Union)	万国郵便連合
WHO (World Health Organization)	世界保健機関
World Bank	世界銀行

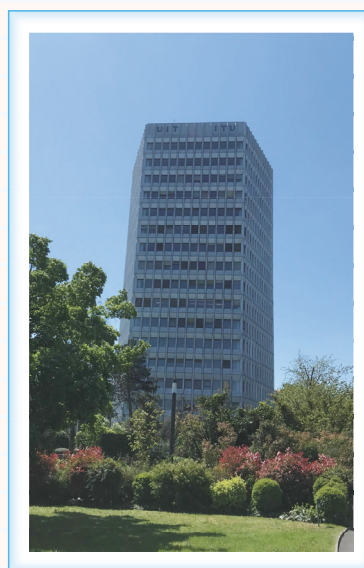


図1 ITU本部 (スイス・ジュネーブ)

表 2 ITU-R の研究委員会の概要

研究委員会	研究の所掌
Study Group 1	効率的な周波数管理の原則・技術、周波数監視等
Study Group 3	電波伝搬、電波雑音特性
Study Group 4	衛星業務に関する軌道・周波数の有効活用、システム等
Study Group 5	固定業務、移動業務、無線測位業務、アマチュア業務及びアマチュア衛星業務に関連するシステム等
Study Group 6	放送業務による映像、音声、マルチメディア及びデータサービスを含む無線通信
Study Group 7	時刻信号及び標準周波数報時、宇宙運用・研究システム、地球探査衛星システム及び気象に関する事項、電波天文業務等

をするため、様々な ITU-R 文書案の作成を行っている。

ITU-R の会合の開催頻度としては、無線通信総会が 3～4 年に 1 回で 5 日間の開催、各研究委員会が年に 1～2 回で各 1～2 日間の開催、各作業部会が年に 2～3 回で各 5～12 日間程度の開催となっている。

3 ITU-R における議論の進め方

通常、ITU-R における標準化議論の起点となるのは、作業部会における審議である。新たなトピックの議論を開始する場合には、各研究委員会が策定している研究課題 (ITU-R Question) の内容を踏まえた上で、入力文書により提案を提出することにより議論を開始する。もし提案する内容が、既存の ITU-R 研究課題で十分にカバーされていないければ、既存の研究課題の範囲を拡張するか、新たな研究課題を策定することも必要となる。

入力文書により提出された提案は、1 回の作業部会の議論のみで審議を完了できることは極めてまれである。通常は、図 2 に示すとおり、会合出席者の意見を反映

して必要な修正を行った上で、次回の作業部会の審議のベースとなる作業文書を作成し、出力文書とすることが一般的である。更に、今後の作業部会の会合開催に合わせて、どのような観点の議論を行うか、作業部会としていつまでに審議を完了させるか等を定めた作業計画を併せて策定する。

次回の作業部会の会合では、前回会合の出力文書に対する修正提案が、入力文書により行われる。会合では、これらの修正提案の議論を行った上で、次回の作業部会の審議のベースとなる出力文書を作成する。このような過程を、作業部会の複数回の会合にわたって繰り返し実施し、作業部会としての審議を完了したことを合意できれば、上位会合である研究委員会に出力文書を提出し、文書の採択や承認の手続きに関するステップへと移る。

このような審議の進み方に対応していくためには、会合への入力文書の作成だけでなく、会合における出力文書の作成への対応が非常に重要である。次回会合の審議のベースとなる出力文書を作成する際には、会合出席者からの合意を取り付けることが必要となるため、出力文書に含めるべき内容の調整を、会合出席者との間で会合期間中に精力的に実施する必要がある。

ITU-R の研究委員会の研究結果として策定される文書としては、ITU-R 勧告 (ITU-R Recommendation) と ITU-R 報告 (ITU-R Report) が代表的である。このうち、ITU-R 勧告については、異なる国・地域間での無線通信に関する国際的な標準化を促進する目的で策定されるものであり、各無線通信業務の利用に関わる技術的なガイドラインや、無線通信システムの標準仕様などをまとめたものである。作業部会が作成した ITU-R の勧告案は、研究委員会での採択の際に、研究委員会の会合に出席している加盟国からの反対がないことを条件に、勧告の承認を求める手続きを ITU の全加盟国に対して実施する手順を踏んでいる。

一方、ITU-R 報告については、無線通信に関する様々

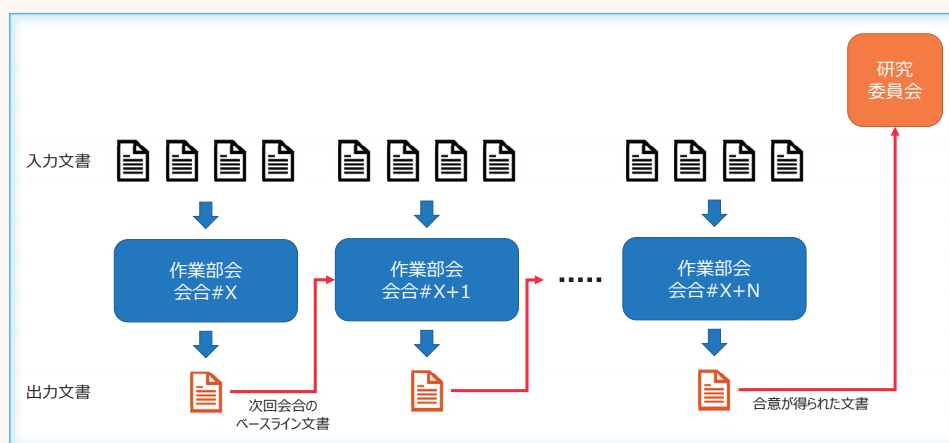


図 2 作業部会における審議の進め方

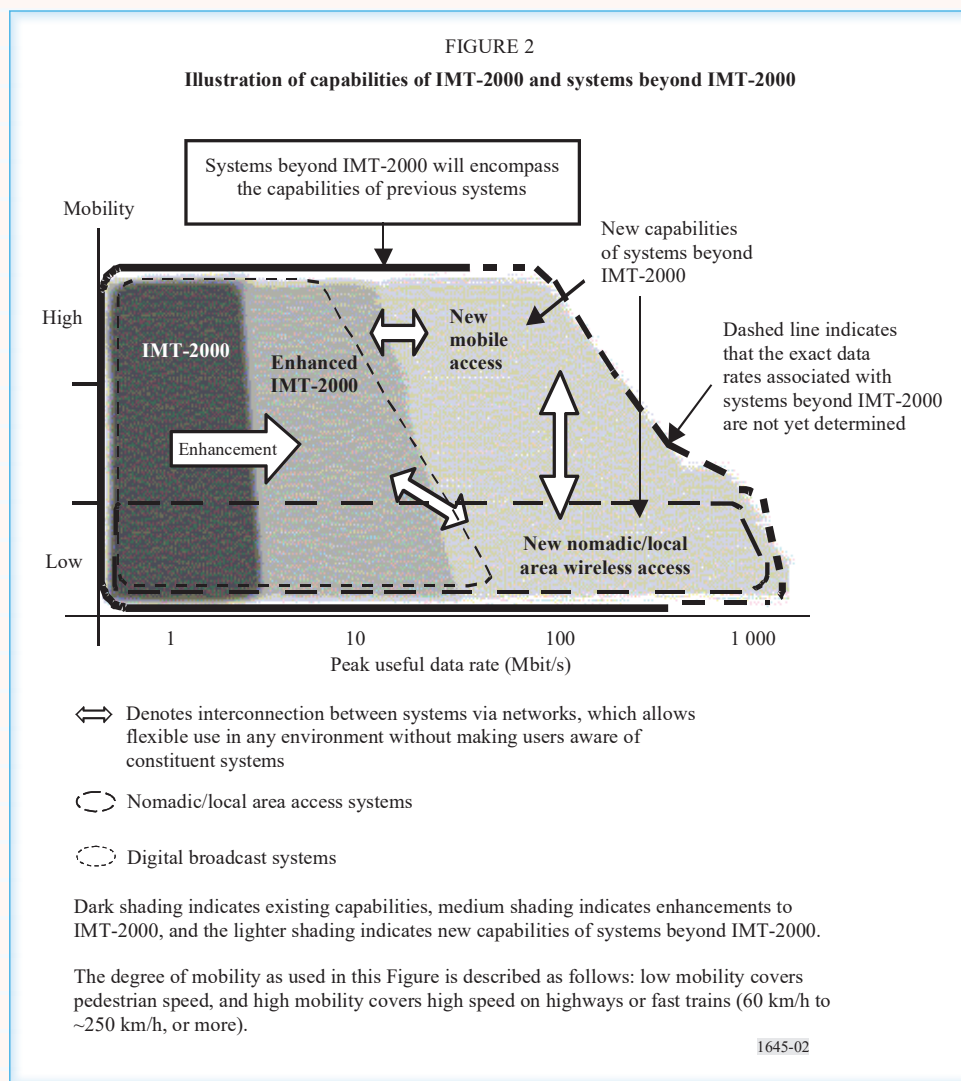


図3 IMT-2000の高度化やその後継システム（IMT-Advanced）が有するべき能力

（出典：ITU-R 勧告 M.1645 の Figure 2）

なトピックに関する検討結果について、その名のとおり、レポートとしてまとめた位置付けのものである。ITU-R 勧告に比較して承認のハードルは低く、研究委員会の会合に出席している加盟国から反対がなければ、その場で承認される。

4

ITU-R における技術標準化の活動

ITU-R における技術標準化の活動として、筆者の専門分野である携帯電話に関連する標準化の取組みを説明する。ここで言う標準化とは、ITU-R 勧告や報告の策定を行う営みを指す。ITU-R では、第3世代以降の携帯電話システムについて、国際的なモバイル通信システムを指し示す用語として、IMT（International Mobile Telecommunications）という呼称を使用しており、Study Group 5 やその傘下の作業部会である Working Party 5D において標準化活動が行われている。

ITU-R において取りまとめられた IMT に関する勧告のうち、度々引用されるものが、IMT の枠組みや目的をまとめた勧告類である。このうち、筆者が社会人として第4世代携帯電話（4G）の研究開発に本格的に従事し始めた頃に策定された勧告が、2003年に発行された ITU-R 勧告 M.1645 である。この勧告は、第3世代携帯電話（3G）の呼称である IMT-2000 について、その高度化や後継システム（IMT-Advanced と呼ばれる）について検討したものであり、図3に示されるヴァンダイアグラムと呼ばれる図面を含んでいる。この図面では、IMT-Advanced が有するべき能力として、端末の高速移動時、低速移動時の最大通信速度として、それぞれ 100 Mbit/s、1 Gbit/s を実現することを表している。その後、4G 携帯電話においてこの目標を実現するための研究開発が進められ、現在では、実際に 4G 携帯電話の商用サービスにおいてこれらの最大通信速度を実現するに至っている。

その後、ITU-R では第5世代携帯電話（5G）を念頭

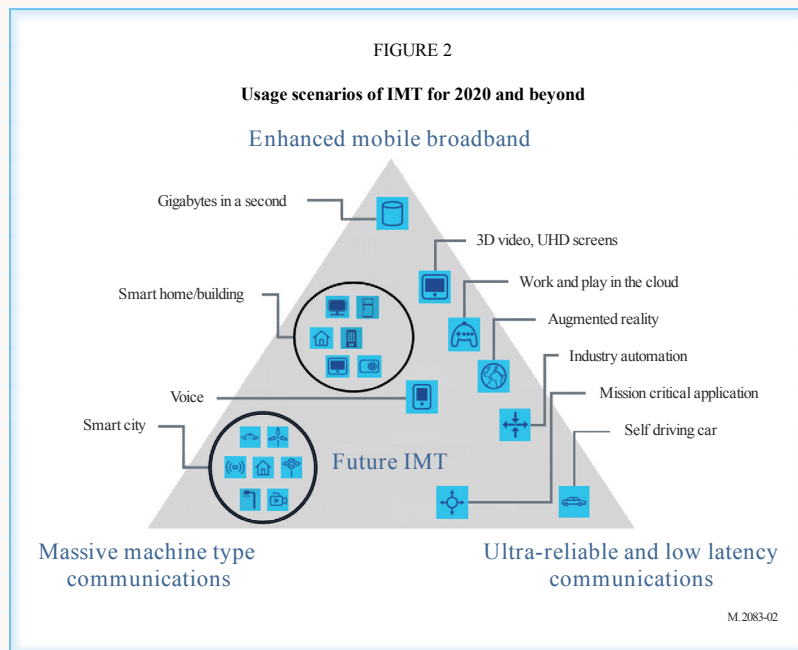


図4 2020年及びそれ以降のIMT (IMT-2020)の利用シナリオ
(出典: ITU-R 勧告 M.2083 の Figure 2)

に、その枠組みや目的をまとめた勧告として、ITU-R 勧告 M.2083 を 2015 年に発行している。この勧告では、図4に示すように、2020 年及びそれ以降の IMT (IMT-2020 と呼ばれる。) の利用シナリオとして、①モバイルブロードバンドの高度化 (eMBB: enhanced Mobile BroadBand), ②マシンタイプ通信の多数接続 (mMTC: massive Machine Type Communications), ③超高信頼・低遅延通信 (URLLC: Ultra-Reliable Low Latency Communications) の三つを挙げている。5G の商用サービスは、モバイルブロードバンドの高度化からスタートしているが、今後は mMTC や URLLC の利

用シナリオの拡大にも、期待が持たれている。

筆者は当時 ITU-R の Working Party 5D における本勧告案の検討作業に深く従事していたが、日本を含め、5G の検討を精力的に行っていた国や研究機関・企業から、5G の利用シナリオやシステムが有すべき能力を示すシンボリックな図面の提案が行われ、調整が行われた。これら細かい議論の調整を経て、本勧告案の作成は、作業計画の策定からおよそ2年の歳月をかけて完成した。

更に、ITU-R ではこれらの IMT-2000 (3G), IMT-Advanced (4G), IMT-2020 (5G) の各世代に相当す

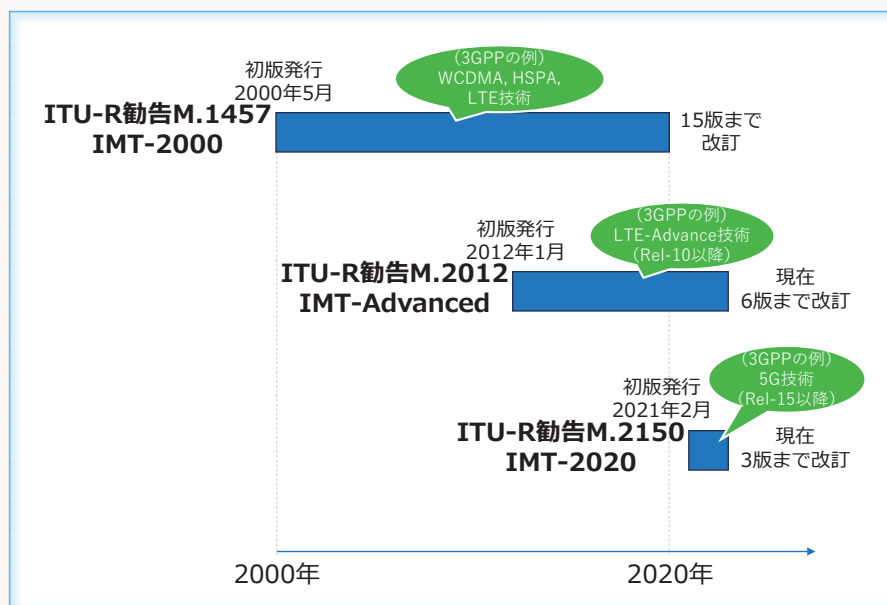


図5 携帯電話の無線通信方式に関わる ITU-R 勧告

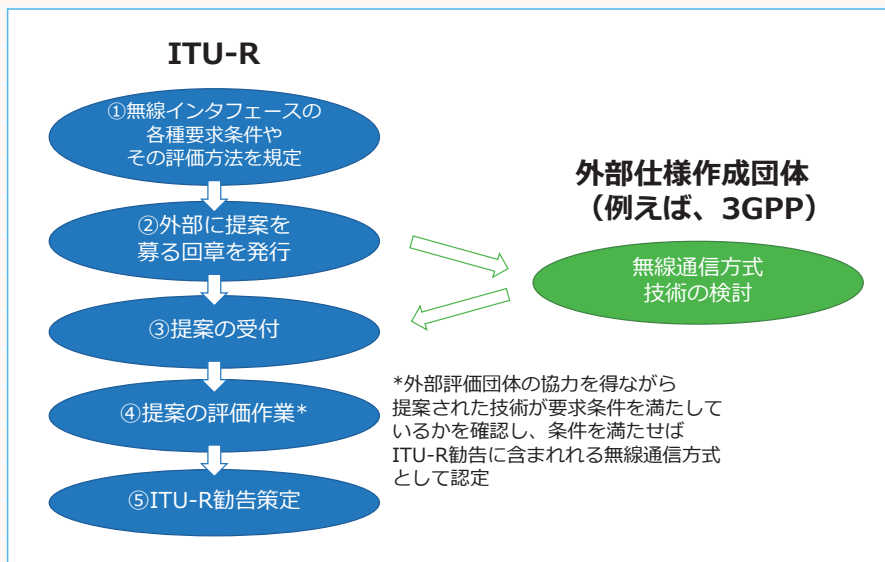


図6 ITU-R と外部仕様作成団体の連携による携帯電話の無線通信方式の国際標準化

る携帯電話の無線通信方式の国際標準仕様として、それぞれ ITU-R 勧告 M.1457, M.2012, M.2150 を策定している (図 5)。

これらの ITU-R 勧告の策定にあたっては、無線通信方式の詳細な標準仕様そのものは、3GPP (3rd Generation Partnership Project) に代表される外部団体で作成された仕様を引用する形とし、Working Party 5D が外部団体からの仕様提案を受け付ける形で勧告を策定している (図 6)。

5G の場合を例に挙げると、ITU-R 勧告 M.2083 でまとめた IMT の利用シナリオを具現化するための技術的な要求条件や評価シナリオを ITU-R が提示し、その提示内容を満たす無線通信方式を外部団体から提案募集する形を取っている。そして、提案された無線通信方式に対して、各国・各地域に設立された第三者の外部評価団体のサポートを受けながら、ITU-R が提示した要求条件を提案された無線通信方式が満たしているかの確認を行う。確認の結果、要求条件を満たした無線通信方式については、IMT の国際標準仕様として採用し、これらを取り入れた ITU-R 勧告 M.2150 を発行している。

携帯電話の詳細な標準仕様を策定している 3GPP は、米国、欧州、日本、韓国、中国、インドにある標準化団体に属する一般企業のメンバ等で構成されているが、その標準仕様を ITU-R 勧告として取り込むことで、ITU 加盟国からの承認を得た国際標準仕様として認知される形を取っている。

ITU-R では、第 6 世代携帯電話 (6G) を念頭に、2030 年及びそれ以降の IMT (「IMT-2030」と呼ぶ) の枠組みや目的をまとめた勧告として、ITU-R 勧告 M.2160 を、2023 年 12 月に既に発行している。本勧告では、図 4 に示した IMT-2020 の三角形の IMT の利

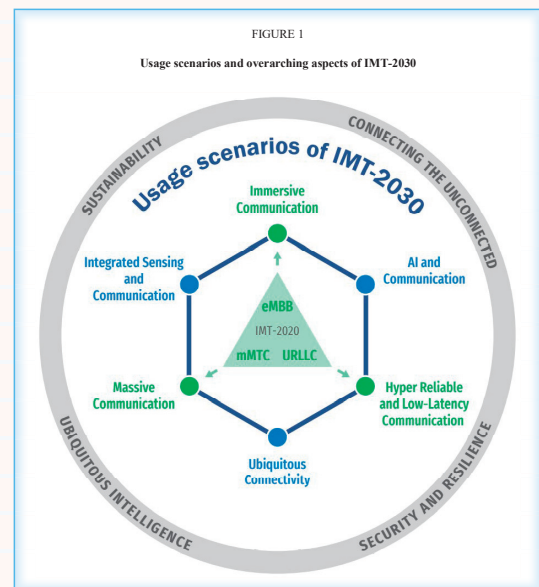


図7 IMT-2030 の利用シナリオ

(出典: ITU-R 勧告 M.2160 の Figure 1)

用シナリオを更に拡大する形で、図 7 に示す IMT-2030 の利用シナリオを示している。

今後 ITU-R では、IMT-2030 の無線通信方式に対する国際標準仕様の策定のため、外部団体に対して提案募集を行い、2030 年頃の ITU-R 勧告の完成を目指して、作業を進める予定となっている。

5

世界無線通信会議の準備に関わる活動

前章までの技術標準化活動に加えて、ITU-R の研究委員会・作業部会の大きな役割の一つが、ITU が主催する世界無線通信会議 (WRC: World Radiocommunication Conference) への準備活動である。

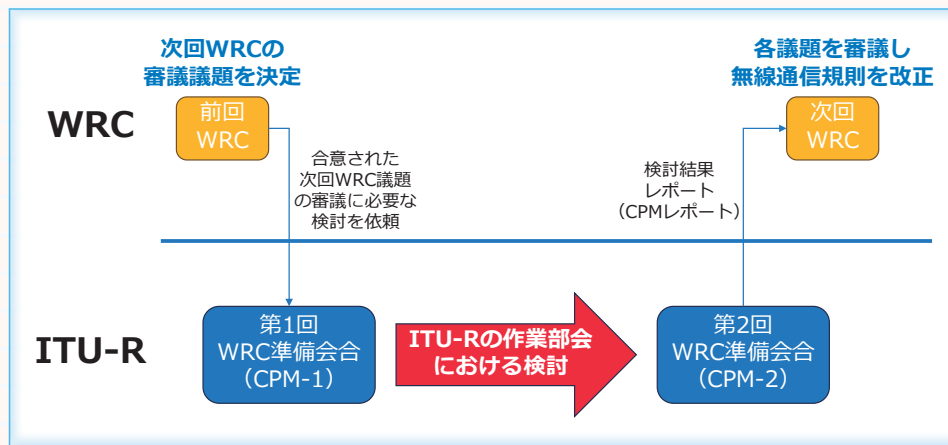


図8 ITU-RにおけるWRCの準備に関わる活動

WRCは、ITUが国際的な法規として発行するITU無線通信規則（RR: Radio Regulations）の改正を審議する会議体であり、3～4年に1回の頻度で4週間にわたって開催される。ITU無線通信規則は、国をまたがった電波の混信を避けるため、周波数の利用方法や無線通信業務の運用に関する規制事項を定めたもので、国際条約の一部として位置付けられている。本条約を批准した国には、法的な拘束力が課されることになる。このような背景もあり、また近年の電波需要の拡大・多様化を反映して、WRCは3,000人以上が参加するITUの中の最大規模で、かつ注目度の高い会合である。直近では、2023年11月20日から12月15日にかけて、アラブ首長国連邦のドバイにおいて開催された。

WRCでは、前回のWRCで決定した議題のスコープに沿って関連するRRの規定を改正するか否かの審議を行う。ここで、WRCの審議に必要な各種検討や、RRの具体的な改正案の検討を行うのが、ITU-Rの作業部会の役割である（図8の下段）。WRCでは次回WRCの審議議題を決定する際に、併せて、ITU-Rに対して必要な技術検討を要請する。次回WRCの開催までには、3～4年の期間があるため、この期間を利用してITU-Rの作業部会を中心に、無線業務間の混信を避けるための技術検討やRRの改正案の検討が行われる。ITU-Rの作業部会における検討の進め方自体は、図2に示した方法と同様であり、入力文書による提案、出力文書の作成という作業を決められた期限までに実施する形で進められる。作業部会で取りまとめられた検討結果は、WRCの約半年前に開催されるITU-RのWRC準備会合（CPM: Conference Preparatory Meeting）で最終化され、CPMLレポートと呼ばれる文書として、WRCに提出される。この際、一連の技術検討結果の詳細については、別途、ITU-R勧告や報告として発行する場合もある。ITU-Rの作業部会によっては、前節で示した技術標準化の活動に比較して、WRCの準備に関わる活

動の比重が増大しているのが昨今の状況である。

6

ITU-Rの標準化活動における経験に基づいて

筆者のこれまでのITU-Rの標準化活動での経験を踏まえて、標準化活動に従事する上での幾つかのポイントを書き記したいと思う。

6.1 知識と経験

継続的に標準化会合へ参加し、知識と経験を積み重ねていくことが、標準化活動を進めていく上での最大の武器になると考えている。その意味では、自身が所属する組織からの継続的なサポートを得ることが大切となる。逆にサポートを得るためには、自身の活動を「見える化」し、上流工程である標準化活動の成果を、下流工程のビジネスの営み等につなげていくという貢献意識・目的意識を持つことが重要である。

また、知識と経験をより効果的・効率的に積み重ねていくためには、標準化会合に対する自身の参加姿勢や様々な会合参加者との交流について、より前向きかつ積極的な気持ちで取り組んでいくことが必要である。

6.2 英語スキル

会合に前向きに参加していくためには、一定程度の英語スキルは磨いていった方がよい。表3に、標準化会合の場面で必要となるスキルを簡単にまとめる。

標準化会合に参加する場合、自らの提案がなければ、会合への参加姿勢も受け身になってしまいがちである。そのため、入力文書の作成（Writing）に積極的にチャレンジしていくことをお勧めする。その際には、過去の検討の経緯を踏まえることや、よく使われている専門用語や言い回しを利用することで、ほかの会合参加者の理解も得られやすくなるため、出力文書を分析（Reading）

表3 標準化会合における英語スキル

スキル	場面
Listening	他の会合参加者のプレゼンテーションや会合での議論を理解する
Speaking	会合において、自身の提案や主張を説明する
Reading	入力文書や出力文書の内容を理解する
Writing	入力文書の作成や、出力文書のための提案テキストを作成する

することも重要である。

一方、Listening と Speaking については、日本国内の日本語だけの日常生活ではなかなか伸ばしていけない部分があるのも事実である。やはり会合に継続的に参加し、Listening に必要な耳を慣らすことも重要である。ほかの会合参加者が頻繁に使う主張が頭の中に入っていれば、英語を全部を聴き取れない場合でも、内容を補完することも可能となる。また、Speaking についても、会合に継続的に参加し場数を踏むことが重要である。更に、会合の会議時間だけでなく、休憩時間やランチ・ディナーの時間も利用して、ほかの会合参加者との交流を図っていくことが大切である。

6.3 アウトプットスキル

標準化の結果・成果は、出力文書に反映される。出力文書の作成にいかにか自身が介在し、提案や主張を盛り込んでいけるかが重要となる。その過程では、自身の主張を、論理的かつ建設的に行うことが鍵となる。この能力については、英語スキルというよりも、自身の思考に依存するものである。

更に、自身の主張のみを押し付けるだけでなく、相手の主張の論点もくみ取って、合意できる妥協点を探っていくことも必要となる。ITU の会合では、合意できる解決法は、「会合参加者の全員が平等に幸せ／不幸せな状態にすることである」(everyone is equally happy and equally unhappy) とよく言われている。

会合参加者として散々ディベートをしたが、会合期間中に何も出力文書を作成できなかったという事態は、次の会合における議論への進展がないため望ましくない。何をアウトプットするかということを念頭において、議論を進めていく必要がある。

6.4 ITU-R における議論の特徴

ITU-R の標準化会合には、ITU-R にメンバー登録した一般企業等の所属としての参加も可能であるが、通常は加盟国（政府）の立場で参加しているケースが多い。日

本の場合は、電波利用や周波数管理の役割を担う主管庁である総務省の承認を得た形で、日本（Japan）として参加することになる。他国でも同様な状況が多く、各国の主管庁や各企業からの会合参加者が、その国を代表する立場で参加している。その意味では、国としての利害・主張が展開される場面もあり、その点をくみ取って、お互いを尊重した議論が重要となる。

また ITU-R の研究委員会以下の会合では、全ての ITU 加盟国からの会合参加者が常時出席している状況ではないものの、欧州、ロシア、アフリカ、中東、米州、アジア・太平洋州の各地域から、様々な状況を有する国から参加しているため、幅広い国の提案・主張を踏まえた出力文書を作成していく必要がある。出力文書の作成に当たっては、できるだけ一般的・中立的な表現とすることや、断定的な表現を避けるなどの工夫が、会合参加者の合意を得る上で必要となってくる。

以上のように ITU-R の標準化議論では、全てを技術的な議論に基づいて明確化を図ればよいというわけではなく、場合によっては文書表現上、若干の曖昧さを残した上で、合意を図る等の対応もしていく必要がある。

7 おわりに

これまでの筆者の経験に基づいて、ITU-R における標準化の概要について説明を行った。新型コロナウイルスの流行で各国に渡航制限があった時期には、電子的な会議による会合も開催したが、やはり会合参加者同士の意思疎通がうまくいかず、議論の進捗が芳しくなかった。対面での物理会合が全面的に再開し、その大切さを改めて認識している次第である。

本記事により、標準化の活動に興味を持って頂き、参加してみようという方が少しでも増えることを願っている。私自身も、ITU-R の標準化活動に従事する方々の裾野を広げるべく、人材の育成や指導にも力を入れていると考えている。

新 博行（正員）

（株）NTTドコモ入社後、第4世代携帯電話の無線アクセス方式の研究に従事した後、2006 から ITU-R を中心に、国際標準化活動に継続的に従事。2015～2023 まで、ITU-R Study Group 5 の副議長を務めた。



3GPP における 標準化活動と経験談

鈴木秀俊 Hidetoshi Suzuki パナソニックホールディングス株式会社

1 まえがき

移動通信の標準化が議論されている 3GPP (3rd Generation Partnership Project) は、2023 年 12 月に 25 周年を迎えた。3GPP の物理層の標準化に 1999 年から 3G, 4G, 5G と 3 世代にわたって関わってきた。様々な提案が合意できたり、合意できなかったりという経験を通して、3GPP Excellence Award として表彰を頂くこともできた。それらの経験について記載する。

2 移動通信の標準化

3GPP は、日本 の ARIB (Association of Radio Industries and Businesses, 電波産業会) や TTC (Telecommunication Technology Committee, 情報通信技術委員会) を含め、表 1 の標準化機関の協調により移動通信の仕様 (TS: Technical Specification) や報告書 (TR: Technical Report) を作成する。最終的な標準仕様は、3GPP の成果物を基に、各国・各地域の標準化機関からの発行となる。名前に含むように 3G (第 3 世代移動通信) の標準化のために組織された団体

であるが、その後も名前の変更をせずに、4G, 5G の標準化を行ってきており、6G の標準化にもコミットしている⁽¹⁾。

移動通信の世代と標準化の年表を図 1 に示す。大まかには 3G が 2000 年代、4G が 2010 年代、5G が 2020 年代であり、その 2~3 年前に標準化を行ってきている。10 年ごとの 3G, 4G, 5G という世代に対して、中間的なスケジュールで、3G W-CDMA には、HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access)/HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) でパケットの高速化、4G LTE には、LTE advanced としてキャリアアグリ

表 1 各国・各地域の標準化機関

ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
CCSA	China Communications Standards Association
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
TSDSI	Telecommunications Standards Development Society, India
TTA	Telecommunications Technology Association

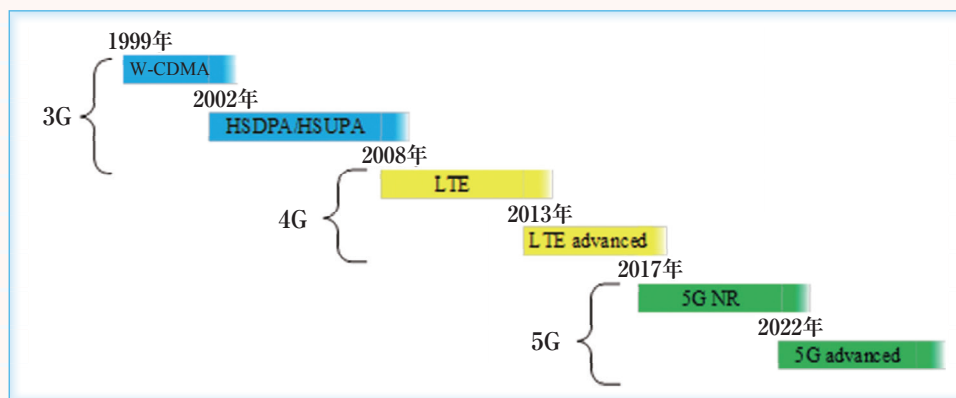


図 1 移動通信の各世代と標準化

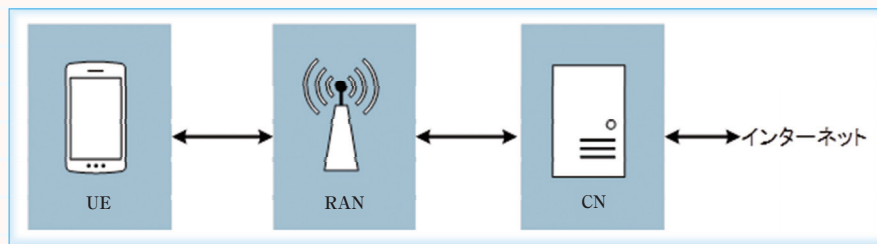


図2 移動通信のネットワークの構成

ゲーション（複数の無線キャリアを合わせて高速化）、eMTC（enhanced Machine Type Communication）、NB-IoT（Narrow Band-IoT）、セルラ V2X、5G NR（New Radio）には、NTN（Non Terrestrial Network、衛星など地上系以外の通信）などの大きな機能が追加されてきている。

3GPPでは、Release という「単位」で機能の標準化を行ってきている。近年では、15～18 か月を一つの Release のスケジュールとすることが多い。3G の標準化の初期は西暦の下 2 桁から Release 99 という名前を付けたが、それ以降は Release 4、Release 5 と数字を繰り返す形で Release 名を付けている。2023 年 9 月に Release 18 の物理層の標準化を終えたところである。Release 99 が 3G W-CDMA、Release 8 が LTE の初期リリース、Release 15 が 5G NR の初期リリースである。Release 18 が 5G advanced の初期リリースとなる。

移動通信のネットワークの構成を図 2 に示す。3GPP での標準化範囲は、UE（User Equipment）と呼ばれる端末と基地局間のインタフェースのみではなく、基地局を含む無線方式固有のネットワーク部分である RAN（Radio Access Network）、アクセス管理や複数の無線方式間の連携など全体として移動通信を実現する CN（Core Network）を含む。3GPP では、全体のアーキテクチャやサービスを規定する TSG SA（Technical Specification Group Service and System Aspects）、RAN を標準化する TSG RAN（Technical Specification Group Radio Access Network）、CN を主に標準化する TSG CN（Technical Specification Group Core Networks and Terminals）に分かれて標準化が進められており、2023 年 9 月時点で、全体で 1,800 弱の仕様が作られてきている⁽²⁾。更に TSG RAN の中には物理層の RAN WG 1、プロトコル及び RAN アーキテクチャの RAN WG 2、基地局間インタフェースを含む RAN WG 3、無線及び性能仕様の RAN WG 4、端末適合試験などの RAN WG 5 と分かれて標準化が行われている。筆者は主に物理層の RAN WG 1 に参加してきている。

3

3G W-CDMAでの標準化経験

3G W-CDMA での標準化は、3GPP という組織の運営方法や標準化仕様の作成方法も含めての標準化であった。何を仕様とし、何を実装依存とすべきという度合いについてや、完成したと思われる仕様であっても不具合や複数の解釈が存在し得る部分を CR（Change Request）手順により更に修正していく、という手順の確立なども含めての標準化であった。なお、CR 手順により修正される量は膨大な数であり、3GPP 全体で 2022 年には 14,712 件であり、2023 年には 18,000 件弱と推定されている⁽²⁾。

この頃の RAN WG 1 での会合当りの寄書数は、300 件程度で、近年の 2,000 件超の寄書数に比べると非常に少なかった。

筆者は、3G W-CDMA の端末において、移動通信の物理層のどの部分をハードウェアにして高性能化・低消費電力化し、どの部分をソフトウェアにして柔軟性を確保するかという設計や、実装上必要となる意図的に規定しない部分の把握などのために、1999 年 4 月に日本の新横浜で開催された第 4 回の RAN WG 1 会合から参加した。

3G W-CDMA で行った提案の一つに、端末での受信軟判定値を保持するバッファサイズがある⁽³⁾。このバッファサイズは、HSDPA/HSUPA 以降では、HARQ（Hybrid Automatic Repeat Request）バッファに相当し、端末チップ面積の主要な部分となる。このバッファサイズに関して、無線方式観点と端末実装観点という異なる観点からの白熱した議論があった。W-CDMA では、10、20、40、80 ms のインターリーブ長が規定されている。無線方式観点からは、端末の対応最大ビットレートにおいても最大インターリーブ長に対応しフェージングに対する耐性を改善することが望ましい。端末コスト観点からは、最大ビットレートでは、通信遅延からの現実的な短いインターリーブ長までの対応にすることでチップ面積を削減することが望ましい。この二つのバランスを見いだすことが、性能とコストのバランスから必要になる。

筆者は端末実装観点から参加し、無線方式観点からのネットワーク側の参加者、ほかの端末側の参加者らと妥協点を見つけ出す議論を、連日朝から晩まで行った。当時は、無線方式の専門家に比べて、端末の低コスト化や低消費電力のための背景知識を持った参加者が少なかったことと、自分自身の英語力の不足から、提案をほかの参加者に理解してもらうことが非常に困難であった。最終的に、端末での受信軟判定値を保持するバッファサイズをビットレート の 6.6 倍という端末実装観点からも納得できる合意を得ることができ、それが仕様書に記載されたときには大きな充実感があつた。この経験を通して異なった視点からバランスの取れた提案をすることが大事だと学んだ。現在の 5G 端末での HARQ バッファに比べると、当時の 384 kbit/s のビットレートに対する受信軟判定値を保持するバッファは非常に小さなサイズになっており、20 年強の半導体技術の進歩が、無線方式の設計に大きな影響を与えているとも感じる。

当時、出張前に寄書を 100 部ほど印刷し、紛失しないように機内持込みにして会議で紙で配布したり、フロッピーディスクで会議の資料を配布したりしたことと比べると、近年は会議中の新規寄書が瞬時に共有サーバやオンライン会議で共有でき、会議の効率化ができている。

英語に関しては、標準化固有の「shall」や「should」の使い分けなどはこの頃に学んだ。雑談などに関しては、自分はいまだに英語力の不足を感じている。

4 HSDPA, HSUPAでの標準化経験

3.5G とも呼ばれる HSDPA, HSUPA では、良いフェージング条件時に、端末に無線リソースを割り当てる基地局のスケジューリング動作を導入することで、フェージングに対していかに耐性を持たせるかという方式設計から、フェージングをいかに活用するかという方式となった。

行った提案の一つに、端末カテゴリーの標準化がある。3G W-CDMA では、上位レイヤのインタフェースでのデータサイズ、誤り訂正符号化前や符号化後のデータサイズなど、物理レイヤの各処理で対応可能なビット数を、個々に端末はネットワークに通知する。それらの数値は、384 kbit/s class といった形で例示はあるが、制限はなかった。端末設計の自由度は高いが、端末間が大きく異なったパラメータの場合、ネットワーク側としては、端末実機とのテスト労力の観点から、端末間の最大公約数的なパラメータを選んで、テストをして、運営せざるを得なくなり、端末の能力がフルに用いられないことがあるという課題があつた。HSDPA, HSUPA の

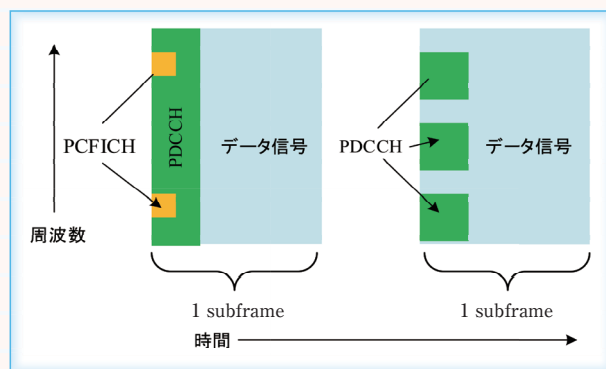


図3 下り物理層制御信号の構成

標準化では、端末カテゴリーとして、上位レイヤとのインタフェースでのデータサイズをネットワークに通知し、物理レイヤの各処理で所要ビット数をそこから規定する形を提案した⁽⁴⁾。このことで端末種類の増加による組合せの増大を防ぐことができるようになった。この考え方は、LTE においても端末カテゴリーに適用されたが、5G NR においては、URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency) といった信頼度の高いサービスへの対応から、上位レイヤのインタフェースでのデータサイズのみでの端末カテゴリー分類では、困難となった。必要なサービスの信頼度によって、通信の冗長度を増したりという物理層の複雑さが異なるため、5G NR においては端末からネットワークに個々のパラメータを通知する形式となっている。端末設計の自由度は再び増しているが、端末の能力をフルに用いられないことがあるという課題も再現していると思うので、利用ユースケースと端末能力の関連付けを規定することなどが有効ではないかと思う。

5 4G LTE での標準化経験

4G LTE では、無線アクセス方式が CDMA (Code Division Multiple Access) から OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) となった。

下りや上りのデータを転送するチャネルの無線リソースを指示する下り物理層制御信号 (PDCCH: Physical Downlink Control Channel) の復号のためには、PDCCH の利用シンボル数を PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) という信号で通知し、その情報を基に、OFDM 帯域全体を用いて伝送される PDCCH を復号する (図3 左側)。PCFICH を導入せずに、周波数軸上で分散配置された事前設定済みの無線リソースを直接復号することで、PDCCH が利用するリソース量を可変にする方式⁽⁵⁾ (図3 右側) を提案した。PCFICH の信頼度に依存せずに PDCCH を復号でき、シンプルになると主張したが、PDCCH はデータ

信号の前に存在するという事前の仮合意 (working assumption) に完全に一致していないとして、LTE の下り制御信号としては合意されなかった。PCFICH の信頼度は、その後の LTE のシステム拡張上、たびたび問題となり、提案した構成は個別参照信号 (DMRS: Demodulation Reference Signal) による下り制御信号で、空間的に MIMO (Multiple Input Multiple Output) など多重する構成や、広帯域のシステムに適しており、LTE advanced での拡張下り制御信号 EPDCCH (Enhanced PDCCH) や NR での下り制御信号 (PDCCH) では、適用されている。合意されなかった考え方であっても、適用条件などの変更により将来、標準化に適用されることがあるので、方式的に正しいと思うものを提案していくことが大切であると思う。また仮合意であっても、微妙な記載の違いが、後の合意に影響するので注意することも大事である。

3GPP での決定は、非公式な手段として挙手で多数を確認することはあっても、極力、合意形成をもって進めており、これは 3GPP Working Procedure にも規定⁽⁶⁾している。そのため、提案が通るための努力を行っても、最終的にはほかの参加者の合意を取らなくてはならないため、様々な理由で合意されないことは多い。時期尚早だったり、複雑過ぎだったり、効果のあるシーンが限られていたりなどである。野球やサッカーのトッププレーヤでも打率やシュート成功率が半分を超えることはないの、提案が通らず、ほかの案になったとしても、合意された案に対する改善や改良や、自案のエッセンスをどう組み込むかを考えるなどで気分を切り換えて、次に進めていくことが大事なことなのではと思っている。特に、移動機対ネットワークの機能分担や、どこまでの性能や複雑さを入れるかといったトレードオフに対しては絶対的な正解はなく、そのときの情勢などにもよって変化していくものなので、多数の意見を用いて決定していくしかない面があるのではと思っている。

また、合意形成をもって進めるという 3GPP の進め方のため、端末メーカ、チップセットメーカ、ネットワークベンダ、ネットワーク運営者、利用するユーザといった多くの関係者が、共にメリットがあるような提案を行うことが必要となる。会合中においても、自分が元々持っていた案とは異なっている、対立した複数の意見を考慮して全体が満足できるような協調的な提案を行うことが必要であり、そういった提案を行うことが、長期的には他参加者からも信頼を得ることに通じるのでは、と考えている。

6 LTE advancedでの標準化経験

LTE advanced では、キャリアアグリゲーション、eMTC、NB-IoT、セルラ V2X といった技術が標準化された。

LTE で合意を得られなかった機能が、5G NR で用いられている例として、PDCCH の構成を 5. に記載したが、LTE advanced においても、議論されたが合意を得られなかった機能や、LTE advanced で導入された機能が NR にて、更に改良された形で用いられていることは多い。Dual Connectivity は複数の基地局に端末が同時接続する技術であるが、その考え方が 5G NR での NSA (Non-Standalone) となっている。また LTE advanced での New Carrier Type として提案し議論された、共通参照信号 (CRS: Common Reference Signal) を持たず、個別参照信号のみによる考え方⁽⁷⁾や、セグメントとして周波数帯域の一部を用いる考え方⁽⁸⁾は、NR の基本骨格ともなっている。

LTE advanced では、前述の拡張下り制御信号 EPDCCH の標準化を通して、3GPP Excellence Award を受賞することもできた (図 4)。

IoT (Internet of Things) 向けとして、3GPP には NB-IoT と eMTC の二つが存在する。NB-IoT は、3GPP 内の GSM の標準化を行っていた組織で初期検討が行われてきた。他方、eMTC は LTE の標準化を行ってきた TSG RAN で初期検討が行われてきた。共に低コストかつ広域カバレッジを意図している。eMTC に比べて NB-IoT は、2G システムである GSM からの延長ということで、より狭帯域で低コスト化を意図したシステム設計をしている。

eMTC はフェージングに追従してスケジューリングが可能な LTE より近い動作のモード A と、広域カバレッジのための繰返し送信を多用したモード B がある⁽⁹⁾。eMTC での広域カバレッジを意図して検討してきた動作と、NB-IoT の動作の共通化により、標準化に要する



図 4 3GPP Excellence Award の受賞

期間の短縮やLTEとの親和性をNB-IoTを入れることを提案した⁽¹⁰⁾。公式には合意はしていないが、提案した方向で標準化が進んだと考えている。

7 5G NRでの標準化経験

5Gでは従来型のトラヒックであるeMBB (enhanced Mobile Broadband)に加えて、高信頼度低遅延なトラヒックであるURLLCがサポートされている。また、共通参照信号などの常時送信信号が、将来、新規機能を拡張するときに問題になるというLTE標準化の経験を生かして、常時送信信号を減らす思想で無線方式が設計されている。

同じ物理層のRAN WG 1 会合の中であっても、より短い時間でより専門化した議論を行うため、複数の議論(セッション)が同時に行われることがほとんどである。5G NRの基本構造の標準化では、参照信号やMIMOの議論を行うセッション、データや制御信号の無線リソース割当の議論を行うセッション、誤り訂正の方式のセッションなどである。極力、依存関係がない議論を同時に行うように議長がスケジュールを調整するが、議論の内容によっては異なったセッション間の合意が矛盾した状況になることもある。そのような矛盾を、その後の議論で整合をとった例を紹介する。

移動機の受信動作では、まず参照信号により無線チャネル推定が行われ、その後、復調、誤り訂正といった処理が行われる。参照信号やMIMOの議論を行うセッションでは、復調時間を短くするため、参照信号を割り当リソースの先頭に配置することや、移動速度などに応じて柔軟な参照信号数に対応することが決まった。他方、データや制御信号の無線リソース割当の議論を行うセッションでは、単純化のためリソース割当方式に依存せず参照信号の位置は一定という合意と、広帯域な無線リソースを有効に利用するために、PDCCHとデータ信号とを同一OFDMシンボル上に多重できるという合意がなされた。リソースの先頭に制御信号とデータ信号を配置しながら、データ復調用の参照信号も先頭に配置することは困難で、かつPDCCH配置時と非配置時では参照信号の配置も異ならざるを得ない、という異なったセッション間の矛盾を指摘して議論⁽¹¹⁾し、最終的には、図5に記載のとおり、スロットスケジューリングと呼ばれるeMBBを主要用途としたリソース割当タイプAと、ミニスロットスケジューリングと呼ばれる、URLLCを主要用途としたリソース割当タイプBが合意された。

異なったセッション間、異なったWG間、異なったTSG間などでそれぞれ異なった専門分野の参加者間で

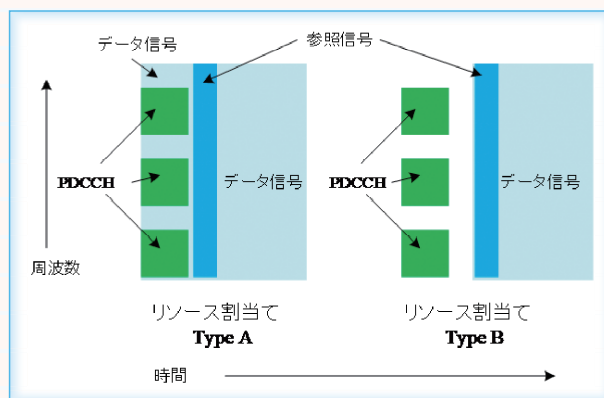


図5 異なったリソース割当て

議論が同時に進められるため、自分が参加していない会議の決定事項なども考慮して、全体として整合が取れるように移動通信システムを標準化していくことが必要となる。

8 COVID-19 環境下での標準化経験

COVID-19以前は、活発なe-mail議論や電話会議は行われたとしても、何らかの決定に関しては、対面会議のみであった。しかし、COVID-19をきっかけにオンラインでの公式会議も開催されるようになった。Release 17の標準化はほとんどがオンラインで行われ、Release 17の終盤の2022年8月に、COVID-19後の初の対面でのRAN WG 1 会合がフランスで行われた。声と文字のみで議論をしてきて、初めて顔を見ることができた参加者もあり、新鮮であった。対面会議では、相手の表情などからどれくらい強く主張しているのかなどを読み取ることができたり、参加者全体からのプレッシャーや廊下などでの非公式な会話などから合意や妥協が取れやすかったりということがあり、対面会議での効率性があると感じる。

9 5G advancedでの標準化経験

現在、3GPPでは5G advancedの標準化が行われている。その中で無線区間インタフェースに係るAI/ML (Artificial Intelligence/Machine Learning)の標準化が進んでいる。このAI/MLの標準化を例として、3GPPでの標準化がどのようなステップで進められるかを説明する。

ネットワーク内部でのAI/MLの標準化は以前から標準化されてきていた。他方、端末にAI/MLを搭載する無線区間インタフェースに係るAI/MLの標準化を行おうという提案が、Release 18のworkshopで各社から提案された⁽¹²⁾。どの内容を、どのようなスケジュー

ルで標準化するかは、TSG RAN でほかの標準化項目との議論時間の配分を考慮しながら、Work Item または Study Item Description として決定される。Study Item では実現可能性などを検討し、Work Item は実際の標準化を行う。

無線区間インタフェースに関する AI/ML に関しては、実現可能性からの検討が必要なため、Release 18 では Study Item とすることが決まった⁽¹³⁾。どのような端末とネットワークの協調レベルがあるかなどのフレームワーク議論のほかに、具体的なユースケースとして、以下が選ばれた。

- ・ 端末からの電波環境の報告への AI/ML の適用
- ・ ビームの推定などのビーム管理への AI/ML の適用
- ・ 位置情報推定への AI/ML の適用

RAN WG 1 では、従来の無線通信と比べて、AI/ML の適用は、以下のような点が議論された。

・ 大量のデータを用いた学習から従来よりも効率良く電波環境の報告やビーム推定、位置情報の推定が可能である。

・ 様々な移動速度や基地局のアンテナなどの異なった学習データに対して汎用化させた AI/ML のモデルを用いるか、若しくは固有の状況に応じた AI/ML モデルを、ネットワークや端末が選択するといったシステム設計上の選択肢が存在する。固有の AI/ML モデルの方がシンプルな AI/ML モデルで性能が高い可能性があるが、どの条件や環境でその AI/ML モデルを用いるという選択が難しく、正しい AI/ML モデル選択のためにネットワーク側の固有情報などを端末と共有する必要がある。

・ AI/ML モデルとしては、具体的なパラメータやモデル構造による物理モデルのほかに、入出力関係などから定義される論理モデルがあり得る。

上記の議論結果は、Technical Report 38.843⁽¹⁴⁾ としてまとめられた。

AI/ML モデルには、従来の 3GPP での規定や制御するパラメータのほかに、ネットワークや端末の実装状況を含んだ条件・状況が学習される。それらのパラメータや条件・状況をどこまで一致させないと、その学習させた AI/ML モデルが活用できないのかといった点は、今後議論や検討が続くのではないかと考える。他方、特定のセルなどの条件に応じた特定の AI/ML モデルという考え方は大きな将来性があると考えている。

Release 18 での Study item の結果を受けて、Release 19 workshop⁽¹⁵⁾ では AI/ML の実際の標準化を行おうという提案がなされ、2023 年 12 月の TSG RAN において、Release 19 にどのような標準化内容を行うかが決定された⁽¹⁶⁾。

10 まとめ

3G, 4G, 5G と 3 世代の標準化に関わってきた経験を通して学んだことを記載した。本記事が標準化への活発な参加に貢献できればと考える。

また各会合などで公私ともにお世話になった方々にこの場を借りてお礼を申し上げたい。

文献

- (1) <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/partner-pr-6g>
- (2) RP-231514, “MCC support team report,” ETSI MCC, Sept. 2023.
- (3) R1-01-0178, “Downlink rate matching limitation,” 3GPP TSG RAN WG1, Jan. 2001.
- (4) R1-02-0169, “HSDPA UE capability,” Panasonic, Jan. 2002.
- (5) R1-070930, “Downlink L1/L2 control signaling: multiplexing, configuration and logical receiver model,” Panasonic, Feb. 2007.
- (6) 3GPP Working Procedures. https://www.3gpp.org/ftp/Information/Working_Procedures/3GPP_WP.htm
- (7) R1-113804, “Channels and signals for additional carrier type,” Panasonic, Nov. 2011.
- (8) R1-130786, “Way Forward on synchronized carrier and segment,” Panasonic, KDDI, AT&T, Qualcomm, Motorola Mobility, New Postcom, Interdigital, Jan. 2013.
- (9) R1-154830, “Draft WF on coverage enhancement level & coverage enhancement mode & repetitions,” Sony, LG, Panasonic, Aug. 2015.
- (10) R1-155776, “Commonality design between eMTC and NB-IoT,” Panasonic, Oct. 2015.
- (11) R1-1711681, “WF on the structure of a data channel including DMRS,” Panasonic, OPPO, DOCOMO, June 2017.
- (12) RWS-210659, “Summary of RAN Rel-18 workshop,” RAN chair, June 2021.
- (13) RP-221348, “Study on artificial intelligence (AI) / machine learning (ML) for NR air interface,” Qualcomm, June 2022.
- (14) TR 38.843 “Study on artificial intelligence (AI) / machine learning (ML) for NR air interface.”
- (15) RWS-230488, “RAN chair's summary of Rel-19 workshop,” RAN chair, June 2023.
- (16) RP-232745, “Summary for RAN Rel-19 package: RAN1/2/3-led,” RAN chair, Dec. 2023.

鈴木秀俊

1992 東北大・工・電気卒。同年松下通信工業株式会社入社。以来、音声符号化向け DSP の開発、移動通信無線アクセス技術の研究・開発。3GPP では Rapporteur 等を務め、2012 に 3GPP Excellence Award 受賞。現在、パナソニックホールディングス株式会社上級主幹技師。



IEEE 802.11ac 標準化の舞台裏

浅井裕介 Yusuke Asai NTT
鷹取泰司 Yasushi Takatori NTT

1 はじめに

本稿では、2013年に完成した5 GHz帯無線LAN規格IEEE 802.11ac⁽¹⁾の標準化に携わった筆者の標準化活動及び国内制度化活動の概要、並びに得られた知見を紹介する。本稿が今後標準化活動を行う本会会員の一助になれば幸いである。

2 IEEE 802.11 WGの標準化プロセス

IEEE 802.11 WG (Working Group) (以下、IEEE 802.11を802.11と略記する。)は、IEEEの標準化部門(SA: Standard Association)配下の無線LAN標準規格を策定する組織である。802.11 WGにおける新たな標準規格の策定には、所定のプロセスを経る必要がある。以下にその概要を紹介する。なお、より詳細な内容を把握したい場合は、既存文献^{(2), (3)}を参照されたい。

2.1 Task Group (TG) 立ち上げまでのプロセス

初めに、802.11 WG配下で将来に向けた議論を行うWNG SC (Wireless Next Generation Standing Committee)において、技術面・ユースケース面等の観点で新たな標準規格の必要性に関する議論を行う。ある程度賛同者が集まったタイミングで有志がSG (Study Group)の設立を発議し、802.11 WG内で承認されれば活動が開始される。

SGは標準規格を策定するTG (Task Group)の設立を目的とする。その準備として、PAR (Project Authorization Request) 及びCSD (Criteria for Standards Development)と呼ばれるテンプレート文書に、新たな標準規格を策定する意義、技術スコープ、実現性等についてのもくろみとその妥当性を取りまとめる。PAR/CSD文書が作成され802.11 WG及び上部組

織であるNesCom (New Standard Committee)において承認されると、TGとしての活動が認められる。SG立ち上げからTG立ち上げまでの所要期間は通常1年から1年半程度である。

2.2 TG 立ち上げ後のプロセス

TGのミッションは、前述のPAR/CSD文書に記載したスコープ・目標性能を満足する標準規格(技術仕様)を策定することである。標準規格策定に当たっては、まず規格書案となるドラフトを作成する必要があるものの、ドラフト作成までのプロセスはTGが決めてよいこととなっている。一般的には、TG設立後初期の段階では、ドラフト策定に向けた技術選定プロセスや標準規格策定に必要となる要求機能一覧・ユースケース・技術の性能評価手法等について議論を行い整理する。その上で、参加者から候補技術の提案を広く受け付け、時間を掛けて議論を行い、採用の合意が取れた技術を技術骨子としてSF (Specification Framework) 文書に都度追加する。SF文書が十分な完成度となったことを確認した段階で、これを基にドラフト初版を作成する⁽³⁾。

ドラフトの初版が完成した後は、802.11 WGの所定のプロセスに則る。初めに、ドラフト初版に対して802.11 WG内でドラフトをレビューする投票(LB: Letter Ballotと呼ばれる)が行われ、投票権を持つメンバ (ITU-R*¹や3GPP*²とは異なり、802.11 WGでは投票権が国や企業ではなく、個人に帰属することが特徴である。)一人一人がドラフトをレビューし、内容の支持/不支持、修正すべき内容をコメントとして入力する。基本的にドラフト初版がそのまま承認されること

* 1 ITU Radiocommunication Sector,
<https://www.itu.int/en/ITU-R/Pages/default.aspx>

* 2 3rd Generation Partnership Project,
<https://www.3gpp.org/>

はなく、コメントを解決 (comment resolution) してドラフト第二版を作成し、再度 LB を行い新たに付加されたコメントを解決し……というプロセスを繰り返すことで、ドラフトの完成度を高める。LB を繰り返して支持率が十分高くなった段階で、(手続き上は 75 % の支持率が最低条件となっているが、慣例として 90 % を超える支持率が目安とされている。) SB (Sponsor Ballot) のフェーズに移行し、IEEE-SA (IEEE Standard Association) 配下での投票が行われる。SB も LB 同様繰り返し行われる。SB において新たなコメントが付加されなくなった段階で IEEE-SA 配下の RevCom (Standard Review Committee) で審議され、問題がなければ標準規格として承認される。SG 立ち上げから標準規格化が完了するまでの所要期間は、伝送速度高速化に関わるメインストリーム規格であれば、802.11n/ac/ax の実績からおおむね 5 年程度である。

3 TGac における活動

本章では、TGac における著者の活動について概説を行う。802.11ac 規格の技術内容の詳細については既存文献^{(4)~(6)}を参照されたい。

3.1 VHT SG~TGac 初期 (2007~2010 年)

802.11ac 標準化議論が開始されたタイミングは、802.11n の次の規格策定を目指す VHT (Very High Throughput) SG が設立された 2007 年 5 月であった。VHT SG で作成された 6 GHz 帯以下の周波数を対象とした PAR 文書⁽⁷⁾ (VHT SG の PAR は、6 GHz 帯の周波数を対象とした 802.11n の後継規格に対するものと、60 GHz 帯の周波数を対象とした新たなミリ波帯無線 LAN の規格策定を対象としたものと、都合二つが作成された。) では、単一リンク 500 Mbit/s 以上・システムスループット 1 Gbit/s 以上を実現する目標が掲げられ、その候補技術として下りリンク (DL: downlink) マルチユーザ MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) (MU-MIMO) 技術を挙げている。また、DL MU-MIMO 技術のフィージビリティの根拠として NTT 研究所の実機を用いた特性評価⁽⁸⁾が引用されている。DL MU-MIMO 技術を活用した新たな高速無線 LAN の登場は、当時デジタル家電を中心としたホームネットワーク (NW: Network) の高速大容量化に大きく貢献することが期待されており、家庭向けブロードバンドサービスを提供する通信キャリアとしても必要としていた。

TGac 設立後の初期の議論においては、新たな候補技術の伝送特性を評価するためのチャンネルモデルの改定、

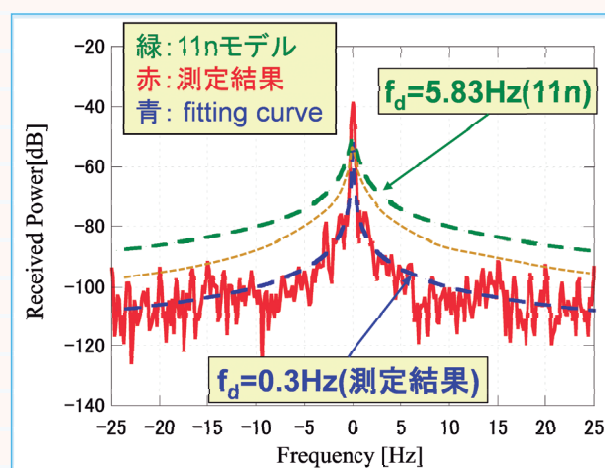


図 1 ホーム NW のドップラースペクトル測定例

並びにシステムレベルシミュレーションを行うためのホーム NW の評価モデルについて寄書入力を行った^{(9)~(11)}。

チャンネルモデルについては、802.11n 標準化で用いられた MIMO チャンネルモデル (TGn モデル) を拡張する議論が行われていたが、チャンネルの時変動モデルであるドップラースペクトルが過剰に見積もられていることに問題があった。DL MU-MIMO では、アクセスポイント (AP: Access Point) が送信ビームフォーミングを用いて複数端末 (STA: Station) へ相互干渉がない状態で同時伝送を行うことでスループットを拡大する。送信ビームフォーミングを行うためには、AP から STA へと向かうチャンネル情報を STA 側からフィードバックを受けることが必要となる。そのため、チャンネルの時変動速度が実際の環境よりも過剰に見積もられると、チャンネル情報の誤差もまた過剰となり、送信ビームの形成の誤差が大きくなる。結果、DL MU-MIMO の性能が過小評価されてしまう。これを是正するために、オフィスにおける実測データからドップラースペクトル特性 (図 1) を評価し、ホーム NW 実態に見合った値に修正する提案を行った^{(9), (12)}。実測データを用いることで信頼性の高い提案であったことと、他企業から提出された測定データにおいても類似の変動量が示されたことで、最終的に NTT 提案とほぼ同じ時変動量に修正された。

ホーム NW の評価モデルについては、当初は単一の AP が複数の STA を収容するモデルのみが規定されていた。TGac では伝送速度高速化のためにチャンネル帯域幅を 80 MHz 以上に拡大することを前提としており、互いに重複しないチャンネル数が 802.11n (最大チャンネル帯域幅 40 MHz) と比較して減少することが想定されていた (802.11n: 9 チャンネル → 802.11ac: 4 チャンネル)。米国と比べて敷地面積の狭い日本の集合住宅環境を考慮すると、同一の周波数チャンネルを用いる AP 間の

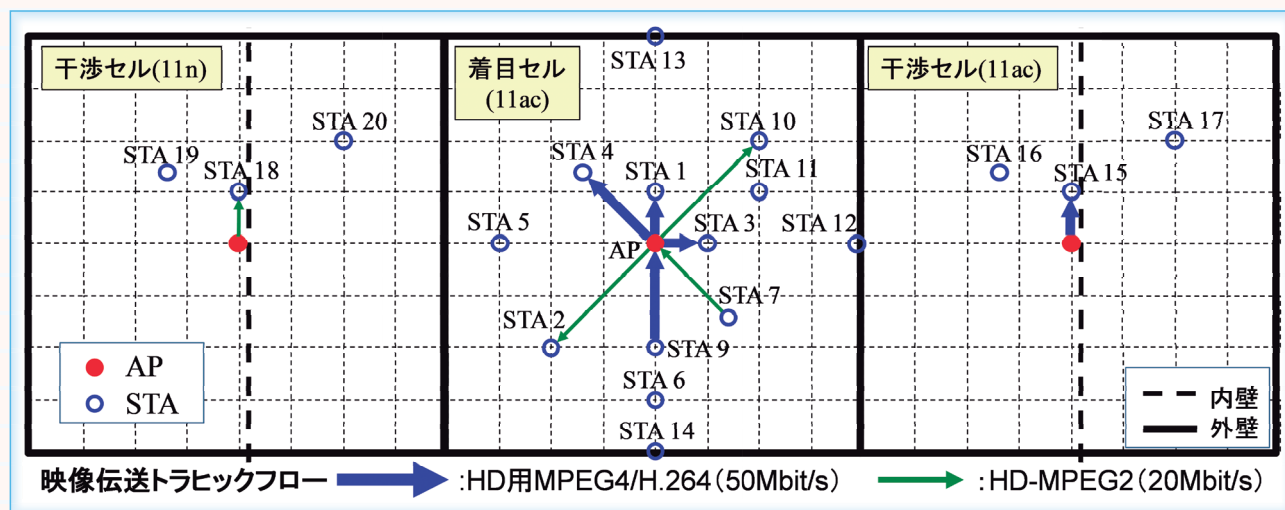


図2 干渉 AP を含むホーム NW 評価シナリオ

距離が短くなり相互干渉が問題になることが想定された。そこで、近隣で同一周波数を用いる AP が存在するホーム NW においても高い性能を実現することと、その評価モデルが必要であることを主張した⁽¹⁰⁾。この意見は当初は受け入れられなかった。無線 LAN 機器の作り手側となるベンダ企業に所属するメンバが多く、性能が劣化するようなシナリオを積極的に導入するモチベーションがなかったためである。しかし、必要性を粘り強く主張するとともに、ベンダ側が受け入れられるシナリオの落とし所について議論・折衝を重ねた。最終的に隣接 AP を考慮したホーム NW シナリオ⁽¹¹⁾ が評価モデルとして採用された (図2)。

図2のホーム NW シナリオでは、中央のセルがシステムスループット評価を行うセル、左右のセルが中央のセルに対して干渉を及ぼすセルと位置付けられており、AP/STA がちゅう密の配置された環境でのシステム容量を評価することを目的としている。図中のグリッドサイズは 5 m、外壁で囲まれた部屋の一边は 40 m (!) である。これは米国の住居が巨大であることを反映したわけではなく、多数のメンバの意見を総合的にまとめた結果である。左右に AP に帰属する台数を減らす、内壁を置くことで干渉セルからの伝搬損を増加させる、二つの干渉セルのうちの一つは 11n 規格の AP/STA とする、といった干渉量を低く見積もる意図が含まれている。その一方で、実際の集合住宅での運用を考えると、複数ある 80 MHz チャンネルを繰り返し利用すると想定される。その観点では、隣ではなく数件先の住戸からの干渉を受けることとなるため、同一周波数を利用する AP 同士の離隔距離が 40m となっていることは、結果的には現実的なパラメータとなった。

ホーム NW シナリオは 2010 年 5 月に完成した⁽¹³⁾。STA において利用されるアプリケーションとして、低

圧縮率の高精細映像、BD/HD Video、MP3 オーディオ、VoIP、Web ブラウジング、ゲームコントローラ制御といった形で規定されていた。これは STA としてデジタル家電製品・ゲーム機・PC が想定されていることを意味している。スマートフォン・タブレットの利用が登場する直前に議論を行っていたこともあり、これらのデバイスを想定したモデルにはなっていない。一方で、802.11ac は 2013 年以降、LTE 対応スマートフォンやタブレットに内蔵されることで広く普及を遂げた。ICT 産業のトレンドの移り変わりの速さを示す象徴的な事項である。

3.2 TGac 内のアドホックグループ

TGac が活動を開始してから 1 年後となる 2009 年 11 月に、参加者から TGac の技術トピックが多岐にわたるため、トピックごとに集中的に議論を行うアドホックグループを設立すべき、という意見が挙がった。これを踏まえ、PHY (物理レイヤ)、MAC (アクセス制御)、MU (マルチユーザ伝送)、Coex (共存) の四つのアドホックグループが設立され、アドホックグループごとに 3 人の共同議長が選出された。NTT からの参加メンバは Coex アドホックの共同議長を担った (図3)。

3 人の共同議長は、議事進行・議事録作成・投票カウンターの三つの役割を持ち回りで担った。ドラフトのコメント解決のフェーズでは、アドホックごとにコメントが割り当てられ、議長は解決者への割当、解決内容の記録、進捗管理 (コメント解決に候補するも、なかなか対応しない「筆の遅い」参加者も時にいるため、リマインダをかけてドラフト改定作業を遅滞なく進捗させる必要がある。) を行った。「共同議長は 3 人も必要だろうか？」という議論もあったが、2011 年 3 月の TGac 会合について、直前に発生した東日本大震災の影響で著者

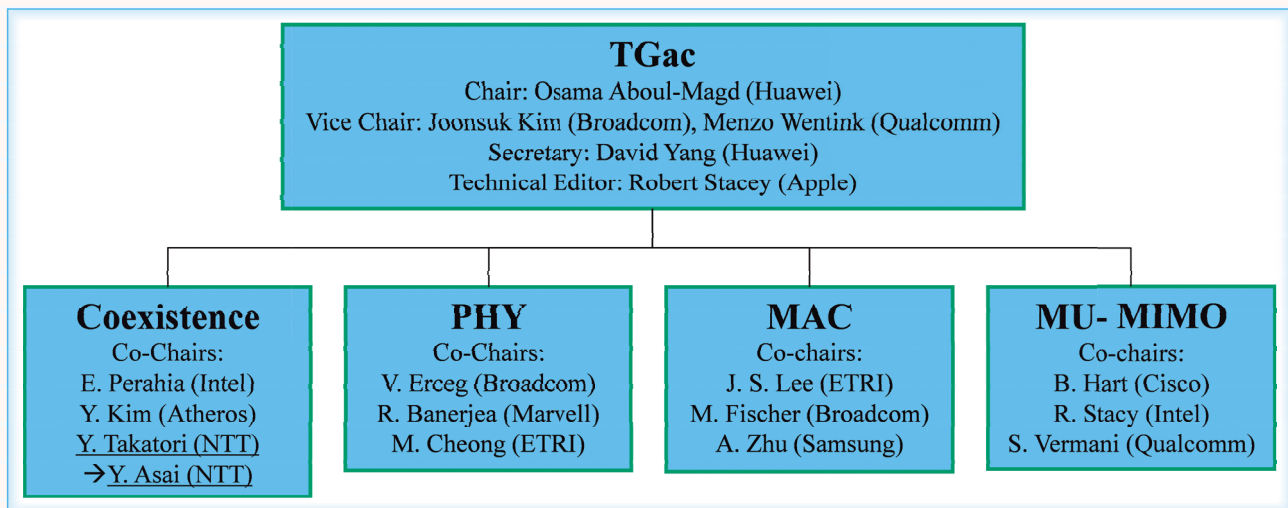


図3 TGac/ad-hoc groupの構成 (文献(14)を基に作成)

(浅井)は参加できず、ほかの2人の共同議長にCoexアドホックの運営を対応頂いた。バックアップ体制確保の観点で複数の議長を選出しておく重要性について、身をもって認識した出来事であった。

共同議長を含めた議事運営を担うオフィサー（議長・副議長・ドラフト編集を担うエディタ・議事録作成を担うセクレタリ）は中立の立場での活動となる。したがって、オフィサーを担うことが自社提案採用に有利に働くといった直接的な利益を生むわけではない。しかし、世界各国から集結した技術者の合意形成を促しながら仕様策定を完遂させる役割を担うことは、標準化における重要な目的の一つである「標準規格策定を通じた新たな市場の開拓」に対する大きな貢献となるため、他参加者からの信頼獲得につながり、結果的には自社の提案活動にプラスに働くこととなる。そのため、今後標準化に携わる方は積極的にオフィサーのポジション確保を目指すことをお勧めしたい。

3.3 TGac中期(2010~2011年)

チャンネルモデルの修正・ホームNWシナリオの追加を行った後に、DL MU-MIMO技術の性能向上に資する技術提案を行った^{(15), (16)}。

はじめに、近隣に同一周波数を用いるAPが存在する場合にAP同士が連携し、相互にヌルビームを向け合い同時伝送を行うことでスループットを拡大する技術⁽¹⁷⁾の提案を行った⁽¹⁵⁾。(図4は概要イメージ。)本技術は近隣のAPに帰属するSTAからチャンネル情報のフィードバックを受信することが必要であり、オーバーヘッドが大きくなることが課題であった。そこで、Implicit Feedbackの活用を検討した。Implicit Feedbackでは、各APはあらかじめ同時伝送を行う際の全てのSTAに対するアンテナ・回路のキャリブレーション情報

(AP → STAの伝送の場合と、STA → APの伝送の場合とでAP/STAそれぞれで用いられる送受信回路が異なるため、その差分となる位相・振幅情報)を取得した上で、STAから送信される参照信号(NDP: Null Data Packet, 時間長が極めて短い)を用いてSTA → APのチャンネル情報を取得し、先述したキャリブレーション情報を用いてこれをAP → STAのチャンネル情報に変換を行う。無線LANでは通信相手によらず同一のチャンネルを時間で切り換え、棲み分けるためチャンネルの対称性が成立し、このような処理が可能である。このImplicit Feedbackは、実際の利用環境を想定すると、AP連携伝送を行う全てのAP/STAが必ずしも同一ベンダ製品ではないことが想定されるため、独自実装ではなく標準規格に準拠したImplicit Feedback機能が必要であった。我々は、Implicit Feedbackは前規格である802.11nにおいて既に定義されていたため、当然TGacでも規格化されるだろう、という想定でいた。しかしながら、ベンダ各社は802.11nのImplicit Feedbackではなく、各社独自の実装を行い差別化領域とする意向を持っていたため、ドラフト策定の前段階において

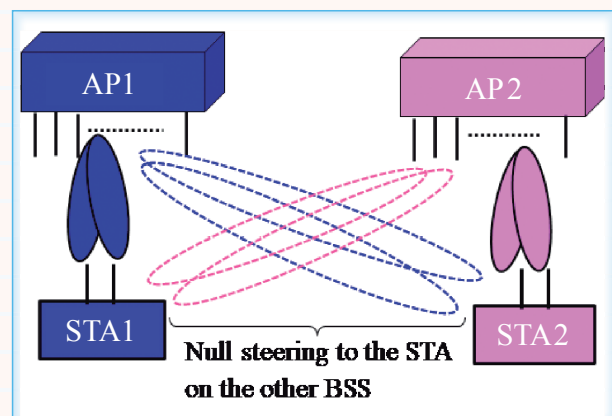


図4 AP連携DL MU-MIMO伝送 (イメージ図)

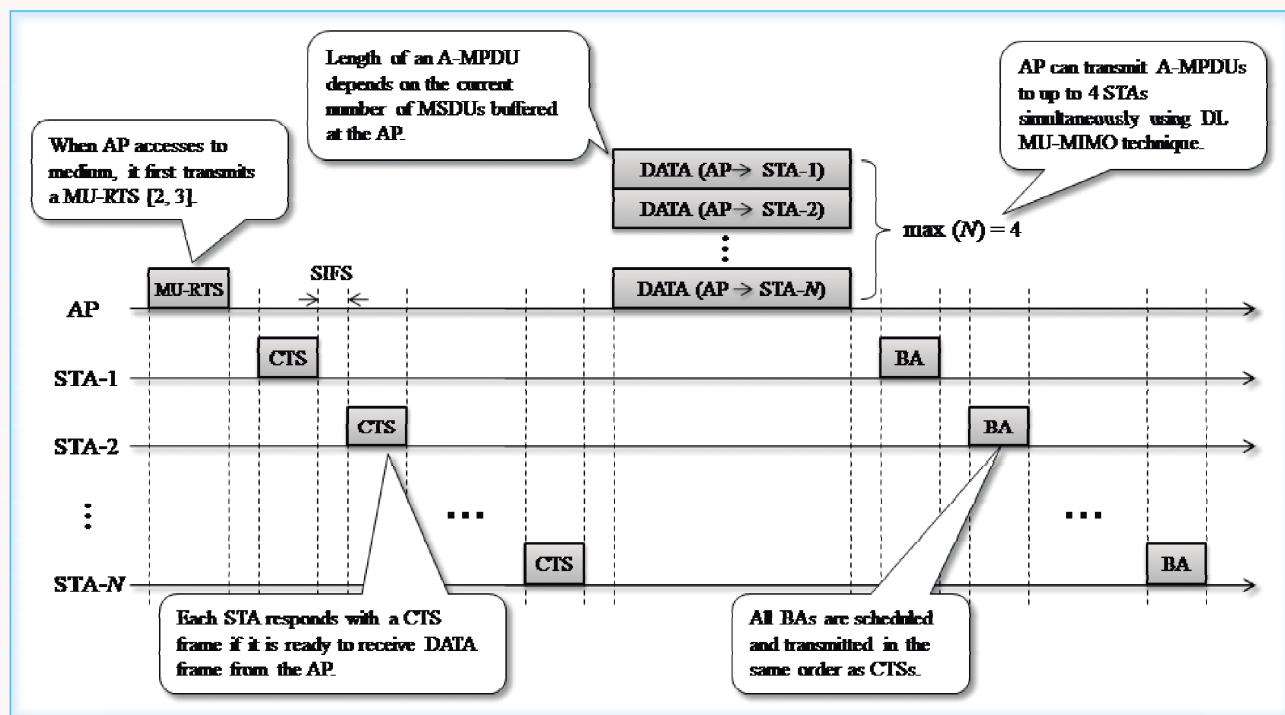


図5 MU-RTSを活用したプロテクションシーケンス

Implicit Feedbackは802.11ac標準において規定しない決議が承認された⁽¹⁸⁾。これに付随する形で、提案していたAP連携DL MU-MIMO伝送技術は採用の見込みがなくなった。標準規格だけではなく市中製品における実装動向についても、把握した上で実現性の高い技術提案を行うことが重要である。

また、DL MU-MIMO伝送の宛先となるSTA周辺のAP/STAによる干渉からSTAの受信を保護することを目的としたプロテクション手法として、既存のRTS (Request to Send) /CTS (Clear-to-Send) フレームの交換を拡張したMU-RTSフレーム⁽¹⁹⁾の提案を行った⁽¹⁶⁾。(図5はフレームシーケンス。) こちらもシーケンスの複雑性が実装上課題であることもあり、ベンダからの支持が十分に得られず採用には至らなかった。

これらの提案技術はTGacでは採用されなかったが、複数AP連携のコンセプトは、2023年11月に活動を開始し、802.11beの後継規格と位置付け超高信頼無線LAN (UHR: Ultra High Reliability) の標準規格策定議論を行っているTGbnにおいて、信頼性向上技術として活発に議論が行われている。標準化技術として一度採用された技術は必ずしも残り続けるわけではない一方、時期尚早として目の目を見ることがなかった技術が時を経て再び注目されることもある、という事例と考える。また、MU-RTSについては、802.11acの後継となる802.11ax標準化において、AP/STAが高密度に配置される環境における伝送効率改善が目標に設定されたことを受け、同様のコンセプトを持つフレーム及びシーケ

ンスが定義された⁽²⁰⁾。これらの事例から、新たな技術提案はその技術が持つ特性改善効果や実装の観点における実現性といった要素に加えて、提案を行うタイミングやその時期に策定される標準化の課題設定に対する寄与度といった側面の訴求力も重要であると考え。

TGacにおけるSF文書は2011年1月に最終版が承認され、ドラフト作成のフェーズに移行した。

3.4 TGac後期 (2011~2013年)

ドラフト策定のフェーズでは、SF文書を基に技術スペックを標準規格としてテキスト化するため、技術の採用の是非を議論することはない。一方で、採用された技術を標準規格に落とし込むためには、既存規格との整合性及び後方互換性を確保する必要があるため、完成までに数年にわたる期間を要する。(後方互換性の担保によりユーザは安心して新製品を購入することができ、これが無線LAN市場拡大の一要因であるため、必須要件となっている。) TGacでは、SF文書が策定されてからドラフト初版が完成するまでに半年を要した⁽²¹⁾。

DL MU-MIMO技術については、PARにおいて主要技術と位置付けられており、また、先述のとおり適切なチャンネルモデルを策定し特性評価が行われたことから早期にSF文書に盛り込まれ、当初は採用が確実視されていた。ところが、TGacに参加する一部の主要企業から「変調方式256 QAM及びチャンネル帯域幅160 MHzが規定されており、DL MU-MIMOを使わずともPARに記載された目標性能であるシステムスループット1

Gbit/s を満足できるので、実装が複雑な DL MU-MIMO は SF 文書から外すべき」という議論が持ち上がった。DL MU-MIMO 技術の規定に最も積極的だった某ベンダは、この状況に危機感を覚え、内製したプロトタイプを会場ホテルの一室に持ち込み TGac 会合が行われている裏で、各企業のメンバーを個別に呼び出してデモを実演していた。筆者も見学したが、都合 30 社以上に声を掛けてデモを実施しているとのことであった。DL MU-MIMO 技術のフィージビリティを TGac 参加者に実機により体感してもらうことで、TGac ドラフトに技術スペックとして維持することを目的とした営みであったが、自社の技術に対する揺るぎない自信と、ネガティブイメージを払拭するためには費用を掛けてでもベストを尽くす姿勢が印象的であった。この某社のプロモーションのかいもあり、DL MU-MIMO 技術はオプション規定として 802.11ac 標準に採用され（文献 (1) の Annex B）、後継規格（802.11ax）においても規定され現在広く無線 LAN で活用されている。

ドラフトの LB、コメント解決が最も盛んに行われたのは 2011～2012 年であった。802.11 WG の対面での会合は北米を中心に隔月で 1 週間（年 6 回）開催されるが、ドラフトのコメント解決には膨大な時間が掛かるため、電話会議の実施に加えて会合の前の週や会合と会合の間の月にもアドホック会合を実施していた⁽²²⁾。

4 国内における電波法令改正

著者（浅井）は 802.11ac 標準化の活動を行う傍ら、国内における電波法令改正にも取り組んでいた。802.11ac で規定されるチャネル帯域幅 80 MHz、160 MHz、80+80 MHz（二つの 80 MHz チャネルを不連続に用いることで 160 MHz チャネル相当の伝送速度を実現するモード）については、当時の電波法令では利用することができなかった。802.11ac 標準対応製品が登場したタイミングで速やかに日本でも利用が可能となるよう、ドラフト第 2 版が策定されたタイミング（2012 年初頭）に、国内の無線 LAN 関係者とともに総務省を訪問し、802.11ac を利用可能とする電波法令改正について相談を行った。802.11n 以降ドラフト対応製品が早期に市場に投入されることから、802.11ac の標準化完了を待つことなく、早期の制度化を行うことが無線 LAN ユーザにとってメリットが大きいことを訴求した。その結果、2012 年 5 月に情報通信審議会配下の「無線 LAN システム作業班」において議論が開始された⁽²³⁾。

作業班では、早期制度化を実現するために標準化の最新動向を示すとともに、具体的な技術的条件を提案することで議論を加速化させた。これにより、作業班立ち上

げから半年後となる 2012 年 11 月に技術的条件に対する一部答申が出された。その後、電波監理審議会の答申を経て、2013 年 3 月 27 日に日本で 802.11ac が利用可能となる電波法令が施行された。（一般的に即日施行されるため、改正法令が官報に掲載された日が法令施行日となる。）無線 LAN 機器は工事設計認証（量産製品に対する「技適（技術適合証明）」である。）を取得することで、市販品として一般ユーザに販売することができ、当然ながら工事設計認証が取得できるのは制度施行日以降となる。ところが、制度化の 3 日後には家電量販店に 802.11ac 対応 AP が登場していた⁽²⁴⁾。当時の最新規格が 802.11n であり、その後継として 1 Gbit/s を実現する無線 LAN、ということで販売側の 802.11ac に対する期待も高かったことが要因であると考えられる。恐らくベンダ各社はかなりの突貫作業で工事設計認証を取得し、認証シールを張り付け、パッケージ梱包し量販店に出荷したと推察される。AP が登場する一方で、STA 側は 802.11ac のラインナップがほぼ存在しない（USB ドングル製品程度であり、PC・スマートフォン等の 802.11ac 対応製品は出ていなかった。）状態であった。そのため販売後即座に 802.11ac 対応 AP が大ヒットし利益が上がることは期待できなかったが、Web 系メディアを中心に「802.11ac 対応一番乗り」というニュース記事が多数掲載されることから、製品そのものの PR 効果に加えて、無線 LAN 市場をリードする企業としてのイメージ醸成につながるため、ベンダとして早期市場投入のメリットが高いと判断したのではないかと推察する。

5 むすび

本稿では、IEEE 802.11ac 標準規格策定における著者の経験及び知見について、記憶をたどり述べた。今後標準化活動を志す方・現在取り組まれている方にとって、少しでも参考になる点があれば幸いである。

本稿執筆中の 2023 年 11 月 13 日に、802.11be の後継規格を策定する TGbn において、筆者（浅井）は TG secretary に任用された⁽²⁵⁾、⁽²⁶⁾。今後も無線 LAN 標準化に技術面・運営面において貢献してゆく所存である。

文献

- (1) IEEE Std. 802.11ac-2013, IEEE Standard Association, May 2014.
- (2) 真野 浩, “標準化で世界を歩く—無線 LAN IEEE 802.11 での戦い—,” 信学通誌, vol. 6, no. 24, pp. 311-316, March 2013.
- (3) ラナンテ レオナルド Jr., 長尾勇平, 尾知 博, “無線 LAN 国際規格 IEEE 802.11 の標準化—標準化作業手順とその最新動向—,” 信学 FR 誌, vol. 13, no. 2,

- pp. 124-132, Oct. 2019.
- (4) 浅井裕介, 石原浩一, 村上友規, 工藤理一, 市川武男, 鷹取泰司, 溝口匡人, “超高速無線 LAN 規格 IEEE 802.11ac の概要とマルチユーザ MIMO の実験的検証,” 信学論 (B), vol. J97-B, no. 1, pp. 1-18, Jan. 2014.
 - (5) 絶対わかる! 無線 LAN 超入門, 日経 NEWTORK (編), 日経 BP 社, 東京, 2014.
 - (6) E. Perahia and R. Stacey, Next generation wireless LANs: 802.11n and 802.11ac ? Second Edition, Cambridge University Press, 2013.
 - (7) E. Perahia, “VHT below 6 GHz PAR Plus 5C’s,” doc.: IEEE 802.11-08/0807r4, Sept. 2008.
 - (8) K. Nishimori, R. Kudo, Y. Takatori, A. Ohta, and K. Tsunekawa, “Performance evaluation of 8×8 multi-user MIMO-OFDM testbed in an actual indoor environment,” IEEE PIMRC 2006, Sept. 2006.
 - (9) W. Yamada, K. Nishimori, and Y. Takatori, “Coherence time measurement in NTT Lab,” doc.: IEEE 802.11-09/0828r0, July 2009.
 - (10) Y. Takatori, K. Nishimori, and S. Kitazawa, “OBSS issue in 802.11ac,” doc.: IEEE 802.11-09/0536r0, May 2009.
 - (11) Y. Asai, Y. Takatori, Y. Kim, V. Erceg, Y. Morioka, S. Sbraham, and S. Merlin, “Revisions of home network simulation scenario with OBSS,” doc.: IEEE 802.11-10/0384r3, May 2010.
 - (12) 山田 渉, 西森健太郎, 鷹取泰司, 浅井裕介, “ベル型モデルを用いたドップラスペクトルの統計的評価,” 2009 信学ソ大, B-1-20, Sept. 2009.
 - (13) P. Loc and M. Cheong, “TGac functional requirements and evaluation methodology Rev. 2,” doc.: IEEE 802.11-09/0451r2, May 2010.
 - (14) R. de Vegt, Y. Takatori, Y. Seok, M. Cheong, J. Benko, Y. Morioka, P. Chambelin, A. Bourdoux, A. Stephens, V. Erceg, R. Banerjea, and N. Zhang, “Proposed scope for Tgac Ad Hoc groups,” doc.: IEEE 802.11-09/1175r1, Nov. 2009.
 - (15) Y. Asai, T. Ichikawa, R. Kudo, K. Ishihara, T. Murakami, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, “Interference management using beamforming technique in OBSS environment,” doc.: IEEE 802.11-10/0585r4, May 2010.
 - (16) B. A. Hirantha Sithira Abeysekera, S. Shinohara, Y. Asai, Y. Inoue, T. Ichikawa, M. Mizoguchi, P. Christin, and L. Cariou, “Performance evaluation of MU-RTS under OBSS environment,” doc.: IEEE 802.11-10/1293r3, Nov. 2010.
 - (17) K. Ishihara, T. Murakami, Y. Asai, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, “Cooperative inter-cell interference mitigation scheme with downlink MU-MIMO beamforming for dense wireless LAN environment,” Springer Wireless Personal Commun., vol. 93, pp. 661-674, Dec. 2014.
 - (18) O. Aboul-Magd, “TGac September 2010 agenda,” doc.: IEEE 802.11-10/1016r5, Sept. 2010.
 - (19) B. A. Hirantha Sithira Abeysekera, 篠原笑子, 浅井裕介, 井上保彦, 市川武男, 溝口匡人, “次世代無線 LAN におけるオーバラップ通信セル環境下での MU-RTS 手法の特性評価,” 2011 信学総大, B-5-127, March 2011.
 - (20) IEEE Std. 802.11ax-2021, IEEE Standard Association, May 2021.
 - (21) OFFICIAL IEEE 802.11 WORKING GROUP PROJECT TIMELINES - 2024-02-05. https://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm
 - (22) IEEE P802.11 - TASK GROUP AC - MEETING UPDATE. https://www.ieee802.org/11/Reports/tgac_update.htm
 - (23) 総務省情報通信審議会「無線 LAN システム作業班」. https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/idou/wlesslan.html
 - (24) 「無線 LAN がギガビット到達, 実測 900Mbps 超の新規格「11ac」ドラフト版ルータが発売に」, AKIBA PC Hotline!, インプレス, 2013 年 3 月 29 日. <https://akiba-pc.watch.impress.co.jp/docs/news/news/593862.html>
 - (25) IEEE P802.11-TASK GROUP BN (UHR) MEETING UPDATE. https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbn_update.htm
 - (26) 「次世代無線 LAN IEEE 802.11bn 標準規格策定の本格化と NTT からのオフィサー就任について〜 6G/IOWN 時代の無線アクセスの超高信頼化に貢献 〜」, NTT TOPICS, 2023 年 12 月 14 日. https://group.ntt.jp/topics/2023/12/14/tgbn_officer.html

浅井裕介 (正員)

1999 名古屋大学大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社未来ねっと研究所入所。以来, MIMO-OFDM システムの信号処理技術を中心とした研究, IEEE 802.11 標準化活動, 無線 LAN の利用を可能とする電波法令改正活動等に従事。博士 (工学)。現在, NTT アクセスサービスシステム研究所特別研究員, IEEE 802.11 TGbn secretary.



鷹取泰司 (正員: シニア会員)

1995 東北大学大学院修士課程了。同年日本電信電話ワイヤレスシステム研究所に入所。以来, 空間信号処理, 高速通信システム, 高速無線 LAN 等の研究開発に従事。2004〜2005 デンマークオーホルボー大学客員研究員。工学博士。現在, NTT アクセスサービスシステム研究所上席特別研究員。



Bluetoothの標準化に向けた取組みと標準化活動参加に関するお願い

足立克己 Katsumi Adachi (株) 東芝

1 はじめに

便利な世の中を支える知られざる標準化の裏側としての小特集で Bluetooth^{*1} の標準化に向けた取組みを扱って頂けることとなった。企業競争の主戦場である標準化を戦ってきた企業人として、基本的にそのノウハウを社外に公開することはできないが、その中で既に公知となっていること、及び実際の標準化活動の現場で起きている公開可能なことに関して記述する。誌面の都合で書き切れないことなどは、お会いする機会があれば適切にお話ししたいと思う。

2 Bluetooth 仕様⁽¹⁾ とは

2.1 現在の基本周波数と仕様の目指す三つの特徴

ISM バンド (Industrial, Scientific and Medical Band) は産業、科学、医療の用途に割り当てられ、国際的に認知されている無線周波数帯域であり、一般的には免許不要で利用できる。現在の Bluetooth 仕様は、この ISM バンドのうちの 2.4 GHz (2,400~2,483.5 MHz) 帯域を使用しており、同じ機器で世界のどこでも通信利用できることを目指している。Bluetooth 仕様の中で特に重要である三つの特徴は、堅ろう性 (Robustness)、低消費電力 (Low Power Consumption)、低コスト (Low Cost) であり、仕様策定を始めたときから変わらず、これらを求め続けている。

2.2 二つの異なった互換性のない物理層

Bluetooth の物理層の仕様は、基本仕様である Basic Rate (BR) 仕様及び変調方式を増やして高速化した Enhanced Data Rate (EDR) 仕様と、低消費電力とともに同報通信を特徴とする Low Energy (LE) 仕様と

表 1 Bluetooth 仕様の物理層の違いとその特徴⁽²⁾

	LE	BR/EDR
周波数帯	2.4 GHz (2,400–2,483.5 MHz)	
Ch 数, 間隔	40 ch, 2 MHz (37 データ Ch, 3 アドバタイジング Ch)	79 ch, 1 MHz
Ch 使用方法	周波数ホッピングスペクトル拡散 (FHSS)	
変調方式	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
データ転送速度	2M PHY: 2 Mbit/s 1M PHY: 1 Mbit/s Coded PHY (S=2): 500 kbit/s Coded PHY (S=8): 125 kbit/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mbit/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mbit/s BR PHY (GFSK): 1 Mbit/s
送信電力*	≤ 100 mW (+20 dBm)	
受信感度	2M PHY: ≤ -70 dBm 1M PHY: ≤ -70 dBm Coded PHY (S=2): ≤ -75 dBm Coded PHY (S=8): ≤ -82 dBm	≤ -70 dBm
データトランスポート	非同期コネクション指向 等時性コネクション指向 非同期コネクションレス 同期コネクションレス 等時性コネクションレス	非同期コネクション指向 同期コネクション指向
通信トポロジー	Point to Point (ピコネットを含む) 同報通信 Mesh	Peer to Peer (ピコネット, スキャ タネットを含む)

* 各国の電波法の下で許容される最大送信電力に従っています。

Ch: Channel

DPSK: Differential Phase Shift Keying

DQPSK: Differential Quaternary Phase Shift Keying

GFSK: Gaussian Frequency Shift Keying

に大別できる (表 1)。

EDR は BR と物理層の互換性があるが、これらの仕様と LE の間には物理層の互換性はなく、通常は通信できない。このために Bluetooth で行われたことは、スマートフォンや PC などのゲートウェイデバイスには両物理層仕様を必須とすることで、後発仕様で互換性のない

* 1 Bluetooth は登録商標。

LEにおいてもBluetoothのネットワーク外部性を享受できる戦略とした。LEを受けるゲートウェイデバイスを戦略的に増やすことで、コイン電池駆動のLEセンサデバイスやLEウェアラブルデバイス等、LE通信だけを具備した低消費電力デバイスを増やすことに成功した。

今後、どの団体においても、互換性のない物理層を仕掛ける際は、対等なピアツーピア (Peer to Peer) でデバイスを増やす通常戦略に加え、標準化戦略の一つの手法としてシステム要求を活用することになると思われる。

2.3 コア、プロファイルとサービス、プロトコル仕様

Bluetoothの仕様は、コア (Core) とプロファイル (Profile) とサービス (Service) に記述されている。また一部の定型手順はプロトコル (Protocol) に記述される。コア仕様はBluetoothの基本となる物理層、ベースバンド層、リンク層、セキュリティなどの仕様が記述されており、物理層が大きく変わる際にBluetoothのメジャーバージョンが更新される。コア仕様の各メジャーバージョンと主な特徴を表2に、V5の各バージョンと主な機能追加・強化を表3に示す。

Bluetoothの大きな特徴はプロファイルとサービス仕様を策定することにある。サービスは各機能を規定し、プロファイルはその機能が集まった大分類を総称して付けられる名称である。これらは、実現したいユースケースとユースナリオを考えて仕様策定が進められる。近年はプロファイルとサービスが一对となってリリースされるものが増えている。

策定が完了した仕様に関しては、Bluetooth SIG (Special Interest Group) のホームページで無償公開される。仕様は多くの人に見られて使用されることを目的とするため、SIGメンバにならずともダウンロード可能である。

3 仕様書の読み方に関して

3.1 読むべき仕様書の選択方法

標準化済みの仕様書は、SIGホームページの「仕様書と資料⁽¹⁾」に、現在は約340編ほど掲載されている (バージョン違いを含む、執筆日現在)。ここではその目的に応じ、仕様書の選択方法と読み方に関して簡単に触れる。

基本的な学習方法に関する推奨は、Bluetoothに関する基本知識を身につけ、自分が実現したいことを想像し、このためのプロファイルサービスを選択・創造することである。

表2 各メジャーバージョンと主な特徴

版 (初版日付)	主な特徴
V5系 (2016.12.06)	LEを2M Symbol/sに高速化。出力と感度を増強し、誤り訂正を入れて長距離化。データ容量の拡張。角度推定で測位を強化。等時性Ch採用でLE音楽を本格化。バースト的な通信から定期的な通信までをカバー。
V4系 (2010.06.30)	低消費電力領域へ拡張したバースト的な通信を開始。1対1だけでなく1対多の同報/同時刻/コネクションレス通信が可能となり、ビーコン利用が広がる。Meshサポートで、複数路による信頼性と容易なシステム拡張が可能。
V3系 (2009.04.21)	High Speed (HS) としてIEEE802.11利用のAMP管理プロトコル採用、L2CAP強化。
V2系 (2004.11.04)	変調方式を追加しEDRとして通信を高速化。流行ったのは、暗号鍵入力が楽になるSSPが採用されたv2.1+EDRで、BR/EDRはほぼ完成。
V1系 (1999.07.26)	1対1のデバイス間の連続通信を得意とする。PCと携帯電話間における音声通信とデータ通信、及びこれらの周辺機器の有線接続を無線に置き換えることを目的にスタート。V0.7は1998.10.19にリリース。無線LANとの共存の際に発生する干渉問題を軽減するAFHを採用したv1.2 (2003.11.05) が流行。

AFH: Adaptive Frequency Hopping

AMP: Alternate MAC/PHY

BR/EDR: Basic Rate/Enhanced Data Rate

L2CAP: Logical Link Control and Adaptation Protocol

SSP: Secure Simple Pairing

表3 V5各バージョンと主な機能追加・強化

版 (日付)	主な追加機能及び強化部分
V5.4 (2023.01.31)	Advデータ暗号化、レスポンスを伴う定期的Advなど
V5.3 (2021.07.13)	定期的Adv、LINK層でのCh認識、AMP廃止、暗号鍵の実装脆弱性警鐘・防止、表記修正
V5.2 (2019.12.31)	LE Isochronous (等時性) Ch、拡張属性プロトコル、LE電力制御
V5.1 (2019.01.21)	角度推定、定期的Adv同期転送、Adv Ch Index、GATTキャッシング
V5.0 (2016.12.06)	LE速度/長距離/出力/感度/容量/安定性向上、コネクションレス通信強化

Adv: Advertising

Ch: Channel

3.2 ユーザとしてのコア仕様の読み方

Bluetoothの動作原理などの基本知識はコア仕様書に書かれている⁽³⁾。現時点でのコア仕様はV5.4であり、総ページ数は3,112ページに達している。その目次を表4に示す。全体概要はVol. 1, Part Aのアーキテクチャに記載されているが、このパートだけで115ページあり、またそれぞれの数値の意味をこのパートだけで理解することができないため、軽く流し読むことで十分であ

表 4 コア仕様書 V5.4 の各巻と各パートの内容

巻・パート	項目・内容（巻全ページ数）
Vol. 0	全目次とコンプライアンス要件等（177P）
Part A	各 Vol 目次を連結したもの
Part B	コンプライアンス要件
Part C	バージョン履歴と貢献者
Vol. 1	アーキテクチャとバージョン混在の説明と規約（205P）
Part A	アーキテクチャ
Part B	頭字語と略語
Part C	コア仕様の変更履歴
Part D	仕様バージョンの混在に関する説明
Part E	言語規則，解釈規定，命名規則
Part F	コントローラのエラーコード
Vol. 2	BR/EDR コントローラ（621P）
Part A	無線仕様
Part B	ベースバンド仕様
Part C	リンクマネージャ・プロトコル仕様
Part D	削除（Vol.1 Part F へ移動）
Part E	削除（Vol.4 Part E へ移動）
Part F	メッセージ・シーケンス・チャート
Part G	サンプルデータ
Part H	セキュリティ仕様
Vol. 3	ホスト（638P）
Part A	論理リンク制御及び適応プロトコル仕様
Part B	サービス発見プロトコル仕様（SDP）
Part C	汎用アクセスプロファイル（GAP）
Part D	テスト・サポート
Part E	削除（AMP マネージャ・プロトコル）
Part F	属性プロトコル（ATT）
Part G	汎用属性プロファイル（GATT）
Part H	セキュリティ・マネージャ仕様
Vol. 4	ホスト・コントローラ・インタフェース（999P）
Part A	UART トランスポート層
Part B	USB トランスポート層
Part C	SD トランスポート層
Part D	3 線式 UART トランスポート層
Part E	ホスト・コントローラ・インタフェース機能仕様
Vol. 5	削除（AMP コントローラ）（1P）
Vol. 6	LE コントローラ（437P）
Part A	物理層仕様
Part B	リンク層仕様
Part C	サンプルデータ
Part D	メッセージ・シーケンス・チャート
Part E	LE リンク層セキュリティ
Part F	ダイレクト・テスト・モード
Part G	等時性適応層
Vol. 7	ワイヤレス共存シグナリングとインタフェース（31P）
Part A	MWS 共存論理シグナリング仕様
Part B	無線共存インタフェース1 (WCI-1) トランスポート仕様
Part C	無線共存インタフェース2 (WCI-2) トランスポート仕様

表 5 既存／新規仕様と既存／新規事業領域における戦略的特徴

仕様区分	事業領域区分	特徴
既存仕様	既存事業領域	トップ集団は成長戦略・競争力強化戦略など。トップ集団以外は破壊的技術の創造
	新規事業領域	トップ集団以外でもトップ集団を構成可能。一方で競合他社からの追従が早い
新規仕様	既存事業領域	新機能追加など，先行者利益戦略／差別化戦略
	新規事業領域	トップ集団以外でもトップ集団を構成可能。既存事業者はならず，追従も遅くなる

る。

無線送受信モジュール部分を「コントローラ」と呼ぶ。BR/EDR コントローラに関しては Vol. 2 に，LE コントローラに関しては Vol. 6 に記載されており，それぞれの各物理層及びリンク層を読むことで，上記の全体概要に記載される数値の意味が理解できる。目的に応じて，いずれかのコントローラを選択して読むか，その両方に目を通すことになる。

これらコントローラを扱うのがホストであり，Vol. 3 に記述されている。通常はコンピュータやスマートフォンなどのホストデバイスがこれを担当する。また，コントローラとホストとの間で通信を可能にするインタフェースが HCI（Host Controller Interface）であり Vol. 4 に記述されている。ただし，ユーザの立場としては，これらの HCI 仕様を読み込むより，既に各 OS に用意されている Bluetooth 通信を行うための API や，統合開発環境に進んだ方が短期間で開発がスタートできると思われる。ユーザが使用する理想的な API は，HCI より更に抽象度を上げ，物理層が Bluetooth であることすら意識させない，目的優先なインタフェースである。

セキュリティに関しては，各コントローラの Vol. 2，Part H 及び Vol. 6，Part E，ホストは Vol. 3，Part H に記述されており，これらをまとめた概要が Vol. 1，Part A の 5 章に記述されている。こちらも詳細はコントローラ仕様を読む必要はあるが，概要は一読頂きたい。

4

なぜ，新規仕様策定を行うのか？

4.1 既存仕様と既存事業領域における戦略

既存／新規仕様と既存／新規事業における戦略的特徴を表 5 に示す。既存仕様のまま，既存事業領域で成功を収めるためには，トップ集団は成長戦略・競争力強化戦略などを適用し，トップ集団以外は破壊的技術⁽⁴⁾の創造などを行うのが一般的である。

4.2 既存仕様と新規事業領域における戦略

Bluetooth は、全世界で販売されるスマートフォンのほぼ 100 % に搭載されている⁽⁵⁾。また既に、各 OS には Bluetooth 通信を行うための API や統合開発環境が用意され、プラットフォームとして整備されている。更に、Web 検索するとサンプルコードやチュートリアルを豊富に見つけることができる。このため、既存の Bluetooth デバイスを利用して、現行のスマートフォン上で自分の考えるアイデアを具現化した Bluetooth アプリを作成することが可能となっている。

これは、既にあるリソースを最大限に活用した、アイデア勝負のリスタートアップ戦略の一つとなり、既存の仕様を用い、既存のデバイスで、既存事業領域の新機能や新規事業領域を開拓する戦略となる。ただし、誰もが実現可能となるため、それを発表した瞬間から競合他社の追従が始まる。別の層で設けた特許に守られた差別化や、アイデアの追加で逃げ続ける成長戦略や、競争力強化戦略が必要である。

4.3 新規仕様と既存事業領域における戦略

現行商品との差別化を行う戦略として、新しいユースケースとユースナリオを提供する新規仕様を用いる戦略が有効であり、これが新規仕様を策定する目的の一つである。これにより、ユーザ層・ユーザ数・ユーザ使用数量を増やして市場を拡大し、差別化機能を追加することで競争力を高めることができる。

ここで取るべき戦略は、先行者利益戦略及び差別化戦略である。標準化団体の知財に関する考え方の違い及び自社のポジションで取るべき戦略が選択される。

4.4 新規仕様と新規事業領域における戦略

現在トップ集団に位置せず、市場影響力もない立場なら、新規仕様を用いて新規事業領域を創造することが推奨される。この場合、スタートアップ企業や既存事業でトップ集団以外であっても、新規事業領域でトップ集団を構成することが可能であり、既存事業者はおらず、その追従も遅くなる。更に、一般的には 1 社で行うよりも市場成長スピードが速く、標準化の目的の一つである投資回収までの速度が速くなる。

世界では、この領域を目指して、便利で簡単に楽しく、人々の生活が豊かになる商品や技術を創造するための標準化活動が日々行われており、皆の参加を待っている。

表 6 メンバ区分の主な違い

	アソシエート	アドプタ
WG への参加可否	参加可能	参加不可
ドラフト開示時期	V0.5, V0.7, V0.9	V0.9
商品宣言費用*	\$5,520	\$11,040
年会費 (年間売上 ≤ \$100M)*	\$10,350	\$0
年会費 (年間売上 > \$100M)*	\$48,300	\$0

*費用は 2024 年 1 月 1 日から適用されるもの (USD)

5

Bluetooth SIG と標準化活動

5.1 Bluetooth SIG とは

Bluetooth SIG は、Bluetooth 技術に興味を持つ企業等が集まった、米国デラウェア州の非営利団体であり、米国ワシントン州カークランドにその本社を置く。SIG の役割は、標準化活動の推進・支援・広報であり、仕様の策定・管理、仕様策定活動支援、ライセンス管理、会員管理、仕様準拠管理、ブランド管理、マーケティング、プロモーション、開発コミュニティ支援、テスト開発・維持管理、製品前試験となる相互接続イベントである UPF (Un Plug Festa) の主催などである。

5.2 仕様策定を行うには

現在の Bluetooth SIG の会員数は約 39,000 社 (2023 年 12 月) であり、その区分はプロモータ (Promoter) とアソシエート (Associate) とアドプタ (Adopter) に分かれている。アソシエートとアドプタの大きな違いは、仕様策定への参加可否、策定途中の仕様開示タイミング、及びこれに伴う年会費である (表 6)。ユーザの立場で使用する場合は、まずはアドプタでも活動可能である。

Bluetooth SIG のメンバであっても、仕様を策定するために集まったグループである WG (Working Group) メンバになって貢献活動を行わないと、策定途中の仕様開示が限定される。アソシエートは V0.5, V0.7, V0.9 の開示だけで、アドプタは V0.9 のみである。このために、自社の使用したい機能が最終的に入るかどうか分からず、また仕様変更等が入ると実装変更が必要となるために、実装開始タイミングが遅れることとなる。このことから、仕様策定を行って新しい世界を創造し、策定途中の仕様の早期開示を受けるためにはアソシエート籍が必要である。

表 7 Bluetooth における仕様要素とその特徴

仕様要素	知財タイプ	特徴及び普及に必要な労力
必須要素	クロスライセンス	SIG メンバで推進していく。 1 社で行うよりも立上げ時間が早く、投資回収までの時間が短い
オプション	RAND	RAND となる IP を入れ込み、それを回収する組織を用いて回収する。オプションを推進するメンバで流行・普及させる必要がある。

5.3 NWP (New Work Proposal) から始めよう

実現したい機能があり、その機能に Bluetooth の特徴が当てはまるのなら、新しい仕様の提案である NWP をメンバの誰もが登録できる。登録の際は、その NWP に対して 3 社以上の支持を集め、そのメンバでユースケースとユースシナリオを描き、実現したい利便性を明示する。これを基に Bluetooth SIG 取締役会である BoD (Board of Directors) の承認作業が行われ、承認後に既存 WG に属して活動を開始する。

5.4 標準化における注意点

国際的な標準化は、相互運用性の確保や、効率や品質の向上に寄与し、国際的な規模で市場を拡大するために行う。また、全世界の英知を結集して技術の進化を促すとともに、新しいイノベーションを生み出す共通の基盤を創って共創を促す。更に知的財産関連は、特許関連の RNAD (Reasonable And Non Discriminatory: 合理的なライセンス条件で非差別的に解決する) 保障と、ロゴ使用許諾等を兼ね備えていることが多い。一方では、これらが差別化要素をなくし、価格を低下させる方向に働く。このような理由から、標準化に携わるメンバは、他社に貢献しているのではないと言われることがあるため、戦略的には次のポイントを抑える必要がある。

Bluetooth は仕様の必須要素に記述されるものはクロスライセンスとなる。このために、自社の技術に関して、Bluetooth 仕様の必須要素に記述して市場をけん引するものと、仕様のオプション部分に記述して自社特許を RAND のままとするものの、どちらを選択するかを考慮する必要がある (表 7)。前者は自分の得意な領域へ誘って先行者利益を得るか、Bluetooth 仕様の外側で勝負を行うものである。後者はオプションとするために差別化が可能となるが、オプションを推進するメンバーで普及させる必要がある。また、入れ込んだ IP に関しては、それを回収する組織を作って回収する必要がある。

6

Bluetooth 標準化活動への協力のお願い

6.1 AV (Audio Video) WG は日本メンバが中心で発足

Bluetooth は、PC と携帯電話の通信及びそれらの周辺機器との通信に対して、その有線が無線に置き換えることを目指して、半導体と携帯電話と PC のメーカを中心に推進が始まった。その頃日本では、DVD や SD カードなど、著作権を持ったコンテンツをハンドリングするためのメディアに対して、その覇権を争っていた時期となる。

日本のメンバは、Bluetooth 上で Audio を発展させるという利害が一致し、上記で争っている企業同士がこちらでは手を結び、皆で AV WG を立ち上げることとなった。現在の Bluetooth の主要な用途に Audio があるが、この Audio 用途は、日本のメンバが中心になってプロファイルを作成してはやらせたものである。PC で音楽再生と音声通話の切換ユーセージを見せ、携帯電話に搭載し、クラウドから音楽をダウンロードし、著作権保護を付けてヘッドフォンに転送し、ヘッドフォンはそのコンテンツに応じた再生を行った。今では、この Audio 用途が Bluetooth の最大勢力である。

6.2 Bluetooth SIG が推進するソリューション

現在、Bluetooth SIG は、応用例を四つのソリューションに大別して推進している。オーディオストリーミングは、ヘッドホン、ヘッドセット、スピーカなどから人の動きを制限するケーブルを取り去った。データ転送は、バッテリー駆動のセンサデバイスなどから好きなタイミングで送られてくるデータを収集し、様々な付加価値を提供できるようになった。デバイスネットワークは、Mesh サポートで複数路による信頼性と容易なシステム拡張が可能となった。位置情報サービスは、存在確認から方角推定を経て場所の特定ができるようになり、クラウド連携と共同捜査により資産追跡が可能となった。

また新しい応用例として、LE オーディオのブロードキャストである AURACAST^{*2} や、V5.4 で採用されたレスポンスを伴うアドバタイジングを用いた電子柵札への応用や、Mesh を用いたネットワーク照明制御などを推進している。AURACAST は、自分が聞いている音を大切な人と一緒に聞いて感動を共有したり、複数のモニタ画面から望むモニタの音を選択して視聴したり、自分の特性に合わせた音声アナウンスや会議内容や公演内容を聞くことができ、音声のアクセシビリティ向上も目指

* 2 AURACAST は商標。

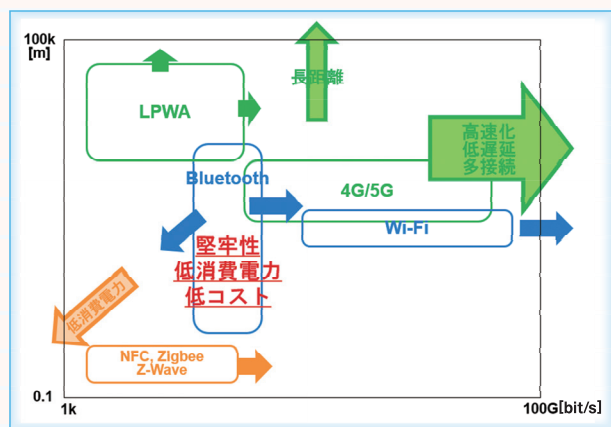


図1 各無線規格の距離と通信速度の関係

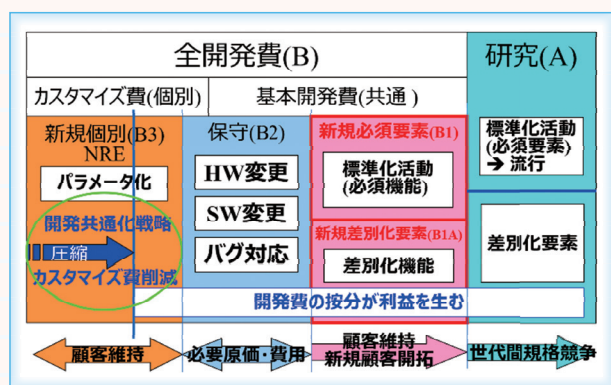


図2 標準化と差別化と研究開発と保守の関係

している。2024 年は AURACAST を全世界的に強力に推進していくこととなっている。

6.3 今後の Bluetooth 物理層の方向性

各無線規格の距離と通信速度の関係を図1に示す。現在の無線規格に求められていることは、高速化、低遅延、多接続、長距離、及び低消費電力などであり、それぞれの無線規格は自陣の特徴に向かって進化を続けている。

Bluetooth における低消費電力の領域は、既に LE で拡張しバッテリー駆動するセンサなどの様々なデバイスに搭載されているが、近年は更に低コストで環境発電駆動可能な IoT デバイスの推進を行っている。これにより、物理的な環境やセンサから得られるデータを基に、リアルタイムで環境や状況を把握し、コンテキストを意識して適切なアクションを起こすアンビエント IoT を推進する⁽⁶⁾。これを用いたサプライチェーンの領域では、食品や薬品など期限のある商品や返品可能な資産を多く扱う高速サプライチェーンを中心に実用化をスタートし、大幅な業務改善を目指している。

多接続の領域は LE の得意とするところであり、Mesh に加えて、低消費電力の方向に関しても V5.4 からバッテリー駆動が必要な電子柵札への推進が加速されている。これらは全て、多接続におけるデータ通信の信

頼性をどう考えるのか、誤り訂正やそのレスポンス確認と再送をどうするのか、という問題に帰着される。またこれらはデータの持つ特性によって選ばれ、あるときは外乱に対する堅ろう性や拡張性を優先して選ばれ、更にあるときは仕様外の論理層において誤り訂正を持つシステムとして実現される。またあるときは AURACAST のごとくストリームとみなし、パケットに誤りがあっても無音・雑音として処理し、実時間を優先して次のパケットを処理するシステムとして実現される。また、V5.4 で追加されたレスポンスを伴う定期的なアドバタイジングを用いると、通信の信頼性と効率性を考慮したシステムとして実現することが可能となる。

高速化と低遅延の応用領域に関しても標準化活動が加速されており⁽⁷⁾、メンバの提案するユースケースとユースナリオに従って、Bluetooth 仕様の三つの特徴に反しない適切な形で標準化活動が行われている。

長距離の領域は V5.0 で実現されており、既に数 km の通信を行うことが可能である。ただし、余り広報されないために知られておらず、皆の利用を待っている。ここは、通信頻度・通信占有率が低ければ、半径を広く取ることが全体のシステム費用と運用効率的に有利に働く、といったセル化への進化と逆の考えとなる。

6.4 標準化と研究開発と保守の関係

4. と 5. において標準化と差別化の二律背反する関係について述べたが、この二律背反の問題をいかに解決するかがポイントであり、ソフトウェア (SW) ライセンスを例にとり、標準化と差別化と研究開発と保守の関係を示す (図2)。

ビジネスの世界では、必須要素はコンペに必要な要素となり、差別化要素は選ばれるために必要な要素となる。このため、顧客維持や新規顧客開拓には新規機能開発が必要であるが、この開発内容を新規必須機能 (図2の B1) と新規差別化機能 (B1A) に区別して理解する必要がある。

また、顧客維持のためには個別開発も必要となるが、これらは共通開発費とは異なり NRE (Non-Recurring Engineering) 費用を頂いて開発を進めるべきものである (B3)。ただし、利益の根源は開発費の案分にあるため、費用案分できないものは避け、パラメータ化によって開発を共通化することでカスタマイズ費用を削減する。一方で、関係するハードウェア (HW) や SW 変更に伴う変更、バグ対応やセキュリティ対応・対策などにより原価処理や経費処理がリリース後も継続的に必要となることに注意が必要である (B2)。

標準化は、基本開発の必須機能をどこまで標準化として市場をけん引するかを決定する必要がある。またこれ

と同時に、次世代の規格に対する研究も、標準とする必須要素と差別化要素を区別して進めていく必要がある。

6.5 世界一を創って世界一になる

Bluetooth は誰もが購入・利用できるスマートフォンでデータを読み書きすることができ、統合開発環境を用いて誰もが自分の考えるアイデアを具現化したアプリを開発できることが強みである。ホストデバイスとアプリでユーザ認証と課金管理を行えるため、リーンスタートアップできる SW ライセンス事業などで新規事業を軌道に乗せた後、是非とも標準化活動に参加して頂きたい。

また、現在トップ集団に位置せず、市場影響力がない立場なら、逆に顧客要求に左右されることがないため、イノベーションのジレンマを利用した破壊的技術を物理層で創造するのが有効である。新しいデバイスを創造して新規市場を創造する際に Bluetooth を具備していれば、スマートフォンでアプリをダウンロードすることで、スマートフォンをデバイスやシステムのコントローラやモニタとして機能させることができる。このことは、ユーザやシステム管理者のみならず、新規事業創造者の重要な利便性の一つとなっている。研究の成果を是非とも事業の世界へ応用して頂き、世界一を創って世界一になって頂きたい。

7 おわりに

本稿では、Bluetooth 仕様の概要について述べ、仕様の読み方と新規仕様策定を行う意味を記述し、仕様の策定方法とクロスライセンス型の標準化における注意点に関して記述した。また今後の無線規格の方向性に関して触れ、標準化と研究と開発と保守の関係について記述し、事業の観点から必須要素と差別化要素に関して区別する必要があることを述べて、研究・開発・新規事業創造の一助とした。

標準化活動は企業における戦略の要であり、本稿をきっかけとして、『世界一を創って、世界一になろう！』

と思う方が一人でも多く増えてくれることを願っている。またこの言葉は、私が先進より受け継いだ言葉であることも記しておく。Bluetooth の標準化に関して、私にでき得ることがあれば何なりと協力するので、気軽に相談頂きたい。

■文献

- (1) Bluetooth SIG, “Bluetooth specification and documents.” <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/> (2023 年 12 月 17 日参照)
- (2) Bluetooth SIG, “Bluetooth technology overview.” <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/> (2023 年 12 月 17 日参照)
- (3) Bluetooth SIG, “Bluetooth core specification v5.4,” Jan. 2023.
- (4) クレイトン・クリステンセン, イノベーションのジレンマ, 翔泳社, 東京, 2001.
- (5) Bluetooth SIG, “2023 Bluetooth market update.” <https://www.bluetooth.com/2023-market-update/> (2023 年 12 月 17 日参照)
- (6) Bluetooth SIG, “3 Bluetooth innovations that will have major market impacts.” <https://www.bluetooth.com/blog/3-bluetooth-innovations-that-will-have-major-market-impacts/> (2023 年 12 月 17 日参照)
- (7) Bluetooth SIG, “Specifications in development.” <https://www.bluetooth.com/specifications/specifications-in-development/> (2023 年 12 月 17 日参照)

足立克己

1994 熊本大大学院博士課程システム科学専攻了。博士（学術）。同年（株）東芝入社。マルチメディア技術研究所にて Mobile PC アーキテクチャ関連の研究開発を行う。PC Card, SD Card 等の新規メディア、MPEG-4 を用いた画像通信モバイルデバイス、Bluetooth/Wi-Fi/DLNA 等の立ち上げ・普及に貢献。

Continua では Bluetooth を用いた SW 業事法改正など、日本での ICT ヘルスケアビジネスの創造にも貢献している。Bluetooth SIG 取締役会メンバ。



電波法上での新参者 WPT システムの制度化の実際

庄木裕樹 Hiroki Shoki (株) 東芝

1 電波法上での市民権のない 中での WPT の制度化

ワイヤレス電力伝送 (WPT) システムに関する研究開発の歴史は古く、1970 年代に太陽光発電衛星から地上へのマイクロ波による送電をターゲットとして進められてきた。しかし、WPT システムの実用化はここ最近の話である。2007 年にマサチューセッツ工科大による磁界結合方式 WPT を利用したワイヤレス電力伝送の発表⁽¹⁾をきっかけとして、電力伝送距離が最大でも数十 cm 程度のいわゆる近接結合方式 WPT (2. で説明) の実用化が始まった。身近な例では、スマートフォンの無線充電システムの商用化などもある。

一方、実用化に必須となる制度化に関しては、元々は、電波法上に WPT というカテゴリーがなく、言わば“市民権”がない状態であった。しかし、2010 年代から国内での制度化議論が活発に進められ、その結果として、2016 年に電気自動車などへの充電のための近接結合方式 WPT システムが制度化 (正確には電波法省令が改正) された⁽²⁾。更に、空間に電波を飛ばす空間伝送方式 WPT に関しても、2022 年に最初の段階 (ステップ 1) のシステムが制度化されている⁽³⁾。

さて、このように書いてしまうと、業界からの制度化要望に対して、制度化がスムーズに行われたように感じるかも知れない。しかし、近接結合方式 WPT にしても、空間伝送方式 WPT にしても、総務省の関連委員会における制度化議論の開始から約 3 年掛けてやっと制度化されたものである。なぜ制度化にそんなに時間が掛かったかと言うと、その理由の一つが、WPT が電波法上での新参者であったことが挙げられる。制度化における重要な議論項目は既存のほかの無線システムとの共用化になり、限られた周波数資源を有効に活用するためには、複数の無線システムとの周波数の共用化が必須になる。もし、共用化

の相手となる双方の無線システムが既に電波法上で明確なポジションのあるものであれば、対等の立場で共用化の検討や対策を行うことになるが、電波法上で“市民権”のない WPT に関しては、既存の無線システムと対等の立場ではなく、WPT の制度化をしようとする、周波数的に影響のあるほかの無線システムに影響がないことを証明するか、若しくは影響がない条件で利用することが求められる。場合によっては、既得権益者である無線システムの関係者からは、新参者の WPT は干渉を与える可能性のある相手として、強い警戒感を持って対応されることがある。WPT 側としては、決して、ほかの無線システムへの干渉を与えることがないように対策等をしているつもりでも、ほかの無線システム側の関係者はその干渉影響をシビアに見てくるため、制度化議論がかなり慎重になっている。

同様のことは、国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) など国際協調の場でも起きている。例えば、共用化検討は、英語では“Sharing study”とか、“Co-existence study”と言うのが一般的であるが、これは電波法上で同等の位置にある無線システム同士の間で使う言葉であり、共用化を行う双方の無線システムが互いにシステム上のマネジメントや技術的な対策など行うことで共用化を図ろうというものである。一方で、電波法上に“市民権”のない WPT は立場が弱く、共用化検討は“Impact study”という言い方をされ、WPT が他システムに与える影響のみを考え、共用化の対策も WPT 側のみが行うことになる。

WPT の国内外での制度化には、以上のような高いハードルがあり、いかにほかの無線システムの関係者を納得させるかというのがポイントになる。本解説では、実際の制度化がどのように進められたか、そのときの苦労話なども含めて説明したいと思う。

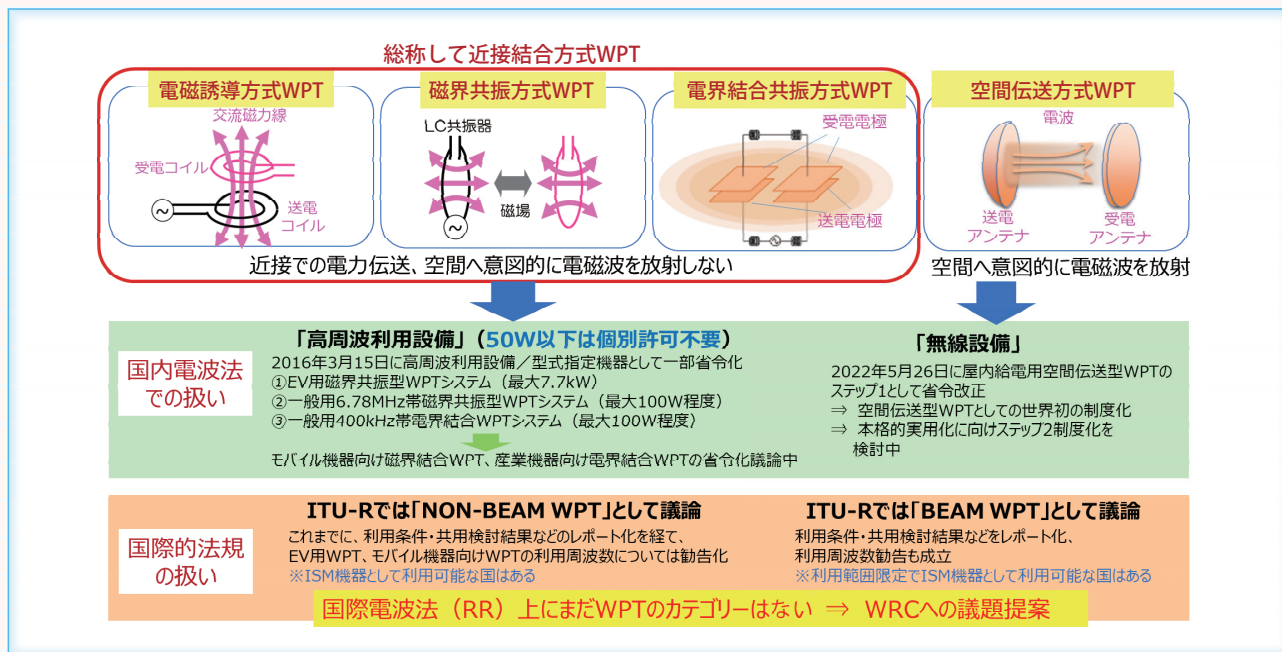


図1 WPT方式の概要と現在の電波法上での取扱い

2 電波法上でのWPTの扱い

最初にWPTの技術方式の概要、各WPT方式が電波法上でどのような扱いになっているかを説明する。

図1に示すように、WPTの技術方式は、電力伝送距離がせいぜい数十cm以下の近接結合方式WPTと、逆に意図的に電波を放射させて遠くまで電力伝送を行う空間伝送方式WPTに大きく分けることができる。技術方式の詳細は他文献⁽⁴⁾に譲るとして、ここではこの二つのWPTについて、電波法上での扱いについて説明する。

- (1) 近接結合方式WPT: 国内電波法においては、意図的に電磁波を空間に放射するものではないということで、通信を主体にするものでなければ「高周波利用設備」として扱われている。高周波利用設備は本来、個別許可が必要になるが、高周波出力が50W以下であれば個別許可が不要になる。現在、市場に出回っているスマートフォン向けの非接触充電装置は50W以下であり、個別許可不要の高周波利用設備であるということになる。50Wを超える出力のWPTシステムについては、個別許可を得ることで利用可能になるが、個別許可を必要としない型式指定機器として、2016年に電気自動車(EV)用WPTなど三つのWPTシステムが制度化されている。
- (2) 空間伝送方式WPT: 電波を意図的に放射する機器になるため、電波法上では「無線設備」の扱いになる。これまでは実験局以外では利用できなかったが、2022年に屋内給電用空間伝送方式WPTの最初の制度化(ステップ1)が行われた。IoT

センサ機器などへの充電が主な応用である。現在は、屋外利用も含め、利用範囲を拡大することを目指した次段階のステップ(ステップ2)の制度化について産業界で検討を行っている。

なお、ITU-Rにおいては、近接結合方式WPTは“NON-BEAM WPT”，空間伝送方式WPTは“BEAM WPT”として各々分類され、共用化検討を含めたレポートや利用周波数の勧告化などが策定されている。しかし、国際電波法(RR: Radio Regulations)の中では、WPTとしての明確なカテゴリーはまだ存在していない。そこで、RR上でWPT位置付けを明確化するために、RRの改訂について世界無線通信会議(WRC)で議論するよう求める働き掛けを日本を中心に進めてきた。その結果、2023年11月から12月にかけて開催されたWRC-23において、WPTに関するRR改訂が2031年に予定されるWRC-31の暫定議題となった。

3 WPTの国内制度化の進め方

次に、日本国内における制度化に向けた議論体制や進め方について説明する。

図2に、総務省におけるWPT制度化のための議論体制を示す。電波法関連の制度化議論は、総務省の情報通信審議会の下の情報通信技術分科会の各委員会で行われている。前述したWPTの方式によって制度化の議論を行う委員会が異なり、空間伝送方式WPTについては陸上無線通信委員会、近接結合方式WPTについては電波利用環境委員会で議論が行われている。制度化のための共用化検討などの技術検討は各委員会の下に組織される

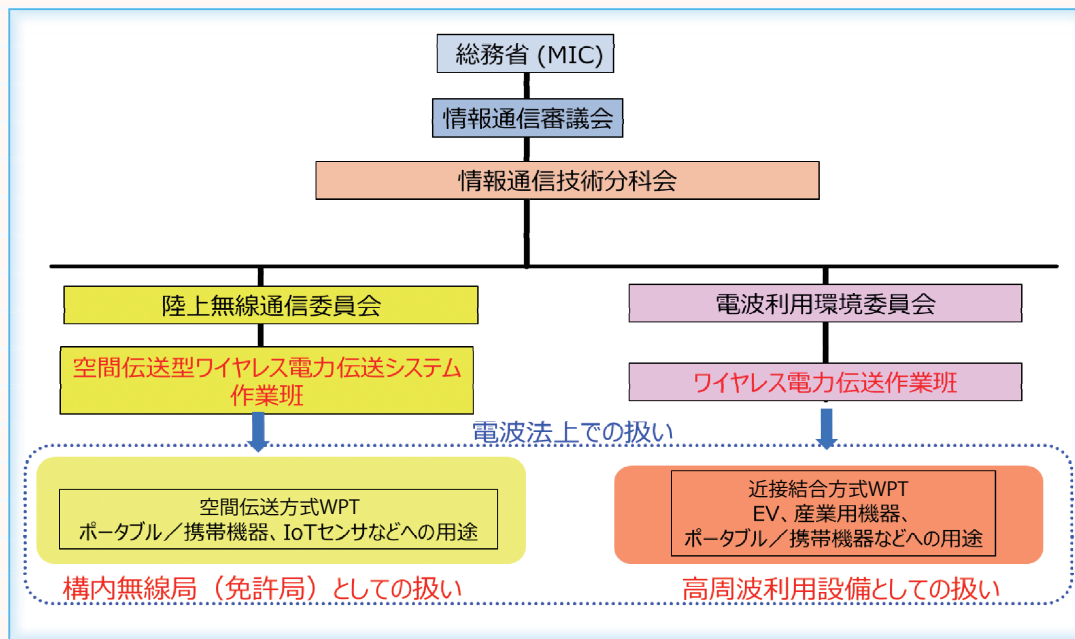


図2 総務省における WPT 制度化のための議論体制

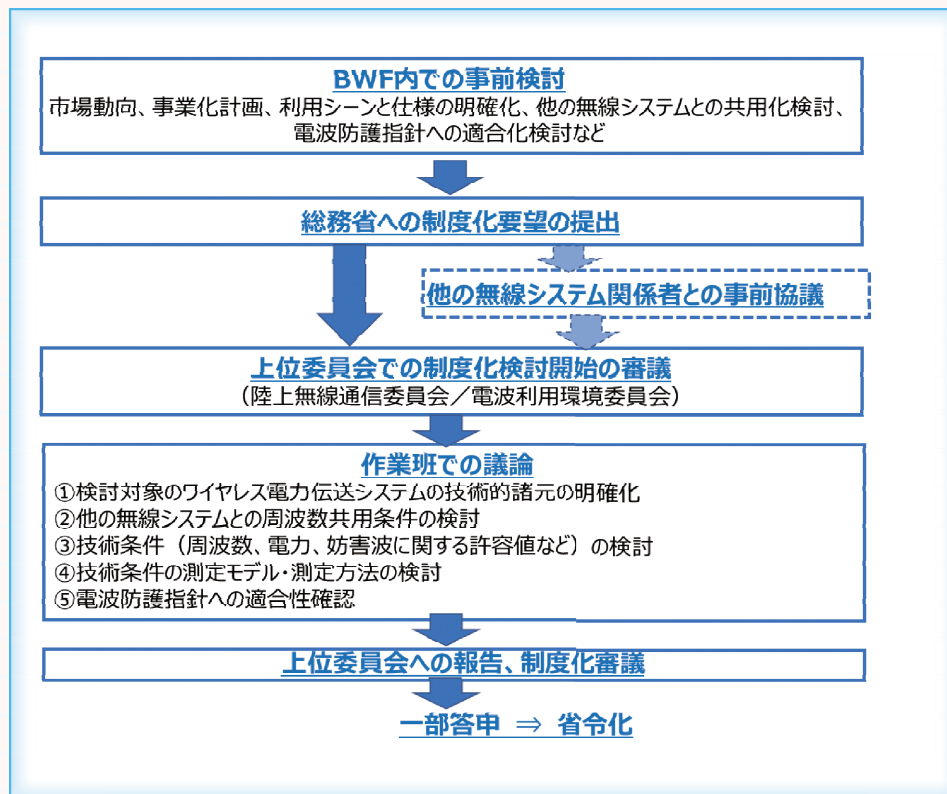


図3 WPT 制度化までの一般的な流れ

作業班において議論される。

次に、実際の制度化までの議論の進め方について、図3を用いて説明する。WPTシステムの制度化に関しては、業界団体であるブロードバンドワイヤレスフォーラム（BWF）⁽⁵⁾がWPT関連企業や組織をまとめ、その代表として、総務省への制度化提案、作業班議論への参画など行っている。制度化に向けた流れは以下のとおりである。

- (a) BWFにおける事前検討：制度化として要望するWPTシステムの利用ケースなどを精査して、その仕様や機能を明確化し、他システムとの共用化、電波防護指針への適合性についての事前検討を行う。
- (b) 総務省への制度化要望：上記(a)での結果を基に、総務省へ制度化要望を提出する。オフィシャルには、陸上無線通信委員会若しくは電波環境委員会



(1) EV 用磁界結合方式 WPT 利用イメージ



(2) 6.78 MHz 帯磁界結合方式 WPT 利用イメージ



(3) 400 KHz 帯電界結合方式 WPT 利用イメージ

図4 2016年に制度化されたWPTシステムの利用イメージ

※写真引用 (1) 産業競争力懇談会 2016 年度推進テーマ「ワイヤレス電力伝送の普及インフラシステム」最終報告書
(2) 及び (3) 情報通信審議会ワイヤレス電力伝送作業班第 5 回資料 5-4-2

の中で制度化要望について説明し、審議して頂くことになる。

- (c) 上位委員会での制度化開始の審議と作業班組織化：委員会での審議の結果、制度化検討が進められることが決定されると、各委員会の下に作業班が組織される。具体的には、空間伝送方式 WPT については空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班⁽⁶⁾、近接結合方式 WPT についてはワイヤレス電力伝送作業班⁽⁷⁾となる。本来は、作業班が組織された後に、技術検討が行われるが、場合によっては、総務省が作業班開始の前に事前協議（共用相手のほかの無線システムの関係組織との事前の検討）を求めてくることもある。
- (d) 作業班における技術検討：作業班において、制度化に向けた各種の技術検討が行われる。検討内容としては、①検討対象のワイヤレス電力伝送システムの技術的諸元の明確化、②ほかの無線システムとの周波数共用条件の検討、③技術条件（周波数、電力、妨害波に関する許容値など）の検討、④技術条件の測定モデル・測定方法の検討、⑤電波防護指針への適合性確認、になる。このような検討を行うために、作業班の構成員は、BWF など WPT 制度化推進側の関係者、共用相手の無線システムの関係者、測定などを含む技術条件の検討の関係者（例えば、国際無線障害特別委員会（CISPR）の国内委員会関係者）により構成される。なお、作業班の議論は通常、公開で実施される。
- (e) 上位委員会での作業班検討結果の報告及び制度化審議：作業班での検討結果を関係する上位委員会に報告され、審議される。制度化の方向になる場合には、委員会報告書案の審議も行われ、制度化の内容（省令案）などについても審議される。通常は、報告書案、制度化の内容について公開され、一般からの意見募集（パブリックコメント）も求

める。そのため、1 か月程度の意見募集期間を経て、再度委員会が開催され、最終的な制度化に向け確認される。

- (f) 情報通信審議会からの一部答申：最終的な制度化の決定は情報通信審議会で行われ、「情報通信審議会からの一部答申」として総務省へ提出される。総務省はその一部答申を受け、速やかに制度化することになっている。

4

作業班における制度化議論の実際

この章では、作業班で実際にどのような議論が行われたかについて説明する。作業班では、電波防護指針への適合性などについての議論も行われるが、ここでは他システムとの共用化検討に関する議論の実際に焦点を絞る。その例として、2016 年 3 月 15 日に高周波利用設備の型式指定機器として制度化された以下の三つの WPT システムに関する議論の実際について説明する。

- ① EV（電気自動車）用磁界共振方式 WPT システム（最大 7.7 kW）
- ② 一般用 6.78 MHz 帯磁界共振方式 WPT システム（最大 100 W 程度）
- ③ 一般用 400 kHz 帯電界結合方式 WPT システム（最大 100 W 程度）

各利用イメージは図 4 に示すとおりである。

これらの WPT システムの制度化に向けた技術検討のための WPT 作業班は 2013 年 6 月に開始された。当初は、2014 年 7 月に情報通信審議会に上程、2014 年中の制度化の予定であったが、共用相手からの要求もあり、共用化検討を慎重に進めたため、実際の制度化までに予定から 1 年半程度の時間が掛かった。

表 1 には、この作業班で検討された WPT システムと共用化の相手の無線システムについて、利用周波数帯も含めて記載している。最終的には、WPT 推進側での絞

表 1 WPT 作業班で検討された WPT システムと共用相手の無線システム

WPT の利用形態・周波数（与干渉側）		周波数共用検討の必要なシステム（被干渉側）
家電機器用 WPT ② （家庭・オフィス機器）	20.05-38 kHz	電波時計（40 kHz, 60 kHz）、列車無線等（10-250 kHz）、 AM ラジオ（525-1,606.5 kHz）
	42-58 kHz	
	62-100 kHz	
電気自動車用 WPT	42-48 kHz	
	52-58 kHz	電波時計（40 kHz, 60 kHz）、列車無線等（10-250 kHz）、 アマチュア無線（135.7-134.2 kHz）、AM ラジオ（525- 1,606.5 kHz）
	79-90 kHz	
	140.91-148.5 kHz	AM ラジオ（525-1,606.5 kHz）、船舶無線等（405-526.5 kHz）、アマチュア無線（472-479 kHz）
家電機器用 WPT ③ （モバイル機器）	425-524 kHz	
家電機器用 WPT ① （モバイル機器）	6,765-6,795 kHz	固定移動通信（6,765-6,795 kHz）

り込みなどもあり、黄色枠で示した WPT システムと利用周波数帯が制度化されている。ここで、特徴的なことは、共用相手のほかの無線システムの選定には、WPT の利用周波数と同一周波数帯だけでなく、隣接周波数帯や WPT 利用周波数の高調波に対応する周波数帯に関係する無線システムも選ばれている。この各無線システムに対応する組織・団体との共用化に向けた協議を行うが、その流れとしては、WPT システム側の不要放射などに関する測定データなどを基に机上計算による共用化検討を行い、必要がある場合には、共用化のための実験を行い確認するというものになる。

この中で特に、電気自動車（EV）用 WPT に関係する無線システムとの共用化検討の最終結果を以下にまとめる。

- ① 電波時計：電波時計の周波数 40 kHz, 60 kHz から離れた周波数帯で WPT 機器を運用することで共用可能に。
- ② 鉄道無線：信号保安設備（ATS 等）については、共用検討の結果、線路から約 5 m 離すことが必要に。誘導式列車無線については鉄道設備から数十 m 離すことが必要に。
- ③ 中波放送（AM ラジオ放送）：隣家（距離 10 m）の屋内において背景雑音以下に放射妨害波レベルを下げることを条件に検討。試験を実施し、AM ラジオへの影響について確認。製造者側で WPT 機器からの高調波低減化を努力することで共用可能に。

これらの結論だけ見ると、簡単に得られた結論であるように見えるが、ここに至るまで、関係者との間で慎重な、場合によっては厳しい議論があった。

電波時計の場合には、EV 用 WPT システムによる充電と電波時計の時刻合わせが同時に行われる場合には、WPT 側から干渉を与える可能性がどうしてもあったが、EV 用 WPT システムが充電のために動作している時間と電波時計の時刻合わせの時間が重なる可能性は低いことなどから、電波時計の関係者へ共用化に問題が現実的ではないことを何とか納得頂いた。

また、列車無線に関しては、鉄道の安全運行に関わるシステムであるために、かなり慎重な検討を行った。特に ATS に関しては、最終的に鉄道事業者から機器を提供して頂き、そのそばで WPT システムを動作させ、ATS 側への干渉を確認する実験を実施した。EV 用 WPT は大きなシステムになり、実験のための ATS 側の機材も多く、また、この実験には EMC 測定専門の測定サイトで行うことも必要になり、この実験には時間と費用も掛かっていた。実験の結果から、机上検討の結果の妥当性を確かめることはできたが、ATS 側への干渉を回避するためには、ATS 装置から約 5 m 離す必要があることが明確になった。しかし、ATS 装置の設置場所は線路のどこにあるかを特定することができないため、線路そのものから EV 用 WPT システムを 5 m 以上離すということが、制度化における条件になった。

次に、中波放送に関しては、放送事業者側から、WPT システムからの高調波成分による不要放射により、AM ラジオ放送に影響が出ることに対して大きな懸念が指摘され、これも慎重な検討が行われた。机上検討により、放送事業者側から、WPT システムから発生する不要放射のレベルが AM ラジオの受信アンテナ端において環境雑音以下であれば許容できる、という条件を提示

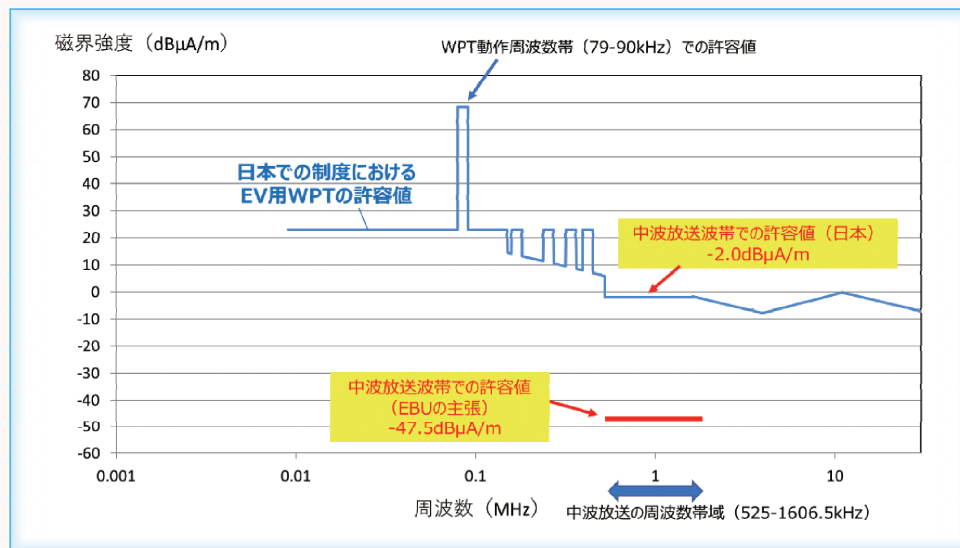


図5 EV用WPTからの放射妨害波の許容値の比較（10 mにおける磁界強度）

して頂き、WPTシステム側で高調波成分の低減化も努力することを前提に納得して頂いた経緯がある。実際に、WPTシステム動作時におけるAMラジオの受信状態に関する試聴試験も実施した。

以上説明したとおり、WPTシステムの制度化議論においては、影響を受ける可能性がある共用相手の無線システム側の関係者がどうしても慎重になるため、制度化議論に時間が掛かってしまう実情がある。ただし、WPTシステムが我が国の産業振興や国民の利益にもなる技術という点については、御理解を頂き、制度化に向けた多大な協力も頂いており、共用化相手の関係者の皆さんにはとても感謝している。空間伝送方式WPTのステップ2の制度化の議論など今後の制度化予定の案件も多く、その検討には共用相手の無線システム関係者の協力なしには進めることができないので、良い連携関係を維持しつつ対応していきたいと考えている。

5 国際協調の場での議論の実際

国際電波法（RR）上に、WPTのカテゴリーは明確になっていない状態であるが、ITU-Rの周波数管理に関する研究委員会（SG1）においては、WPTシステムに関する共用化検討のレポート策定やWPTの利用周波数のガイドラインとしての勧告化は行われている⁽⁸⁾⁻⁽¹²⁾。現在の各国のWPTシステムの国際協調議論に対する姿勢としては、日本、韓国、米国、ドイツ、ブラジルなどの推進側とイギリス、中国など慎重側に分かれており、その両者間で議論を戦わせているという状況である。推進側の国は、基本的に国内にWPT製造企業があり、実用化に積極的な国である。一方、イギリスなどのよう

に、影響を受ける可能性のある放送システムなど既存の無線システム側の意見が強い国は、WPTに関する国際協調議論に対して慎重である。中国については、国内にWPTを実用化しようと検討している企業などはあるのだが、国内における検討が終わるまでは（国内規格などができるまでは）、国際協調議論をできるだけ進めないようにするという中国政府の考えが見え隠れしている。また、従来はどちらかと言うと推進側だったロシアが、ここ1～2年は慎重側に変わってきた印象がある。多分、ウクライナ情勢の影響で、ITUなど国際機関の重要ポジションからロシア代表団が締め出されそうな雰囲気があり、その影響かもしれない。

以上のような背景の中で、WPT推進側と慎重側の間で厳しい議論が行われている。その一例として、EV用WPTの放射妨害波の許容値をITU-Rで勧告化するという動きがあったので、その具体的な内容について紹介する。この勧告化の提案は、欧州放送連盟（EBU）から議題提案があったもので、中波放送システムの周波数帯域（525～1,606.5 kHz）におけるEV用WPTからの不要放射をできるだけ下げたいという意図があった。各無線システムの妨害波の許容値やその測定法は、そもそもEMCの専門家で組織化されている国際無線障害特別委員会（CISPR）で国際規格化されており、既にEV用WPTの放射妨害波の許容値についてCISPRで議論されている中でのこの提案は、日本やWPT推進側にとってはとても違和感のあるものであったが、EBUをサポートする欧州の国もあり、結局、議論が開始されることになった。その中での日本とEBUの主張を以下に列記する。

- (1) 日本の主張：中波放送システムの周波数帯域におけるEV用WPTの放射妨害波の磁界強度の許容値を-2.0 dB μA/m（測定距離10 mでの値）に

する。この提案は日本国内で制度化された許容値と同じであり、EV 用 WPT が主に利用される都市部において、EV 用 WPT からの不要放射が、隣家（離隔距離を 10 m に設定）内で受信する AM ラジオの受信アンテナ端において、ITU-R 勧告に基づく環境雑音以下にするという条件の下で導出された許容値になっている。放送電波の建物内への侵入損などの緩和要素も加味されている。

- (2) EBU の主張：日本の主張に対して、許容値を $-47.5 \text{ dB } \mu\text{A/m}$ （測定距離 10 m での値）とするものである。この数値の根拠は、放送波が一番弱い場所（例えば山間部）での最低の放送波の受信強度を基準に、どんな信号でも良好に受信可能な信号対妨害波比（SI 比）及び放送波と干渉波の周波数差による信号劣化を避けるための干渉波低減量を加算したものになっている。

上記の二つの提案を図 5 に図示する。この図から、まず 40 dB 以上の差があることに驚かれると思う。日本提案は実際に使う環境を考慮したもので、ほぼ大多数のラジオ受信ユーザに対して深刻な影響を与えることがないものであると自負しているところである。先に述べたように、試聴実験においても確認している。一方、EBU の提案は、WPT 側にとって最悪の利用環境（多分 WPT 利用者はほぼいない）において、最悪条件での足し算をした結果の値になっており、どんな状況にある環境でも、100 % のラジオ受信ユーザに対して影響を与えないようにすべきという主張になっている。実は、この最悪条件を重ね合わせた結果の数値であるが、一般的な測定装置・測定条件では測定できないレベルになっており、（図 5 において、一般的な受信機のノイズフロアは $-30 \text{ dB } \mu\text{A/m}$ 程度になる。）そもそも通常の AM ラジオでは検知できないレベルのものである。筆者も ITU-R の会議において、何回かこの問題は指摘してきたが、余り素直に受け入れてもらってはいない。また、違う視点では、そもそもイギリスを除いた欧州各国では、フランスやドイツなど中波放送は既に停波しているところが多く、気持的にはそこまで厳しくしなくてもと考えるのが率直なところである。

以上のような厳しい議論が続けてきたが、ITU-R における EV 用 WPT の放射妨害波の許容値の勧告化の議論は 2021 の ITU-R SG 1 会合において中止されることになった。二つの主張が平行線のまま折り合いがつかなかったこと、EBU の主張をサポートする国がなかったこと、逆に日本の主張に対しては米国がサポートし、勧告化に消極的な姿勢を示したことによる。放射妨害波の許容値の議論は、本来の議論の場である CISPR で行われている。

ところで、ITU-R など国際会議では日本代表团として提案し、意見することになる。そこで、会議前から会議期間中も、日本代表团として密接に情報交換・意見交換なども行い対応している。例えば、会期中のほぼ毎日、会議後には夕食をとりながら、当日の会議の復習と翌日に向けた作戦会議なども行ってきた。また、推進側、慎重側のどちらに対しても、他国・他組織の代表团との意見交換は必須であり、会議の裏側での打合せなども頻繁に行ってきた。ただし、ここ数年は、オンラインの会議が多く、現地でのこのような活動ができないことが多くなり、実質的な議論が進みにくい状況であるのが残念なところである。今後、対面での会議がまた増えていくと思うので、相手を限らず、密接で良い関係を作っていきたいと考えている。

6

円滑な制度化・国際協調議論を心掛けたい

ここまで説明したように、WPT システムの制度化や国際協調議論では、既得権益者と言える組織・団体から既存システムを守ることにに対する意見・要求が強いこともあり、いつも厳しい議論になるのが実情である。しかし、決して、ほかの無線システムへ悪い影響を与えることがないことを前提に検討しているので、この点を今後も丁寧に説明し、理解して頂くことが重要である。また、WPT システムを利用することにより社会への貢献、例えば、脱炭素化や安心・安全な社会に向けて有効であること⁽¹³⁾も主張していき、一般の方々にも WPT の利用効果を理解して頂くことも重要かと思われる。読者の皆さんにも、このような活動を行っていることを御理解頂き、今後、何かしらの御協力を頂ければ幸いと考えている。

文献

- (1) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Sci.*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, July 2007.
- (2) 総務省, “国際無線障害特別委員会 (CISPR) の諸規格に関する情報通信審議会からの一部答申—電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件—,” March 2016. https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban16_02000100.html
- (3) 総務省, “電波法規則の一部を改正する省令について—空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの導入に係る制度整備— (概要),” March 2022. https://www.soumu.go.jp/main_content/000815075.pdf
- (4) 庄木裕樹, “IoT 社会に貢献するワイヤレス電力伝送技術,” *信学誌*, vol. 103, no. 10, pp. 1009-1015, Oct. 2020.

- (5) ブロードバンドワイヤレスフォーラム . <https://yrprd.or.jp/bwf>
- (6) 空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班 . https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/idou/b_wpt_wg.html
- (7) ワイヤレス電力伝送作業班. https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/denpa_kankyou/wpt.html
- (8) ITU-R: Report ITU-R SM.2303-4, “Wireless npower transmission using technologies other than radio frequency beam,” 2023. <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2303-4-2023>
- (9) ITU-R: Report ITU-R SM.2449-0, “Technical characteristics and impact analyses of non-beam inductive wireless power transmission for mobile and portable device,” 2019. <http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2449-2019>
- (10) ITU-R: Report ITU-R SM.2451-0, “Assessment of impact of wireless power transmission for electric vehicle charging on radiocommunication services,” 2019. <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2451>
- (11) ITU-R: Recommendation ITU-R SM.2110-1, “Guidance for the use of frequency ranges for operation of non-beam wireless power transmission for electric vehicles,” 2019. <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.2110/en>
- (12) ITU-R: Recommendation ITU-R SM.2129-0, “Guidance on frequency ranges for operation of non-beam wireless power transmission systems for mobile and portable devices,” 2019. <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.2129/en>
- (13) SIP 第 2 期課題：IoE 社会のエネルギーシステム研究開発成果等報告書, “ドローン WPT システム,” “センサネットワークおよびモバイル機器への W P T システム , 2022. https://www.jst.go.jp/sip/p08_result.html

庄木裕樹 (正員：フェロー)

昭 57 北大・工・電子卒. 昭 59 同大学院修士課程了. 同年 (株) 東芝入社. 以来, アンテナ, 無線システム, ワイヤレス電力伝送などの研究開発及び制度化・標準化活動に従事. 現在, 同社研究開発センター上席エキスパート. 博士 (工学). 平 3 年度本会学術奨励賞, 平 13 年度本会論文賞各受賞



国際電気通信連合（ITU）と 国際的な周波数管理について ～世界無線通信会議（WRC）を例に～

総務省

林 祐二郎 Yujiro Hayashi

1 まえがき

携帯電話サービス、テレビ放送、衛星放送、GPS（Global Positioning System）等、私たちの身の周りには無線サービスが多数存在し、人々の生活に欠かせないものとなっている。

電波は、電波法第2条に「三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう」と規定されており、情報通信に利用可能な周波数帯域は有限である。また、同一周波数の電波で複数の通信を同時に行うと混信するため、周波数帯によってその用途や利用方法を定め、それぞれに利用されるシステム同士が干渉を起こさず適正に利用できるようにする必要がある。更に、電波は長距離でも空間を伝搬することから、国境を越えて混信が発生する危険性もある。よって、国内のみならず、国際的にもその用途や利用方法を定める必要がある。

標準化というと、技術規格を想起しがちであるが、電波の世界では、周波数の使い方を決めること、すなわち周波数管理が広義の標準化として捉えられることがある。本稿では標準化の違った側面である周波数管理、特にその国際的な実態について情報通信分野を志す学生や若手研究者・技術者に向けて解説したい。（一部に、筆者の個人的な主観に基づくものが含まれることは御容赦頂きたい。）

2 ITU について

国際的な周波数管理は、情報通信分野の国際機関である国際電気通信連合（ITU: International Telecommunications Union）で実施されている。ITU は、国際連合の専門機関の一つであり、2024 年 1 月現在、193 か国の加盟国と、900 を超える民間企業、大学、研究機関等の各種機関が参加している。ITU の組織図を図 1 に示す。

2.1 全権委員会議・理事会

ITU では、加盟国から成る各種会議で、必要な事項を取り決めている。最高意思決定機関である「全権委員会議（PP: Plenipotentiary Conference）」は、ITU 憲章・条約の改正、予算及び経費の限度額の設定、事務総局長、次長、理事会の構成国、各部門の局長、無線通信規則委員会委員の選出等を行うため、4 年に一度開催されている。その下に、48 の理事国で構成される「理事会（Council）」が設置されており、理事会は、ITU 全体の組織予算等について調整し、全権委員会議に対して提案するとともに、ITU の各部門の事業について報告するため、毎年開催されている。

2.2 実務を担う 3 部門

更に、ITU には、実務機関として、無線通信技術の標準化、周波数分配に関する検討を行う無線通信部門（ITU-R: ITU Radiocommunication Sector）、電気通信技術の標準化を行う電気通信標準化部門（ITU-T: ITU Telecommunication Standardization Sector）、電気通信インフラの開発支援を行う電気通信開発部門（ITU-D: ITU Telecommunication Development Sector）の三つの部門が設置されている。

各部門における活動の基本的な流れは、まず、4 年ごとに「総会」に当たる無線通信総会（RA: Radiocommunication Assemblies）、世界電気通信標準化総会（WTSA: World Telecommunication Standardization Assembly）、世界電気通信開発会議（WTDC: World Telecommunication Development Conference）が開催され、4 年間の活動計画や、研究課題、研究体制を決定する。その後、それぞれの分野ごとに設置された研究委員会（SG: Study Group）で研究課題を検討し、必要に応じ、勧告等が作成される。

上述のとおり、ITU は、この 3 部門で、有線・無線に関する様々な勧告を作成しており、この活動全般を「ITU における標準化活動」と称することが多い。他方、

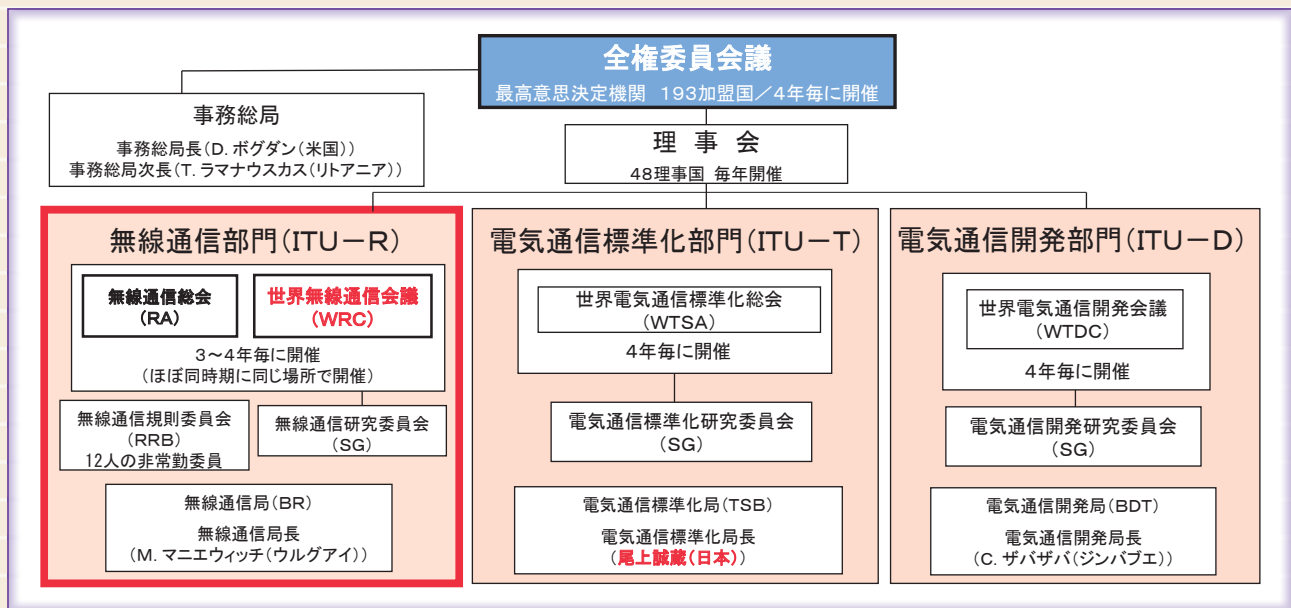


図1 国際電気通信連合（ITU）の組織図

序文で触れた国際的な周波数管理は、ITU-Rが定める無線通信規則（RR: Radio Regulations）に基づき、ITU-Rで行われている。ITU-Rは他部門と異なり、無線通信総会とは別に、RRを改正するための世界無線通信会議（WRC）を開催しているが、これはまさに周波数管理がITU-Rの大きな役割の一つであることを意味している。

3 ITUにおける無線関連ルールについて

3.1 概要

ITU加盟国が従うルールは、加盟の条件でもある憲章・条約を頂点として定められており、無線関係では主に以下のものがある。

①憲章（Constitution）及び条約（Convention）

ITUの組織役割等を定めた活動の基礎となる条約。憲章では目的・組織・役割等を定め、条約では運営・手続き等を定めている。無線通信規則の改廃手続き等もここで規定されている。

②無線通信規則（RR: Radio Regulations）

ITU憲章・条約を補足する規則であり、無線通信に関する国際的な取決め、加盟国を拘束する義務規則として規定されている。

③ITU-R勧告（Recommendation）

無線システムの技術・運用等の課題に対するITU-R SGの研究成果として作成される文書。RR中に条文として明確に規定されたものを除き拘束力を持たないが、無線局の技術的特性など、可能な限り関係勧告に従うことが求められる場合がある。

3.2 RR

これらのうち、周波数管理で最も基本となる規則はRRである。RRは4巻構成であり、第1巻が条文本体、第2巻がその付録、第3巻はWRCで作成された決議及び勧告、第4巻はRR条文に参照されるITU-R勧告を掲載している。（上述した③の文書のうち、拘束力を持つものである。）

RRは、周波数の割当と使用、国際的な周波数分配、周波数の国際調整手続き、周波数割当の登録、有害な混信の除去、無線局の運用等に関する国際的な取決め等を規定した文書であり、詳細な国際周波数管理の方法が定められている。

具体的には、世界の地域ごと及び周波数帯ごとに、無線を使用したどの業務（固定業務、移動業務、固定衛星業務、移動衛星業務、放送業務、無線航行業務、無線評定業務、宇宙運用業務、地球探査業務等）に周波数を分配するか、各業務を行う無線システムにつき、どのような電力、変調方式等の技術基準を適用し、どのように運用するか、国際的な周波数調整が必要な場合にどのような手続きでそれを行うか等が規定されている。

中でも、国際的な周波数分配について規定しているのは、RR第5条である。同条では、図2のように、全世界を第1地域（主に欧州、アフリカ、中東、旧ソ連諸国等が含まれる）、第2地域（主に南北米州等が含まれる）及び第3地域（主にアジア太平洋地域、オセアニア等が含まれる）の三つの地域に分けて規定している。

その上で、図3に例示されるように、8.3 kHz以上275 GHz以下の周波数について、周波数帯域を区分し、それぞれの地域、周波数帯域ごとに、当該周波数帯域を使用可能な業務、それぞれの業務で周波数を使用する際

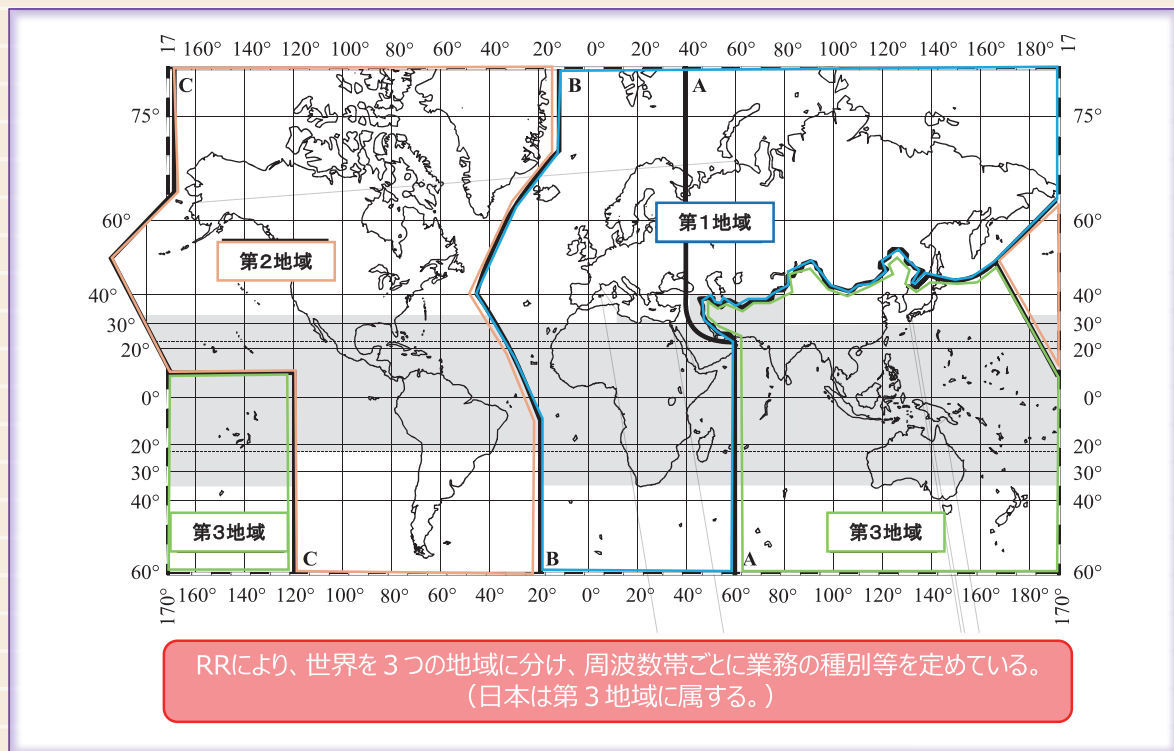


図2 RRにおける地域区分

RR

Vol.4 (RRに引用されたITU-R勧告)

Vol.3 (決議・勧告)

Vol.2 (附属書)

Vol.1 (条文)

Radio Regulations

Allocation to services		
Region 1	Region 2	Region 3
890-942 FIXED (固定通信) MOBILE except aeronautical mobile 5.317A (移動通信) BROADCASTING 5.322 (放送) Radiolocation	890-902 FIXED MOBILE except aeronautical mobile 5.317A Radiolocation 5.318 5.325 902-928 FIXED Amateur Mobile except aeronautical mobile 5.325A Radiolocation 5.150 5.325 5.326 928-942 FIXED MOBILE except aeronautical mobile 5.317A Radiolocation 5.325	890-942 FIXED MOBILE 5.317A BROADCASTING Radiolocation
5.323		5.327

図3 RRによる周波数の国際的な分配

の条件等を詳細に定めている。

ここで補足すると、周波数管理の世界では一般的に、「分配」(Allocation)は、どの周波数をどの業務に使用できるようにするか、あらかじめ決めることを意味する。一方、「割当」(Assignment)は、個々の無線シス

テムや無線局が使用可能な周波数を具体的に指定することを意味する。したがって、RRが規定するのは周波数の「分配」であり、各国主管庁が国内の無線システムや無線局に行うのは周波数の「割当」である。すなわち、RRで規定された周波数分配の範囲内であれば、どの無

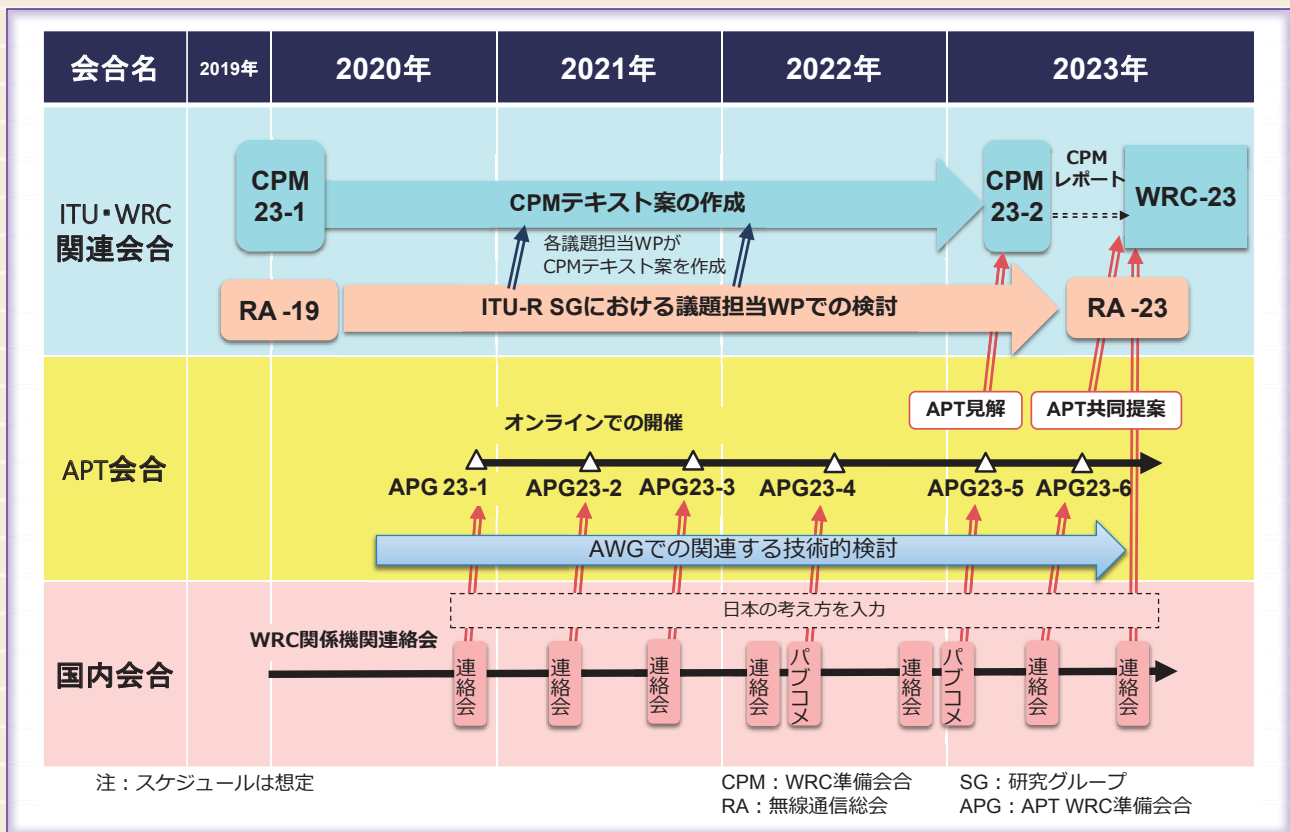


図4 WRCに向けたスケジュール（WRC-23の場合）

線システムにどの周波数を割り当てるかは各国主管庁の裁量に委ねられる。例えば、RRで移動業務と規定された周波数を、携帯電話、行政無線など様々な移動通信システムのうちどれに割り当てるのかは各国が決めればよい。また、こうした国内の周波数管理のために各国は国内法を整備しており、日本では電波法がこれに当たる。国際分配と国内の割当は別の話ではある。とはいえ、電波法は、国際的な取決めであるRRの考え方や構造が反映された内容となっていることから、RRが改正される場合には電波法または関連法令の改正も必要になることがある。

4 WRCについて

4.1 概要

国際的な周波数分配を変更するには、RRを改正する必要がある。RRの改正は、世界無線通信会議（WRC: World Radiocommunication Conference）で取り扱われる。

WRCは、多くの加盟国が参加し、3～4年（近年は4年）に一度開催される。開催期間は4週間にわたり、参加者数も約3,000人以上となるITUにおける最大規模の会議である。WRCは、開催された年により、例えば2015年に開催されたものをWRC-15、2019年に開

催されたものをWRC-19というように呼称している。

昨年のWRC-23は、アラブ首長国連邦のドバイで開催され、163の加盟国から3,900人以上、日本からは総務省職員、民間事業者等を含めて約130人が参加した。

4.2 WRCに向けた検討の流れ

WRCでは、前回の会合で設定された議題に沿って、議論が行われることになっている。例えば、WRC-23の議題はWRC-19で既に決定されている。一例として、WRC-23に向けた4年間のスケジュール概要を図4に示す。

まず、WRCの準備会議であるCPM（Conference Preparation Meeting）の第1回会合が前回のWRCの直後に開催される。この会合では、前回のWRCで決定した各議題の担当WP（Working Party）が設定され、ITU-Rの研究委員会（SG: Study Group）活動を通して議題の技術的検討がなされる。また、日本の場合、アジア太平洋地域の地域会合（APG: APT Conference Preparatory Group for WRC）が年間1～2回程度開催され、地域での共同提案や見解が策定される。そして、WRC開催年の初めに、CPMの第2回会合が開催され、各議題で取り得るオプション等をまとめたCPMレポートが作成され、本番のWRCに臨む。

このように、WRCにおける議題の検討は、4年間掛けて行われるため、新たな周波数分配を要する無線システムを導入しようとする場合、まず、APG等の次回のWRCに向けた準備会合で議題を提案し、そのWRCで次期議題として承認されることが最初のステップである。更にその後4年掛けて当該議題が検討され、様々な国との調整を経て、次回のWRCで改正の合意を得ることで、ようやく導入が決定される。(当然ながら、反対国が多く合意されない場合には、更に次回のWRCに議論が持ち越されたり、議題提案からやり直しになったりすることもある。)その後、必要に応じて国内の関係法令の改正を行うが、法律であれば国会審議、省令であっても制改定過程の透明性を確保するため審議会への諮問等の手続きが必要なため、これまた検討期間も含めて通常1~2年を要する。更に無線局の開設、免許付与に1年程度掛かるため、結局、最初の提案を行ってから無線システムの実用化まで10年近い時間を要することになる。逆に言えば、新たな周波数を必要とする無線システムを実用化しようと思えば、10年前から準備を重ねて国際的な周波数分配を勝ち取る必要がある。

例えば、今回のWRC-23で日本が強く推進したIMT基地局としての高高度プラットフォームステーション(HIBS)の検討に関しては、2025年のHIBSの実用化を目標としているが、WRC-19で議題化が提案され、WRC-23で周波数分配を獲得した。(詳細は5.で述べる。)WRC-19での議題化提案のためには、当然、その数年前から議論を始めなければならず、その意味でも無線サービスで新しい技術を導入しようとした場合、最初に行うべきものが、国際周波数管理に関する検討である。

他方で、情報通信技術の進化は著しく、規制が技術に追い付かないケースはITUの検討でも散見される。例えば、WRC-23で、衛星と携帯電話の直接通信の検討が次期WRC-27の議題として採択されたが、技術自体は既に一部実用化されている。

ITUの周波数管理がないと、各国はその外側でサービスを実施せざるを得ない。RR第4.4条では、RRに従い運用される別の無線局に有害な混信を生じさせず、またその局からの有害な混信からの保護を要求しないことを条件として、RRの国際分配に従わない割当をしてよいとなっており、究極的にはRRに記載がなくとも新たな無線サービスの実施は可能である。しかしながら、他の無線システムから完全に劣位として扱われるため、他国からの干渉等による通信の不安定性を抱えたままサービスすることになる。また、先にサービス展開が始まると、そのサービスに用いられる技術が次第にデファクト化し、国際分配やそれに伴う技術基準等の規制を後から追加しようとしても、修正に多大な労力が掛か

ることも想定される。結果として、推進する国々と規制すべきとする国々との間の争いも一層激しくなる。こうした問題が今後も発生し得ることから、ITUで、RR改正のサイクルを現在よりも早めるべきという声も少なからずあり、今後議論される可能性がある。

4.3 地域会合での準備

RR第5条に規定されている国際的な周波数分配は、各国の権益に直結するとともに、無線通信分野における国際標準化にも大きな影響を与えることから、その改正に当たって、しばしば利害の対立が生じる。そのため、各国とも自国の無線システムの開発及び利用動向を踏まえ、積極的な取組みが必要になっている。

WRCへの提案は、以前は各国が個別に行っていたが、市場統合を進める欧州諸国が共同提案を行う傾向が1990年代に顕著になり、これに対抗して他の地域も共同提案を行うようになった。

現在では、欧州、米州、旧ソ連邦諸国、アラブ諸国、アフリカ、アジア太平洋の六つの地域機関による地域共同提案が重視され、一国の提案では議題にならない傾向にある。(なお、アラブ諸国の一部はアフリカ大陸に位置しているため、アラブ諸国とアフリカ地域の両方の提案に重複して名前を連ねている国もある。)

日本が所属するアジア太平洋地域の場合、ITUの地域機関であるアジア・太平洋電気通信共同体(APT: Asia-Pacific Telecommunity)で年に数回程度WRCの準備会合や関連する技術的な会合が開催されている。これらの会合で地域の共同提案を取りまとめ、WRCやCPMに提出するというプロセスが一般化してきており、これは他地域でも同様である(図5)。

また、WRC-23では、特に合意が難しいとされた議題に合意するため、地域機関の意見の活用が目立った。

日本が新たな周波数分配の獲得を目指す場合、まずはアジア太平洋の国々からの支持を得ることが重要であり、WRCでの合意に当たっては他地域機関の支持を得ることが非常に重要になってきている。

5 WRC-23について

本章では、WRCで具体的な議論がどのように進むのか、WRC-23における実例により説明する。

5.1 会議構成

会議構成は図6のようになっている。

全体会合であるプレナリーの下に、第1委員会から第7委員会まで設置される。これらはCommitteeの頭文字を取ってCOMと呼ばれる。COMのうち、

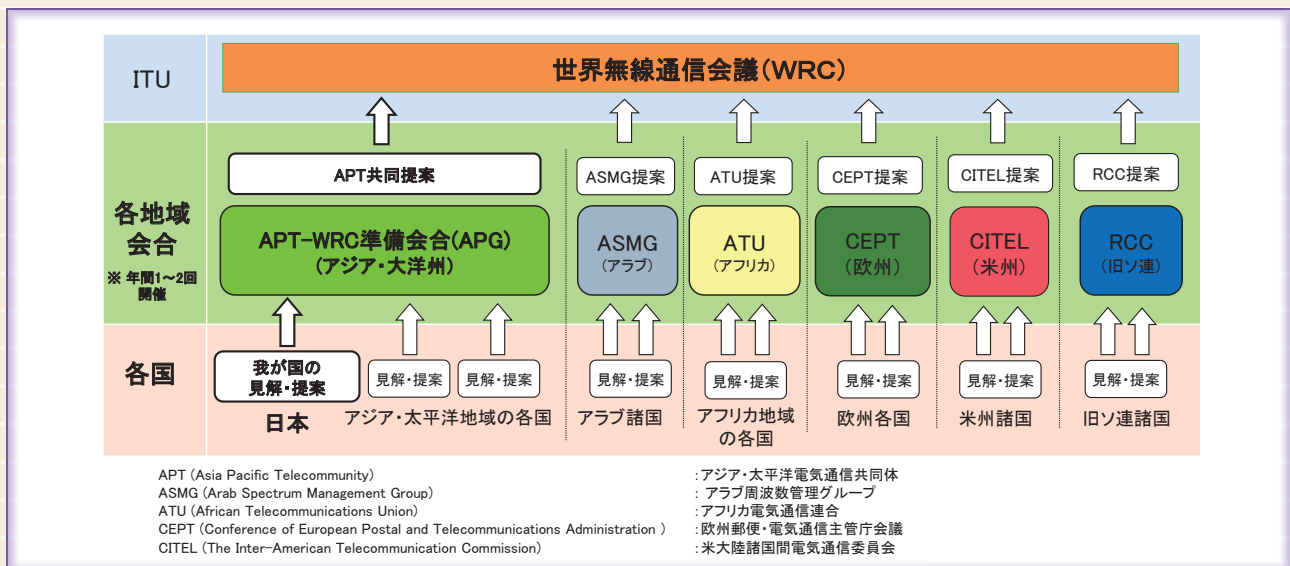


図5 WRCに向けた地域準備会合

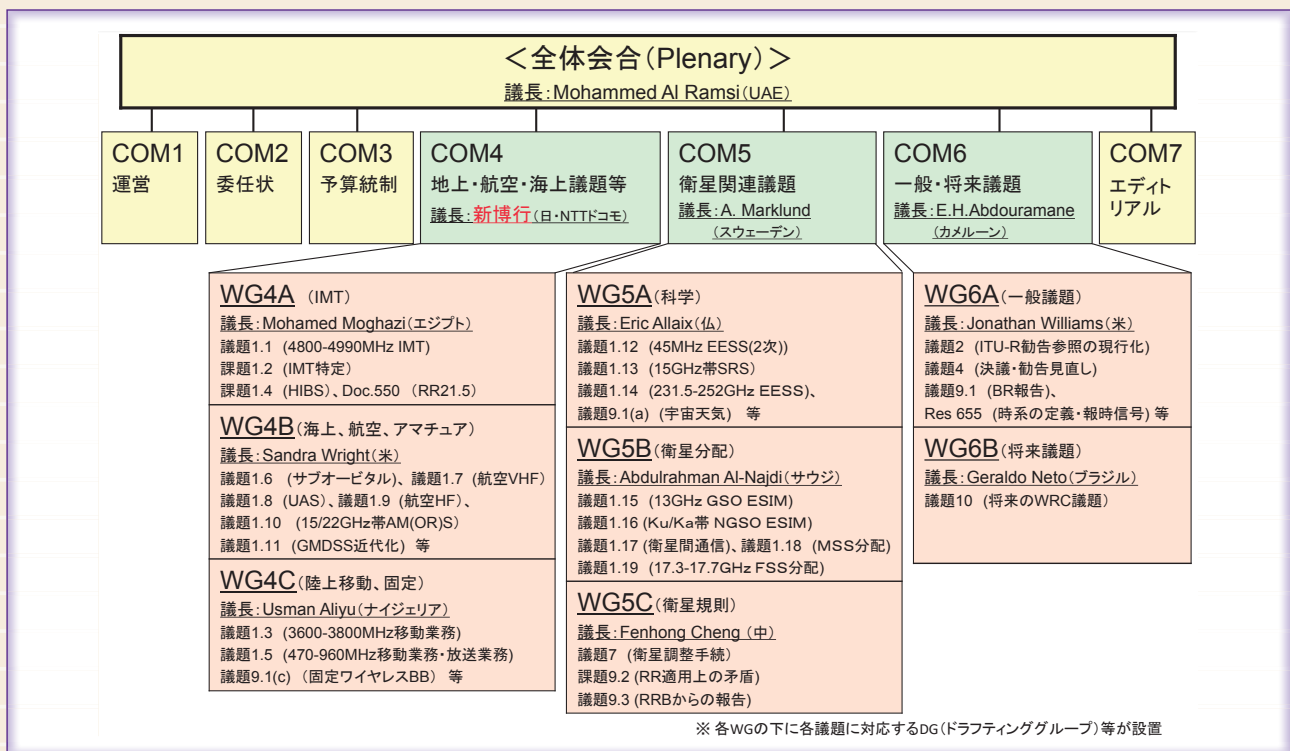


図6 WRC-23の会議構成

COM1, 2, 3はWRCの運営面に関する事項を取り扱い、COM7は出力文書の公用6か国語への翻訳及びそのエディトリアルなチェックを行う。それらを除いたCOM4, 5, 6がWRC議題を議論する場所であり、これら各COMの下にWG(Working Group)、更にその下にDG(Drafting Group)が設置される。

DGは基本的に議題ごとに設置され、基本的な決議案やRRの修正文案等の出力文書を作成する場所である。下位の会合で合意されたものが上位の会合に上げられ、そこで合意されれば更に上位の会合に上げられ、最終的にはプレナリーで合意されればWRCの最終出力文書

(Final Acts)に載ることになる。つまり、最低でも4回の会合で合意を得る必要があり、合意されない場合は、各議長の判断によるが、下位会合で再度議論される、または、そのまま未合意箇所を明記した上で更なる上位会合に上げられる、といった対応がなされる。(後者は、議論が紛糾し、下位会合では合意の見込みがない場合に見られ、WRC-23では度々見られた。)なお、円滑な議事進行には議長の能力が重要であり、議論の進め方に議長が与える影響は大きいことから、各会合の議長・副議長の椅子を巡る各国の争いはし烈である。これらの役職は、WRCが始まる前に各地域機関間の調整を

経て決定されるため、地域・国ごとのバランスが考慮される。WRC-23 では、日本からは NTT ドコモの新氏が COM5 の議長に就任した。

5.2 合意形成の裏側

上述のように、加盟国は RR に従う義務があるため、その改正に際しては、意見が対立する国の間の利害調整に多大な労力を要し、しばしば議論は非常に厳しい局面に陥る。どうしても意見の一致を見ない場合に加盟国の投票による多数決によって決定する作業ルールも存在する。しかし、ほとんどの場合、最終的には各国が譲歩し、コンセンサススペースで結論にこぎ着けることが多い。これは、少数意見の国が採決に持ち込まれて全ての主張を退けられるよりは、早めに妥協して部分的にでも自国の主張を通した方が得策と判断することによる場合もあるが、本質的には WRC に受け継がれる「妥協と協調の精神」によるところが大きい。そもそも無線通信の世界では、誰かがルールを無視すると混信を引き起こして当事者の誰もが電波を使えなくなってしまうため、当事者の全てが譲り合って電波を使えるように、このような伝統が長年掛けて形成されていったものと思われる。したがって、仮に会議で厳しい局面が予想される場合、いかに各国の妥協を早めに引き出して審議を円滑化するかが鍵になる。とは言え、早期に妥協することは難しく、時間がなくなってきたところで歩み寄るのが常である。

妥協案をまとめるためには、まずは相手国の反対理由を的確に把握することが非常に重要である。そのための非公式会談や、レセプションやコーヒープレイク中の雑談等で当該国のみならず、その周辺国や機関を含めて積極的に情報収集することが必要になる。また、対立する双方の国に影響力のある第三国が、互いの主張を踏まえた妥協案を提示したり（助け船を出してもらう）、キーパーソンだけを集めた非公式の調整会議を開催したり、二国間協議を行ったりするなど、会場外での様々な根回しも重要なテクニックである。対立が想定される議題に対して強い意見がある場合は、最終的に妥協が必要になることを織り込んで、当初の主張ラインと妥協できるラインを事前に決めておくことで交渉がしやすくなる。

一方、自国の主張を他国に認めさせるためによく用いられるのが相互支持という手法で、利害関係の少ない国に自国の主張の支持を要請する代わりに、その国の別の議題の主張を支持するものである。これはバーター交渉とも呼ぶべきものだが、WRC-23 で、ある主管庁は自国が支持しない案件全てに不支持を表明することでこのバーターを成立させようとしたが、理由の見えない反対姿勢は関係する国の心証を損なう可能性もあるため注意

が必要である。

また、結局のところ多数派を形成した方が有利になるので、会期中も各国の動向を情報収集し、仮に自国の主張が少数派と判明した場合には主張の一部を取り下げて条件闘争に移るなど、臨機応変に対応することもしばしばある。どうしても結論が出ない場合には、合意可能な部分を結論とし、対立した部分は次回の WRC の議題にしたり、ITU に常設されている SG などの組織に検討を依頼したりするといった決着のつけ方もある。

これらが基本的な交渉の動きであるが、WRC-23 では、世界六つの地域機関を介した合意形成プロセスが見られたのが特筆すべき点である。特に議題 10（将来の WRC 議題）で見られたため、後述する。

5.3 実際の議論の流れ～具体的な議題に即して～

以下で具体的な議題に関する議論の流れを 2 例紹介する。

- ① HIBS 関連：議題 1.4 「2.7 GHz 以下の IMT 特定された周波数帯における IMT 基地局としての高高度プラットフォームステーション (HIBS) 利用の検討」

HIBS は、高度 20 km 前後の成層圏を飛行する高高度プラットフォーム (HAPS: High Altitude Platform Station) に IMT (国際移動通信: International Mobile Telecommunication) 基地局を搭載するものである。山間部や海上等へのカバレッジの拡大、大規模災害時の迅速な通信が期待されることから、既に HIBS 用に特定されている帯域に加えて、利用可能な周波数帯の追加等を目指す議題である。対象周波数帯は、(ア) 690~960 MHz (UHF 帯)、(イ) 1710~1885 MHz、(ウ) 1885~1980/2010~2025/2110~2170 MHz、(エ) 2500~2690 MHz である。

日本が強く推した議題の一つであり、アジア太平洋地域の共同提案に加え、10 数か国連名で提案を作成した上で WRC での審議に臨んだ。

WRC では、初めに議論の対象となっている四つの周波数帯について、最も課題が多い (ア) UHF 帯を先送りして、(エ) 2.6 GHz 帯から議論が開始された。議論を繰り返して、UHF 帯を除く部分についてはおおよそ改正案がまとめられた。UHF 帯については複数の国が反対していたが、日本が個別交渉（前述のバーター交渉を含む。）を粘り強く実施し、課題点に関して妥協案を提示したところ、沈静化した。

しかしながら、議論の最終局面で、ある国が急に UHF 帯の無線局の保護を主張し、その他の複数国も同調したため、妥協案として、第 3 地域（アジア太平洋）の UHF 帯は一部の国を除外することになった。日本は、

将来的に HIBS の海外展開を予定する国が除外されていないことから、妥協できるラインとして合意した。

また、別の国からは、上位会合に文書を上げていく中で、かねてから示されていた放送業務保護の観点での懸念が改めて表明された。これに対して CEPT（欧州郵便・電気通信主管庁会議）から、同懸念が別の規定に基づき保護されることで解消される旨の指摘があり、その指摘を踏まえた修正がなされた結果、関連の改正案は全て合意され、全体会合でも承認された。

このように、折り合えるラインを事前に設定した上で、キーとなる各国と必要に応じて戦略的なバーターを含めた交渉を行ったり、他国等からの支持や発言をうまく使ったりしたことが効果的であった。

②将来の WRC 議題関連：議題 10「将来の世界無線通信会議の議題」

将来の WRC の議題として、各地域機関及び主管庁から全体で 40 弱の議題が提案された。議題が多過ぎると、各議題について十分な検討が行えなくなることから、近年では議題数の削減が求められており、WRC-27 での議題数も WRC-23 と同程度（20 弱）にする必要があった。

議題 10 は、WRC-27 の議題になるか、ならないかの二択であり（ならない場合でも WRC-31 の議題にすることもある。）、様々な国が絡むことから、妥協案の作成が非常に難しいと考えられていた。そのため、当初、議題化の選定はオープンに議論されず、六つの地域機関による非公式会合で、優先的に議論を始める案件が選定されていた。その選定は地域機関の支持が多いものを優先し、その後各地域機関の優先課題を取り扱うというものであった。当初は選定のみが進められていたが、難航したことから、一旦全ての案件を各 DG に割り当て、決議案の作成を開始することとされた。一方で議題化の選定は地域機関による非公式会合で引き続き議論することにして、オープンに議論されないままであった。

各案件の決議案がまとまりつつある会合終盤で、WRC-27 / WRC-31 の議題の暫定案が作成され、各国に公開された。日本は、APG の役職者を確保していることから事前に情報を得ており、合意できる内容であったため、強く反対しなかった。他方で自国が推す議題が含まれていない国からは当然、猛反発があり、会議は紛糾した。しかしながら、暫定案は地域機関の議論を踏まえたものであること、また議論を続けても合意が難しいことから、半ば強引に上位会合（全体会合）へ上程された。

上位会合でも、一部の国からは選定のプロセスを含め

た批判が出たものの、既に議論の時間がほとんど取れなくなっていたこともあり、議長が各地域機関に対して同意を取る形で採決し、結果としてほぼ上程された案のままで合意された形になった。

このように、地域機関の意思が決定において非常に重要な役割を果たした。地域機関の役職者の選定プロセスは各機関で異なるが、地域機関で重要なポストを得ていた国は議論しやすかったことは想像に難くない。（日本は、APG 副議長のポストを獲得していたことで対策を円滑に練ることができた。）他方で、地域機関はあくまで地域における共同提案や合意形成の場であり、各国が地域機関の長に対して何らかの決定権を委託しているわけではない点に注意が必要である。

6 むすび

国際的な周波数管理について、WRC-23 での例を示しながら解説した。

近年では、無線サービスの需要の急速な拡大により IMT、衛星に限らず様々な業務で、周波数帯の追加が求められている。その一方で利用可能な周波数帯の空きはほとんどなく、既存の業務との共用が必須となっている。更に、本稿には記載していないが、政治的な思惑も絡み、真に技術的な議論だけで妥協案を作ることは難しい。このような局面は今後も多数発生すると予想される。対立の激しい議題をどのようなアプローチで合意していくかは今後、非常に重要なテーマとなり得る。

新たな無線システムの導入には、国際的な周波数の獲得が不可欠である。多大な時間と労力を使って各国と交渉を地道に重ねていくことが重要であるのはもちろんのこと、過去の議論を踏まえて戦略を立案し適切に推進することも重要になる。このためには、長期的な視野に立って戦略的な対応が可能な体制を官民で作っていく必要がある。

本稿が、国際的な周波数管理に関する活動について、読者が理解や関心を深める一助となれば幸いである。

林 祐二郎

平 28 総務省入省。以来、情報通信技術の研究開発支援、電気通信分野の競争政策等を担当。令 5 から現職（総合通信基盤局電波部国際周波数政策室課長補佐）に就き、日本の無線技術の国際標準化を担当。APG23-6、WRC-23 等の国際会議に日本代表団として参加。



エコキュート開発物語

電力中央研究所 齋川路之 Michiyuki Saikawa

1. エコキュートとは？

家庭用自然冷媒（CO₂）ヒートポンプ給湯機、愛称“エコキュート”が2001年5月に商品化されて早20年以上が経過した。図1にエコキュートの年間出荷台数の経緯を示す⁽¹⁾。発売以降、省エネ・環境問題への意識やオール電化住宅への関心の高まり、メーカーの市場参入などにより、順調に出荷台数を伸ばし、2010年度には約57万台出荷された。2011年の東日本大震災以降、出荷台数が減少・低迷したが、ここ数年は、地球温暖化防止、太陽光発電など再生可能エネルギー活用などの観点から再び注目され、出荷台数は増加し、2022年度には約70万台出荷された。累積で見ると、2022年度末

までで877万台となっており、2024年度末には累積で1,000万台を突破する勢いである。

肝心のエコキュートの原理を説明しておこう。図2にエコキュートの仕組みを示す。ヒートポンプの原理を使って空気から熱を集めて温度を上げ、水を加熱してタンクにためておき、必要なときに利用する。ヒートポンプの中を流れ、熱を移動させる物質を「冷媒」と呼んでおり、エコキュートの場合はCO₂が使われている。原理は、私たちが家庭で使っているエアコンと同じである。ただし、エアコンではフロン的一种であるHFC（ハイドロフルオロカーボン）32が主に使われている。

さて、電力中央研究所（電中研）では、エコキュートを開発する以前に、給湯ヒートポンプの研

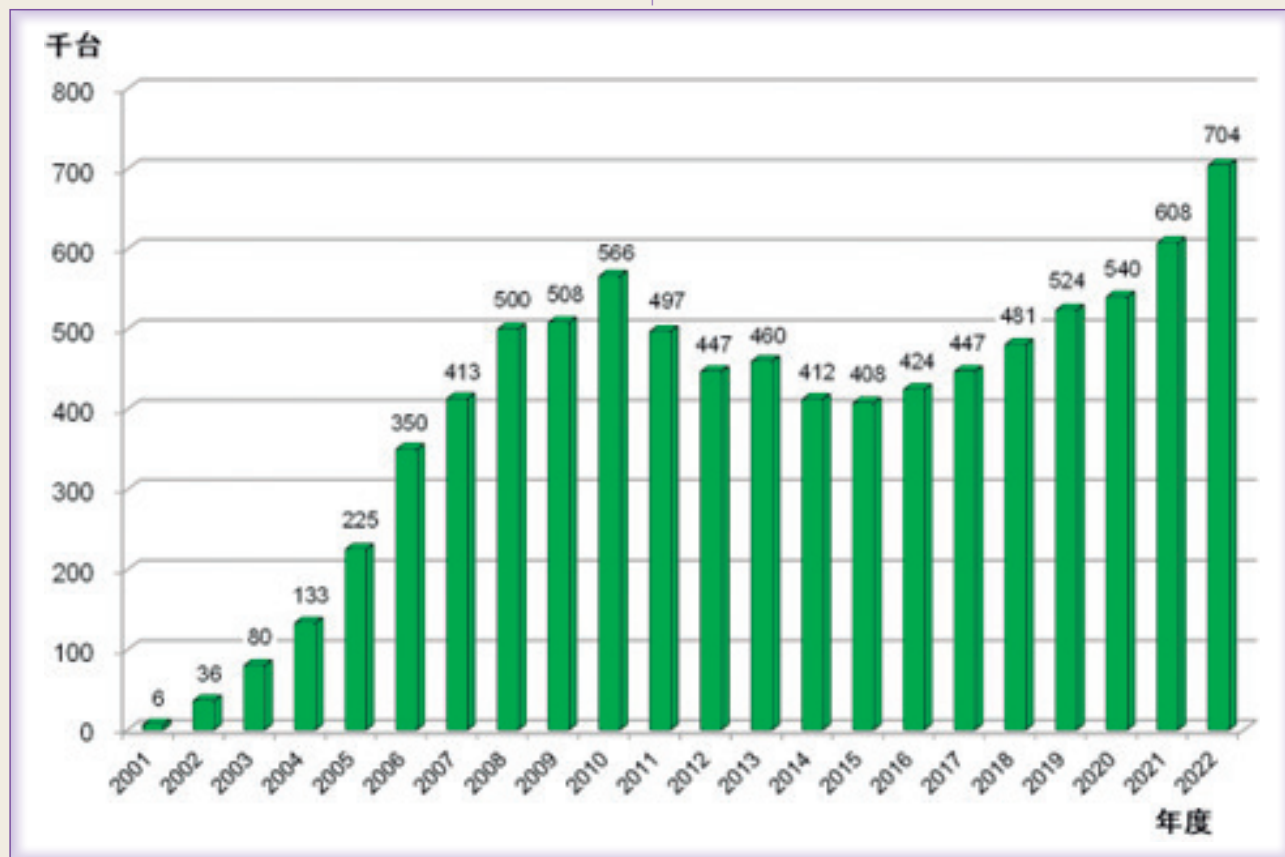


図1 エコキュートの年間出荷台数

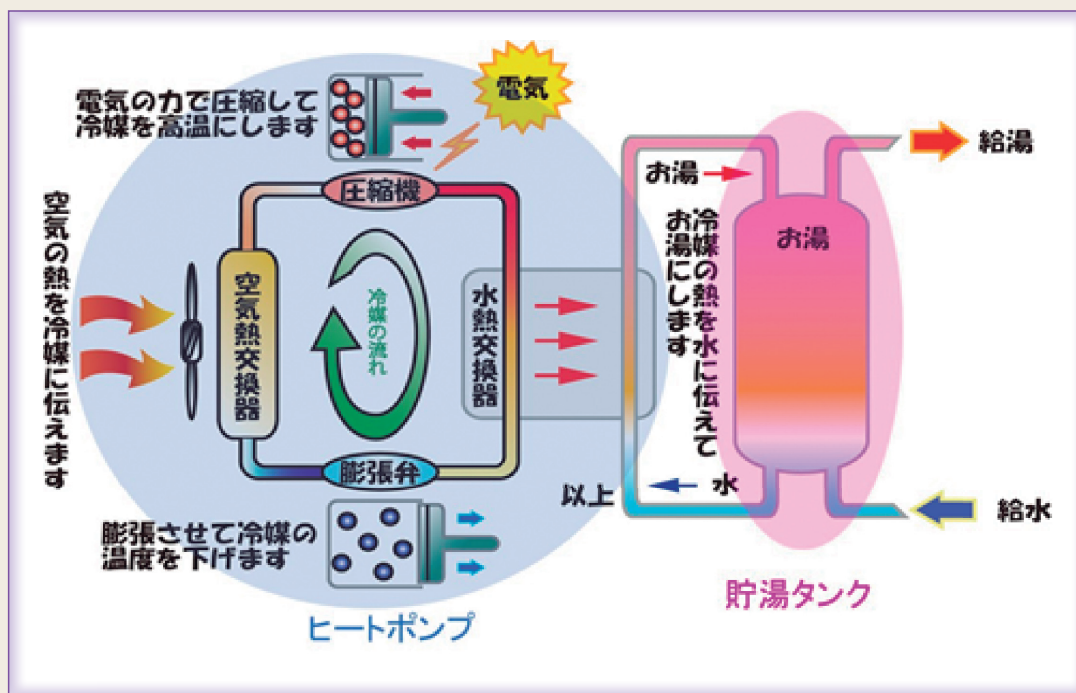


図2 エコキュートの仕組み

究開発を進めてきたが、商品化には至らなかったことが二度ある。そこで、今般は、電中研における給湯ヒートポンプの研究開発や私自身の経緯・視点から、技術的な話を含めつつ、エコキュート誕生までの経緯を紹介したい。

2. 電中研におけるヒートポンプ研究開発の経緯

まず、ヒートポンプの原理を図2の左側の絵を使って説明しておきたい。ヒートポンプは電気を使って圧縮機を動かし、熱を低温からくみ上げて高温へ吐き出す装置である。空気熱交換器（蒸発器）において、冷媒は室外の空気から、例えば3の熱エネルギーをもらって蒸発し気体となり圧縮機に入る。圧縮機では、1の電気により気体は圧縮されて高温・高圧になる。高温・高圧になった気体が水熱交換器（凝縮器）で凝縮し液体になることにより水へ4の熱を与える。圧力の高い気体はより高い温度で凝縮するので、蒸発温度よりも凝縮温度の方が高くなる。このような原理でヒートポンプは低温で熱をもらって高温で熱を吐き出すことができる。エネルギーは保存するので、ヒートポンプに入ったのが1の電気と3の低温の熱（蒸発器から）を足した4、ヒートポンプから出るのは4の高温の熱（凝縮器）となる。ヒートポンプの性能を表す指標として、熱出力を圧縮機動力（電力）で割った値が用い

られる。これを成績係数（COP: Coefficient Of Performance）という。前述の数字を使うと、高温側（凝縮側）出力が4なので、 $4 \div 1$ でCOPは4となる。電気ヒータで加熱すると、1の電気から1の熱しか得られないが、ヒートポンプを使うと、1の電気から4の熱が得られるので、ヒートポンプは省エネ性に優れた技術と言える。COPは熱力学の原理から、熱をくみ上げる低温側と熱を吐き出す高温側の温度差が小さいほど大きくなる。

以上紹介したように、ヒートポンプは省エネ性に優れているが、電中研の研究開発は、1984年（昭和59年）、国のムーンライト計画SHP（スーパーヒートポンプ）プロジェクトが始まり、電中研が研究を受託したことが端緒である。ヒートポンプは原理的には火力発電と同じであるため、火力から分野転向した私の四つ上の先輩が中心になってこの研究に取り組むことになった。更に、この受託をきっかけに新人を採用することになり、私がたまたま電中研に入所することとなった。1986年のことである。今でも鮮明に覚えているが、入所していきなりその先輩から、「俺もヒートポンプのことはよく分からないから、おまえと一緒に考えろ」と言われたときには、正直言って驚いた。研究開発は、当然、先輩の指導で進めるものと思い込んでいたのだ。

さて、電中研としては受託研究を行うだけでなく、電中研オリジナルの研究を立ち上げるために、ヒートポンプ導入による省エネ効果が大きいところ

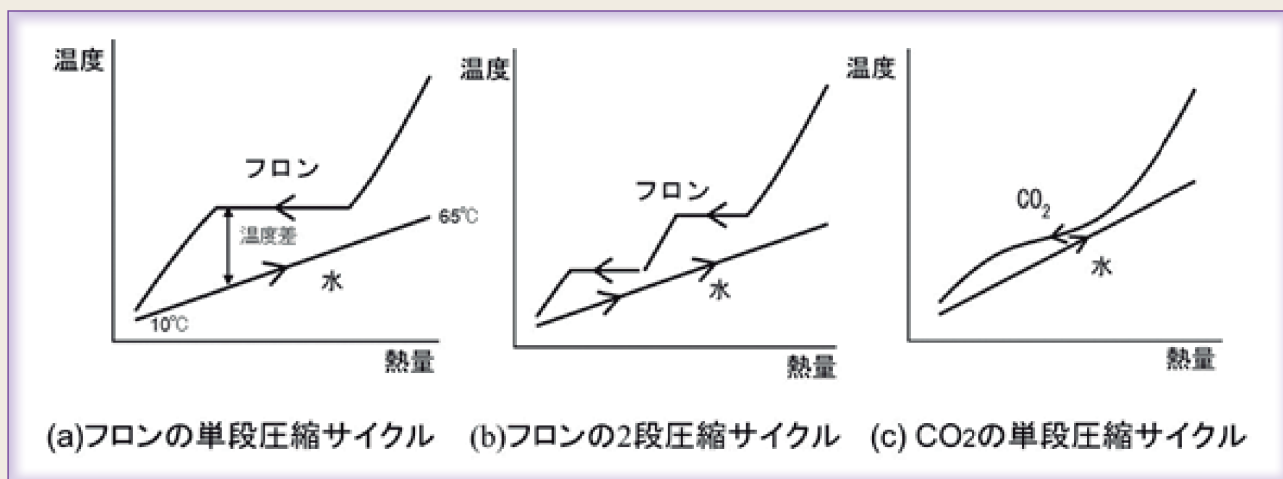


図3 冷媒・サイクルの違いによる給湯加熱方式の比較

はないか、ということで調査研究を始めた。いろいろ調べてみると、給湯分野は民生用（家庭・業務）エネルギー消費の約3割を占めるにもかかわらず、その9割は化石燃料の直接燃焼によって賄われており、もし高効率なヒートポンプを開発・導入できれば、省エネルギーが格段に進むことが分かった。給湯分野に狙いを定めた。

狙いを定めたのはよいが、格段に高効率化が狙える給湯ヒートポンプを速やかに考案し、開発に着手しなければならない。

私は新人だったのでまだ気楽だったが、先輩へのプレッシャーは相当なものだった。そのプレッシャーの中から、先輩が火力発電サイクルの知見を生かしつつ、「2段圧縮式カスケード加熱給湯ヒートポンプ」という新方式を考案した。この方式は後に特許登録された。

フロンなど通常の冷媒では、サイクルの高圧側で一定の温度で凝縮することにより水や空気を加熱する。このため、空調向けのように、水や空気の加熱温度幅が小さい場合には効率が上がる。一方、給湯用では、例えば10℃の水を65℃まで加熱する必要がある、昇温幅の大きい加熱が必要となる。この65℃のお湯をフロンによる単純なヒートポンプサイクル（単段圧縮サイクル）で作った場合の加熱の様子を図3(a)に示す。図は、水を加熱してお湯を作る熱交換器内（凝縮器）における冷媒と水の温度と交換する熱量の変化を示したもので、温度-熱量線図である。図に温度差とあるが、垂直の線の幅が各状態での冷媒と水の熱交換温度差を示す。(a)の場合、(b)や(c)の熱交換に比べ、全体的に温度差が大きくなっているのが見て取れる。フロンによる



図4 2段圧縮式原理試作機
(加熱能力4 kW, 1987年設置)

単純なサイクルでは、熱交換温度差が大きく、必要以上に高い温度の熱を作っているため、COPが低くなってしまう。

電中研が考案した2段圧縮式カスケード加熱給湯ヒートポンプではフロンを使うが、圧縮を2段とすることで二つの凝縮圧力を作り、それぞれの凝縮温度で水と熱交換を行うことで温度レベルに応じた加熱を実現し、COPが向上する(図3(b))。机上検討の結果、この2段圧縮式では、通常のサイクルに比べ、3割程度のCOPの向上が期待できることが分かった。

次に、考案した2段圧縮式が実際に成立するのか、要素技術はどのようなものにすればよいのか、という検討が必要になった。そこで、図4に示す2段圧縮式の原理試作機を手作りで作製し、サイクルの成立性を検証した。その結果、COPが格段に向

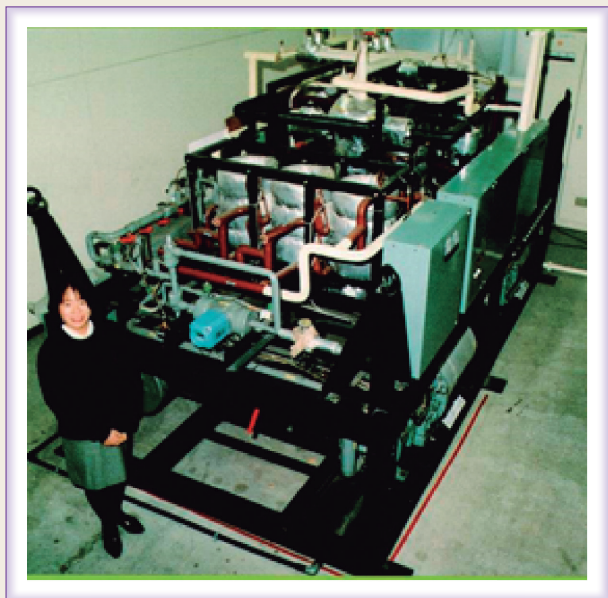


図5 業務用2段圧縮式試作機
(熱出力150kW, 1991年設置)

上するという手応えが得られた。

ただし、電中研だけでは製品を作れないし、売ることできない。そこで、電中研が考案し高効率化が期待できることを検証した2段圧縮式給湯ヒートポンプをベースに、電力会社・メーカーと共同で、家庭用冷暖房給湯ヒートポンプを開発した。1988～1992年のことである。要素技術開発等が順調に進み、フィールドテスト機の設計・製作と実際のフィールドテストまで進展した。しかしながら、給湯の効率が期待されたほど達成できなかったこと、効率も含めて価格や大きさなど商品としての魅力に乏しいことなどの理由から、商品化までには至らなかった。冷暖房給湯という多機能機の開発を目指したわけであるが、まずは、一番重要な給湯単機能で高効率なものを目指すべきだったという反省が残った。

それならば、ということで、家庭用ではなくホテルや各種施設など業務分野向けに2段圧縮式給湯機の開発を進めた。1990～1996年のことである。図5に示す試作機を作り、要素技術の開発も含めて業務用としての基本方式を確立後、メーカー、ゼネコンと共同研究を行って商品化を目指した。

しかしながら、オゾン層破壊によるフロン問題などにより、商品化を断念した。業務用については、給湯専用機ということもあって、期待された効率も達成でき、技術的にも良いものができたが、開発のタイミングが悪かった。

以上、共同開発を2回行ったが、2回とも商品化

を達成することはできなかった。当時は、後輩も二人入所し、先輩と合わせて四人で研究開発を進めていたし、研究開発費も投入していたので、「ヒートポンプの研究はどうするのだ」と、所内では厳しい状況に追い込まれた。

3. 自然冷媒の調査とCO₂冷媒との出会い

2段圧縮式を考案し、共同研究を進めて商品化を目指したが、2回も商品化に失敗した。しかし、ヒートポンプは、省エネルギーの推進に欠かせない技術であることは間違いない。そこで、再び原点に帰って、今後の研究開発の方向性について皆で議論した。業務用の2段圧縮式が商品化に至らなかった大きな理由の一つはフロン問題である。当時、オゾン層を破壊するフロン系の冷媒は使えなくなる状況にあった。これには、エアコンの冷媒として主流であったHCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）22という冷媒も含まれており、この代替冷媒の開発が急務であった。いろいろと調べてみると、代替冷媒としては、日本やアメリカでは、同じフロンであるが塩素を含まないのでオゾン層を破壊しないHFC（ハイドロフルオロカーボン）系の冷媒が有力になっていた。一方、ヨーロッパでは、「フロンは化学合成品であり、同じフロン系から代替冷媒を探しても、またオゾン層破壊のような問題が起こるかもしれない、それならば、フロンができる前に使われていた自然界に元々存在する冷媒、自然冷媒を今の技術で見直す方がよい」という考えが主流になっていた。そこで電中研では、フロン系の代替冷媒はメーカーに任せにおいて、長期的な視点で自然冷媒の検討を進めるべきだろうとの考えで調査を開始した。1993年のことである。

自然冷媒には、アンモニア、ハイドロカーボン、CO₂、水、空気などがある。各冷媒の詳細はここでは省略するが、それぞれ長所・短所があり万能ではない。当たり前の話である。優れた特性を有するフロンが開発されて、ほぼ駆逐された冷媒だからである。

電中研としては、これら自然冷媒の中でも、毒性、可燃性もなく、ユニークな特徴を有するCO₂に着目し、その基礎研究を1995年に開始した。実際に検討を進めると、CO₂は、お湯を作る場合、ほかの冷媒に比べて理論的に最も高いCOPが得られること

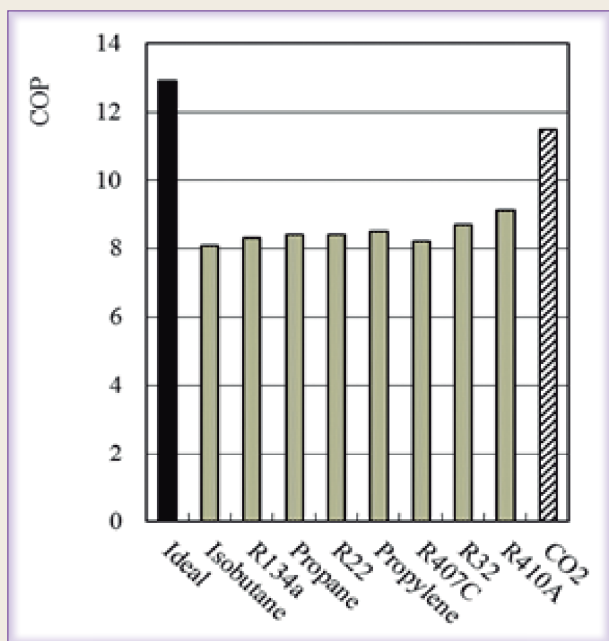


図6 各種冷媒の給湯 COP の上限値
(熱源温度 16℃, 給水温度 17℃, 給湯温度 65℃)

が分かった。その理由を先ほど示した図3で説明する。図3(c)を見ると、CO₂はフロンのように凝縮することがなく、水の加熱に伴ってCO₂の温度が徐々に低下し、水とCO₂が小温度差を保ちながら熱交換していることが分かる。CO₂は、臨界温度が低く(31℃)、サイクルの高压側が超臨界圧条件になるため凝縮することがなく、熱交換温度差の小さい加熱が実現でき、フロンに比べ高いCOPが達成できる。

図6に各種冷媒による損失のないサイクルのCOP(各冷媒の上限COP)を試算した結果を示す。図の横軸の項目は、Idealが理想サイクルを示し、そのほかは冷媒名である。理想サイクルは、高温熱源の温度が比熱一定で変化し、そのほかの過程は逆カルノーと同じとしたサイクルである。水の比熱を一定とみなせば、このサイクルが給湯用COPの上限を決めるサイクルと考えられる。図から、各冷媒の中で、CO₂のCOPが最も高く、理想サイクルの値に近いことが分かる⁽²⁾。

CO₂は給湯用には高い効率が得られる可能性があることは分かったが、実は、フロンに比べて非常に高い圧力で作動する。CO₂ではサイクルの低压側が3 MPa(大気圧の30倍)程度、高压側は10 MPa程度になるが、フロンではそれぞれ、0.5 MPa、2.5 MPa程度である。

当時、CO₂冷媒に関する研究開発は、ヨーロッパでは行われていたが、日本ではまだ行われてい



図7 CO₂ヒートポンプ基礎実験ループ
(熱出力 6 kW, 1996 年設置)

かった。ちゃんと実物として作動するのか示す必要がある。そこで、電中研は1996年3月に、CO₂ヒートポンプ基礎実験ループ(図7)を設計・製作・設置し、実験を開始した。当時、このような圧力で作動する圧縮機はなかった。

このため、高压ガスのプロセスを扱う、小規模だが「プロの会社」を探し出し、無理矢理お願いして、圧縮機を作ってもらった。この実験ループを使って、サイクルの成立性や制御方法、CO₂の伝熱を調べた。その結果、CO₂は冷媒として使えるという確信が得られた。しかも給湯には有望である。

4. エコキュートの共同開発

CO₂冷媒が使えること、給湯には有望であることがほぼ分かった1998年3月、東京電力の営業の担当者が空調用自然冷媒技術に関する調査でたまたま電中研に來られた。來所された方は、業務用の2段圧縮式給湯ヒートポンプを売り込みに行ったときに対応してくれた方だった。当所でヒートポンプの研究開発をやっていることを分かってくれていたのだ。空調用には余り良いものがないが、給湯用にはCO₂が良いという話をしたところ、「筋が良さそうなのでやってみますか」という話になり、開発に向けてお互いの社内調整が始まった。話が進むときは早いものである。さて、実際に物を作れるのはメーカであり、共同開発のメーカを捜す必要がある。

同じ年の5月、ヨーロッパで自然冷媒の国際会議があった。電中研もCO₂冷媒に関する基礎研究の成果を発表したが、デンソーがCO₂冷媒を使ったカーエアコンの開発について発表していた⁽³⁾。その発表

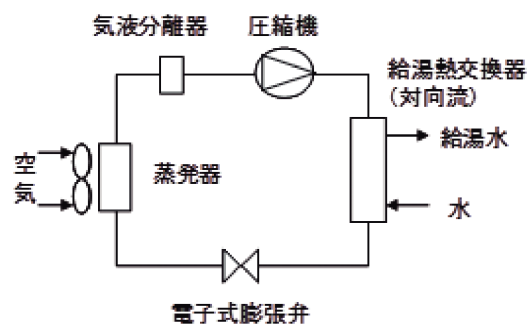


図8 試作機試験風洞
(加熱・冷却能力 5kW, 1999 年設置)

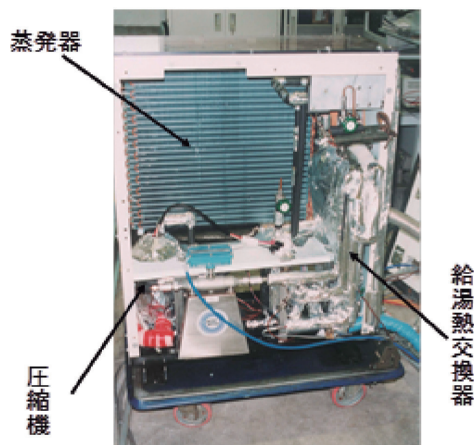
を聞きながら、「これだ!」と思った。学会は3日間だったと思うが、その間、デンソーの方といろいろ話をさせてもらった。7月に東京電力がデンソーを訪問、共同開発を打診する。当初は、「給湯機?」という感じだったと聞いているが、開発技術の展開として、デンソーが手を挙げてくれた。これでメンバはそろった。実質的な共同開発は10月からスタートし、3者の役割は、東京電力は「商品企画」、デンソーは「技術開発・製品化」、電中研は「基礎研究・評価」であった。

技術的な課題としては、CO₂冷媒に適した高効率圧縮機、小温度差の熱交換を実現するコンパクトな給湯熱交換器、ヒートポンプユニット及びシステム全体(含む貯湯ユニット)の高効率運転制御方式であった。

共同開発の中で、電中研は図8に示す試作機試験風洞を設置(1999年)し、図9に示す試作機の試験を行って、効率把握・分析・評価、開発課題の抽出、性能改善方策の検討を実施した。要は、デンソーから改良部品が送られてきてそれを試作機に組み込んで評価試験を行い、その結果をフィードバックして、また改良部品を組み込んで試験を繰り返すということを行った。一時、改良品が次から次へとデンソーから来てしまい、担当の後輩が試験に追われるという状況もあった。最終的に、開発した技術で当初設定した目標をクリアできることを確認した⁽⁴⁾。3者の打合せも、朝から晩までということもよくあったように記憶している。皆、格段に効率の良い給湯機を世に送り出すのだ、という思いで熱くなっていた。ここでは、電中研の話しかしていないが、それぞれ大変な苦勞があったと思う。いろいろ



(a) サイクル構成



(b) 外観

図9 CO₂給湯ヒートポンプ試作機の概要
(加熱能力 4 kW)

な山や谷を乗り越えて、2001年5月、世界で初めて、家庭用自然冷媒(CO₂)ヒートポンプ給湯機「エコキュート」を世に送り出すことができた。電中研にとっては三度目の正直であり、2回の商品化失敗という経験が十分に生かされた開発だったと思っている。

自慢話になってしまうが、開発機はその優れた省エネ性・環境性が高く評価され、多くの賞を受賞した。極め付きは2010年7月30日、関連する共同出願特許で、最高の荣誉である「恩賜発明賞」を受賞したことである。

5. おわりに

エコキュート以前の苦労話を中心になってしまったが、エコキュートの開発を振り返ると、本当にタイミング良く人と人がつながって開発がスタートし、それぞれが同じ志を持ち、それぞれの役割を果たした結果、良いものができたのではないかなと思う。最後に自宅に設置した三代目のエコキュート(図10)



図 10 我が家の第三代エコキュート

を紹介して本稿の結びとしたい。初代は 2002 年に購入したが、新たにモニタ試験を開始するということで 2 年弱で撤去・交換し、二代目は 15 年以上順調にお湯を作ってくれたが、本体ではなくリモコン

が故障し、2020 年に新製品を購入した。三代目は現在せっせとお湯を作っている。

文献

- (1) 日本冷凍空調工業会の統計データなどから作成
- (2) 齋川路之, “給湯用理想ヒートポンプサイクル及びその成績係数 (COP) の導出と各冷媒の上限 COP の評価,” 日本機械学会論文集 B 編, vol. 74, no. 738, Feb. 2008.
- (3) T. Hirata and K. Fujiwara, “Improvement of mobile air conditioning system from point of global warming problem, natural working fluids,” 98, IIR Gustav Lorentzen CONF.
- (4) 齋川路之, 橋本克巳, 小早川智明, 草刈和俊, 伊藤正彦, 榊原久介, “家庭用 CO₂ ヒートポンプ給湯機の開発—試作機の開発と性能評価—,” 日本冷凍空調学会論文集, vol. 18, no. 3, pp. 225-232, 2001.

齋川路之

電力中央研究所. 1986 東大大学院工学系機械了. 電力中央研究所に入所, ヒートポンプの研究開発に従事. 博士 (工学)



電波の不思議探検 ～静電磁界におけるエネルギー流動の一描像～

Adventure in Electromagnetic World: An Image of Energy Flow in Static Electromagnetic Field

唐沢好男 Yoshio Karasawa[†]

Summary

ワイヤレス通信の物理層技術はアンテナや電波伝搬といった電波工学に支えられている。更に、その電波工学は電磁気学、すなわち、マクスウェルの方程式が屋台骨をしっかりと固めている。そんな電磁気学にも、電波が我々の目に見えないゆえに、いろいろな不思議に満ちている。本稿ではその一つ、ポインティングベクトルの謎を取り上げてみたい。電磁界のエネルギーの流れを示すものとして、電界 E と磁界 H の外積 $E \times H$ で表されるポインティングベクトルがある。電磁界解析の多くの場面に適用できて重宝なものであるが、その適用性に関してはまだ議論が多い。特に、静電磁界におけるポインティングベクトルが示すエネルギーの流れについては、感覚的に受け入れがたい描像が得られるので、教科書レベルでも様々な見解がある。本稿では、静電磁界におけるポインティングベクトルの振舞いについて、筆者が抱く一つの描像を述べたいと思う。あくまで、仮定した条件の下での推論であるので正しさを実証するものではないが、既知の電磁現象に対してつじつまが合う説明ができる。読者の皆さんには、ここで述べる推論を一つの考え方と受け止め、更なる深い議論への入り口として頂ければ幸いである。

1 電磁気学のパラドックス

図1を見てほしい。帯電した平板コンデンサの中に棒磁石が置かれ、極板間にはそれぞれによって静電界 E と静磁界 H が作られている。マクスウェルの方程式が教えてくれるように、電磁波では、電界 E と磁界 H が作るポインティングベクトル $E \times H$ の方向に、光速で進むエネルギーの流れができ伝搬する。同軸管による直流電力伝送でも、管内にできる静電磁界空間を $E \times H$ がエネルギーを運んでいる。では、図1に示すように、独立に作られた静電界 E と静磁界 H が存在する空間において、ベクトル $E \times H$ により、図の赤い矢印の向きにエネルギーの流れができているのだろうか？これがその疑問である。静電磁界は時間的に変化するものが何もないから“静”と呼ばれている。「そんなところにエネルギーの風が吹くわけない」と思うだろう。だが、この稿を読み終える頃には、「そうかも」に変わっているかもしれない。

筆者が研究者としてまだ駆け出しの頃の1984年、本会の会誌6月号に「電磁波工学におけるパラドックス—その思い違いを探る—」と題する解説記事が安達三郎先生によりまとめられている⁽¹⁾。その中では、六つの項目が質問の形で提起され、それ

ぞれについて解答が述べられているが、その一つに「静電界の中の磁石はポインティング電力を発生するか」がある。これはまさに、図1と同じ範ちゅうの問いである。

問いは以下である。「図2に示すように正電荷を帯びた磁石があるとすると、電荷による電界と磁石による磁界によって作られるポインティングベクトルが図に示すようになり、磁石の周りをエネルギーが循環することになる。本当か？」。この問題を最初に提起したのはヘルツ(1890)と言われている。文献(1)でのこれに対する解答は、「この問題に解答を与えるのは簡単ではないように思う」で始まり、三つの考え方(発生する・しない両面からの)がまとめられている。(問題提起は後藤尚久先生、解答担当は徳丸 仁先生。)

図1を含む静電磁界全体についての答えは、組

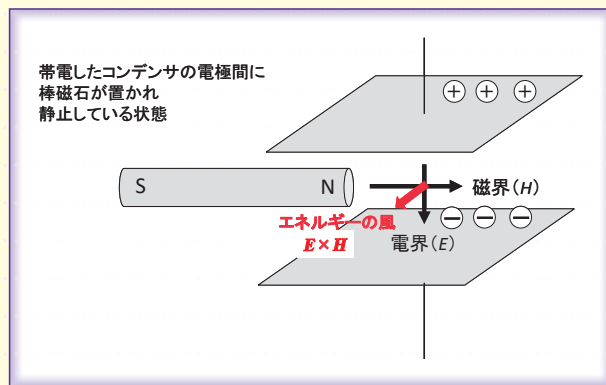


図1 静電磁界中のポインティングベクトル $E \times H$ はエネルギーの流れを表しているか？

[†] 電気通信大学、調布市
Univ. Electro-Communications, Chofu-Shi,
182-8585 Japan

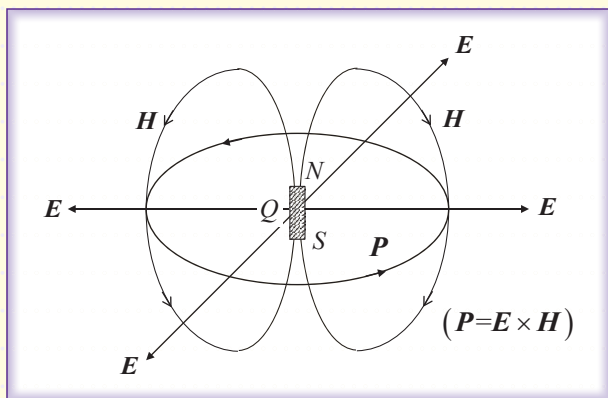


図2 静電界と磁石によるポインティング電力の還流

合せて的に

- ① エネルギーの流れを生む
- ② エネルギーの流れはできない
- ③ できる場合とできない場合がある

である。②は直流伝送線路（例えば、同軸線やこの後述べる平行平板伝送線路）で存在が示されているので×である。③の場合であれば、できる・できないの違いは、何の差でそうなるかが知りたいところになる。

電磁気学の教科書では、例えば、文献 (2)、文献 (3) は③、文献 (4)、文献 (5) は①と読める書き方になっている。文献 (5) のファインマンの物理学 IV (§6.5) では、図2の問題そのものに言及がある。そこでは、「これ（＝エネルギーの還流があるということ）はばかげた話である」で始まっているが、普通の直感は正しくない（＝還流を認める。）という論調であり、①に軍配を上げている。こういう両論があり、文献 (1) では「この問題に解答を与えるのは簡単ではないように思う」のまとめになっているのだ、と推察される。その後の学会論文には、電磁界の運動量に着目し①の立場からの検討結果が発表されている^{(6), (7)}。また、インターネット上には、物理学者 Prof. Eric Load によるオープンフォーラム “What is the significance of the Poynting vector in a static electromagnetic field?” のスレッドが2014年に立ち上げられ、多くの識者による議論が数年間にわたって繰り広げられている⁽⁸⁾。ただ、その展開をざっと見る限り、こだわりの議論あり、脱線ありで、収束してゆくようには見えない。

筆者にはこれらの議論に深入りできるほどの力量はないが、**3.**以降で直感的な推論を行い、答えは①であろうとの確信の下⁽⁹⁾、この稿を書いている。

2 ポインティングベクトルとは

ポインティングベクトル (Poynting vector) は、ポインティング (John Henry Poynting) がマクスウェルの方程式から導いたエネルギー保存則に由来する。マクスウェルの方程式から、対象領域 V 、その表面を S 、 S 面上の単位法線ベクトルを n として、電界 E 、磁界 H 、電束密度 D 、磁束密度 B 、電流密度 i には、次式で表されるエネルギー保存則が成り立つ⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \int_S (E \times H) \cdot n dS + \int_V E \cdot idV \\ = - \int_V \left(E \cdot \frac{\partial D}{\partial t} + H \cdot \frac{\partial B}{\partial t} \right) dV \end{aligned} \quad (1)$$

領域内に電荷も電流もない自由空間では次式になる。

$$\int_S (E \times H) \cdot n dS = - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_V (\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) dV \quad (2)$$

上式は、領域内でのエネルギーの減少率は、表面の単位面積当たり $(E \times H) \cdot n$ の電力の流出となることを示している。空間 V に蓄えられた電磁エネルギーの時間変化量はその表面から出入りする $E \times H$ の面積分で与えられるということである。このベクトル $E \times H$ はポインティングベクトルと呼ばれ、ここでは

$$P = E \times H \quad (3)$$

と置く。ベクトル P の方向がエネルギーの動く方向、大きさ P が単位面を通過する電力 (W/m^2) である。静電磁界の場合、式 (2) は

$$\int_S (E \times H) \cdot n dS = 0 \quad (4)$$

となる。確かに、閉曲面全体での出入りの合計は0だが、面の部分部分では静電界 E と静磁界 H が共に存在し、それが同じ向きでなければ、エネルギーの流れができると考えてもよさそうに見える。我々の感覚では、ばかげた話に思えるのにそういう結論になってしまうのが、パラドックスと言われるゆえんである。

電磁気学の教科書の古典 Stratton⁽¹⁰⁾ を見てみよう。そこでは Poynting がマクスウェルの方程式から直接に導いた式を遵守する姿勢を読み取ることができ、非常に慎重な記述がなされている。式 (2) までは、マクスウェルの方程式からの直接的な帰結なのでこれに問題はない。しかし、ここから、拡大解釈してゆくことに対して Stratton は慎重姿勢な

のである。すなわち、式 (2) は時間的に変化するエネルギーの全体としての出入りのみに適用できるのであって、面の特定の部分に着目することには否定的な見解になっている。

3 静電磁界におけるポインティングベクトルの推論

3.1 対象環境と前提条件

議論を簡明にするため、自由空間に一樣な静電界 E と静磁界 H が存在する場合を考える。電界 E の向きを y 軸正方向にとり、磁界は yz 面の任意方向を向いているとする。この議論に際して、次の基本的な考え方（前提条件）を採用してみよう。

① 電磁界の振舞い（電磁現象）は電界と磁界によってのみ決まる

② 電界と磁界がそれぞれどのような仕組みで生成されたかということ（原因）によらない

（要は、電界や磁界には生成原因が識別できる色が付いていない。電界は電界、磁界は磁界、それ以上に違うところは何もない。）

この前提条件が誤りであれば、以下の展開は無意味である。しかし、マクスウェルの方程式も、ローレンツ力を表す式も電界と磁界を含む式で表されていて、そこに、電界や磁界の違いについての使い分けはないのであるから、この前提条件は合理的であると確信する*。

3.2 静電磁界のポインティングベクトルとエネルギー流

図3に示すように、自由空間に静電界 E (y 軸方向に正の値をもつ成分: E_y) と静磁界 H (z 軸方向成分: H_z) が直交して存在するケースを考える。同図の閉領域空間は単位立方体で、この静電磁界が立方体を含む十分広い空間に均一に存在しているとす。この単位立方体内のエネルギー、すなわち、エネルギー密度 u_{EM} (J/m^3) は次式である。

$$u_{EM} = \frac{1}{2}(\epsilon_0 E_y^2 + \mu_0 H_z^2) \quad (5)$$

この空間にもしエネルギーの流れがあるとする。と、 x , y , z 面に対して S_{x1} , S_{x2} , S_{y1} , S_{y2} , S_{z1} , S_{z2}

* 1833年、ファラデーは、摩擦電気・ボルタ電池・電磁誘導起電力・電気魚（エイ、うなぎなど）といった種々の電源から得た電気の性質（磁気作用、熱作用、電気分解、火花放電など）を調べた結果「電源によらず、電気の性質は全て同じである」という結論に達したそうである（小山慶太，科学史年表，中公新書，2003）。上記考え方はその延長線上にあると言える。

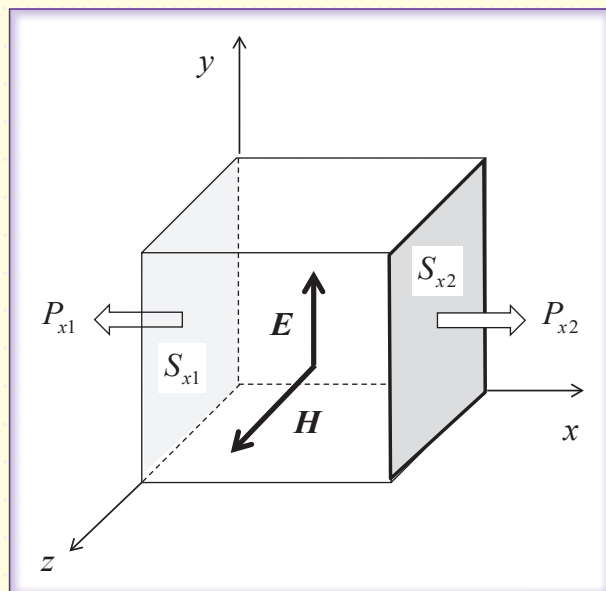


図3 静電磁界におけるエネルギーフローの関係
(図では $S_{y1,2}$, $S_{z1,2}$, $P_{y1,2}$, $P_{z1,2}$ は省略しているが、 x 面の $S_{y1,2}$, $S_{x1,2}$, $P_{x1,2}$ と y , z 面について同じルールで)

の六つの面 (x 面に対する S_{x1} , S_{x2} のみ図中に表示) から法線方向に流出する単位時間当たり、単位面積当りのエネルギー、すなわち電力密度 P_{x1} , P_{x2} , P_{y1} , P_{y2} , P_{z1} , P_{z2} (W/m^2) は、立方体内部にエネルギーの発散がないことと、その構造の対称性により

$$P_{x2} = -P_{x1}, \quad P_{y2} = -P_{y1}, \quad P_{z2} = -P_{z1} \quad (6)$$

となるであろう。この値が決まれば、エネルギーの移動方向と速度 v_{EM} (m/s) も定めることができる。

電磁波に代表される動電磁界では、単位面を通過する電力密度とその方向はポインティングベクトルで表され

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = E_y H_z \mathbf{i} \quad (7)$$

となる。ここでの $\mathbf{i}$ は x 軸方向を表す単位ベクトルである。(式 (1) の電流密度 $\mathbf{i}$ とは別。) 本稿の目的は、静電磁界においても式 (7) が成立するかどうかを明らかにすることである。

以下、これを具体的に調べてみよう。前節で述べた前提条件に立てば、図3と同じ静電磁界が現れる具体的な環境の一つを見つけ、そこで、エネルギー移動の有無を調べれば、その結果を図3の環境にそのまま適用してよいという理屈が成り立つ。任意の静電磁界が存在する環境は無数にあるが、解析の容易さと直感的な分かりやすさという点において図4の平行平板伝送線路（線路方向に十分長い）がよいであろう。

図4は幅 l 、間隔 d で $d \ll l$ の平行平板伝送線路を用いた直流電力伝送回路で、直流電圧 V 、負荷抵抗 R に対して、電流 I と負荷抵抗への供給電力 W

は、次式である。

$$I = \frac{V}{R}, \quad W = VI = \frac{V^2}{R} \quad (8a, b)$$

伝送線路の単位長さ当りの自己インダクタンス L (H/m), 静電容量 C (F/m), 線路の特性インピーダンス R_0 (Ω) は, 端部効果が無視できる定常部分において, それぞれ,

$$L = \frac{\mu_0 d}{l}, \quad C = \frac{\varepsilon_0 l}{d} \quad (9a, b)$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{d}{l} Z_0 \left(Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377(\Omega) \right) \quad (9c)$$

である。ここで, Z_0 は自由空間の固有インピーダンスである。

この平板間の空間には直交静電磁界が存在しており, 電界 E_y と磁界 H_z , 及び, その比で定義される電磁界の特性インピーダンス Z (Ω) の大きさは次式である。

$$E_y = \frac{V}{d}, \quad H_z = \frac{I}{l} = \frac{V}{Rl}, \quad Z = \frac{E_y}{H_z} = \frac{Rl}{d} = \frac{R}{R_0} Z_0 \quad (10a, b, c)$$

これから,

$$E_y H_z l d = \frac{V^2}{R} = W \quad (11)$$

となる。この結果は, 直流線路の電力伝送においては, 電力は導線内を運ばれるのではなく, 導線間の空間を電磁界が運ぶという解釈の根拠となっている。これから, 式 (6) で示した P_{x2} , P_{y2} , P_{z2} に関しては

$$P_{x2} \mathbf{i} = \mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad P_{y2} = P_{z2} = 0 \quad (12)$$

としてよいことが分かった。この結果は周知の事実である。しかし, ここでこれを持ち出したのは, 先前提条件に立てば, この結果を汎用的な性質として用いてよいという論理を貫きたいためである。ここでは静電磁界に限定してはいるものの, そのときの $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ は, 環境がどのようなものでも同じ性質を示すはずという主張である。

ここで P_{x2} を P_{EM} と置き直すと, $P_{EM} = E_y H_z$ なので, x 方向へのエネルギーの流れる速度は次式で算定される。

$$v_{EM} = \frac{P_{EM}}{u_{EM}} = \frac{2E_y H_z}{\varepsilon_0 E_y^2 + \mu_0 H_z^2} = \frac{2c}{\frac{Z}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z}} \quad (c: \text{光速}) \quad (13)$$

図4の回路のパラメータで書き換えると

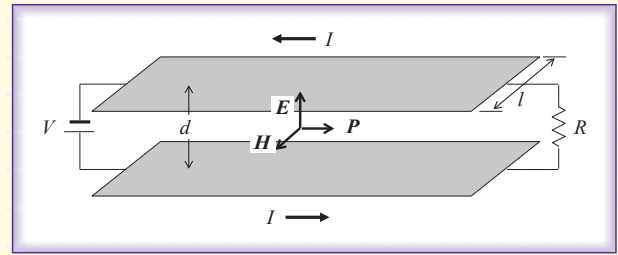


図4 平行平板完全導体伝送線路による直流電力伝送と内部に存在する静電磁界環境

$$v_{EM} = \frac{2c}{\frac{R}{R_0} + \frac{R_0}{R}} \quad (14)$$

である。負荷抵抗が線路の特性インピーダンスに等しい整合負荷の場合にはエネルギーの移動速度は光速となり, 不整合負荷では, 光速よりは遅くなることを意味している。

以上をまとめると, 電界と磁界が直交する静電磁界環境において,

- エネルギーの移動がある
- 単位面を通過する電力 (すなわち電力密度) は $E_y H_z$ で与えられるポインティング電力である
- エネルギーの移動速度は式 (14) で与えられ, $R=R_0$, すなわち, $Z=Z_0$ のとき光速になる

なお, ここでは, 平行平板伝送路の例で示したが, 異なる構造, 例えば同軸伝送線路でも, R_0 を与える式そのものは変わるけれども式 (14) の形は変わらない。

以下, 次章では, 非直交を場合も含めてこのような振舞いをする静電磁界のメカニズムを考えてみよう。

4 電磁エネルギー流動のメカニズム

4.1 電界と磁界が直交している場合

エネルギーの動きを表す式 (13), (14) から, どのような電磁界のメカニズムが見えてくるかを示したい。前節に倣って, まずは直交する静電磁界について考える。唐突であるが, 以下のような仮説を立ててみよう。番号は先の①, ②に続けて,

③ 電界と磁界が直交し, その大きさの比率の絶対値 $|Z|$ が Z_0 であるものを基本成分とする。基本成分は2種類あり, $Z=Z_0$ では, エネルギーは x 軸正方向に光速で動く。もう一つの基本成分は $Z=-Z_0$ で, エネルギーの移動方向は反対になる。ここでは, 便宜上, 前者を正の基本成分, 後者を負

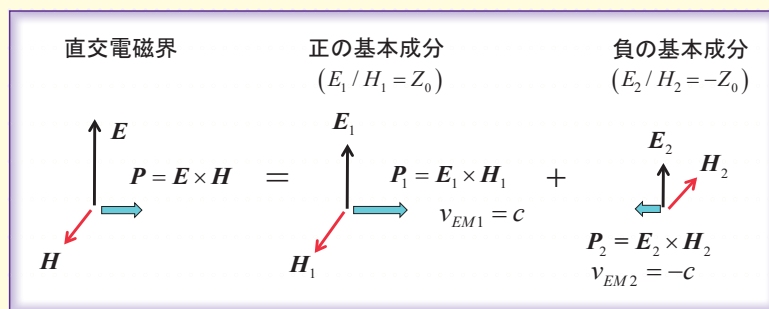


図5 直交静電磁界の二つの基本成分への分解

の基本成分と呼ぶ。

④ 任意の直交電磁界は二つの基本成分（＝正負の基本成分）に分解でき、エネルギーの動きは、逆方向に動く二つの成分の合成である。

図5は直交静電磁界を正負の二つの基本成分（添字1, 2を付している）に分けたものである。

二つの基本成分 E_1, H_1 と E_2, H_2 は

$$E = E_1 + E_2, \quad H = H_1 + H_2 \quad (15a, b)$$

$$E_1/H_1 = -E_2/H_2 = Z_0 \quad (15c)$$

から、次式のように定まる。

$$E_1 = \frac{1}{2}(E + Z_0 H), \quad H_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{E}{Z_0} + H\right) \quad (16a, b)$$

$$E_2 = \frac{1}{2}(E - Z_0 H), \quad H_2 = -\frac{1}{2}\left(\frac{E}{Z_0} - H\right) \quad (16c, d)$$

これから、両成分のエネルギーを求めて足し合わせると次式となって、つじつまが合う。

$$\begin{aligned} u_{EM,1} + u_{EM,2} &= \frac{\epsilon_0}{4} \left\{ (E + Z_0 H)^2 + (E - Z_0 H)^2 \right\} \\ &= \frac{1}{2} (\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) = u_{EM} \quad (17) \end{aligned}$$

同様に、単位面積を通過する電力（単位時間当りのエネルギー）も2成分合わせて

$$\begin{aligned} P_{EM,1} + P_{EM,2} &= (u_{EM,1} - u_{EM,2})c \\ &= \frac{\epsilon_0}{4} \left\{ (E + Z_0 H)^2 - (E - Z_0 H)^2 \right\} c \\ &= \epsilon_0 Z_0 E H c = E H = P_{EM} \quad (18) \end{aligned}$$

となり、これもつじつまが合う。ゆえに、合成速度も

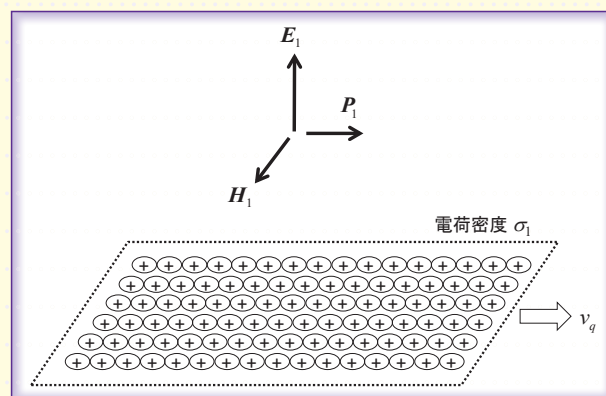


図6 正の基本成分を作る構造の一例

$$\begin{aligned} \frac{u_{EM,1} - u_{EM,2}}{u_{EM,1} + u_{EM,2}} c &= \frac{2EH}{\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2} \\ &= \frac{2}{\frac{Z}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z}} c = v_{EM} \quad (19) \end{aligned}$$

となり、式(13)の意味が説明できる。

ところで、なぜ静電磁環境において光速という動きが隠れているのだろうか。それは、その環境がどういう仕組みでできているかという広い視野に立つて考えると見えてくるかもしれない。例えば、正の基本成分の場合、図6に示すように、環境の底辺に一樣に正に帯電した無限大平板シート（電荷密度 σ_1 (C/m²)）があり、これが図の右方向に速度 v_q で動いていたとする。この電荷シートにより、その上方空間に $E_1 = (1/2) \sigma_1 / \epsilon_0$, $H_1 = (1/2) \sigma_1 v_q$ の電界と磁界を作っている。 $E_1/H_1 = Z_0$ となるためには、 $v_q = c$ が要請される。電磁界からは見えないところに、光の速度 c が埋め込まれていたのである。

以上により、電界と磁界が直交する場合、本節の最初に挙げた仮説③、④に不合理なことは見つからず、受入れを拒む理由はない。

4.2 電界と磁界が非直交の場合

次に、電界と磁界が直交しない場合を見てみよう。その電磁界を以下のように表そう。（ j : y 軸方

向単位ベクトル, $\mathbf{k}$: z 軸方向単位ベクトル)

$$\mathbf{E} = E\mathbf{j}, \mathbf{H} = H \sin \theta \mathbf{k} + H \cos \theta \mathbf{j}, Z \equiv E/H \quad (20)$$

非直交の場合, 正負の基本成分では表せない成分が必ず残り, 上記の例では, 直交成分から差し引いた $H \cos \theta \mathbf{j}$ がそれである. ここで, エネルギーの移動に関して, 前節③, ④の仮定に加えて, 以下の仮定を加える.

⑤電界のみ, または磁界のみの環境ではエネルギーは静止している.

この環境でのエネルギー密度 u_{EM} を, 直交成分を $u_{EM,1}$, $u_{EM,2}$ に分け, 残りの成分を $u_{EM,0}$ とすると,

$$u_{EM} = u_{EM,1} + u_{EM,2} + u_{EM,0} \\ = \frac{1}{2}(\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) \quad (21)$$

である. エネルギーの移動速度 v_{EM} は③~⑤の仮定から, 次式で算定できる.

$$v_{EM} = \frac{u_{EM,1} - u_{EM,2}}{u_{EM}} c \\ = \frac{\frac{1}{4} \epsilon_0 \left\{ (E + Z_0 H \sin \theta)^2 - (E - Z_0 H \sin \theta)^2 \right\}}{\frac{1}{2} (\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2)} c \\ = \frac{2 \sin \theta}{\frac{Z}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z}} c \quad (22)$$

また, 単位面積を通過する電力 P_{EM} は次式となる.

$$P_{EM} = u_{EM} v_{EM} = (\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) \frac{\sin \theta}{\frac{Z}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z}} c \\ = EH \sin \theta = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| \quad (23)$$

なお, 非直交の電磁界を直交成分と残りの1成分に分ける方法は, 上述のように電界の方向を基準として分ける仕方とは別に, 磁界を基準にする方法もある. どちらの方法をとっても, 式(22), (23)の結果に変わりがないことが確認できる.

静電磁界のエネルギーの動きに関して, ③~⑤の三つの仮説を立て, それに基づく推論を行った. その結果, 考えられる動作に対してつじつまの合う説明ができ, この仮説は正しいものと確信している. 繰返しにはなるが, 静電磁界が持つ性質は以下のよ

うにまとめられる.

(i) $\mathbf{E} \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$ の電磁界 (電界のみ, 磁界のみ, あるいは, 両成分の向きが同じ) ではエネルギーは静止している

(ii) 電界と磁界が直交し, その大きさの比率の絶対値 $|Z|$ が Z_0 であるものを基本成分とする. 基本成分は2種類あり, $Z = Z_0$ (正の基本成分) では, エネルギーは $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ 方向に光速で動く. もう一つの基本成分は $Z = -Z_0$ (負の基本成分) で, 反対方向に光速で動く.

(iii) 電界と磁界が直交する電磁界は二つの基本成分 (= 正負の基本成分) に分解される. この電磁界でのエネルギーの動きは, 逆方向に光速で動く二つの成分の合成である.

(iv) 非直交電磁界 ($\mathbf{E} \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$ を除く) は, 正負の基本成分から成る直交電磁界と, 電界または磁界どちらか1成分のみの計3成分から成り, エネルギーの移動 (方向と速度) は, それぞれの成分の移動の合成である.

非直交電磁界において, 成分ごとに見たエネルギーとポインティング電力とエネルギー移動速度の関係は図7のようにまとめられる.

5

動電磁界におけるポインティングベクトルとの整合性

ここまで, 静電磁界の性質として話を進めてきたが, 電磁界の性質は, 電界と磁界によって一意に決まると言う大前提に立てば, ポインティングベクトル $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ に限ってみても, 上記の(i)~(iv)の性質は時間変動のある動電磁界に対しても, その時間の瞬間瞬間において同様に適用できると期待できるであろう. 静電磁界から動電磁界 (電磁波) への連続的な接続という視点でポインティングベクトルの性質を見てみたい.

交流信号に対する分布定数線路の伝送特性

図4に示した無損失な平行平板伝送路を考え, 電源のみを交流電源に替える. 式(9)から, この伝送線路の特性インピーダンス R_0 は $R_0 = \sqrt{L/C} = (d/l)Z_0$, 信号の伝送速度 v_s は $v_s = 1/\sqrt{LC} = c$ となり, 光の速度になる. 負荷抵抗 R に対する反射係数 Γ_0 は $\Gamma_0 = (R - R_0)/(R + R_0)$ から, 光速に線路の正方向に進む波と反対方向に進む波の二つのモードが存在し, その電力比は $1:\Gamma_0^2 = (R + R_0)^2:(R - R_0)^2$ である. 逆方向に光速に進む両者合わせての実効速度 $v_{EM,AC}$ は

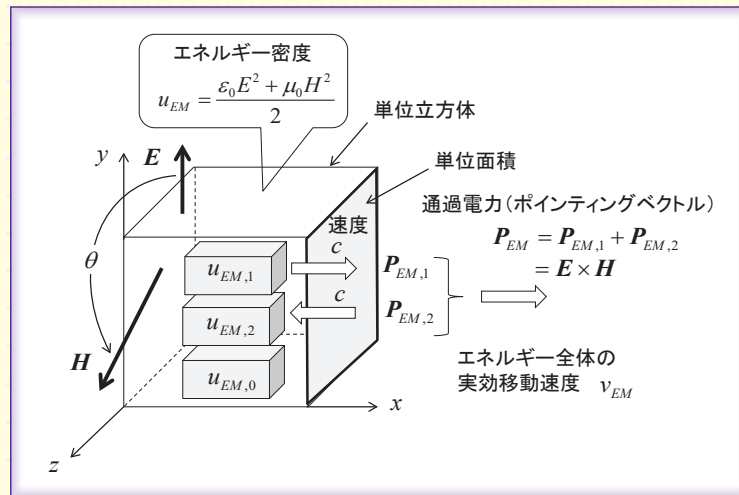


図7 エネルギーとポインティング電力とエネルギー移動速度の関係
(電界が y 軸方向、磁界が yz 面上の任意の方向に向く場合)

$$v_{EM,AC} = \frac{(R+R_0)^2 - (R-R_0)^2}{(R+R_0)^2 + (R-R_0)^2} c = \frac{2}{\frac{R}{R_0} + \frac{R_0}{R}} c \quad (24)$$

となる。これは、式 (14) で与えた直流伝送時のエネルギー伝送速度 v_{EM} に等しくなっている。

自由空間における平面波の伝搬

平面波の伝搬では、電界と磁界が直交し、その比 E/H は自由空間の特性インピーダンス Z_0 である。故に、このモードは 4.1 で述べた正の基本モードであり、 $E \times H$ 方向に光速で伝搬する。

導波管内の伝搬

電磁波伝送の例として導波管での伝送を見てみよう。前述の考え方を応用し、導波管内に生まれる電磁界を微視的に見る。そのことによってエネルギーの伝送速度が群速度になることを示す。

導波管伝送では、管内を壁面で反射しながら斜めに伝搬する平面波が導波管壁での境界条件を満たすような角度を定めて進行波モードを作る。ここでは、図 8 に示す方形導波管の中で最も基本である TE_{10} モードに着目する。(ほかのモードも式が複雑になるだけで適用性確認の目的では共通である。) TE_{10} モードの遮断波長は $\lambda_c = 2a$ であり、これより高い周波数において、電磁界の各成分と群速度 v_g は以下の式で表される。

$$E_y(z, x) = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a} z\right) e^{-jk_x x} \quad (25a)$$

$$H_z(z, x) = \frac{E_0 k_x}{Z_0 k} \sin\left(\frac{\pi}{a} z\right) e^{-jk_x x} \quad (25b)$$

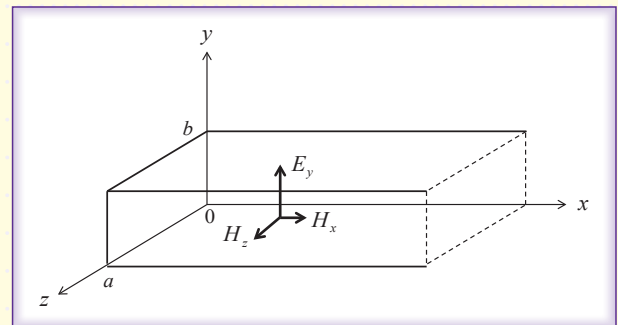


図8 方形導波管 TE_{10} モードの伝送

$$H_x(z, x) = -j \frac{\pi E_0}{Z_0 k a} \cos\left(\frac{\pi}{a} z\right) e^{-jk_x x} \quad (25c)$$

$$\frac{k_x}{k} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} = \cos \theta$$

(θ : 平面波の x 軸方向に対する伝搬角度)

$$Z \equiv \frac{E_y}{H_z} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (25d)$$

(H_x を除いている定義であることに注意)

$$v_g = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} c \quad (26)$$

電磁界 3 成分の導波管断面 $\times$ 管内波長の直方体空間内で平均したエネルギーの比率は次式である。

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \langle |E_y|^2 \rangle : \mu_0 \langle |H_z|^2 \rangle : \mu_0 \langle |H_x|^2 \rangle \\ = 1 : 1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 : \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

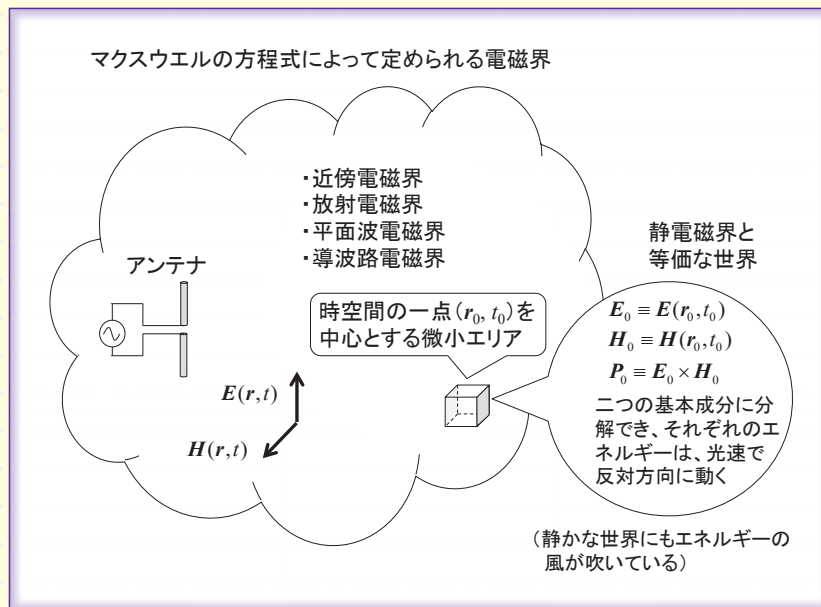


図9 電磁界の一つの描像 (エネルギー流動の種は静電磁界の中に埋め込まれている)

ここからが本題である。導波管内の電磁界を微視的に見てみよう。 E_y と H_z の比は一定なので、この二つの成分で作る電磁界のエネルギーの伝送方向はポインティングベクトルが示す x 軸正方向であり、導波管内の場所によって電界と磁界の大きさは違うものの、その速度は一定で、式 (19) から次式である。

$$v_{E_y+H_z} = \frac{2}{\frac{Z}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z}} c = \frac{2\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}{2 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} c \quad (28)$$

これに H_x が加わることで、エネルギーの瞬時的な意味での動く方向は z 軸成分が加わって微妙に揺れるが、 x 軸方向の速度には影響がない。ゆえに、 x 軸方向への速度は3成分のエネルギー比による加重平均をとると

$$v_{EM} = \frac{\varepsilon_0 \langle |E_y|^2 \rangle + \mu_0 \langle |H_z|^2 \rangle}{\varepsilon_0 \langle |E_y|^2 \rangle + \mu_0 \langle |H_z|^2 \rangle + \mu_0 \langle |H_x|^2 \rangle} v_{E_y+H_z}$$

$$= \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} c = v_g \quad (29)$$

となり、式 (26) で与えられる群速度と一致する。

6 電磁界の描像

電荷と電流を源とする電界と磁界がどのような関係で存在するかはマクスウェルの方程式が雄弁に

語ってくれている。その電界と磁界が織り成すエネルギー流動や運動量についても、マクスウェルの方程式の中に包含されているはずであるが、それが陽に見えてこないところがあって、この部分に謎を残している。図9は本稿で述べた電磁界のポインティングベクトルとエネルギー流動に関する推論の結果をまとめている。この図は、三次元空間 ($\mathbf{r}$) と時間 (t) で定められる四次元時空間に横たわる動電磁界 $E(\mathbf{r}, t)$, $H(\mathbf{r}, t)$ と、その微小領域である時空間の一点 ($\mathbf{r}_0$, t_0) での電磁界の関係を示している。この微小領域の電磁界は静電磁界を成すものである。ここでの推論から、電磁界の全体を矛盾なく捉えるためには、その静的な界、すなわち、静電磁界の中に、図7に示したエネルギーの光速移動が埋め込まれていて、それが、四次元時空間全体に敷き詰められ、動的世界を形作っているという描像を得たのである。冒頭にも書いたように、この描像はあくまで筆者の推論 (想像) であり、読者の皆さんの更なる議論によってより真実の姿に迫って頂ければ幸いである。

本稿ではポインティングベクトルに着目し、電波の世界の不思議を探索した。授業などで電磁気学を一通り学んで理解したつもりになっても、そこに現れる主要な役者、例えば、ローレンツ力 (電界と磁界が電荷に作用する力)、ベクトルポテンシャル (ゲージ場)、電磁誘導、変位電流などはくせ者ぞろい。その奥深いところを探つてゆくと、ポインティングベクトル同様、いろいろなパラドックス (不思議感覚) に突き当たる⁽¹¹⁾。ファインマンが言うように「物理のパラドックスは我々の理解の迷い

に過ぎない」⁽¹²⁾ のではあろうけれども、その不思議との格闘もまた、電波の世界の醍醐味を知る楽しみ方だと思う。

謝辞 本推論を行う過程において、電気通信大学准教授安藤芳晃博士との議論が有益であった。謹んで謝意を表す。

■文献

- (1) 安達三郎, “電磁波工学におけるパラドックス—その思い違いを探る—,” 信学誌, vol. 67, no. 6, pp. 657-662, June 1984.
- (2) 砂川重信, 理論電磁気学 (第3版), 紀伊国屋書店, 東京, 1999.
- (3) 宇野 亨, 白井 宏, 電磁気学, コロナ社, 東京, 2010.
- (4) 太田浩一, 電磁気学の基礎 II, 東京大学出版会, 東京, 2012.
- (5) R.P. ファインマン, R.B. レイトン, M. L. サンズ, ファインマン物理学 IV; 電磁波と物性 (増補版), 戸田盛和 (訳), 岩波書店, 東京, 2002.
- (6) 細野敏夫, “Poynting ベクトル, 電磁モーメントおよび Abraham-Minkowski 論争について,” 信学論 (C), vol. J69-C, no. 9, pp. 1122-1133, Sept. 1986.
- (7) 中島将光, “電磁現象の新たな基本概念 (その2); ポインティングベクトルの解明とパラドックスの解消,” 電学電磁界理論研資, EMT-91, no. 57-75, pp. 101-110, Oct. 1991.
- (8) E. Load, Open forum, “What is the significance of the Poynting vector in a static electromagnetic field?”. https://www.researchgate.net/post/What_is_the_significance_of_the_Poynting_vector_in_a_static_electromagnetic_field
- (9) 唐沢好男, “静電磁界中のポインティングベクトルについて,” 信学技報, AP2022-50, pp. 119-124, July 2022., “同 (II),” 信学技報, AP2022-138, pp. 193-198, Oct. 2022., “同 (III),” 信学技報, AP2023-159, pp. 24-29, Dec. 2023.
- (10) J. A. Stratton, Electromagnetic theory, McGraw-Hill, 1941.
- (11) 唐沢好男, 謎解き電磁気学, 私製本, Jan. 2023. http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-075_EM_Wonderland.pdf
- (12) R. P. ファインマン, R. B. レイトン, M. L. サンズ, ファインマン物理学 III; 電磁気学, 宮島龍興 (訳), 岩波書店, 東京, 1969.

(2023 年 7 月 18 日受付, 11 月 11 日再受付)

唐沢好男 (正員:フェロー)

1950 長野県生まれ。電波の研究は偶然が導いてくれた道であったが、長く歩み続けてみると面白いことがいっぱい。研究者 (KDD), 研究マネージャー (ATR), 大学教員 (電通大) を経てフリーに。今は、次世代を担う若者に向け、電波関連の技術レポートをせっせと書いている。唐沢研究室 HP より公開中。



半導体の工場誘致と研究教育で 盛り上がる「熊本」

街plus
探訪

熊本大学 瀬戸謙修 Kenshu Seto



1 あらまし

20 年以上働いていた東京を離れ、2023 年 4 月に熊本大学に着任してから 8 か月が過ぎました。本記事では、半導体で盛り上がる熊本の様子や魅力を簡単に御紹介できればと思います。TSMC 工場建設現場や熊本の半導体関係の教育機関に経済産業大臣、元文部科学大臣が訪問され、国が半導体に力を入れている熱を感じます。

2 熊本へのアクセスと半導体工場の位置

東京から飛行機で、阿蘇くまもと空港まで 2 時間弱、空港からバスで、市街地まで 50 分ほどです。鉄道ですと、新幹線を使えば、博多から最短 32 分ですので、博多からとても近いです。

図 1 に示すように、半導体工場までは熊本空港から 8 km ほどで、JR 熊本駅からは 20 km ほど、電車で約 30 分です。最短で 2034 年度末の開業を目指し、半導体工場から数 km 離れた肥後大津駅から、熊本空港まで、JR 延伸が予定されています。

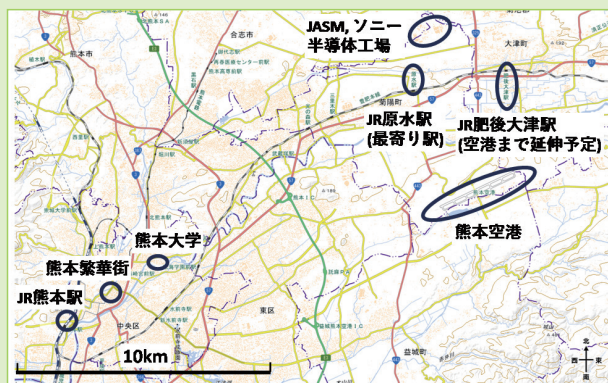


図 1 熊本市街、熊本空港、半導体工場等の位置関係 (地理院地図 Globe を加工して作成)

3 熊本の半導体産業と TSMC 誘致の影響

ロジック IC 生産で世界シェア 50 % 以上 (2022 年) の収益を占める半導体メーカ、TSMC (ていーえすえむしー) の工場誘致で盛り上がる熊本。TSMC が過半数出資し、ソニーセミコンダクタソリューションズとデンソーも出資する、ロジック IC を製造する会社が JASM (じゃすむ、Japan Advanced Semiconductor Manufacturing) です。TSMC の工場は、正確には JASM の工場ですが、TSMC が中心かつ不可欠なため、TSMC の工場とも呼ばれています。ロジック IC は、自動車、スマホ、データセンター、通信などに不可欠ですが、日本では 40 nm 未満の半導体を作れませんでした⁽¹⁾。TSMC 誘致で状況が一変します。12~28 nm の半導体を生産する JASM 第 1 工場⁽²⁾は、2024 年末までの本格稼働を目指し、2022 年 4 月に着工し、2023 年 11 月末で建屋はほぼ完成しています (図 2)。更に TSMC は熊本に、5 nm 半導体を生産する第 2 工場を検討中で、加えて、3 nm の半導体生産を視野に入れた第 3 工場についての報道もありました⁽³⁾。JASM 稼働に伴い、半導体の生産体制が強化されることが期待できそうです。

また、JASM に隣接して、ソニーセミコンダクタマ



図 2 建設中の JASM の第 1 工場 (2023 年 4 月撮影)

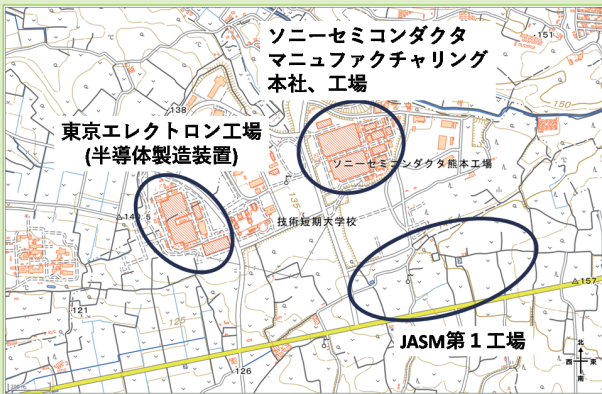


図3 JASM, ソニー半導体工場付近 (図1) の拡大図 (地理院地図 Globe を加工して作成)

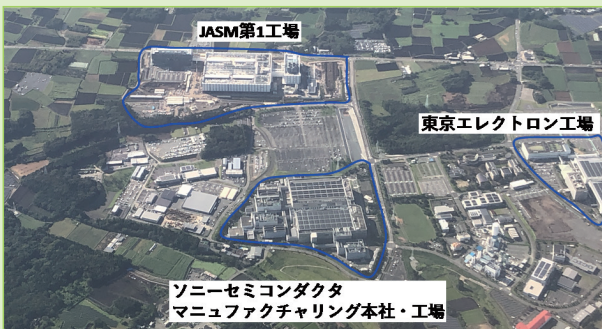


図4 上空から見た半導体工場 (図3と上下反対)

ニユファクチャリング (SCK) の本社及び工場があります (図3, 4)。SCKの工場はソニーが世界シェア1位を持つイメージセンサを製造しており、更に近隣に2か所目の新工場を建設する方針です。

半導体工場だけでなく、近隣に東京エレクトロン (図3, 4) など半導体製造に必要な製造装置メーカーなども集まっており、今回のTSMC誘致に伴い、熊本での半導体関連会社の集積が一層進みそうです。

TSMCは熊本の第1工場で約1,700人を雇用予定で、台湾からの駐在員とその家族は合計600人と見込まれています⁽⁴⁾。TSMCの工場が建設された菊陽町や大津町などの近隣では、工業用、住宅用などの用地確保が進み、国税庁が2023年7月3日に発表した2023年1月1日時点の路線価は、前年比19%以上高騰しました。また、TSMC工場建設関係者が熊本の街を訪れていることを耳にしており、街のにぎわい増加に貢献しているようです。一方、工場周辺で車の渋滞が喫緊の課題となっており、道路の車線を増やすなどの対策が計画されています。更に、台湾など海外からの駐在員の子供が英語で教育を受けられるインターナショナルスクールなどが求められており、新設・拡充が計画されています。

JASMでは、大卒の初任給を他社と比べて数十%高い水準 (28万円) で求人しており、他社も求人を成功

させるため、初任給を上げるなどして対応しているようです⁽⁵⁾。また、途中でJASMに転職する可能性もあり、人材の獲得競争が増しているとのことです⁽⁵⁾。半導体分野の人材にとって、従来と比べ、就職環境が大幅に良くなっているようです。半導体分野の就職環境の盛り上がりは、その分野を学ぶ学生のモチベーション向上にポジティブな影響を与えそうです。

4 熊本大の半導体研究教育

TSMC誘致に伴い、人材確保・育成が課題になっています。この課題に応えるため、筆者の所属する熊本大でも、半導体分野の人材育成に向け、スピーディーに、力を入れて取り組んでいます。2023年4月1日に、半導体・デジタル研究教育機構がスタートし (図5)、半導体関係の教員6人が着任しました。(筆者は、そのうちの一人です。) 更に2024年4月1日から勤務開始の半導体分野4人を公募しました。熊本大からの半導体関連企業への就職は元々多かったですが、一層多くの人材を輩出予定です。

半導体・デジタル研究教育機構の半導体部門は、三次元実装技術、次世代LSIデバイス、次世代イメージセンサなど半導体分野の重要トピックについて、実用化を強く意識しながら研究を進めています。元々、熊本大では、SCKなどの半導体関連企業と共同研究を進めていますが、TSMC誘致に伴い、TSMCとの共同研究が期待されます。半導体は、製造は言うまでもなく、設計も欠かすことができません。筆者は、半導体の集積回路設計自動化技術 (EDA, コンパイラ技術) が専門で、設計技術の観点から、研究教育に打ち込む予定です。

熊本大では、学科レベルの組織である「半導体デバイス工学課程」、学部レベルの組織である情報融合学環に「DS半導体コース」を新設し、2024年4月に最初の1年生を迎えました。また、半導体関係の研究教育



図5 熊本大学半導体・デジタル研究教育機構の除幕式 (2023年4月1日)



を進める新棟も現在建設中です。半導体・デジタル研究教育機構のメンバは、これら新設組織の教育を担当予定で、半導体産業の期待に応える人材をしっかりと育成できるよう取り組んでいます。

半導体・デジタル研究教育機構のある熊本大の黒髪南地区は、街の中心部（通町筋）まで2.5 kmと、時間は掛かりますが、頑張れば歩ける距離です。中心部まで、道路の混雑がなければバスで10分、夕方など混雑していると、30分ぐらいは掛かります。大学のすぐそばに、阿蘇に水源を持つ白川が流れており、学生が河原でバーベキューやサークル活動などをしてリフレッシュしています。白川沿いに遊歩道があり、市街地までサイクリングもできます。このように、熊本大は自然や旧制五高の歴史を感じられ、街からも比較的近く、恵まれた環境にあると言えます。

5 熊本の観光

JR 熊本駅近辺には2021年に開業した新しい商業施設があり、ショッピングや食事などが楽しめます。熊本の繁華街（図1）は、下通（しもとおり）で、JR 熊本駅から路面電車やバスで約20分です。下通には広いアーケードがあり、上通（かみとおり）や新市街のアーケードとつながっており、全部を合わせると2 kmほどと長いです。脇道に入っても、おいしいレストランや飲み屋さんが数えきれないほどあります。下通と上通の境目が、街の中心部の通町筋（とおうちょうすじ）で路面電車やバスの駅があり、デパートの鶴屋百貨店や、その裏に小泉八雲の旧居があります。

新市街の方の「サクラマチクマモト」と呼ばれる2019年に開業した商業施設には、おしゃれなショッピングモール、レストランがあり、便利です。更に熊本各地に行けるバスが発着しており、空港からのバスや、ビール工場の無料シャトルバスも発着します。

街中からですと、熊本城の観光が、移動時間が少なくスムーズです（図6）。お城の中は、加藤時代、細川時代から、西南戦争まで充実した歴史展示があり、しっかり見ると、2時間は掛かります。天守閣は震災から見事に復活していますが、同時に、まだ2016年の熊本地震の爪痕⁽⁶⁾が残る建築物や崩れた石垣が多くあり、継続的な復興が望まれます。街中は震災の爪痕を感じませんが、熊本城から路面電車と徒歩で約30分の、加藤清正公がまつられている浄池廟では、階段の石灯籠が多く倒れたままになっていました。熊本大の建物も震災で被害を受けましたが、安全確保できる耐震補強



図6 熊本城

を施すことで、継続使用しています。

熊本市には、細川藩に招かれた宮本武蔵関係の史跡も多いです。路面電車も風情があり、街の中心から路面電車に乗って30分ほどで、細川藩が作った立派な庭園である、水前寺成趣園に行けます。

少し足を延ばせるようでしたら、阿蘇がお勧めです。距離が比較的近いので空港からレンタカーが便利で、大観峰や草千里ヶ浜など、体験してみなければ分からない雄大な景色が眺望できます。市内からバスも出ていて、2時間ほどで阿蘇山にも行くことができ、タイミングが合えば火口見学もできます。市内から1時間半～2時間で、天草にも行けます。早朝になりますが、船釣りで、鯛釣りなどが楽しめます。温泉もたくさんあり、市内から比較的近くてメジャーなところだと、バスで約70分の山鹿温泉や、阿蘇には内牧温泉があります。更に足を延ばすと、神話の里の高千穂など、魅力的な観光スポットがたくさんあります。

6 熊本のおいしい食べ物

九州と言えば、ラーメンが思い浮かびます。熊本にも、幾つも熊本ラーメンのお店があります。また、博多ラーメンのお店もあり、ラーメン好きには、お腹の膨らみに気を付けなければいけない環境です。

熊本と言えば、馬刺しが有名です。熊本の人は、正月や祝い事で食べることが多いそうですが、スーパーなどでも売っています。うまみが口の中に広がり、最高の酒の肴（さかな）です。発祥は諸説あるそうですが、熊本初代藩主の加藤清正が朝鮮出兵した際、朝鮮半島で食料がなくなり、仕方なく軍馬を食べたところ、大変おいしかったのが始まり、とも言われているそうです⁽⁷⁾。細川藩とゆかりのある、からし蓮根も有名です。お土産屋、郷土料理を出す居酒屋などで売ってい

て、衣が油で揚げてあり、揚げたてはパリッとしていてこちらもお酒のお供にぴったりです。

また、あか牛丼（あかうしどん）は、値段は少々高めですが、柔らかく甘みのある焼き加減のレアな牛肉が乗っていてとてもおいしく、関東では見掛けたことがありません。熊本の周りの鹿児島や宮崎などからも取り寄せたおいしい牛肉も食べることができます。

熊本は農産物が豊富で、おいしく安価な果物や野菜が入手できます。スイカ、イチゴ、メロン、またトマト、ナス、アスパラなどがおいしいです。

更に、新鮮な天草の海鮮を熊本市街で食べられるお店があります。鯛や伊勢海老などのお刺身をはじめ、おいしい魚介が食べられます。鹿児島に近いこともあり、新鮮なカツオの刺身も食べられます。

九州では、中華料理として、長崎ちゃんぽんが有名ですが、熊本も実は中華料理がおいしく、太平燕（タイピーエン）が名物です。味わい深いスープに春雨を入れた太平燕を是非食べてみて下さい。

熊本には、おいしい食べ物がいろいろあります。たくさんお店があって、どこに行ったらよいか迷います。熊本の人にお勧めを聞くのが確実かもしれませんが、例えば、熊本県公式観光サイト⁽⁸⁾を参考にできます。

7 おわりに

書き足りないことがあると思いますが、熊本の半導体の様子について、また、熊本に出張などでいらっしゃったときの情報として、少しでも参考になりましたら幸いです。熊本の半導体の勢いをきっかけに、通

信分野を含め日本の産業、経済が元気になるよう頑張ってください。

■文献（URL は 2023 年 11 月 29 日にアクセス）

- (1) 半導体産業復活の鍵、我が国の「半導体・デジタル産業戦略」
https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/92/3/92_136/_pdf
- (2) TSMC が熊本で第 3 工場建設を検討、最先端半導体の生産視野…米報道
<https://www.yomiuri.co.jp/economy/20231121-OYT1T50144/>
- (3) TSMC が熊本県に三つ目の「半導体工場」設立を検討
<https://toyokeizai.net/articles/-/716612>
- (4) 台湾半導体 TSMC 熊本進出⑥ TSMC ってなに？
<https://www.nhk.or.jp/kumamoto/lreport/article/000/78/>
- (5) 「TSMC」熊本進出④半導体人材の獲得競争が激化
<https://www.nhk.or.jp/kumamoto/lreport/article/000/78/>
- (6) 「熊本」住んで・旅して・学んで
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/15/2/15_166/_pdf
- (7) 農林水産省 うちの郷土料理
https://www.maff.go.jp/j/keikaku/syokubunka/k_ryouri/search_menu/menu/basashi_kumamoto.html
- (8) 熊本県公式観光サイト
<https://kumamoto.guide/brand/>

瀬戸謙修（正員）

1997 東大・工・電気卒。1999 同大学院修士課程了。2004 同博士課程了。同年東大産学官連携研究員、2007 東京都市大・電気電子通信（武蔵工大・電気電子）講師。2023 熊本大半導体・デジタル研究教育機構准教授。





オープンソース LAN アナライザ Wireshark と ハードウェアキャプチャ

いけりりネットワークサービス株式会社 竹下 恵 Megumi Takeshita

1 パケットと LAN アナライザ

よく「今月のパケ代が高い」などの言葉を聞きます。現在の通信はパケット交換方式が主流です。パケット交換方式はデジタル通信方式の一つで、データをパケットという単位で送受信するものです。パケットを宅配便の荷物とイメージするとよいでしょう。パケットはヘッダとペイロードから構成されます。ヘッダは荷送り状に当たり、宛先や送信元などの項目がフィールドとして用意されます。そしてペイロードが荷物の部分で、各プロトコルで送るデータが入ります。

さて、このようなパケットは無線や銅線、光ファイバで伝送されるので、直接見ることはできません。そこで、パケットを「見える化」するツールが LAN アナライザです。LAN アナライザはパケットを解読して、ヘッダ、フィールド、ペイロードの内容を表示するツールです。LAN アナライザを用いることで、通信のデバッグや調査、トラブルシューティング、最近ではサイバーセキュリティの分析などを行うことができます。

2 今年で 26 年目を迎える Wireshark

オープンソース LAN アナライザ Wireshark は、Gerald Comb 氏がスタートさせた前身の Ethereal から数えて 2024 年で、26 年目になります。筆者は同氏が創設した米国の CACE Technologies の代理店をしていたことから、Wireshark 開発者会議で講演を続けるとともに、GTK から QT にフレームワークが変更された際に、最初に Wireshark の日本語化を行いました。

現在、Wireshark は解読できるプロトコル(Dissector)数は 2,900 以上、フィールド数は 244,000 を超え、2,100 人以上の開発者、ソースコードは 330 万行を上回る大きなプロジェクトとなっています。現在の

Wireshark のメジャーバージョンは 4 になり、2024 年 5 月時点で 4.2.4 がリリースされています。公式プロジェクトサイトは <https://www.wireshark.org/> です。

3 Wireshark のアーキテクチャ

Wireshark は図 1 のような構成をしていて、CLI 版の tshark とともに、汎用の復号器（デコーダ）として設計されています。パケットキャプチャを行う部分は Wireshark/tshark とは独立しており、dumpcap が行います。dumpcap は libpcap 互換のパケットキャプチャドライバを呼び出してパケットを取得します。Windows 環境では CACE 社の開発していた WinPcap に代わり、現在では Nmap プロジェクトが作成した Npcap がパケットキャプチャドライバとして Wireshark に同梱されています。もちろん dumpcap をはじめとした、ほかのキャプチャツールや形式からの入出力も libwiretap から行えます。Wireshark の中心となる libwireshark は EPAN (Ethereal Packet Analyzer) フォルダにあり、パケットの絞り込みを行う表示フィルタ (Display filters)、統計画面などのプラグイン

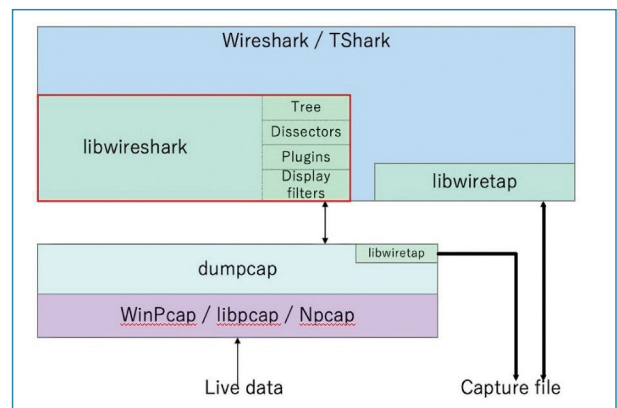


図 1 Wireshark のアーキテクチャ

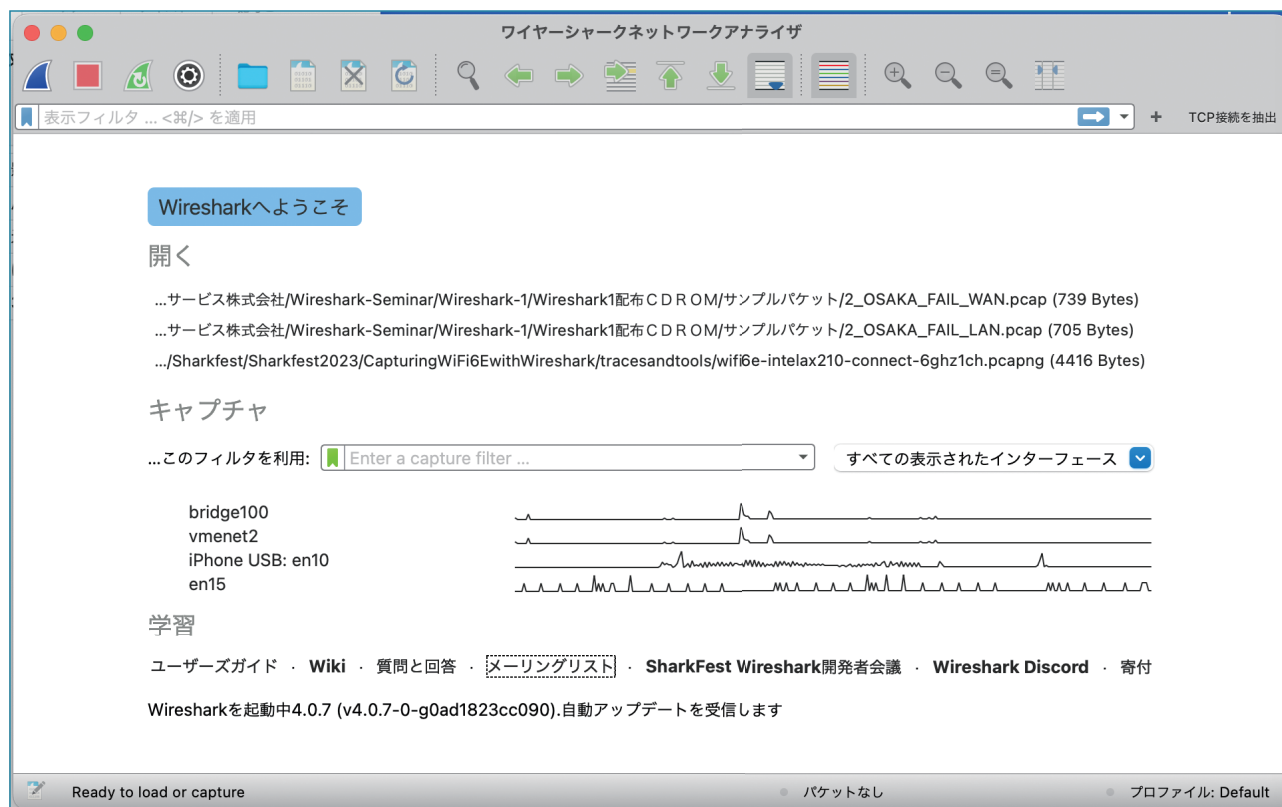


図2 Wireshark スタート画面

(Plugins), プロトコルの解説を行うダイセクタ (Dissectors), トリー (Tree) 形式でレイヤごとにヘッダ, フィールドを表示する画面で構成されています。

標準のキャプチャファイル形式は pcapng 形式です。これは XML を元にしており、従来の pcap/cap 形式と異なり、コメントを追加したり、ホスト名のエイリアスやキャプチャ環境などの追加情報をファイルに残せるほか、UNIX 時刻問題などにも対応しています。

4 パケットキャプチャの開始と停止, 表示フィルタとキャプチャフィルタ

ここでは Wireshark からのパケットキャプチャの開始と停止, フィルタ, 保存という一般的な利用方法について紹介します。

Wireshark を起動すると, 図 2 のようにメニューやボタンなどの下に, 取得したパケットを絞り込むための表示フィルタツールバー, 最近開いたファイルの一覧, キャプチャ時のパケットを絞り込むためのキャプチャフィルタツールバー, 接続されているインタフェース及び拡張インタフェース一覧, ユーザガイドなどのリンク及びステータスバーが表示されます。

Wireshark4 からは, 図 2 のように現在稼動しているインタフェースが上位に表示されます。そこで, インタフェース右に表示されているパケット数を示す線グラフ

を参考に, キャプチャしたい LAN カードを選びます。また, 各インタフェースを選択すると, 取得しているアドレスなどの情報がポップアップされて表示されるほか, パケットを絞り込むためのキャプチャフィルタを入力することができます。

早速パケットキャプチャを開始してみます。アクティブなインタフェースをダブルクリックします。パケットキャプチャが開始されます。ここでは簡単な ping コマンドを実行してみます。コマンドを実行したら, ツールバーにある赤の■のボタンをクリックしてパケットキャプチャを停止します。そして, ファイルメニューから保存を選択してパケットキャプチャを ping.pcapng として保存します。

Wireshark4 からは図 3 のようにフレーム 1 本 (慣れない方はパケット一つと考えても大丈夫です。) について 1 行でパケットの概要を表示するパケット一覧部が上部に表示されます。パケットは色付けルールに従って色が付けられます。また画面下部が左右に 2 分割されます。左側にはパケット詳細部が表示され, 選択したパケットをダイセクタが解析したパケットの意味がレイヤごとにトリー形式で表示されます。右側にはパケットデータ部が表示され, パケットの 16 進数ダンプ及び ASCII 表示が示されます。これらの表示は設定すれば, 使いやすいように変更・カスタマイズすることができます。

パケットキャプチャになじみのない方に, もう少し説

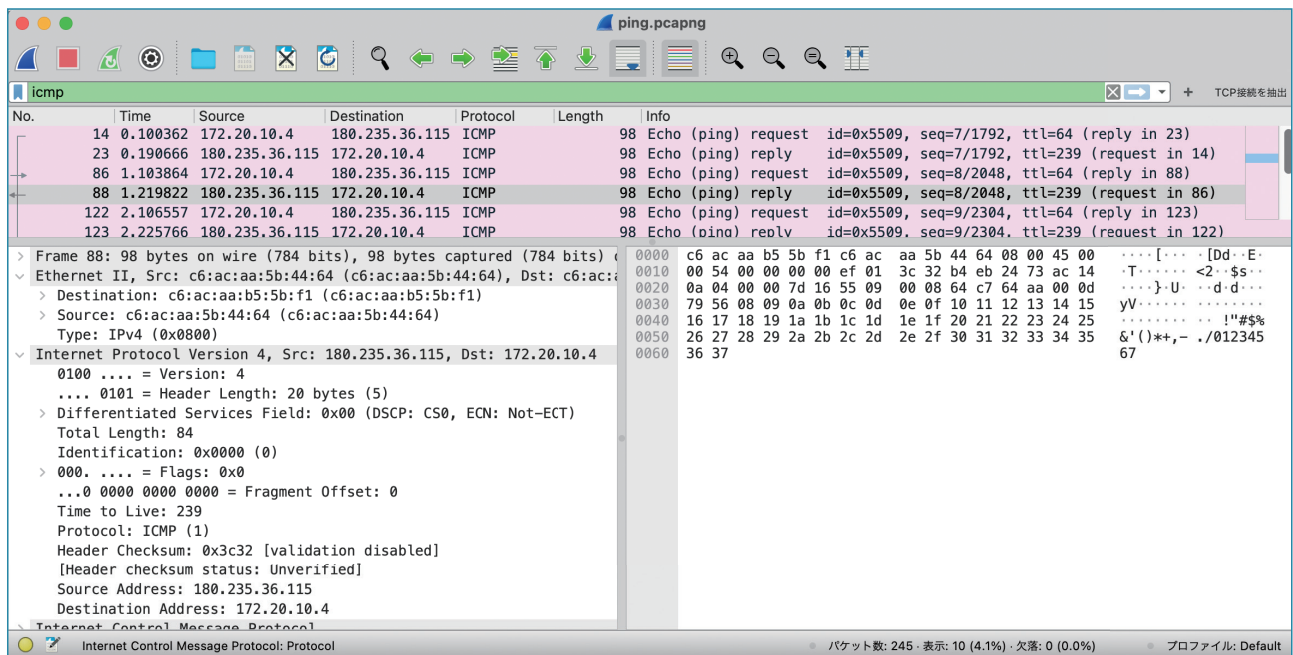


図3 ping コマンドを実行した際の packets 例 (ping.pcapng)

明します。例えば、画面のピンク色がついている部分がパケット一覧画面です。この画面ではパケット一つが1行で示されます。グレーで反転表示されているのが現在参照しているパケットです。

次に右下の画面を見て下さい。「0000 c6 ac aa b5 5b f1 c6 ac aa 5b 44 64 08 00 45 00[...][Dd..E.」のように表示されています。ここで、0000 がアドレスで、1 Byte が2文字の16進数で実際のパケットが「c6 ac aa b5 5b f1 c6 ac aa 5b 44 64 08 00 45 00」表示されています。1行が16 Byte でデータが続いた後、「....[...][Dd..E.」のように表示されている部分はASCII表示と呼びます。これは1 Byte をASCII表に変換して1文字で表示しています。さて、このパケットデータ画面だけではどのようなパケットかよく分かりません。そこで、画面左下の部分がパケット詳細画面と呼ばれる部分で、パケットの意味がプロトコル別にトリー形式で表示され、ヘッダを展開するとフィールドが表示され、パケットの意味が分かるようになっていきます。例えば、IPv4ヘッダ (Internet Protocol Version4) と表示されているトリー項目を展開すると、フィールドが一覧表示されています。ここで表示されている送信元IPアドレスのフィールド (フィールド名 Source Address) には、180.235.36.115 と記載されており、このフィールドがパケットデータ部分の「b4 eb 24 73」に対応することが分かるようになっていきます。

Wireshark のフィルタには表示フィルタとキャプチャフィルタがあります。

キャプチャフィルタは libpcap 互換のキャプチャ

ライバに適用するもので、設定すると取得するパケットをあらかじめ絞り込み、キャプチャ量を減らすことができます。キャプチャフィルタの書式は libpcap のフィルタ式の pcap-filter 形式で指定します。

<https://www.tcpdump.org/manpages/pcap-filter.7.html>

一方、一度取得したパケットを絞り込むためには表示フィルタを用います。表示フィルタは Wireshark の表示フィルタツールバーはもちろん、ireshark や tshark でグラフや表を作成する際に指定します。表示フィルタは Wireshark のダイセクタ (Dissector) の書式を利用します。表示フィルタはプロトコル・フィールド (サブフィールド) の形式を取るほか、解析を支援するために生成した生成フィールド (フィールド名に [] の記号がつきます。) を用いることができます。非常に詳細な指定が可能ですが、複雑になるため、まずは Wireshark で表示されたフィールドをドラッグ&ドロップしたり、自動補完機能を利用するとよいでしょう。

5 フローグラフや入出力グラフ、帳票の作成、ファイルの出力

Wireshark はパケットの意味を解析する機能だけでなく、便利な統計機能も持ちます。統計メニューからフローグラフを選択することで、図4のようにパケットの流れを矢印で表示するラダー図を作成することができます。また、統計から入出力グラフを選択することで必要な凡例を作成して、目的に応じて自由にカスタマイズしたヒストグラムや折れ線グラフを作成できます。

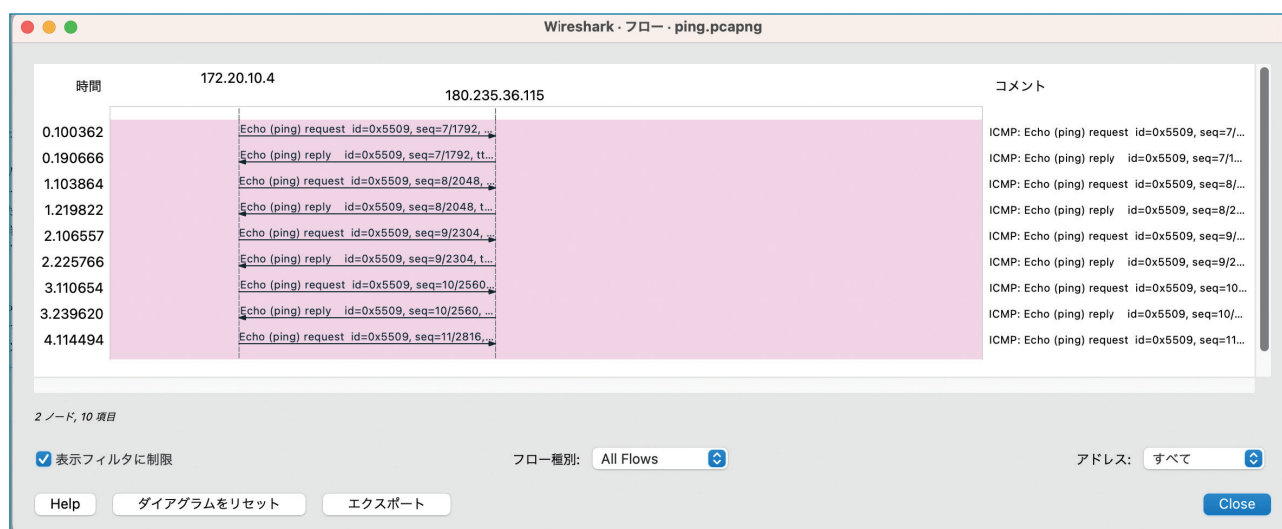


図4 フローグラフ画面

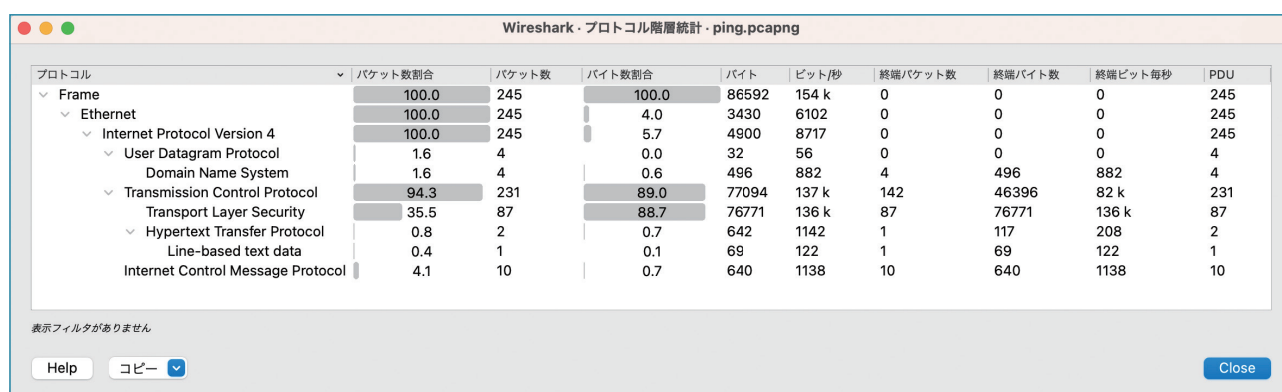


図5 プロトコル階層画面

統計メニューには終端、対話といった統計画面が用意されており、パケットを表形式で出力したり、出力内容からパケットをフィルタすることも可能です。

例えば、取得したパケットの全体の概要を把握したい場合には、プロトコル階層機能が便利です。統計からプロトコル階層を選択すると、図5のように各レイヤのプロトコルのパケット数・バイト数の割合を確認することができます。

図5のプロトコル階層画面では、全てのフレームがイーサネットフレームであり、またIPv4のパケットであることが分かります。また、そのうちの94.5%がTCPのパケットであり、4.1%がICMPのパケットであることなどを知ることができます。

Wiresharkは充実したファイルの入出力機能も備えています。取得したパケットは「ファイル」から「名前をつけて保存」を選ぶことで、pcap/pcapngをはじめとした様々なトレースファイル形式で保存できます。更に、「ファイル」から「エクスポートパケット解析」を選択し、テキスト、CSVのほか、JSON形式で出力することで、ほかのアプリケーションで活用することができます。

6 ハードウェアキャプチャ

さて、これまでWiresharkの主要機能を紹介してきましたが、もし研究や評価で正確なパケットキャプチャが必要な場合、Windows/macOS/Linuxのパケットキャプチャは完全ではありません。具体的には通常のPCでWiresharkを使ってパケットキャプチャする際にはタイムスタンプの問題とパケット紛失の問題に注意する必要があります。

まずタイムスタンプの問題は、通常のPCでパケットを取得する場合、WiresharkはOSの時刻のAPI機能を利用します。この場合、PCの内部クロックではナノ秒レベルの精度はなく、時刻のずれが生まれてしまいます。次に、パケット紛失の問題ですが、通常のPCのLANカードでも100 Mbit/s程度の通信であれば、さほどパケットのドロップは気になりません。しかし、1 Gbit/s以上のトラフィックやフレームサイズが小さいと話が変わってきます。例えば、パケットジェネレーターで1 Gbit/sで全てが64 Byte (FCS含む)の最小フレー



図6 Profitap 社 ProfiShark1G+



図7 Profitap 社 IOTA10G+

ムを隙間なく送ったとします。すると、Intel の Pro 1000 アダプタを搭載した汎用的な PC の場合では、大体 140 Mbit/s くらいからパケットの取りこぼしが発生するとともに、CPU 利用率が 100 % に近づいていきます。

以上から、高精度な時刻の測定・確認が必要であったり、基幹ネットワークなどの高スループットトラフィックの環境であれば、ハードウェアキャプチャ機器をお勧めします。

ハードウェアキャプチャ機器は、従来ソフトウェアが行っていたパケットキャプチャドライバの機能のパケットの取得、pcap/pcapng ファイルの作成を FPGA によって行うものです。

例えば、Profitap 社の ProfiShark1G+ (図6) では、キャプチャファイルに最小 8 ns でのハードウェアタイムスタンプを付与するほか、GPS アンテナ端子や PPS 端子を備え、時刻同期も可能です。また、PC とは USB3 で接続し、ハードウェアキャプチャにより 1 Gbit/s 全二重のロスレスでノンサンプリングのパケットキャプチャが行えます。また上位モデルであれば 10 Gbit/s のトラフィックでもキャプチャすることができます。

7 パケットの見える化

Wireshark 自体もグラフや帳票を作成できますが、よりリッチな形でパケットを見る化したいという場合もあるかと思います。例えば、オープンソースで行う場合、Wireshark で取得したパケットを JSON 形式で保存します。この JSON データを ElasticSearch をはじめとしたビッグデータを処理するデータベースに格納して、Kibana などのグラフや帳票の作図ツールを使ったり、Grafana などのツールでインパクトのある見やすいダッシュボードを作成するという方法があります。

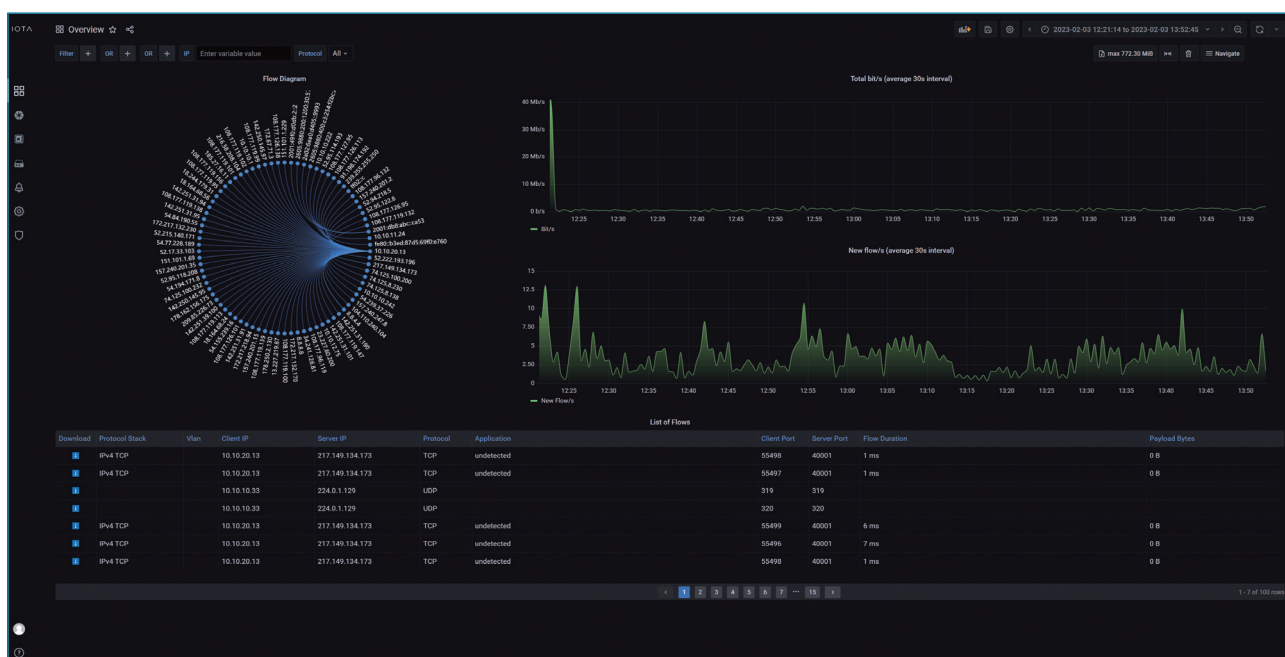


図8 Profitap 社 IOTA10G+ のダッシュボード画面例

例えば、Profitap 社の IOTA10G+ (図 7) にはハードウェアキャプチャ + 2 TByte の交換可能ストレージに、パケットの「見える化機能」が備わっています。IOTA は電源切断時のフェイルセーフに対応した SFP/SFP + インタフェースを備え 1 Gbit/s / 10 Gbit/s の銅線やファイバインタフェースを交換して利用できます。またハードウェアキャプチャはハードウェアタイムスタンプ及び GPS/PPS に対応しており、直接 AES 暗号化された交換可能な 2 TByte の SSD に保存されます。

保存したパケットはデータベースに格納され、Web UI からフィルタ、pcap/pcapng ファイルの抽出が可能です。そして、自由にカスタマイズ可能な見える化機能を持ち、世界地図やマトリックス表示などのダッシュボード画面を作成できます。図 8 は可視化した例です。この画面ではトラフィックの傾向を一目で把握できるように見える化しています。また、ハードウェアボタンを持ち、ボタン一つでキャプチャの開始、停止を行えるため、計測やトラブルシューティングの現場に持ち運んで、ハードウェアキャプチャ、保存、抽出、作図、解析といった作業を WebUI から行えます。

更なる詳細な情報は Wireshark/tshark の書籍^{*1}や集合教育^{*2}でも提供しています。本記事により Wireshark を中心としたパケットキャプチャの魅力が伝わり、計測、研究、評価に御活用頂ければ幸いです。

* 1 <https://www.ikeriri.ne.jp/store/books.html>

* 2 <https://www.ikeriri.ne.jp/learning/>

竹下 恵

いけりりネットワークサービス株式会社 Wireshark プロジェクト日本語化担当、Wireshark 開発者会議にて講演を行う。米国 BayNetwork/Nortel Networks を経て、いけりりネットワークサービス株式会社代表取締役。中大・国際情報・兼任講師。



研究者になるきっかけとなった 研究者のところの研究者に なってみて (前編)

若者よ、
世界に
出よう！

岩手大学 村田健太郎 Kentaro Murata

1 まえがき



筆者は、2022年8月から2023年7月までの1年間、スウェーデンのLund University (LU) にて客員助教として長期海外研修を行いました。LUは1666年に創設された歴史のある大学で、世界大学ランキングでもトップ100にランクインする北欧屈指の大学です(図1)。最近で言えば、アト秒パルスレーザの研究で2023年のノーベル物理学賞を受賞したAnne L'Huillier教授が在籍する大学として、ニュース等で知った方も多いのではないかと思います⁽¹⁾。

特に、無線通信分野の方であれば、一度は図2の装置を目にしたことがあるのではないのでしょうか？ こちらは、LUと英国のUniversity of Bristolの共同研究開発である、世界初のリアルタイム massive multiple-input multiple-output (MIMO) テストベッドです⁽²⁾。

そして、セルフィー(自撮り)と一緒に写っているのが、国際メンターであるProf. Buong Kiong Lauです。皆からはVincentの愛称で呼ばれています。Vincentは、LUのDepartment of Electrical and Information Technology (EIT) にて、アンテナ・伝搬・信号処理技術を統合するマルチアンテナシステムに関する研究を行っています。これまでにIEEE Antennas and Propagation Society (AP-S) のジャーナル編集委員やEducation Committeeメンバを歴任し、2024年のAdComメンバに選出される等、AP-Sのアクティビティ向上と学生・若手研究者の育成にも精力的に取り組んでいます。

本記事では、Vincentの研究グループの一員として1年間研究してきた体験記を、前編・後編の2回にわたって紹介させて頂きたいと思います。特に前編では、筆者が海外研修を実施した経緯や向こうでの研究生活について真面目？ に書いていこうと思います。先にお断りしておくと、今回の記事は、個人の経験・主観によるところが多く、「世界に出よう！」と考えている読者の方、万人の役に立つものではないかもしれません。



図1 ルンド市内にある歴史情緒ある建築物。LU本部(左上)、LU図書館(左下)、ルンド大聖堂(右)。ルンド大聖堂に隣接してLUの前身である中世の大学Studium generaleが1425年に設立された。

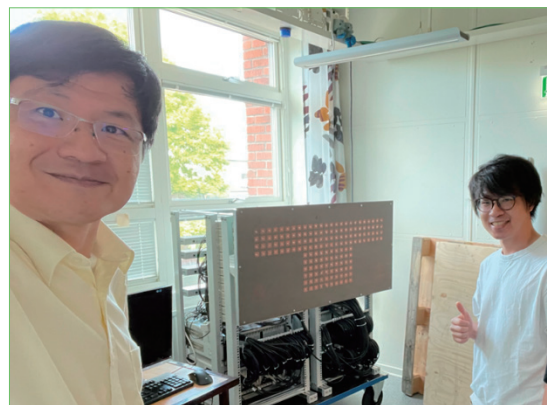


図2 Massive MIMOテストベッドとVincentと私。Vincentがセルフィーをたくさん取ってくれたおかげで本記事執筆にあたり写真がたくさんあって助かりました。

それでも、本記事を読んで、少しでも共感できたり、刺激になる部分を見つけて頂ければ、筆者としては幸いです。

2 LUでの長期海外研修のきっかけ



まず話の前提として、「なぜ」そして「どうやって」LUに行ったのか、についてお話ししたいと思います。

2.1 なぜLUに行こうと思ったのか？

唐突ですが、皆さんには「尊敬する研究者」はいらっしゃいますか？ 私には、自分の研究者人生に大きな影響を与えてくれた研究者が大勢います。ここでは今回の記事に関係する四人の研究者を紹介させていただきます。

一人目は、学部・修士時代の指導教員で、研究の「いろは」を教えてくれ、アカデミックの道に進むきっかけを与えてくれた岩手大学の本間尚樹教授です。（以下、海外風に Naoki と呼ばせて頂きます。）

二人目は、Brigham Young University の Prof. Michael Jensen (2016 IEEE AP-S President) です。

筆者は学部4年次の2010年当時、独学で「MIMO アンテナの反射と相互結合を原理的に零とする回路の設計理論」を考案したのですが、これは Jensen が2004年発表の論文で既に提案していた multiport conjugate matching の理論と全く同じものでした⁽³⁾。自分の研究がほかの人に既にやられていた、という経験は「研究者あるある」だと思いますが、初めてこの経験をした私にとって、このときのショックは計り知れないくらい大きなものでした。ゆえに Jensen は、私にアカデミックの道の厳しさを教えてくれるとともに、独力で独自の研究を成し遂げたい、という博士課程進学のモチベーションを与えてくれた人物です。これを契機に、「これからの研究テーマは自分で作る」と決心しました。

そして博士課程2年次の2015年に、「特定の配列から成る MIMO システムに特定の回路を接続すると、原理的に無限の多重伝送路を実現可能」という大発見をしました^{(4), (5)}。…と思ったのも束の間、お気づきの方もいらっしゃるかと思いますが、これは軌道角運動量 (OAM: Orbital Angular Momentum) 多重伝送技術の無線通信への応用にほかならず、私がそれを知るようになったのは、私の尊敬する三人目の研究者である LU の Prof. Ove Edfors の論文を見つけたときだったわけです⁽⁶⁾。

ただし、前回の学部時代の状況と異なるのは、研究過程で、国内における同分野の従来研究はちゃんとサーベイしたはずだった、ということです。それではなぜ結果的に同様の事態に陥ったかという点、

- ・ OAM は量子力学や光学といった“異分野”では元々よく使われる物理量であるが、専門外の私にとって聞いたことすらない用語であったこと、そして
 - ・ OAM 多重伝送技術を無線通信に応用した研究は“国外”では既に多く実施されていたが、電子情報通信学会の大会・研究会・論文では同研究に関する発表が当時はまだなかったこと、
- といった理由でサーベイから漏れていたものと後に分析しました。この経験から、国内の自分の専門領域の



図3 2013 IEEE AP-S/URSI@Orlando で Vincent と食事をしたときの一枚。右のほとんど見切れているのが Vincent (撮影者は Naoki)。一緒に写っている新潟大の故西森健太郎研究教授も、筆者が学生のときからアカデミックの道に進むことを後押ししてくれていた、尊敬する研究者の一人です。

研究だけでなく、国外の専門領域外の研究にもアンテナを向けなくてはならない、ということを知りました。

以上の経験から、一端の研究者になるには「尊敬する世界の研究者に伍する研究をしなくてはならない」と確信し、これが私にとって「世界に出よう！」と思うきっかけとなったのです。そしてくしくも前述の三人の研究者との出会いが、最後の四人目、国際メンターの Vincent につながっているのです。

実は Vincent とは2013年に米国 Orlando で開催された IEEE AP-S/URSI で、Naoki の紹介で一緒に食事をする機会がありました(図3)。元々、Naoki は前職の NTT 時代から Vincent とは旧知の仲で、当時デンマーク Aalborg University に留学していた故西森健太郎研究教授と一緒に LU を訪れたことがあったそうです。更に Vincent もまた MIMO の研究で著名で、学部時代に研究室配属後、最初の輪講で読んだのは Vincent の MIMO 整合回路に関する論文⁽⁷⁾で、後に Jensen との共著論文も読んで勉強することになりました⁽⁸⁾。(だったら最初から文献(3)の論文チェックしとけよ、という話なのですが…) ちなみに Vincent と Ove は共に LU・EIT 所属で、LU に行ってから知ったのですが、彼らの居室は同じコリドーの又隣でした。

「無線の業界はどこかでつながっている」とよく言いますが、私が「LU の Vincent の下で研究してみたい」と思うようになったのは運命的でもあり、ごく自然な流れだったように思えます。上記のような理由とともに CV (Curriculum Vitae) を添え Vincent にメールしたところ、Vincent も私のことを覚えてくれていたようで、客員研究員としての受入れを快く認めてくれました。

余談ですが、実は以前訪問したことがあった某大学

の先生にもメールしたのですが、残念ながらそちらからは返信がなく早々に諦めてしまいました。そういった意味で、あらかじめ海外の研究者とコネを作っておくのは大切だと思いましたし、その機会をくれた Naoki には感謝です。

2.2 どうやって LU に行くことができたのか？

さて海外に行く動機と許可を得たところで、「では海外に行ってきます」とは簡単にはいきません。例えば、スウェーデンの場合、滞在予定期間で生活するのに十分な資金があることを証明できない場合、そもそも居住許可 (residence permit) が下りない可能性があります。そのため、海外研修に当たり金策は必要不可欠でした。

そこでまず、私の場合、岩手大学の教員長期海外渡航支援制度を活用しました。各大学にも同様の制度があるかと思いますが、筆者はこれに応募し学内選考を経て、海外研修先への往復旅費とそこでの滞在費を最低限カバーする資金を得ることができました。

そして、学内支援経費を元手に、文部科学省の世界で活躍できる研究者戦略育成事業「学際融合グローバル研究者育成東北イニシアティブ (TI-FRIS: Tohoku Initiative for Fostering Global Researchers for Interdisciplinary Sciences)」の育成対象者にも応募しました⁽⁹⁾。TI-FRIS では、学際性、国際性、社会性を備えた世界トップレベル研究者を育成することを目的とした様々なプログラムが用意されています。中でも国際共同研究プログラムでは、自立した研究環境の整備、国際研究ネットワークの構築、国際共同研究の実施、研究成果のアウトプットを一貫してサポートする体制が整っており、本当に至れり尽くせりでした。この全面的バックアップのおかげで、LU 渡航前の予備検討から研修終了後の国際共同研究の国際学会発表 (図 4) に至るまで、海外研修をより充実したものにすることができました。

また本国際共同研究成果を基に、研修中に応募して



図 4 2023 IEEE AP-S/URSI@Portland にて Vincent との国際共同研究成果を発表。学会参加にあたっては、TI-FRIS の研究成果発表支援経費に採択頂いた。

いた科研費が採択され、帰国後も国際共同研究を継続そして発展させるための基盤を作ることができました。

このように、私の場合、最初にまとまって大きな予算をドカンと獲得したわけではなく、国際共同研究を開始・実施・継続するための予算を、都度コツコツ積み重ねていったような感じでした。今回は公的資金が主でしたが、ほかにも海外渡航を支援する民間ファンドも様々あるかと思うので、まずは御自身の渡航期間や研究規模に適したものを探してみるのがよいかと思います。

3 LU での Vincent との共同研究エピソード



本稿執筆にあたり、改めて 1 年間の海外研修を振り返ると、Vincent のメンタリングがあったからこそ得られた経験が多々あったなあ、と感じました。本章では、私の印象に残った Vincent との共同研究エピソードを三つ紹介しようと思います。

3.1 研究に厳格な Vincent

渡航前のオンラインミーティングで、研修中の研究テーマを何にするか決めようとしていたときの話です。まず初めに筆者が提案したのは、岩手大で既に始めていた研究を LU に持ち込み、Vincent のアドバイスをもらいながら発展させていく、というものでした。しかし、Vincent の返事は、即答で「ノー」でした。理由は単純で、その研究は筆者の研究であって、Vincent との共同研究ではないからであり、自分自身の研究をやりたいただけなら、わざわざ他所の大学でやる意味はない、という「ど正論」で突き返されることになりました。確かに渡航前の筆者は“海外で研究する”こと自体に意義があるのでは？と履き違えており、これをきっかけに“海外の研究者と共同で研究する”という本来の目的を再認識することができました。

ただし筆者としても譲れないものはあって、Vincent が強みとするアンテナ素子や電磁界解析そのものの研究だけをやるつもりはなく、筆者の強みとするアレー信号処理を生かせる研究がしたい、という主張は曲げませんでした。その結果、アンテナでの電磁波の散乱現象とアレーアンテナの信号処理の要素を融合した reconfigurable intelligent surface (RIS) の研究テーマ⁽¹⁰⁾に落ち着くには時間は掛からず、これもまた運命的でもあり、自然の流れだったのだと思います。

この一件で何が言いたいかというと、筆者の持論ではありますが、国内外限らずメンターとは上下関係なく気持ちでぶつかって、お互いに強みとすることと一緒に研究したいことの擦り合わせをした方が、良い師弟関係を築くことができる、と信じています。

このほかにも Vincent の厳格さを語るエピソードがあり、筆者は学会・論文投稿するとき締切りぎりぎりまで粘るタイプなのですが、Vincent は投稿前には必ず原稿に目を通し有意義なコメントをくれました。逆に Vincent は、自分が関わっていない研究、目を通していない論文の共著者には断固としてならん！ というスタンスを貫いており、この研究者としての厳格さこそが、Vincent の研究の質にも現れているのだと思いました。

ちなみに研究には厳格な Vincent ですが、基本的にはとても面倒見が良いメンターです。筆者の研修開始にあたり、居室の前に手作りのネームプレートを用意してくれたり、LU ロゴの入ったコーヒーカップをプレゼントしてくれたり、ホスピタリティあふれる歓迎をしてもらいました（図5）。また、毎日筆者の居室に「Everything OK?」と声を掛けに来てくれたり、研究グループでの交流イベントを率先して企画してくれる等、メンバの生活面についてもメンタリングが行き届いていたのが印象的でした（図6）。

3.2 教育に熱心な Vincent

ある日、Vincent がいつもどおり筆者の居室に来て「良いアイデアを思い付いた」と話し始めました。何か嫌な予感がしました。その「良いアイデア」というのは、Student Design Contest (SDC) に出場するチームのメンターになってくれ、というものでした。SDC とは IEEE AP-S/URSI で開催されるイベントで、学部生を中心に結成されたチームが毎年異なるテーマに沿ってアイデアを創出し、設計・試作・デモンストレーションを通して競技するもので、LU は過去に多数回の本選出場・入賞を果たした強豪校でした。ただし、今年の SDC のテーマが RIS に関するもので、学部生には難易度が高い、ということで当初学内からの申し出がなかったようです。そこで、Vincent は学部の講義でメンバを募り、最近、偶然 RIS の共同研究を始めた筆者にメンターの白羽の矢が立ったわけです。筆者自身、SDC への参加は初めてであり、正直不安もありましたが、これも良い経験！ と引き受け、メンターからメンターに任命されることになったのです。

SDC のプロジェクトを開始してからは、週1のミーティングでブレインストーミング形式でアイデアを出し合い、応募書類提出の段階で、提案アイデアを実現するための予備実験を実施するところまで進展することができました（図7）。この過程で筆者は、LU と日本の学部生との「ある違い」に気づきました。

まず LU の学部生は、スウェーデン現地の学生であっても英語圏外からの留学生であっても、圧倒的に英語がうまいということです。現に LU は、「THE 世界大学



図5 Vincent が用意してくれた筆者居室のネームプレート（上）と自腹でプレゼントしてくれた LU ロゴの入ったコーヒーカップ（下）。なお筆者はカップをもらったその週に、そのカップをなくすという大失態をします。



図6 Vincent の自宅に招かれグループのメンバー皆で BBQ

ランキング」の国際性の分野で 40 位にランクインしています。

ゆえに筆者はメンバ間の英会話が速過ぎて聞き取れず、何度も「Sorry?」と聞き返さなければなりません。また SDC への応募書類も当然英語で書く必要があるのですが、理系作文という観点で添削することはあっても、英作文で口出しできることは正直何もなかったです。逆に現地デモの際に、審査員の質疑応答に英語力で困ることはない、という絶対的な安心感がありました。

一方、アイデアを形にする、というプロセスは日本の学部生の方が得意だと感じました。LU では、研究グループに配属され、実際に研究に携わることができるのは、修士課程の残り半年くらいだけ、と聞きました。その点、日本の大学では学部生から研究室に配属され、

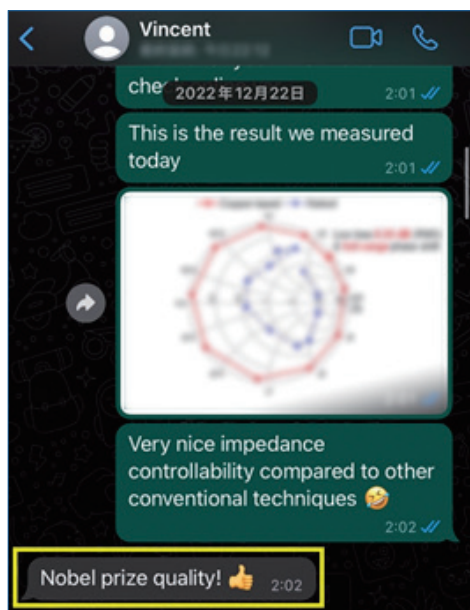


図7 SDCに向けた予備実験結果をWhatsAppでVincentに送ったときのレスポンス。VincentはLUからノーベル賞受賞者が出ることを予知していたのかもしれない。

OJT (On the Job Training, いわゆる「習うより慣れろ」) 方式で研究に着手することになるので、学部生時点では研究遂行能力は日本の学生の方が高いのではないかと思います。

逆に言えば、英語力を理由に日本の大学からのSDCへの応募が少ないことは、もったいないことだと思いましたし、アンテナ・伝播研究会で国策的に学部生のSDC参加を促進する取組みがあってもよいのではないかと思います。

話は戻りますが、それでは筆者らのチームがどうなったかという、全応募31件中トップ10には入ったものの、惜しくも本選出場の6チームに入ることはできませんでした。実は、筆者が本国際会議に参加して知ることになったのですが、最終的にはEITから筆者らのチームを含む複数のチームからの応募があり、うち1チームが本戦出場しFirst Placeを受賞したようで、結果的にそのチームに本戦出場枠を取られる形となりました。このように悔しい結果に終わりはしたものの、LUの学生だけでなく、客員研究員の筆者にも教育者としての成長のチャンスを与えてくれたVincentには本当に感謝です。

3.3 国際的に著名な Vincent

前述の国際学会に参加したときに、Vincentが世界の研究者をたくさん紹介してくれたのですが、皆口をそろえて「Vincentをメンターに選んだのは正解だったね」と話してくれました。確かに筆者の研修期間中だけでも、EITとVincentの所には世界から多くの客員研究員・留学生が集まってきました。中でも一番の

記憶に残るのはLUで開催されたミニワークショップです。

海外研修も終盤に差し掛かった2023年5月、メンターのNaokiと筆者の指導学生がデンマークのオールボーで開催されたIEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT)に参加するついでに、LUに見学に来ることになりました。そして何と、同会議に招待講演で参加していたJensenも同じタイミングでLUに来ることとなり、Vincentの計らいでミニワークショップを開催することになったのです。このワークショップにはOveも参加することとなり、私の尊敬する研究者四人が奇跡的に一堂に会することになりました(図8)。

そして、筆者にとっては、その場にいられるだけで光栄なことだったのですが、何よりも筆者を驚かせたのは、JensenのiWATでの招待講演内容⁽¹¹⁾が、筆者が岩手大着任直後(2019年)から現在進行形で行っているRIS関連の研究と極めて近い内容であったということです^{(12)~(14)}。つまり、尊敬する研究者に突き動かされ自分自身も研究者となり、尊敬する研究者を追い掛けて海外研修に来てみたら、図らずも尊敬する研究者に追い付いていた、ということを知ることになったのです。このような体験は少なくとも筆者が一生日本にいたとしてもできなかったでしょうし、Vincentの国際的な研究者ネットワークがあったからこそ実現し得たものだと思います。

この経験からの気付きではありますが、世界に出る、ということは、研究者としての世界での自分の現状位置を確認し、自分自身の今後の研究者キャリアを客観的に見つめ直すためのマイルストーンにする、という意味もあると感じました。

ちなみにJensenの講演を聞いているときから興奮が収まらず、ワークショップ後に個別にJensenとディスカッションをさせて頂いたのですが、興奮し過ぎて何の話をしたのか全く覚えていません(図9)。

4 あとがき



本記事では、筆者が経験した海外研修について紹介させて頂きました。LUのVincentの下で研究すること、そして世界の尊敬する研究者たちに伍する研究をするようになることが、実は筆者が研究者になると志したときから決まっていたのかもしれない、という運命的とも必然的とも取れる一連の研究者ストーリーについて真面目に書かせて頂きました。

次回の後編では、LUでの海外の研究者・博士課程学生との出会いを通じ、筆者が海外研修で体験・体感したことを踏まえ、「世界に出よう!」と考えている学生



図8 EIT で開催されたミニワークショップ。前述した筆者の尊敬する研究者4人が同じ部屋にいるという奇跡的状况（撮影者は Vincent）。



図9 ミニワークショップ後の Jensen とのディスカッション。撮影した筆者の指導学生いわく「先生、今まで見たことないくらい興奮してましたよ。」

の皆さんへ伝えたいメッセージを、少しでも楽しんでもらえる内容で書ければと思います。

謝辞 本国際共同研究は、JSPS 科研費 23K13328 の助成、文部科学省世界で活躍できる研究者戦略育成事業「学際融合グローバル研究者育成東北イニシアティブ (TI-FRIS)」の支援及び岩手大学教員長期海外渡航支援のもと実施したものです。

文献

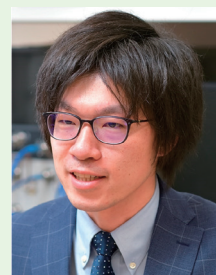
- (1) <https://www.lunduniversity.lu.se/research-and-innovation/nobel-prize>
- (2) S. Malkowsky, J. Vieirg, L. Liu, P. Harris, K. Nieman, N. Kundargi, I. C. Wong, F. Tufressen, V. Owall, and O. Edfors, "The world's first real-time testbed for massive MIMO: Design, implementation, and validation," IEEE Access, vol. 5, pp. 9073-9088, May 2017.
- (3) J. W. Wallace and M. A. Jensen, "Mutual coupling in MIMO wireless systems: a rigorous network theory analysis," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 3, no. 4, pp. 1317-1325, July 2004.
- (4) K. Murata, N. Honma, K. Nishimori, N. Michishita, and H. Morishita, "Analog eigenmode transmission for short-range MIMO based on orbital angular momentum," IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 65, no. 12, pp. 6687-6702, Dec. 2017.
- (5) K. Murata and N. Honma, "OAM multiplexing

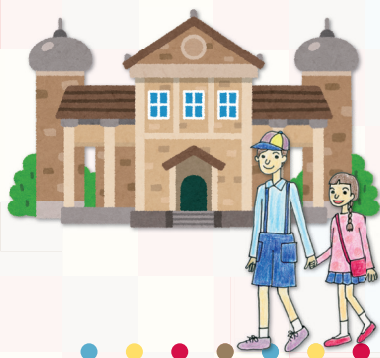
using uniform circular array and microwave circuit for short-range communication," Electromagnetic Vortices: Wave Phenomena and Eng. Appl., IEEE, pp.295-319. 2022.

- (6) O. Edfors and A. J. Johansson, "Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area?," IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 60, no. 2, pp. 1126-1131, Feb. 2012.
- (7) B. K. Lau, J. B. Andersen, G. Kristensson and A. F. Molisch, "Impact of matching network on bandwidth of compact antenna arrays," IEEE Trans. Antennas and Propag. vol. 54, no. 11, pp. 3225-3238, Nov. 2006.
- (8) M. A. Jensen and B. K. Lau, "Uncoupled matching for active and passive impedances of coupled arrays in MIMO systems," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 10, pp. 3336-3343, Oct. 2010.
- (9) <https://www.ti-fris.tohoku.ac.jp>
- (10) K. Murata, B. K. Lau, and N. Honma, "Impact of ground plane scattering on performance of reconfigurable intelligent surfaces," Proc. 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI), pp. 109-110, 2023,
- (11) M. A. Jensen, B. T. Arnold, M. D. Arnold, and R. Mehmood, "Reconfigurable surfaces in reverberation chambers for over-the-air mobile device testing," Proc. 2023 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), pp. 1-4, 2023,
- (12) K. Murata, S. Kondo, K. Takiya, N. Honma, and T. Chida, "Receiver-feedback-free cavity resonant wireless power transfer based on in situ S-parameter estimation using a parasitic antenna," IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., vol. 20, no. 10, pp. 1923-1927, Oct. 2021.
- (13) K. Murata, K. Takiya, S. Kondo, and N. Honma, "Performance improvement in implicit cavity resonant wireless power transfer using dual parasitic antennas," IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., vol. 21, no. 6, pp. 1273-1277, June 2022.
- (14) K. Murata, "Dilemma of microwave wireless power transfer and fully passive receiver finding utilizing multi-antenna technologies," 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 342-344, 2022.

村田健太郎 (正員)

平 23 岩手大・工卒。平 26 同大学院修士課程了。平 28 防衛大理工学研究科博士課程了。同年 (株) 東芝入社。現在岩手大・理工・助教。マルチアンテナのシステム、信号処理、アプリケーションの研究に従事。平 27 ISAP Best Student Paper Award, 平 28 本会学術奨励賞, 平 29 IEEE AP-S Japan Young Engineer Award, 平 30 EuMC Microwave Prize, 令 4 URSI AT-RASC Young Scientist Award 各受賞。工博。IEEE 会員。





つくばエキスポセンター

干川尚人 Naoto Hoshikawa 筑波大学

1 はじめに

研究学園都市として知られる茨城県つくば市には多数の研究機関がありますが、同時に多くの科学博物館などの研究教育施設も点在している街です。約50か所の研究教育機関等を回る「つくばサイエンスツアー」があり、小・中・高校の校外学習や修学旅行、企業研修などで様々なコースが利用されています⁽¹⁾。今回はこの研究学園都市の数ある施設の中で、代表的な科学館である「つくばエキスポセンター」を紹介します。

2 つくばエキスポセンターとは

つくばエキスポセンターは公益財団法人つくば科学万博記念財団が運営する科学教育施設で、1985年につくば市で開催された科学万博の施設として建設された後、科学館として再オープンしたものです。つくばエクスプレス・つくば駅を出て北側に目を向けると、屋外展示物であるH-IIロケット実物大模型が見えますので、これを目指して駅に隣接する、つくば市中央公園を抜けると入り口に到着します(図1)。展示は屋内フロア、屋外フロアに分かれており、屋内では先端技術の展示

コーナーやサイエンス体験設備、1985年の科学万博メモリアル展示コーナーやプラネタリウム、3Dシアターなどがあり、屋外ではロケットのような巨大な展示物や科学体験ができる遊具が展示されています。

3 展示コンテンツの紹介

3.1 おもしろサイエンスゾーン

1階フロアにあるこのゾーンでは身近な現象に潜む科学原理を体験できる数々の展示物があります。図2左は「たつまき発生装置」で、竜巻雲の発生から消滅までリアルタイムに確認できます。そのほかにも、人が丸ごと入ることができるシャボン玉作成装置(図2右「シャボン玉のかべ」)、空気の弾丸を発射するエア・バズーカなど、科学を体で感じる事ができる遊具が盛りだくさんです。隣接する「サイエンスワークス～科学者のしごと～」コーナーでは世界中の「科学者のお仕事」を平易な表現で紹介する展示もあるので、お子様に科学への興味を持ってもらうきっかけ作りに最適なコンテンツではないでしょうか。



図1 エキスポセンター入り口



図2 たつまき発生装置(左)とシャボン玉のかべ(右)

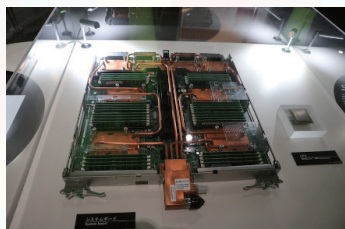


図3 スーパーコンピュータ「京」のきょう体（左）とシステムボード（右）

3.2 夢への挑戦～のぞいてみよう科学がひらく未来～

2階フロアにあるこのコーナーは、科学者の挑戦（研究）にまつわる展示物が配置されています。世界最速の演算性能を目指したスーパーコンピュータ「京」のきょう体やシステムボード（図3）や国際宇宙ステーションのモジュール、有人潜水調査船「しんかい6500」など、様々な分野の「夢への挑戦」を実物展示しています。

3.3 屋外展示場

H-II ロケットの実物大模型が目を見張ることは冒頭でも説明しましたが、個人的にはその脇にあるロケット



図4 フェアリング



図5 小形雪上車

の先端部を覆うフェアリング構造物（図4）の展示もしっかり見てもらいたいと思います。これは実物を海から回収したものらしく、実際に使われた生のロケット部品を手で触れることができる場所は、屋外展示ならではの、耐熱性や耐振動性に優れた軽くて丈夫な「ハニカムサンドイッチ構造」を一部穴の空いた生々しい実物から観察できるのがよいですね。ほかにも南極で使われた小形雪上車（図5）や巨大な陽電子リング用電磁石などもあります。

3.4 プラネタリウム

6台構成の4Kレーザプロジェクタ、ドームスクリーンに映し出される、全天8K相当のマルチプロジェクションシステムで投影されるプラネタリウム⁽²⁾は、観光ガイドなどでしばしば「世界最大級のプラネタリウム」として案内されています。プラネタリウム室内の写真撮るのが難しかったので、つくばエキスポセンターから提供頂いた写真を掲載します（図6、7）。上映番組は子供向けだけでなく、大人も楽しめる様々な番組があり、1本40分程度で時間帯ごとに変わるため、朝から夕方まで一日中楽しむことができます。

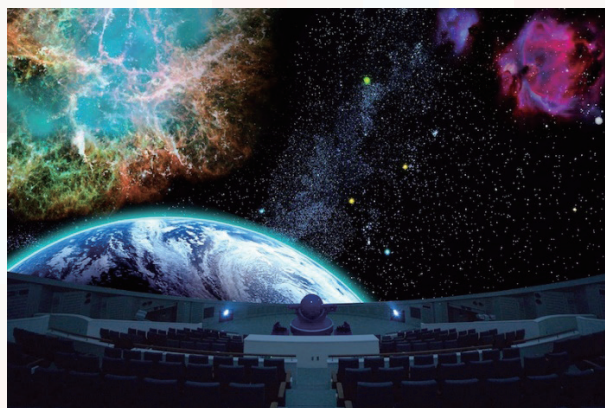


図6 プラネタリウム

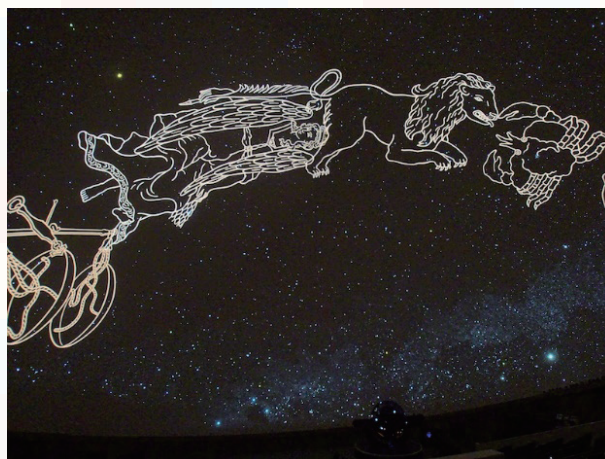


図7 星座

（図6、7は公益財団法人つくば万博記念財団御提供）

4 おわりに

今回御紹介できたのは本施設のごく一部のコンテンツで、そのほかにも科学教室、講演・講座、ワークショップなどの参加型イベントも多く企画されております。御興味のある方は是非公式 Web サイトを御確認下さい。研究学園都市内の科学教育施設は提供する研究機関の専門性の高いコンテンツが目立ちますが、つくばエキスポセンターは科学分野全般を幅広く、また小さなものから大きなものまで取り扱っている点が特徴です。子供から大人まで幅広く楽しめるコンテンツが盛りだくさんですので、つくば市へお越しの際は是非見学してみてください。

■文献

- (1) つくばサイエンスツアーオフィス
<https://www.i-step.org/tour/tsukuba-science-tour.html>
- (2) つくばエキスポセンター プラネタリウムについて
<https://www.expocenter.or.jp/planetarium/about/>

Access

「つくばエキスポセンター」

開館時間：9:50～17:00（最終入館は16:30）

休館日：毎週月曜日（祝日の場合は翌平日休）、年末年始、プラネタリウム番組入れ替え等で臨時休館あり

入館料：展示場 18歳以上500円、4歳～高校生250円
展示場＋プラネタリウム

18歳以上1,000円、4歳～高校生500円

交通：つくばエクスプレス「つくば駅」A2出口徒歩5分

URL：<https://www.expocenter.or.jp/>

※開館時間や入館料など2024年3月1日時点の情報です。

干川尚人（正員）

2009 NTT 東日本入社、その後NTT 研究所にて通信サービス基盤のR&Dに取り組む。2018 小山高専に着任。2023 から筑波大（システム情報系）准教授。現在、情報サービス技術による社会課題解決をテーマに研究を推進中。博士（情報科学）。



原点は電気少年遊びが仕事に

田中良明（名誉員：フェロー）

1974 東大・工・電子卒。1979 同大学院博士課程了。1979 東大講師。1984 同助教授。1996 早大教授。2022 同名誉教授。通信ネットワーク・交換システムの研究・教育に従事。本会編集長、編集理事、通信ソサイエティ会長、ネットワークシステム研究専門委員会委員長、テレコミュニケーションマネジメント研究専門委員会委員長、アクレディテーション委員会委員長、総務省情報通信審議会専門委員、日本 ITU 協会出版編集委員会委員長、日本技術者教育認定機構理事等を歴任。本会論文賞、業績賞、功績賞各受賞。総務大臣表彰受彰。



早稲田大学名誉教授

田中良明

Yoshiaki Tanaka



1. 小学校時代

最近研究者を志望する人が減っているようだ。そこでジュニア会員に研究者を目指してもらうために私の子供の頃の話から始めたい。

私はいわゆる電気少年だった。なぜ電気に興味を持つようになったのかというと、電線は水道管やガス管と全然違うからだ。つまり、水道管やガス管は中空になっていて、そこを水やガスが通る。それに対し電線はそういうものがないのに電気が通る。水道管やガス管をつなぐには中空部分を合わせて接続しなければならないが、電線は接触させるだけでつながることができる。それが不思議でならなかった。

最初は豆電球をつけたり、ブザーを鳴らしたりすることから始めて、いろいろな電気工作をした。小学校で先生から動くおもちゃを持参するように言われたときは、コイルと永久磁石と電池とスイッチでブランコのおもちゃを作って持参した。自作のおもちゃを持参したのは私だけだった。私の家は貧しくておもちゃなどなく、やむなく自作したのだった。電気工作も少しずつ進んでいって、ゲルマニウムラジオを製作した。それが無線に興味を持つきっかけだった。



2. 中学・高校時代

1964 年に中学校に入学したらアマチュア無線クラブがあったので、即入会した。アマチュア無線を始めるには国家試験を受けて無線従事者の資格を取らねばならない。最初は電話級アマチュア無線技士（現在の第四級相当）と電信級アマチュア無線技士（現在の第三級相当）の資格を取ったが、その受験のための勉強が電気通信工学を学習する始まりだった。

その頃、佐伯哲馬氏と出会ったことが、私が電気通信工学の道に進むことを決定付けた。佐伯氏は、東京都杉並区下井草の私の家の近所に下宿しており、早稲田大学第一理工学部電気通信学科を卒業して東京放送に勤務していた。私がアマチュア無線に興味を持っていることを知り、無線のことをいろいろ教えてくれた。佐伯氏は下宿を引き払うときに、無線の本、無線機、部品などを私にプレゼントしてくれた。当時の日本はまだ貧しく、軍放出のものが結構あった。朝鮮戦争で使った電池管の受信機もあった。今ネットオークションに出したら相当な値段が付くのではないかなと思う。図 1 は頂いた本の一つである。また、図 2 は、佐伯氏のおかげでアマチュア無線局を開局できたときに作った QSL カードである。QSL カードとは交信証のことで、交信した相手にその証明として送るものである。

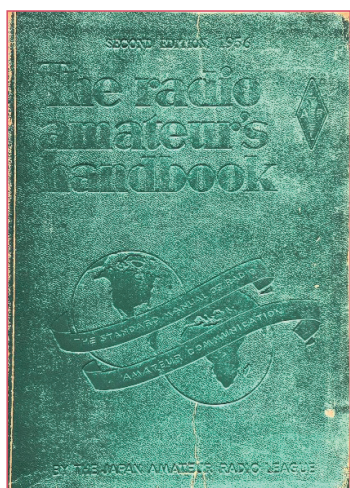


図1 頂いた本の一つ



図2 アマチュア無線局のQSLカード

大学進学に関して真っ先に考えたのは、佐伯氏が卒業した早大に入ることだった。佐伯氏から、電気通信分野では早大が日本のトップクラスであると聞いていた。自分でも調べてみて、戦前から「通信」と名が付く学科があるのは阪大、早大、東北大の三つで、早大は通信分野伝統3校のうちの一つだと知った。しかし、私の家は貧しかった。父は国家公務員だった。当時、日本は高度経済成長期で民間企業の給料はうなぎ上りだった。国家公務員はそれに取り残され、物価高で生活は苦しくなる一方だった。当時の国立大学の学費は、入学金4,000円、授業料年12,000円で、私立大学の学費はそれより1桁以上高かった。そのため、進学先は国立にせざるを得なかった。

私の両親は宮城県出身で、父をはじめとして親戚一同東北大卒業なので、東北大も候補に考えた。東北大はアマチュア無線家の間でも八木・宇田アンテナで大変有名だった。私が小学生の頃は親戚の家に下宿して大学に通うのは当たり前であったが、私が高校生の頃には日本も少し豊かになり、親戚の家に下宿するような人はいなくなっていた。そのため、東北大に進学したらアパート代が掛かることになり、やはり家計にはきつかった。そこで、やむなく東京の国立大学に進学することにした。実は、入学

願書は東北大と東大の両方に出し、入試直前まで家計と相談して、最終的に東大に決めたのだった。

第3志望の大学に進学することになって落胆したかと言えばそうでもない。東大本郷キャンパスは秋葉原に近い。歩いて行くことができる。秋葉原には中学生の頃から毎週1~2回は通っていた。当時の秋葉原は、部品屋やジャンク屋がひしめき合っており、電気少年の聖地であった。そんな秋葉原に歩いて行ける大学ということでワクワクする気持ちもあった。



3. 大学教養学部時代

1970年に東大に入学して真っ先にしたことはアマチュア無線クラブの設立である。東大には過去にアマチュア無線クラブがあったが、途絶えてしまっていた。私が入学した年の前年は、大学紛争で入試が中止になっていた。理科系の場合、クラブ活動は駒場キャンパスの教養学部にいる最初の2年間だけが普通なので、上の学年がいないとクラブ活動も途絶えてしまう。

教養学部では50名ずつのクラスに分かれていたが、私のクラスにはアマチュア無線をしている者が数名いた。理科系のほかのクラスにも結構いたので、恐らく理科系学生の数%はアマチュア無線をしていたのではないと思われる。それゆえ、アマチュア無線クラブを設立するのは容易であった。

次にしたことは第1級アマチュア無線技士の資格を取ることである。家でアマチュア無線を行うときはTVI (Television Interference, テレビ受像機への干渉) に注意しなければならないので、大出力にすることは難しい。大学のアマチュア無線クラブならTVIを気にすることはないので、大出力を出せると考えた。そのため、クラブ員全員が出力に制限がない第1級アマチュア無線技士の資格を取った。それで、別名「東大1アマ無線クラブ」とも呼ばれていた。クラブ員の中で電気電子系に進学したのは私だけであったが、ほかの学生もアマチュア無線は後々役に立ったようだ。原子核工学の実験で使う電磁波発生装置を自作した者もいた。

現在のアマチュア無線技士の国家試験では電気通信術(モールス電信)の実技試験はないが、かつての第1級アマチュア無線技士の国家試験では、欧文60字/分、和文50字/分の送受信の実技試験があった。私はアマチュア無線の交信で電話よりも電信を使うことが多かったので、実技試験に比較的楽に臨むことができた。搬送波をオンオフするだ



図3 大学時代の無線機

けの電信の送信機は簡単に作ることができるので、電信はアマチュア無線の基本と言ってもよい。電気通信術はそれに直結することであるのに、試験が廃止されたのは残念である。

さて、中学・高校のときの自分の家の無線機は自作が中心であったが、大学のときは出来合いのものを買って改造を楽しんだ。高校の頃、学校近くの数学書出版社に入り浸って数学談議をしていたおかげで、大学入学後その出版社でアルバイトに雇ってもらえた。それで小遣いが少し豊かになったので出来合いの無線機を購入することができた。それを図3に示す。

大学に入って最初の2年間の教養学部の授業はどうであったかという、自然科学の授業は面白くなかった。なぜなら、高校で既に学んだことだからである。私の高校の先生は研究者を目指す人が多かった。大学教員のポストが空くまで高校教諭をして食いつないでいた。先生は大学で教えたことを高校生に好き勝手に教えていた。大学に入ってまず驚いたのは、数学や物理学の教科書が、高校で使っていた教科書と同じだったことである。例えば、高木貞治の解析概論などである。そのため、一応授業には出席したが、予習も復習もする必要がなかった。その時間をアマチュア無線につぎ込んだ。

教養学部の授業で面白かったのは、社会科学や人文科学である。特に、経済学、法学、統計学の授業でそれらの基礎を学んだことは、工学の研究を行う上で非常に役に立った。経済学は通信ネットワークの運用や管理を行う上で大変重要である。また、法学は情報の知的財産権の面で重要である。統計学は通信の理論計算の際に必要な。今、日本の大学では教養教育を軽視する方向であるが、私は教養教育を重視すべきであると思う。余談であるが、東大教養学部では、統計学は社会科学に分類されていた。

数学の一種であるのに社会科学の単位として履修できるので、理科系学生には人気があった。どういうわけか、それがここ数十年下火になっていたようである。データサイエンスの流行でまた統計学が見直されたのは隔世の感がある。



4. 大学工学部時代

東大では2年後期から専門の授業が始まり、3年から本郷キャンパスに移る。私は工学部電子工学科に進学した。大学紛争の影響で、進学したのは4月ではなく6月であった。専門の授業内容は、アマチュア無線をやっていたおかげで知識としては既に持っていることが多かった。しかし、それを体系化して学術的な裏付けとともに学ぶのは新鮮で、どんどん深みにはまっていくような感じがした。

3年生のときは、月曜から土曜の8時から12時まで講義があった。月、火、木の午後は13時から20時頃まで学生実験があった。水曜午後は工場見学で、金曜午後は外部講師等による授業があった。家に帰ってからは学生実験の整理があり、寝るのは明け方の日も多かった。そのため、講義科目の復習の時間は余り取れなかった。幸い、前期の試験は夏休みの後だったので、夏休みは毎日朝から晩まで復習をした。後期は冬休みが復習の時間であった。

本郷キャンパスは秋葉原に近いので、毎日秋葉原に行けるのではないかと楽しみにしていたが、それははかない夢となって消え去った。



5. 卒業論文

アマチュア無線でいろいろ研究のようなことをしていたが、きちんと学術的に研究を行うのは卒業論文が初めてであった。当時の卒業論文の研究期間は、4年生の10月下旬から3月上旬までの5か月弱しかなかった。私は宮川 洋先生の研究室に所属し、変調の研究を行うことになった。研究室では、先輩の大学院学生がある変調方式の研究をしており、私はその特性を実験で求めることになった。ある変調方式とは、今でいうMSK (Minimum Shift Keying) のことである。

帯域制限等の特性を求めるだけなら搬送波を高周波にしても低周波にしても同じなので、実験のしやすい低周波にすることにした。その変調波を生成する回路を設計して、それをICと個別部品で製作することにした。それが送信機である。卒業論文の期間は短いので、寝る間も惜しんで、はんだ付けの

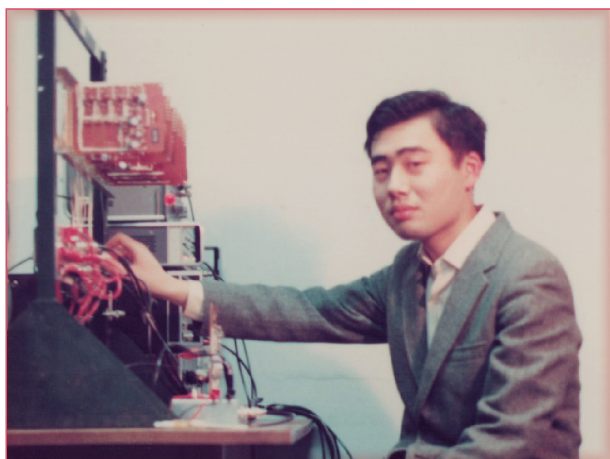


図4 家で製作した実験装置

作業を行わねばならない。そこで、装置の製作は家で行うことにした。当時の大学の通信分野の研究室の設備はアマチュア無線家のシャック（無線小屋のこと）と似たようなものだったので、私の家でも十分に作業ができた。

出来上がった装置を大学に持ち込んで、特性を取る実験自体は大学の研究室で行った。図4は装置を大学に持ち込んだところである。送信機と比べて受信機は難しいので、装置を短期間に製作することは困難であった。そこで当時使われ始めたミニコンピュータにA-D変換で取り込むことにした。当時はミニコンピュータのれい明期であり、よく故障した。オシロスコープでコンピュータの中の波形を観察して故障箇所を探り当て、はんだ付けで修理したものだった。

受信の計算をミニコンピュータの中で行うことも可能であったが、当時のミニコンピュータはアセンブラ言語でプログラムを書かねばならず、それに時間を要した。卒業論文は時間との勝負なので、受信データを紙テープにパンチして中形コンピュータに移し、高級言語を使うことによって時間を節約した。当時は文字を印刷するラインプリンタしかなく、図形やグラフは文字の集合として印刷した。図5はそのようにして印字したアイパターンである。

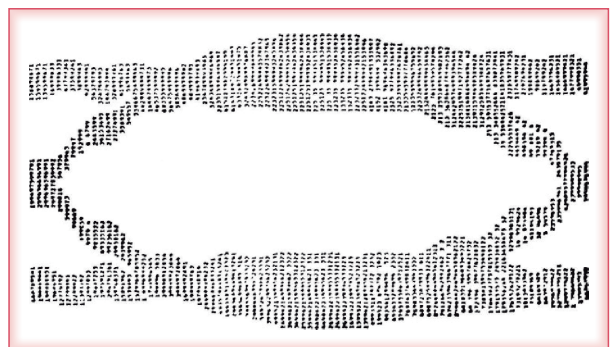


図5 ラインプリンタで印字したアイパターン

ところで、昔の大学では、教員が学生を手取り足取り指導することはなかった。教員は研究そのものについては助言するが、研究の道具について教えることはなかった。私の場合で言うと、MSKの帯域制限や非線形ひずみに対する特性を実験で求めることを課題にしてはどうかという助言はあったが、次に助言をもらったのは結果が出たときである。実験装置の設計と製作、実験データ収集、データ処理などは一人で黙々と行った。研究の道具に関しては、自分で身に付けておくのが常識だった。現在は手取り足取りの指導が良しとされており、昔とは大違いである。



6. 符号化変調

1974年に大学院に進学し、引き続き宮川 洋先生の研究室に所属した。卒業論文で変調の研究を行ったので、変調関係の新しい論文が出ると食い入るように読んだ。私は大学院に進学したときに本会とIEEEの会員になり、その機関誌が毎月送られてきた。IEEE Transactionsは2〜3か月掛けて船便で届くので、それが届いているかどうか郵便受けを見るのが日課になった。もちろん本会の会誌や論文誌が届くのも楽しみであったが、それらは国内であるため毎月同じ日に届くのでドキドキしながら待つ必要はなかった。

ある日IEEE Transactions on Communicationsに驚くような論文を見つけた。位相連続FSK (Frequency Shift Keying) に関する論文である。図6にFSKの波形を示す。情報の0、1を周波数

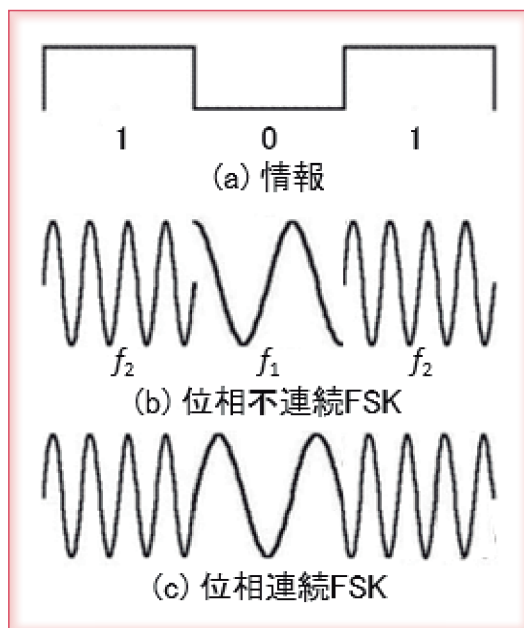


図6 FSKの波形

f_1 , f_2 に対応させたのがFSKで、(a)の情報は(b)や(c)のような波形になる。(b)は位相のことは考えないで周波数を対応させた位相不連続FSKである。位相に連続の条件を付けると、(c)の位相連続FSKになる。

位相連続FSKでは、当該タイムスロットの周波数だけでなく、その次のタイムスロットの位相にも情報が引き継がれる。これを利用して復調を行うと、2相PSK(Phase Shift Keying)と比較して、同じ誤り率を与えるSN比(信号対雑音比) E/N_0 が約1 dB小さいというのが論文の内容であった。同じ誤り率を与えるSN比は小さい方がよいので、1 dBのSN比向上ということになる。当時2相PSKの誤り率特性が最も良いと信じられていたので、私だけでなく皆が仰天した。しかし、2相PSKの誤り率特性が最も良いのは、1タイムスロットの波形から1タイムスロットの情報を復調する場合であり、皆その条件を忘れていたのだった。

そこで私は、このことを積極的に利用するように変調波形を作ってやれば、より優れた特性が得られるのではないかと考えた。そこで、位相連続FSKにおいて、変調指数 h (周波数の振れ幅)を複数用意し、タイムスロットごとに順番に用いる多モード2進位相連続FSKを考えた⁽¹⁾。その特性を図7に示す。2モードというのは、二つの変調指数 h_1 と h_2 を交互に使う方式である。誤り率は上界と下界で評価した。正確な誤り率特性を理論計算で求めるのは難しく、現在ならシミュレーションで求めるところであるが、当時はコンピュータ利用が限られていたので、理論的に上界と下界を計算した。2モードの

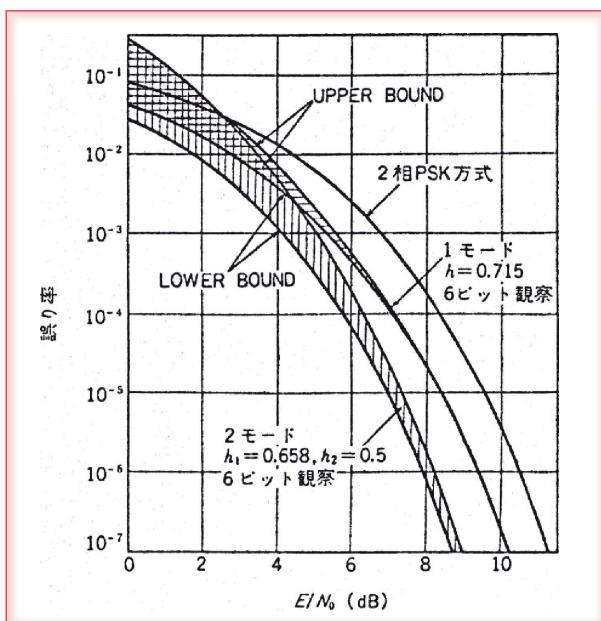


図7 多モード2進位相連続FSKの誤り率特性

方式は、2相PSKと比べてSN比を約3 dB向上させることができる。この分野に詳しくない人は3 dBという値がどの程度のものか分からないであろうが、この分野ではかなり大きい値である。それを実に簡単な方法で得ることができてしまった。電電公社や日本電気の第一線の研究者の方が詳しいことを聞きたいと大学を訪ねて来られ、修士課程1年の私は右往左往してしまった。

この方式は、変調を符号化することから、現在符号化変調と呼ばれている方式の先駆けであった。大学院ではこの原理を利用した方式をいろいろと検討し、博士号を頂いた。

余談であるが、私が多モードを発表して数年たってから、同じ方式を別の研究者がIEEE Transactions on Information Theoryに発表した。それにはMulti- h という名称が付いていた。変調指数 h が複数あるという意味である。現在ではそちらの名称の方が通用してしまっており、悔しい限りである。私はIEEE Transactionsでは発表しなかったが、国際会議で発表しているし、本会和文論文誌の英語要約も出版されている。しかし、今日のように研究発表がWebで瞬時に入手できる時代ではなかった。有名な定理に、数年ずれて独立に研究した複数の研究者の名前が付いていることも多かった時代の話である。

7. マルチキャスト通信

大学院博士課程を修了したら大学に残るように言われて1979年に講師になり、1984年に助教授になった。当時東大では配属先が分からない状態で就職が決まり、配属先が決まるのは就職直前であった。電力出身の人がデバイスの講座に配属されるようなことが当たり前であった。アマチュア無線では量子力学など関係なかったの、デバイスだけは嫌だった。幸い、私が配属されたのは秋山 稔先生の交換の講座で、一応通信の中であった。

当時、通信の分野は伝送と交換の二つに大別されていた。伝送分野は2地点間でどのような信号を使って通信を行うかという分野である。学生時代の分野はまさに伝送分野であった。交換分野は3地点以上で通信を行うときに必要となる技術であり、交換機、ネットワーク、通信サービスなどが対象である。交換分野は現在ではネットワーク分野と呼ばれることが多いが、当時はネットワークの要である交換機の研究に精力が注がれていたので交換分野と呼ばれていた。

それでは、その要の研究の一つとして、マルチキャスト通信の交換機の話をしてしよう。図8は、クロスバ (Crossbar) 交換機やアナログ電子交換機で使われた格子スイッチを表している⁽²⁾。(a)が格子スイッチの形であり、入線と出線が交差していて、交差点の○のところに接点がある。(b)のように●の接点を閉じると、2番の入線と3番の出線を接続することができる。

この格子スイッチ一つで交換機を作ると、例えば入線数10,000、出線数100だと、1,000,000個の接点が必要となり、大変大きくなる。そこで、図9のように格子スイッチを接続したクロス (Clos) のスイッチ回路網が用いられた⁽²⁾。一次格子の入線数を n_1 、二次格子の数を m 、三次格子の出線数を n_2 として、

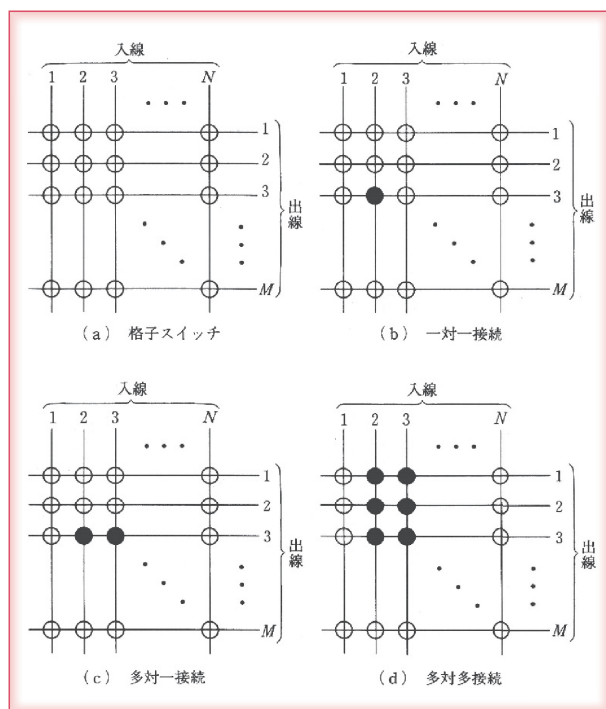


図8 格子スイッチ

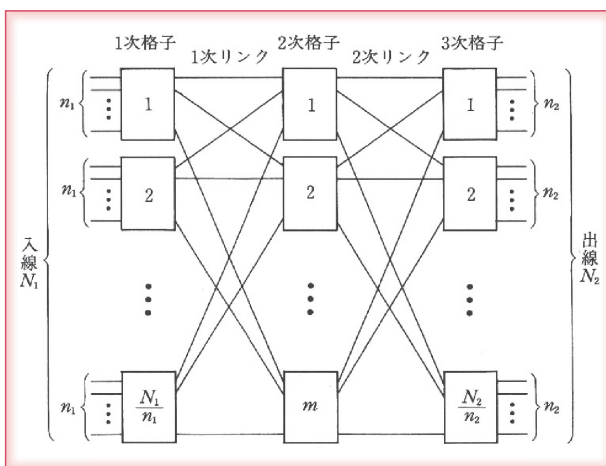


図9 クロスのスイッチ回路網

$$m \geq n_1 + n_2 - 1 \quad (1)$$

なら内部閉塞がなく、空き入線と空き出線を必ず接続できる。内部閉塞とは、スイッチ回路網内部の都合で接続できないということである。クロススイッチ回路網を用いれば、接点数がそれほど大きくならず交換機を構成することができる。

さて、通信ネットワークで放送を行ったり、会議を行ったりするには、多対一接続や多対多接続、すなわちマルチキャスト接続が必要になる。格子スイッチでマルチキャスト接続を行うのは簡単で、図8の(c)や(d)のように接点を閉じればよい。それではクロススイッチ回路網ではどうであろうか。図10はクロススイッチ回路網で多対一接続を行ったところである⁽²⁾。図中の×印の入線と出線は、共に空きなのに接続できない。つまり、一対一接続で非閉塞なスイッチ回路網でも多対一接続では非閉塞にならない。

そのため、マルチキャストスイッチ回路網について、新たに構成理論を考えねばならない。これについて瀬崎 薫氏とともに検討を行った。このスイッチ回路網そのものは回線交換が対象であるが、パケット交換においても高速化するにはハードウェア処理が必要になるので、この理論を適用できる。

マルチキャスト通信については、これ以外にも検討すべきことが山ほどあった。マルチキャスト通信のルーティングについてはPaul C. Huang氏、NTTから派遣されていた朝香卓也氏、マルチキャスト通信のネットワーク構成については三好 匠氏、コンテンツのマルチキャスト配信に関してはOlivier Berlage氏、梶田剛広氏とともに検討を行った。ただし、朝香氏、梶田氏については、私が早大に移ってからのことである。

8. トラヒック理論

1985年に京都でトラヒック理論の国際会議があ

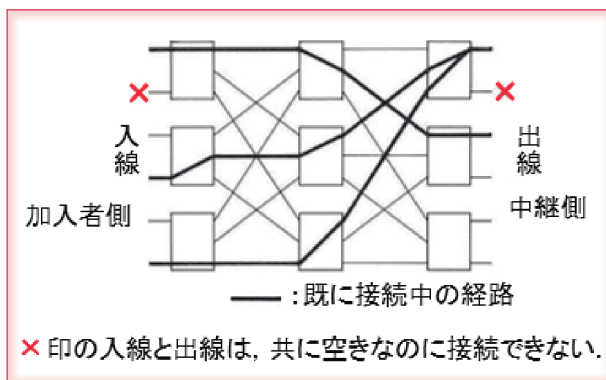


図10 クロスのスイッチ回路網での多対一接続



(a) 工学部



(b) 隣接するエリクソンの研究所

図 11 ルンド大学

り、その運営に携わった。国際会議が終わってしばらくたった頃、サバティカルを取ってスウェーデンで研究をしたいと考えるようになり、スウェーデン人の親友に相談してみた。すると、すぐにエリクソンの重役に話をしてくれて、スウェーデン滞在の費用をエリクソンが出してくれることになった。

なぜスウェーデンかという点、ネットワーク分野の一番の基礎理論であるトラヒック理論は、北欧が発祥の地であるからである。トラヒック理論の創始者のアーランはデンマーク人で、その名前が呼量の単位になっている。トラヒック理論の重要な定理や公式で「北欧発」のものは多い。私は、前述の国際会議の諮問委員の先生がいるルンド大学に1986年から1年間客員教授として滞在することになった。ルンド大学は1666年創立のスウェーデン南部の大学で、私の親友の出身大学でもある。図11の写真は、工学部の建物の一つと、隣接するエリクソンの研究所である。

実は、ルンド大学滞在中に仕上がった研究成果はトラヒック理論ではなく、グラフ理論を用いたネットワーク設計である。トラヒック理論に関しては、その後の研究に役立つことをいろいろと温めることができた。

私よりも上の年代では、サバティカルは「落差発電」と言われた。つまり、技術先進国に行って先端知識を学び、技術後進国の日本に戻ってその知識で

仕事をするということである。しかし、私の時代にはもはや落差はなく、日本の方が進んでいる分野も多かった。サバティカルは、雑務に時間を取られず研究に専念できる期間の意味が強かった。



9. 暗号を用いた通信サービス

私が大学院在学中の1976年に米国商務省標準局がDES (Data Encryption Standard) を暗号の規格に定めたことで、世の中で暗号の商業利用の重要性が認識された。これは共通鍵暗号である。その後1977年にRSA暗号が発明された。これは初の公開鍵暗号である。RSAは、3人の発明者 Rivest, Shamir, Adleman の頭文字である。共通鍵暗号は秘密保護が目的であるが、公開鍵暗号は秘密保護に加えて、逆に用いることによりデジタル署名を行うことができる。これにより、暗号を用いたいろいろな通信サービスが可能になる。学生時代の研究室では符号理論の研究も盛んだったので、私は学生の頃から暗号に興味を持っていた。就職後配属されたのは交換の講座であったが、通信サービスは交換の範ちゅうであるので、研究対象にすることが可能であった。

暗号を用いた通信サービスとして行った研究の主なものを図12に示す。有印文書伝送の研究は郵政省郵政研究所特別研究官の立場で行ったもので、郵便局におけるワンストップ行政サービスのためのものである。テストベッドを作り、実際に使用するための具体的な検討まで行った。現在ではそれが住民票等のコンビニ交付に発展している。

私が暗号を用いた通信サービスの研究を始めた頃、暗号の専門家の研究対象はまだ通信の秘密保護であった。そのため、暗号を用いた通信サービスの研究は、日本では私が最初の方であるし、世界的にも早い方であった。日本における暗号の権威の電電公社の小山謙二氏や日本電気の岡本栄司氏が興味を



図 12 暗号を用いた通信サービス

持ってくれて、いろいろ議論することができたのは光栄なことであった。

10. 通信行動とプライシング

早大の富永英義先生から、大きな研究費を手に入れたので早稲田に来て研究しないかとのお話があり、1996年に東大を辞めて早大教授になった。子供の頃憧れていた早大にようやく入ることができた。東大には学生時代を含めて26年いたが、早大にも26年いることになった。

早大では、大学院独立研究科の国際情報通信研究科の設立に携わった。まず1998年に基盤となる研究所を設置し、次に2000年に大学院研究科を設置した。この研究科は情報通信を様々な側面から研究する文理融合の研究科である。「国際」との名が示すように公用語は英語であり、優秀な外国人が多数集まった。研究領域は、自然科学、社会科学、人文科学全てにわたっており、芸術も含んでいる。私は工学と経済学にまたがる分野に重きを置くことにした。というのは、私の専門の基盤を成すトラヒック理論は、人間の行動を数式化することにより構築された理論であり、まさに工学と経済学にまたがる分野であったからである。

従来、通信の品質は物理品質であるQoS (Quality of Service) で表されていた。しかし、品質を感じるのは人間であるので、体感品質QoE (Quality of Experience)の方がより適切に品質を表現できる。QoEは経済学における効用と同じものである。図13は、ディスプレイ画面に画像を表示する主観評価実験を行った結果である。横軸は画像表示までの待ち時間で、縦軸は被験者の平均評価値MOS (Mean Opinion Score) である。横軸がQoSに相当し、縦軸がQoEに相当する。図中の●は実験結果の

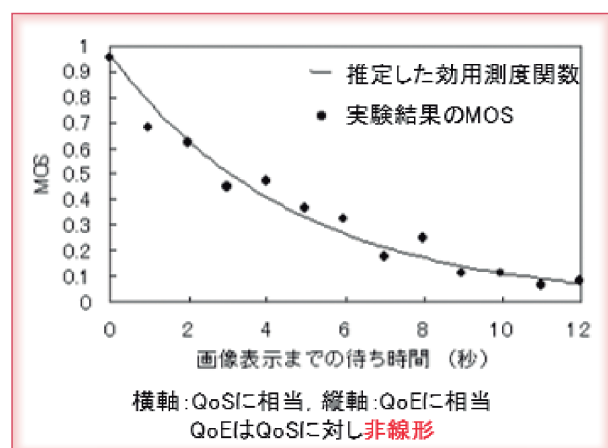


図13 QoSとQoEの関係

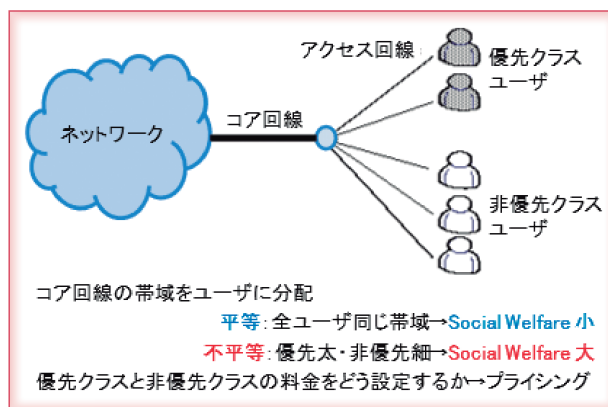


図14 Social Welfare: 全ユーザの効用の和

MOSで、曲線はそれから推定した効用測度関数である。図から分かるようにQoSとQoEの関係は非線形である。

ここで図14のように、多くのユーザがコア回線を共用することを考えよう。ユーザは、優先クラスユーザと非優先クラスユーザに分けられる。優先クラスユーザが割り当てられるコア回線の帯域は太く、非優先クラスユーザが割り当てられるコア回線の帯域は狭い。つまり不平等な分配である。これを全ユーザ平等な分配と比べると、Social Welfare (全ユーザの効用の和) は、不平等の方が大きくなる。それは、効用測度関数が非線形であるためである。

人は効用に対してお金を払う。効用は支払意思額 (WTP: Willingness To Pay) である。料金を支払意思額に等しく設定すると、Social Welfareは事業者の収入になる。不平等の方が事業者はもうかることになる。

さて、当然のことであるが、優先クラスは料金が高く、非優先クラスは料金が低い。それではどのように料金を設定すればよいであろうか。料金差が小さければ優先クラスを用いる者が多く、料金差が大きければ非優先クラスを用いる者が多くなるであろう。すなわち、料金により各クラスのトラヒックが変わってくる。従来のネットワークでは品質一定であったが、今日のネットワークは品質に差があるので、いかに料金を設定するか、すなわちプライシングが重要になる。トラヒック理論には料金の要素を取り入れる必要がある。

ユーザの行動はプライシング以外でも誘導することができる。図15において、新規ユーザが無線LANのアクセスポイントを選ぶとき、普通は電波が強い近くのアクセスポイントに接続する。しかし、そのアクセスポイントが混んでいるとしよう。電波は弱いすがすいているアクセスポイントがあることを教えれば、ユーザはそちらに接続するであろう。そ

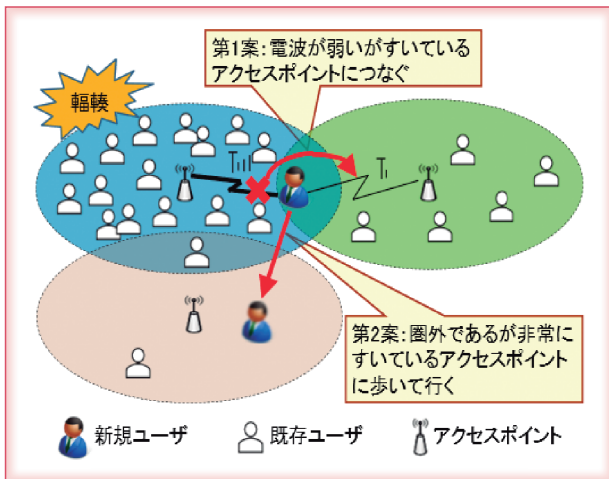


図 15 ユーザ誘導

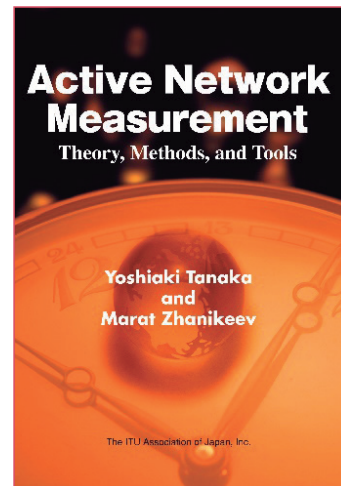


図 17 アクティブ測定の本

それがユーザ誘導の第1案である。圏外であるが、もっとついていけるアクセスポイントが近くにあることを教えればユーザはそちらに歩いて行くかもしれない。それがユーザ誘導の第2案である。このようにユーザを誘導すれば、限られた資源を有効活用できる。余計な設備投資をしなくて済むことになる。

このような研究を矢守恭子氏、高橋英士氏、古博氏、張成氏とともに多数行い、研究成果を上げるとともに、国際情報通信研究科の目的に貢献することができた。



11. ネットワーク制御・運用・管理

従来のネットワーク管理は故障への対処が主であった。しかし、ネットワークの品質が多様化し、通信品質の確保が重要になってくると、パフォーマンス管理が必要になる。従来はネットワーク機器のMIB (Management Information Base) のデータを用いてネットワーク管理を行っていたが、MIB

データでパフォーマンス管理を行うのは膨大なデータ量と処理量を必要とし困難である。

そこでアクティブ測定で必要な場所の品質データをピンポイントに集める方法が有効である。アクティブ測定の原理を図16に示す。クライアントから連続するパケット二つを間隔 t_1 で送出する。途中帯域が十分なところはそのまま間隔 t_1 でパケットが通過する。しかし、帯域が不十分なボトルネックがあると、パケットの間隔は t_2 に広がる。サーバがACKパケットを返すと、その間隔は t_2 なので、クライアントはボトルネック帯域幅を知ることができる。

この技術を用いれば、従来パフォーマンスに関するデータを得ることができなかった他社のネットワークを含めてデータを得ることができる。したがって、複数社にまたがるネットワークのパフォーマンス管理を行うことが可能になる。これらに関して、Marat Zhanikeev氏とともに検討を行った。

アクティブ測定に関しては、この分野世界初となる本を英語で出版してみた。図17である⁽³⁾。英語

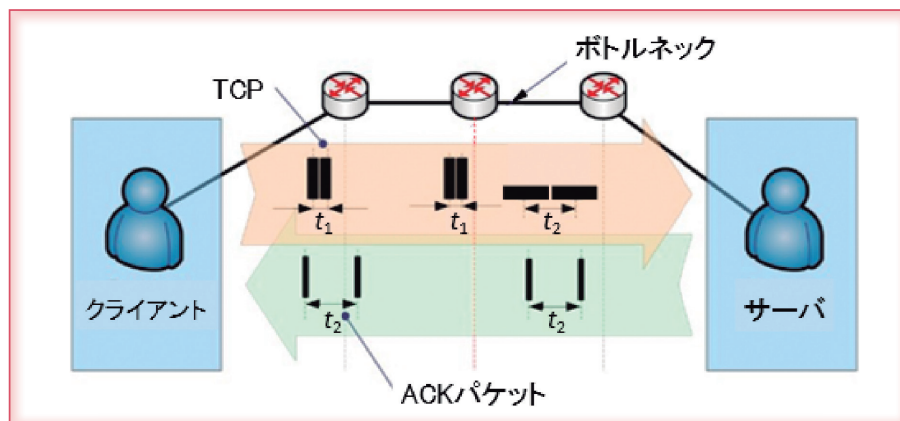


図 16 アクティブ測定の原理

の本の出版は海外の出版社を使えば容易であるが、日本の国際化のためにあえて日本で出版してみた。日本には英語の本の編集能力がある理工学書出版社がなく、また流通経路もないため、大変苦勞をした。

ネットワーク管理の研究としては、NTT 所属の社会人学生の大石晴夫氏が、通信ネットワークサービスを社会的なリソースとして扱う高所から見た検討を行ってくれて、プライシングなども含めた研究の集大成になった。

また、ネットワーク制御や運用に関して、最近注目されているアドホックネットワークも研究した。これは自律分散的なネットワークであるし、またその構成端末が移動することもあり、いろいろ興味深い検討を行うことができる。これに関しては、山本 嶺氏や山崎 託氏とともに検討を行った。



12. おわりに

私は 2022 年 3 月に早稲田大学を 70 歳で定年退職した。大学教員になってからの研究で本稿に書いたことはごく一部である。大学では研究室の学生それぞれ課題が違うので、本稿に書いた以外にも多数の研究を行った。「学生さん」のおかげで良い成果を上げることができた。

さて、私から若い方にアドバイスしたいことが幾つかある。まず、興味を持ったことに突き進んでほしい。私は電気に興味を持ち、無線に興味を持ち、アマチュア無線に明け暮れた。遊んでばかりであったが、それにより大学入学前に多くの専門知識を得ることができた。大学ではその知識を学術的に裏付けることができ感動した。この感動が研究者への道を歩ませたのだろうと思う。興味が湧いたのが大学入学後なら、大学入学後に突き進めばよい。突き進むことが重要である。迷って中途半端なことをしては、自分を確立できない。

学生時代は好きなことを研究できる。自分の能力を 100 % 発揮することができる。そのため、学士

よりも修士、修士よりも博士に進むことをお勧めする。それだけ好きなことを研究できる期間が長くなる。また、博士課程では、下級生の指導を通じて教育経験を積むとともに、研究の幅を広げることができる。

就職してからの研究には制約がある。私が就職した東大は講座制のため、研究はその講座の内容に縛られた。配属された講座の内容である交換分野は、「あちらを立てればこちらが立たず」という感じの研究分野であり、白黒はつきりさせたい性格の私はモヤモヤを抱えることになった。しかし、給料をもらって研究する以上、自分の性格がどうのこうのと言っではいられない。あちらを立てればこちらが立たずの議論を好きになるしかない。最近はこちらでつまづいてしまう人が多いが、ここを乗り越えることがその後の発展につながる。

早大に移ってからは講座制でないので好きなことを研究できたが、あちらを立てればこちらが立たずの議論が染み付いてしまっていた。それで、研究分野を変えるのではなく、それまでの工学の検討から工学と経済学を合わせた検討へと分野を拡大することを選んだ。

研究者には研究以外にも教育や雑務の仕事がある。教育や雑務は組織により大きく異なる。私は固い国立から柔軟な私立に移ったので、慣れるのが大変であった。実は、研究者が最も苦勞するのは研究自体ではなく、研究以外の業務であることが多い。その点にも気を付けておくとよいだろう。

文献

- (1) 電気電子・情報関連 5 学会, 国立情報学研究所, “位相連続 FSK 方式に関する基礎研究,” 日本の電気電子・情報関連卓越技術データベース, March 2008. <http://www.dbjet.jp/>
- (2) 田中良明, 通信放送統合網の基礎, オーム社, 東京, 1995.
- (3) Y. Tanaka and M. Zhanikeev, Active Network Measurement: Theory, Methods, and Tools, ITU Association of Japan, Tokyo, Japan, 2009.

安全で豊かな未来社会の創成に向けて

2024 年度通信ソサイエティ会長 中尾彰宏
Akihiro Nakao

近年、情報通信分野において二つの大きな変化が起きている。第1にライフラインとしての情報通信の価値の再認識と、第2に、次世代の情報通信を支える新たな技術の展開の進展である。

情報通信が様々な社会経済活動の根幹を支えていることが国民に再認識されつつある。人間同志のコミュニケーションの手段としての情報通信だけではなく、あらゆる「もの」が接続されるようになり、人々の生活の一部として溶け込んでいる。企業や組織の活動の維持、及び、人間の生命の維持などに影響がないこと、を保証する付加価値が求められている。

2024年の年始に起きた能登半島の地震では、通信が途絶え尊い生命が失われた事例もあり、自然災害の多い我が国では何度となく議論が繰り返されてきた、堅ろうな情報通信インフラの必要性が再度浮き彫りとなった。モバイル通信における大規模障害もなくなることはなく、その影響は人々の情報通信へのますますの依存とともに年々顕著になりつつある。

サイバー世界を支えるライフライン「サイバーライフライン」は未来社会には不可欠のインフラである。

また、2030年に向けて、新たな通信技術の展開が進展している。昨年2023年12月には、6Gの標準化が公式に始まり2030年に向けて次世代情報通信の姿が明らかになりつつある。

次世代のサイバーライフラインに向けた有無線通信技術に関しては、2019年頃に電子情報通信学会で活躍している研究者が集まり、総務省への情報提供を行った。

その結果、大容量、低遅延、多数接続、省電力、安全性、自律性、拡張性という七つの方向性が総務省から示された。筆者からは、AIと機械学習を活用する自律性、衛星やHAPSや水中無線技術（音・光）による従来カバーできていなかった領域への拡張性が特に重要であると主張した。

展開容易性（Deployability）という観点も主張していたが、これは一般に分かりやすくするという理由で拡張性に包含された形となった。

4年近くが経過した現在、この自律性と拡張性に関しては、予測がほぼ的中している。

また同時に、上記に挙げた、二つの変化には大きな相関がある。

自律性に関しては、生成AIの可能性に注目が集まり、また、AI全体のあらゆる産業への応用が期待されている。情報通信分野もその例外ではないが、人間が見逃す単純なミスが原因で引き起こされた大規模障害に対して、AIが未然に障害を防ぎ、起こってしまった障害には自動修復や原因を特定する技術が研究されている。

また、半導体への再投資が拡大し、物理世界をセンシングしてサイバー世界でデータ処理をしてハイレベルの結論を導き出すサイバーフィジカルシステム（CPS）が注目を浴びている。集めた膨大な情報をエッジで計算処理して低遅延で迅速にフィードバックするためのAIチップへの投資が加速している。自律性はこのような堅牢なCPSへの貢献という意義もある。

また、拡張性に関しては、ウクライナの紛争、能登半島の地震被害において、NTN（非地上系ネットワーク）を活用する通信エリアの拡張カバレッジや臨機対応が一般の人々の関心を集めた。NTNが人間の生命を救い、社会経済活動を守ったことは、歴史に深く刻まれ、全世界の人類が、NTNを活用したライフラインに注目する結果となった。筆者らは、富士山のような通信のぜい弱な地域、かつ、顧客が少なく、通信事業の投資回収の合理性が低い地域に、自治体自らが整備可能なローカル5GとNTNの接続のソリューションにより、年間100人を超える遭難者数を削減する研究開発を進めている。

このように、一見、独立に起こっているかのような二つの変化は、情報通信の社会インフラ「サイバーライフライン」の必要性から必然として起きている社会の変容と言える。

このような情報通信の大きな変革が求められる中で、学会はどのような役割を担うべきであろうか？

筆者は米国で過ごした8年を皮切りに情報通信におけるネットワークアーキテクチャの研究に従事してきたが、その後

20年近くは東大の情報系と工学系で教鞭を執ってきた。

最近、学会・大学・研究所の同僚の研究者の中に、「若者の通信離れ」を憂える声が多く聞かれる。

しかし、もしそれが真実ならば、それは我々自身に一因がある可能性も否定できないと考える。

私の経験では、とても楽しく研究をしている姿を見せている限り、したたかに興味深い学術を求める学生は自然に集まるものだからである。工学系に移籍して2年が経過したが、講義を通して魅力を感じた学生が多く志望し「将来は情報通信産業に就きたい」という学生が多く話を聞きに来る。つまり、教授自らが寝食忘れ楽しく研究をする「背中を見せる」ことが重要なのではないだろうか。背中を見せるということは論文などの研究成果を出すことに加えて、社会実装を実現するということが重要である。

また、国際連携による人類共通の価値創造の追求も重要な論点である。

先日、6GFlagship、6GIA、NextGA、PAWRのリーダと議論する機会があり、各国ではレジリエントな社会を創成するべきという価値観が共有された。政府の競争資金は、このような人類共通の価値を追求するテーマでの国際連携プロジェクトに投資を行い、未来社会に向かってビジョンの共有、そして、それを支える通信技術の標準化を進めるべきである。

更に、情報通信分野における「人材供給」のための文部科学省からの情報通信分野への人材育成の投資の強化と、学会がその期待に真摯に応えることである。

政府の研究開発への投資に関しては、総務省からの産業への投資に加えて、文部科学省の人材育成の投資が必須であり、学術はあらゆる仕組みを活用して情報通信の研究・人材育成・社会実装に取り組むべきである。

情報通信産業における人材のプールを水がめの水に例えると、当然、時とともに水がめの水は少なくなっていくわけである。たまっている水をいかにおいしくするか、つまり産業政策だけに重点を置いて、水の供給、つまり人材育成・供給を怠ると、人材のプールは枯渇してしまうのである。私は、日本の情報通信産業には、このような状況が長く続いてきたのではないかと考えている。

グローバルの学術界を見渡しても、米国NSFや欧州委員会が大学の研究者を対象として、情報通信分野の人材育成へ多くの投資をしてきたことに比較すると、どうしても我が国が見劣りする結果となっている。

このたび、このような背景を踏まえて、「情報通信科学・イノベーション基盤創出プログラム（CRONOS）」が新設され、文部科学省配下での情報通信分野の人材供給に向けた人材育成が始まる。

学会は、この期待に応えるべく、また、この背景を深慮してしたたかに捉え、多くの人材がこの競争資金に応募し、未来社会の礎となるサイバーライフラインを構築するという強力な意志と高い目標を持って切磋琢磨しなくてはならない。このような、情報通信業界における人材育成、そして産業界への人材供給の手を緩めるべきではない。

通信ソサイエティでは、このたび、産学連携の観点で、「普段の私を見て」戦略を試行する。産学が集う学会の役割として、学術界からの産業界への人材供給・産業界からの人材可視化が挙げられる。グローバルのトップカンファレンスは、企業が学術の卓越人材をリクルートするマーケティングの場となっている。一方で、電子情報通信学会は産学の会員が多いが、そのような機会創出が活発ではない。通信ソサイエティの産学活性化に向けて、積極的に学生企業間の交流を推進するため、普段の研究会における卓越した発表をする学生の姿を企業に可視化する営みを行い、通信ソサイエティの価値向上につなげる。

このように、学会の継続的な尽力が、堅ろうで安全・安心な社会インフラ、サイバーライフラインを自らの手で構築する人材供給につながり、ゆくゆくは、安全で豊かな未来社会を創るのである。

NEXT ISSUE

2024 年秋号（第 70 号）2024 年 9 月 1 日発行

小特集

6G（メタサーフェス、 テラヘルツ技術など）（仮）

子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページ
ノイズキャンセリングのしくみ

私の研究者歴：加藤修三

若者よ、世界に出よう！：研究者になるきっかけとなった研究者の
ところの研究者になってみて（後編）

街 plus 探訪：自然豊かな小さな町「宮代町」

……他、御期待下さい

Editors Note

交渉により自らの主張を盛り込んでいく、といったスキルは日常生活でも重要そうです。強く主張し過ぎて周りからの抵抗がありそうですし、バランスが大事なのでしょうか。標準化作業にはいろいろなヒントが隠れている気がします。（D.U.）

本号では、情報通信に関する標準化並びに法制化について、必要性、会合の雰囲気、経験談等を含めた特集を組ませて頂きました。本号が読者の皆様にとって、新たな技術・サービスの創出とそれらの技術の標準化の際の一助になれば幸いです。（N.I.）

マガジン編集に携わるのは今号で最後となりました。幹事団、事務局及び編集チームの皆様をはじめ、サポート頂いた全ての方々に感謝します。ありがとうございました。これからも一読者として、B-plus を活用していきます。（T.Y.）

国際標準化の現場は企業や国家が自社・自国の利益や権益をかけてしのぎを削る戦場だと思っています（オーバー？）。そして、この戦場で使われるのは武器ではなくデータ。標準化委員の方はもちろん、日々データを生み出している技術者の皆さんにも感謝。（K.S.）



2024 年夏号(第 69 号)
2024 年 6 月 1 日 発行

EDITORIAL COMMITTEE

編集委員長 関屋大雄

編集副委員長 平野拓一 山口実靖

編集委員

飯田裕之	磯崎裕臣	伊藤暢彦	内田大輔
遠藤寛之	太田真衣	金友 大	木下雅之
小南大智	沢田健介	関 裕太	竹村暢康
中西孝行	中野雄介	中村光貴	早馬道也
干川尚人	松室亮之	松本和人	水野 修
村上靖宜	和田友孝		

本誌の愛称は「B-plus」、正式名称は「通信ソサイエティマガジン」、
「IEICE Communications Society Magazine」です。
本誌掲載論文を文献引用する際は、邦文略称「信学通誌」、英文略称
「IEICE Commun. Mag.」を用いて下さい。

通信ソサイエティマガジン B-plus へのお問い合わせ

- ☐ ご意見、ご要望：b-plus@ieice.org
- ☐ ホームページ ▶ <https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/index.html>
- ☐ B-plus 冊子体購入のお申込みはこちら ▶ https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/order_y.html.utf8

複写される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は、本誌に掲載された著作物の複写複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複写複製を御希望の方は、一般社団法人学術著作権協会（<https://www.jaacc.org>）が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

なお、複写以外の許諾（著作物の転載、翻訳等）に関しては、委託しておりませんので、直接本会へお問い合わせ下さい。

〈問合せ先〉 一般社団法人電子情報通信学会
TEL (03) 3433-6691 FAX (03) 3433-6659
著作物利用許諾申請： <https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

発行人／白石 智
発行所／一般社団法人 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館
Tel：03-3433-6691（代表） 振替：00120-0-35300
制 作／株式会社 太平印刷社
東京都品川区東品川 1-6-16

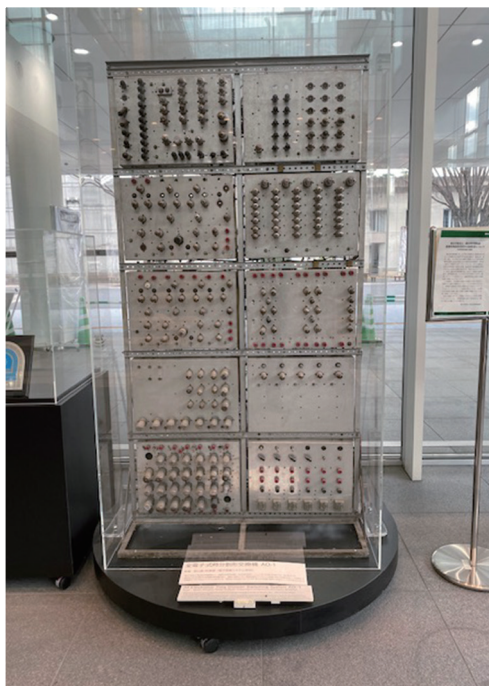
© Copyright 2024 IEICE. All rights reserved.



通信がみえる一枚の写真

日本初の全電子式時分割形交換機 AO-1

水野 修（正員：シニア会員）



（芝浦工業大学大宮キャンパス 写真提供：芝浦工業大学）

2024年2月にNTTの電話網が全てIPに切り替わった。これにより日本のネットワークから交換機がなくなり、接続の処理は全てルータなどの機器が実行することになった。

1887年、米国で初めて、電話交換は人手による接続からステップバイステップによる自動化に移行した。日本では1965年に大規模な処理に適用できるC400形クロスバ交換機が誕生し、更に制御を電子化した電子交換機、通話路もデジタル化されたデジタル交換機が実用となり、1997年にNTTの全ての電話網がデジタル化されている。

写真の全電子式時分割形交換機AO-1は、C400形クロスバ交換機の誕生に先駆け、1958年に東京大学尾佐竹・秋山研究室で開発されたデジタル交換機である。加入

者線は5回線ではあるが、8 kHz サンプリングのパルス振幅変調（PAM）の時分割スイッチ、加入者回路、2線—4線変換、ダイヤルパルスの計数、空塞検出、試験回路等、交換機に必要な機能はほぼ網羅している。1950年代であるので、二極管、双極管や陰極線リレー放電管などの電子管が数多く使われており、限られた電子部品の機能を最大に引き出して構成されていることが感じられる。

なお、AO-1は秋山稔博士の“A”と尾佐竹徇博士の“O”から名付けられており、2017年に国立科学博物館の重要科学技術史資料に登録されている。



写真を募集致します

マガジン編集委員会では、「通信がみえる一枚の写真」をテーマに写真（電子ファイル（jpeg）あるいはプリント）、タイトル、説明文（約300字）を募集致します。詳細は、通信ソサイエティマガジン HP（<http://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/ieice/photo.html>）を御参照下さい。

送り先：

【郵 送】〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン担当

【メール】b-plus@ieice.org までお送り下さい。

IEICE Trans. Commun. & ComEX



in



IEEE Xplore

“OPEN ACCESS”
是非, ご投稿を!