



[小特集]

Web 3.0で実現されるメタバース ——新しい世界を創る技術——

- 「Web3時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」報告書について
- サイバー空間の空間表現性を高める点群メディア処理技術
- メタバースを支える技術 ——AI（人工知能）技術——
- メタバースとWeb3, NFT（非代替性トークン）, DAO（分散型自律組織）のリアリティ
- 東京大学「メタバース工学部」における取り組み
- 企業のメタバース含むXRに関する取り組み

Facebook, 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

2023年度・2024年度 学生員 会費割引キャンペーン

2023年4月1日 — 2025年3月31日

期間中の学生員の年会費が

4,500円から**3,000円**になります

会誌購読、大会・研究会への参加、論文投稿等・・・
学生の方々、是非この機会に電子情報通信学会に入会しませんか？

キャンペーン概要

対象	学生員
年会費	3,000円（通常4,500円）
適用期間	2023年度・2024年度の2年間 （2023年4月1日 — 2025年3月31日）
会員特典	・ 論文の投稿/閲覧・会誌オンライン購読・書籍割引購入 ・ 大会、研究会等の発表・聴講が会員価格に ・ オンラインWebinarアーカイブ視聴（資料DL可能） ※他にも様々な特典がございます。詳細は こちら

・マイページに登録の卒業年月（予定）を過ぎると、翌年度は、【正員】に自動昇格となります。卒業年月（予定）後も引き続き学生（社会人学生を除く）の場合は、マイページから学生員申請を行ってください。学生員申請には、大学院合格通知、入学許可証、学生証などが必要となります。卒業年月が延長となった場合は、進学証明書でも代用可能です。申請の締切日は、3月15日となりますので、進学が決まりましたら、お早目の申請をお願い致します。

ご入会の方は
[こちら](#)



編集チームリーダー 竹村暢康
Nobuyasu Takemura

Web 3.0 で実現されるメタバース ——新しい世界を創る技術——

近年、Web 3.0 やメタバース (Metaverse) という言葉が注目を集めています。Web 3.0 は、従来の Web とは異なり、ブロックチェーンなどの分散型台帳技術を活用し、分散型のシステムを基盤とした次世代のインターネットを指します。中央集権的な Web には、情報の信頼性やプライバシー保護などの課題がありましたが、Web 3.0 ではこれらの問題を解決し、より強化されたインターネットを実現することが期待されています。また、メタバースは、仮想世界を構築するための技術であり、現実世界とは異なる存在感を持ったオンライン空間を指します。「メタバース」の語源は、SF 作家 Neal Stephenson の小説「Snow Crash」の中で、人工的な仮想空間によって構成された現実という意味で、その概念が導入されたと言われています。メタバースは、VR (バーチャルリアリティ) や AR (拡張現実) の技術の進歩によって、ますます現実近く、仮想空間での体験や交流がより自然なものになることが期待されています。このように Web 3.0 とメタバースは密接に関連しており、メタバースは Web 3.0 の技術を活用して構築されたデジタル空間内での活動を可能にするプラットフォームとして、現実世界とは異なる、新たな価値、新たな世界を生み出すことができると考えられます。

本小特集では、Web 3.0 で実現されるメタバースとして、仮想通貨を用いた商品やサービスの取引や現実に近い仮想空間など、様々な取組みが進められている中で、これらを支える技術やメタバースを利用した取組みについて紹介することを意図して企画されました。Web 3.0 で実現されるメタバースは、エンターテインメントやゲームの世界だけでなく、ビジネスや教育、医療などの分野でも活用されており、より安全で、より良いものにするための技術開発や研究が求められています。小特集では、初めに総務省が開催している「Web3 時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」について紹介します。次に、XR (Cross Reality) 技術としてメディアとしての表現性を高めるために必要な技術、AI 技術、NFT (非代替性トークン) / DAO (分散型自律組織) 技術について紹介します。最後に企業と大学から製造現場や教育現場における取組みについて紹介します。

メタバースの可能性を最大限に引き出すためには、技術開発だけでなく、社会的な課題に対する取組みや、倫理的な観点からの議論も重要となります。メタバースは、人々の暮らしや社会を変える可能性があります。本小特集で紹介した事例が、メタバースが進化していく中で、新たな価値観や文化の創出、そして今後の更なる議論を深めていくための一助となれば幸いです。

最後に、本小特集の発行にあたり、貴重な時間を割いて解説論文／記事を御執筆頂きました著者の皆様と、編集作業に御協力頂いた委員の皆様に深く感謝の意を表します。

小特集編集チーム

竹村暢康、金友 大、中野雄介、松井健一
水野 修、山口実靖、和田友孝



201



230



258



265

【小特集】

Web 3.0で実現されるメタバース ——新しい世界を創る技術——

189

巻頭言

編集チームリーダー

竹村暢康

195

— 解説 —

「Web 3 時代に向けたメタバース等の
利活用に関する研究会」報告書について

小林由佳

201

— 解説 —

サイバー空間の空間表現性を高める
点群メディア処理技術

谷田隆一／吉田大我

207

— 解説論文 —

メタバースを支える技術
—— AI (人工知能) 技術 ——

三宅陽一郎

219

— 解説論文 —

メタバースとWeb 3, NFT (非代替性トークン),
DAO (分散型自律組織) のリアリティ

斉藤賢爾／内田晃秀

230

— 解説 —

東京大学「メタバース工学部」における取り組み

吉田 壘

235

— 解説 —

企業のメタバース含むXR に関する取り組み

則枝 真／藤田直毅／大林勇人

192	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 新幹線で使える Wi-Fi 通信の仕組み 松村善洋
242	ー私の研究者歴ー 電波と信号処理 このような道を歩んで 小川恭孝
252	ー開発物語ー FM音源の開発史とヤマハシンセサイザ ヤマハ株式会社電子楽器事業部
258	ー街 plus 探訪ー 北東北の歴史と食文化を楽しむ「岩手・盛岡」 本間尚樹
262	ー若者よ、世界に出よう！ー アメリカ合衆国オクラホマ州での研究留学 内海哲史
265	ー科学館・博物館めぐりー 鉄道博物館（通称：てっぱく） 和田友孝
267	ー解説：技術と制度のおはなしー 情報通信ネットワークのクラウドネイティブ化に対応した 技術基準等の制度改正 梶原 亮
273	ー巻末言ー 論文を書いて、皆さんの技術を世界に発信しませんか 英文論文誌 B 編集委員長 長 敬三
274	編集後記



新幹線で使える Wi-Fi 通信の仕組み

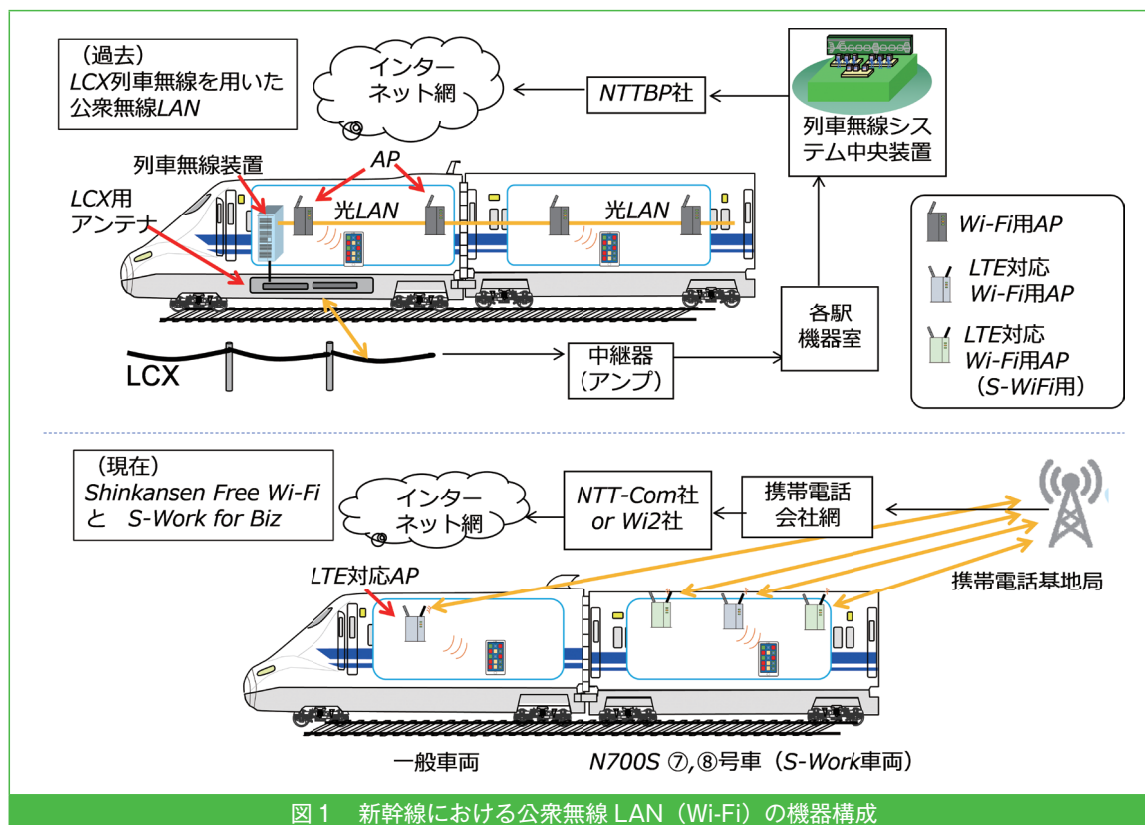
JR 東海 松村善洋
Yoshihiro Matsumura

1. まえがき

コロナ禍も過ぎ、旅行に出たい気分ではないですか？ テレビ会議だけでなく、新幹線に出掛けて人にとって見聞を深めたり、観光地を旅行したり、はたまたワーケーションとして温泉地などに滞在して仕事をするなど、その移動には是非新幹線を御利用下さい。Instagram など SNS で旅先の情報を得たり、行き先の飲食店の予約にも利用できる新幹線の Wi-Fi 接続は、旅行や出張の満足度を向上させます。本稿では、新幹線で実施してきた公衆無線 LAN (Wi-Fi) サービスの変遷と現在の Wi-Fi 通信の仕組みについて解説します。

2. 東海道新幹線公衆無線 LAN の経緯

2000 年代に入り、カフェや駅など公共の場でノートパソコンを無線 (Wi-Fi) でインターネットに接続できる公衆無線 LAN サービスが始まりました。また、新幹線車内でもインターネットに接続したいというニーズが高まってきました。ちょうどその頃、東海道新幹線の列車無線 (総合指令所ー運転士間の無線での直通電話) をデジタル化する機会があり、それと同時に、デジタル列車無線による公衆無線 LAN サービスを開始しました。その後、2018 年からサービスされている「Shinkansen Free Wi-Fi」に置き換わり、2020 年からは更に「S Wi-Fi for Biz」サービスが追加開始されています。それぞれについて、以降で説明します。



3. デジタル列車無線による公衆無線 LAN

新幹線の運転士と総合指令所間の直通電話である列車無線は、線路に沿って張られた LCX ケーブル*¹ と呼ばれる、直線状のアンテナを利用して通信しています。新幹線列車の1号車の側面下部のアンテナと LCX ケーブルの間の通信はその間の距離が短く、送受信が安定するため、全国の新幹線で用いられています。東海道新幹線では2009年3月から、列車無線のデジタル化と同時に公衆無線 LAN サービスを開始しました⁽¹⁾ (図1上)。LCX を用いた列車無線は400 MHz 帯であり、公衆無線 LAN サービスでの伝送速度は、1列車当たり最大2.3 Mbit/s でした。本サービスは東海道新幹線のみのサービスであり、利用するためには公衆無線 LAN サービス事業者と利用契約を結んで頂く必要がありました。JR 東海は電気通信事業者として公衆無線 LAN サービス事業者に通信回線を貸し、利用料を頂いていた。サービス開始当初は Web 上のコンテンツや電子メールも比較的小容量であったため有効に活用されましたが、スマートフォンやタブレット端末などの普及により利用されるユーザが増えるにつれて、ユーザの体感速度は遅くなり、直接、携帯電話会社の電波を受けてインターネットにアクセスされる乗客が増加しました。

4. Shinkansen Free Wi-Fi の開始

東京オリンピックの開催が近づいてきた2018年6

* 1 LCX ケーブル: Leaky Coaxial Cable. 日本語では漏えい同軸ケーブルと言う。電波が同軸ケーブルの外部導体に開けた穴(スロット)から電波が漏れ出るタイプのアンテナ。

月、JR 東海、JR 西日本、JR 九州の3社は、東海道・山陽・九州新幹線車内で使用できる無料 Wi-Fi サービスとして JR 3 社共通サービス「Shinkansen Free Wi-Fi」の提供開始を発表しました⁽²⁾。新幹線車内に、携帯電話会社の電波を活用した Wi-Fi ルータを設置し、乗客に使って頂くサービスです (図1下)。ほぼ同時期に、東北・上越・北陸・北海道・秋田・山形の各新幹線においても同様のサービスが開始されました。東海道・山陽・九州新幹線においては、2020年3月に全ての列車編成で Shinkansen Free Wi-Fi の整備が完了し、2. の公衆無線 LAN サービスを停止しました。

5. Shinkansen Free Wi-Fi の使用方法

新幹線車内での Shinkansen Free Wi-Fi の使用方法を図2で説明します。① Wi-Fi の設定画面でネットワーク一覧から SSID「Shinkansen Free Wi-Fi」を選択します。② ブラウザ等でインターネットにアクセスを開始する際に利用開始画面が表示されます。③ 最初に使用する場合は、メールアドレスや SNS ログインなどを求められる認証画面が表示されます。④ (メールアドレス認証の場合) 入力したメールアドレスに送られた認証メールで案内される URL をクリックすることで認証が完了し、使用が開始されます。なお、このサービスは30分ごとに再接続が必要です。Shinkansen Free Wi-Fi は、JR 東海、JR 九州の列車編成については NTT コミュニケーションズ*² (以下 NTT Com 社)、JR 西日本の編成は Wire and Wireless 社 (以下 Wi2 社) のサービスを用いています。通信に使用される回線も、NTT Com 社のサービスの場合は、NTT ドコモの電波を、Wi2 社のサービス場合は、KDDI の電波を利用



図2 Shinkansen Free Wi-Fi への接続手順

表 1 新幹線における公衆無線 LAN の変遷

項目	デジタル列車無線による 公衆無線 LAN	Shinkansen Free Wi-Fi	S-Wi-Fi for Biz
通信方式	400MHz 帯自営無線 (デジタル LCX 方式)	LTE-A (4G) 方式の携帯電話回線	
アクセスポイント	各車両 2 台	各車両 1 台	N700S 車両の 7, 8 号車に 各々 2 台
Wi-Fi 方式	IEEE 802.11b/g	IEEE 802.11a/b/g/n/ac	
Wi-Fi 周波数	2.4 GHz 帯	2.4 GHz 帯 / 5 GHz 帯	5 GHz 帯
暗号化パスワード	WEP 方式 公衆無線 LAN 事業者ごと	なし	AES 方式
サービス期間	2009.3 ~ 2020.3	2018.7 ~ 現在	2021.10 ~ 現在
利用料金	有料 (公衆無線 LAN 事業者経由)	無料	
その他	最大伝送速度 2.3 Mbit/s (1 編成 16 両当り)	30 分ごとに切断されるので 再接続必要	—

しており、認証サービスの URL は異なりますが、SSID は統一しており、操作も同じにすることでユーザに混乱がないよう工夫しています。

なお、一部の携帯電話会社のモバイル端末を利用する場合、契約する通信メニューによっては、それぞれの無線 LAN 回線として、Wi-Fi が利用可能となっていることがあります (SSID: 0000docomo, 0000wi2)。モバイル端末の Wi-Fi をオンにしていれば、自動的に Shinkansen Free Wi-Fi と同じルータに接続され、携帯キャリアの SIM 認証により、インターネットにつながります。

6. S Wi-Fi for Biz について

2021 年 8 月に、JR 東海はビジネスパーソン向け「S Work 車両」を導入することを発表⁽³⁾し、新しい無料 Wi-Fi サービスとして「S Wi-Fi for Biz」を同年 10 月に開始しました。このサービスのため、従来の Shinkansen Free Wi-Fi に追加して N700S 車両の 7 号車（普通車）と 8 号車（グリーン車）にアクセスポイントを設置しました。このサービスは、ビジネスユースを考慮して 30 分の利用時間の制限を設けていません、また、接続にはパスワードが必要で、通信は WPA2-PSK で暗号化されており安心して利用できます。

Shinkansen Free Wi-Fi のアクセスポイント 1 台に加えて「S Wi-Fi for Biz」のアクセスポイント 2 台でトラヒックが分散されることで体感速度の向上を企図し

* 2 サービス設備の一部は NTTCom 社が NTT-BP 社から借り受けてサービスを提供しています。

ています。表 1 に、上述した三つの無線 LAN サービスについてまとめました。

7. まとめ

本稿では、新幹線で使える Wi-Fi について説明しました。沿線の車窓もお楽しみ頂きつつ、車内の Wi-Fi も活用頂き、新幹線を利用した皆様の旅行、出張が充実したものとなりますことを祈念して、筆を置きたいと思っています。

参考文献

- (1) 杉山寛之, “東海道新幹線車内インターネット接続サービスの導入,” 鉄道と電気技術, vol. 11, pp. 10-14, Nov. 2008.
- (2) JR 東海, JR 西日本, JR 九州, “ニュースリリース: 新幹線車内無料 Wi-Fi 「Shinkansen Free Wi-Fi」サービスの開始について,” 2018.6.29
- (3) JR 東海, “ニュースリリース: 東海道新幹線のビジネス環境の整備について,” 2021.8.26

松村善洋 (正員)

1994 京大・工・電子卒。1996 同大学院修士課程了。同年東海旅客鉄道株式会社入社。2016 同社総合技術本部技術開発部信号通信技術チーム情報通信グループリーダー、現在、同信号通信技術チームチームマネージャー (鉄道通信担当)。鉄道における無線通信システムの開発に従事。博士 (工学)。



「Web3 時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」報告書について

小林由佳 Yuka Kobayashi 総務省情報通信政策研究所

1 はじめに

VR, AR, MR 等の仮想空間に関連する技術が発展を遂げる中、メタバースへの期待が高まっている。メタバースでは、仮想空間上でユーザがアバターを用いることで、物理空間の制限を越えたコミュニケーションや行動が可能となり、その用途も日々多様化し続けている。

今後、メタバースが教育や地域活性化、バーチャルオフィスといった日々の生活の中で積極的に利用される可能性も大いに想定されるが、こうした将来を見据えたとき、既存のユーザに加えて新たなユーザが多数参加し、更に、提供されるサービスの幅も広がることとなると同時に、検討していくべき課題も生じると考えられる。

本稿では、「Web3 時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」におけるこれまでの議論と、2023 年 7 月に公表された報告書について^{*1}、研究会事務局としての筆者の立場から記載する。

2 本研究会について

メタバースの利活用や、Web3 の市場が拡大しつつある中、メタバース等の仮想空間の利活用に関して、利用者利便の向上、その適切かつ円滑な提供及びイノベーションの創出に向け、ユーザの理解やデジタルインフラ環境などの観点から、様々なユースケースを念頭に置きつつ、情報通信行政に係る課題を整理することを目的として開催されている研究会である。

本研究会では、2022 年 8 月以降、メタバース等の様々なユースケースを念頭に、事業者や有識者等へのヒアリングを行い、利活用の現状を把握するとともに、将来的な課題や論点となるであろう事項等について、次の三つの観点から議論を重ねてきた。

(1) メタバースのアバターの在り方等、利用者利便の向上につなげるための課題

(2) ユースケースごとのビジネス化に向けた課題

(3) メタバース等の利活用拡大が与える影響

これらの観点に基づいて、メタバース等の利活用に係る動向や課題について幅広く議論を行うため、本研究会は法律、経済、技術、セキュリティ等の様々な分野の有識者によって構成されている（表 1）。

3 これまでの議論

研究会は、前述のとおり、メタバースの利活用に係る現状や課題等についてのヒアリングを中心として回を重ねてきた。各回の議事等は図 1 のとおりである。研究会のホームページには、配付資料及び議事録等も掲載されていることから、詳細についてはそちらを参照されたい^{*2}。

また、2023 年 2 月には、その時点までの議論を整理した「中間とりまとめ」を公表した^{*3}。中間とりまとめでは、メタバースに関連する主な用語の整理を行った

表 1 研究会の構成員

【構成員】

(座長) 小塚 莊一郎 (学習院大学 法学部 教授)
(座長代理) 柴藤 稔 (大阪大学 先端学際研究機構 教授)
(構成員) 雨宮 智浩 (東京大学 情報基盤センター 教授)
石井 夏生利 (中央大学 国際情報学部 教授)
出原 立子 (金沢工業大学 情報フロンティア学部 教授)
大屋 雄裕 (慶應義塾大学 法学部 教授)
岡嶋 裕史 (中央大学 国際情報学部 教授/政策文化総合研究所 所長)
木村 朝子 (立命館大学 情報理工学部 教授)
是津 耕司 (情報通信研究機構 ユニバーサルコミュニケーション研究所 統合ビッグデータ研究センター センター長)
塚田 学 (東京大学大学院 情報理工学系研究科 准教授)
仲上 竜太 (日本スマートフォンのセキュリティ協会 技術部会 部会長)
増田 雅史 (森・濱田松本法律事務所 パートナー)
安田 洋祐 (大阪大学大学院 経済学研究科 教授)

*1 https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01iicp01_02000120.html

*2 https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/metaverse/index.html

*3 https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01iicp01_02000115.html

【開催実績】

	議事等		議事等
第1回 (22.8.1)	1 本研究会の運営について 2 事務局資料説明 3 構成員からのプレゼン (1) 宋藤構成員「メタバースがもたらす社会インパクト」 (2) 大屋構成員「メタバースと着地問題」 4 意見交換	第6回 (22.12.14)	1 メタバース等の利活用事例のヒアリング、構成員からのプレゼン (1) 塚田構成員「メタバース実現に求められるデジタルインフラの課題と要件 ～まだ遠い理想のメタバース～」 (2) 株式会社KDDI総合研究所「メタバースを支えるデータ圧縮技術と標準化動向について」 (3) 株式会社HKKY「メタバース経済圏の最前線 ―バーチャルマーケットをケーススタディとして―」 2 意見交換 3 事務局説明 中間とりまとめの構成(目次)について(案)
第2回 (22.9.16)	1 メタバース等の利活用事例のヒアリング、構成員からのプレゼン (1) 大日本印刷株式会社「DNPのXR/メタバースの取り組みXRコミュニケーション事業のご紹介」 (2) oVice株式会社「となりで話しているような、バーチャル空間を oVice(オヴィス)」 (3) 雨宮構成員「教育におけるメタバースの利活用 ―東大VRセンターの取り組み―」 2 意見交換 3 事務局説明「メタバース等の利活用がもたらす社会の未来像とその実現に当たっての課題等に係る提案募集」について	第7回 (23.1.27)	1 中間とりまとめ(案)について 2 メタバース等の利活用に係る海外動向等の調査報告 3 意見交換
第3回 (22.10.6)	1 メタバース等の利活用事例のヒアリング (1) 凸版印刷株式会社「凸版印刷のメタバースへの取り組みについて」 (2) 福井県越前市「福井県越前市 事例報告」 (3) 国土交通省「デジタルツイン実装モデル「PLATEAU」の取組みについて」 2 意見交換	第8回 (23.3.23)	1 メタバース等の利活用事例のヒアリング (1) 株式会社シュタインズ「メタバースがもたらす 新たな教育と人文知」 (2) 日本電気株式会社「メタバースとダイバーシティ・エクイティ・インクルージョン」 (3) アンダーソン・毛利・友常法律事務所外国法共同事業「本人(中の人)とアバターの関係性」 (4) 一般社団法人VRMコンソーシアム「日本発の、相互運用性のある3Dアバター規格「VRM」について」 2 意見交換
第4回 (22.10.31)	1 メタバース等の利活用事例のヒアリング (1) 株式会社オリイ研究所「超高齢化、外出困難社会における分身ロボットによる社会参加事例」 (2) (一財)首都高速道路技術センター「スマートインフラマネジメントシステム―DREAMS実装の取り組みについて」 (3) コマツ(株式会社小松製作所)「Smart Construction(スマート コンストラクション)ご紹介」 2 意見交換	第9回 (23.4.20)	1 メタバース等の利活用事例のヒアリング (1) 株式会社Shiftall「VRメタバースの中で人は何を感じ、どう楽しんでいるのか」 (2) 日本マイクロソフト株式会社「デジタル革新を支援するマイクロソフトのメタバーステクノロジー」 (3) 内閣府知的財産戦略推進事務局「『メタバース上のコンテンツ等をめぐる新たな法的課題等に関する論点の整理(案)』について」 (4) 株式会社三菱総合研究所「メタバースに関する動向等」 2 意見交換
第5回 (22.12.2)	1 メタバース等の利活用事例のヒアリング、構成員からのプレゼン (1) ソニーグループ株式会社「メタバースへの取り組みについて」 (2) 石井構成員「仮想空間におけるプライバシー:アバターの不正利用を中心に」 (3) 仲上構成員「メタバースにおけるサイバーセキュリティの検討について」 2 意見交換	第10回 (23.5.30)	1 報告書骨子(案)について 2 意見交換
		第11回 (23.6.14)	1 報告書(案)について 2 意見交換
		第12回 (23.7.11-13)	1 報告書(案)について(メール審議)

図1 これまでの議論 (出典:「Web3 時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」報告書)

上で、前述の三つの観点に基づいて論点整理を行った。中間とりまとめの構成は以下のとおりである。

- 「本研究会の視点」に基づく論点整理
 - メタバースのアバターの在り方等、利用者利便の向上につなげるための課題
 - ユースケースごとのビジネス化に向けた課題の整理
 - メタバース等の利活用拡大が与える影響
 - 本研究会で引き続き議題とすべき事項
 - 今後の想定スケジュール
- (参考) これまでの議論で提示された留意点と課題

中間とりまとめの公表後は、引き続き議題とすべき事項とされた論点を中心にヒアリングを実施し、議論を更に深めてきた。その後は、2023年5月の第10回研究会では報告書骨子(案)について議論を行い、同年6月の第11回研究会では報告書(案)について議論を行った。また、報告書(案)については同年6月17日から同年7月9日まで意見募集を行い^{*4}、その結果を踏まえ、同年7月18日に報告書を公表した。

*4 https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01iicp01_02000118.html

4 報告書の概要

本章では、2023年7月に公表した報告書について、構成に沿って主なポイントを抜粋しつつ記載する。(以下、この4. では報告書の抜粋を一部の用語を含めてそのまま引用する。)

第1章 メタバース等の仮想空間をとりまく状況

(1) メタバース等への期待

コンピュータ上に仮想空間を作る試みは1980年代に始まり、オンラインゲーム、SNS、オンライン会議サービスなどの要素も取り入れ、近年「メタバース」として注目を集めることとなった。

メタバースが成長を遂げた背景には、仮想空間の進化を支える様々な技術の進化を挙げることができる。我が国ではモバイル通信の最大速度は1980年代以降30年間で約10万倍に、我が国のインターネットトラフィックは2010年代以降10年で約13倍に増加するなど、通信基盤が大きく強化された。通信環境の向上を背景に、仮想空間の構築を担うクラウドの性能が向上し、大量のデータを高速処理することにより、風景や動きなどの詳細な再現が可能となった。

また、HMD(ヘッドマウントディスプレイ)を通じ

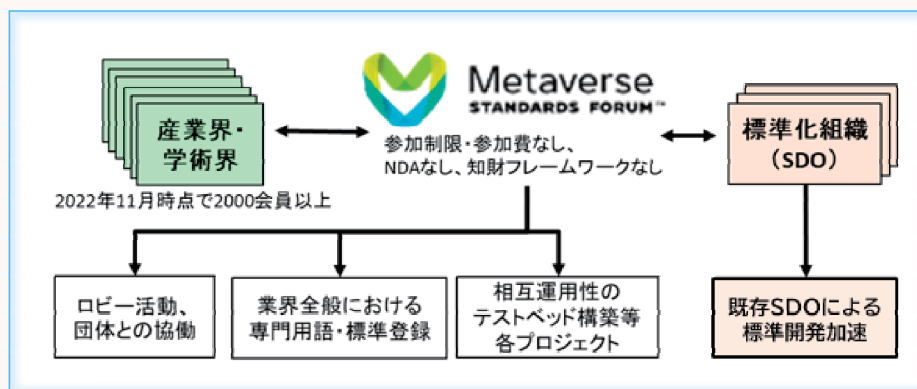


図2 メタバース・スタンダード・フォーラム概観（出典：第7回研究会資料を一部改変）

て高精細な3D映像の中にリアルタイムに「没入」することが可能となり、物理空間に類する感覚で仮想空間で長時間「生活」を楽しむことが可能となった。

(2) メタバース等の利活用の進展

メタバース等の仮想空間の利用分野や応用事例として、本研究会では以下のようなサービス等が紹介された。

- ①仮想空間内におけるコミュニケーション、イベント等の開催
- ②テレワーク時にもオフィスのようなコミュニケーションが可能な「バーチャルオフィス」などのビジネス利用
- ③メタバース上での街の「デジタルツイン」としての再現（空間内で開催されるイベント等を通じてリアル空間への訪問を促す）
- ④大学等における、メタバース上での講演やVR空間での授業等の開催
- ⑤製造業や建設業をはじめとする産業分野でのデジタルツインやメタバース等の利用
- ⑥仮想空間でのアトラクションやマーケットをユーザー参加型で開催することによる、経済活動や娯楽への活用

(3) メタバースの市場やユーザの現状

全世界のメタバース市場は、2030年に2021年の約17倍、6,788億米ドルに達すると予測されている。（うち、日本市場の比率はおおよそ1割前後と考えられる。）オンラインゲームやそのインフラ等に関わってきた企業を中心に様々なプレイヤーが参入し、市場競争が激化する中、ソニー、任天堂等の日本企業も参入し、我が国発のメタバースベンチャーも複数誕生している。

2022年12月の我が国の調査^{*5}では、「メタバース」を知っていると回答した者（「他者に説明できない」レベルで知っている者を含む。）は8割強に達し、「他者に説明できるほどよく知っている」と回答した者も

12%弱に達している。メタバースの利用経験がある割合は若年層ほど高く、20代以下では10%を超えている。また、認知度も若年層ほど高く、10代では「他者に説明できるほどよく知っている」と回答した者が20%を超えている。

(4) メタバースに関する国際動向

米国では、連邦議会調査局がメタバースへの期待や特徴、関連技術・企業の整理とともに政策課題をレポートしており、EUでは、EU理事会及び欧州議会が2022年に政策文書を公表している。

国際機関・団体等の動向として、メタバース・スタンダード・フォーラムが、メタバースの相互運用性に関する標準作成を支援するために様々な標準化機関の調整等を行う目的で2022年6月に設置された（図2）。

ITU-Tにおいて、メタバースの標準化に向けた検討のため、メタバース・フォーカスグループ（FG on Metaverse）が同年12月に設置された。

G7については、広島サミット（2023年5月19～21日）首脳コミュニケ及びデジタル・技術大臣会合（同年4月29～30日）閣僚宣言において、メタバースなどの没入型技術が、我々が共有する民主的価値に沿って更新し続けられるべきであることについて言及がなされた。

第2章 メタバース等の分類とその特徴

(1) メタバース等に関連する用語の整理

「仮想空間」に関連するサービスが次々と生まれている中、本研究会の課題整理の対象やそれに用いる用語をどのように整理するかが重要となる。こうしたサービスの中には、VR技術を利用したもののほか、ARやMRといった技術を用いたものもあるところ、後者については、

- ・仮想空間に関する要素が相対的に小さい

*5 三菱総合研究所「メタバースの認知・利用状況に関するアンケート結果」

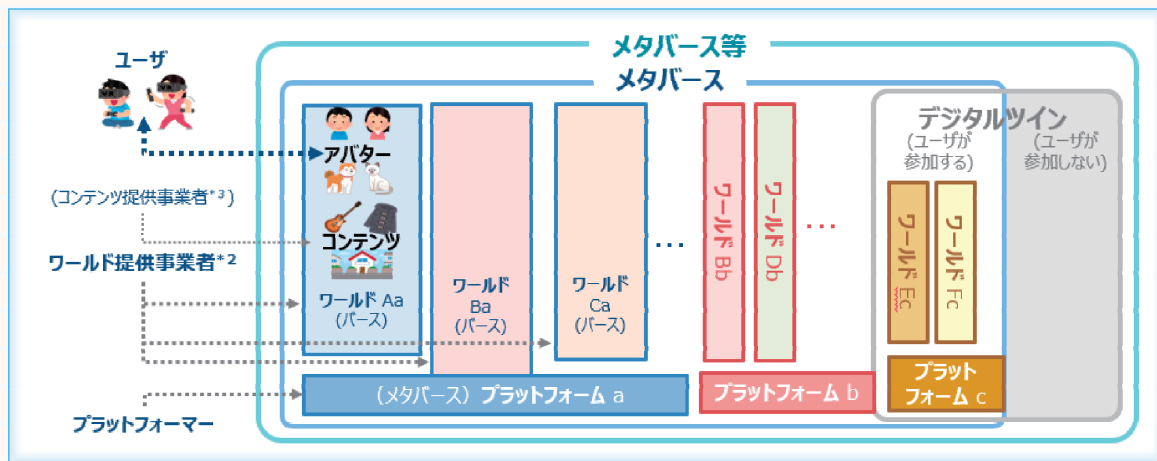


図3 「メタバース」と関連する用語の概念図*6 (出典：第7回研究会資料を一部改変)

・アバターの存在など構成要素が大きく異なる

ことから、研究会としての射程としては広く捉えつつ、用語として明確に使い分けるとともに、議論の重点を置くポイントを整理することが必要である。こうした考え方にに基づき、仮想空間に関連するサービスを広く「メタバース等」という用語として整理した上で、VRを利用した仮想空間のうち、特にアバターによるコミュニケーション等が可能なものを「メタバース」という用語として捉え、これに係る議論を主題とすることについて研究会として整理した。

メタバースとは、ユーザ間で「コミュニケーション」が可能な、インターネット等のネットワークを通じてアクセスできる、仮想的なデジタル空間であり、次の①～④を備えているものとした。

- ①利用目的に応じた臨場感・再現性があること
- ②自己投射性・没入感があること
- ③(多くの場合リアルタイムに) インタラクティブであること
- ④誰でもが仮想空間に参加できること(オープン性)

また、多くの場合は三次元(3D)の仮想空間として構築され、VRデバイスを必須とするものもあるが、スマートフォンなど一般のデバイスから利用可能なものもあり、ビジネス向けの一部には二次元で構築されるものもある。なお、次の⑤～⑦のいずれか、または全てを備えている場合もある。

- ⑤仮想空間を相互に接続しユーザが行き来したり、アバターやアイテム等を複数の仮想空間で共用したりできること(相互運用性)
- ⑥一時的なイベント等ではなく永続的な仮想空間であること
- ⑦仮想空間でも物理空間と同等の活動(例：経済活動)が行えること

メタバースのほか、デジタルツイン、プラットフォーム、ワールド等の用語についても整理を行った(図3)。

(2) メタバースの特徴とそれに伴う論点の整理

本研究会におけるこれまでの議論を踏まえると、現在の「メタバース」には、次の特徴がある。

- ・ユーザが仮想空間に入って活動するためのアバターの存在
 - ・(リアルな空間を模したメタバースについては)物理空間に存在する建造物の再現
 - ・多数のプラットフォーム等が市場に参入していることによる多種多様なメタバース空間の存在
 - ・VRデバイス等の価格やシステム・ネットワーク負荷等による遅延等の技術的課題が残存し、普及が途上
- 中間とりまとめ及びその後の議論を踏まえ、論点・課題を「アバターを中心とするメタバース空間内に係る課題(下記①～④)」及び「メタバース空間外と関連する課題(下記⑤、⑥)」に再整理して検討することとする(図4)。

- ①アバターに係る課題
- ②プラットフォーム間の相互運用性
- ③メタバース構築時・利活用に係る課題
- ④データの取得・利用に係る課題
- ⑤ユーザインタフェース(UI)／ユーザ体験(UX)に係る課題
- ⑥メタバースの動向・社会的な影響

*6 ※1 物理空間を再現する場合、いわゆる「デジタルツイン」の場合もあれば、簡略化された物理空間のモデルや物理法則も含め異なる世界を構築する場合もある。

※2 プラットフォーマーがワールドを提供する場合(図のワールドBa)もある。

※3 プラットフォーマーやワールド提供事業者の場合もある。コンテンツにはアイテムその他も含まれる。

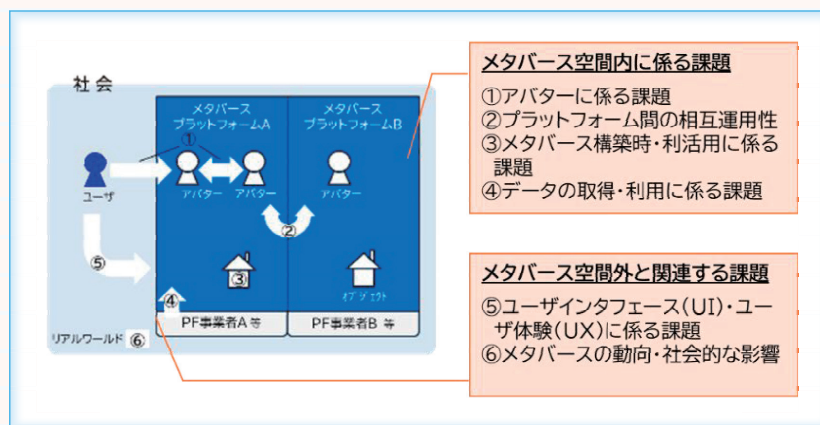


図4 論点整理の概念図（出典：第11回研究会資料を一部改変）

第3章 メタバース等の発展に向けた課題

(1) アバターに係る課題

メタバースに関する攻撃的行為としては、VRについての視界や機器、身体フィードバックに関する攻撃のほか、個人特定、ストーキング、人格のなりすまし、盗聴・盗撮等のほかのユーザへの不正行為などが想定される。メタバース上のコンテンツ等をめぐる新たな法的課題への対応に関する官民連携会議（以下「官民連携会議」という。）では5月に論点整理を実施。同論点整理においては、実在する他者の人物を模したアバターに関する肖像権、パブリシティ権のほか、創作されたアバターに関するこうした権利侵害の可能性についても議論を行い、関係者における今後の対応を整理している。今後、本研究会での検討結果を踏まえた取組を行うにあたっては、官民連携会議の論点整理を踏まえて政府や事業者で行われる対応と連携・協調して進めていく必要がある。

また、メタバースで用いられるアバターについては、ユースケースごとにユーザからアバターへの「自己投射率」は異なり、更にそれが第三者たる他のユーザから分かりにくいことを前提として議論する必要がある。「中の人」の存在の有無について、必要な場合に他のユーザが判別できることは重要であるとともに、ユースケースの必要性に応じ、物理空間の人物と「中の人」を正しくひも付けることも求められると考えられる。一方で、そうした情報をどの程度、どのような方法で他のユーザ等に開示するかについては、「中の人」自身にとってのプライバシー侵害そのほかの被害を招かないよう十分な検討が必要である。

(2) プラットフォーム間の相互運用性

VRに適用可能な映像符号化方式（ビデオベースPCC、座標ベースPCC）の国際標準化が進行中である。日本発の3Dアバター規格「VRM」を推進するVRMコ

ンソーシアムでは、メタバース・スタンダード・フォーラムにおける調査グループでの議論やアバターの規格策定等を各社有志の自己負担で推進中である。国際機関での標準化を引き続き進めることと併せ、民間の取組をどのように推進していくべきかが重要な課題となる。

(3) メタバース構築時・利活用時に係る課題

人の手やドローン等を用いて撮影したデータを利用して3Dモデルを構築する場合には、撮影データ内の人物や自動車等、プライバシー情報等の映り込みへの対処が必要である。人的資源が潤沢でない場合やリアルタイムにデジタルツインを生成する場合等を想定した場合、例えばAIによる画像解析等を利用した効率化等も重要となってくる。

円滑かつ安定的なメタバースビジネスを進めるために管理者や地権者等の理解は重要であることに留意しつつ、権利と利活用のバランスを図っていく必要がある。自治体が管理する既存データを構造化し公開する、国土交通省の「Project PLATEAU」の展開が進んでおり、これにより公開されたデータの活用が期待されるとともに、道路インフラ等の維持管理などに活用されるデジタルツインデータの標準化や管理者間での連携も有効であると考えられる。

物理空間と異なる形でのモデルを構築した際に、ユーザ等にその旨を明示することが望ましいと考えられる一方で、その情報開示が適切な水準でなされているかといった評価は難しいものとなる。

仮想空間内行為に関する資格等の取扱いについて、検討にあたっては、様々なユースケースの創出と連動させ、「物理空間で行為を行った場合の危険性等が低減することによる要件の緩和」と、「メタバースが物理空間と異なる環境であることによる新たな要件の必要性の有無」の両面から行うことが必要である。

サービス提供時にプラットフォーマーやワールド提

供事業者等に求められる事項について、違法行為への対処を行うことに加え、そのほかの個々の行為について、その許容性についてユーザ等が理解できるよう、プラットフォーム等はその利用規約等において可能な限り明確かつ具体的に定めることが期待される。ユーザ間トラブルへの責任については、今後の事例の蓄積を踏まえつつ、事例ごとの整理を重ねて一定の共通認識を醸成することが適当であると考えられる。

(4) データの取得・利用に係る課題

ユーザの行動履歴等の取扱いについて、電気通信事業法や個人情報保護法等の法令の規定を順守することと併せ、プラットフォームやワールド提供事業者により、どのようなデータが管理されているのか等についてのユーザへの説明が重要となる。

メタバースを利用したユースケースの中には、メタバース内で表現されるモーション等のデータのみならず、心拍数などのほかの生体反応データを用いるものも存在する。本人のアイデンティティに極めて近いスマートフォンを用いることによる、セキュリティやプライバシーの面からの論点が生じる可能性も指摘されており、個人情報保護法をはじめとする法令の遵守等が必要である。

(5) ユーザインタフェース (UI)・ユーザ体験 (UX) に係る課題

VR 用ウェアラブルデバイス等について、軽量化等技術開発が進んでいるが、重さ・大きさにより長時間使用時の装着ストレスがあり、2023 年現在、主要な HMD の価格は数万～10 数万円と高価である。また、長時間利用しているユーザであっても、慣れるまでは酔いやすかったとの声があった。ユーザの実体感等を踏まえつつ、今後の技術動向・ビジネス動向を注視していく必要がある。

(6) メタバースの動向／社会的な影響

メタバースのユーザ文化について、メタバースとゲームとの大きな違いは、ゲームにはルールが設けられているが、メタバースにはルールがないといった指摘がある。普段は肩書などで自分をカテゴライズしているが、アバターを通すと人格が切り替わるという感覚が多くの人にあり、日本人の場合は、アバターのときには自分の仕事のことを余り話さず、メタバース上の人格を持っているといった見解がある。

また、メタバース内のアバターのアイデンティティがユーザ自身の振舞いにも影響する「プロテウス効果」

や、メタバース内で異なるアバターを利用することによる教育効果等の向上が見られるという研究結果もある。メタバースの普及と併せ、アバターの利用実態やユーザの認識等がどのように変化していくのか、継続的に状況把握することが重要である。

VR デバイスについて、視覚、聴覚に加え、触覚（温度を含む。）や嗅覚などのほかの五感へのアプローチも含め、更なるデバイスに関する技術の発展が期待される。

描画の遅延及び空間内の収容人数について、将来的に、クラウドのデータセンター側処理をネットワークのエッジにオフロードする MEC (Multi-Access Edge Computing) レンダリングなどの技術の活用が期待される。

第 4 章 課題解決の方向性

(1) メタバース空間内に係る課題解決の方向性

メタバースはいまだ萌芽期にあることを踏まえれば、第 3 章 (1) ～ (4) に掲げた課題の解決には、イノベーションを阻害しないよう、まずは国際的な共通認識の醸成や、相互運用性確保に向けた標準化の推進、メタバース関連サービス提供者向けガイドライン（仮）の策定などが求められるのではないかと。

(2) メタバース空間外と関連する課題解決の方向性

第 3 章 (5)、(6) に掲げた UI/UX に係る事項やメタバースの動向／社会的な影響については調査や継続的なフォローアップが必要ではないかと。

※参考資料

- (参考 1) 「Web3 時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」構成員・開催実績及びこれまでの議論
- (参考 2) 意見募集 (2022.10～11) に寄せられた意見
- (参考 3) 若年層のメタバース利用に関する座談会

5 おわりに

前述のとおり、報告書は 2023 年 7 月 18 日に総務省ホームページにおいて公表しており、詳細については、そちらを御覧頂きたい。

小林由佳

総務省情報通信政策研究所調査研究部主任研究官。2009 総務省入省。これまで、電気通信分野に関する多国間交渉 (WTO・EPA 等)、教育分野の ICT 化推進 (フューチャースクール推進事業)、電気通信事業法改正等の業務に従事。2020 からは現職にてメタバースや経済学関係の研究等に従事。

サイバー空間の空間表現性を高める 点群メディア処理技術

谷田隆一 Ryuichi Tanida NTT 人間情報研究所
吉田大我 Taiga Yoshida NTT 人間情報研究所

1 はじめに

建設現場での測量やインフラ設備の保守管理、自動運転車における周囲オブジェクトとの距離計測、文化遺産のアーカイブデータ計測など、多くの業界で空間の三次元形状を計測し 3D データ化するニーズがある^{(1)~(3)}。3D データの計測には、ライダ (LiDAR: Light Detection and Ranging) と呼ばれる、レーザ光を用いた測距装置が使われることが多い。このライダは、照射したレーザの反射光を計測することで、高精度な 3D 点群データを取得することができる。

3D 点群とは、物体や地形などの三次元形状をその名のとおり空間上に分布する点の集まりとして表現したデータを指し、一般的には三次元の直交座標系 (x, y, z) 上の座標の集合として表現される。各点は座標以外に、色情報 (R, G, B) や計測した反射光の強さを表す反射強度などの様々な属性情報を持つこともできる。3D 点群の一例を図 1 に示す。

昨今はライダなどの計測装置が普及し安価に入手できるようになり、先に挙げた測量や設備保守などを目的とした 3D データ計測以外にも用途が広がっている。例

えば、広域な 3D 空間の形状を正確に計測できる特徴を生かし、取得した 3D 点群データをコンテンツとして利用する事例も登場している。その一つが、点群を用いたサイバー空間構築の取組みである。本稿では、3D 点群データからサイバー空間を構築する際に必要となる技術について解説する。

2 3D 点群によるサイバー空間構築

サイバー空間の構築では、ライダ等による 3D 点群計測を活用することで効率的に広範囲の 3D データを取得できる。例えば、TENGUN Ogijima プロジェクト⁽⁴⁾では、瀬戸内海に浮かぶ香川県・男木 (おぎ) 島の港周辺のエリアを延べ 3 日半かけて 3D 点群計測をしている。計測範囲は東京ドームおよそ 2 個分に及び、そこで得られた 42.4 億点 (88.4 GByte) の 3D 点群データを基に、図 2 に示すようなサイバー空間を構築している。

男木島のような狭い路地の多い空間の計測には、作業者が携行して計測できる可搬型のライダ装置が適している。各地点で計測した断片的な 3D 点群に対し、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) やレジストレーションと呼ばれる手法を適用することで、広域の 3D 点群を構成できる。SLAM とはセンサやカメラの情

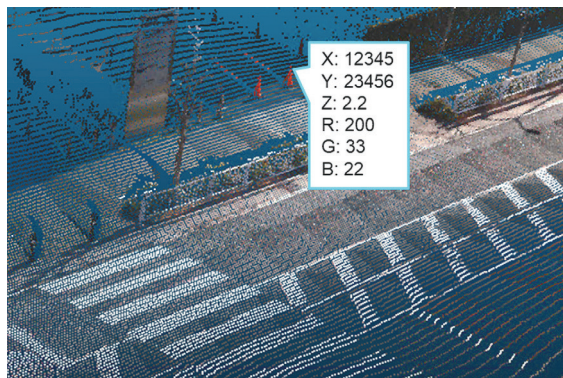


図1 3D 点群の例



図2 TENGUN Ogijima プロジェクト

報から撮影姿勢の推定と 3D 地図の作成を同時に行う手法である。また、レジストレーションとは複数の点群を重ね合わせるため、点群データの共通する領域を見つけて位置合わせする手法である。

広い道沿いに計測可能な場合には、車両にライダーやカメラ、GNSS (Global Navigation Satellite System) や加速度センサなどを搭載した MMS (Mobile Mapping System) と呼ばれるシステムを利用することで、位置情報の付与された点群を効率的に計測することもできる。

ただし計測した 3D 点群データは、点間の隙間が目立つ上、データサイズも大きいなど、見た目や取り扱いやすさなどの面で課題がある。高精細なサイバー空間の構築に向けては、様々な処理技術を適用することで見た目や取り扱いやすさを改善できる。本稿では、そのうち点群処理技術として特徴的な点群超解像、点群認識、点群圧縮の 3 技術について 3. 以降にて詳説する。

なお、3D 空間の計測手段としてはライダーによる点群計測以外にも、複数枚の画像データから 3D 形状を推定するフォトグラメトリと呼ばれる技術もある⁽⁵⁾。フォトグラメトリはカメラで撮影した複数枚の画像データを用いて形状を再構成し、レーザ光照射での計測と比べて緻密な 3D データを作成できる特徴がある。一方で、少しずつ重なり合った多数の画像が必要であり、撮影条件に 3D 品質が左右されるなど、計測コスト上の課題から比較的狭い範囲の計測に適している。

3 点群超解像技術

3.1 点群超解像技術の概要

ライダーは主にレーザを照射し反射波から方向と距離を 1 点ずつ計測するため計測時間が長いほど点密度は高く、また、一般的に高価なライダーほど同時に計測できる点数が多い。そのため、計測時間やコストに制約がある場合、取得できる点群の密度は相対的に低く、細部の特徴が失われてしまうため、取得したデータをそのままサイバー空間に適用することは難しい。

短い計測時間や低コストで目視確認や AI での解析処理に十分な密度の点群を取得するための技術として、点群を高密度化する点群超解像と呼ばれる技術がある。

3.2 サイバー空間構築における点群超解像技術の課題

点群を高密度化する手法は、三次元の点群を直接入力して補間するアプローチと、点群をある視点からの深度情報として扱うアプローチに大別される。

前者は点群のアップサンプリングとも呼ばれ、代表的な手法としては PU-Net⁽⁶⁾、EC-Net⁽⁷⁾、PU-GAN⁽⁸⁾、PU-Transformer⁽⁹⁾ などがある。本アプローチは点群を

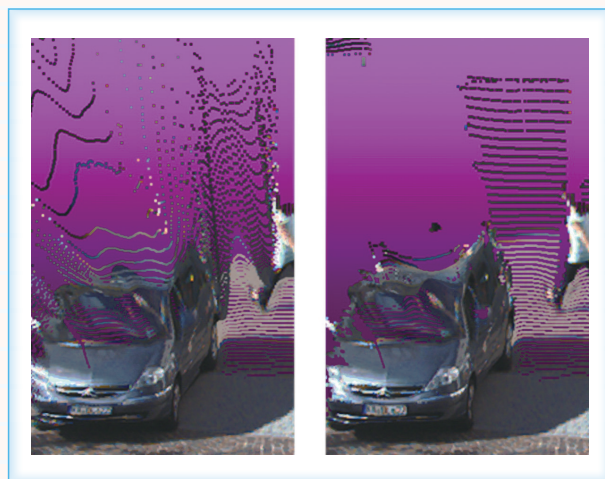


図3 物体境界の点が乱れる例(左)と改善した例(右)

直接扱うことで、三次元的な局所形状を考慮し滑らかに点密度を向上させることができる。

後者は Depth Completion と呼ばれ、カメラで撮影した画像とライダーで取得したまばらな点群等から生成した深度情報を入力し、密な深度情報を推定する。本アプローチは密度の高いカメラ画像を補足情報として利用可能であり、長年にわたり蓄積された画像処理技術を活用できるという利点がある。主な手法としては CSPN⁽¹⁰⁾、NLSPN⁽¹¹⁾、Sparse-to-Dense⁽¹²⁾、RigNet⁽¹³⁾ などがある。

Depth Completion の手法はカメラ画像を併用することで、軽量に高精度な高密度化ができる特徴がある。一方で、深度情報が連続的に変化するという仮定の下で処理するため、物体の境界に位置する不連続な点の深度も連続的に補間してしまう。そのため、図3の左図に示すように点が波打つ、乱れるなど、サイバー空間の見た目が低下してしまう問題があった。このような問題を解決するため、Yao らの手法 (B-ADT)⁽¹⁴⁾ が提案されている。

3.3 点群超解像手法の処理手順

Yao らの手法の点群超解像の処理の流れを図4に示す。同手法は、Depth Completion に分類され、1 枚のカメラ画像と超解像の対象となるまばらな点群を入力とする。

まず、点群データをカメラ画像と同一の視点・画角に対応するデプスマップに変換する。デプスマップとは画像の各画素値としてカメラからの奥行情報を持つ形式である。奥行きを計測できていない画素は空値となり、一般的なライダーを用いて計測した点群はカメラ画像と比べて密度が低いため、値の存在しない画素の多いまばらなデプスマップとなる。

続いて、カメラ画像の情報を参考にまばらなデプスマップの空値を埋める Depth Completion 手法を適用

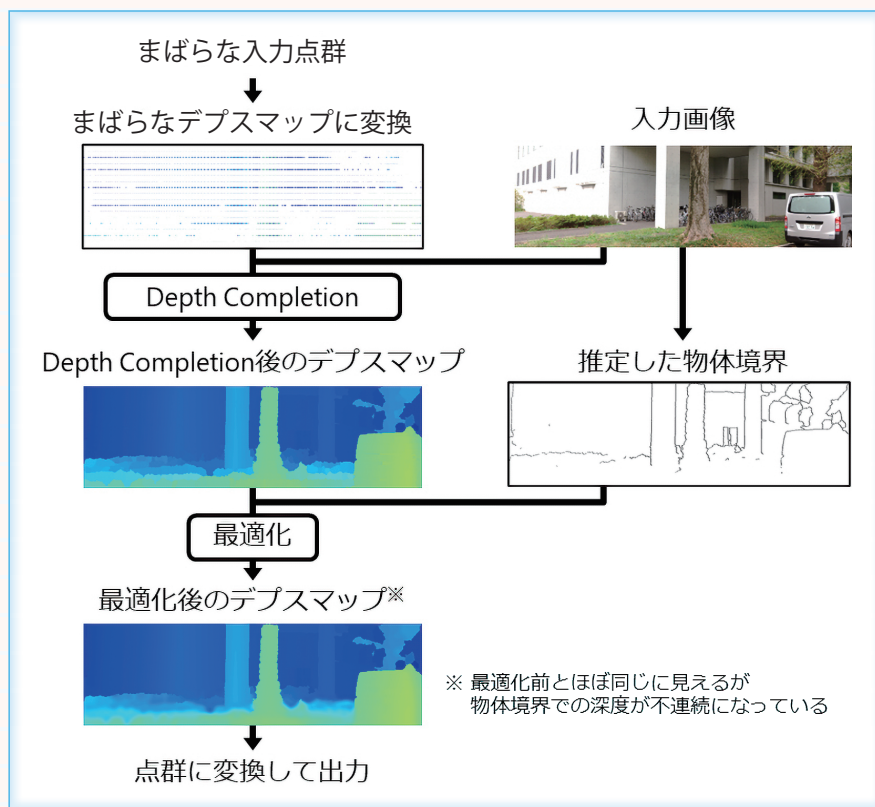


図4 物体境界での深度の不連続性を考慮した点群超解像処理の流れ

する。Depth Completion では、空値の画素の奥行きを周辺の画素値から推定するタスクを解く。このタスクはエネルギー最小化問題とみなすことができ、デプスマップの画素値が画像全体で滑らかに変化するほど小さくなる平滑化項と、まばらなデプスマップ（入力）と密なデプスマップ（推定結果）の画素値が近いほど小さくなるデータ項の和を最小化することで解を算出できる。

算出されるデプスマップはカメラ画像と同程度に高密度化されるが、前述のように物体境界での奥行きも滑らかに補間されてしまう。そこで、画像の色情報を頼りに物体境界を推定し、物体境界をまたいで平滑化項が影響しないよう最適化することで、図3の右図に示すように物体境界での深度の不連続性を維持し、見た目にも自然な点群超解像を実現している。

最後に、最適化後のデプスマップを画素ごとに三次元座標に変換することで、高密度な点群を取得できる。

4

点群認識技術

4.1 点群認識技術の概要

ライダー等で計測した点群データは、一般的に三次元の座標と、照射したレーザが物体に当たった際の反射光の強度を表す反射強度、カメラ画像と照合することで付与した R, G, B の色情報などを属性情報として持つが、それだけでは各点が何の物体に対応しているかといった

意味情報は含まれていない。

計測された点群を表示するだけであれば意味情報は不要であるが、計測した点群から人や車だけ削除したい、特定の物体への動作付与やインタラクションを可能にしたいなど、よりリアルなサイバー空間の構築には意味情報が必要となる。人手で各点に意味情報を付与するのは現実的ではないため、一般的にはラベル付与には点群認識（セマンティックセグメンテーション）と呼ばれる技術が用いられる。付与したラベルの活用例として、サイバー空間上に存在する樹木に風で揺れる動きを疑似的に付与するイメージを図5に示す。

4.2 サイバー空間構築における点群認識技術の課題

画像は各画素が縦横に整列されているのに対し、3D点群は整列されておらず空間内に散らばっている。処理しやすいよう点群を構造化するため、従来の手法では三次元空間をボクセル（立方体）に区切り、各ボクセル内に点が含まれるか否かで2値化して三次元行列として扱うことが一般的であった。しかし、細かな形状の特徴が欠損してしまい、精度面で課題があった。

点群を点の集合として処理する際には、点の入力順序が異なる場合や、点群が回転・平行移動した場合でも同一の結果を得られる必要がある。そのためにデータ拡張すると計算量が爆発的に増えてしまうが、PointNet⁽¹⁵⁾の登場により点の入力順序や回転の影響を受けずに効率



図5 点群認識結果を活用してサイバー空間に動きを付与するイメージ

的に処理する手法が提案され、点群の活用の幅が広がった。点群に意味情報を付与するセマンティックセグメンテーションも多く手法が提案されており、PointNet 以外にも PointNet++⁽¹⁶⁾、KPConv⁽¹⁷⁾、Point Transformer⁽¹⁸⁾ などがある。

サイバー空間全体に意味情報を付与するためには非常に広範囲の点群を処理する必要があるが、空間の大きさに比例して認識対象となる点数も増加し計算量が増加してしまう。そのため、限られたリソースで処理するためには空間の分割やデータを間引くサンプリングを実施する必要があるが、その際に認識精度が低下してしまう問題がある。広域の点群を対象とする場合でも精度低下を防ぐ認識手法として、Kurata らの手法⁽¹⁹⁾ が提案されている。

4.3 点群認識手法の処理手順

Kurata らの手法の点群認識処理の流れを図6に示す。同手法では、サンプリング後の各代表点の特徴抽出の際、代表点だけでなく近傍点の属性情報も集約する。そして、近傍点の情報を持った代表点の特徴を点群認識に

入力することで、点を間引いたことによる精度低下を抑制する。

また、サンプリングした点の認識後、入力された元の点全てにラベルを付与するため、代表点に付与されたラベルを周辺の点に伝搬させる。その際に空間的な距離のみに基づいて伝搬させると物体境界の位置があいまいになってしまうが、色の類似性も併せて考慮した距離指標を用いることで物体境界での識別性能を向上させている。

これらの工夫により、広範囲の点群を軽量かつ細部まで高精度に認識することができる。

5 点群圧縮技術

5.1 点群圧縮技術の概要

3D 点群はデータサイズが非常に大きいため、広大な点群データの効率的な保管・伝送には圧縮技術が不可欠となる。これに関して、国際標準化団体である Moving Picture Expert Group (MPEG) が2017年頃から点群圧縮に関する標準化活動を開始している。この活動では、点群の特性に基づき異なる二つの手法を検討してい

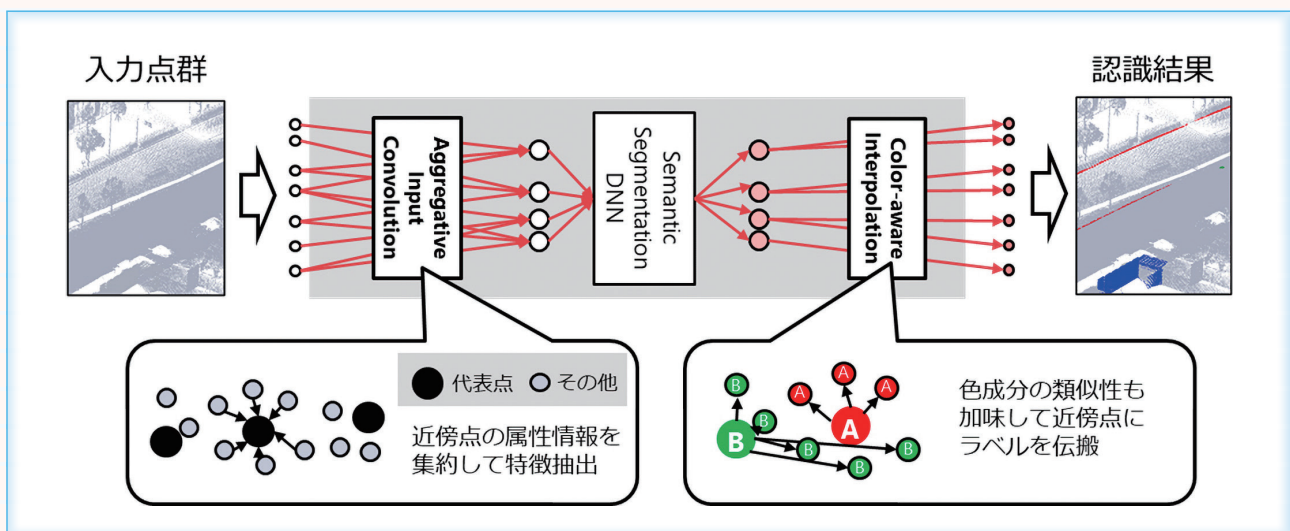


図6 サンプリング時の精度低下を抑制する点群認識処理の流れ

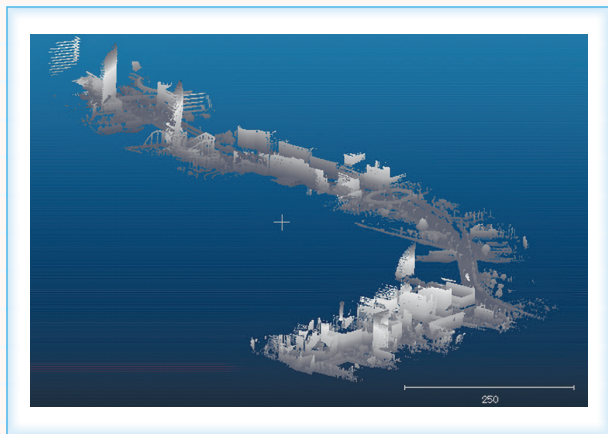


図7 G-PCCの圧縮対象の3D点群データ

る。一つが Video-based Point Cloud Compression (V-PCC)⁽²⁰⁾、もう一つが Geometry-based Point Cloud Compression (G-PCC)⁽²¹⁾である。

前者の V-PCC は、動的オブジェクトを前提とした規格となっている。符号化時は、オブジェクトを取り囲む立方体に点群を投影し、点群をテクスチャパッチと深度パッチの集合に変換する。そして、これらを 2D ビデオ状に並べ、既存の 2D ビデオ符号化技術により圧縮する。

一方、後者の G-PCC は、点群の座標データをそのまま符号化する方式である。そのため、例えばアーカイブ用途など、元データをできるだけ忠実に保ったまま圧縮する用途に適した規格となっている。符号化時は、点群を含む立方体を再帰的に 8 分割し、各分割された立方体内の点の有無を走査する。その結果を octree と呼ばれる八分木構造により効率的に表現することで、高い圧縮性能を実現している。

これらの特徴から、サイバー空間向け 3D 点群データの圧縮では、高い精度を保った状態で圧縮できる G-PCC の方がより適していると言える。一方の V-PCC は、そのサイバー空間内を動くアバターなどの動的オブジェクトの圧縮により適している⁽²²⁾。

5.2 点群圧縮標準 G-PCC について

G-PCC を用いたサイバー空間向け 3D 点群データの圧縮について述べる⁽²³⁾。図 7 に圧縮対象となる 3D 点群データを示す。これは横浜市内とみらい地区を道路に沿って約 1.5 km にわたり点群計測したもので、3 ファイルに分割保存されており、総点数は合計約 8,800 万点である。各点は座標データ (x, y, z) と色データ (R, G, B) の合計 216 bit の情報を持つ。このデータを G-PCC の可逆圧縮で圧縮した結果の一例を表 1 に示す。この結果から、G-PCC の可逆圧縮により、およそ 1/3 程度に圧縮できることが分かる。

また G-PCC では、3D 点群データを「tile」と呼ばれ

表 1 G-PCC による点群の圧縮結果 (可逆圧縮)

点群	点数	ファイルサイズ [MByte]		圧縮率 [%]
		圧縮前	圧縮後	
No.1	29,411,758	775.5	268.8	33.6
No.2			260.4	33.6
No.3			270.7	34.9
Total	88,235,274	2,326.5	791.9	34.0

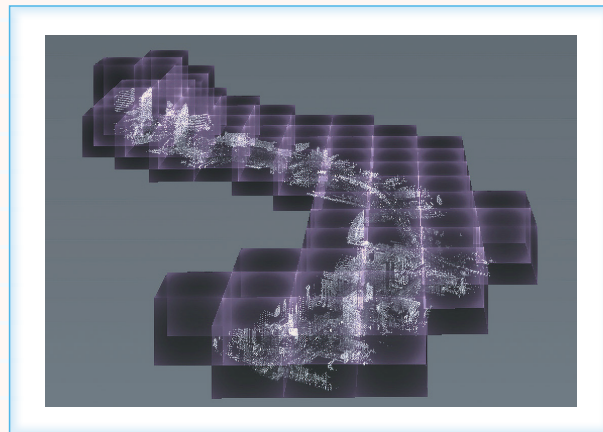


図8 G-PCCのtileによるセグメント分割の例

るセグメントに区切りながら圧縮保存できる。図 8 に、G-PCC の tile によるセグメント分割を模式的に表した例を示す。この図は、図 7 で示したみなとみらい地区の点群データを 68 個の tile に分割したものである。復号時は、圧縮ファイル中の特定の tile だけを指定して復号する部分復号が可能となっている。この特徴により、広大なサイバー空間の 3D 点群データを圧縮保管するケースにおいても、ランダムアクセス性を保ったまま、コンパクトに保存することが可能となる。実際のユースケースにおいては、圧縮ファイルのうちユーザの視点に対応する tile データだけをユーザに伝送・復号すればよく、伝送帯域を大幅に節約できる。

6 まとめ

本稿では、サイバー空間構築の際に点群を用いるケースにおいて、特に特徴的な 3 技術について概説した。

点群計測に用いられるライダは、これまでは設備保守分野など、極めて限られた分野に限定されていたが、2021 年に発売された iPhone12 にライダが搭載されるなど、低価格なライダも徐々に登場しつつある。今後は、このような低価格ライダと本稿で紹介したような技術を活用することで手軽に高精細な点群空間を構築できるようになり、更なるメタバースの普及が期待される。

■ 文献

- (1) 西 乃輔, 木寺浩紀, “建築分野における 3D モデリング,” 建設機械施工, vol. 71, no. 4, pp. 40-44, April 2019.
- (2) Y. Li and J. Ibanez-Guzman, “Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive Lidar and perception systems,” IEEE Signal Processing Mag., vol. 37, no. 4, pp. 50-61, July 2020.
- (3) 浜田侑輝, 曾 鑫, 荒木俊輔, 碓崎賢一, 向井智久, 石井儀光, “大規模三次元点群データを用いた文化遺産の VR 体験システムの構築に関する研究,” 第 26 回地理情報システム学会学術研究発表大会, Oct. 2017.
- (4) 松元崇裕, “TENGUN Ogijima プロジェクトの取組紹介とデモンストレーション,” 情処学研報, vol. 2023-CDS-37, no. 4, pp. 1-6, May 2023.
- (5) F. Remondino, “Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning,” Remote Sensing, vol. 3, no. 6, pp. 1104-1138, May 2011.
- (6) L. Yu, X. Li, C-W. Fu, D. Cohen-Or, and P-A. Heng, “PU-Net: Point cloud upsampling network,” Proc. IEEE conf. comput. vision and pattern recognition (CVPR), March 2018.
- (7) L. Yu, X. Li, C-W. Fu, D. Cohen-Or, and P-A. Heng, “EC-Net: An edge-aware point set consolidation network,” Proc. European conf. comput. vision (ECCV), July 2018.
- (8) R. Li, X. Li, C. W. Fu, D. Cohen-Or, and P-A. Heng, “PU-GAN: A point cloud upsampling adversarial network,” Proc. IEEE/CVF international conf. comput. vision (ICCV), July 2019.
- (9) S. Qiu, S. Anwar, and N. Barnes, “PU-Transformer: Point cloud upsampling transformer,” Proc. Asian Conf. Comput. Vision (ACCV), Oct. 2022.
- (10) X. Cheng, P. Wang, and R. Yang, “Depth estimation via affinity learned with convolutional spatial propagation network,” Proc. European Conf. Comput. Vision (ECCV), Aug. 2018.
- (11) J. Park, K. Joo, Z. Hu, C-K. Liu, and I. So Kweon, “Non-local spatial propagation network for depth completion,” Proc. European Conf. Comput. Vision (ECCV), July 2020.
- (12) F. Ma, G. V. Cavalheiro, and S. Karaman, “Self-supervised sparse-to-dense: Self-supervised depth completion from LiDAR and monocular camera,” International Conf. Robotics and Automation (ICRA), May 2019.
- (13) Z. Yan, K. Wang, X. Li, Z. Zhang, J. Li, and J. Yang, “RigNet: Repetitive image guided network for depth completion,” Proc. European conf. comput. vision (ECCV), July 2022.
- (14) Y. Yao, M. Roxas, R. Ishikawa, S. Ando, J. Shimamura, and T. Oishi, “Discontinuous and smooth depth completion with binary anisotropic diffusion tensor,” IEEE Robotics and Automation Lett., vol. 5, no. 4, pp. 5128-5135, June 2020.
- (15) C. R. Qi, H. Su, K. Mo, and L. J. Guibas, “PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation,” Proc. IEEE conf. comput. vision and pattern recognition (CVPR), April 2017.
- (16) C. R. Qi, L. Yi, H. Su, and L. J. Guibas, “PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space,” Adv. neural inf. process. syst. 30, June 2017.
- (17) H. Thomas, C. R. Qi, J. E. Deschaud, B. Marcotegui, F. Goulette, and L. J. Guibas, “KPConv: Flexible and deformable convolution for point clouds,” Proc. IEEE/CVF international conf. comput. vision (CVPR), Aug. 2019.
- (18) H. Zhao, L. Jiang, J. Jia, P. Torr, and V. Koltun, “Point transformer,” Proc. IEEE/CVF international conf. comput. vision (ICCV), Sept. 2021.
- (19) K. Kurata, Y. Yao, S. Ando, N. Ito, and J. Shimamura, “Aggregative input convolution for large-scale point cloud semantic segmentation,” IEEEJ Trans. Image Electron. and Visual Computing, vol. 10, no. 1, pp. 11-18, June 2022.
- (20) MPEG 3DG, “V-PCC codec description,” ISO/IEC JTC 1/SC29/WG7 N00100, 2020.
- (21) MPEG 3DG, “G-PCC codec description v12,” ISO/IEC JTC 1/SC29/WG7 N00271, 2022.
- (22) D. Graziosi, O. Nakagami, S. Kuma, A. Zaghetto, T. Suzuki, and A. Tabatabai, “An overview of ongoing point cloud compression standardization activities: Video-based (V-PCC) and geometry-based (G-PCC),” APSIPA Trans. Signal and Inf. Process., vol. 9, April 2020.
- (23) MPEG 3DG, “MPEG G-PCC test model,” <https://github.com/MPEGGroup/mpeg-pcc-tmc13>

谷田隆一 (正員)

2003 京大大学院工学研究科修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、映像や点群の符号化に関する研究開発に従事。現在、NTT 人間情報研究所主幹研究員。



吉田大我

2009 京大大学院情報学研究科修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、画像認識や点群処理に関する研究開発に従事。現在、NTT 人間情報研究所主任研究員。



メタバースを支える技術 —— AI(人工知能)技術 ——

AI Technologies in Metaverse

三宅陽一郎 Yoichiro Miyake[†]

Summary

メタバースは一つのシステムであるが、それを内側から支え、より良い空間に変えるためには人工知能 (AI) の力が必要である。メタバースは現在発展中であり、また形成されつつ存在である。その中で人工知能がどのような役割を果たし、メタバースにどのような可能性を与えるかを解説する。特にスマートシティと同期したメタバースを実現するためのスパーシャル AI (空間型 AI) について解説し、物理空間を自律知能化し、かつそれをメタバースと同期する設計について述べる。またスマートシティとメタバースの連携において、エージェントが人の拡張としてどのような役割を果たすのか、詳細を提示する。

Key Words

スマートシティ、メタバース、人工知能、デジタルツイン、エージェント、スパーシャル AI

1

メタバースと人工知能

メタバースと人工知能 (AI) は密接な関係にある。メタバースは仮想世界のフレームであり、人工知能はその内容 (= コンテンツ) を支える技術である⁽¹⁾。人工知能は広範な範囲を指す言葉であるが、本稿では、メタバースで用いられる人工知能技術に限定して述べる。メタバースの前身としてデジタルゲームが考えられる。デジタルゲームにおける人工知能の発展としてメタバースにおける人工知能技術がある。

1.1 用語定義

ここで本稿におけるメタバース、スパーシャル AI (空間型 AI)、スマートシティの定義を述べる。メタバースはユーザの分身であるキャラクタ (「アバタ」と呼ばれる) を操作できる仮想空間である。3D が想定される場合が多いが 2D のメタバースも存在する。また数人規模から数十万人規模まで様々である。スパーシャル AI は空間そのものを母体とし、その空間を管理する AI である。センサは担当する空間に配置された様々なセンシングデバイスを通じてセンシングを行い、またエフェクタもまた担当空間に対してその空間に属するエージェントや機器に命令することを通じて影響を与える。多くの場合、スマートシティは本論文では単に都市の情報を

取得するシステムを超えて、自らを管理する人工知能を持つ都市を意味する。

1.2 デジタルゲームにおける人工知能のシステム

メタバースの前身として、デジタルゲームにおける人工知能の発展も概説する。デジタルゲームにおける人工知能のシステムは、三つの要素の自律分散協調システムである。つまり、ゲーム全体を統御するメタ AI、キャラクタの頭脳であるキャラクタ AI、空間そのものと知能化したスパーシャル AI である^{(2)~(4)} (図 1)。

スパーシャル AI について先に簡単に解説しておく。前述したように、スパーシャル AI は担当する空間に対するセンサを持ち、同時にその空間にエフェクタを持つ AI のことである。多くの場合、その空間を管理する人工知能となる。ゲーム内では特定の空間に対して、例えばダンジョンのそれぞれの部屋にスパーシャル AI が定義される。スパーシャル AI はその部屋の地形、形状、置かれているオブジェクト、ギミックなど空間的特性を認識し、またその部屋に置かれる敵モンスター群を管理する。例えばプレーヤが部屋に入ると柱を倒すなど、自動的な処理を行う場合もあれば、はしごを登らせるなどプレーヤキャラクタを操作する場合もある。物理空間においても同様に、カメラをはじめ各種センサから当該空間の情報を取得する、あるいは逆にドローンやロボットなどのエージェントから情報を取得し、エージェントへの命令などを通じて、その空間を管理する。このスパーシャル AI に搭載した空間

[†] 東京大学生産技術研究所, 東京都
Institute of Industrial Science, The University of
Tokyo, Tokyo, 153-8505 Japan

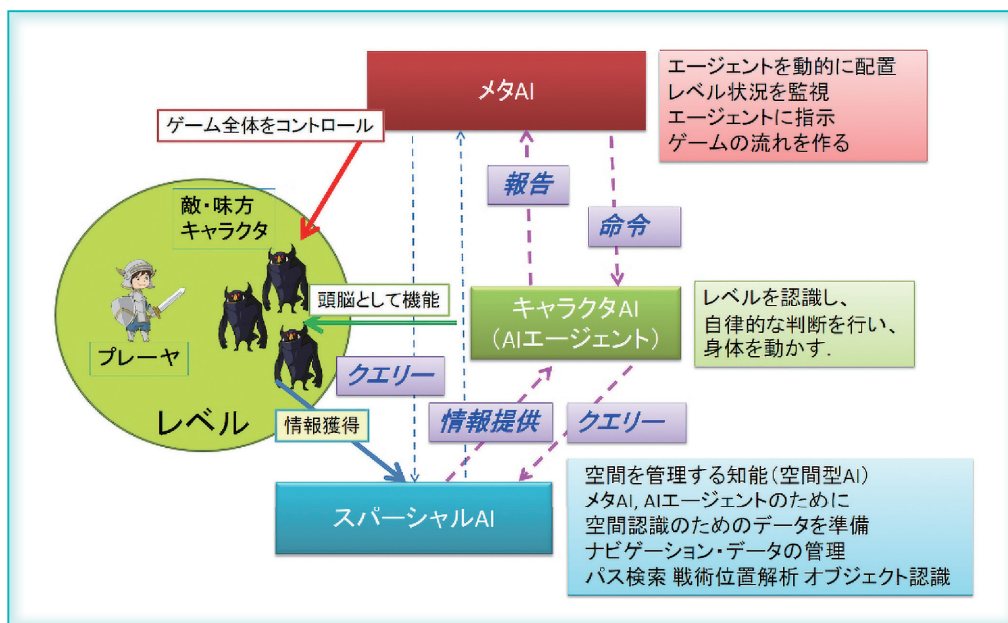


図1 デジタルゲームにおける人工知能

はスマートスペースと呼ばれ、スマートシティの基礎となり、またメタバースとスマートシティを同期させる役割を持つ。

1.3 本論文の構成

本論文では、この三つのAIを軸に、スマートシティへの人工知能の応用を述べる。2. ではメタバースの二つの形について、3. , 4. ではデジタルゲームと関係してメタバースが発展してきた歴史とブロックチェーンとの関係について、5. は生成AIがメタバースの仕組みに寄与する効果について、6. ではAIエージェントによる人間拡張について、7. ではAIエージェントがメタバース内で形成する新しい社会とその人間関係について、8. では空間型AIとメタバースについて、9. ではメタバースとスマートシティの空間型AIによる同期

について、10. では集合知性としてのメタバースについて述べる。

2 メタバースの二つの型

メタバースは中央集権型と分散型の二つの型に分類することができる(図2)。中央集権型とは、オンライン上に一つの大きな世界を作り、そこに多人数のユーザが同時に参加する形式である。デジタルゲームで言えば「ファンタースターオンライン」(セガ, 2000年)や「World of Warcraft」(Blizzard Entertainment, 2004年)のようなMMORPG (Multi-Massive Online RPG) の形式であり、多人数同時接続を基本とする。メタバースで言えば「サンドボックス」「フォートナイト」(Epic Games, 2017年)がこれに相当する。技術的には何万、何

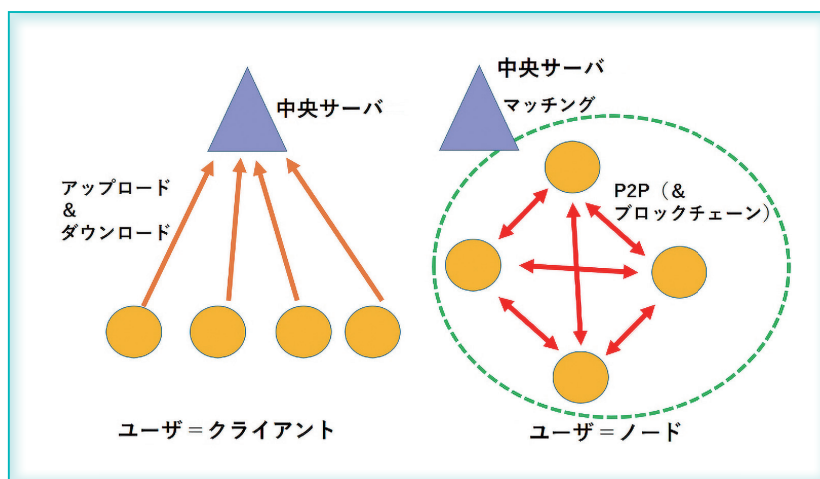


図2 メタバース中央集権型と分散型

十万ユーザの同時接続を可能とするほど大規模な中央サーバがあり、これに多人数が同時に接続し同期する形式である。一方、分散型とはそれぞれがインターネット上のノードとなり、限られた友人、例えば数人だけ招待の下に同期できる形式である。例えば「あつまれ どうぶつの森」(任天堂, 2020 年)は基本的には一人でプレイするゲームである。与えられた島を招いた動物たちが快適に暮らせるように整備・改造する。この動物たちは基本的には AI で動いている。同時に 7 人までほかのユーザを招待することができ、招待されたユーザは自分のキャラクタで島にやってくる。この仕組みを利用して採用説明会を行った企業もあり、新しいメタバースの活用事例である⁽⁵⁾。

中央集権型は、各ユーザのノード同士の通信を避け、ゲーム全体の同期を中央サーバに各ノードから情報を集約することで行うモデルである(図 2)。多人数の同期を必要とするゲームで用いられる。しかし、リアルタイム性の高いゲームの場合に多人数の同期を取るには、1/60 秒以内に全ての同期処理を行う必要があるが、これは現在の通信環境、サーバの処理速度では原理的に難しい場合が多い。そこで数人に限った場合には通常、分散型が採用される。また、リアルタイム性を必ずしも必要としないロールプレイング、ストラテジーゲーム分野でのゲームで応用が数多くなされている。通常はインターネット回線の環境の良い、データセンターに設置されたサーバによって運用される。

分散型の多くは技術的には P2P (Peer to Peer) による接続であり、中心となるサーバはマッチングだけを行う。近年のブロックチェーン技術におけるトークンの交換の自動記録、自動相互認証機能をこれに加味すれば、保証の付いたアイテムのやり取りを実現することができる。これは「ハッシュクラフト」(Ubisoft, 開発中)が提示しているモデルである^{(6), (7)}。「ハッシュクラフト」は各ユーザに島が一つ与えられ、配布されたツールで半自動生成的に 3D オブジェクトを生成することができる。そのオブジェクトをブロックチェーンによってユーザ同士で交換することで、ユーザが分散しつつ結び合う経済圏を作る。運営がストップすると全てがストップする中央集権型と違い、中央のサーバがなく、ユーザがいる限りゲーム世界である群島が存在し続ける。言わば「ユーザによるユーザのためのユーザのゲーム世界」であり、ゲーム開発・運用、プレイまで全て開発者の手からユーザの手に民主化する動きである。

2023 年の段階では分散型に比べて中央集権型が多い。中央集権型はメタバースを集中的に管理できるメリットがあるが、十分なサーバリソースを準備する必要がある。分散型は管理とセキュリティの確保が課題であるが、サーバリソースは最低限だけでよいというメリットがある。

3 メタバースと市場の成立 (1): UGC 文化の浸透

オンラインゲームがゲーム企業の製作と運営によって成立することに対して、メタバースはユーザの活動のダイナミックな連携によってメタバース世界が活動する。様々なメタバースが存在するが、多くのメタバースはユーザの生産活動と経済活動を基本とする(図 3)。ユーザの生産活動とは、メタバースで準備された生産ツールを用いてコンテンツを生産することである。例えば「サンドボックス」「Roblox」(Roblox, 2006 年～)ではツールからキャラクタや地形のデザイン、ゲームまで製作できるようになっている。

メタバースではこのような生産が容易にできるようにし、ユーザの生産活動を活発化し維持することが基本運用指針の一つである。ここで言うユーザは一般のユーザに加えて企業のユーザも含まれる。企業としてメタバースの土地を購入し、その上の地形や建物を構築しアイテムを販売する、などである。「サンドボックス」ではアディダス社が展覧し一週間で 26 億円相当のアイテムを売り上げたという報道がある⁽⁸⁾。経済活動は、そのようにユーザが作ったオブジェクトが売買されることを意味する。このような仕組みはユーザが購入するポイントか、仮想通貨によって行うが、近年のメタバースの発展は仮想通貨の使用によってメタバース上のユーザによる自律した経済圏が実現されたことが大きい。

このようなユーザによるコンテンツ生成は UGC (User Generated Contents) と呼ばれる。ディジ

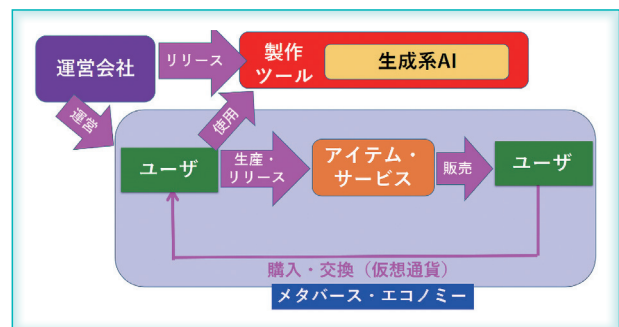


図3 メタバースの経済圏

タルゲームでは1980年代からある概念であり、1980年代ではゲームステージをユーザが自作できる「ロードランナー」(ブローダーバンド, 1983年)、「レッキングクルー」(任天堂, 1984年)、「エキサイトバイク」(任天堂, 1984年)がある。また、海外ではパソコンゲーム市場が日本より大きく、パソコンゲームにはステージ生成ツールが付属されている場合があり、そのツールによって作られたゲームはMOD (Modification の略語を起源とする) と呼ばれる。MODはユーザが手元で作って楽しむ以外にも、同じゲームを持つユーザにデータを渡すことで遊ばせることも可能である。またそれを用いて新しいゲームが作られる場合もある。代表的なものとして、「Half-Life」(Valve, 1998年)のMODとして作られた「Counter Strike」(Valve, 1999年)があり、世界で1,000万本以上を売り上げた。eSportsで世界的に人気のある「Dota2」(Valve Corporation, 2013年)は元々「Warcraft III」(Blizzard Entertainment, 2002年)のMODとして作られた。これらはMODとして有名であるが、MODということ意識されずに購入される場合が多く、タイトル単体での知名度がMODとしての知名度を上回るゲームである。

しかし、MOD文化はかなりのゲーム好きや開発者の間で使われるもので、一般的な文化ではなかった。UGCを一躍世界に広めたのは「マインクラフト」(Mojang Studios, Microsoft, 2011年)である。「マインクラフト」はほぼ一人の開発者が独自で作り上げたゲームであり、ブロックで構成された世界の中で、ユーザがそれらを組み合わせたコンテンツを作るゲームである。ゲームとしての面白さもさることながら、パソコンに触れるようになった子供を中心に教育的効果が注目されており、2014年にMicrosoftが買収し、2015年には、「Minecraft in education」がリリースされている。2023年までに2億本以上を売り上げている⁽⁹⁾。「マインクラフト」は当初、高画質のグラフィクスに対するシンプルな画面でグラフィクスがけん引するゲーム市場に対するカウンターとして現れた。しかし、シンプルながらも自分で建築やオブジェクトを製作する楽しみを中心にしたゲームデザインが世界中で受け入れられている。「マインクラフト」がゲーム産業やメタバースに与えた影響は大きい。特に「マインクラフト」のUGCシーンの影響力は大きく、デジタルコンテンツを複数人でオンラインで製作し合う様々な環境が出現し、また「ハッシュクラフト」ではユーザ同士がそれぞれの製作物を公式にやり取り

する仕組みとしてブロックチェーンが導入された。

UGCの普及は歴史的には「マインクラフト」よりも古く「Roblox」が広めてきた。「Roblox」は2006年から続くメタバースであり5,000万人以上のユーザを持つ⁽¹⁰⁾。「Roblox」はユーザが製作するゲームの集合体であり、ユーザは「Roblox」の運営が提供するツールやコーディング環境でゲームを製作し、ほかのユーザに遊ばせることが可能である。

4

メタバースと市場の成立 (2): 仮想通貨の浸透

本章ではメタバースの歴史を概説する(図4)。2000年を前後としてインターネット環境が整備され、オンラインゲームが台頭した。「ウルティマオンライン」(EA, 1997年)や「ファンタシースターオンライン」(SEGA, 2000年)などがある。デジタルゲームの中でもメタバースに近いゲームが台頭したのもこの時期であった。「EVE ONLINE」(CCP Games, 2003年)は7,000以上の星系があり、ユーザは惑星から資源を回収して自由に貿易をすることができる。またユーザから星間管理評議会の議員が選挙によって選ばれ、この評議会は運営に対して改善点を提案することができる。このように2000年から数年間は、メタバースの萌芽となるゲームがリリースされ、これらのサービスの多くは現在も続いている。特に「セカンドライフ」(リンデン・ラボ, 2003年)は明確な達成目標、用意された物語、ユーザの役割がなく、オンラインゲームとは全く異なるメタバースであり、世間でもゲーム産業でも大きく注目を集めた。この2000年から2006年までのメタバースの台頭期を「メタバース第一期」と呼ぶこととする。

第二期は2007年頃から2010年にかけて、ゲーム産業では実際に幾つかのメタバースが作られた時期である。「meet-me」(2008~2017年、株式会社ココア)や「internet Adventure」(2008年発表、2009年、セガ)、「ai sp@ce」(ドワンゴ, 2008~2011年)などがあり、また「PlayStation Home」(ソニーコンピュータエンタテインメント, 2008~2015年)は、PlayStation3上のオンラインサービスで、特定のゲームとは独立してユーザ同士が一般的に交流する空間が設けられた。しかし、これらはオンラインゲームとよく似たアイテム購入モデルなど、あくまで製作主体はゲーム開発会社であり、収益源はそれらと広告モデルであった。例えば

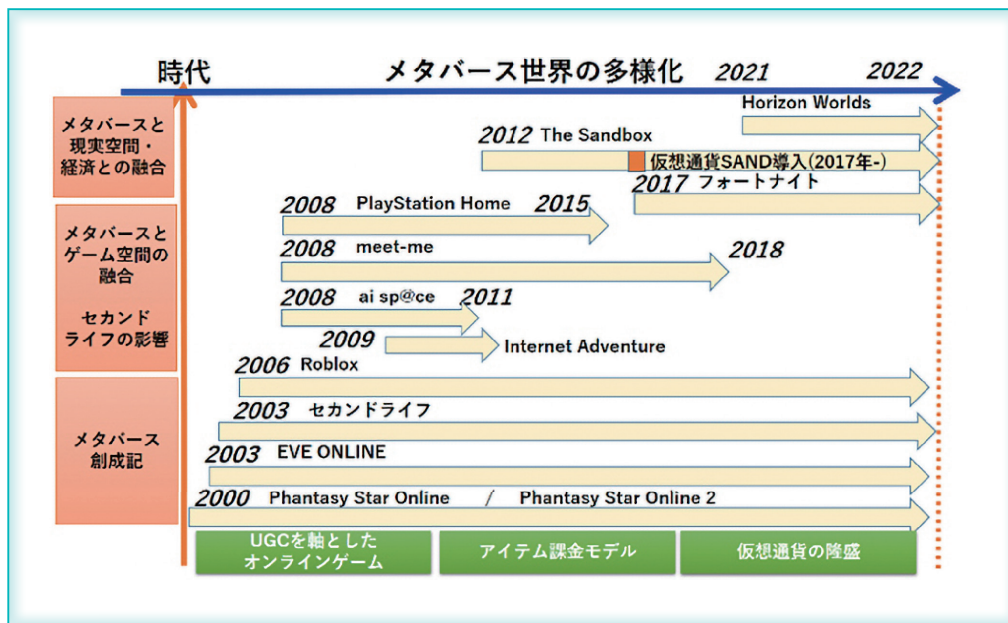


図4 メタバースの歴史

「meet-me」ではトヨタ車をフィーチャーした仮想空間「トヨタメタポリス」が2008年に公開されていた⁽¹¹⁾。第二期で台頭したこれらのメタバースは2018年までに全て閉じられることとなった。

第三期は2017年前後から2023年も継続しているメタバースのブームである。このブームはUGCの浸透に加え、仮想通貨などブロックチェーン技術の普及、更に感染症下における「デジタル空間における社会」への関心の高まりである。「The Sandbox」はモバイル版をリリースし、2017年頃、イーサリアムと連動したゲーム内通貨（SAND）を導入した⁽¹²⁾。ゲーム内の土地（LAND）やアイテムを売買できるシステムを導入し、現実の土地のようにメタバース内の土地が分割され売買されている。個人や企業はこの土地を購入し（大地主）、そこに様々な小さなゲームを設置することが可能である。また「The Sandbox」は製作ツールをユーザーに提供しており、素人でも3Dモデル、アニメーションするキャラクタ、更に簡単なゲームを作れる仕組みを提供している。「The Sandbox」は時流に乗り、数十以上の企業が参入する一大メタバースとなっている。一方、「フォートナイト」は出発点としてはオンラインアクション対戦ゲームであったが、徐々にコミュニティ機能を充実させ、ゲーム以外のソーシャル要素を強化することで、次第にメタバースへと移行してきた。ユーザー数が3億人を超えるメリットを生かして、ゲーム以外の時間でも「フォートナイト」の世界に居続けるようにデザインを変更しつつある。特に2023年3月には「フォートナイト」内でユーザーの製作したゲームを

リリースできる仕組みを発表し、いよいよ本格的なメタバースへの変革を宣言した⁽¹³⁾。ユーザーはUNREAL ENGINE 5を用いて自分のゲームを製作し「フォートナイト」で公開することが可能である。

このようにメタバースはオンラインゲームの横で誕生し、オンラインゲームが巨大化していく横で徐々に変革を繰り返し成長していった。そして、オンラインゲームを吸収する形で、より広い間口を持つオンラインサービスとして社会に浸透しつつある。

5 メタバースにおける生成AI

メタバースは3.、4.で述べたように、UGC、そしてその経済圏を基礎としている。ここに、更に生成AI（Generative AI）が導入されることで、ユーザーに更に飛躍的な創造力を与えることができる。「Roblox」は製作ツールに生成AIを導入することを発表し、そのデモを公開している⁽¹⁴⁾。「Roblox」においては、ユーザーがスクリプトから生成AIを呼び出す環境が準備されており、様々な車やオブジェクトを手軽に生み出すことが可能である。

デジタルゲームにおける生成AIの歴史は1980年まで遡ることができる。例えば「Rogue」（Unix, 1980年）ではダンジョンが自動生成、敵が自動配置される。また「FarCry2」（Ubisoft, 2008年）の「DUNIA ENGINE」は植物を自動生成し森を生成する機能を有している⁽¹⁵⁾。このような自動生

成はフラクタル技術などアルゴリズムを駆使した生成であり、プロシージャル・コンテンツ・ジェネレーション (PCG: Procedural Contents Generation) と呼ばれる。また機械学習を用いた場合には、PCGML (Procedural Contents Generation via Machine Learning)⁽¹⁶⁾、強化学習を用いた場合には PCGRL (Procedural Contents Generation via Reinforcement Learning) と呼ばれる⁽¹⁷⁾。これらも生成 AI の一種として捉えることができる。

生成 AI はメタバースにおける UGC の質と量を増加させると予想される。2022 年「Midjourney」(Midjourney, 2022 年)、「Stable Diffusion」(Stability AI, CompVis LMU, Runway, 2022 年)といった画像生成のツールやライブラリがリリースされ注目されたが、2023 年は会話生成と 3D モデル生成のツールやライブラリがリリースされている⁽¹⁸⁾。3DCG の生成が容易になれば、メタバース内にユーザの作成した 3D モデルがあふれることになり、これまで小規模であったメタバース内の各ユーザのゲーム空間はそれらの 3D モデルによって、ますます拡充する。この生成 AI によるユーザの創造力増大の流れはデジタルゲームの新しいシーンを作っていくと予想される。

6 AI エージェントによる人間の拡張

ある役割を持った自律的な人工知能は「エージェント」と呼ばれる。エージェントが活躍する場に応じて、Web エージェント、実世界エージェント、キャラクタエージェントなどと呼ばれる。メタバース内のエージェントはメタバースエージェントと呼ばれる。

6.1 ミラーワールド

エージェントはメタバース世界を構成する一部であるが、ユーザを拡張する技術でもある。2023 年以降、メタバースとスマートシティの発展は、人間にデジタル仮想空間の生活と物理世界における生活の双方を強いることになると予想される。そして、デジタル仮想空間と物理空間が融合したミラーワールドを生きることになる⁽¹⁹⁾。その場合に人はメタバースエージェント、スマートシティエージェントを持ち、それぞれの世界に向けてエージェントによって自分を拡張する必要がある。

ミラーワールドとは物理世界と仮想世界が常に同期しながら進行する一つのシステムである。物理世界のオブジェクトには仮想世界のオブジェクトが

対応し、また仮想世界のオブジェクトには物理世界のオブジェクトが対応し、その間の同期が取られる。同期やその規模は様々であるが、例えば物理世界の一つのリングは仮想世界に一つのリングと対応し、物理世界のデパートでリングが一つ売れば、仮想世界のマーケットのリングも売却済みとなる。より大規模には、日本の社会と同期するもう一つ仮想世界を構築することが想定される。その背景には、物理世界が疫病や災害で機能しなくなったときにも、仮想世界の社会が機能することで社会活動を継続させるバックアップとしての役割もある。

6.2 メタバース内におけるエージェント AI による拡張

物理的身体はスマートシティの物理的現実の中にあり、自分の分身となるメタバースエージェント (アバタ) としてメタバースにおいて活動する。メタバースで自分が不在の場合でも、人工知能を搭載したメタバースエージェントが自分の代わりに受け答えしてくれる。現在、人はインターネット空間に自ら参加しているが、それぞれのメタバースに対して、それぞれ異なるメタバースエージェントによって参加するモデルが考えられる。エージェントの中身は AI でも、また本人自身であってもよい。またハイブリッドであってもよい。例えば普段は AI で駆動しているが、ある時間にはその所有者本人が操作している、などである。一つのバーチャルビーイングに対して、AI と人の間でスムーズに操作権の移行されることで、人は一つのメタバースに張り付くことなく、メタバースから別のメタバースへスムーズに移動し参加・離脱することができる。より広い見地から見れば、この仕組みによって、AI によって動かされる社会と、人間によって動かされる社会が滑らかに融合する社会デザインがなされる。

このような仮想社会と物理社会、AI による社会と人による社会の融合世界では、人とそのエージェントによる集合体によって、人の存在は拡張される (図 5)。人単体の活動ではなく、人とその人の複数のエージェントによる集合体が、一つのユニットとして認識される。このような人の拡張によって、人と人のコミュニケーションもまた、ダイレクトな「人-人コミュニケーション」を超えて、新しい間接的な「人-エージェント-エージェント-人」コミュニケーションが加えられることになる (図 6)。

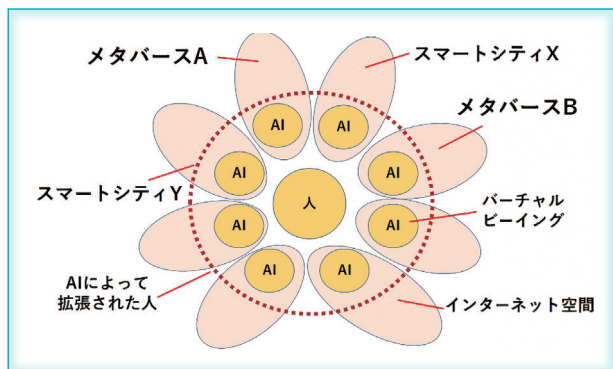


図5 AI エージェントによる人の拡張

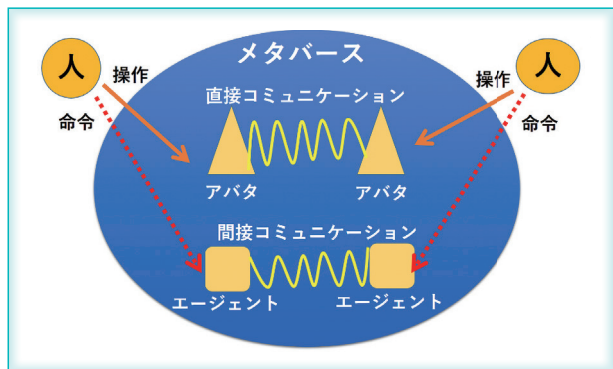


図6 メタバースにおけるコミュニケーションの形

7 AI エージェントが作る社会

メタバースエージェントは、メタバース世界を構成する一員として、様々な場所で特定の役割を果たす。例えば、世界の案内人や、各土地の受付などである。あるいは、同時翻訳をするエージェントや専門的な知識を持つエージェントが、ユーザ同士のミーティングに参加し会話を補助することなども考えられる。

また、メタバースは人と人の関係も変化させる。メタバースでは、人は自分の代理となるキャラクターエージェント（アバタ）を通じてメタバース世界に干渉する。そのようなインタフェースを通じたメタバース空間への参加は、必ずしも現実の人格をメタバースに持ち込む必要はなく、新しい人格としてメタバース空間に参加することを可能にする。そういった人格の変容はオンラインゲームでもSNSでも見られるものである。メタバースにおける人と人との関係も、人と人が操作するアバタ同士のダイレクトな関係から、「人—AI エージェント—AI エージェント—人」という間接的な関係に変化する。また自分のアバタにも人工知能を導入することも今後考えられる。そういった人工知能はユーザの行動を補助したり、ユーザが不在の場合には代理で対応したりする。例えば用件を聴くなどである。

こういった「ユーザのキャラクタの補助を人工知能が行う」アプローチは既にデジタルゲームで行われている。現代のゲームにおいては、ユーザは自らのキャラクタを操作して複雑な3Dマップの中を移動せねばならず、何もかもユーザがコントロールするには、余りに複雑な動作である。そこで、例えば障害物をよける、敵キャラクタを視野に入れるなどは、人工知能のアシストによって自動的に行われている⁽²⁰⁾。自動的にこのような動作を行うことで、ユーザは重要な動作の操作に集中することができる。同様にメタバースにおけるユーザのエージェントにも人工知能を導入することで、ユーザがメタバースに干渉できないときでも、ユーザの方針に従って自動的に行動させることが可能である。つまり、メタバース世界におけるメタバースエージェントは、人工知能によって半自動的に動作する存在であり、ユーザが操作可能な場合にはユーザがメタバースエージェントによって世界へ干渉する存在である。

8 スーパーシャル AI とメタバース

スーパーシャル AI とは、空間そのものに人工知能を内在させる手法である。つまり、一つの空間に対してそれを認識する人工知能を付与し、その空間を認識し、その空間に対して作用を行う人工知能である（図7）。

キャラクタ AI（エージェント AI）はロボットやキャラクタの身体に搭載され、自律化を促すが、スーパーシャル AI は空間に搭載され、空間を自律化させる。この空間 AI を付与された空間をスマートスペースと呼ぶ⁽²⁰⁾。スーパーシャル AI は与えられた担当空間を観測・スキャンし、その空間の空間的情報を蓄積し、またその中にあるロボット、電子デバイスとコミュニケーションを取ることができる。ここで言う空間的情報とは、その空間における物の配置、移動可能な領域、人の位置などである。スーパーシャル AI はロボットやドローンに対して蓄積した空間的情報を与え、命令を行い、またそこから報告を受けることができる。この空間的情報は、もしロボットやドローンがSLAMなどで自ら獲得するとすれば、多くの時間を要するものである。しかしスーパーシャル AI はその空間を常に監視し、その空間に関する膨大な情報を所持し更新している。スーパーシャル AI からロボットやドローンのエージェントに様々な情報を渡すことで、エージェントは瞬時にその空間に対する詳細な空間的情報を取得し、自ら

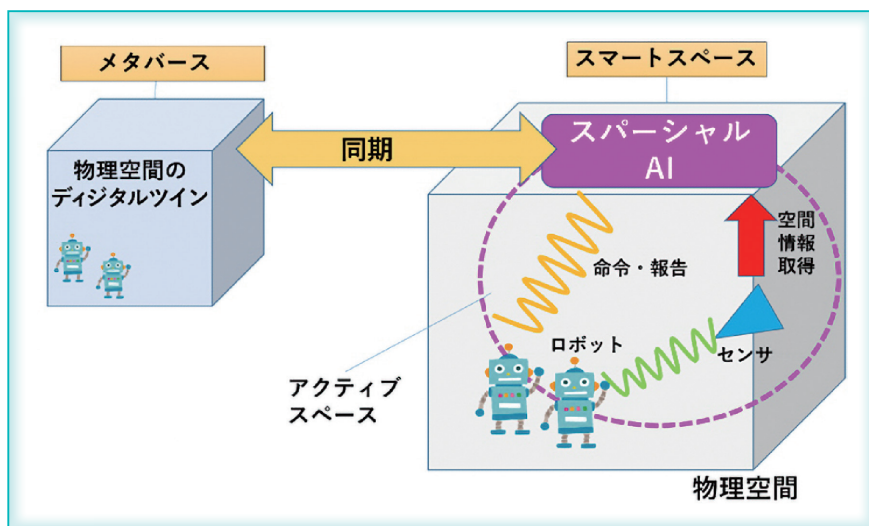


図7 スパーシャル AI とスマートスペース

の空間認識能力以上の空間活用を持つことができる。

例えば、教室のお掃除ロボットであれば、部屋に入ろうとするとスパーシャル AI は「現在、講義中なので教室の前には来ないようにする、後ろの領域だけ掃除して立ち去る」ように指示をする、あるいは、そのような空間データをロボットに与える。また、倉庫の巡回ドローンであれば、その空間に新しい荷物が届いていると、新しいルートを与えて荷物に当たらないように促す、あるいは新しく更新された空間データをドローンに与える。スパーシャル AI はその場のテンポラリーな状況変化（速度制限や通行禁止区域など）を各エージェントに与えることで、その場の状況に応じた行動をエージェントに取らせることができる。

スマートシティはスマートスペースの集合から構成することができる（図8）。スマートシティは都市全域にわたる空間知能であるが、それが大規模な場合には、階層的に組織されたスマートスペースから成る。スマートシティの発展は広場・公園などパブリックスペースから始まり、スタジアム、高層ビル、幹線道路、一般道路、マンション、個人住宅など、パブリック空間とプライベート空間を徐々につなぐ形で、ボトムアップにつながっていくことで構成されると予想される。つまり、スマートシティは一朝にしてならず、分散して立ち上がっていくスマートスペースの集合として徐々に拡大していく。同時に、それらを総括する人工知能（メタ AI と呼ばれる）が全体を結び付け一つのシステムに統一化する。

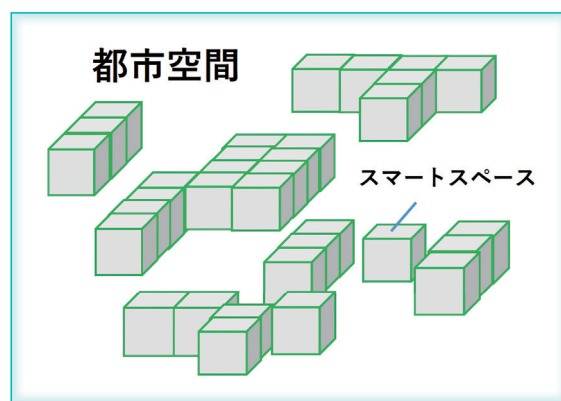


図8 スマートスペースの集合によるスマートシティ

9 メタバースとスマートシティのスパーシャル AI による同期

このようなスパーシャル AI はスマートシティの基礎となる。スパーシャル AI の持つ空間情報をリアルタイムにメタバースと同期することによって、スマートシティとメタバースをリアルタイムに接続し同期することが可能となる⁽²¹⁾（図9）。このような「動的な同期」（dynamic synchronization）は、メタバースにスマートシティの状態をリアルタイムに反映させ、メタバースにおけるシミュレーション機能を通して物理世界を予測・認識することを可能にする。メタバースはインターネット上にあるため、インターネットを通して物理世界を把握することが可能となる。逆にメタバースで変更した空間の情報を基に、スマートスペースが物理空間を変更することで、メタバースから物理空間を変更することが可能となる。

例えば、スマートシティにおけるリンゴのような商品に対して、それと結ばれたメタバース上に

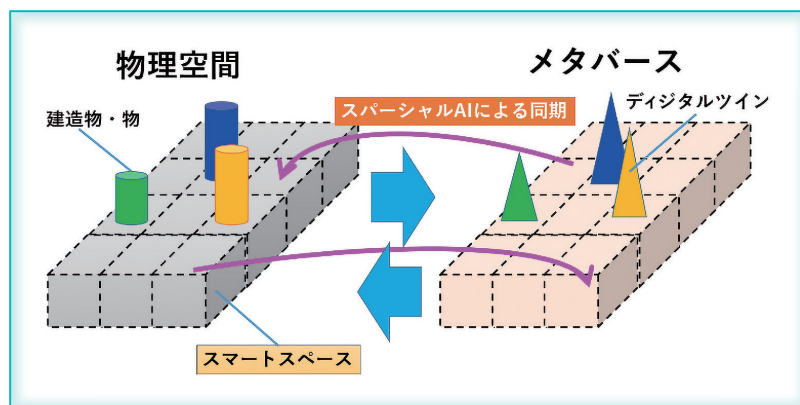


図9 スペシャル AI がつなぐスマートシティとメタバース

「デジタルリング」が存在する、実際の車の動きがメタバースでも同期しているなどである。この物理世界の要素とデジタルの要素のペアはデジタルツインと呼ばれる。個々の商品、建築、空間、都市、そして人に至るまで、スマートシティとメタバースの間でデジタルツインが構成される。物理世界の変化に対して、それと同期したメタバース世界のシミュレーションを並行して行うことで、社会はスマートシティとメタバースという二重の構造を持ち、社会活動をより円滑に進める土台を得ることができる。例えば、人が人とある物理的場所で会って交渉する、ということは、人のアバタとアバタがデジタル空間で会って交渉することへ、いつでも変更することができる。それによって、災害や疫病など理由で物理世界において活動できなくなった場合にも、いつでもメタバースへ社会活動を切り替えることが可能になる。つまり社会活動維持のためのサブモードとしてデジタルツインメタバースが存在する。また、物理空間と仮想空間の二重性は、都市の情報を一元的に仮想空間に集約させ、都市・人・物の情報を可視化し、それらを追跡可能とする。更に都市全体を把握する人工知能が都市の未来を予測することを可能とする。また仮想空間における状態を物理空間に同期させることで、仮想空間から物理空間へ効力を持たせることが可能である。例えば仮想空間である教室の机の配置を指定したとする。それと合致するように物理空間の机の配置を人間やロボットが整備する。このように物理空間と仮想空間の二重構造は、それらの間の相互作用によって、お互いに新しい機能を提供する可能性をもたらす。

10 集合知性としてのメタバース

スマートシティに対応するメタバースにとって、都市の情報は様々な情報網によって与えられる。また逆に都市のセンサ・情報網による情報の集積場としてメタバースを活用することができる(図10)。なぜなら、都市の形状を持つメタバースが都市情報の可視化とそれを用いたシミュレーションの土台として優れているからである。メタバースに集約された情報によって、様々な行政機能・サービスを展開することが可能となる⁽²²⁾。

10.1 物理空間に対する拠点としてのメタバース

物理空間を反映したデジタルツインメタバースはサービスの空間としてだけでなく、ビジネスや行政のためにも用いることが可能である。例えば、市職員のためだけの市を変革していくためのメタバース、災害対策本部としてのメタバースなどである。つまり、メタバースは物理空間に対する変更の拠点として、つまりメタバースそのものを現実に対する人工知能として用いることができる。物理世界からの情報がメタバースに収集されると同時に、そのメタバースから物理世界に効力を持つ、あるいは命令系統を持たせることで、外側から見ると、メタバースそのものが一つの知能としてみなせることができる(図10)。

メタバースは都市情報を集約し可視化するメディアとして優れているのみならず、都市の施策に対するシミュレーションを可能とする。例えば災害シミュレーション、物理シミュレーション、人流シミュレーションなどである。またメタバースは遠隔で人が集まり相談する場としても優れている。災害時に物理空間の特定の場所に集合できない場合でも、メタバースで集合し、災害対策の意思決定の中核として機能させることができる。そこで、メタ

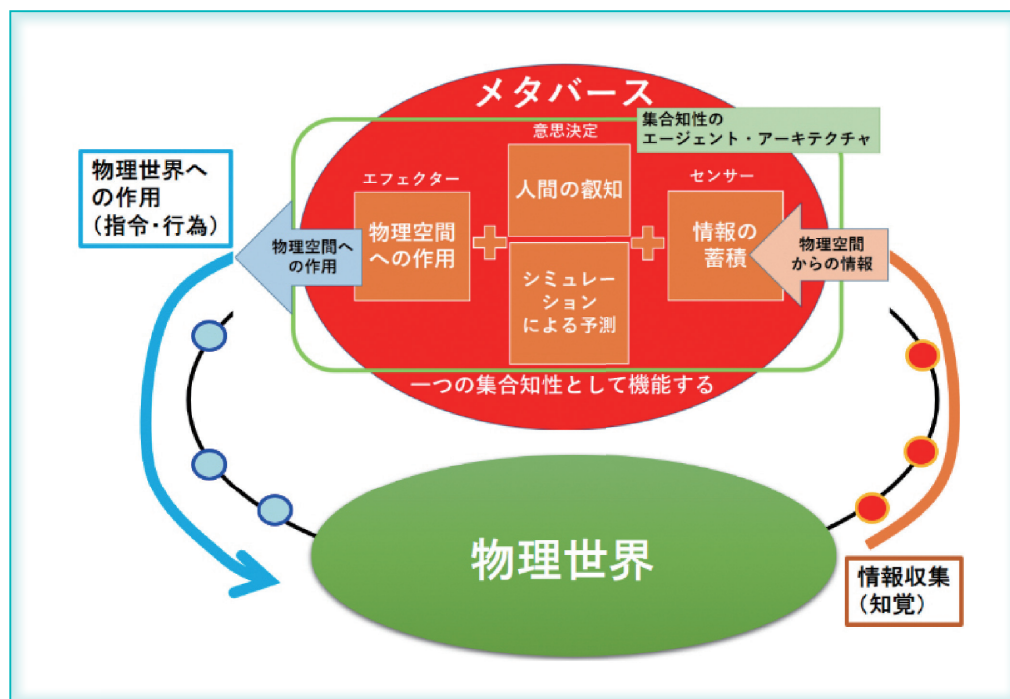


図 10 集合知性としてのメタバース

バースに都市の意思決定を行う人間を集合させ、人工知能にアシストさせ、またシミュレーション能力を用いて対策の効果を予測することで、このメタバースを、物理都市を監視し意思決定を行う人工知能システムとして用いることが可能となる。そのような意思決定システムの中身は、複数の人間であってもよいし、また人工知能と複数の人間の組合せでもよい。

このように物理空間を反映したデジタルツインメタバースは人間の英知を結集し、実験し、意思決定をする場として活用することができる。例えば、防災の本部は都庁に置いてもいいが、専門家を一同に集めた防災会議を東京都のメタバース上に構築すれば、場所を超えて英知を集合することができる。つまりメタバースは集合知 (collective intelligence) を実現する場でもあり、現実空間を制御する人工知能として用いることができる。これは行政の視点からは特に重要なことである。

10.2 集合知性としてのメタバースは何を考えるか？

スマートシティの集合知性としてのメタバースが考えるべきことは、都市全体の意思決定と、人の生活の質の向上である。前者は都市そのものの防衛、維持、運営である。現在の都市は人間とオートセキュリティシステムが運営しているが、いずれ人工知能と人間の共同作業に発展していくと予想される。後者はより具体的には人命、安全、生活の質な

どクオリティ・オブ・ライフ (QoL) である。

集合知性としてのメタバースは、都市を一つの情報空間として機能させることになる。インターネットで検索するように、都市の中で自らが求める商品やサービスなどをスマートシティの中で発見する。逆に店舗側からすれば、顧客を探すために都市全域に案内を出したい。それは現在では物理空間のデジタルサイネージ上の広告ポスターや動画像であるが、やがてそれはメタバース上のエージェント (キャラクタ) になるだろう。ある見知らぬ都市に行って物や場所を探したい。そのために、その都市に対応するメタバース内で、その都市における商品検索や場所の検索をできるようにしておく。ユーザが検索して結果がでたら、メタバース内でエージェント (キャラクタ) がその商品の場所まで案内してくれる。メタバースと現実の座標を拡張現実として同期させることで、メタバース内のエージェントがメタバース内のその場所まで案内してくれることは、実際の物理空間でも案内してくれることになる。また各店舗は自分たちの場所へ案内してくれるエージェントを開発してメタバースに放っておくことで、エージェントに各店舗まで案内させることによる集客を促す。そのように、様々な経済的・社会的意図がメタバースに反映されることで、メタバースは充実していく。

11 メタバースと人工知能が示す未来像

メタバースは可能性に満ちているが、その可能性を引き出すには人工知能の力が必要である。本論文では、2. では中央集権型と分散型、二つのメタバースの可能性について述べた。中央集権型は完全な管理体制による安定したシステムの継続が可能であるが、分散型はユーザ側により自由度の高い柔軟なシステムである。サービスとしてメタバースは前者の中央集権型の管理が適切であるが、ユーザが主体となって広がっていくメタバースは後者の分散型が主流となると予想される。このような分散型のメタバースの方向は、ユーザがインターネット上の一つのノードとなり、ノードとノードがボトムアップに結合していくことで、全体のシステムが構築されていくプロセスである。そして、ユーザ側に力を与える生成 AI をはじめとする人工知能の力が各ノードにおける生成物を充実させ、ノード間の交換を促していく。

3. , 4. ではデジタルゲームと関係してメタバースが発展してきた歴史と現状について述べた。オンラインゲームはメタバースの一つの母体であり、オンラインゲームの中にはメタバースの萌芽となる要素が含まれている。特に UGC とその生産アイテムの交換はメタバースがオンラインゲームから独立していく契機を作った。更に、それらと仮想通貨・ブロックチェーンが合流することで、ユーザによる独自の経済圏が立ち上がり、それがオンラインゲームからメタバースの成立を促進した。

5. は生成 AI が UGC を更に加速させ、メタバースをより加速していく点を示唆した。6. , 7. ではメタバースでは人間がエージェントをはじめとする様々な人工知能技術によって拡張した存在とな

り、拡張した人間同士に新しいコミュニケーションチャンネルが開かれることを述べた。

8. ではスパーシャル AI とメタバースについて述べた。メタバースは物理空間から完全に引き離された純粋な仮想空間としても価値を持つが、スマートシティと結び付いた仮想空間としてのメタバースも大きな可能性を有している。特にスパーシャル AI によって物理空間と同期したデジタルツインメタバースは、スマートシティとメタバースによるミラーワールドを形成する。

9. ではこのミラーワールドを構築するメタバースとスマートシティのスパーシャル AI による同期について述べた。スパーシャル AI は管理する空間を認識し、その空間に対して命令を行うことが可能である。スパーシャル AI の管理する空間はスマートスペースと呼ばれ、スマートスペースの集合はスマートシティを構築する土台となる。

10. では集合知性としてのメタバースについて述べた。メタバースに物理空間の情報を集約し、またメタバースから物理空間のロボットやドローンに命令する。メタバースは場所を超えて人の知性を集合させる場として機能させることができる。

このようにメタバースは以下の三つの要素を所持しており、その全てに人工知能が関わっている。

- ①スパーシャル AI によってスマートシティとメタバースを同期させ、社会を物理と仮想の二重構造化し、新しい社会活動の場を構築する。
- ②エージェント AI などを通じてメタバース内で人のあり方を拡張し、新しく人と人を結び合わせる。
- ③メタバースそのものが集合知性となることで、現実、物理空間に対する変革の拠点となる

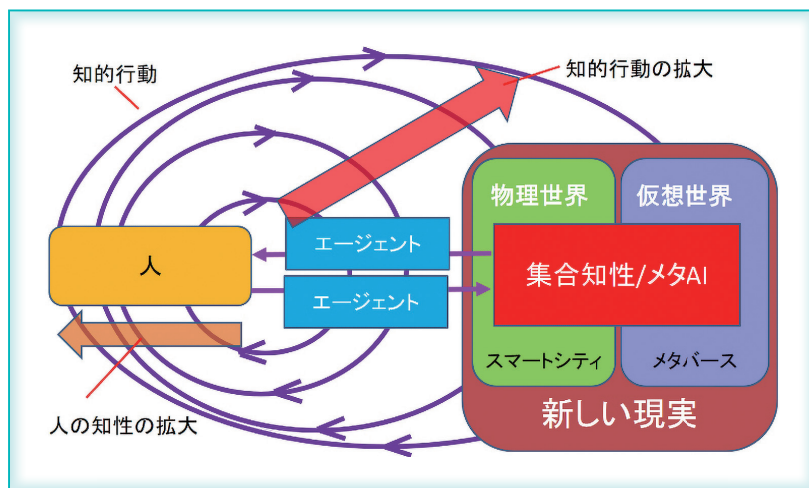


図 11 メタバースとスマートシティによる人の世界の拡張

メタバース、そしてそれとつながったスマートシティは新しい現実として人の意識を変容していく(図11)。現在でも、人の活動空間は既に何割かはインターネット空間であるが、実際にメタバースという仮想空間が与えられることで、様々な空間的情報がそこに集約されていく。物理的空間とデジタルツインを成すメタバースは、より深く物理空間の状態を知る手段としても有用である。逆にメタバースは物理空間に新しい価値を与える。このようにメタバースとスマートシティによる新しい現実の中で、人は新しい活動の自由度を獲得すると予想される。

■ 文献 (アクセス日はいずれも 2023 年 5 月 27 日)

- (1) 三宅陽一郎, “「メタバース」の世界,” JOSYOR (IPSJ 情報処理カタログ), 2022. <https://ipsj-catalog.jp/story/metaverse.html>
- (2) 三宅陽一郎, “デジタルゲームにおけるメタ AI-キャラクター AI- スペシャル AI 動的連携モデル,” 人工知能学会全国大会論文集, 第 34 回全国大会, June 2020.
- (3) 三宅陽一郎, “デジタルゲームにおける人工知能技術の応用の現在,” 人工知能, vol. 30, no. 1, pp. 45-64, Jan. 2015.
- (4) 三宅陽一郎, “大規模デジタルゲームにおける人工知能の一般的体系と実装,” 人工知能学会論文誌, vol. 35, no. 2, pp. B-J64_1-16, March 2020.
- (5) 大原絵理香, “ついに「あつまれ どうぶつの森」で会社説明会を行う企業が登場,” ねとらぼ, 2020. <https://nlab.itmedia.co.jp/nl/articles/2006/24/news123.html>
- (6) G. Jimenez, “HashCraft: Ubisoft’s blockchain experiment is the future of gaming,” Decrypt, Feb. 2019. <https://decrypt.co/4915/hashcraft-ubisoft-blockchain-future-of-gaming>
- (7) 三宅陽一郎, “「マインクラフト」から「ハッシュクラフト」へ ゲーム業界の今,” 日経クロストrend, April 2020. <https://xtrend.nikkei.com/atcl/contents/18/00253/00007/>
- (8) 菊谷ルイス, “adidas Originals 初の NFT コレクション, 26 億円 売り 上げ,” coinpost, Dec. 2021. <https://coinpost.jp/?p=302485>
- (9) T. Cheshire and A. Babic, “マインクラフトをつくった男: ゲーム業界を根幹からゆるがしたインディーマーメーカー,” 2013. <https://wired.jp/2013/01/06/minecraft-vol6/>
- (10) Yusuke, “世界中の Z 世代を熱狂させる「Roblox」とは何なのか。メタバース界に台頭する “ゲーム版 YouTube,” 4gamer, 2021. <https://www.4gamer.net/games/612/G061219/20211224165>
- (11) aueki, “「meet-me」システムを使ってトヨタ車をフィーチャした仮想空間「トヨタメタポリス」本日より正式公開,” 4gamers, 2008. <https://www.4gamer.net/games/044/G004419/20081001050>
- (12) L. Kamada, “「バーチャル空間のデジタル不動産」人気ゲーム The Sandbox COO セバスチャン・ボルジェ氏 (全インタビュー記事),” BTCBOX, 2020. <https://blog.btcbox.jp/archives/13452>
- (13) “「フォートナイト」向けの “ゲーム開発ツール” Unreal Editor For Fortnite」3 月 23 日 配信 へ. HashCraft (ハッシュクラフト) とは? UBISOFT 開発ブロックチェーンゲームの最新情報をわかりやすく解説 !!,” automaton, 2023. <https://automaton-media.com/articles/newsjp/20230317-241099/>
- (14) D. Sturman, “Generative AI on roblox: Our vision for the future of creation,” Roblox, 2023. <https://blog.roblox.com/2023/02/generative-ai-roblox-vision-future-creation/>
- (15) 西川 善司, “「CRY ENGINE」独自拡張「DUNIA ENGINE」, 新生「UNREAL ENGINE3」,” GameWatch, 2008. <https://game.watch.impress.co.jp/docs/20080229/3df.htm>
- (16) A. Summerville, S. Snodgrass, M. Guzdial, C. Holmgard, A. K. Hoover, A. Isaksen, A. Nealen, and J. Togelius, “Procedural content generation via machine learning (PCGML),” May 2018. <https://arxiv.org/abs/1702.00539>
- (17) A. Khalifa, P. Bontrager, S. Earle, and J. Togelius, “PCGRL: procedural content generation via reinforcement learning,” Aug. 2020. <https://arxiv.org/abs/2001.09212>
- (18) 吉本幸記, “Stable Diffusion の進化, デジタルヒューマンの動画・3D オブジェクト生成,” CG WORLD, May 2023. <https://cgworld.jp/article/202305-gtc.html>
- (19) 三宅陽一郎, “デジタルゲーム AI 技術に応用したスマートシティの設計,” 人工知能, vol. 37, No.4, pp. 436-445, July 2022.
- (20) P. van Grinsven, “Player traversal mechanics in the vast world of horizon zero dawn,” GDC2017, March 2017. <https://www.guerrilla-games.com/read/player-traversal-mechanics-in-the-vast-world-of-horizon-zero-dawn>
- (21) 三宅陽一郎, “メタバースの成立と未来ー新しい時間と空間の獲得へ向けてー,” 情報処理, vol. 63, no. 7, pp. e3-e36, June 2022.
- (22) 三宅陽一郎, “メタバースによる人の意識の変容,” 現代思想 2022 年 9 月号, Aug. 2022.

(2023 年 5 月 29 日受付, 8 月 28 日再受付)

三宅陽一郎

博士 (工学, 東大). 東大生産技術研究所特任教授, 立教大学院人工知能科学研究科特任教授, 九大客員教授, 東大先端科学技術研究センター客員上級研究員. 人工知能学会編集委員会副編集委員長・シニア編集委員, 日本デジタルゲーム学会理事, 国際ゲーム開発者協会日本ゲーム AI 専門部会代表. 著書に「ゲーム AI 技術入門」(技術評論社, 2019), 「人工知能が「生命」になるとき」(PLANETS, 2020), 「人工知能のための哲学塾」(BNN 新社) シリーズ.



メタバースとWeb3, NFT(非代替性トークン), DAO(分散型自律組織)のリアリティ

The Metaverse and the Reality of Web3, NFTs (Non-Fungible Tokens) and DAOs (Decentralized Autonomous Organizations)

齊藤賢爾 Kenji Saito[†] 内田晃秀 Akihide Uchida^{††}

Summary

2020年代前半の現在、一部の意見として、暗号資産やNFT(Non-Fungible Token, 非代替性トークン)に代表されるようなブロックチェーンの応用(いわゆる「Web3」)とメタバースに必然的な関連性があるかのような主張が見られる。そうした主張の難点の一つは、暗号資産やNFTが関わることで仮想空間への参加が資産形成のためのゲームに変わってしまい、メタバースが持つ本来の可能性が損なわれ得ることである。その一方で、なぜブロックチェーンとメタバースを結び付ける見解が存在するかは興味深くもある。この解説論文では、Web3の概念が登場するまでの歴史的経緯を検討し、Web3に特徴的な概念かつメタバースと結び付けられがちなものとして、特にNFTとDAO(Decentralized Autonomous Organization, 分散型自律組織)がそれぞれ何であるかを整理しつつ、それらのリアルな状況を明らかにする。この解説が、メタバースとブロックチェーンの応用に関心を持つ両方のコミュニティにとって有益な情報を提供できれば幸いである。

Key Words

ブロックチェーン, Web3, NFT, DAO, メタバース

1 はじめに

1.1 改めてメタバースとは何であり、なぜブロックチェーン技術と関連付けられやすいのか

まず、メタバースとは何かという基本的な定義を再確認し、その上で話を進めたい。この解説の筆頭著者は、文献(1)にてメタバースを「あえて仮想的な空間にマッピングされた情報空間(インフォスフィア)」と定義した。本稿でもこの定義を出発点としつつ、かつ、ユーザがそのマッピングを自発的に組み換えることが可能、すなわち、ユーザ自身が仮想空間をプロデュースできる点に焦点を当てたい。世の中に散見される、メタバースでは必然的にブロックチェーン技術が使われるという主張は、ユーザが創造した空間やアイテムのマネタイズや交換を前提に考えているのだから、ユーザが創造する行為を前提とするこの定義は妥当と言えるのではないだろうか。

さて、Webで得られる情報の中には、メタバースについて「ブロックチェーンを基盤にしたものもある」としつつ、例えば文献(2)や文献(3)のように、結局はブロックチェーンを前提にした暗号

資産やNFT(非代替性トークン)への投資の話に終始しているものが見られる。(トークンとは代用貨幣で、ゲームセンターのメダルのようなもの。)これらは、メタバース内のアイテムや区画をトークン化し、トークンを所有することを通してそれらのデジタル資産をプレーヤが所有、つまり排他的に支配できるようにするという基本的な考え方が共通している。

私たちは現実の社会の中でアイテムや土地を所有したりしているので、空間に配備された何かを人間が所有できるという、こうした考え方にはなじみがあるし、一見、それは正しい方向性のように見えるかも知れない。しかし、技術の実際の特性に照らして、そうした考え方に妥当性があるのかを見ていくのが本解説の目的であり、上記のような言説と本解説の間には、実のところかなり見解の相違がある。

1.2 メタバース系ゲームとNFTの禁止

ユーザ自身が仮想空間をプロデュースできるような環境は、ゲームの世界で先行して人気を集めている。そのようなゲームを、ここでは仮に「メタバース系ゲーム」と呼ぶことにする。

そうしたゲームの代表例として、プレーヤが立方体のブロックを自由に配置・破壊し、創造的な建築物やアート作品を作ることができるサンドボックス型のビデオゲームとして人気が高いMinecraft⁽⁴⁾

[†] 早稲田大学大学院経営管理研究科, 東京都 Graduate School of Business and Finance, Waseda University, Tokyo, 169-8050 Japan

^{††} 筑波銀行, つくば市 Tsukuba Bank, Ltd., Tsukuba-shi, 305-0032 Japan

は、NFTを禁止している⁽⁵⁾。プレーヤ自身が制作できる仮想空間をオンラインで訪れ、アバタを通してほかのプレーヤとの交流を楽しむことができる、仮想現実（VR）対応のソーシャルプラットフォームとして人気が高いVRChat⁽⁶⁾もまた、NFTを禁止している^{*1(7)}。

これらの人気ゲームの開発者らが、ゲームの中にNFTを組み込もうとしないのはなぜだろうか。Minecraftでは、その理由はプレーヤにゲーム体験にフォーカスしてもらうためであり、ゲーム内のアイテムがNFTにひも付けられると、その市場価格の上下にプレーヤの関心がそらされてしまうし、何よりも、NFTが暗示する希少性と排除の考え方が、Minecraftが大切にしている包摂の考え方となじまないからだとしている⁽⁵⁾。

では、これらのゲームにおいて、アイテムや場所の希少性はどのように扱われるのだろうか。VRChatを例にして考えてみよう。あるVRワールドの中に、そのワールドでは一つしかないアイテムがあり、大勢のプレーヤがそれで遊びたがっているとする。そのような場合、VRChatでそれらのプレーヤがすべきなのは、それぞれがそのワールドの別のインスタンス（実体）を作り（そのための機能があり日常的に使われている）、全員がそのアイテムで自由に遊ぶことである。

このように、希少性と排除の考え方は、開発会社のポリシー以前に、デジタル材の本質的な性質により無効化されているとも言えるのである。

1.3 メタバース系ゲームのユーザ数を比較する

しかし、MinecraftやVRChatのそうした考え方は、ユーザに受け入れられているのだろうか。

そのことを確認するために、図1ではmmostats.com^{*2(8)}が提供するデータに基づき、Minecraft、Roblox⁽⁹⁾、VRChat、The Sandbox⁽¹⁰⁾の四つのメタバース系ゲームの2023年現在の1日のユーザ数を比較した。

Robloxは、ユーザが独自のゲームや体験を作成・共有できるオンラインプラットフォームである。The Sandboxは同様なサービスだが、ブロックチェーン技術を利用し、プレーヤが独自のアセットやゲームを作成し、土地を購入・編集し、取引できる。どちらもプレーヤによるマネタイズが推奨され、暗号資産やNFTが認められたり、ゲーム自体に統合されたりしている。

図1では、NFTを禁止しているMinecraft^{*3}が圧倒的にユーザ数が多いことが分かるが、公平な比

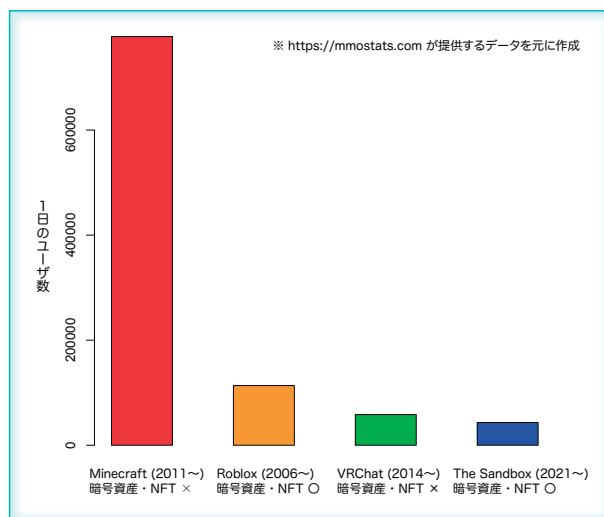


図1 (参考) 主要なメタバース系ゲームの1日のユーザ数 (2023年4月29日現在)

https://mmostats.com が提供するデータを基に作成

較なのか疑問を持つ読者もいるだろう。

まず、The Sandboxは登場してからまだ日が浅い。同様にブロックチェーンを基盤とするZEPETO (2018~)⁽¹²⁾は、mmostats.comでの記載がなく同じ条件で比較できないため図1には載せていないが、2022年のプレスリリース⁽¹³⁾で月間アクティブユーザ数が2,000万人であることを明らかにしている。これはThe Sandboxが公表⁽¹⁴⁾した2022年の月間アクティブユーザ数の100倍程度に当たるが、ActivePlayer.ioが推定するRobloxやMinecraftのそれらと比較すれば1/10程度である。

また、仮想的な土地取引ができるプラットフォームとして知名度の高いDecentraland (2020~)⁽¹⁵⁾は、自ら公開している月間アクティブユーザ数⁽¹⁶⁾でThe Sandboxの更に1/10程度の規模であるため、比較から除外した^{*4}。

*1 ただし、NFTとひも付けられた3Dモデル等であっても、VRChatの利用規約の範囲内で仮想現実の中で使用することは認められている。

*2 MMOはMassively Multiplayer Onlineの略であり、statsは統計を意味する。このデータ提供者は独自のアルゴリズムでユーザ数を推定しており、同アルゴリズムは公開されていないので、この結果は参考程度だと考えて頂きたい。

*3 ただし、例えばActivePlayer.io⁽¹¹⁾のようなほかのデータ提供者はRobloxの月間アクティブユーザ数をMinecraftのそれよりも多いと推定している。しかし、その場合でも差は1.2倍程度である。一方、図1に用いたデータでは、Minecraftの1日のユーザ数はRobloxのそれよりも7倍近く多い。mmostats.comはソーシャルメディアへの投稿数等、総合的な観測結果を用いてユーザ数を推定していると見られる。

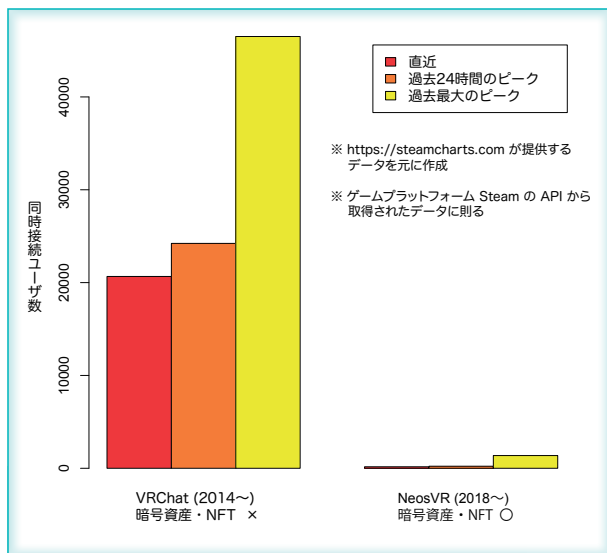


図2 (参考) VRChatとNeosVRの同時接続ユーザー数
(2023年4月29日0:00現在)

では、Minecraft 同様に NFT を禁止している VRChat のユーザー数が、辛うじて The Sandbox よりも多い程度なのはどうか。そもそも、VRChat は図1の中では唯一 VR を主として扱っているの、(必ずしもなくても遊べるが) ヘッドセットを要するなど参加のハードルが異なっている。

そこで、VRChat と同様にヘッドセットをかぶって遊べるメタバース系ゲームとして、図2では NeosVR⁽¹⁸⁾ との比較を行った*⁵。NeosVR は 2021 年の時点で NFT を許可していない⁽¹⁹⁾ が、それは環境と持続性を考慮 (NFT 作成・移転時の電力消費*⁶ を憂慮) したものであり、仮想空間内のアイテムをトークン化するアイデア自体は良しとしているし、暗号資産とも統合されている。

実態的な差はこのグラフほど圧倒的ではないとしても、文化人類学者らによる調査⁽²¹⁾によれば、ソーシャル VR プラットホームとしては VRChat が世界1位、NeosVR が世界2位の人気度であるので、この比較を行う妥当性は認められるだろう。

ユーザー数だけがゲームの盛り上がりや産業的な貢献を測る尺度ではないが、少なくともこれらの事例から、メタバースの成功に暗号資産や NFT が必ずしも不可欠ではないことが示唆される。

このことを踏まえた上で、本解説では Web3 と称されるブロックチェーンの応用について、そのリアリティを見ていきたい。

2 Web3とブロックチェーン

2.1 Web3に至る歴史的経緯

図3に、World Wide Web の誕生⁽²²⁾ から Web3 の概念の登場と変化に至るまでの歴史を示した。

Web3 は時に Web 3.0 とも表記されるが、Web 3.0 を標ぼうする (あるいはした)ムーブメントには3種類ある^{(23), (24)} ことに注意したい。

1989年に誕生した World Wide Web (いわゆる Web 1.0) は、研究者が論文等の文書を容易に出版・取得できるようにするという目的を出発点としており、当初から参加する全員がデータの生産者であることを前提としていた。インターネットの商用化を経て、専らデータの消費者であるユーザが増えたが、Web 2.0⁽²⁵⁾の時代を迎え、ブログやソーシャルメディア、あるいは単に Web 上で情報を検索する行為 (ユーザが検索ウィンドウに打ち込む検索文字列は検索サービスにより集約・統計処理され、データとして利用されている)を通して、Webに参加する誰もが容易にデータの生産者となるに至った。

しかし、Web 2.0ではデータはサービスにより保有・管理され、プラットフォーム間で分断され、データを生産した本人であっても必ずしも自由には使えない状況にある。こうした Web 1.0 (ユーザがデータを管理するが出版は容易でない) と Web 2.0 (ユーザはデータを管理できないが出版が容易) の対立的状況を、言わば「止揚」し統合するものとして、Web 1.0の開発者である Tim Berners-Lee が遅くとも 2006 年に Web 3.0 に言及⁽²⁶⁾し、自身が推進してきた Semantic Web⁽²⁷⁾を発展させ、自動処理と連結によるデータの利活用を狙う Linked Data⁽²⁸⁾に基づく Web 3.0 を提唱し、現在はその延長で Solid (Social linked data)⁽²⁹⁾ と呼ばれるプロジェクトを推進している。

*4 NFTを用いるものとして同様に知名度の高いAxie Infinity (2018~)⁽¹⁷⁾は、メタバース系というよりは育成ゲームであるため比較から除外しているが、参考までに、ActivePlayer.ioが推定する月間アクティブユーザー数でThe Sandboxの2倍程度である。

*5 図2はゲームプラットフォームSteam上の統計データを用いており、SteamはVRChat及びNeosVRをプレイするための唯一のプラットフォームではないので、このグラフはユーザー数全体を表していない。やはり参考程度と考えて頂きたい。

*6 2023年現在、NFTの基盤として使われる主なブロックチェーンは、NeosVRが利用しているものも含めて電力を過剰に消費しない方式⁽²⁰⁾に移行しているため、この憂慮はもはや当たらないのではないだろうか。

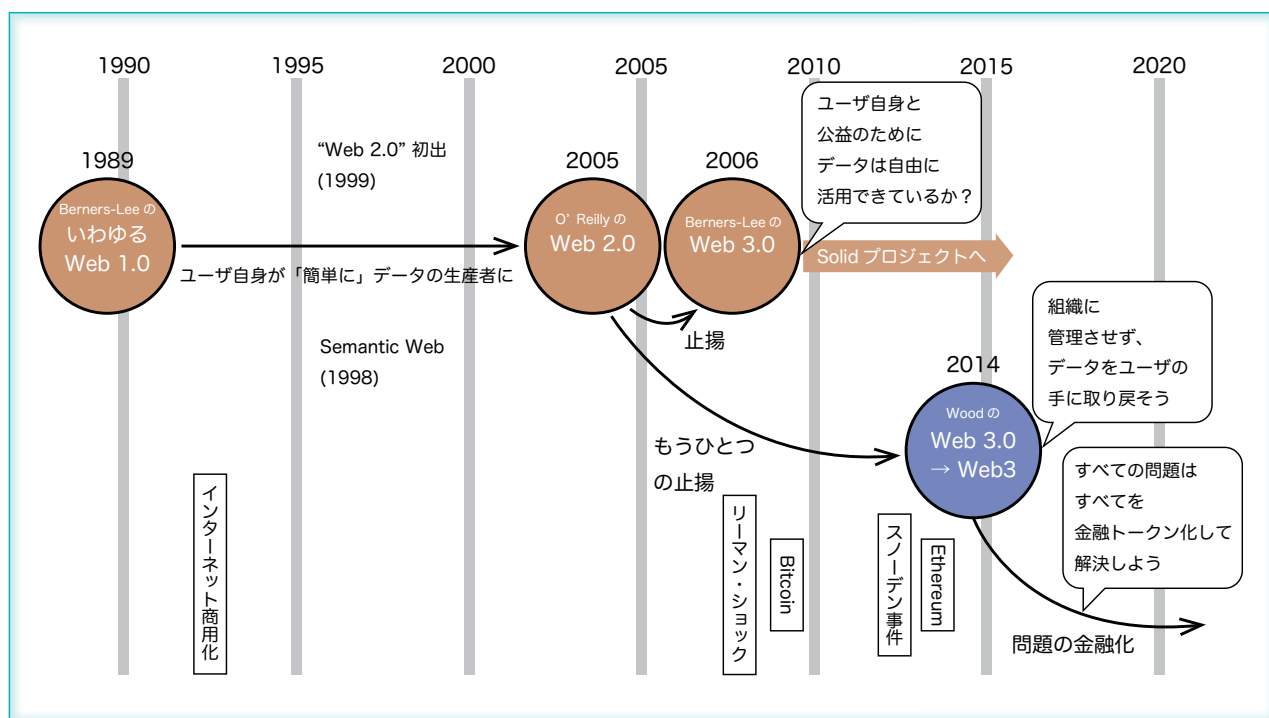


図3 Webの歴史

同様に Web 2.0 サービスによるデータの保有・管理を問題視した、Ethereum ブロックチェーン⁽³⁰⁾の共同創始者であった Gavin Wood は、スノーデン事件⁽³¹⁾を経てプライバシーを重視する考えを持ち、彼の Web 3.0 のアイデアを 2014 年になってブログ記事⁽³²⁾で公開した。その中で Wood は、必要な技術的要素を①検閲できない台帳、②仮名(かめい)によるメッセージング、③コンセンサス・エンジン、④それらの全てを統合するブラウザとユーザインタフェース、だとしている。次節で解説するように「ずれ」はあるのだが、このうち①～③はおおむね Ethereum ブロックチェーンをイメージしていると考えられる。すなわち、Ethereum を Web から使えるようにしたもの(実際、Ethereum コミュニティにより保守されている、Ethereum と接続するための Python 言語用ライブラリ⁽³³⁾は“web3.py”と呼ばれる)が、Wood の Web 3.0 の少なくとも初期のイメージだと考えられ、それが現在、Web3 と呼称されているものの原型となったと言える。

その後 2021 年、ベンチャーキャピタリスト Chris Dixon は Twitter (当時)での連続ツイート⁽³⁴⁾にて Web3 の重要性を訴えたが、そこでの焦点はトークンにあった。投資家の視点からは当然の見方であったのかもしれないが、以降 Web3 は、メタバースを含む「私たちがオンラインで行うほぼ全てのことの内部に、トークンという形で金融資産を組み込

表1 ブロックチェーンが満たすべき四つの性質

性質	意味
自己主権性	ユーザ自身が意思決定し実行できる(e.g. アカウントを勝手に作れる)
耐検閲性	他者の意思で記録やその確認を妨げられない
耐障害性	故障によっても記録やその確認を妨げられない
耐改ざん性	過去の記録を抹消・改変・捏造できない

む」⁽³⁵⁾運動とも捉えられるようになる。

しかし、既に 1.2 や 1.3 で見たように、トークンの導入は問題の解決になるどころか、本来の問題から人々の目を遠ざけることにもなりかねない。

この反省から、最近では Ethereum の発案者である Vitalik Buterin らが SBT (SoulBound Token)⁽³⁶⁾の概念を打ち出している。これは証明書としてのトークンを意味し、興味深いため、本解説論文の最後で立ち返ることにしたい。

2.2 ブロックチェーン

2.2.1 ブロックチェーンの概要とその特徴

Web3 の技術的な基盤となるブロックチェーンは、「自己主権性」「耐検閲性」「耐障害性」「耐改ざん性」の四つの性質(表1)を満たす公開台帳システムである。

ブロックチェーンは元々 Bitcoin⁽³⁷⁾のために発明されたが、自分が持つコインを自分だけが自由に

誰かに送るのを誰にも止めさせない（一方、銀行を用いる送金では、送金が止められたり口座が凍結されたりする恐れがある）必要があり、正当な送金の記録がいかなる方法によっても否定されないことを実現したため、これらの性質を要した。（もちろん技術であるので、動作条件の下で、という注釈が付く。その動作条件は、組込み暗号資産の市場価格が十分に高いことである。）

Bitcoin では基本的にコインの量と宛先を台帳に書き込むが、後発の Ethereum ではプログラムコードとそれが扱うデータを台帳に書き込める。Ethereum ではそれを「スマートコントラクト」と呼ぶ。（以降では単に「コントラクト」と呼ぶこともある。）

2.2.2 P2P システムと状態マシンの複製

図4にEthereumブロックチェーンの構造を示した。

ブロックチェーンはP2P（Peer-to-Peer）、すなわち参加者のコンピュータが対等な立場で参加し、全体でサービスを実現するシステムであり、ネットワークを通して送受信されるデータ群と、ブロックチェーンの維持参加者（バリデータ）らが各々ロー

カルなデータベースに維持している状態遷移システム（状態マシン）から成る。ネットワークを通して送受信されるのはトランザクション（コントラクト・オブジェクトの生成指示または生成済みのオブジェクトへの状態遷移メッセージ^{*7}）とブロック（トランザクションの集合）である。ブロックは12秒間隔のスロットごとにバリデータにより提案され、それぞれのブロックは直前のブロックの暗号学的ダイジェストを格納している。暗号学的ダイジェストは暗号学的ハッシュ関数によって生成される固定長の一意な出力で、元のデータを事実上逆算できない特性を持つ。

ブロックチェーンのシステムとしてのゴールは、参加者が自由に投入する正当なトランザクションをブロックに格納し、処理しながら、起こり得る障害や攻撃にもかかわらず、全バリデータが状態マシンの状態を一致させ続けることである。その実現のため、過去から存在する「状態マシンの複製」⁽³⁸⁾の考え方を応用し、①最初のブロック（ジェネシスブロックと呼ばれる）を全員が共有した上で、②同じ

*7 若しくは組込み暗号資産の送金指示であるが、以降では説明を省略する。

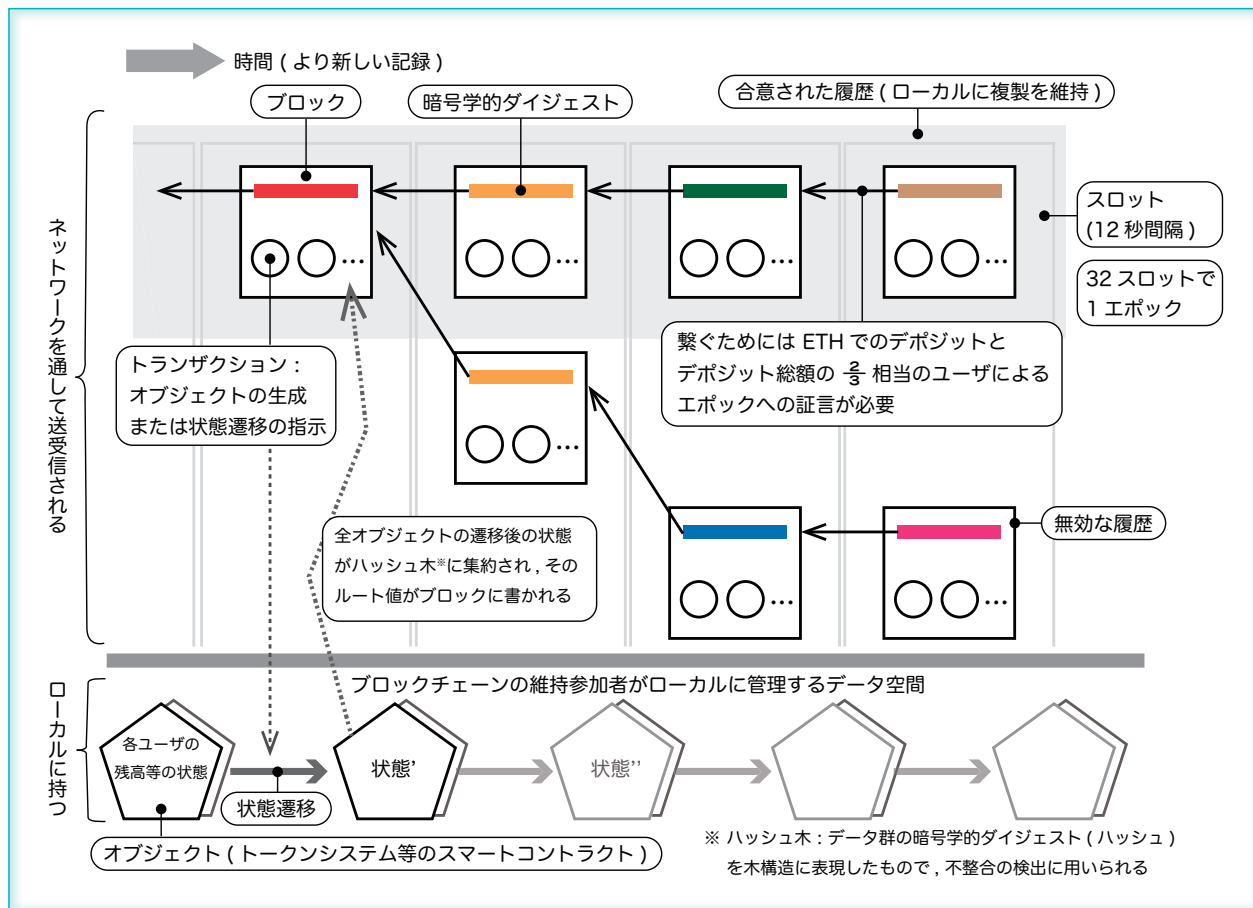


図4 Ethereum ブロックチェーンの構造

並びのブロックの連鎖の複製を全員が維持し、③処理結果がどのバリデータでも同じになるよう、スマートコントラクトは決定的な処理しかできない(乱数の生成や並列処理を行えない)ようにしている。

この仕組みに無数のバリデータが参加することで、ブロックチェーンがどこかで複製され続けるので耐障害性が達成され、参入が自由であることで、特定のトランザクションがブロックに入らないようにしたくても監視・制御し切れず、耐検閲性が達成される。加えて、バリデータとしての参加に ETH (Ethereum の組み込み暗号資産) でのデポジットが必要で、その上でデポジット総額の 2/3 相当のバリデータが認めなければブロックが繋がれないようにすることで、過去に遡った履歴の改変に大きなコストが掛かるようにしている。その代わり、バリデータはブロックチェーンの維持作業に関わることで、新たに造幣される ETH で報酬を得られる。ETH の市場価格が安く、報酬が十分でなければバリデータらは撤退する。それがブロックチェーンの動作条件に組み込み暗号資産の市場価格に関わる理由である。

事故や攻撃により履歴が分岐した場合は、デポジットベースで最も多くの承認を集めた履歴を全員が選択することで、最も改変しにくい履歴に全員が一致し、各自が見る状態マシンの状態が等しくなるとともに耐改ざん性が達成される。履歴を一意にするこの一致がブロックチェーンにて達成されるコンセンサスであり、人間の間の合意を助けているわけではない。この点で Wood が Web 3.0 に期待したものとはズレがある。

2.2.3 スマートコントラクトの動作原理 (図 5)

前述のとおり、トランザクションは新たなコントラクト・オブジェクトを生成するか、あるいは既存のコントラクトにメッセージを送る。メッセージを送られたコントラクトは、ほかの既存のコントラクトにメッセージを送って処理を依頼することがある。(ソフトウェアの部品をデータとそれに対する操作をまとめた「オブジェクト」として捉えるパラダイムであるオブジェクト指向プログラミングのモデルにのっとる。)

そうした処理を行うのは、各バリデータが手元で動作させる仮想マシン (EVM: Ethereum Virtual Machine) である。EVM が提供する計算資源の量は Gas と呼ばれる。Gas の使用料は、トランザクションを投入したユーザのアカウント (EOA: Externally Owned Account) の ETH 残高から都度

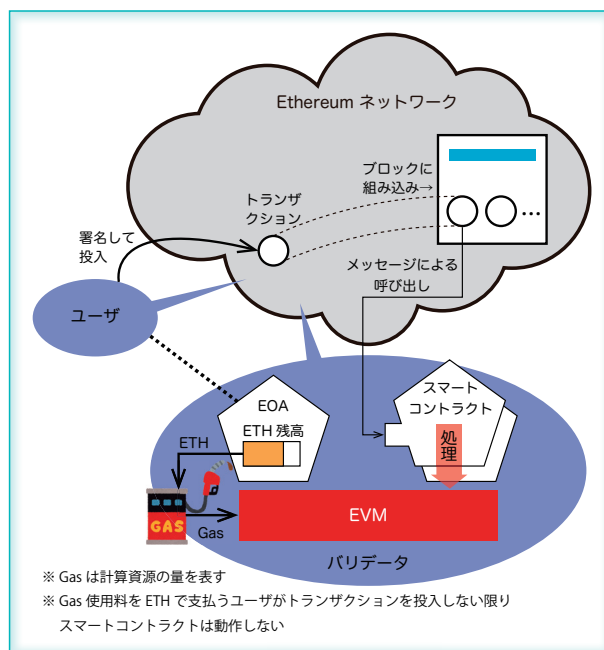


図 5 Ethereum におけるスマートコントラクトの動作原理

自動的に引き落とされる。

Gas の価格には、Ethereum ブロックチェーンのふくそう制御の役割がある。多くのトランザクションが投入され、ブロックのサイズが大きくなれば Gas の基本料金が自動的に高くなり、以降のトランザクションの投入が抑制される。ブロックのサイズが小さくなれば基本料金は自動的に安くなり、以降のトランザクションの投入が促進される。ユーザは優先料金を上乗せして支払うこともできる。

3 NFT とその現実

3.1 代替不可の概念

あるトークンが non-fungible (代替不可) かどうかを知るためには、そのトークンを借りてすぐ同じ数量の別のトークンで返す思考実験をしてみればよい。例えば 1 万円札を誰かから借りて、すぐに別の 1 万円札で返しても通常は文句は出ない (fungible, 代替可)。一方、コンサートの S 席のチケットを誰かから借りて、すぐに同じコンサートの A 席のチケットで返したら、ほぼ確実に文句が出るだろう。1 座席という数量は変わらなくても、チケットは番号で区別されるからである。座席表といったメタデータ (データに関する情報を提供するデータであり、データの内容、構造、管理等に関する情報を記述する) に照らすと、それぞれの番号が別の価値を代表していることが分かる。これが代替不可なトークンの意味である。

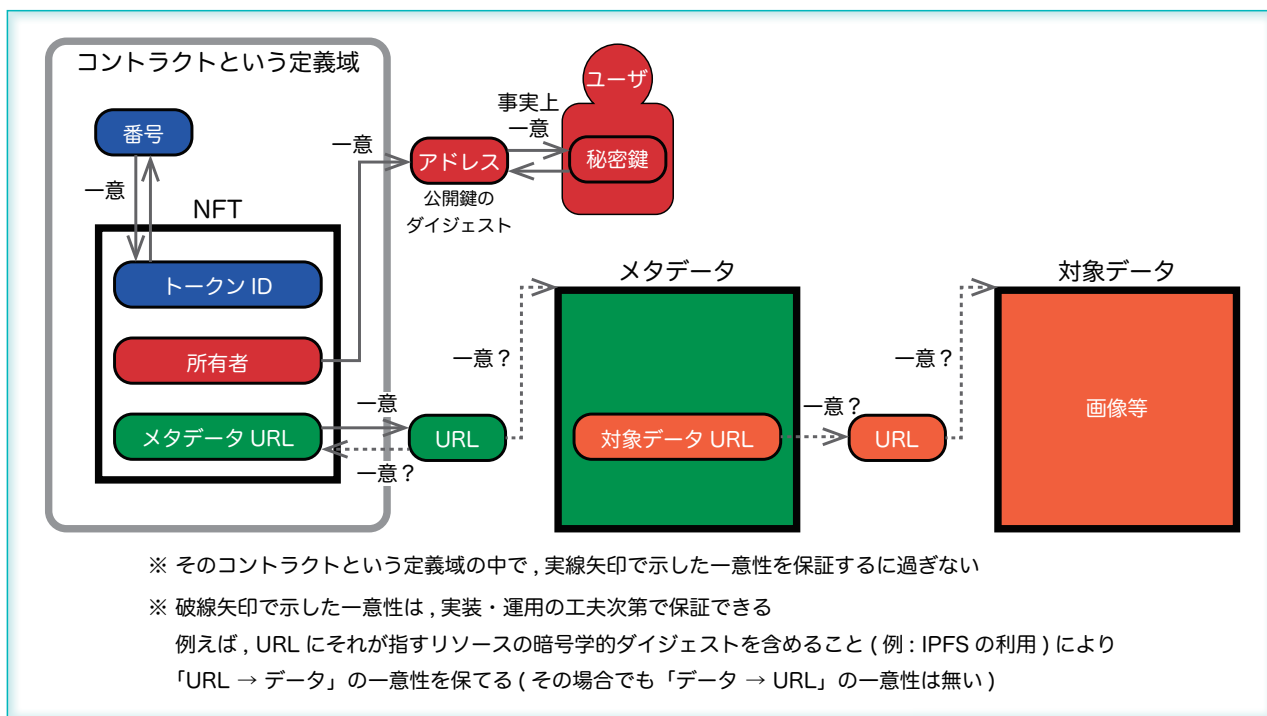


図6 ERC-721 仕様によるとる NFT システムの構造

3.2 ERC-721 における NFT の特性

図6に、ERC-721 仕様⁽³⁹⁾によるとる NFT システムの構造を示した。ERC (Ethereum Request for Comments) は Ethereum におけるスマートコントラクトに関わる標準仕様文書のシリーズで、721 は提案番号である。提案番号は、スマートコントラクト以外に関わる提案も含め、Ethereum Improvement Proposal (EIP) の番号として順に振られる。

ERC-721 では、一つのコントラクトの中に同じ番号を持つ2個以上のトークンは作れない。トークンには所有者が割り当てられており、その関係は一意だが、一人のユーザは複数の NFT の所有者となれるので、逆の関係は一意ではない。また、トークンにはメタデータの URL（仕様上は URI だが、大抵 URL が使われる）が格納されている。メタデータは、例えば画像データなど、その NFT とひも付けられる対象となるデータの URL を含んでもよい。（こちらも仕様上は URI である。）

URL はデータの格納場所を示し、データそのものの識別子ではないので、メタデータや対象データは後に置き換えられる恐れがある。このような仕様なのは、それで問題が生じない応用が想定されていたからだろう。ERC-721 の文書は、NFT の別名として ticket が候補の中にあったと明らかにしている。チケットであれば、発行者が債務を履行することを基本的には信じる仕組みのため、メタデータ

の管理を発行者に一任したとしても多くの場合に問題とはなりにくい。

もし URL が指すデータを一意に決めたい場合は、例えば URL にそれが指すデータの暗号的ダイジェストが含まれていればよく、IPFS⁽⁴⁰⁾ といったサービスを用いてそのことを実現できる。

3.3 NFT の一意性をめぐる誤解

ただし、いずれにせよデータから見て NFT を一意に指すことは一般にない。であるのに、文献(2)や文献(3)に見られるように、NFT が「唯一無二」であるとか、「希少性を証明できる」といった言説が後を絶たない。

図7に示すように、一つのコントラクトの中でさえ、同じ対象を指す NFT は複数作れる。これは実装により禁止できるが、仕様はそこまで求めていない。また、ほかのコントラクトや別のブロックチェーンを考慮すれば、同じ対象を指す NFT の作成は禁止できない。

このことについて、オンチェーン、すなわちブロックチェーンに対象となるデータ自体を書き込めば、事態が改善するという誤解が一部であるように見受けられる。しかし、図7が示すように、たとえオンチェーンにデータを書き込んだとしても、同じコントラクトの中でさえ、同じデータを格納する複数の NFT を作ることは可能であるし、それを禁じるためにはデータ（または少なくともコントラク

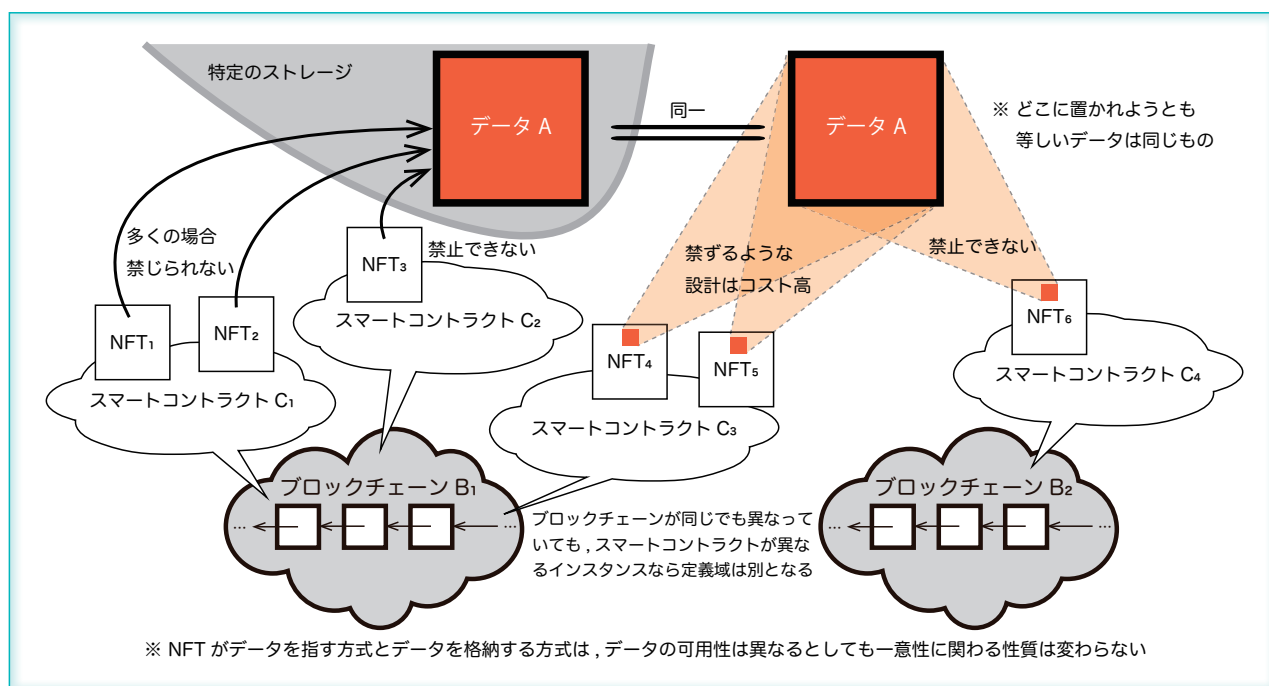


図 7 データがオンチェーンであるかにかかわらず、データ→NFT の一意性は保証できない

ト内で計算するデータの暗号的ダイジェスト) の比較を行わなければならない、計算資源量的にコストが高くなる。(Gas 使用料の面で金銭的にも高くなる。) 別のコントラクトの NFT が同じデータを格納することも、もちろん禁じることができない。

3.4 NFT の真正性を巡る問題

そのため、あるデータにひも付けられた、ある NFT が世界に唯一であると主張するためには、そのデータに関する権限をもつ誰かが、どれか一つの NFT を本物だと決める必要がある。そのためには、NFT は番号で区別されるのだから、(このブロックチェーンの) このスマートコントラクトのこの番号の NFT が本物だ、と指定するしかない。(図 7 を見ながら考えてほしい。)

メタバース内のアイテムがどれかの NFT とひも付いていると決められるのは、恐らくそのメタバースのサービス運営者である。その NFT がサービス外で譲渡される可能性を考慮しなくてよいのなら、データベースで所有者を管理すればよいのだから、NFT を使う理由はない。NFT がサービス外で譲渡される場合は、それが本物だと証明するためにサービスの権限が必要であり、サービス運営者が何らかの方法で NFT の真正性を証明した上で、譲渡を受けた者はその証明を検証できるようになっていなければならない。恐らくそうした検証には verifiable credentials⁽⁴¹⁾ の仕組みが利用できるだろう。

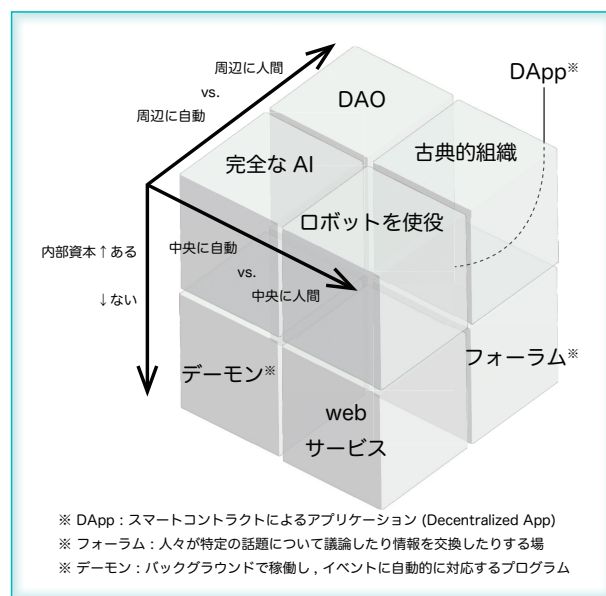


図 8 中央・周辺と資本の有無に注目して組織を分類するキューブ
(文献⁽⁴²⁾に掲載の平面図を立体化)

4 DAO とその現実

4.1 Buterin による DAO の定義

DAO (分散型自律組織) の概念は、Ethereum の発案者である Buterin のブログ記事⁽⁴²⁾ に萌芽的に定義されている。図 8 は、同記事の内容に沿って、人間や自動システムが中央と周辺のどちらにいるか、及び内部資本の有無によって、様々な組織形態を立方体上に 8 通りに配置し分類したものである。この分類はあくまで萌芽的なものであって、厳

密に見ると様々な矛盾点がある。例えば、仮に資本を人間を駆動するものと定義すれば、完全なAIは人間を含まないため資本を必要としないし、逆にフォーラムは社会関係資本を蓄積していると言える。ともあれ、この分類によれば、DAOは中央に自動システムがあり、周辺に人間がいて、周辺の人間を駆動するために内部に資本を持つものだということになる。

このことに基づき、ButerinはDAOを次のように定義した。①インターネット上に自律的に存在するが、自動システム自身にはできない特定のタスクを担うために、人間を雇うことに大きく依存している。②そのため、内部に資本（報酬として使われ人間を駆動する）を持つ。③意思決定を自律的に行う。

4.2 ブロックチェーンとDAO

BitcoinやEthereumなどのブロックチェーンは、この定義にのっとるDAOだとみなせる。これらは、それぞれの組込み暗号資産で報酬を得る人間が（コンピュータを通して）働くことで維持されているが、本体は自動的に動いているアプリケーション層の通信プロトコルだと考えられるからである。ただし、「意思決定を自律的に行う」という面では、アップグレードなどの決定が迅速に進む（つまり人間が意思決定している）Ethereumよりも、変化が遅いBitcoinの方が、よりDAO的だと言えるかもしれない。

4.3 スマートコントラクトとDAO

メタバースで暮らすコミュニティが民主的に物事を決め、実行するためにDAOを利用するといった状況を見ると、その場合に中央で動いている自動システムとは、スマートコントラクトということになるだろう。しかし、ブロックチェーン本体と異なり、スマートコントラクトに基づくDAOには自律性に難点がある。

コントラクトが組織のルールを規定しているとすれば、その動作を変更することが組織としての意思決定の表れだと言える。しかし、コントラクトのコード自体はブロックチェーンに書き込まれており、書き換えられないので、間接参照を用いて、全体を制御するコントラクトが機能ごとに別々のコントラクトを呼び出すようにあらかじめ記述しておき、新たなコントラクトを書き込んだ後に、全体を制御するコントラクトにメッセージを送って、処理が新コントラクトによって行われるように参照を書き換え、かつ旧コントラクトを無効にするという手

順になる。

しかしながら、図5に示したように、スマートコントラクトはユーザがトランザクションを投入しなければ動作しない。また、投票により意思決定を行う^{*8}場合、トークン（特にこの場合はガバナンストークンとも呼ばれる）を所持していることの証明に基づいた投票が一般的であるが、投票者は、提案（すなわち新たなコントラクトのコード）を読み、正しく評価できるのだろうか。また、トークンの持ち分により投票の重みが変わるとすれば、それは公平なのだろうか。

提案が可決された場合、誰が新コントラクトを有効にする起動メッセージを送るのだろうか。権威ユーザが行うのであれば、拒否権を持つその者が実質的な支配者ではないのだろうか。あるいは、可決した提案については、誰でも起動メッセージを送れるとするならばより民主的だが、悪意を持ち難読化された提案が、コードを正しく読めなかった大勢の投票者（あるいは少数の有力なトークン保持者）により可決するような事態を考えると、ぜい弱な仕組みだとは言えないだろうか。（実際にこのぜい弱性を突いた事件が起きている⁽⁴³⁾。）

5 所有の概念をめぐる問題

2.1でも紹介したように、Web3では、Web2.0がもたらした課題を「誰がデータを所有するか」の問題だと捉えている⁽⁴⁴⁾。そもそもBitcoinが銀行に信用を置かない送金の仕組みを作り出したように、Web3は人や組織に対して信用を置かない前提だが、では「所有」は信用によらずに技術的に表現できるのだろうか。Web3コミュニティの手元にあったのはブロックチェーン技術である。ブロックチェーンではトークンを実現できる。トークンは所有者が排他的に処分（他人に譲渡したり、存在しない宛先を指定することで焼却（バーン）したり）できる。トークンの所有者はアドレス（その正体は公開鍵のダイジェスト）により識別され、対応する秘密鍵を使用しデジタル署名できる本人だけが正当なトランザクションを投入できるからである。これ

*8 前述のとおり、ブロックチェーンにおけるコンセンサスは人間の合意を表しているわけではないが、人間が意思を表明するならば、検閲ができないのでその意思を間違いなく記録することはできる。このことにより、ブロックチェーンを用いて投票により物事を決めることが可能になる。DAOはこのことに依存しがちだが、投票は敗者を生み遺恨を残すので、必ずしもいつでも最適な意思決定の方法ではない。

は実質的に所有の概念を技術的に表現したものではないだろうか。

しかし、3.3や3.4で示したように、トークン自体は排他的に処分できることで実質的に所有できるものの、トークンが指し示したり、格納するデータについては処分はできない。そのNFTとの唯一無二な関係性すらなく、NFTに対する操作が、データに対しては何の効力も持たないからである。そのため、トークンを所持しているだけでは、トークンとひも付けられた何かを自動的に所有していることにはならない。

トークンとひも付けられた何かの所有を実現するためには契約が必要であり、その点ではWeb3以前の社会の仕組みと何ら変わることはない。

DAOもまた、会社（同じ志をもって物事を行う集団）を所有できるという従来の株式会社の考え方の延長にある。十分な数量のトークンを持っていないければ意思決定に効力を持たないのは、十分な数量の株を持っていないければならないのと状況が変わらない。DAOは、従来の会社が持つ、例えば所有者の判断により、そこに所属し働く者らの意に反して会社のそもそもの目的が書き換えられ得るといった問題点を特に解消しないのではないだろうか。

6 おわりに

本解説論文では、Web3、NFT、DAOのリアリティを紹介した。

最初にメタバース系ゲームにおけるNFTの禁止について触れたが、結局、ゲームのポピュラリティを支えているのは、そのゲーム自体の面白さであって、NFTを組み込むかどうかはゲーム体験にさほど寄与せず、組み込むとかえってゲーム自体からプレイヤーの興味がそらされかねないというMinecraftやVRChatの判断は正しいのかもしれない。

それでは、NFTは何の役にも立たないのだろうか。NFTは元々チケットを想定して作られているので、Gas使用料が十分に安ければ、チケットとしては役に立つかもしれない。また、2.1で簡単に触れたSBTのように、何かの証明書であるなら意味があるかもしれない。というのも、ブロックチェーンを用いて検証可能なことから、例えば大学の卒業証明書に应用したとすれば、仮にその大学が後に破綻し消滅したとしても卒業証明書の真正性が検証可能であるといったように、証明書が発行された場所と時間を離れても本物かどうかを確認できるからである。

メタバースに関連して言えば、例えば、現実世界と対になる双子のような世界を仮想空間に作り、実データに基づいたモニタリングやシミュレーションを可能にする「デジタルツイン」を実現する上で、実在するセンサから得られたデータであることの証明⁽⁴⁵⁾に基づいて、実空間における事象が仮想空間に実際に再現されていることを確認できるといった応用が考えられる。しかしそれらは証明書であって、NFTではない。譲渡できる仕組みが組み込まれているNFTは、仮に証明書への応用のために譲渡の機能を無効にできたとしても、オーバースペックである。

恐らく私たちは、ブロックチェーンとその応用に関わる全体のアーキテクチャを今一度見直して、メタバースを含む応用において、効率的で実際に役に立つ仕組みを設計し直す時期に差し掛かっているのではないだろうか。

謝辞 この解説論文は、科研費基盤研究（A）「ブロックチェーンを持続可能にする数理的・実験的研究」により支援されています。（This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP21H04872.）

文献

- (1) 齊藤賢爾，“希少性と排除にもとづくデジタル所有権 vs. メタバース,” 現代思想, vol. 50, no. 11, pp. 115-124, Sept. 2022.
- (2) CRYPTO INSIGHT, “メタバースとは？ 仮想通貨銘柄ややり方・始め方・将来性を解説!,” 2023. <https://diamond.jp/crypto/nft/metaverse/>
- (3) 日本情報マート, “Web 3.0・NFT・メタバース・DAO 最新用語の基礎知識,” 2022. <https://resonacollaborare.com/leadership/2205130>
- (4) Mojang Synergies AB, “Minecraft,” as of 2023. <https://www.minecraft.net/>
- (5) Mojang Studios, “MINECRAFT AND NFTS,” 2022. <https://www.minecraft.net/ja-jp/article/minecraft-and-nfts>
- (6) VRChat Inc., “VRChat,” as of 2023. <https://hello.vrchat.com/>
- (7) The VRChat Team, “Our policy on NFTs and blockchain in VRChat,” 2022. <https://hello.vrchat.com/blog/our-policy-on-nfts-and-blockchain-in-vrchat>
- (8) MMO Stats, “MMO stats-population & player count of MMO games,” as of 2023.
- (9) Roblox Corporation, “Roblox,” as of 2023. <https://www.roblox.com/>
- (10) The Sandbox, “The sandbox game - user-generated crypto & blockchain games,” as of 2023. <https://www.sandbox.game/>
- (11) ActivePlayer.io, “The game statistics authority,” as of 2023. <https://activeplayer.io>
- (12) NAVER Z Corp., “ZEPETO - World,” as of 2023. <https://web.zepeto.me/>

- (13) NAVER Corp., “Asia’s No.1 metaverse platform ZEPETO reaches 300 million global users,” May 2022. <https://www.navercorp.com/en/promotion/pressReleasesView/30824>
- (14) The Sandbox. Tweet, 2022. <https://twitter.com/TheSandboxGame/status/1579528320441815040>
- (15) Decentraland, “Welcome to Decentraland,” as of 2023. <https://decentraland.org/>
- (16) Decentraland, “Live metrics,” as of 2023. <https://status.decentraland.org/metrics>
- (17) Axie Infinity Limited., “Axie infinity-battle, collect and trade collectible NFT creatures,” as of 2023. <https://axieinfinity.com/>
- (18) Solirax, “Neos Metaverse,” as of 2023. <https://neos.com>
- (19) NeosVR Wiki, “Environmental impact and sustainability,” 2021. https://wiki.neosvr.com/Neos_Wiki:Environmental_Impact_and_Sustainability
- (20) ethereum.org., “PROOF-OF-STAKE (POS)” 2022. <https://ethereum.org/en/developers/docs/consensus-mechanisms/pos/>
- (21) バーチャル美少女ねむ, ミラ, “ソーシャル VR 国勢調査 2021,” https://note.com/nemchan_nel/n/ne0ebf797984c
- (22) T. J. Berners-Lee, “Information management: a proposal,” Technical report, CERN, March 1989.
- (23) 内田晃秀, “Webのビジネス的沿革とWeb3の実相に関する考察,” 早稲田大学大学院経営管理研究科プロジェクト研究論文, 2023.
- (24) 齊藤賢爾, “Web3は金融なのか,” SBI金融経済研究所所報, vol. 2, pp. 29-37, Aug. 2022.
- (25) Tim O’Reilly, “What is web 2.0: Design patterns and business models for the next generation of software,” Sept. 2005. <https://www.oreilly.com/pub/a/web2/archive/what-is-web-20.html>
- (26) V. Shannon, “A ‘more revolutionary’ Web,” The New York Times, May 2006.
- (27) W3C, “W3C SEMANTIC WEB ACTIVITY,” Dec. 2013. <https://www.w3.org/2001/sw/>
- (28) T. Berners-Lee, “Web 3.0 and linked data,” 2009. <https://www.w3.org/2009/Talks/0427-web30-tbl/>
- (29) The Solid Team, “Solid,” as of 2023. <https://solidproject.org>
- (30) V. Buterin, “A next-generation smart contract and decentralized application platform,” 2013. <https://ethereum.org/en/whitepaper/>
- (31) M. Gidda, “Edward Snowden and the NSA files - timeline,” 2013. <https://www.theguardian.com/world/2013/jun/23/edward-snowden-nsa-files-timeline>
- (32) G. Wood, “Dapps: What web 3.0 looks like,” 2014. <https://gavwood.com/dappsweb3.html>
- (33) ethereum.org., “web3.py,” as of 2023. <https://github.com/ethereum/web3.py>
- (34) C. Dixon, “Why Web 3 matters,” Sept 2021. <https://twitter.com/cdixon/status/1442201621266534402>
- (35) O. Kharif, “What you need to know about Web3, crypto’s attempt to reinvent the internet. Bloomberg, Dec. 2021.
- (36) E. GlenWeyl, P. Ohlhaber, and V. Buterin, “Decentralized society: Finding web3’s soul,” May 2022. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4105763>
- (37) S. Nakamoto, “Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system,” 2008. <http://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- (38) F. B. Schneider, “Implementing fault-tolerant services using the state machine approach: A tutorial,” ACM Comput. Surv., Vol. 22, no. 4, pp. 299-319, Dec. 1990.
- (39) W. Entriken, D. Shirley, J. Evans, and N. Sachs, “Non-Fungible token standard,” 2018. <https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-721.md>
- (40) J. Benet, “IPFS-content addressed, versioned, P2P file system,” July 2014. <https://arxiv.org/abs/1407.3561>
- (41) W3C Recommendation, “Verifiable credentials data model,” March 2022. <https://www.w3.org/TR/vc-data-model/>
- (42) V. Buterin, “DAOs, DACs, DAs and more: An incomplete terminology guide,” May 2014. <https://blog.ethereum.org/2014/05/06/daos-dacs-das-and-more-an-incomplete-terminology-guide>
- (43) “Beanstalk exploit - A simplified post-mortem analysis,” Everything Blockchain, April 2022. <https://medium.com/coinmonks/beanstalkexploit-a-simplified-post-mortem-analysis-92e6cdb17ace>
- (44) ethereum.org., “Introduction to Web3,” 2023. <https://ethereum.org/en/web3/>
- (45) H. Watanabe, K. Saito, S. Miyazaki, T. Okada, H. Fukuyama, T. Kato, and K. Taniguchi, “Proof of authenticity of logistics information with passive RFID tags and blockchain,” 2021 International Conf. Electron. Commun., Internet of Things and Big Data (ICEIB), pp. 213-216, 2021.

(2023年5月8日受付)

齊藤賢爾 (正員)

早大大学院経営管理研究科教授。1993 コーネル大から工学修士号（計算機科学）を取得。2006 慶大から博士号（政策・メディア）を取得。2019 から現職。デジタル通貨、自律分散システムを中心に、インターネットと社会の諸問題の研究に従事。

**内田晃秀**

筑波銀行デジタル戦略部副部長。2001 早大・政治経済卒。大和銀行を経て2004 関東つくば銀行（現筑波銀行）入行。2023 早大大学院経営管理研究科了。Web企画業務、データ分析等に従事、フィンテック企業出向を経て現職。行内DX等を担う。



東京大学「メタバース工学部」 における取組み

吉田 壘 Lui Yoshida 東京大学

1 はじめに

東京大学メタバース工学部は、急速な技術進展や多様な働き方の変化に伴う産業構造の大変化に対応する必要がある現代において、様々な立場の人々に最新の工学や情報学を提供するため、2022年9月に設立された（図1）。

ここで、メタバース工学部とは、文部科学省から正式に認可を受けている大学組織の学部というわけではない。多様な人々に工学と情報の学びの機会を提供し、工学キャリアに関する情報を広めることを目指した新しい学びの場を指している。

筆者はメタバース工学部ジュニア講座部会長として、中高生向け教育プログラムである「ジュニア工学教育プログラム」の運営を担当している。本稿ではメタバース工学部の概観を説明した後、当該プログラムについて詳しく紹介する。

2 メタバース工学部

2.1 設立の目的

メタバース工学部の Web ページ^{(1), (2)}に記載されている設立目的を要約すると以下のとおりである。

近年の技術発展と働き方の多様化に伴い、工学や情報学への関心が高まり、その知識を得たいという個人から社会全体への需要が増大している。これに対応するため、東大大学院工学系研究科は、デジタル技術を活用した新たな教育の場として「メタバース工学部」を設立した。メタバース工学部では、全ての人が平等に最新の情報や工学を学ぶことができ、より多様な人々が未来社会の構築に参加できることを目指している。

2.2 活動内容

メタバース工学部は以下に挙げる三つの主要な活動を推進している。

一つ目は、ジュニア工学教育プログラム（ここでは

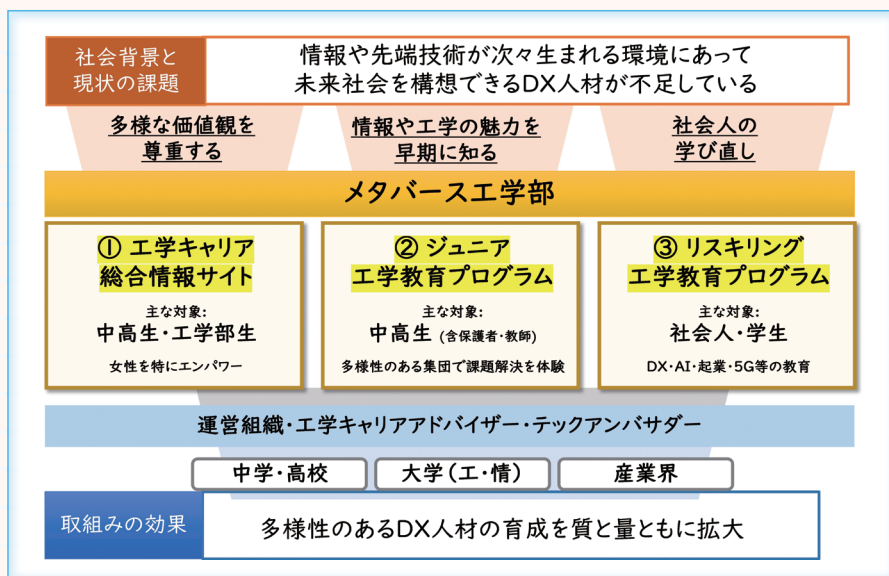


図1 メタバース工学部の構想

「ジュニア講座」と呼ぶ)の運営である。主に中高生、その保護者、そして教師を対象として、多様な工学について無料で学ぶことができる、主にオンラインの講座を提供している。講座によっては産業界と大学が共同で、協力する形で提供されているプログラムも存在する。これは、DX(デジタルトランスフォーメーション)に対応する人材を増やす活動と言え、詳細については次の3.で述べる。

二つ目は、リスキリング工学教育プログラム(以下、「リスキリング講座」と表記)の提供である。主な対象は社会人(会員企業の社員)と学生で、対象者の再学習やスキルの再獲得(リスキリング)を支援することを目指している。人工知能(AI)、アントレプレナーシップ教育、次世代通信など最新の工学と情報技術についてオンラインで学習する教育プログラムが提供されている。受講者のニーズに応じた多種多様なコースが開講され、設定された評価基準を満たせば受講生は各講座の修了証を受け取ることができる。

三つ目は工学キャリアに関する総合情報サイトの構築である。中高生、保護者、教師、工学部生といった幅広い層を対象に、工学キャリア情報を提供すること、特に現状ではロールモデルが少ない女性のキャリアを提供することを通して、工学分野におけるダイバーシティの向上を目指している。これはDX人材の多様性を高める活動であり、教職員だけでなく、学生・大学院生、更に産業界の若手社員も参加し、産学連携を実現しながら取り組んでいる。

表1 2022年秋のジュニア講座一覧

プログラム名	回数	総講義・演習時間	同受可能人数
メタバースを作ろう	全5回	5.5時間	無制限
バーチャル教室でデジタル回路を学ぼう	全2回	2時間	320名
起業入門～困っていることを解決しよう～	全6回	5.5時間	無制限
デザイン×工学 Part 1	全5回	5時間	無制限
デザイン×工学 Part 2	全5回	10時間	50名
理系思考を活かした企業のシゴト：丸井グループの理系社員と話そう	全2回	2時間	50名
オンラインホワイトボードを用いたアイデア発想講座	全3回	4.5時間	30名
デジタルファブリケーションでオリジナルUSBメモリを作ってみよう	全2回	8時間	12名
グリーンエネルギー：太陽からのエネルギーを運び・貯めて・賢く使う	全6回	6時間	200名
スマホで脈波を測ろう	全2回	8時間	16名
イノチャン in メタバース工学部	全3回	10.5時間	50名
協町高校イノベーションプログラム	全6回	8時間	15名
新潟東高校イノベーション教育入門集中講座	全2回	13.5時間	15名
化学システム工学入門	全3回	4.5時間	40名
未来の原発をデザインしよう	全4回	8時間	20名

3 ジュニア講座について

多様な工学の学びや卒業後のキャリアを伝える、参加費無料の講座・イベントを実施している。主な受講対象

者は中高生、保護者、教師だが、講座によってはそれ以外の対象者も受け付けている。講座は単発の講義ではなく、2回以上の講義から成り立っており、各教員が専門性を生かしたものとなっている。

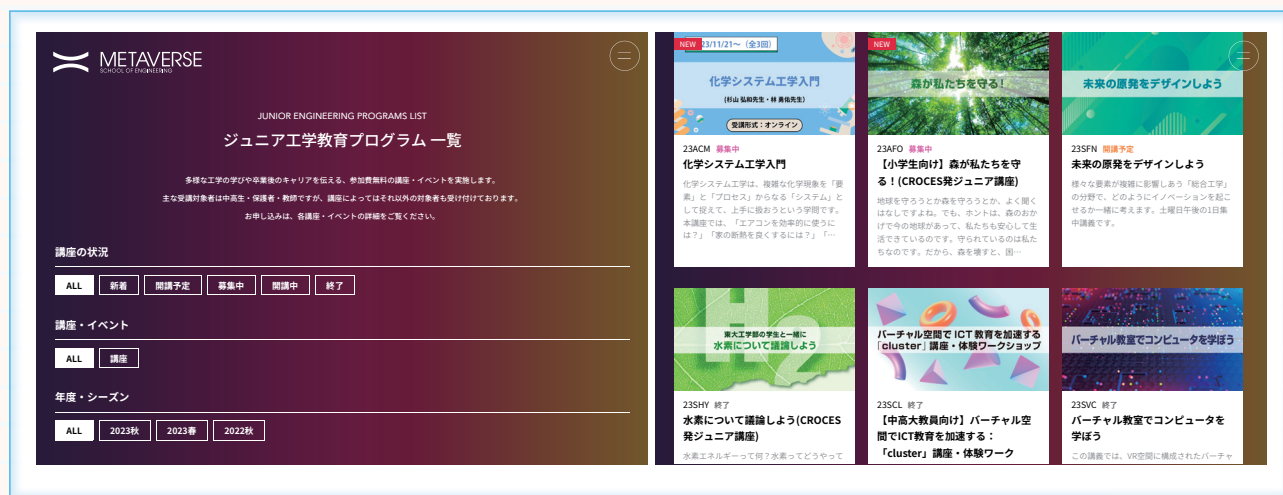


図2 ジュニア工学教育プログラム Web ページ (この図の掲載内容は2023年9月のものです)



図3 ジュニア講座「バーチャル教室でデジタル回路を学ぼう」における教室や講義の様子

図2にジュニア工学教育プログラムのWebページ⁽³⁾のスクリーンショットを記載する。また、表1に2022年度秋(10月~3月)に開講された講座一覧を記載する。また、2022年度秋の講座全体の受講登録者数は延べ約3,000名であった。約6割が中高生であり、それ以外の4割もの大学生、保護者、職員、社会人が講座に参加していた。

4. , 5. に具体的なジュニア講座の情報を記載することを通して、その様子をお伝えする。

4 ジュニア講座「バーチャル教室でデジタル回路を学ぼう」⁽⁴⁾

4.1 概要

本講座では、実際に東大工学部電子情報工学科での授業で用いられているバーチャル教室での講義を体験できる(図3)。オンラインの利便性そのままに、対面授業と同じか、それ以上の表現力を有するVR空間授業、様々なギミックを活用して授業がどう変わっていくか、デジタル回路の授業を例に実演する。Zoomでの視聴のほか、VRChatアカウントがあればVR機器の有無にかかわらずバーチャル教室へ入室して受講体験が可能である。

4.2 プログラム

全2回構成であり、各回1時間の講座であった。第1回、第2回ともバーチャル教室からの配信の様子をZoomから参加・視聴する形となっていた。また、

VRChatを用いることができる受講生は直接バーチャル教室に入室することが可能であった。

第1回「バーチャル教室紹介、コンピュータシステム概論」では、大学講義でも用いているバーチャル教室の機能や仕組みについて、また、それらを可能とする今日のコンピュータシステムについて、バーチャル教室の機能を活用しながら解説した。

第2回「仮想空間で学ぶデジタル回路」では、仮想空間ならではの便利なギミックを活用し、情報技術の基礎であるデジタル回路を学んだ。更に、このような仮想空間の環境が授業をどう変えていくか、受講者の皆さんからのフィードバックを得ながら一緒に議論した。

4.3 受講生のコメント

「えっ、すごい」

「実際にVR空間で回路を組むことによってどう動いているのか、目で見たので分かりやすかった」

「とても楽しめた」

「解説と身振りがあってとても分かりやすかった」

「先生のアバタがかわいかった」

4.4 担当教員のコメント

「VR教室で実施した公開講座では多くの受講者に好評を頂き、新しい公開講座の形として可能性を感じました。想像していたよりも多くのVR参加者を含み、多様な受講者が集まり、互いに刺激し合う空間となりました。仮想空間で動作する論理ゲートを直接触って配線しながら、即興で論理回路を組み立てるなど、VRならではの

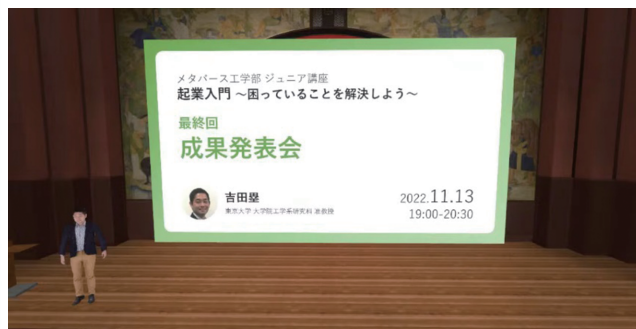


図4 ジュニア講座「起業入門」における最終発表会の様子

はの仕掛けにより、印象深い授業になったと思います。

講義内では専門であるコンピュータシステムの基礎や魅力について語るとともに、VR活用によって『物理的に所有していなくても、誰でも大教室で講義ができる』ようになることの意味を受講者と一緒に考えました。VR空間での知識交流の形の一つとして、このVR教室講義の可能性を模索していきたい、引き続きメタバースジュニア講座にて展開を続けていければと期待しています」。

5 ジュニア講座「起業入門～困っていることを解決しよう～」⁽⁵⁾

5.1 概要

中高生にとって余りなじみのない起業をより身近に感じてもらうための講座である。現在、ベンチャーキャピタルや助成金などの資金調達環境の充実、数多くのインキュベーションプログラム、アクセラレーションプログラムの登場などにより、起業しやすい環境が整備されつつある。また、起業において重要となる課題発見及び解決の力は、会社や大学の環境においても大いに役立つ能力である。

そこで、本講座を通じて「起業は自身の未来の選択肢として考慮できる」という認識を深め、起業のプロセスで学べる知識が幅広く応用可能であることを実感することを目指した。

担当教員は筆者であり、学生3名に講座運営サポーターとして参加してもらった。筆者と学生のうち一人は研究室の取組みをベースとして起業を行っており、その実体験も共有することが可能であった。

5.2 プログラム

本講座は全6回にわたって行われ、最初の4回では知識提供を行い、起業に関する理解を深めることを目指した。最終回の前には任意参加の事業案のブラッシュ

アップを目的としたセッションを設けた。最終回では、最終課題で優秀な成果物を提出した者に、「バーチャル東大安田講堂」にてその内容を発表する機会を提供した。具体的な内容とスケジュールを以下に示す。全ての回に参加され、最終課題を提出した者に対して、参加証を交付した。

第1回「イントロダクション」では、起業についての全般的な知識と情報が提供された。また、実際に起業を経験した学生の体験談も紹介することを通して、参加者が起業について理解を深める時間とした。

第2回「課題を発見しよう」では、起業において肝要な課題の発見に関する情報が提供された。起業家たちがアイデアを思い付いたきっかけなどを紹介し、課題を検討するときのポイントを提示した。

第3回「課題を深掘りしよう」では、自ら立てた仮説を検証する方法を紹介した。課題をより深く探究し、それがなぜ問題であるのか、どのような影響を及ぼしているのかについて考えることが重要であることを提示した。次回で扱う解決策を検討する際のポイントも紹介した。

第4回「解決策を考えよう」では、それぞれが発見し、深掘りした課題に対する解決策を検討する時間とした。起業家の方にも参加して頂き、具体的な解決策の検討に関する方法を共有して頂いた。

特別セッション「課題と解決策をブラッシュアップしよう」では、これまでの学びを生かし、課題と解決策を更に洗練させる時間を提供した。各自のアイデアを共有し、相互にフィードバックを行うことで、最終課題のクオリティを上げる一助とした。

最終回「バーチャル安田講堂を利用した優秀者による発表会」では、参加者の中から選ばれた優秀者が自らのアイデアを発表した(図4)。メタバースプラットフォームであるcluster上に構築されたバーチャル安田講堂を発表会場として用いた。6名の参加者が選出され、それぞれが5分間の発表を行い、4分間の質疑応答が行われ

た。具体的には、「路上パフォーマー支援」「ペット健康管理」「メタバース学校」「ご高齢者向けのパスワード管理機器」「VTuber ご当地 NFT」「メタバース旅行」といったテーマで発表された。いずれの発表も各参加者が抱えている課題をベースにしたものであり、ほかの参加者からの評価も高かった。

5.3 受講生からのコメント

「工学部は‘もの’を作るだけなのかと思っていましたが、社会を変える大きな力があることを学びました。大学の学部を選ぶときのとても良い参考となりました」

「みんなのアイデアや的確な問題意識に新たに気付くことがたくさんあり、学びの多い時間となりました。当事者にしか分からない悩みもあったり、ありそうでなかったシステムなど、一人で考えても思い付かないような内容が多くて楽しかったです。充実した時間となりました。本当にありがとうございました」

「短い間でしたが、ありがとうございました。毎週楽しみにしていました。コロナ禍の学生生活の中で、学校外の人たちとつながり、嬉しかったです。また、講義を聴けたら幸いです」

5.4 担当教員のコメント

「メタバース空間を活用したことで、受講生の皆さんからの反応は良く、その臨場感が受講生のモチベーションを高めたと感じています。また、講座のフィードバックも大変好意的で、受講生の皆さんからの満足度が高かったことうれしく思っています。この講座をきっかけに自身の強みを生かして起業を行う高校生が出てきて報告してくれました。

この講座を通して、受講生の皆さんが行動することの重要性を実感してくれたなら、それ以上にうれしいことはありません。これからも中高生の皆さんが夢を追い求め、その実現に向けて積極的に行動できるようサポートできればと思っています」

6 おわりに

メタバース工学部は、これからも中高生向けの講座やイベントを継続的に、かつ無償で提供し、多くの方が工学の魅力を体験するための機会を提供していく予

定である。ジュニア講座は全体的に好評であった一方、全ての講座で VR 空間やメタバース空間が活用されていたわけではなかった点、今後の課題であり、有効な活用を模索していく予定である。また、リスキリング工学教育プログラムも継続的に提供していく予定であり、法人会員も募集中である。

メタバース工学部の活動に興味がある方は、ホームページ⁽⁶⁾から各コンテンツを御覧頂きたい。引き続き多様な工学の魅力を発信し、より多くの人々がその魅力に触れられる機会を提供していく予定であり、各講座への参加や身近な方への周知など、私たちの活動に御理解と御協力を賜わることができれば幸甚である。

謝辞 本稿の執筆にあたり、東大大学院工学系研究科脇原徹教授、齊藤英治教授、大牧信介学術専門職員、東大大学院情報理工学系研究科入江英嗣教授に御協力を頂いた。心より感謝申し上げる。

■ 文献 (Web サイト参照日はいずれも 2023 年 6 月 8 日)

- (1) 東京大学工学部 / 工学系研究科, “プレスリリース「メタバース工学部」設立のお知らせ,” <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-07-21-001>
- (2) 東京大学工学部 / 工学系研究科, “メタバース工学部の概要,” <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/meta-school-info>
- (3) 東京大学メタバース工学部, “ジュニア工学教育プログラム,” <https://www.meta-school.t.u-tokyo.ac.jp/junior/>
- (4) 東京大学メタバース工学部, “バーチャル教室でデジタル回路を学ぼう,” <https://www.meta-school.t.u-tokyo.ac.jp/junior/22a15/>
- (5) 東京大学メタバース工学部, “起業入門～困っていることを解決しよう～,” <https://www.meta-school.t.u-tokyo.ac.jp/junior/22a12/>
- (6) 東京大学メタバース工学部ホームページ, <https://www.meta-school.t.u-tokyo.ac.jp/>

吉田 壘

東大大学院工学系研究科准教授。2015 東大大学院新領域創成科学研究科博士課程了。博士 (科学)。同教養学部特任助教、同大学総合教育研究センター特任講師を経て、2020 から現職。2022 Global Edtech Startups Awards Competition 2023 研究開発部門にて世界大会優勝。(株) LearnWiz 取締役、共同創業者。



企業のメタバース含む XR に関する取組み

則枝 真 Shin Norieda NEC
藤田直毅 Naotake Fujita NEC
大林勇人 Hayato Obayashi NEC

1 はじめに

本稿では、メタバース・XR に対する、企業（NEC）の認識及び取組みについて解説する。

2 メタバース及び XR の定義

2.1 メタバースの定義と概要

2.1.1 メタバースの定義

メタバースとは、デジタル三次元空間上で、ユーザ同士が各々自身の化身である「アバター」を介したコミュニケーションを楽しむためのアプリケーション・サービスの総称である。

SF 作家のニール・スティーヴンソンが 1992 年に発表したサイバーパンク小説「スノウ・クラッシュ」に登場する架空の仮想空間サービスの名称が語源であり、確固たる定義は現時点で存在しないものの、以下の要素の全部または一部から構成される⁽¹⁾。

- ・三次元の仮想空間
- ・ユーザがそこに「いる」感覚
- ・ユーザが世界（ワールド）を創造できる
- ・他ユーザとの社会性
- ・経済活動などの基盤

2.1.2 メタバースの概要

メタバースアプリケーションは、一般的には Unity や Unreal Engine といった 3D ゲームエンジン上で動作する。更に、ワールド並びにワールド作成環境がプラットフォームサービスとして提供される形態がほぼ定着している。ユーザはいずれかのプラットフォームを選択した上で、当該プラットフォームに存在する既存のワールドに参加するか、自分で新規にワールドを作成する。

メタバース上で利用したり、やり取りされたりするアバターを含むコンテンツは、プラットフォームであらかじめ提供されるものを除いては、外殻部分について 3D-CG を扱うソフトウェアや専用のツールで作成の上、更にプラットフォームに登録をする必要がある。

2.2 XR の定義

NEC では、メタバースは XR に含有される、その一アプリケーションであると捉えている（図 1）。

XR は、「クロスリアリティ」または「エクステンディドリリアリティ」の略称であり、人間が認識する世界や現実を、デジタルテクノロジーを用いて再構築する手法の総称を指す。詳しくは、高精細な画像、音声、巧みな演出などにより、人間が XR により構築される人工空間と、物理的（Physical）に元々存在している空間とを、

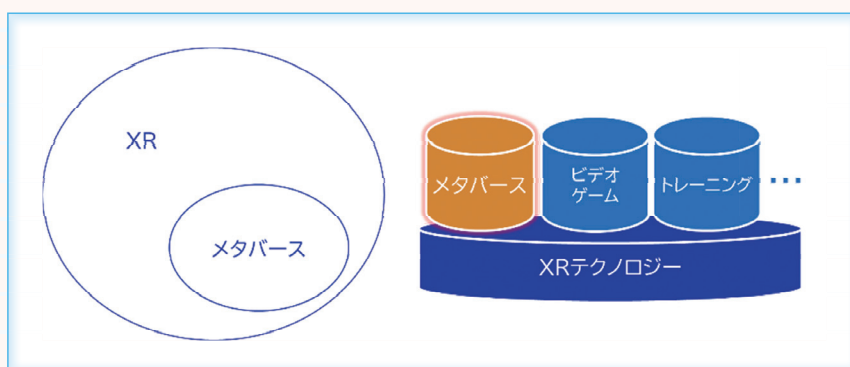


図 1 メタバースと XR の関連性

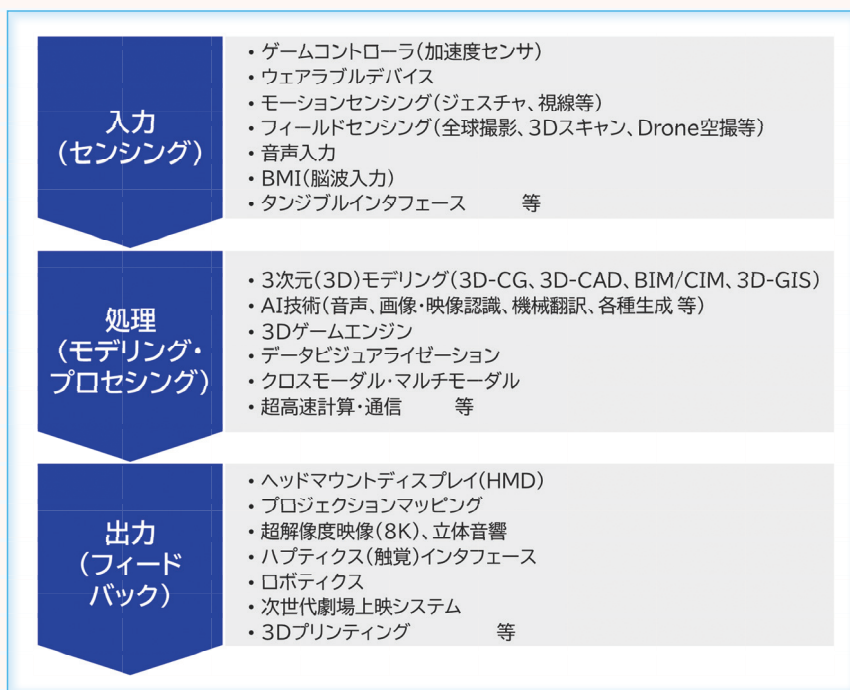


図2 XRの構成要素技術

つなぎ目なく認識できるならば、それは、もはや仮想や虚構ではなく、現実(Real)そのものといった考え方に基づく定義となる。かつ、従前のVR／MR＊／ARを全て包含する概念だとされる。

XRは、デジタルテクノロジーの一種であるため、その構成要素技術を、コンピューティングの三要素である「入力」「処理」「出力」といった分類で整理することが可能である⁽²⁾(図2)。

3 メタバース含むXRの隣接技術

3.1 デジタルツイン及びサイバーフィジカルシステム

デジタルツインとは、物理世界にあるものや出来事、人の行動をIoT・センサで検出し、これらを基に仮想空間上に再現する技術である。また、物理世界の対象物の特性やパフォーマンスをモデル化し、AIによる分析、シミュレーション、予測を行うことで物理世界の出来事をより正確に反映することが可能となる。

サイバーフィジカルシステムでは、これらシミュレーションの結果や、仮想空間上でのアバタを介した行動により起こる現象を、人が活動する物理世界へフィードバックする。ここでのフィードバックとは人に対して三次元空間の映像を見せるだけではなく、ロボットにより物理世界のものを動かすことや、空調や照明などの環境自体に影響を及ぼすことも含む(図3)。

* Mixed Realityの略で、複合現実(感)を指す。物理空間にCGなどで作られた人工的なデジタル空間の情報を取り込み、物理とデジタルを融合させた空間を作る技術の総称。

3.2 NFT

NFTはNon Fungible Tokenの略称で、非代替性トークンを指す。具体的には、ブロックチェーンを用いてデジタルデータに唯一性を付与する仕組みにより、デジタルデータに関する真がん性の担保や取引履歴の追跡を可能とするものである。

NFTを用いて、メタバース内のコンテンツや財に固有性を付与することで、経済的な希少性が高まり、メタバース上での経済取引を活発化されることが期待されている。

また、NFTが付与された三次元デジタルコンテンツや財を扱うプラットフォームを、先述のメタバースのプラットフォームと独立させる、若しくは疎結合させる形で運営することにより、ユーザの手間を極力なくす形で、メタバースのコンテンツや財をメタバースプラットフォーム間で流通可能とする取組みが企図⁽³⁾されている。

3.3 ハプティクス

ハプティクスは、触覚をデジタルテクノロジーで再現し、ユーザからの入力やユーザへの情報呈示のインタフェースとして用いる手法を指す。ほかにも、ハプティクステクノロジー、ハプティクスインタフェース／触覚インタフェースなどと呼称⁽⁴⁾されている。

XRにおいては、VRのデジタル3D空間上でのオブジェクトや、MR／ARにおける物理空間上の物体(建造物や設備など)に重畳されたデジタルオブジェクトを操作する際に、ハプティクスを用いることで、ユーザに対して「手で触って動かす」感覚を再現し、直

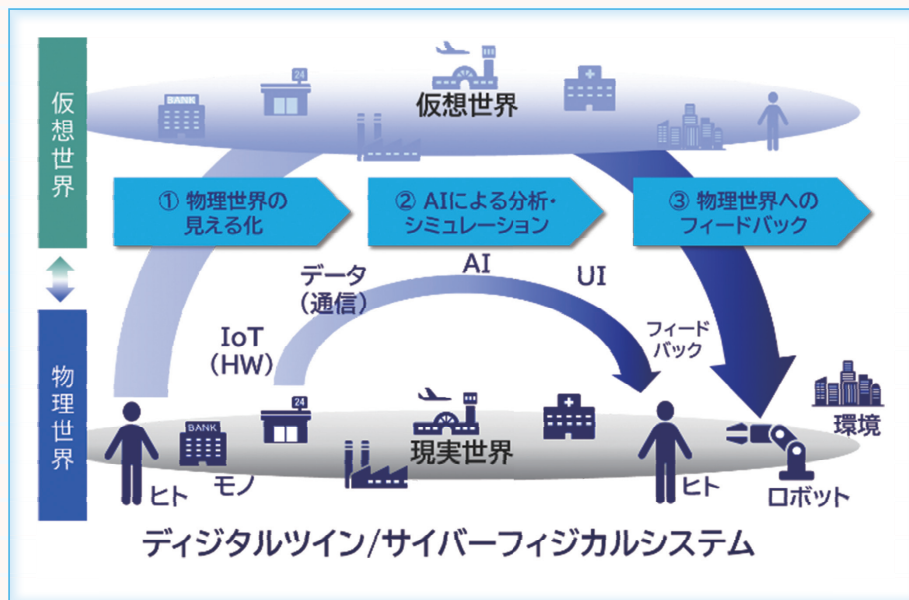


図3 デジタルツイン/サイバーフィジカルシステム

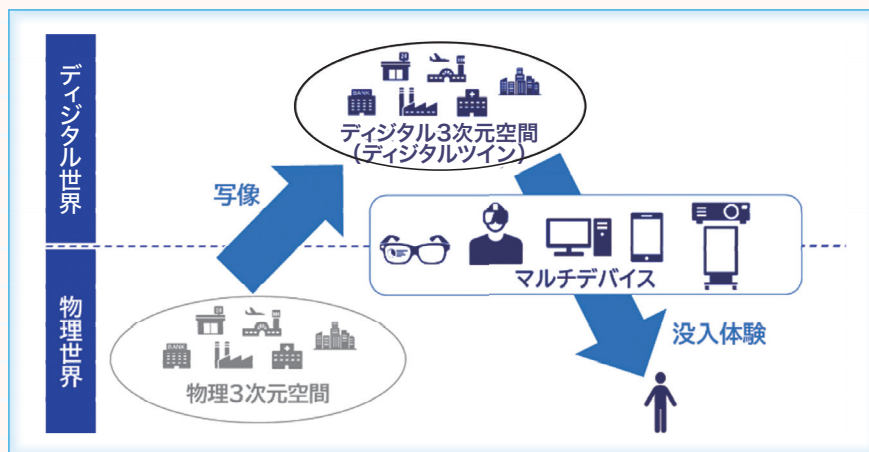


図4 NECのXR関連ソリューションの全体イメージ

感的なインタラクションを実現することが可能となる。

近年では、既にXRの領域で活用可能な人間が体感できる触覚を再現して表示するハードウェアが、VRヘッドセットのハンドコントローラをはじめ多数登場してきている。

4 NECのXRへの取組み

4.1 取組みの概要

我々は、物理世界の空間・事物や事象を写像したデジタルツインを、マルチデバイスで没入体験可能とするソリューションを提供している(図4)。これにはビジネスコンサルティングや体験デザインコンサルティングも含まれている。

4.2 各種事例

我々のXRに関する取組み事例を、実業務支援による

効率化、XRによるエンターテインメント要素、サービス企画における高速スプリントの三つの観点から紹介する。一つ目はARを活用した実業務支援による効率化である⁽⁵⁾。機器修理業務において、預かった機器の一時保管場所の探索時間を削減するものである。具体的には、ARで棚の保管場所のガイドと検品チェックをすることで、探索時間の削減と作業ミス防止を実現している。結果、従来業務と比較して18.2%の工数削減を達成している。二つ目はXRによるエンターテインメント要素として、ARを用いた街の観光案内に取り組んでいる。観光ランドマークに映像ARを重ねるだけでなく、立体音響を含めたマルチモーダルなARガイドを実現している。三つ目は、VR/MRを活用したサービス企画における高速スプリントである(図5)。事業開発やサービス企画の初期段階ではMVP(Minimum Viable Product)を用いた効果検証を行うことが一般的である。しかし、ペーパープロトといった簡易的なものであつて

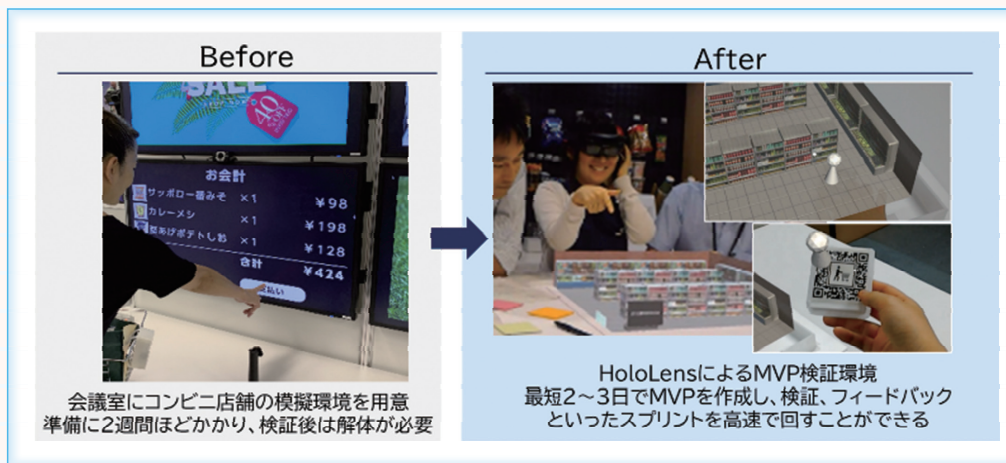


図5 XRを活用したサービス企画の高速スプリント

も、物理的な空間を使ったサービス体験の設計には時間がかかり、効果を得るための適切な表現にも限界がある。そこで仮想空間上で体験環境をVR／MRで簡単に構築するための仕組みの開発に取り組んでいる。

5 今後の取組み予定

5.1 XRの普及に向けた進化の予測

メタバース含むXRの更なる普及に向け、私たちが考える今後の進化の予測⁽⁶⁾を以下に示す。

(1) インタフェースデバイスの進化と多様化

目的に応じてウェアラブル（身体装着型）とユビキタス（環境埋込み型）とが使い分けられるようになるに伴い、多様化していく形で進化を遂げる。

(2) データモデルの標準化

メタバースやXRで用いられる三次元の人・群衆、空間、事物、事象等の三次元データモデルについて、ある分野で作られたものが、ほかの分野でも流用可能なように、標準化が進んでいく。具体的には、建築業界の「IFC (Industry Foundation Classes)」⁽⁷⁾、都市計画分野における「CityGML」⁽⁸⁾などが挙げられる。

(3) UI／UXの洗練化

VRで用いられる三次元仮想空間やARで情報が重畳された拡張物理空間においては、ユーザが自然と次の行動を促されるような利用体験が提供される必要がある。これらを実現するために、AIの活用や三次元空間や事物・事象向けのデータビジュアライゼーションの発展が予想される。

(4) ネットワークの進化

従来、高速化が図られてきた下り回線に加えて、ユーザからセンシングした身体挙動などの情報を送信するための上り回線の充実化が求められる。また、三次元データモデルに大量かつ多数のIoT・センサデータを含める

場合は、エッジコンピューティングやローカル5Gといった大量接続・高速ネットワーク構築技術の活用が必要となる。

(5) セキュリティの堅ろう化

今後、メタバースやXRが企業や行政機関などで活用され、ライフログやユーザの身体動作といったセンシティブデータを扱うようになった場合、強固なセキュリティが求められる。特にメタバースを含む遠隔からユーザが利用するVRアプリケーションの場合は、他人によるなりすましを防止する対策が必要となる。

5.2 XRに対するNECユーザからのニーズ

現状のメタバースやXRは三次元仮想空間でのコミュニケーションや体験が中心であるが、様々なアプリケーションやサービスを検討する際に、ユーザの声としてよく耳にすることを三つ挙げる。

一つ目は、「仮想空間ならではのものにしたい」である。仮想空間では物理空間では難しい表現が可能である。また、物理的な空間では取得が難しい様々な情報も仮想空間であれば容易に取得できる。例えば、誰がどこにいて何を見ている、といったことは、物理的な空間であればたくさんのセンサを配置しないと取得が難しいが、仮想空間の中では容易に取得できるため、これらデータ取得の容易性を生かしたサービスが求められている。

二つ目は、「複雑な製品やサービスの仕組みを、体感を通して直観的に理解できるようにしたい」である。

3.1で示したコンピューティングの要素の発展により、仮想空間での三次元表示は複雑な仕組みを分かりやすく表現することが可能になる。3.3で述べたハプティクスのように、マルチモーダルな感覚表現は、体感を通じて直観的な理解につながるような表現が期待されている。



図6 メタバースでの店舗接客サービス

三つ目は、「人の生活に必要な実在するものや現場業務を直接的に支援したい」である。業務にはオフィスワークなど仮想空間に閉じた中で行えるものもあるが、現状、人の生活の中心は物理的な空間にあり、仮想空間上で起きた出来事やシミュレーションの結果は、物理的な空間に反映させることで初めて価値を生み出すことが多い。単なる見える化にとどまらないものが求められている。

5.3 NECとしての取組み

5.3.1 XRの今後につながる取組み事例

5.2で述べたXRに今後求められる3点に関する取組み事例を紹介する。

一つ目の「仮想空間ならではのものにしたい」に関して、仮想空間でのデータ取得の容易性を生かしたサービスを挙げたが、我々はメタバース上での店舗接客サービスに取り組んでいる（図6）。仮想店舗内であればユー

ザの位置・視線、それにユーザは常にデバイスの近くにいることから音声、カメラによる顔映像が容易に取得できる。これにより仮想空間上にあるどのコンテンツを見たかによる顧客興味情報の抽出、音声認識による応対記録、顔画像による感情分析を実現している。今後はこれらのデータを分析し、顧客に最適な接客員の動的アサインを検討している。また、メタバースは物理的な距離の制限がない世界であることから、接客員の選定も店舗という空間的に限定される必要がないといった価値もある。

二つ目の「複雑な製品やサービスの仕組みを直観的に体感して理解できるようにしたい」に関して、3自由度の力覚フィードバックが可能なタブレット⁽⁷⁾の事例を紹介する（図7）。学習用タブレットの応用として検討されたもので、通常では触ることが難しい生き物や、力加減の強弱を学ぶ楽器の学習、本来であれば複数のレバーの組合せで複雑な操作が必要な重機を、直感的につ

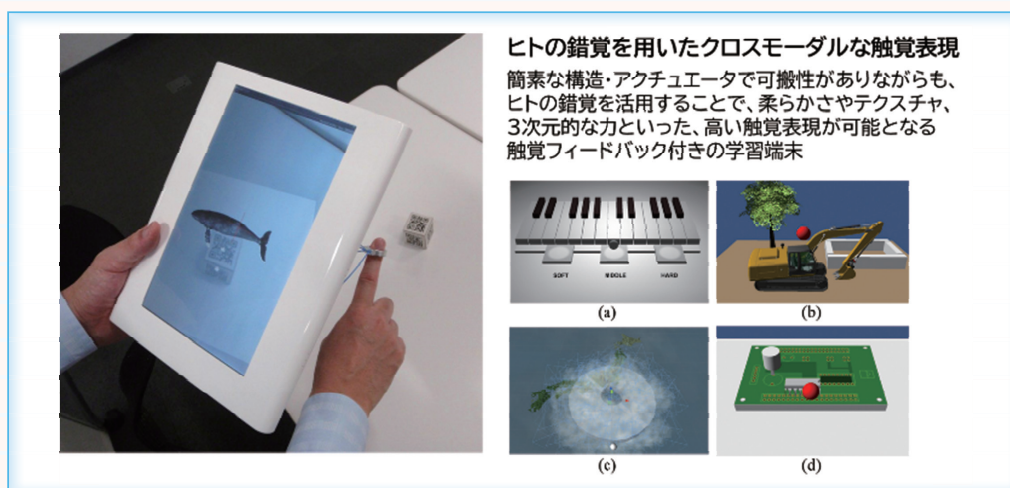


図7 力覚タッチパネル

かんで操作するなどの体感が可能である。ハプティクスを活用した取組みが多く始まっている。

三つ目の「人の生活に必要な実在するものや現場業務を直接的に支援したい」に関して、我々は特にサプライチェーンの観点で、ものが動くことに着目したロボティクスを検討している。製造、物流、小売、生活と、ものが移動していく中で、製造領域では生産性向上を目的にしたロボティクス、物流領域では空間全体を理解して制御する、協調搬送ロボット⁽⁸⁾に取り組んでいる。物流センター内では荷姿や経路の種類・変化が多いため、天井に設置したカメラにより、人・搬送対象・障害物のデータをリアルタイムに把握し、2台のロボットで挟むことで様々な形状のものの搬送を可能にしている。小売領域では、店舗における品出し作業を行うロボットを検討している。従来、陳列商品の欠品などを検出し、商品棚の前まで搬送するといった部分的な作業自動化に対し、陳列までの作業の完全代替を狙っている。生活領域では、マンションやオフィスといった建物内での搬送を行うロボットを検討している。マンションでは不在時の再配達の問題や、オフィスでのフリーアドレスにおける個別搬送といった「ラストワンマイル」を検討している。

5.3.2 デジタルプラットホームの整備

NECではDXを推進するために、数年前からNECの強みを集約させたグローバル共通基盤「NEC Digital Platform (以下、NDP)」の整備を開始⁽⁹⁾している。NECは、NDPの整備を通じて、ユーザがより安定的に安心してクラウドサービスを利用でき、ベストプラクティスをベースとした標準化と多様な要望に応える柔軟性を両立させることで、DXにおけるユーザ課題の解決に貢献することを目指している。

本稿で述べた、XR技術に関連する領域においても、NDPの整備と並行する形で、ベストプラクティスを蓄積・共有してNECグループとしての標準を模索しながら、XRに関連する多様な要望に応える柔軟性を備えたプラットホームの構築に向けて、NECグループの関係部門との活動を開始した。

NDPは、NECの強みであるクラウド技術の適用が進み、他システムとの接続性が向上したほか、マルチクラウドに対応した運用の仕組みが整備されるなど、目指す姿に向けた整備が着々と進められている。

我々も、NDPの様々なクラウドサービスを活用するなどして、メタバースやXRに関連するアプリケーションやサービスを、ユーザが安心して使って頂けるように安定的に提供することを目指していく所存である。

6 さいごに

昨今(2023年6月時点)、数年来のメタバースへの過剰な期待、ブームが一段落を見せつつあるとともに、メタバース含むXRの社会への本格普及は2030年代に入ってからといった展望が語られつつある⁽¹⁰⁾。

無論、そのステージに到達するためには、本稿でも述べた各種の技術的な課題を着実に解決するとともに、XRが価値を発揮する分野やビジネスドメインを明確化するためのユースケースの開拓も引き続き行われていく必要がある。

我々NECは、そのための一助となるべく、引き続き、本稿で述べたような研究開発及びビジネス展開を含む社会実装について、たゆまなく、まい進していく所存である。

■ 文献

- (1) 武者良太, メタバースの歩き方, 往来, 東京, 2022.
- (2) 大林勇人, “第1章 VRの現状とビジネスチャンス,” VR/ARの開発動向と最新応用事例, 技術情報協会, 東京, 2018.
- (3) 廣瀬優香, “メタバースに必須のNFTは次世代の流通革命を起こせるのか. あらゆるものがデジタルでつながる時代へ,” NET GUIDE, Feb. 2022. <https://nft-guide.jp/2022/02/03/post-2806/> (2023年4月25日閲覧)
- (4) (株)村田製作所, “センサとAIの融合で築く, 人と機械の新たな関わり ハプティクスで実現する「人機一体」,” March 2021. <https://article.murata.com/ja-jp/article/new-relationship-between-humans-and-machines-1> (2023年4月25日閲覧)
- (5) 則枝 真, “VR/AR技術における感覚の提示, 拡張技術と最新応用事例, 第8章第3節 現場作業の効率化,” ミス防止のためのAR技術の活用事例, 技術情報協会, 東京, 2021.
- (6) 則枝 真, 大林勇人, “5-1-4 メタバースが創り出すリアルとバーチャルの融合,” AIビジネス大全, プレジデント社, 東京, 2022.
- (7) S. Norieda, Y. Takano, and S. Makoto, “String-based 3-DOF haptic tablet device with control method based on human haptic adaptation,” JSME-IIP/ASME-IPSPS Joint Conf. Micromechatronics for Inf. and Precision Equipment, 2015.
- (8) 日本電気株式会社, “協調搬送ロボット,” <https://jpn.nec.com/arc/index.html> (2023年4月25日閲覧)
- (9) 日本電気株式会社, “DXを支えるITインフラ DXオフファリングを支える「NEC Digital Platform」,” <https://jpn.nec.com/techrep/journal/g21/n02/210219.html> (2023年6月26日閲覧)
- (10) (株)三菱総合研究所, “2030年代、メタバースの産業利用が社会課題を解決,” Nov. 2022. <https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20221122.html> (2023年6月26日閲覧)

則枝 真

日本電気株式会社グローバルイノベーションビジネスユニット事業開発統括部。2006 東工大大学院総合理工学研究科修士課程了。同年 NEC 入社，中央研究所配属。計測制御技術を専門に触力覚インタフェース，身体を操作デバイス化する機器操作インタフェースの研究に従事。2013 東工大大学院総合理工学研究科博士後期課程にて博士（工学）取得。NEC ではスマートグラスを中心に XR のビジネス化に取り組む。その後 AR / VR / MR を中心に，顧客企業向けの業務分析からのシステム提案を行う戦略コンサルティングに従事。現在，ロボティクスを活用した新規事業開発に取り組む。



藤田直毅

日本電気株式会社デジタルプラットフォームビジネスユニット AI・アナリティクス統括部。東大・工・計数工卒，同大学院情報工学専攻修士課程了。1991NEC 入社。2022 から AI・アナリティクス領域の新技術事業化に関する業務に従事。



大林勇人

日本電気株式会社デジタルプラットフォームビジネスユニット戦略・デザインコンサルティング統括部。慶大・総合政策卒。システムエンジニアとして，新規パッケージ関連のビジネス立ち上げ，設計・開発，導入，運用・保守を経験。更にコンサルタント・研究員として，情報システム全般に関するコンサルティング，官公庁関連の調査研究，XR 含む先端テクノロジー関連の調査・マーケティング，これからの働き方をはじめとする数十年先を見据えた未来洞察などに従事。2008 から 2 年間，総務省に出向し「情報通信白書」執筆，ICT 利活用ルール整備促進事業（サイバー特区事業）9 プロジェクト推進等を担当。2021-11 から現職にてデジタル・DX 関連のコンサルティングに従事。



電波と信号処理 このような道を 歩んで

小川恭孝 (正員：フェロー)

昭48北大・工・電子卒。昭53同大学院博士課程了。昭54同大学・工・電子講師、昭55同助教授、平7同大学院・工・電子情報・教授、平16同大学院・情報科学・メディアネットワーク・教授、平25同大学・名誉教授、現在に至る。この間、アダプティブアンテナ、MIMOシステム、高分解能時間領域推定に関する研究に従事。平4～5米国オハイオ州立大にて、電磁波の高分解能測定に関する研究に従事。工博。平18年度本会論文賞、平19年度電気通信普及財団賞（テレコムシステム技術賞）、平25年度本会業績賞。平27～29本会監事。IEEE Life Fellow。



北海道大学名誉教授

小川恭孝

Yasutaka Ogawa



1. 適応信号処理との 出会いまで

私は、小学生のときから理科が大好きで「大きくなったら科学者になりたい」と思っていた。中学生の頃、親から天体望遠鏡を買ってもらい、木星を見たときの感動は忘れられない。周囲に4大衛星を引き連れた堂々とした姿に、この衛星を発見したガリレオ・ガリレイも感動したのではないだろうか。また、この頃、優れた啓蒙書が日本語訳で出版されていた。例えば、ジョージ・ガモフの「1, 2, 3...無限大」、サイエンティフィック・アメリカン社の「星から宇宙へ—新しい天文学」などは難しい宇宙論を中学生にも何とか分かるように解説してくれていた。ますます、理系への志を強くしたものである。

高校生になったとき、「情報」という新たな学問領域があることを知った。NHK教育テレビで「シャノンの情報理論」、「ウィナーのサイバネティクス」、「チューリングマシン」の説明が放映されていた。理解できた部分は少なかったが、新鮮な領域であることを感じる事ができた。将来は、この分野の研究に携わりたいと考えるようになった。

このような希望を持って、1969年4月に北大の理類に入学した。しかし、それまで首都圏を中心に吹き荒れていた大学紛争の嵐が地方にも及び、平穏な学園生活というわけにはいかなかった。1年生の

ときは、教養部（当時）の建物が過激派学生によって封鎖され、授業を受けることができない日々が続いた。何とか大学紛争も収まり、授業が再開されたとき、同じクラスにいた何人かの友人が大学を去ってしまっていた。優れた人物だったので本当に残念な思いをした。

このような混乱はあったものの、教養部の課程を終えた後、迷うことなく工学部電子工学科に進学した。ここで「情報」に関する勉強をしたいと考えたためである。電子工学科の授業で習ったフーリエ変換はすごいと思った。波形の挙動を調べる時、時間領域から周波数領域に変換して考察するという手法には感心した。一方、時間領域で高い分解能を得るには広い帯域幅を必要とするというフーリエ変換の宿命が、後述する高分解能推定によって乗り越えられることには、このときは全く思いも寄らなかった。

学部4年生の研究室配属のときは、松本正教授と伊藤精彦助教授がおられた電波伝送工学講座を選択した。（肩書は当時、以降も同じ。）この講座はスロットアンテナをはじめとする電磁波の研究を行っていたが、情報伝送も扱うと紹介を受けたためである。卒業研究を行った後、引き続き同講座で大学院に入学した。1973年のことである。博士課程でのテーマについて、指導教官の松本正先生から、「電話回線でデジタル信号を送る研究について勉強す

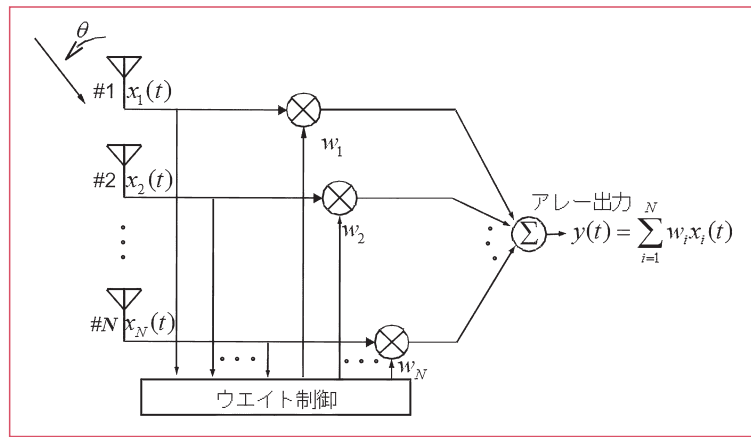


図1 アダプティブアンテナの構成（受信系）

るように」という指示があった。電話回線は音声を効率的に伝えるため、なるべく狭帯域で伝送するように設計されていたので、4 kHz 足らずの帯域幅しかなく、低域と高域で大きく減衰するとともに位相も著しくひずんでいる。ここにデジタル情報に対応するパルスを送り出すと、無ひずみ条件が満たされていないため、当然のことながら大きくひずんでしまう。これにより符号間干渉が発生する。この問題を解消するため、受信側にトランスバーサルフィルタと呼ばれる FIR (Finite Impulse Response) フィルタを接続してタップ係数を調整する手法が提案されていた。送信機から受信機までのチャネルは、通信のたびに異なる振幅・位相特性を有している。それに適応してタップ係数を調整することによって、送信機から受信機までの全体の特性を無ひずみ条件が満たされるようにする（等化する）ことができる。これは適応等化器（Adaptive Equalizer）と呼ばれている。私は、与えられた環境に適応して最適化をするという概念に強くひかれるようになった。これが適応信号処理との出会いであり、私のその後の研究を貫く一つの柱になった。

なお、私の博士課程での研究では、完全に伝送路を無ひずみにするのではなく、符号間干渉が存在する状態を許容して、その条件の下で符号誤り率が低くなるビタビ識別器をテーマにした。このときのインパルス応答の最適化を中心にした研究⁽¹⁾で論文を提出し、工学博士の学位を授与された。1978年のことである。



2. アダプティブアンテナ研究の開始と苦闘の日々

大学院修了後、1年間の日本学術振興会奨励研究員を経て、それまで所属していた工学部電子工学科電波伝送工学講座で講師として勤務することになった。

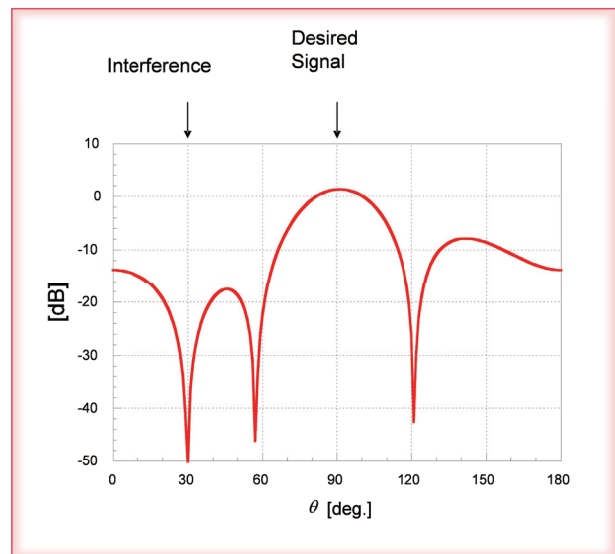


図2 アダプティブアンテナの指向性制御の例（半波長間隔4素子リニアアレー）

た。教授に昇任されていた伊藤精彦先生と相談して、アダプティブアンテナの研究を行うことになった。これは、電波環境に適応してアンテナの特性を最適化するものである。図1に受信系について動作原理を示している。アレーアンテナの各素子で受信した信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$ （複素信号）のそれぞれに複素ウェイト $w_1, w_2, \dots, w_N$ を乗算して振幅と位相を調整する。このとき、複素ウェイトを環境に適応して最適化すると望ましい受信特性が得られる。図1に示したように、通常はアレーアンテナの構成となることから、アダプティブアンテナは、アダプティブアレーアンテナとも、アダプティブアレーとも呼ばれている。また、このようなアンテナは環境に応じて、その特性を最適化する賢いアンテナであることから、スマートアンテナと表されることがある。

図2のように、受信すべき希望波（Desired Signal）のほかに干渉波（Interference）が到来しているとする。これらの到来方向は受信側では未知

である。このような環境で複素ウェイトを最適化すると、その図に示したとおり、希望波方向に主ビームを向け、干渉波方向にヌルを形成する指向性が実現される。これによって干渉波の影響を受けずに希望波のみを受信できるようになる。複素ウェイトを制御する手法、つまり、アダプティブアンテナの制御アルゴリズムには幾つかの提案があり、大学院で適応信号処理を学んだ私としては、大変興味深い研究テーマになった。研究成果が論文⁽²⁾に掲載されたときは本当にうれしかったことを昨日のこのように覚えている。

私には楽しい研究ではあったが、重大な問題があった。「アダプティブアンテナを何に使うか?」、つまり、「ニーズは何か?」ということである。アダプティブアンテナの研究は、1960年代からアメリカを中心に軍用目的でなされてきた。具体的には、レーダや通信に対しての意図的な妨害電波を除く手段として、この研究が進められてきた。私は大学で軍事研究をする気は全くなく、商用通信に役立てたいと考えていたが、私にとっては残念なことに、通常の通信では干渉が発生しないようにシステムや制度が構築されていた。アダプティブアンテナの出番がないわけである。

いろいろ調査してみると、スプラディック E 層

という突発的に発生する電離層によって、外国の電波が我が国のテレビジョン信号に混信する問題があることが分かった。中継放送所において混信波を受けると、そのサービスエリア全域に混信波が再送信され、受信障害が広範囲に及ぶことになる。この問題にアダプティブアンテナが使えるのではないかと考え、その信号処理系（シミュレータ）を作製して混信波の抑圧効果を実験的に検証した。アンテナ素子は設置せず、アンテナからの信号が入力するポートにケーブルでテレビジョン信号と混信波（簡単化のため CW）を入力し、シミュレータによって混信波の抑圧効果を検証した。複素ウェイトの乗算は、信号を 90° ハイブリッドで同相分と直交分に分離して、それぞれを可変減衰器で振幅を制御するというアナログ処理で実現した。

図 3 (a) は実験に用いたテスト用原画面である。これを VHF の 1 チャンネルのテレビジョン信号とした。これに混信波を加えたときの画面は図 3 (b) に示したとおり、カラー画面がモノクロになり、ビート縞が発生している。そのときのスペクトルが図 3 (d) である。（この実験を行っていた 1980 年代、テレビジョン信号は残留側波帯方式によるアナログ変調を用いていた。）これらがアダプティブアンテナ入力である。その信号処理系では、混信波の抑圧

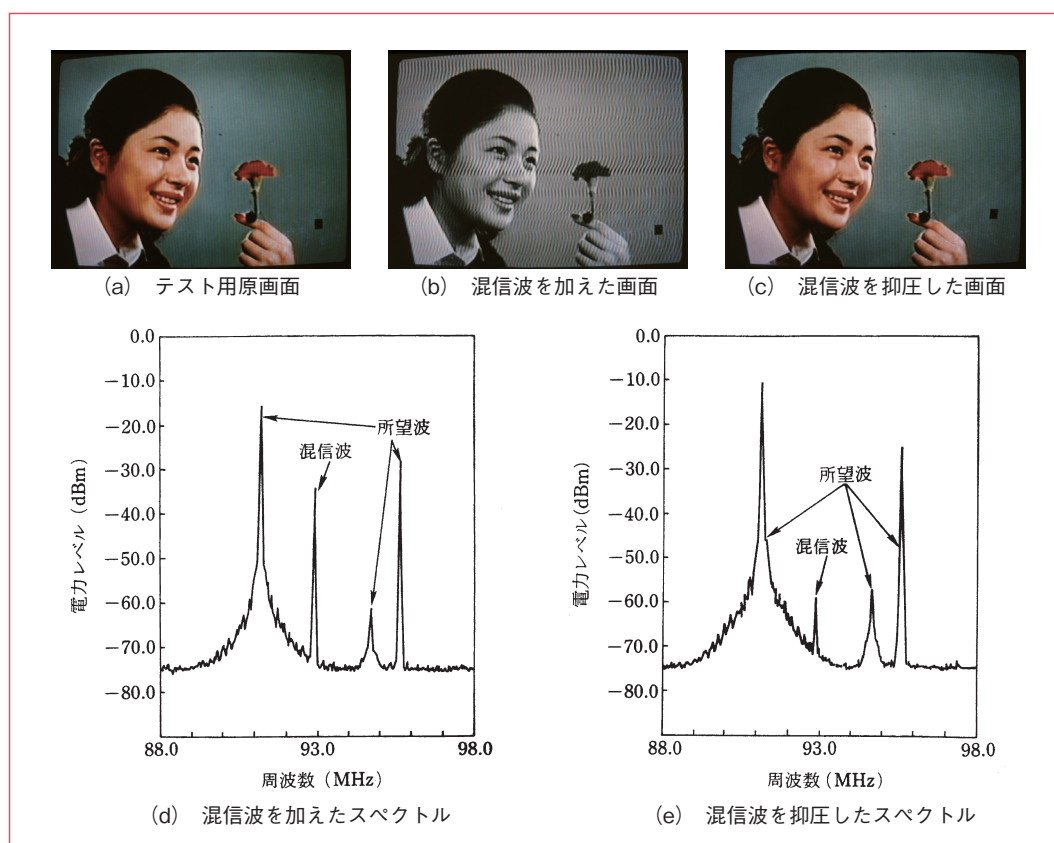


図 3 アダプティブアンテナによるテレビジョン信号の混信波抑圧
文献 (3) から転載 ©映像情報メディア学会

が行われ、テレビジョン画像は図 3 (c) に示したように原画面とほとんど同じ程度まで改善されていることが分かる。図 3 (e) の出力スペクトルに示したように混信波が大きく抑圧されている。この成果⁽³⁾については残念ながら注目を集めるには至らなかった。

一方、我が国において 1979 年にアナログ方式の自動車電話のサービスが始まり、無線は移動通信の時代へと移っていった。アナログの次はデジタルになるわけであるが、1980 年頃の重要な研究課題は遅延時間差の長い遅延波への対応であった。マルチパス（多重波伝搬）はフェージングを引き起こし、受信レベルを著しく低下させることがある。雑音と並んでマルチパスは無線技術者を悩ませてきた難題である。なかでも、遅延時間差がシンボル長と比較して無視できないほど長い場合には、隣接するシンボルに重なりを生ずる符号間干渉が発生する。このようなマルチパスでは、フェージングのレベル変動が周波数によって異なることになる。これは周波数選択性フェージングと呼ばれている。符号間干渉が発生する周波数選択性フェージング環境では、SN 比を増加させても符号誤り率が下がらないフロアと言う現象を生ずることになる。高速伝送になるほど、シンボル長が短くなることから、その影響を深刻に受けることになる。あるとき、「16 kbit/s の伝送は可能との見通しを得ているが、256 kbit/s についてはほとんど絶望的…」という趣旨の発言を聞いたことがある。

そのような課題を背景として、昭和 57 年度電子通信学会全国大会でパネル討論会「移動通信の発展にアンテナ伝搬研究者は何をなすべきか」が開催された。その中で、京大の池上文夫教授が「移動通信の周波数選択性フェージングに対して指向性ダイバーシチを用いると誤り率のフロアが低下する。指向性ダイバーシチの究極の形態がアダプティブアンテナであることから、そこに大きな期待をしている」と述べられた。池上先生の意図は次のように理解できる。指向性ダイバーシチは、異なった指向性をダイバーシチブランチとして切り換える方式である。先行波が、選択された指向性の主ビームで受信され、遅延波がサイドローブで受信されると、後者の受信レベルが低下して干渉が軽減されるため、誤り率のフロアが低下する。アダプティブアンテナは、その指向性を環境に適応して最適化することが可能なので、干渉となる遅延波をほぼ完全に抑圧することが期待できる。私は池上先生の、この御発言に大きく感動したことを覚えている。そして、アダプティブ

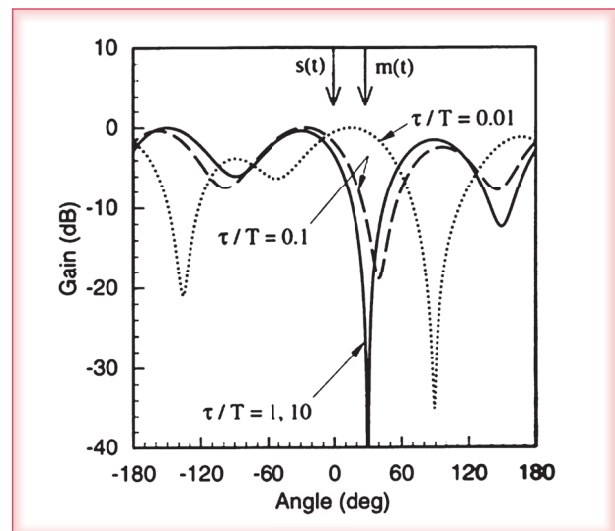


図 4 遅延波到来時のアダプティブアンテナの指向性（パラメータ τ/T はシンボル長で正規化した遅延時間差。 $s(t)$ と $m(t)$ は等振幅）
文献 (5) から転載 ©電子情報通信学会

アンテナで遅延波を抑圧する研究を開始することにした⁽⁴⁾。

図 4 は 3 素子円アレイに先行波 $s(t)$ とそれより τ だけ遅れた遅延波 $m(t)$ が到来したときのアダプティブアンテナの指向性を示している⁽⁵⁾。 T はシンボル長である。同図から、 τ/T が 1, 10 と大きくなるほど、遅延波 $m(t)$ に深いヌルが形成されていることが分かる。つまり、アダプティブアンテナは遅延時間差 τ が大きいほど、その抑圧効果が優れていることが分かる。一方、 τ/T が 0.01 と小さな値のときは、遅延波は抑圧されていない。このような遅延が小さいときは、波形ひずみは無視でき、レベルの低下のみが問題となる。この場合には、アダプティブアンテナは遅延波 $m(t)$ を先行波 $s(t)$ に同相合成することにより、受信レベルを高めるスペースダイバーシチとして機能している。このように、遅延時間差によらず、アダプティブアンテナはマルチパス環境に適応して特性を改善する。

デジタル方式を採用した第 2 世代の移動通信に関して、我が国は、遅延時間差が問題にならない、伝送レートの低い方式を採用した。一方、ヨーロッパを中心に開発され、世界に広く普及した GSM (Global System for Mobile communications) では、より高いレートの伝送を行い、発生する符号間干渉をビタビ識別器などの処理により解消すると聞いたときは、私の大学院時代の研究テーマなので大変驚いた次第である。

ビタビ識別器のような時間領域の処理では、更に伝送レートが高くなると演算量が大変多くなってしまふ。アダプティブアンテナには、このような問題

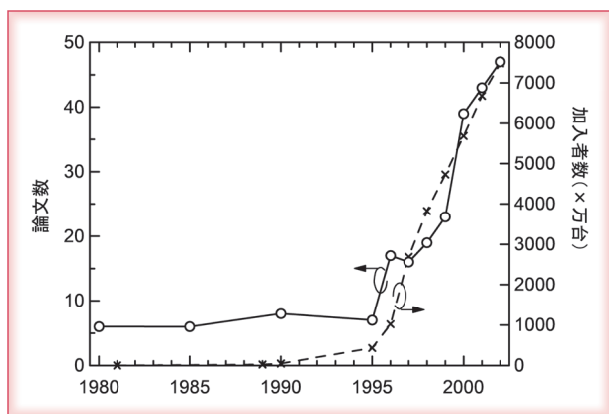


図5 電子情報通信学会総合大会におけるアダプティブアンテナの論文発表数と我が国の移動通信加入者数

がないため、その適用に期待が持てた。1994年から1995年にかけてヨーロッパで行われたTSUNAMI (Technology in Smart antennas for the Universal Advanced Mobile Infrastructure) と呼ばれるプロジェクトでは、この検討もなされた。私どものグループでアダプティブアンテナによる遅延波抑圧の問題を最初に発表したのが1983年なので⁽⁴⁾、ヨーロッパの研究に先ずること約10年であったことを自負している。しかし、残念なことに遅延波の問題はガードインターバルを用いたOFDMにより解決されることになり、アダプティブアンテナが用いられることはなかった。

我が国において、当初、アダプティブアンテナの研究が注目を集めなかったことと、その後の発展を示すデータが図5である。これは、電子情報通信学会総合大会(前身の電子通信学会全国大会を含む)におけるアダプティブアンテナに関する論文発表数と我が国の移動通信加入者数を示したものである。前者については、私が予稿集を1ページずつめくって数えることによって求めた。

まず、論文発表数を見てみよう。実線で示されており、目盛りは左側である。私がアダプティブアンテナの研究を開始した直後の1980年から1995年までの15年間は、毎回5件余りの寂しい件数であったことが分かる。発表者もほぼ決まっており、我が国のアダプティブアンテナ研究のパイオニア京大の鷹尾和昭助教授のグループ、東芝の研究所の方々、そして、私どもである。これで5件余りの論文数になってしまうわけである。このように顧みられることのなかった15年であったが、転機が訪れることになる。移動通信の普及である。図5の点線、右側の目盛りを見て頂きたい。1996年頃に我が国の移動通信加入者数が1,000万台を超えて急上昇すると、アダプティブアンテナの論文発表数が急

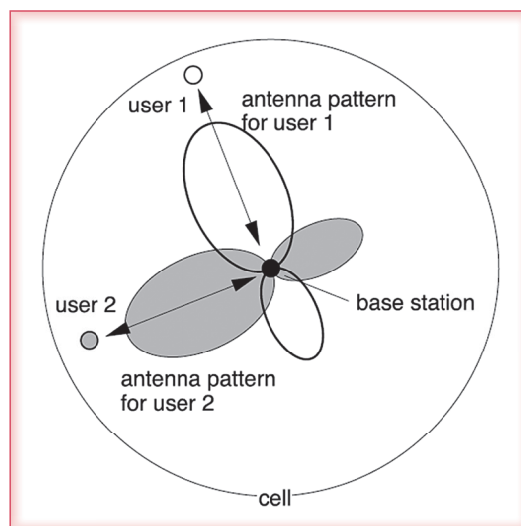


図6 マルチビームアダプティブアンテナによるSDMA

速に増えるのが見事に一致している。移動通信で通信量を増加させるためには、他ユーザからの干渉を抑えることが重要であり、それにはアダプティブアンテナが有効であることに多くの研究者が気付いたわけである。遅延波抑圧では出番のなかったアダプティブアンテナであったが、ここで商用通信への応用の道が見えてきたわけである。思えば長い道のりであった。京大で鷹尾先生のグループにおられ、現在は名工大で教授をされている菊間信良先生は、当時のことを御存じで、この図をお見せしたときには共感して頂いた。

3. SDMAからMIMOへ

移動通信へのアダプティブアンテナの適用で特に注目を集めたのは、空間分割多元接続SDMA (Space Division Multiple Access) である。この原理を図6に示した。基地局に複数のビームを形成できるマルチビームアダプティブアンテナを設置する。図1に示したアダプティブアンテナでは、1組のみの複素ウェイト $w_1, w_2, \dots, w_N$ が用いられていた。これにより、ウェイトベクトルが形成される。マルチビームアダプティブアンテナでは、複数の複素ウェイトの組を用いることになる(図6は2組)。つまり、ウェイトマトリックスを形成する。これを調整することによって、両ユーザからの干渉を受けず(上り回線)、両ユーザに干渉を与えない(下り回線)通信が可能になる。その結果、同一セル内で同じ周波数帯・同じ時間帯に干渉なく、複数のユーザを収容することができる。図1に示したアダプティブアンテナが干渉を切って捨てていたのに対して、図6のマルチビームアダプティブアンテナは

複数の希望波を分離して送受信するわけである。これがSDMAであり、周波数利用効率を改善する優れた方式である。私は大鐘武雄助教授、西村寿彦助手らと協力して、SDMAの評価についての研究を行った^{(6), (7)}。

21世紀の初めにかけて、SDMAは実用化を目指して画期的な動きがあった。電波産業会(Association of Radio Industries and Businesses, ARIBの略称が有名)で「PDMA無線通信技術に関する調査検討会」が1999年から2001年にかけて設置された。ここでPDMA(Path Division Multiple Access)はSDMAと同義である。この調査検討会は、PHS(Personal Handy-phone System)にSDMAを適用することについて検証することを目的としたものである。PHSは1995年にサービスが開始された移动通信システムで、携帯電話・スマートフォンの先駆けと言える。これは上下回線の分離にTDD(Time Division Duplex)が用いられており、アダプティブアンテナを導入しやすい方式になっていた。

調査検討会では、SDMA基地局は三洋電機(当時)が作製した。私は、この検討会に主査として参加する機会が与えられ、貴重な経験をするようになった。検討会では、ATR(Advanced Telecommunications Research Institute International)の電波暗室内でのSDMA通話試験に加えて屋外での試験も行い、SDMAが実環境で機能することを確認した⁽⁸⁾。この検討会の成果により、SDMAはPHSで用いられるに至った。これが世界初のSDMAの商用サービスである。アダプティブアンテナは、我が国において長きにわたって顧みられることがなかったことは先に述べた。私は、このような時代を知っているので、その技術が実用化される過程に立ち会えたときには万感の思いであった。PHSには、このような先端技術が導入されたが、その役割を終え、2023年3月にサービスが終了した。

この検討会で、私が得た貴重な体験をお話しよう。ATRの電波暗室内での通話試験のときである。PHS端末を持った私は、ほかの端末を持った実験担当者とは違い、基地局から見て一直線になる状況を作ってみた。つまり、図7に示したとおり、両ユーザがすれ違うときには、基地局から端末までのチャンネルは同一となり、空間分離できないことになる。そのため、「私どもがすれ違うときにSDMAは破綻して回線は切れるはず」と考えたわけである。ところが、回線はつながったままであった。「なぜだろう?」。更に、図8のように両端末を並べても

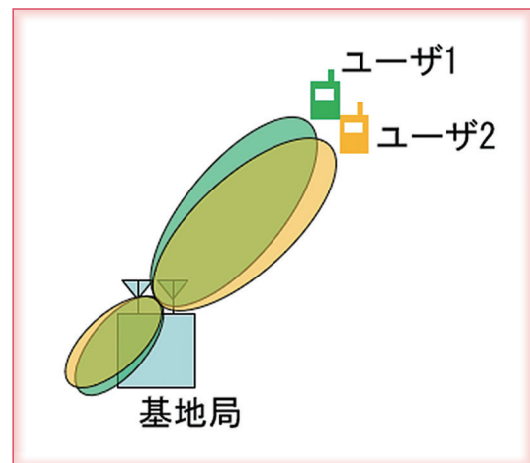


図7 SDMA適用時に両ユーザがすれ違う様子



図8 SDMA適用時に両端末を並べた様子
(北大の電波暗室内での再現イメージ)

回線は切れなかったのである。なお、両端末を並べたときの写真を調査検討会のときに撮影していなかったもので、図8は北大の電波暗室内での再現イメージである。SDMAは端末位置の違いで分離を行っているのに、なぜこのようなことが起きるのだろうか?

基地局から端末までのチャンネルが、直接波のみで構成されるのであれば、図7, 8のような環境では、両端末の信号を分離できず回線は切れることになる。しかし、実際のチャンネルには直接波のほかに人体からの散乱波や、電波吸収体からの僅かな散乱波からの寄与が含まれることになる。このような広がりを持った散乱波が存在する環境では、端末アンテナの僅かな位置のずれによってチャンネルが異なり、多重化が可能になるのである。つまり、周囲のマル

チパスによってチャネルの相関が低下していたことがSDMAの回線が切れなかった理由である。このことは、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) の空間多重の基本原則である。ATRの電波暗室での実験は2000年3月9日に実施された。このとき、私はまだ、MIMOという概念を知らなかった。私が初めてMIMOの研究を目にしたのは、同年5月に東京で開催された国際会議IEEE VTC2000-SpringでLucent Technologies Bell Labsからの発表⁽⁹⁾である。

ここに一つの教訓がある。「端末がほぼ同じ位置に置かれたとき、SDMAは破綻するはず」と考えてそのようにしてみたが、そうならなかった。つまり「こうすればこうなるはず」という仮説を立てて実施したが、そうならず矛盾が起きたわけである。矛盾が起きたときには徹底してこだわるのが新しい真実の発見につながることもある。私も2000年3月の実験の際に体験した矛盾にもっとこだわっていれば、同年5月のVTC2000-Springまで待つことなく、MIMOの研究を開始できたはずと悔やんでいる。MIMOの空間多重SDM (Space Division Multiplexing) とPHSに導入された空間分割多元接続SDMAは一字違いであり、技術的に極めて近いものである。SDMAで端末に複数のアンテナを設置するとマルチユーザMIMO⁽¹⁰⁾となる。

先に述べた「矛盾が起きたときに徹底してこだわること」に関連してお勧めの本がある。菊池 誠著「若きエンジニアへの手紙」である。私はダイヤモンド社から1990年に出版されたものを読んだが、現在も異なった出版社から発行されているようである。この本には、ノーベル賞を授与されたWilliam Shockleyがトランジスタを発明したときのエピソードが書かれている。それは実験を行っていたときに矛盾が起き、それに徹底的にこだわったことである。特に若い読者の方には、この本の一読をお勧めする。

もう一点、MIMOに関連してお伝えしたいことがある。それは、MIMOが空間多重によって通信量を改善できることは、マルチパスが生起するためである。つまり、MIMOはマルチパスを利用してのわけである。これまでは「マルチパスはフェージングを引き起こし、無線通信にとって有害」ということが常識であった。しかし、MIMOが利用されるに至った過程で、かつての常識がひっくり返されたわけである。このように、新しい技術を考える際、常識に捕らわれることは危険であると言える。かつてアダプティブアンテナが顧みられなかったと

き、信号処理を電波の世界に適用することは非常識という趣旨の発言を頂いた。しかし、このような考えも時代が否定してくれた。「研究とは、今日の非常識を明日の常識に変えるもの」と私は考えている。

現在、第6世代移動通信を目指した、サブテラヘルツ帯(100~300 GHz)におけるMIMO空間多重の研究を鋭意続けている。その結果についての紹介はこの記事では割愛し、学会での発表に譲ることとする。次章では、私のもう一つの研究テーマについて述べることにする。



4. 電磁波の高分解能推定

ここで時計の針を1980年代に戻そう。アレーアンテナに信号処理を適用することによって空間領域での信号処理が可能になる。このような技術のアレー信号処理と呼んでいる。その応用がこれまで述べてきたアダプティブアンテナであり、MIMOシステムである。アレー信号処理には、もう一つ重要な適用領域がある。それは、信号到来方向の高分解能推定である。アレーアンテナで主ビームを走査してピークを求めることによって到来波の方向を推定できることは言うまでもない。しかし、このようなビームフォーマ法では、その分解能は、アレーの開口長を D 、対象とする電波の波長を λ とすると、 λ/D で与えられる。この式から分かるように分解能は開口長 D に大きく制限されることになる。この限界を超える手法が高分解能推定である。私がよく用いる手法はMUSIC (Multiple Signal Classification) 法である⁽¹¹⁾。

ここで、MUSIC法によって高分解能が実現される原理を説明しよう⁽¹²⁾。図9は半波長間隔5素子リニアアレーによるビームフォーマ法の結果である。0°と10°の方向から到来している2波を分離できていないことが分かる。MUSIC法では、各アンテナ素子で受信された信号の相関行列の雑音固有ベクトルを用いて走査を行う。図10にその結果を示したとおり、2波を見事に分離している。なお、この2波は無相関と仮定している。5素子アレーに無相関な2波が入射しているので、二次元の信号部分空間に直交している雑音部分空間は三次元となる。相関行列の3個の雑音固有ベクトルは、この雑音部分空間を張っている。したがって、これら雑音固有ベクトルを使って励振した3個のアレーの指向性は、信号到来方向にヌルを形成することになる。これが図11である。ヌルは主ビームとは比べものにならないほど鋭いので、両信号方向に向けら

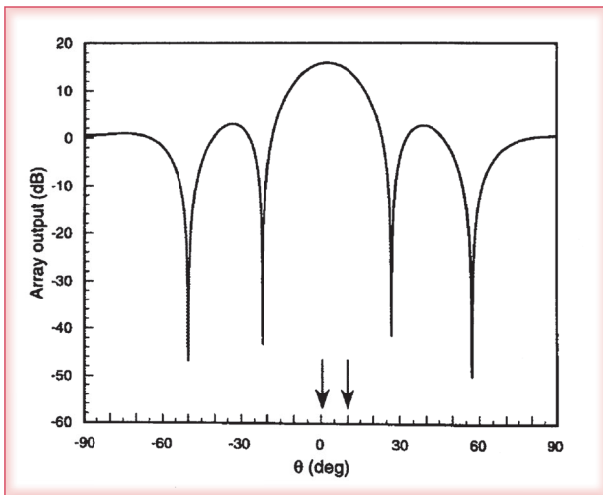


図9 ビームフォーマ法による到来方向推定
文献(12)から転載 ©電気学会

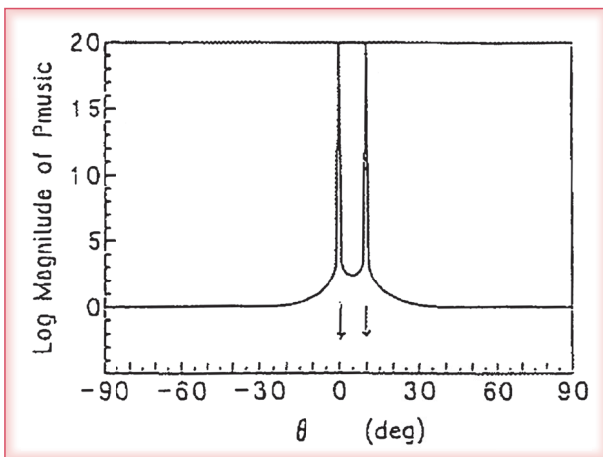


図10 ビームフォーマ法による到来方向推定
文献(12)から転載 ©電気学会

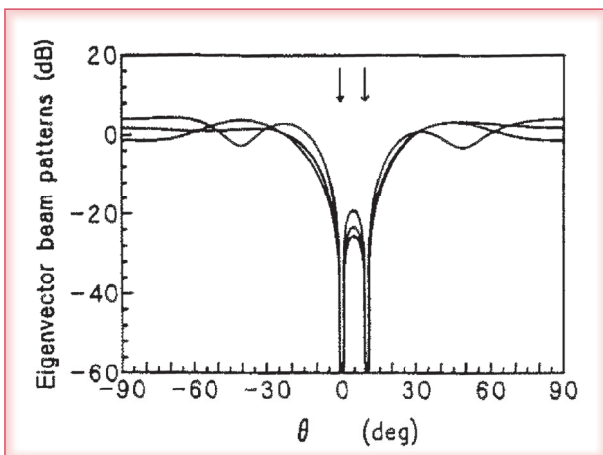


図11 雑音固有ベクトルのビームパターン
文献(12)から転載 ©電気学会

れたヌルは分離されていることが分かる。これら3個の指向性の振幅の二乗和の逆数が図10である。ピークはヌルの逆数となることから、ビームフォーマ法に比べてはるかに高い分解能が実現できることになる。

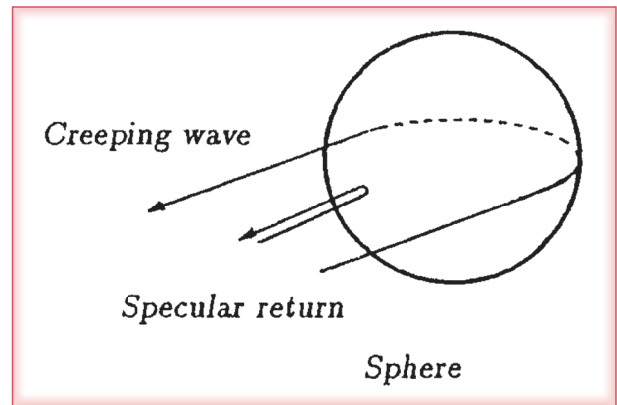


図12 導体球による後方散乱

アレー信号処理は面白い研究と感じていたとき、大きな転機が訪れることになる。1987年のことである。私の上司である伊藤精彦先生が代表者となって申請した科学研究費補助金が採択され、研究室に最新鋭のネットワークアナライザが導入された。これはアンテナや各種の電磁波回路の反射特性と透過特性を周波数領域で測定する装置である。ここで導入されたネットワークアナライザは、従来のものと異なり、測定された周波数領域のデータ（複素振幅）に IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) を適用して時間領域に変換することが可能であった。これにより、「被測定対象のどこで反射が起きているか」などが直ちに分かることになる。しかし、フーリエ変換をベースにした処理なので、時間領域で高い分解能を得るためには広い周波数帯域にわたる測定データが必要になる。先に述べた、ビームフォーミングによる到来方向推定で高い分解能を実現するには大きな開口長が必要であったことと同じである。到来方向推定に適用できた高分解能技術をネットワークアナライザで測定された周波数領域データに用いることによって高い分解能を有した時間応答を推定できることに気が付いた。これが時間領域の MUSIC 法である⁽¹³⁾。狭帯域な被測定対象に有効となる手法である。

ここで実験結果を紹介しよう⁽¹⁴⁾。導体球に電磁波を照射すると、図12に示したように幾何光学波である正規反射波 (Specular return) と、球の表面上を沿う経路をたどり回折するクリーピング波 (Creeping wave) が後方に散乱される。直径 101.6 mm の導体球に電磁波を照射して後方に散乱された成分をネットワークアナライザで観測し、IDFT を適用して時間領域の応答を求めた結果が図13である。横軸の時間は相対的な値である。-0.3 ns 付近に正規反射波、0.5 ns 付近にクリーピング波が存在している。パラメータは測定に用いた周波

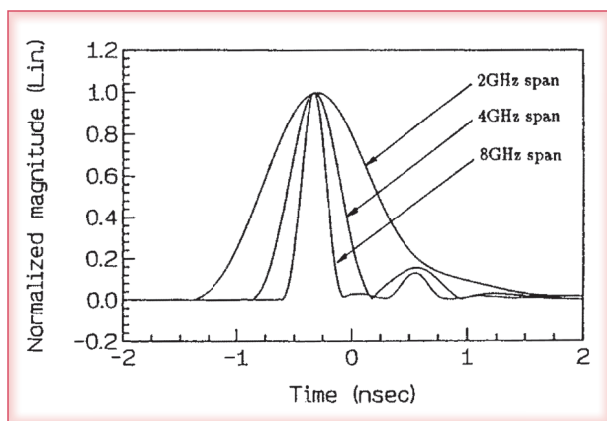


図 13 IDFT による導体球の後方散乱時間領域推定
文献(14)から転載 ©電子情報通信学会

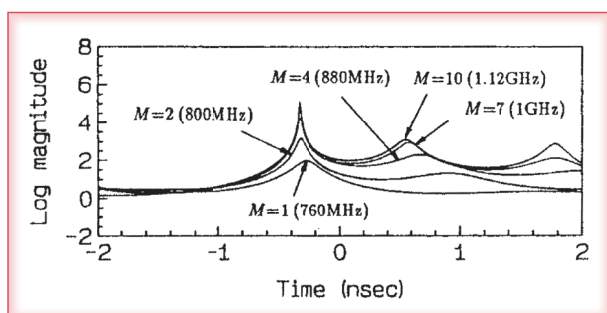


図 14 MUSIC 法による導体球の後方散乱時間領域推定
文献(14)から転載 ©電子情報通信学会

数帯域幅である。2 GHz ではクリーピング波は全く認められない。二つの応答が完全に分離できるためには 8 GHz もの広い周波数帯域幅を必要とすることが分かる。

MUSIC を適用した結果が図 14 である。ネットワークアナライザで測定の対象となる量（この測定では、正規反射波の反射係数とクリーピング波の回折係数）は確定した値であり、ランダム変数ではない。そのため、これらは相関が 1、つまり、コヒーレントな量である。このとき相関行列の信号部分空間は一次元になってしまい、MUSIC 法が適切に動作しない。この問題を解決するため、空間スムージングと呼ばれる前処理を適用することが提案されている⁽¹⁵⁾。

ここで、空間スムージングについて簡単に説明を行う。ネットワークアナライザで測定された複素振幅を、要素数が等しい複数のグループに分ける。これをサブアレーと呼んでいる。各サブアレーの相関行列を求めて、その算術平均を計算する。この操作が空間スムージングである。このようにして得られる相関行列では、異なる時間を有する信号間の相関が 1 より小さくなるので、MUSIC を適用できるようになる。空間スムージングは演算負荷の小さな前処理のため、MUSIC をコヒーレントな信号に適用

する際には広く用いられている。

図 14 の M は、この前処理に用いられるサブアレー数を表すパラメータである。括弧内の値は、用いた周波数帯域幅である。1.12 GHz の帯域幅で 2 波を分離できていることが分かる。IDFT が必要とした 8 GHz に比べると、MUSIC 法は 14 % の帯域幅でよいことが分かる。

1992 年 11 月から翌年 8 月まで、文部省（当時）在外研究員として米国オハイオ州コロンバスにあるオハイオ州立大エレクトロサイエンス研究所で、このテーマに関する研究に従事する機会を頂いた。その研究成果⁽¹⁶⁾により、同大学の大学院生の学位取得に協力することができたことは本当に良かったと思っている。また、私が同大学に滞在中に対応を頂いたりサーチサイエンティストの Eric Walton さんとは、2020 年に亡くなられるまで、クリスマスカードと年賀状の交換を行った。緑豊かなコロンバスの住宅街と Walton さん御一家との交流は良い思い出である。

5. おわりに

このように、私は電波と信号処理についての研究の道を行ってきた。電波の挙動を表すのはマクスウェルの電磁理論である。ここで、信号処理を拡大してシャノンの情報理論まで含めることにしよう。多くの研究者は「これら二つの理論は遠く離れた存在」と考えてきたと思う。一方、メタマテリアルやパッチアンテナを用いた RIS (Reconfigurable Intelligent Surface) を用いることによって、電波環境も制御可能となることが知られている。これはスマート無線環境と呼ばれ、第 6 世代移動通信に向けて研究が加速されている⁽¹⁷⁾。この分野の研究には、上記二つの知識を同じような割合で必要とされると考えられる。若い皆さんには、マクスウェルとシャノンを自分にとって等距離の存在として研究に励んで頂きたい。

ここまで、私が経験してきたことを自由に記述させて頂いたが、御指導を頂いた先生、上司の方、同僚と部下の方々、そして、私を信頼して一緒に研究に励んでくれた学生の皆さんに心からの感謝を申し上げたい。このように書くと、私は研究から完全に引退したように感じるかもしれない。確かに、私は 2015 年に北大を定年退職したが、無線通信の研究の地平線を目指してこれからも歩み続けて行きたい。幸いなことに学会に定年はない。

■ 文献

- (1) 小川恭孝, 仙石正和, 松本 正, “ビタビ識別器を含む受信系の最適化,” 信学論 (B), vol. 62-B, no. 1, pp. 58–65, Jan. 1979.
- (2) Y. Ogawa, M. Ohmiya, and K. Itoh, “An analog open-loop adaptive array antenna system,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-19, no. 1, pp. 89–102, Jan. 1983.
- (3) 小川恭孝, 徳田 英, 佐々木正己, 大宮 学, 伊藤精彦, “LMS アダプティブアレイアンテナを用いたテレビジョン信号の混信波抑圧,” テレビ誌, vol. 39, no. 6, pp. 503–508, June 1985.
- (4) 小川恭孝, 大宮 学, 伊藤精彦, “LMS アダプティブアンテナを用いた相関性妨害波の抑圧, –アダプティブアンテナのフェージング軽減への応用–,” 信学技報, A・P83–54, Aug. 1983.
- (5) Y. Ogawa, M. Ohmiya, and K. Itoh, “Fading equalization using an adaptive antenna for high-speed digital mobile communications,” Proc. ISAP'89, vol. 4, 4A2–3, pp. 857–860, Aug. 1989.
- (6) 岸山祥久, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, 土井義晴, “SDMA 方式上り回線における CRA-AA を用いた特性改善とキャリア周波数オフセット補償,” 信学論 (B), vol. J84–B, no. 2, pp. 178–187, Feb. 2001.
- (7) T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, Y. Doi, and J. Kitakado, “Space domain multistage interference canceller for SDMA,” IEICE Trans. Commun., vol. E84–B, no. 3, pp. 377–382, March 2001.
- (8) Y. Doi, J. Kitakado, T. Ito, T. Miyata, S. Nakao, T. Ohgane, and Y. Ogawa, “Development and evaluation of the SDMA test bed for PHS in the field,” IEICE Trans. Commun., vol. E86–B, no.12, pp. 3433–3440, Dec. 2003.
- (9) R. Nee, A. Zelst, and G. Awater, “Maximum likelihood decoding in a space division multiplexing system,” Proc. IEEE VTC 2000-Spring, pp. 6–10, May 2000.
- (10) 小特集: マルチユーザ MIMO —マルチアンテナとマルチユーザの相乗効果による通信速度向上, 信学誌, vol.97, no.4, pp.273–312, April 2014.
- (11) R.O. Schmidt: “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-34, no. 3, pp. 276–280, March 1986.
- (12) 小川恭孝, 伊藤精彦, “MUSIC 法による高分解能推定,” 電学論 A, vol. 116-A, no. 8, pp. 671–677, Aug. 1996.
- (13) H. Yamada, M. Ohmiya, Y. Ogawa, and K. Itoh, “Superresolution techniques for time-domain measurements with a network analyzer,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 39, no. 2, pp. 177–183, Feb. 1991.
- (14) 山田寛喜, 小川恭孝, 伊藤精彦, “スーパーレゾリューション法を用いた導体球の散乱中心推定,” 信学論 (B-II), vol. J77-B-II, no. 3, pp. 139–148, March 1994.
- (15) T.J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, “On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 33, no. 4, pp. 806–811, Aug. 1985.
- (16) A. Moghaddar, Y. Ogawa, and E.K. Walton, “Estimating the time-delay and frequency decay parameter of scattering components using a modified MUSIC algorithm,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 42, no. 10, pp. 1412–1418, Oct. 1994.
- (17) M. Di Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M-S. Alouini, C. Yuen, J. Rosny, and S. Tretyakov, “Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 38, no. 11, pp. 2450–2525, Nov. 2020.

FM 音源の開発史と ヤマハシンセサイザ

ヤマハ株式会社電子楽器事業部 Yamaha Corporation

1. FM音源との出会い

FM 音源誕生の歴史は 1972 年に遡る。FM とは Frequency Modulation の頭文字を取ったもので、日本語では周波数変調と呼ばれており、ラジオの FM 放送に使われる FM と言葉としては同じものである。ラジオの場合には搬送波と呼ばれる基本波形の周波数を変化させることで、伝送したい波形を表現する伝送方式のことを指す。一方、1972 年に当時スタンフォード大に所属していたジョン・チョウニング博士が、基本波形（変調される側）と変調波形の両方が可聴周波数域にある場合、二つの波形の周波数比率によって様々なスペクトルが発生することを発見した。更にその事象をロジカルな回路で再現できることを証明して特許を取得した。これを様々な電子楽器メーカーに新たな音源方式として売り込んだことが、FM 音源誕生のきっかけとなる。

1970 年代前半の電子楽器と言えば電子オルガンが主流で、シンセサイザとして販売されていたものも、アナログシンセサイザと呼ばれる電子回路の発振器をベースにしたものしかない時代だった。そのため、FM 音源という全く新しい技術を理解できる楽器メーカーはほとんどなく、チョウニング氏の FM 音源を採用して製品化するという電子楽器メーカーはなかなか現れなかった。

そんな中、1973 年にヤマハの音源開発技術者にもチョウニング氏の FM 音源特許が紹介される機会が訪れる。FM 音源技術の説明を受けた技術者たちは、日本に帰った後に早速特許公報に記載されている回路をトランジスタトランジスタ論理回路 (TTL) の組合せで再現した。このときの試作で出した音が、それまでの音源では聞いたことがない、本物のトランペットそっくりの音が出たため、その場に居合わせた誰もが FM 音源の可能性を感じたのである。

これを機にヤマハ社内では、電子オルガン「エレ

クトーン」用の音源を開発するセクションや、ポピュラーミュージックで使用する楽器類（ヤマハでは軽音楽を意味する Light Music の頭文字を取り「LM 楽器」と呼ぶ。）を開発するセクションなど、FM 音源を使用した音源開発を行うプロジェクトが幾つか同時に進行していく。ヤマハがアナログシンセサイザ 1 号機の「SY-1」を発売したのが 1974 年のことなので、それ以前から既に FM 音源の開発が行われていたことになる。その後、1975 年には正式にスタンフォード大とヤマハとの間で、独占使用を含む FM 音源特許の使用許諾契約が結ばれた。

2. アナログシンセサイザの基本構造

FM 音源の原理を説明する前に、アナログシンセサイザの基本構造を説明する（図 1）。

シンセサイザには、音そのものを発生する発振器（オシレータ）がある。アナログシンセサイザの場合には電圧を変化させることで発振器の周波数が変化し、結果として音程（ピッチ）の変化を得られる VCO（Voltage Controlled Oscillator）を用いる。鍵盤に抵抗を配置して制御電圧を変化させれば音階が奏でられる仕組みが、電子キーボード（オルガン）や鍵盤付きシンセサイザの基本構造となる。（注、ほかの方式もある。）この構造だけだと鍵盤がスイッチになったブザーのようになってしまうので、音量を変化させるアンプを併用して、電圧によって音量を変化させる VCA（Voltage Controlled Amplifier）を用いる。更に、電圧制御で音色を変化させるフィルタ（例えば低減フィルタ）を併用する VCF（Voltage Controlled Filter）を用いれば、音を明るくしたり暗くしたりといったことが可能になる。この三つの要素がアナログシンセサイザの基本要素になる。

また、この要素に加えて時間的な電圧変化を作り

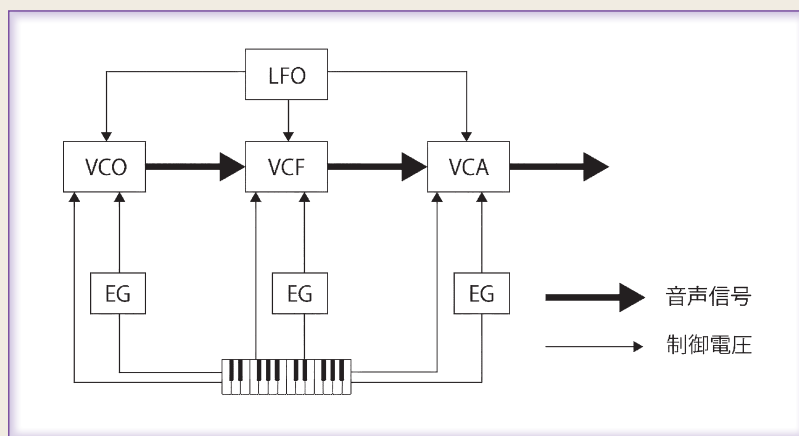


図1 アナログシンセサイザの基本構造

出すエンベロープジェネレータ (EG) という装置もあり、鍵盤を弾いたときを基軸に VCA に対して EG を動作させると、立ち上がりの遅い音や、余韻の長い音などを作り出すことができる。

音色に関しては、例えば低減フィルタを使用した場合、低減フィルタのカットオフ周波数を下げていくとだんだんと高域成分 (倍音成分) が削られ、丸い音になる。基本的にオシレータから発せられる音の特定成分を削る方向で音作りを行うので、このタイプを「減算方式のシンセサイザ」と呼ぶ。

フィルタの特定周波数を共振させて強調することも可能だが、基本的に発振器から発せられる音の倍音成分を最大値として、倍音を抑える方向でしか音作りができない。このため、金属を叩いたような高次倍音の多い音を作成するには、変調 (モジュレーション) 装置を併用して意図的に倍音成分を作り出す。リングモジュレータなどは代表的な変調装置の一つである。

このほかにも、LFO (Low Frequency Oscillator) と呼ばれる低周波発振器を用いたビブラートやトレモロを行う装置も、変調装置の一つと言える。LFO を使用した変調では、鍵盤を弾く位置を変えて音源

部分のオシレータピッチが変化しても LFO の周波数は変わらないことがほとんどなので、どこを弾いても似たようなビブラートになるだけだが、LFO の代わりに別の VCO を用いて (VCO が複数あるシンセサイザであることが前提。) 音程に合わせて変調させると、基準音「A (ラの音) = 440 Hz」の正弦波を 440 Hz の正弦波でビブラートするようなイメージになる。1 オクターブ上の 880 Hz に対しては、変調する側のオシレータも同様に周波数が上がるので 880 Hz で変調することになる。このようにするとただのビブラートではなく、少し変わった音色になりつつも音程の変わらない音色が得られる。アナログシンセサイザにはこのような機能を持ったものもあり、オシレータをオシレータで変調することから「クロスモジュレーション」と呼ばれる。これを波形で表すと図2のようになる。

実は、チョウニング氏の FM 音源開発のヒントとなったのは、ビブラートをかける LFO の周波数を間違えて高周波にしてしまったことであると言われている。

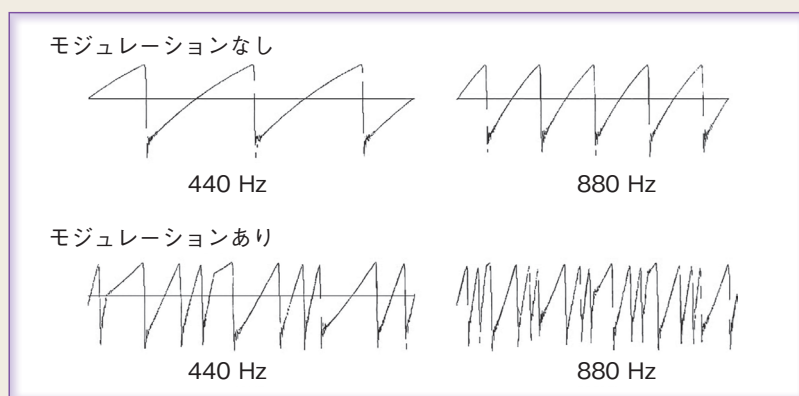


図2 アナログシンセサイザのオシレータをモジュレーションで変調させた場合

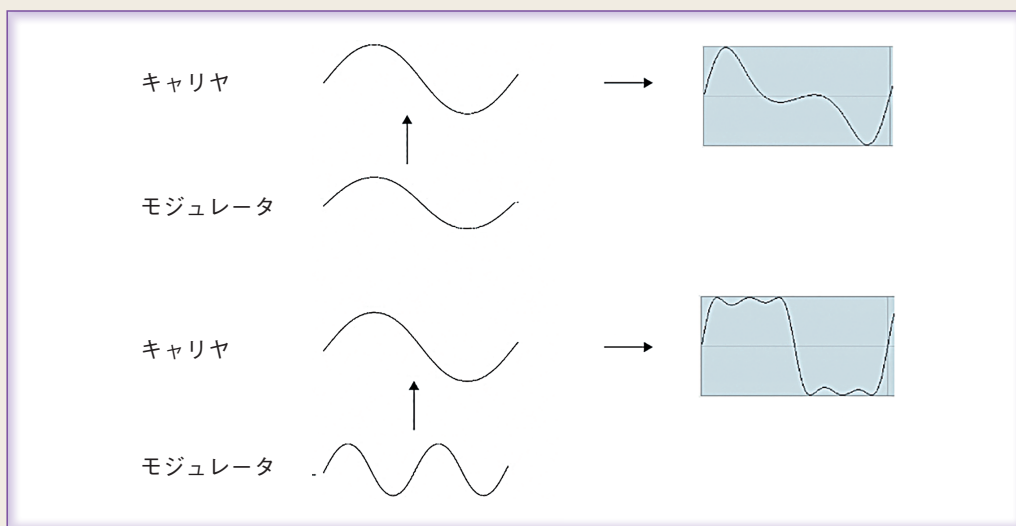


図3 キャリアとモジュレータを掛け合わせたイメージ（右軸は時間）
上はキャリアとモジュレータが等倍の掛けせ。下はモジュレータがキャリアの2倍の周波数での掛けせ。

3. FM音源の原理

ここからがようやくFM音源の解説になる。自身はデジタルで実現されているが、波形の形などはアナログシンセサイザの解説と何ら変わらないので、余り意識せずに読み進めてほしい。

チョウニング氏のFM音源理論では、変調される側のオシレータをキャリアと呼び、変調する側のオシレータをモジュレータと呼んでいる。音階を奏でられる通常の音色を作る場合には、キャリア波形の1サイクルに対してモジュレータの波形がどのように掛け合わされるかで音色が決定される（モジュレータの周波数がキャリア周波数の倍数になるという意味。）ので、イメージは図3になる。もちろんキャリア波形の倍数に限定しなくても変調自体は可能だが、一定の周波数の繰返しでなければ音程として認識できない音になってしまうので、この時点ではキャリア波形の1サイクル内に限定して解説を進める。

図3ではモジュレータの波形によって変調された結果が右側に表示されている波形の形になることが示されているが、モジュレータ波形の振幅が0であればキャリアの波形がそのまま再生されることになる。

図3を書き直して縦線の位置にあるキャリアの値を出力すると考えた場合、縦線が移動しなければ、キャリアの波形は一定の速度で縦線の位置を通過していくので、出力はキャリアそのものになる。しかし、縦線をモジュレータの波形で前後に揺らしてあげると、図3の上の例と同じように波形が変

形していく。

結果として出力される波形はモジュレータの振幅によって大きくひずんでいくのに加え、モジュレータの周波数が高くなると、出力波形により高い周波数の倍音成分が現れることになる。

書き直した図4ではキャリアの波形をつなげて表示しているが、実際には同じ波形の繰返し（正弦波の繰返し）がオシレータから出ているだけなので、この縦線をモジュレータで揺らすということは、キャリアの読出しポイントを1サイクルの位相0度から360度の間でずらしていることになる。この状態は一般的な変調方式の分類でいうと位相変調という分類に入るが、音程感を余り重視しない打楽器や効果音を作成する場合には、モジュレータの周波数がキャリア波数で割り切れる倍率関係にならずに、キャリアやモジュレータの周波数を固定して変調する場合もあるので、広い意味で周波数変調となる。

4. FM音源製品化への取組み

FM音源の大まかな仕組みを理解したところで、再びヤマハにおけるFM音源開発の話に戻る。

FM音源を製品化する試作を繰り返していた1970年代前半には、同時にエレクトーン音源の表現力を拡張させる技術として、鍵盤を弾く強さに応じて音量や音色が変わる技術、タッチレスポンスの研究を進めていた。電子楽器を奏者の感性に合わせてコントロールすることができるようにするというプロジェクトは、社内の開発コード名TRX（TRは

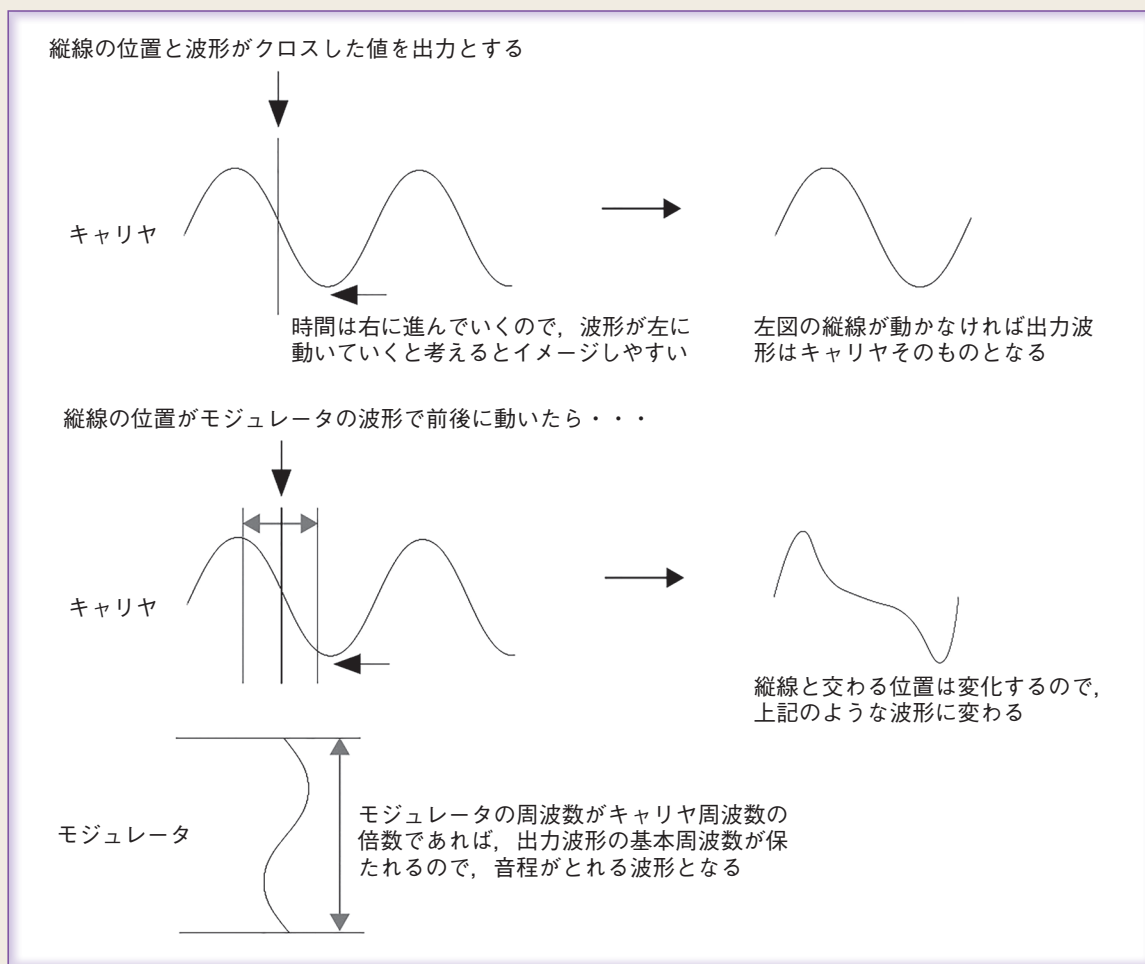


図4 モジュレータでキャリアの読出しタイミングを変える（横軸は時間）

※ DX7などに搭載されるFM音源は正弦波の読出しタイミングを変更可能

Touch Responseの頭文字、図5)と呼ばれる試作機を作り出した。

元々、ほかの音源方式を用いていたTRXにFM音源を搭載したTRX 3号機を完成させると、社内でその音の表現力が評判となり、FM音源をLSI化することが決定された。

このタッチレスポンスとFM音源の関係性は非常に重要で、単に音そのものの音量を変化させるだけでなく、モジュレータの音量を変化させることに



図5 TRX

タッチレスポンスを使用すると、弾く強さによって倍音の量を変化させられるのである。

高次倍音の生成とタッチによる表現力を兼ね備えたFM音源の試作機は、商品としてリリースするためにいくつかの音色を作成し、様々なミュージシャン／アーティストの意見を聴くというフェーズに移行する。その中で「音はきれいだが、リッチネスに欠ける」という指摘がなされた。

この課題を解決する手段として開発されたのが「フィードバックFM」という機能である。これは、キャリアの出力を再度そのキャリアの入力に戻すことで、キャリアの波形でモジュレーションを行うという仕組みである。モジュレータ用にオシレータを一つ潰す必要がなくなるのに加え、フィードバックさせたオシレータをモジュレータとして使用すれば、更に複雑な波形を生み出すことも可能になる。また、正弦波のオペレータ（後述する）でこのフィードバックゲインを上げていくと、アナログシンセサイザの音作りにおいてブラス系音色などを作成するのによく使用される「ノコギリ波」に近い波

形が簡単に得られるという利点もあり、ヤマハ製 FM 音源の大きな特徴になっている。ちなみにヤマハはこのフィードバック機能についての特許を取得した。

5. FM音源のシンセサイザ化

このようにしてブラッシュアップされた FM 音源は 1981 年にエレクトーンの最上位機種である「F-70」とステージキーボード「GS1」（図 6）として商品化された。このときの FM 音源はキャリアとモジュレータの組合せが 4 系統あるだけというシンプルなものだった。しかし、音色を作成するには開発用の専用音色プログラマを使用しなければならず、楽器本体では音色エディットができなかったのである。

シンセサイザとして商品化するにはユーザが音色を自由に作成、変更できる機能が必要になるが、商品化までこぎ着けた FM 音源をシンセサイザとしても商品化し、誰でも自由に音作りができるようにするプロジェクトも GS1 や F-70 の開発と並行して動いていた。

このとき注目されたのが、プログラマブルな音源を作成するという発想から生み出された試作機 PAMS（Programmable Algorithm Musical tone Synthesizer、図 7）である。これは、FM のみならず振幅変調や位相変調、加算合成など様々な音源方式をデジタルで実現し、音作りの自由度を極限まで追求した試作機であった。

そして、PAMS をベースにした FM 音源システムを組み込んだシンセサイザの商品化プロジェクトが立ち上がった。しかし、FM 音源システムは、GS1 でも専用のプログラマを使用しないと音作りができないほど複雑だったため、専門知識を持たない人でも音作りができるようにするには、かなりの工夫が必要だった。

そこで、キャリアにもモジュレータにもなるそれぞれのオシレータを「オペレータ」という呼び名に統一し、それらの結線（変調なのか、加算なのかなど）をテンプレート（「アルゴリズム」と呼ぶ）として固定し、デジタルシンセサイザならではの概念を構築したのである。更に各オペレータの周波数を Hz ではなく倍数で表示させるなど、音色作りのしやすさと自由度を極限まで突き詰めたユーザインタフェースに仕上げ、1983 年に「DX7」（図 8）と

してリリースしたのである。

DX7 は演奏情報のデジタル通信規格として 1982 年に規格制定された MIDI（ミディ）機能を搭載し、音源部分から制御部分に至るまで、全てをデジタル化した世界初のフルデジタルシンセサイザとしても注目され、瞬く間に世界中に広まっていった。

DX7 では正弦波を発生するオペレータを六つ搭載しており、それぞれをキャリアとして使用したり、モジュレータとして使用したりする代表的な組合せ（アルゴリズム）を 32 種類搭載している。



図6 GS1

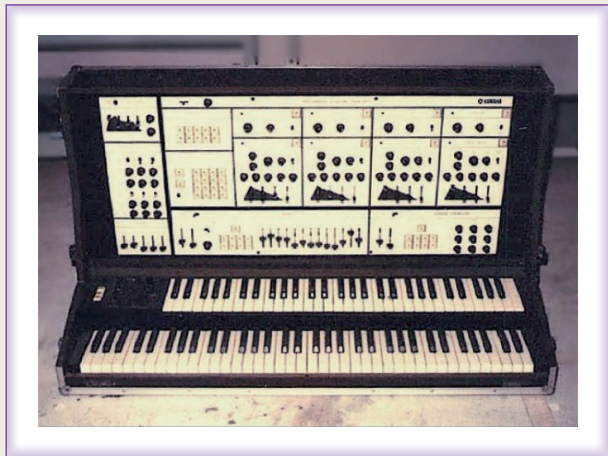


図7 PAMS



図8 DX7

例えば、六つのオペレータを並列に並べたアルゴリズムでは、単に正弦波6種類のミックスとして出力されるので、正弦波加算のオルガンと同じような音作りが可能だ。(この状態では全く変調しない。) キャリヤとモジュレータの組合せが3組ミックスされたアルゴリズムでは、1組目で金属的なアタック成分を作成し、残りの2組でチューニングの異なる音のボディー部分を奏でるなど、それまでのアナログシンセサイザを使った音作りの知識を応用できるような仕組みになっている。

現在のFM音源システムでは、オペレータの波形に正弦波以外の波形を用いることもできるため、より複雑な音作りも可能になっている。

6. FM音源の応用——現在のヤマハ製品におけるFM音源の活用——

このようにチョウニング氏のFM音源特許技術は、ヤマハの音源開発チームによって誰もが音作りを行うことができるシンセサイザ音源の一つとして完成し、現在でも様々な機器に使用されている。

DX7のリリースをきっかけに様々なサウンドクリエイターがFM音源を研究し、音色を作成したことで、音色ライブラリのみを販売するというビジネスにも発展していった。その後、マルチチャネル型(同時に複数のパートを演奏できる形式)のFM音源も登場し、ピアノ、ベース、ドラムといった音色を同時に再生できる、現在のDTM(Desk Top Music)音源に相当する製品までリリースされた。

アナログシンセサイザが全盛だった頃には、シンセサイザというとポピュラーミュージックの世界ではリード系の音色や包み込むような柔らかいパッド系の音色を奏でるのが主流だったが、倍音構成が複雑な音色まで制作することができるFM音源でDTM音源的なものが登場すると、演奏データ(MIDIデータ)を使用した再生機への応用も普及していく。ゲームの効果音やBGMのクオリティーが格段に上がったのも、このFM音源が一つの要因とも言える。

また、フルデジタルで構成されているFM音源LSIは小形で、メモリの消費量も少ないため、その後に普及する携帯電話の着信メロディー用音源などにも応用されていった。

1980年代後半には、実際の楽器音をサンプリングして音源として使用するPCM音源がデジタル



図9 MONTAGE M



図10 MODX+

シンセサイザの主流となり、ヤマハも「AWM音源」という名称でPCMタイプの音源にシフトしていく。PCM音源の良さは、楽器そのものの音をデジタル録音したものをベースにしているため、リアリティという面においては非常に優れており、1990年代から2010年代におけるデジタルシンセサイザの主流になった。しかし、近年ではシンセサイザを使って今までに聞いたことがない音や創造的な音、有機的に変化する音が求められるようになり、パラメータ変更で劇的に波形を変化させることができるFM音源に関心が寄せられている。

ヤマハでもAWM音源のみのシンセサイザから、FM音源を含む複数の音源システムを組み合わせたシンセサイザであるMONTAGE Mシリーズ(図9)やMODX+シリーズ(図10)をリリースしている。最新のFM音源は「FM-X」と呼ばれており、8オペレータ、88アルゴリズムで構成されている。オペレータの波形も7種類と豊富に装備されているのに加え、オペレータの波形自体を変化させる機能なども搭載しており、DX7時代のFM音源からは大幅に進化している。

本物の楽器と同じ音が出るということを目指した電子楽器作りから、「創造的な音を作る」という本来のシンセサイズ(合成)という意味でのシンセサイザが熱望されつつある現在の音楽シーンにおいて、半世紀前に出会ったFM音源技術が改めて注目されているのである。

北東北の歴史と食文化を楽しむ 「岩手・盛岡」

街plus
探訪

岩手大学 本間尚樹 Naoki Honma

1 はじめに

盛岡市は北東北・太平洋側に位置する岩手県の県庁所在地で、豊かな自然・歴史・食に恵まれた中枢中核都市です。本州にありながらも独特の気候・文化があり、県外からの方には新鮮で楽しめる見どころ・食がたくさんあります。筆者は盛岡に移住して10年余りの浅学者ではございますが、拙筆ながら盛岡市とその周辺を御紹介申し上げたいと思います。

2 アクセス・地理

図1に岩手・盛岡への鉄路・空路の概要を示します。鉄道なら、東京から新幹線「はやぶさ」で最速2時間10分（2023年現在）です。ほぼ東京ー京都間の時間と同じです。空路なら、福岡、神戸、大阪（伊丹）、名古屋（小牧）、札幌から、いわて花巻空港に定期便が運航されています。岩手県は日本で最も面積が大きい県で、都道府県としては北海道の次の大きさとなります。

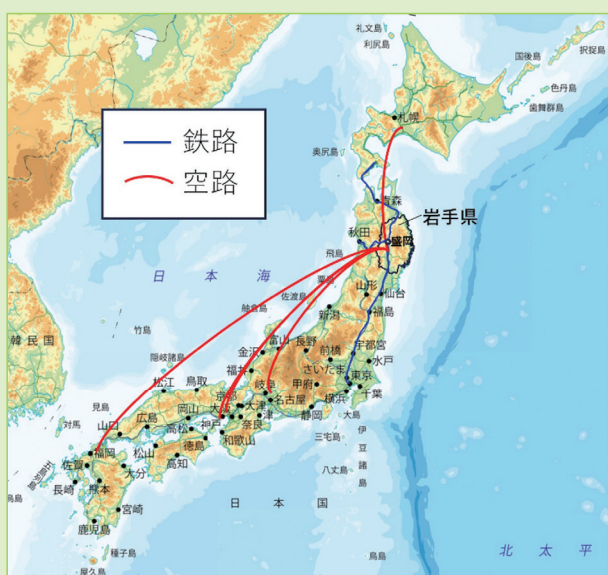


図1 岩手・盛岡へのアクセス
(国土地理院地図に筆者加工)

新幹線で岩手県を通過すると長く感じられ、長さは静岡と同等でありながら面積は2倍あります。沿岸にはテレビドラマにて北限の海女で有名になった三陸リアス式海岸、盛岡の奥座敷とも呼ばれるつなぎ温泉、標高2,038 mの岩手山、日本最長と言われる鍾乳洞、盛岡市中心部を流れ東北最大の流域面積を持つ北上川など、多くの自然に恵まれています。盛岡市の気候は冷涼で厳冬期は-10℃を下回る日があります。盛岡市の薮川はケッペンの気候区分によると亜寒帯に分類され⁽¹⁾、-20℃以下となることがあります。

3 見どころ

3.1 盛岡駅

東北新幹線が1982年に開業し、当時は盛岡駅が東北新幹線の終点でした。現在は盛岡駅から北海道と秋田に新幹線が延びており、「はやぶさ号」と「こまち号」の連結・切離しが見られる駅ということで有名です。（人だかりができません。）盛岡駅1階には多数の飲食店・お土産屋があり、名物の瓶詰め生ウニ、日本酒をはじめ様々なお土産が手に入ります。隣接する駅ビル地下にも飲食店が充実しており、ここで盛岡らしい食を楽し



図2 岩手山を一望

しむことができます。なお、盛岡駅南口を出ると盛岡市出身の新渡戸稲造の胸像があります。

3.2 岩手山

盛岡駅を降りて市内中心部に向けて移動すると、徒歩5分ほどで北上川に架かる開運橋があります。開運橋から川の上流を見ると岩手山が大きく見えます。岩手山は市内のあちこちから望むことが可能で、あえてそういう街づくりをしていると聞いたことがあります。個人的には郊外の国道沿いから見る岩手山が一番気に入っています（図2）。

3.3 石割桜

盛岡地方裁判所の敷地内には、「石割桜」と呼ばれる、巨大な岩の割れ目から生えるエドヒガンザクラの巨木があります（図3）。樹齢は360年以上と言われ国の天然記念物に指定されています⁽²⁾。見頃は4月中旬です。この時期に盛岡を訪れたらこの桜は必見です。盛岡駅からバスで10分ほどです。



図3 石割桜



図4 中津川に架かる上の橋の擬宝珠

3.4 中津川

盛岡駅前の中津川と北上川と雫石川の三つの川が合流します。そのうち中津川を遡上すると、盛岡城跡をはじめ、下の橋・中の橋・上の橋といった建造物があります。特に上の橋には国の重要美術品に指定される擬宝珠があります（図4）。橋自体は何度も流出しているようですが、擬宝珠は江戸時代のものが多数残っています。また、捕まえてはいけませんが、秋になると橋の上からサケの遡上を見ることができます。

3.5 岩手銀行赤レンガ館

1911年に落成した建物で、現在は国の重要文化財に指定されています（図5）。東京駅を思わせるデザインですが、実は同じ設計者による建物で、東京駅より先にできています。近所に旧第九十銀行本店の建物（現もりおか啄木・賢治青春館）もあり、こちらも重要文化財に指定されています。盛岡駅からバスセンター行きのバスで10分ほどです。

3.6 小岩井農場

1891年に原野を開墾し開設された130年以上の歴史のある農場で、農場施設の21棟は国の重要文化財になっています。図6の上の写真で、右は一号牛舎（1934年建設）、中央は一号・二号サイロ（それぞれ1907年、1908年建設）で現存する日本最古のサイロだそうです。農場の一部の「まきば園」は観光可能になっていて、動物と触れ合えるアトラクションやレストランなど家族で楽しめる施設が充実しています。図6の下は、まきば園から2kmほど離れた場所の小岩井農場の一本桜で、例年ゴールデンウィーク頃が見頃です。小岩井農場は、盛岡駅若しくはJR小岩井駅からバスでアクセスできます。



図5 岩手銀行赤レンガ館



図6 小岩井農場と一本桜
(写真提供：小岩井農牧株式会社)



図7 岩手大学農業教育資料館

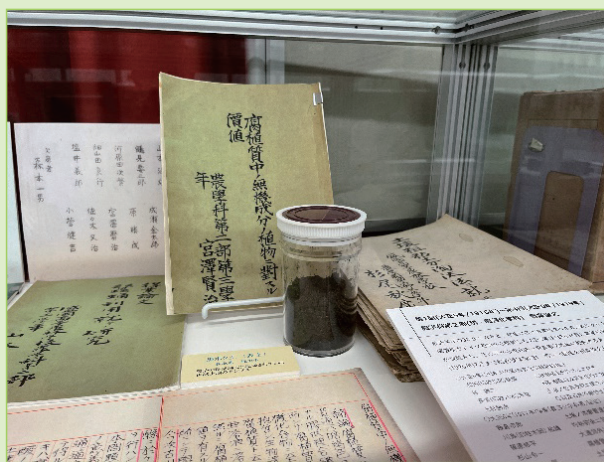


図8 宮沢賢治の得業（卒業）論文

3.7 農業教育資料館

岩手大農学部の前身となった盛岡高等農林学校の本館（図7）が、現在は岩手大内で農業教育資料館として見学できるようになっています。宮沢賢治は盛岡高等農林学校の卒業生で、得業（卒業）論文（図8）など、在学中に学んだ教材などが展示されています。また資料館の前には宮沢賢治のモニュメントがあり、見る角度によって形が変わる不思議な像になっています。

3.8 温泉・スキー

岩手県の温泉は湧出量全国6位、自噴量は全国3位と、日本有数の湯量を誇ります。山奥の秘湯から市内の日帰り温泉まで様々な温泉を楽しむことができます。八幡平エリアには幾つかの地熱発電所もあり、日本初の地熱発電所である松川地熱発電所では施設の見学をすることができます。また、盛岡市周辺には多数のスキー場があり、冬季はスキー・スノーボードを楽しむことができます。寒いだけあって雪質は抜群です。東北有数規模を誇る安比高原スキー場、世界選手権が開催された雫石スキー場、ときには5m以上の積雪となる豪雪の夏油高原スキー場などがあり、これらのスキー



図9 安比高原スキー場にて

場は周辺に温泉もあります。冬には「某研専」有志の温泉・スキー合宿が開催されています（図9）。

4 盛岡三大麺

盛岡冷麺、わんこそば、じゃじゃ麺の三つの麺が有名で、「盛岡三大麺」と呼ばれています。

盛岡冷麺は太めでコシの強い透明感のある麺と、酸



図 10 盛岡冷麺 (写真提供：ぴよんぴよん舎)



図 12 じゃじゃ麺



図 11 わんこそば (写真提供：東屋)

味と辛みのある冷たいスープが特徴で、季節の果物（スイカ・ナシなど）が乗っています。「ぴよんぴよん舎」の冷麺は有名でおいしいのでお勧めです（図 10）。是非あのツルつとした喉越しを楽しんで頂きたいです。なお、郊外にある「盛岡手づくり村」では、冷麺を麺から作る体験ができます。

わんこそばは、おわんに次々と入れられるそばを食べ続けるもので、「東屋」が有名です（図 11）。急いで食べる必要はないのですが、たくさん食べるならスピードはあった方がよいでしょう。だご味を味わうなら給仕さんが付くメニューがおすすめです。100 杯以上食べると木製の手形がもらえます。

じゃじゃ麺は元々、中国由来のジャージャー麺であったものがアレンジされ、麺はうどんのような見た目の平打ちで、こくのある黒い肉味噌とキュウリが乗っています。麺は少し残して、チータンタンと呼ばれるスープを入れて完食します。筆者が一番気に入っているのは岩手大近くの「羽琉（はねる）」で、癖になる味です（図 12）。夜は盛岡市内の繁華街で営業しており、飲み会の最後の締めにもおすすめです。

5 おわりに

盛岡市を中心として岩手県内の見どころ・食について御紹介しました。誌面の都合で御紹介できませんでしたが、地ビールや日本酒の造り酒屋も楽しめますし、盛岡から足を延ばすと平泉の世界遺産も見ることができます。ほかにもカルスト台地の鋭い峡谷を船で進む猊鼻溪、連続する滝が美しい厳美溪など、様々な名勝地があります。岩手・盛岡にお越しの際は是非足を運んでみて下さい。

文献

- (1) 宮本昌幸，“東北地方北部から北海道地方におけるケッペンの気候区分の再検討”，地理学論集，no. 84, pp. 111-117, 2009.
- (2) 岩手県観光協会，“観光スポット 石割桜，” https://iwatetabi.jp/spot/detail.spn.php?spot_id=1079 (サイト閲覧日 2023 年 7 月)

本間尚樹 (正員)

平 8 東北大・工学。平 10 同大学院工学研究科修士課程了。平 17 同大学院博士課程了。平 10 日本電信電話株式会社入社。以来、主として高速無線通信用平面アンテナ、MIMO アンテナシステムに関する研究に従事。平 21 岩手大・工・准教授。平 28 岩手大・工・教授。博士(工学)。平 23 年度から本会通信ソサイエティ英文論文誌編集委員。平 14 年度本会学術奨励賞、平 15 APMC Best Paper Award、平 18 本会通信ソサイエティ論文賞、平 26 日経エレクトロニクス ジャパン・ワイヤレステクノロジー・アワード、APMC 2014 Prize 各受賞。IEEE 会員。



アメリカ合衆国 オクラホマ州での 研究留学

若者よ、
世界に
出よう！

福島大学 内海哲史 Satoshi Utsumi

1 はじめに



私は、2022年5月から2023年1月までの9か月間、アメリカ合衆国オクラホマ州ノーマンにあるオクラホマ大学（University of Oklahoma）に研究留学しました。当時44歳、もう若手とは言えないかもしれませんが、私にとって初めての海外留学でした。オクラホマ州は、夏はとても暑く、冬は寒い気候です。私が滞在していたときは、夏は42℃、冬は寒波でマイナス16℃となったこともありました。夏の非常に暑い時間帯は、外を歩いている人はほとんどいなかったように記憶しています。また、ノーマンには、野生のリス（図1）が生息しており、日課のウォーキングの際に多数見掛け、研究で疲れた私の心を癒やしてくれたものでした。オクラホマ大は、アメリカンフットボール、ベースボール、ソフトボール、バスケットボールのチームがあり、スポーツが盛んな大学です（図2）。

私は、英会話は余り得意ではなく、留学前、アメリカでの生活に多少不安がありました。しかし、実際に留学を終えてみると、言語に関しては、アメリカでの生活でそれほど困らなかったように思うので、多少英語が苦手でも、海外留学を計画することをためらう必要はないと思います。研究留学するのであれば、その



図1 ノーマンに生息するリス

前提として、研究内容についての基礎知識・基礎的な語彙は十分あるはずですので、現地の研究者と研究の議論は成立します。また、日常生活においては、高校英語、あるいは中学英語で、こちらの伝えたいことはある程度伝わると 생각합니다。ただし、ヒアリングとトラブル対応は難しい場合もありますので、何度か聞き返す、筆談する、友人のサポートに頼るなどの工夫が必要かもしれません。

本稿では私のアメリカ留学での研究活動の一部を紹介し、また、これからアメリカでの研究留学を考えている方に向けて、私の思う注意点を簡単に説明します。

2 アメリカでの研究活動



私の考える、アメリカで研究することの意義は、人材も含めた世界最先端の研究環境に触れられることです。オクラホマ大は広大なキャンパスを備えており、私が居住したアパートも大学のキャンパス内にありました。私のオフィスがあった Devon Energy Hall と呼ばれる、コンピュータサイエンス学科の建物（図3）は新しく、最新の研究設備を備えていました。また、私の受入れ教員である Mohammed Atiquzzaman 教授⁽¹⁾は、複数の著名な雑誌の編集長を務める情報ネッ



図2 オクラホマ大の野球場



図3 オクラホマ大コンピュータサイエンス学科棟
(Devon Energy Hall)



図4 留学時の自宅アパート

トワーク分野の大御所です。アメリカ留学に限らず、在外研究することの大きなメリットとして、日本国内の大学の校務から解放され、研究に打ち込めることがあります。私も、9か月間で満足のいく研究結果を得られ、3本の論文をまとめることができました。

具体的な留学中の研究活動の内容は、Atiquzzaman 教授との研究打合せ、日本国内の共同研究者や研究室の学生とのオンラインによる研究打合せと、日々の研究でした。留学中、IFIP Networking 2022⁽²⁾でのオンラインによる研究発表も行いました。

9か月の期間中、日本国内での対面での研究打合せと、日本の研究室の学生への研究指導のため、8月と11月に2度、一時帰国しました。9か月間を通してアメリカにずっと滞在するよりは、めりはりと、目安となる区切りをつけることができたと思います。また、日本での食事を一時的に楽しむことができたのも、よかったです。

3 アメリカ留学での注意点

次に、私の考える、アメリカ留学での注意点について、幾つかまとめます。

3.1 留学準備

私は、海外留学の準備には、しっかり時間と労力を掛けるべきと考えます。留学の準備を怠ったため、トラブル続きで、研究に打ち込めなかったという話も聞いたことがあります。今回のような長期の海外留学の場合、準備のために時間と労力を十分に取っても、トラブルがゼロになるとは思えません。

まずは、受入れ先の研究者を探すことから始めます^{*1}。私は、外国人の研究パートナーである Salahuddin Muhammad Salim Zabir 教授(鶴岡高専)から、Atiquzzaman 教授を紹介してもらいました。

Zabir 教授を介し、Atiquzzaman 教授と連絡を取り、受入れを快諾してもらいました。次に、受入れ先の大学事務とのやり取りになります。私は、J-1^{*2}という入国査証を取得しなければならなかったのですが、そのためには、DS-2019 という資格証明書をオクラホマ大から受け取る必要がありました。DS-2019 を発行してもらうのにも、少し時間が掛かったと記憶しています。DS-2019 を取得するため、アメリカの医療保険に入る必要もありました。アメリカの医療保険も自力で契約する必要がありますが、私は日本人が対応してくれるサービスを利用しました。また、居住場所を探す必要もあります。アパートを見つけるまで、少し苦労しましたが、オクラホマ大の事務の方から、キャンパス内のアパート(図4)を紹介してもらい、大変助かりました。この留学は9か月間と比較的長期でしたので、自動車が必要と考えました。オクラホマ州では、日本の国際免許証が3か月間しか有効でないため、現地で免許を取る必要があると考え、筆記試験の勉強もしていきま^{*3}。自動車購入の手続きもあらかじめ日本で行いました。

例えば、文献(3)のような、アメリカ留学準備のための書籍を熟読して臨むのがいいと思います。これだけ準備しても、私は現地で幾つかのトラブルがありました。

*1 その前に、日本での所属機関からの許可を得ることと、留学の資金を確保する必要があるかもしれません。私の場合、科研費国際共同加速基金(国際共同研究強化(A))と福島大学外地研究員制度の支援を受けました。

*2 交流訪問者ビザのこと。

*3 アメリカでの運転免許証取得のための筆記試験学習用のスマートフォンアプリが存在しており、それを利用しました。実際には、筆記試験のほか、実技試験(ドライビングテスト)もあり、現地では非常に苦労しましたが、この話については、誌面の制約のため割愛します。



図5 アメリカのファストフード



図6 オクラホマで食べたステーキ

3.2 文化・食生活

私が滞在したノーマンでは「あいさつ文化」があったように感じました。私は、自宅アパートの周辺を毎日2マイル(約3.2 km)ほどウォーキングする習慣があったのですが、そのとき、同じように散歩やジョギングをしている現地の人々に、“Hello, how are you?”とよく声を掛けられたものでした。また、よく知られているように、チップや、3月中旬から11月上旬までの「サマータイム」など、日本とは違う習慣や制度もあります。年末年始の休暇も、日本とは少し異なっており、民間は年末の10日間ほど、大学は年末から年明け後2週間程度までが休みのようでした。

日本人が最も困惑すると思われるのは、食環境です。自炊をしない限り、食は全体的に選択肢が少ない印象でした。外食に関しては、高価で、必ずしも味は日本人好みとは思いませんでしたが、ファストフード(図5)は、日本で食べるものと同様の味でした。日本料理レストランもあり、現地ではとても人気なのですが、こちらは日本で食べる味を期待しないほうがよさそうです。ただ、専門店で食べたステーキ(図6)は、格別においしかったです。私は、自炊をせず、ウォルマート(Walmart)というスーパーマーケットで売っているパンとバナナ、プラスチック容器に入った野菜を主に食べていました。バナナは安く、一房1ドル程度と手頃でした。

そのほか、個人的には、トイレに洗浄機能付き便座が設置されていないのに少し困りました。洗浄機能付き便座は、留学中、一度も目にしませんでした。

4

おわりに



本留学は、日本学術振興会(JSPS)科研費国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(A))及び福島大学外地研究員制度の支援を得て実施されたものです。本留学を支えて下さった、Atiquzzaman教授、Zabir教授、長谷川 剛教授(東北大)、福島大の同僚の方々、オクラホマ大の教職員の方々、ノーマンの皆様並びに、関係各位と家族に深謝し、搁筆(かくひつ)致します。

謝辞 本留学は、JSPS 科研費 JP21KK0202 の助成を受けたものです。

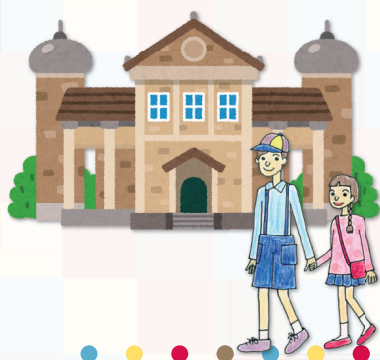
文献

- (1) IFIP Networking 2022, <https://networking.ifip.org/2022/>, 2022.
- (2) Mohammed Atiquzzaman, <https://www.cs.ou.edu/~atiq/>, 2022.
- (3) 日米教育委員会編著, アメリカ留学公式ガイドブック(第2版), アルク, 東京, 2018.

内海哲史 (正員)

2000 東北大・工・情報工卒。2009 同大学院情報科学研究科情報基礎科学専攻博士後期3年の課程短縮修了。博士(情報科学)。同年から日本学術振興会特別研究員(PD)。2011 鶴岡高専・助教。2013 鶴岡高専・准教授。2015 福島大・准教授。2022 オクラホマ大研究員。インターネットにおけるふくそう制御アルゴリズムの研究に従事。情報処理学会、ACM、IEEE 各会員。





鉄道博物館 (通称:てっぱく)

和田友孝 Tomotaka Wada 関西大学

1 はじめに

今回紹介するのは、埼玉県さいたま市大宮にある鉄道博物館です。JR 東日本創立 20 周年記念事業のメインプロジェクトとして、2007 (平成 19) 年 10 月 14 日に開館しました。2018 (同 30) 年 7 月には新たに南館がオープンし、本館の常設展示も全面的にリニューアルしました。このリニューアルでは、館内を車両・歴史・仕事・科学・未来の五つのステーションに分け、多彩な切り口で人と鉄道の豊かな物語を展開する博物館になりました。

2 鉄道博物館の概要

鉄道博物館は JR 大宮駅からニューシャトルに乗って「鉄道博物館 (大成) 駅」で降りてすぐ目の前にあり、駅から直結で図 1 のような入口から入ります。なお、私の訪れた 3 月の平日では、それほど混雑しておらず、スムーズに見て回ることができました。鉄道博物館には、次の三つのコンセプトがあります。

- (1) 日本及び世界の鉄道に関わる遺産・資料に加え、国鉄改革や JR 東日本に関する資料を体系的に保存し、調査研究を行う「鉄道博物館」とします。
- (2) 鉄道システムの変遷を車両等の実物展示を柱に、それぞれの時代背景等を交えながら、産業史と

して物語る「歴史博物館」として位置付けます。

- (3) 鉄道の原理・仕組みと最新 (将来構想を含む) の鉄道技術について、子供たちが模型やシミュレーション、遊戯器具等を活用しながら、体験的に学習する「教育博物館」としての性格も持ち合わせます。

3 内部の展示

入口を入ると、正面には図 2 のような EF58 形電気機関車 (EF58 61 号機) の展示があります。これは「お召列車」というもので、天皇陛下や皇后陛下などが御使用になり特別に運行される列車です。1953 年に製造され、車体正面だけでなく側面まで取り付けられたステンレス製の飾り帯や国旗掲揚装置、足回り各部の磨き出しなどの専用装備を備える特別列車です。2001 年までの間、90 回以上お召列車の先頭に立ち、臨時列車やイベント列車もけん引し、日本の電気機関車を代表する存在です。

ほかにも多くの鉄道の展示があり、鉄道の車両を展示するエリア、仕事を体感するエリア、運転を体験できるエリアがあります。全てを紹介することはできませんので、主なものを紹介します。

1 階の車両展示エリアには、36 両の車両が展示されており、蒸気機関車、電気機関車、電車、新幹線電車な



図 1 鉄道博物館の入口



図 2 EF58 形電気機関車 (EF58 61 号機)



図3 C57 形蒸気機関車

どがたくさん並んでいます。特に図3に示すC57形蒸気機関車は中央の転車台に配置されています。転車台とは、車両の方向を変える機械であり、台がゆっくり回転することにより様々な方向から見る事ができて迫力があります。

また、図4に示す先端が丸いのが特徴の初代新幹線である0系の先頭車両も展示されています。私が小学生のときに初めて乗った車両で、懐かしい思いが込み上げてきました。

また、仕事を体感するエリアでは、運転士や車掌、駅係員だけでなく、列車の運行を裏で支える指令員、車両の設計・製作と保守、線路やトンネルなどの保守、発電所、電気設備・信号の保守、鉄道の建設工事など、鉄道を取り巻く様々な仕事について映像、シミュレータ、グラフィック、実物展示などで体感できます。列車の運行情報は指令室に無線通信で伝えられており、その詳細を学ぶことができます。これらの仕事が全て連携して鉄道の安全、安定輸送が支えられていることを理解できます。

更に、図5に示すE5系新幹線のシミュレータや、在来線のシミュレータも多く用意されており、運転士になりきって体験できるのは非常に楽しいです。

4 外部の展示

外部の展示では、本物そっくりに再現されたE5系が先頭に立つ「ミニはやぶさ号」に乗ることができます。また、ミニ運転列車が用意されていて、芝生と木々を配したコースの中を自分で列車を運転して「万世橋」「飯田町」「汐留」「両国橋」駅を巡ることができます。1周300m、線路幅60cmのコースを、長さ約2.4m、幅約1.2mの3人乗りミニ車両を運転できます。(所要時間約6分)コースの途中にはカーブによる減速や、ポイント(レールを分ける装置)での速度制限、先行列車による信号の変化など、実際の運転シーンを体験できます。

また、3階にある新幹線ラウンジに行くと、建物のす



図4 21 形新幹線電車 (0 系電車)



図5 E5 系新幹線のシミュレータ

ぐ横を実際に走っている新幹線を同じ目線で間近に見ることもできるので、楽しいと思います。

5 まとめ

鉄道博物館について簡単に紹介しました。鉄道好きの人だけではなく、お子様を連れての体験は非常に良いのではないのでしょうか。子供が喜ぶものは、まず運転シミュレータかと思います。それ以外にもミニ車両で実際に運転できる体験も貴重ですし、列車のジオラマ展示も素晴らしいです。私はそれほど時間をとることができず、展示を主に鑑賞しただけなのですが、期間限定の企画展などもあって、体験型の博物館ですので、是非ともいろいろな体験をしてみることをお勧めします。

和田友孝 (正員：シニア会員)

1999 阪大大学院工学研究科博士後期課程了。博士(工学)。同年和歌山大・システム工・助手。現在、関西大・システム理工・教授。無線通信システム、ITS、緊急救命避難支援システムなどの研究に従事。IEEE Senior Member、情報処理学会、日本シミュレーション学会、日本災害情報学会各会員。



情報通信ネットワークのクラウドネイティブ化に対応した技術基準等の制度改正*

総務省

梶原 亮 Ryo Kajiwara

1 はじめに

かつては、自分で撮影した写真は、自らが管理するデバイス上にしか保管することができなかったが、現在は、クラウドの活用によって外部の設備上にも容易に保管できるようになり、多様なデバイスからもアクセスできるようになった。同じように、情報通信ネットワークにおいてもクラウドの活用が進展しており、かつては電気通信事業者が自ら保有・管理するという方法しか取り得なかったコアネットワークですら、外部の設備上に構築することができるようになってきている。

本稿では、情報通信ネットワークのクラウド化の進展と環境の変化について述べた上で、そうした変化等への対応を目的とした技術基準等の改正について紹介する。

2 情報通信ネットワークのクラウド化の進展

情報通信ネットワークは、情報通信技術の発展に伴い進化を続けてきており、従来は必要な機能は個別のハードウェアによって実現されることが基本であったが、2010年代からSDN（Software Defined Network）やNFV（Network Function Virtualization）等のソフトウェアによる制御が導入されるようになるなど、コンピュータリソースを抽象化する仮想化技術の導入が進み、ハードウェアのリソースを物理的な構成にとらわれずに仮想的に統合したり、分割したりすることができるようになってきている。

仮想化技術の進展の背景としては、ICTサービスの多様化に伴い、オンデマンド映像配信やソフトウェア更新など、バースト的なトラヒックが頻発するようになり、

それらの急激な情報通信ネットワークに対する要求の変化に柔軟に対応する必要に迫られたこと等が挙げられる。また、ハードウェアベースではなく、ソフトウェアベースで機能を実装すれば、新たなサービスを提供するための情報通信ネットワークを極めて短時間で構築できるようになる上、情報通信ネットワークの利用状況の変化に応じて柔軟にリソース配分を変更することも可能となるという点も、仮想化技術の進展の理由の一つとして挙げられる。

情報通信ネットワーク（Telco）の変遷イメージは図1に示すとおりであり、IT分野において垂直統合型から水平分業型、そしてマルチクラウド活用へと変化してきたそのフレームワークの変化を、少し遅れて取り入れていくような形で進展してきている。こうした仮想化技術の活用の進展によって、情報通信ネットワークの構成にも変化が生じており、従来は通信サービスの提供に必要な設備は通信事業者が自ら保有・管理することを基本としていたが、仮想化された機能については図2に示すように、他者が設置するクラウド上に実装することも可能となってきた。

こうした動きは5G（第5世代移動通信システム）等の移動通信ネットワークにおいて特に顕著に見られ、携帯電話事業者が自らのネットワークへの仮想化技術の導入を進めていくことで、経済的かつ運用負荷の低いネットワーク構築・運用を実現していくという動きだけにとどまらず、新規の通信事業者がアクセスネットワークからコアネットワークに至るまで、ほぼ全ての設備を自ら設置することなく通信サービスを提供することも可能になっているなど、ネットワーク構造のパラダイム転換が生じようとしている。

2015年頃においては、移動通信ネットワークにおい

* 本稿の内容は、情報通信審議会答申「仮想化技術等の進展に伴うネットワークの多様化・複雑化に対応した電気通信設備に係る技術的条件」（令和5年2月21日）から引用。

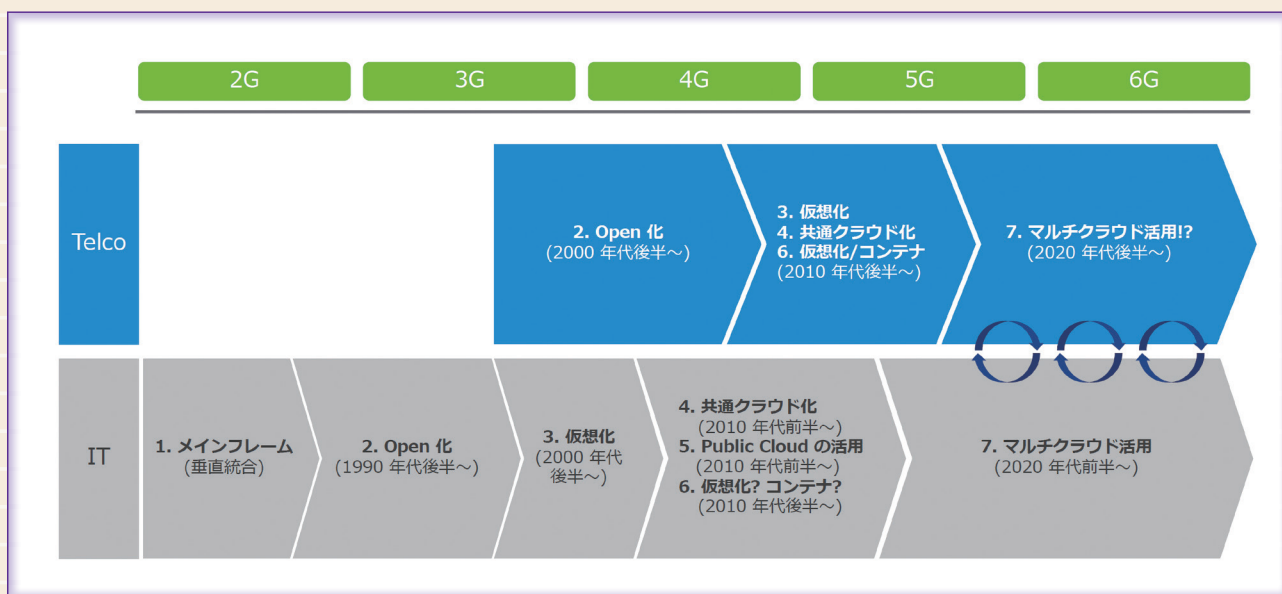


図1 情報通信ネットワークの変遷イメージ

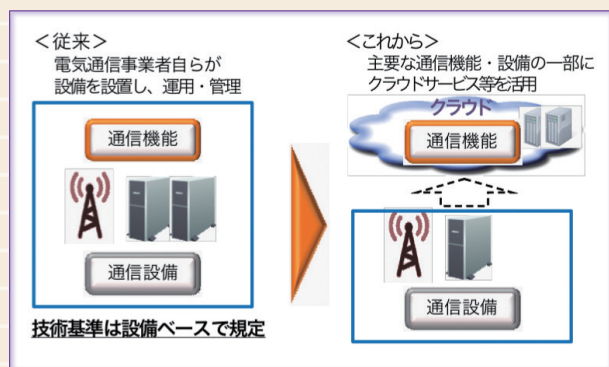


図2 情報通信ネットワークの機能の実装イメージ

て通信キャリアが要求する品質や信頼性の水準、いわゆるキャリアグレードの機能をクラウド上で実現することは技術的に困難であり、また、その実現までには相当の期間を要するものと見積もられていた。事実、我が国の移動通信システムにおいても、5G NSA (Non Stand Alone 型のシステム構成、4G/LTE のコアネットワークと 5G の基地局とを組み合わせた構成をいう。)や 5G SA (Stand Alone 型のシステム構成、5G のコアネットワークと 5G の基地局とを組み合わせた構成をいう。)への導入を契機に、通信混雑時のつながりやすさの向上、通信サービスの信頼性向上、サービスの早期提供、ネットワーク設備の経済性向上等を目的として、コアネットワークの交換設備を中心に仮想化技術の導入が進んでいるが、あくまでも通信事業者が自ら保有・管理する設備に実装することが基本であり、外部のパブリッククラウドに実装するような動きは見られていなかった。しかしながら、その後の仮想化技術の進展は目覚ましいものがあり、米国においては通信事業者の AT&T が

仮想化したコアネットワークの機能を Microsoft のクラウド上に移管する計画を 2021 年 7 月に発表したほか、国内においても NTT ドコモが AWS (アマゾンウェブサービス) のクラウド上に 5G のコアネットワークの冗長構成を実装することが技術的に可能である旨を 2023 年 2 月に発表するなど、当初の見積りを上回る速さで仮想化技術が進展してきている。そして、通信事業者がクラウドを取り入れていくという動きだけでなく、逆に、クラウド事業者自身が通信ネットワークを提供するような動きも出てきている。例えば、まだ国内ではローンチされていない (2023 年 5 月時点) もの、AWS が米国等において提供している「AWS Private 5G」では、コアネットワークだけでなく、アクセスネットワークの一部についても仮想化ネットワークとして構築し、5G ネットワークのほとんどの機能をパブリッククラウド上で提供することを可能としている。図3は5Gネットワークのアーキテクチャ概念図であり、AWS Private 5Gでは、このうちコアネットワークが全てAWSのインフラであるということだけにとどまらず、アクセスネットワークについても仮想化技術が適用可能な部分はAWSが提供しており、通信事業者のインフラは基地局に相当するRadio Unit相当の部分のみというような構成である。

このように、情報通信ネットワークは、仮想化技術の急速な進展とともにクラウドネイティブな形に進化してきている。また、5Gの構成としても、実際のデータを運ぶ伝送機能 (User Plane) と制御機能 (Control Plane) を分離したアーキテクチャが採用されており、クラウドとの親和性が高まってきている。

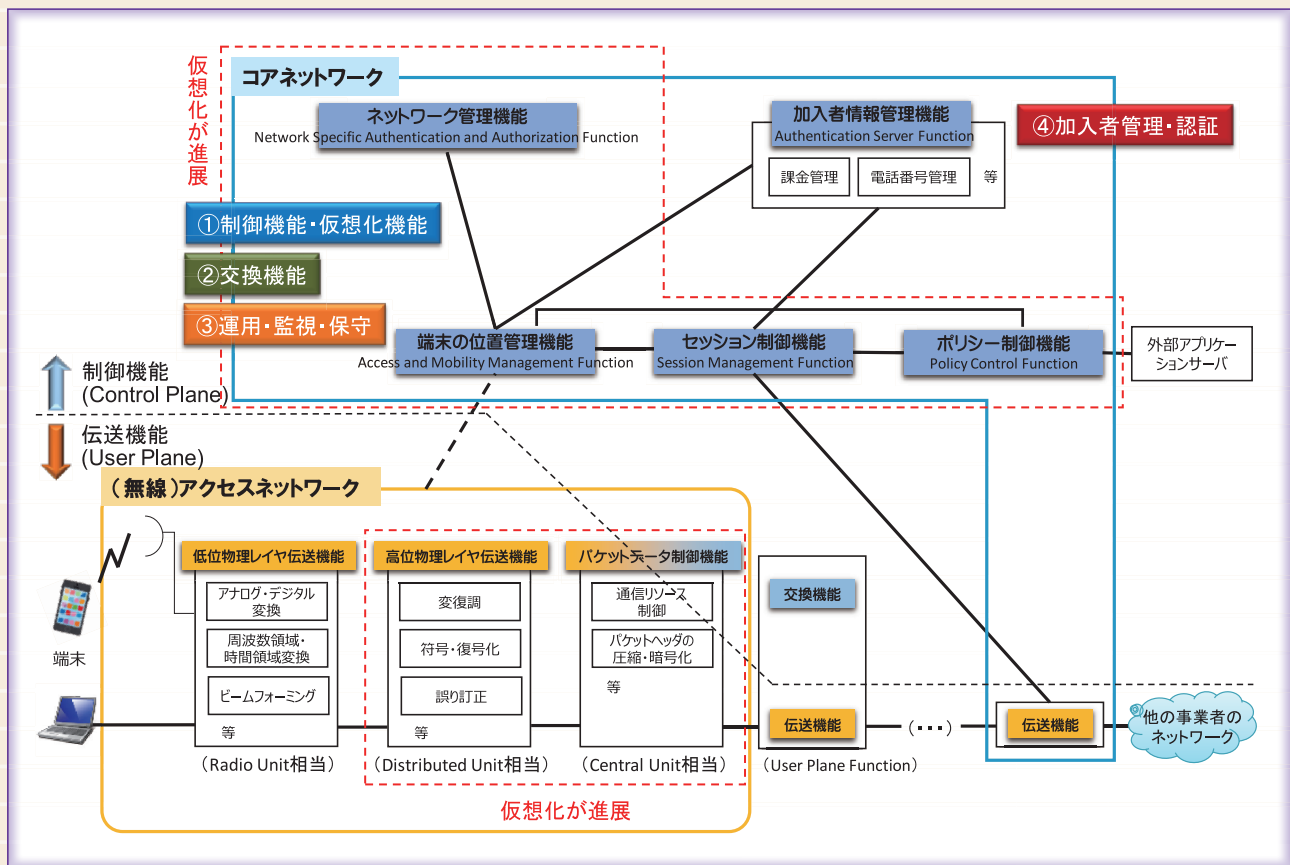


図3 5G ネットワークのアーキテクチャ概念図

3 電気通信事業法上の技術基準の概要と課題

電気通信事業法では、利用者と利用者との間をつなぐ伝送路設備を通信サービスの確実かつ安定的な提供のために重要視すべき設備として捉えており、伝送路設備を含む電気通信回線設備を設置する電気通信事業者（以下

「回線設置事業者」という。）や、利用者の利益に及ぼす影響が大きい通信サービスを提供する電気通信事業者等に対して、「技術基準」への適合維持義務（電気通信事業法第41条）を課している。これは、電気通信回線設備が他人の通信を媒介するために必要となる設備の基本単位あり、当該設備に関連して、一たび通信の秘密の漏えいや通信サービスの提供の停止等の事故が発生した場

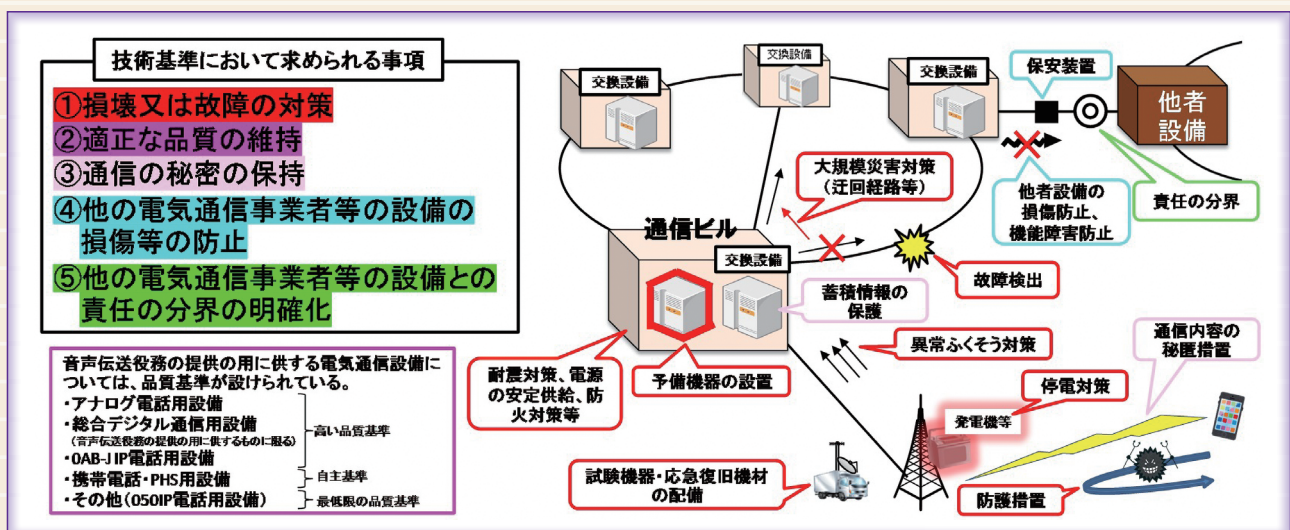


図4 技術基準において求められる事項のイメージ

		損壊・故障対策	品質基準	通信の秘密・他者設備の 損傷防止・責任の分界
音声伝送役務用設備	アナログ 電話用設備	- 予備機器 - 故障検出機能 - 防護措置 - 異常ふくそう対策 - 耐震対策 - 停電対策 - 大規模災害対策 等	高い品質基準	[通信の秘密] ○通信内容の秘匿措置 ○蓄積情報保護 [他者設備の損傷防止] ○損傷防止 ○機能障害の防止 ○漏えい対策 ○保安装置 ○異常ふくそう対策 [責任の分界] ○分界点 ○機能確認
	総合デジタル 電話用設備			
	0AB-J IP電話用設備			
	携帯電話・ PHS用設備	- 防護措置 - 異常ふくそう対策 - 大規模災害対策 等	自主基準*	
	その他 Q50IP電話用設備)		最低限の品質基準	
上記以外の設備 (データ伝送役務用設備等)			規定なし	

※ 携帯電話の品質基準は、電波の伝搬状態に応じて通話品質が影響を受けることを考慮し、基準を一律に定めるのではなく、自主基準としている。

図5 通信サービスの種類に応じた技術基準

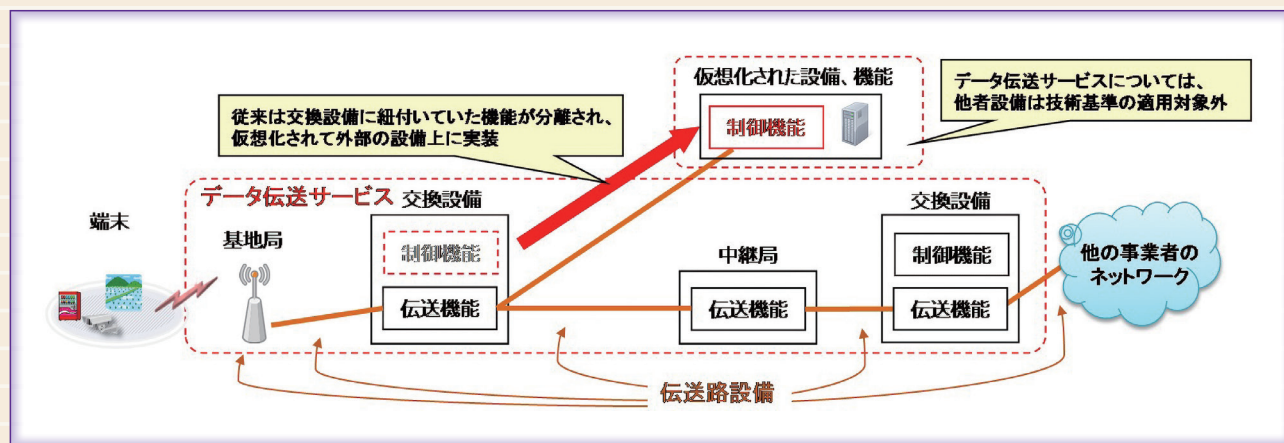


図6 他者設備に対する技術基準の適用範囲のイメージ

合、国民生活や社会経済活動に深刻な影響を与えることが予想されることに配慮した措置である。

電気通信事業法では、情報通信ネットワーク全体の中で情報を伝送する役割を担う回線設置事業者等に対し、図4に示すように、損壊・故障対策、適正な品質の維持、通信の秘密の保持、他の電気通信事業者等の設備の損傷等の防止及び他の電気通信事業者等の設備との責任の分界の明確化を求めることで、通信サービスの確実かつ円滑な提供を確保することとしている。

また、事業用電気通信設備規則において、提供する通信サービスの種類に応じた項目が技術基準として規定されており、図5に示すように、例えば、音声伝送役務用設備に対しては、予備機器の設置、故障検出機能の具備、異常ふくそう対策、大規模災害対策等の損壊・故障対策等を求めることで、通信サービスの円滑な提供を確保することとしている。

電気通信事業者が電気通信設備の一部として他者が設置する設備（以下「他者設備」という。）を使用する

場合における、制度改正前の技術基準の適用範囲のイメージを図6に示す。電気通信設備の一部に他者設備を使用する場合、音声伝送サービス用の設備である場合等を除き、当該他者設備については、損壊または故障による影響が軽微なものとして、技術基準への適合維持義務の適用が除外されていた。

情報通信ネットワークのクラウドネイティブ化が進む中で「他者設備は損壊または故障による利用者への影響が軽微なものである」という考え方が実態に合わなくなってきたことが課題として指摘されていたため、これに対応するための制度改正が行われた。

4 制度改正の概要

情報通信ネットワークへの仮想化技術等の活用によって、より経済的かつ運用負荷の低い通信ネットワークの構築・運用が可能になるとともに、利用者のニーズに応じた機動的な対応を行うためのスケーラビリティ

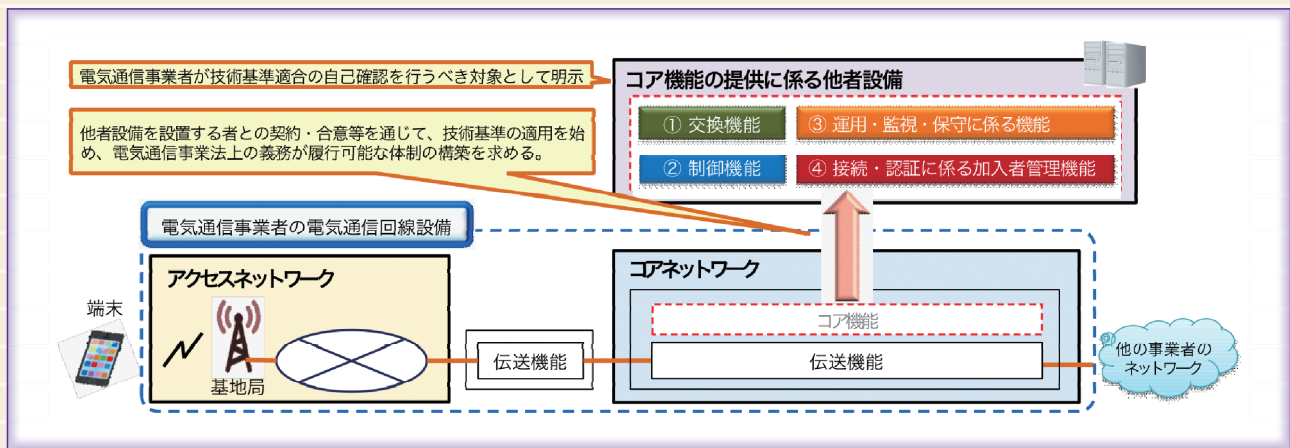


図7 制度改正後の技術基準の適用対象のイメージ

(拡張性)を柔軟に確保していくことが可能となる。したがって、今後の電気通信事業において、クラウド事業者等が提供する仮想化技術等を円滑に活用できるようにすることは、電気通信設備の合理的な構築・運用・保守に資するものと考えられる。また、将来的には、クラウド事業者等が提供する仮想化技術等を活用することで、革新的なネットワークアーキテクチャを実現できるようになれば、利用者に対しても高度な通信サービスを迅速に提供できるようになる利点があると考えられる。このため、電気通信事業者が仮想化技術等を円滑に活用できるようにすることを目的として、電気通信事業者が希望する場合には、仮想化された機能をクラウド事業者等の他者設備から提供を受けられることを明確化することが適当であると考えられる。具体的には、電気通信事業者がクラウド事業者等の他者設備を通じて仮想化された機能の提供を受ける場合を想定して、(1)技術基準の適用範囲の見直し、(2)他者設備に対する管理方法の具体化を目的とした制度改正を実施した。

4.1 技術基準の適用範囲の見直し

仮想化技術等によって電気通信事業者に提供され得る機能のうち、①交換機能、②電気通信設備の制御機能(仮想化した機能を制御するための機能を含む。)、③電気通信設備の運用、監視または保守に係る機能、④通信の接続または認証に係る加入者管理機能を、重要な機能(以下「コア機能」という。)として特定した。なお、コア機能のうち、④の加入者管理・認証に係る機能については、利用者の情報に関わるものであることから現時点においては必ずしも仮想化が進展しているわけではないが、技術的には仮想化した上での他者設備を通じた提供も可能となっていることから、ほかのコア機能と同様に扱っていくことが適当であるとされている。

コア機能については、他者設備(クラウドサービスの

提供に係る設備を含む。)を通じて提供される場合においても例外なく技術基準が適用されるように、技術基準の適用対象を見直したものである。技術基準の適用対象のイメージを図7に示すが、技術基準が適用されるのは、利用者に通信サービスを提供する電気通信事業者であって、コア機能を提供するクラウド事業者ではないことに留意することが必要である。つまり、電気通信事業者が、利用者に通信サービスを提供するためにクラウドを前提とした情報通信ネットワークを構築する場合には、当該電気通信事業者自身が、他者設備であるクラウド設備も含めて技術基準で定める損壊・故障対策等が取られていることを確認する義務を負うことになる。

4.2 他者設備に対する管理方法の具体化

制度改正前の電気通信事業法関係省令においては、他者設備からコア機能の提供を受けることが可能であることが明示的に示されていなかった。そこで、クラウドをはじめとする他者設備の円滑な利用に資するため、仮想化された機能を電気通信事業者が他者設備を介して活用する場合においても、電気通信役務の確実かつ安定的な提供を確保することができるよう、他者設備に対する管理方法を定めるための措置が取られている。

現在、電気通信事業者は、電気通信事業法に基づき、設備の自主的な管理体制を整備することを目的とした管理規程を自ら定め、あらかじめ総務大臣に届け出ることとなっており、この管理規程の届出事項の一つとして、コア機能を提供する事業用電気通信設備の全部または一部を構成する設備の運用を他人に委託している場合(クラウドサービス等を通じて他者からコア機能の提供を受ける場合を含む。)における業務管理体制が制度改正を通じて追加された。

なお、管理規程は、電気通信事業者の設備の自主的な管理体制を整備することを目的としたものであり、法令

により管理規程や具体的な措置事項の内容について画一的に定めることは必ずしも適当ではなく、また、その細部までを法令で規定する構造にはなっていない。一方、銀行法においては、業務の外部委託における金融業務の的確な遂行、健全かつ適切な業務運営を確保することを目的に、金融機関が他社のクラウドサービス等を利用する場合においても金融サービスの安全・信頼性を確保するための仕組みが整えられている。そのため、電気通信事業分野においても、こうしたほかの事業分野の事例も参考にしつつ、管理規程等の運用が行われることにより、通信サービスの確実かつ円滑な提供が確保されていくことが期待される。

4 今後の検討課題

本稿では、情報通信ネットワークのクラウドネイティブ化に対応することを目的として、技術基準の適用範囲の見直しや、他者設備に対する管理方法の具体化等の制

度改正を実施したことを紹介した。

今後、技術的には、電気通信事業者がアクセスネットワークからコアネットワークに至るまでの一切の設備を自ら設置することなく、通信サービスを利用者に提供することも可能となっていくことが想定される中で、現行の制度が電気通信事業者によるクラウドネイティブな情報通信ネットワークの構築を阻害せず、かつ通信サービスの確実かつ安定的な提供に資するものとなっているかどうかを随時点検することが必要であると考えられる。

梶原 亮

総務省総合通信基盤局電気通信事業部
電気通信技術システム課（2023年5月時点）。在学時に通信工学を専攻した後、総務省総合通信基盤局電波部等に在籍し現職に至る。



論文を書いて、皆さんの技術を世界に発信しませんか

英文論文誌 B 編集委員長 長 敬三
Keizo Cho

本年6月から通信ソサイエティ(以下通ソ)の英文論文誌及び Communications Expressは、公開プラットフォームを IEEE Xploreとする投稿が始まりました。IEEE Xploreで公開される論文は全てオープンアクセスになり、電子情報通信学会やIEEEの会員に限らず、誰でも読めるようになります。これまで通ソ英文論文誌の公開論文のほとんどは会員のみが閲覧可能でしたが、今後掲載される全ての論文は国内及び海外に公開されます。本施策は、歴代の通ソ編集会議の方々が粘り強く進めてきて、ついに実現しました。関係された方々に深く感謝するとともに、実現まで導かれたことに敬意を表します。

通ソ英文論文誌の投稿数はここ数年減り続けていましたが、2021年度からはほぼ横ばいになっています。日本の通信業界は、日本が「ガラバゴス」と呼ばれた日本特有の市場であった時代には多くの企業が参入していましたが、通信規格の世界統一化に伴い、大量に安くものを作り、かつ販売する力を持つグローバル企業が支配的になる時代になりました。日本の企業は、かつては多くの技術を日本国内で内製化していましたが、選択と集中により研究開発に携わる技術者人口は減少し、これらが通ソ英文論文誌の投稿数減少の要因の一つとも考えられます。

近年は、特にアジア諸国の技術力が向上し、日本の技術力が落ちてきているとも言われます。

少し古いですが、文部科学省の科学技術・学術政策研究所が公表したデータによると、米国やドイツの1年当りの掲載論文数は2007-2009年に対して2017-2019年は微増で、それぞれ2位、3位、中国の掲載論文数は約3倍で1位、日本はほぼ同じで4位となっています。注目度の高い論文による評価は、日本は5位から10位に落ちています*。

しかし、日本の技術力は昔に比べて落ちているのでしょうか？ 選択と集中により、多くの分野で先進性を確保していくことは難しい時代になっているかもしれません。一方、今でも、日本製への信頼は厚いと感じます。ものの性能に対して要求が厳しく、あきらめず細かいところまで地道に改善していく国民性により生まれた、海外にはないきめ細やかな技術がたくさんあると思います。確かにそれらの技術がニッチで、今の勢のユーザには不要なものも多いかもしれませんが、将来どのように転ぶかわかりません。実

際の製品に導入されたもの以外にも、検討はしたがコストなど様々な障害で現在はその次のステップに進めなかった技術などもあるのではないかと思います。

現在は働き方も変化しており、一つの企業で働き続けるのではなく、待遇や働きやすさを求めて転職する人が増えてきています。スタートアップによる新たな挑戦を行う人々も増えていきます。アカデミックの分野では、論文が成果として評価される一方で、企業では論文が業務成果として評価されにくく、執筆の意欲が湧かないという声もよく聞きます。技術の権利確保のツールとして特許がありますが、論文は技術者個人及び所属する機関の技術力のアピールのためのツールとも考えられます。論文が公開されることで、体系化された技術を誰が担って実現したのかをアピールできます。執筆作業を行うことで、自分の技術を改めて整理できることもメリットだと思います。日本では技術者の地位が諸外国に比較してまだまだ低いと感じます。その一因として開発されたものが組織の成果としてはアピールされますが、技術者個人の成果としてアピールされることが少ないこともあるのではないのでしょうか。論文としての掲載が増えることは、技術者の地位向上にも寄与していくことになるように思います。

国内に論文誌を持つ意義の一つとして、母国語で執筆できることがあります。しかし技術を世界に発信するためには、世界共通語である英語での公開が必要です。どうせ英語で書くのであれば、よりサイティションの高い海外の論文誌へ投稿したいという気持ちもあるかもしれません。一方、国内技術を世界に発信する自らの論文誌がないというのも寂しい限りです。通ソの英文論文誌は、投稿しやすく世界からも注目される論文誌を目指し、その一つの解としてIEEE Xploreプラットフォームの利用に踏み出しました。学生の皆さんも、自分の書いた論文が海外にも発信されるというのはわくわくするのではないのでしょうか。技術者の皆さんも、自らの成果をアピールする機会と捉え、自分の成果を論文にして世界に発信してみませんか。

*論文数は世界4位だが注目論文数は10位に後退、今年の「科学技術指標」、Science Portal, 2021.8.17.
https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20210817_n01/index.html (2023年8月21日閲覧)

NEXT ISSUE

2024 年春号（第 68 号）2024 年 3 月 1 日発行

小特集

宇宙 ICT の基盤となる 宇宙通信技術のフロンティア

私の研究者歴：宇野 亨

街 plus 探訪：自然と文化と食の街「広島」

若者よ、世界に出よう！：英国における生活と研究

ジュニア会員向けページ：深宇宙探査機の軌道決定

……他、御期待下さい

Editors Note

子供の頃は親に怒られながらゲームをしていましたが、ゲームの発展が AI やメタバースの発展をけん引してきたと正当化され、嬉しかったです。メタバースが目立ち出す、未来の技術をお楽しみ下さい。（S.Y.）

初めて本誌の編集委員をさせて頂きました。校閲の途中からの参加でしたが、著者の方々、査読者、校閲者や私たち編集委員など、様々な方が（多くの方は本業の傍ら）関わって作り上げていくことを体感しました。多くの方に読んで頂けると嬉しいです。（Y.N.）

技術が新たな扉を開き、私たちの想像力が現実を形作るように、メタバースは私たちの未来を刷新する魅力的なアイデアであり、デジタルと現実の融合は未来への挑戦です。革新的な未来への第一歩として、メタバースにより進化する世界に期待が高まります。（N.T.）

先日、初めて盛岡に訪れる機会を持ちました。アメリカ有力紙で 2023 年に行くべき旅行先第 2 位に選ばれただけあって、とても新しい発見がありました。本誌の街 plus 探訪、かなり役立ちます。本誌の魅力を再確認しました。（H.N.）

仮想現実、デジタルツインなど領域が重なるものが様々はやっていますが、メタバースは参加者同士のインタラクションが重要ということで、B-Plus にふさわしいテーマだと思います。今後の広がりにはデバイスがカギになりそうなので、進化に期待しています。（D.K.）



2023 年冬号 (第 67 号)
2023 年 12 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

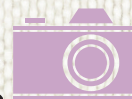
複写される方へ

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 2023 IEICE. All rights reserved.



左：「落石無線電信局の跡」の碑 右：池田良二スタジオ（旧落石無線電信局の建物）

北海道根室市にある旧落石（おちいし）無線電信局（現・池田良二スタジオ）は北方四島を除く日本の最東にあります。立地条件としては航行する船舶にとって非常に好位置にありましたが、冬場に勤務する人にとっては過酷な環境だったそうです。

明治41年（1908年）12月26日に落石無線電信局が開局しました。4 kW 普通火花式を使い、大正5年に使用電力を入力30 kWと7 kWに増加し瞬滅火花式を採用、更に60.6 mの木柱から工費7万円

で90 mの鉄柱を建設し、これを中心に木柱数本を配してアンテナを張架していました。

短波使用により、地中海のイタリア・ナポリ、フランス・マルセイユ、南米ブラジルまで通信できました。昭和20年7月、戦災を受け内部を全焼しましたが、昭和21年5月復旧しました。昭和34年6月13日に送信所を受信所と同一敷地内に移転、同時に長波設備を撤去しました。



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。



年間登録費割引 オプションの案内

通信ソサイエティでは、年間登録による研究会参加費
のまとめ払いとして、全研究会を対象とした
オプションを提供しています。

全研究会年間登録
が断然おトク!

3研究会に年間登録した場合…

	学会員	非会員
一般	例) ¥4,400 + ¥6,600 + ¥8,800 合計 ¥19,800	例) ¥7,700 + ¥9,900 + ¥12,100 合計 ¥29,700
学生	3つの研究会まで無料	

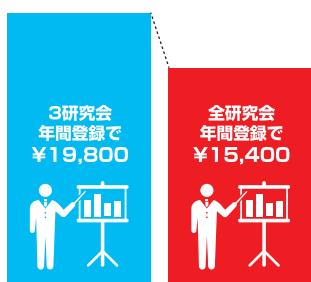
※価格はすべて税込です。※研究会によって価格が異なります。

通信ソサイエティ全研究会年間登録で…

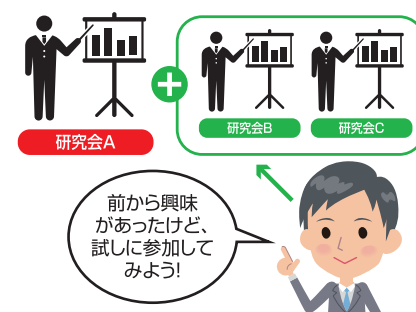
	学会員	非会員
一般/学生	¥15,400	¥25,300

※価格はすべて税込です。

1 複数の研究会に参加する
場合に登録費が安くなる



2 通信ソサイエティ全研究会へ
自由に参加できるようになる



詳細はWEBからも参照できます

技報完全電子化研究会の実施

検索



年間登録サイトはこちら ▶ <https://ken.ieice.org/ken/program/index.php>

お問合せ

通信ソサイエティ研専運営会議 技報照会窓口

✉ kensen-gihou_inquiry@mail.ieice.org