

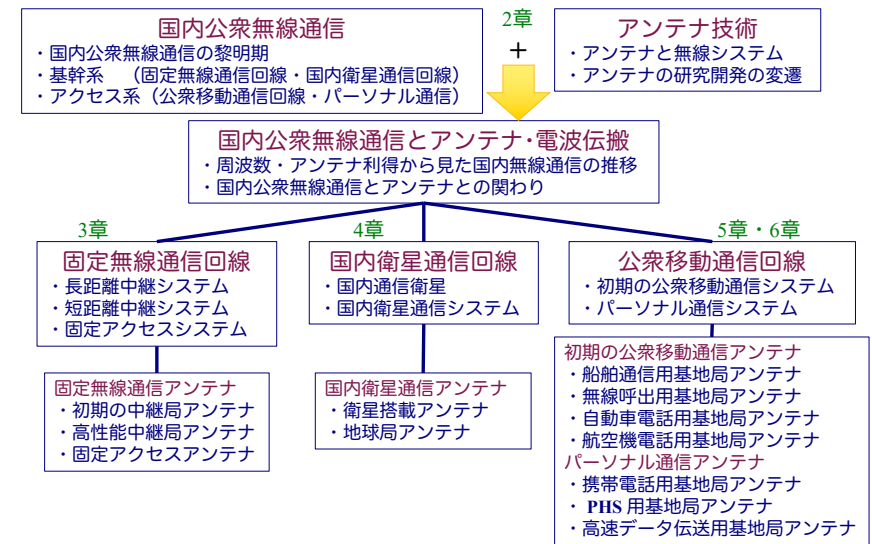
本系統化調査で対象とした範囲

- ・日本国内で研究開発し実用化された
公衆無線通信用アンテナに限る。
- ・対象とするアンテナは、主に電電公社（NTT）がサービスを提供した
固定無線通信回線・国内衛星通信回線・公衆移動通信回線で用いられたアンテナに限る。

<調査対象外とするアンテナ>

- ・移動通信の移動局用アンテナおよび携帯端末用アンテナについては、別の系統化調査で調査済である。
- ・電波天文用、放送用、レーダ用、航空援助用、ITS用、無線ICタグ用、医用、アマチュア無線用等については公衆無線通信用アンテナには該当しない。

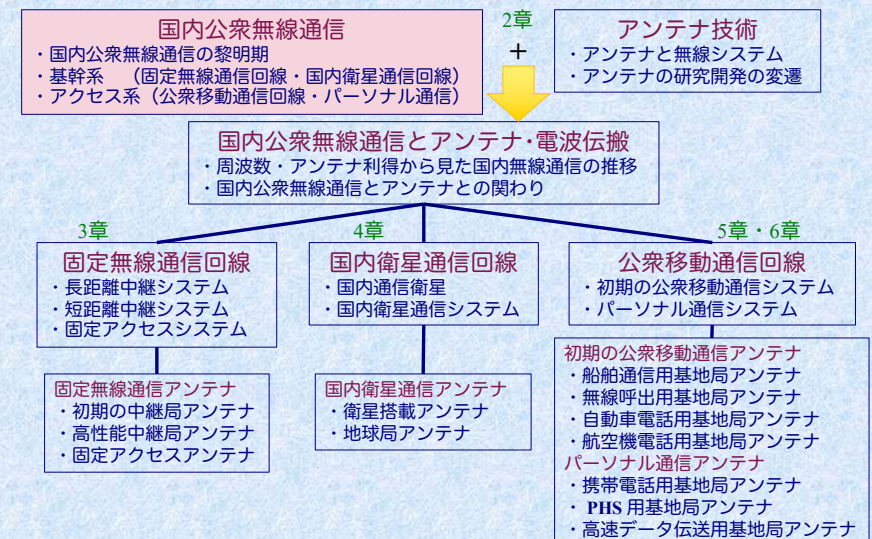
公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



国内公衆無線通信用アンテナ技術の系統図



公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



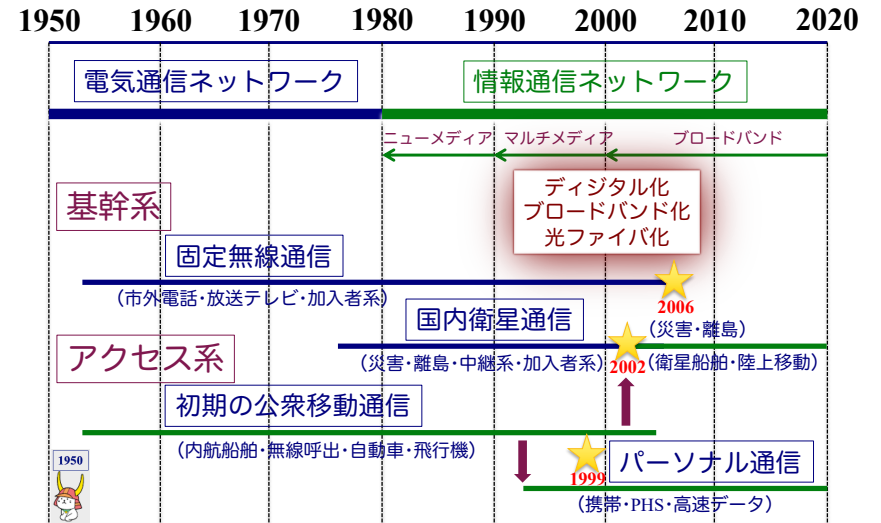
国内公衆無線通信の黎明期

- ・ 公衆無線通信サービスのはじまり
 - ・ 1908 船舶無線電報サービス (銚子無線局)
 - ・ 1923 船舶無線電話サービス (神戸港内)
長波 (LF) ⇒ 中波 (MF) ⇒ 短波 (HF)
 - ・ 1950代 超短波 (VHF) 船舶無線サービス
- ・ 無線多重電話方式のはじまり
 - ・ 1940 超短波無線多重電話回線 (石崎-当別)
 - ・ 1950代 マイクロ波多重電話回線

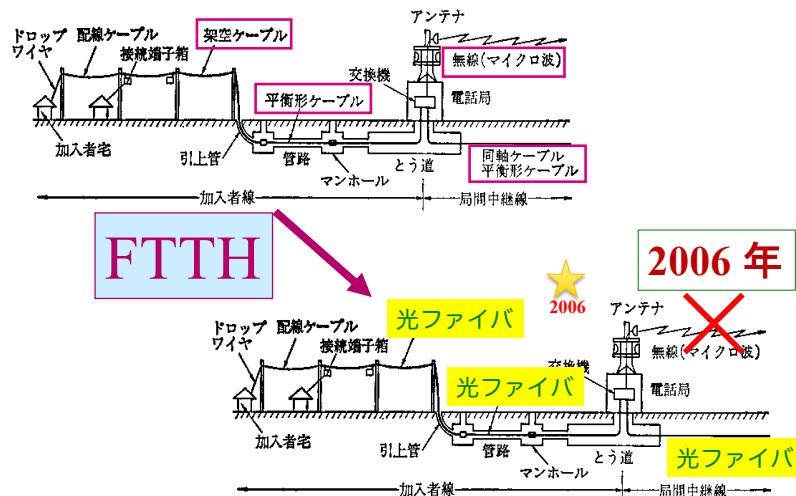


本格的な国内公衆無線通信

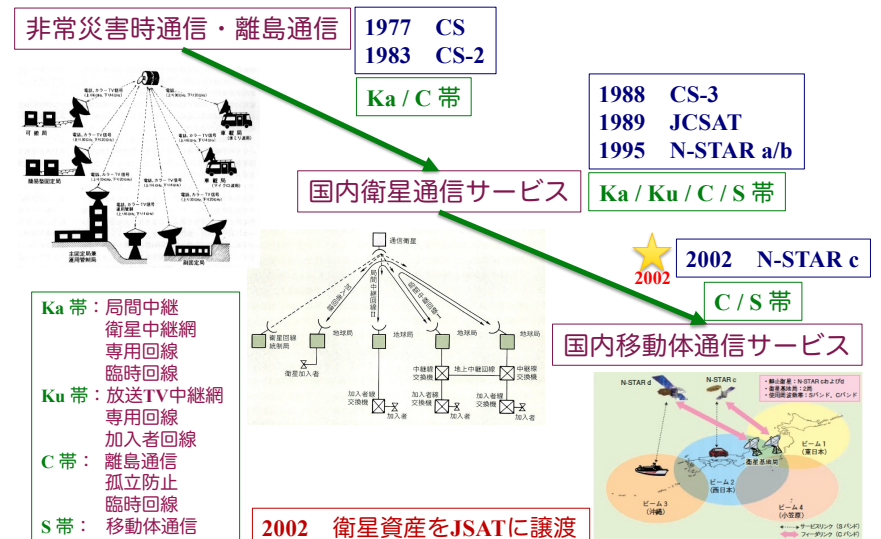
日本における本格的な国内公衆無線通信の変遷 (図2.2)



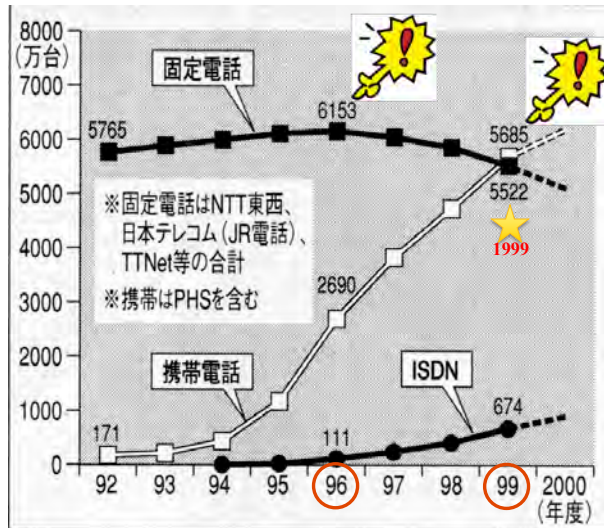
電話中継回線はペア線・同軸線から光ファイバへ



国内衛星通信サービスの変容



固定電話から携帯電話へ



公衆無線通信は基幹系 NW からアクセス系 NW へ

- ・有線通信は、ペア線・同軸線から光ファイバに移行
 - ・デジタル化・ブロードバンド化
 - ・1999 固定電話から携帯電話の時代へ
 - ⇒ 携帯電話・スマートホン・タブレット端末
 - ・2002 国内衛星通信サービスの縮小
 - ⇒ 移動体通信・離島通信・災害時通信に限定
 - ・2006 固定無線中継 NWの終了
 - ⇒ 光ファイバ化
- ↓
- ・基幹系無線 NW ⇒ 非常災害、離島、山間地
 - ・アクセス系無線 NW ⇒ パーソナル通信

無線は飛行機、ひかりは新幹線

無線は飛行機、ひかりは新幹線

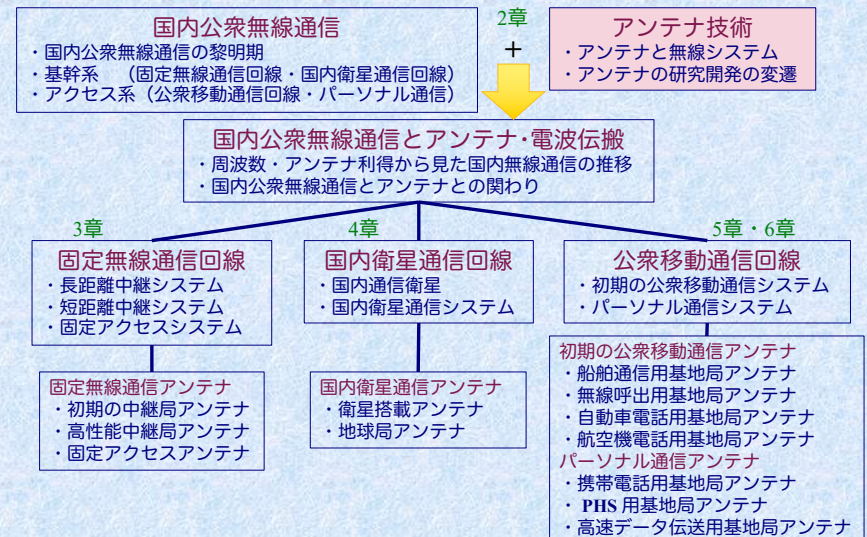
基幹系通信ネットワークの一つである長距離伝送回線の構築において、無線通信が光ファイバ通信と競合関係にあった頃、某大学教授が、無線通信を飛行機、光通信を新幹線に例えてその優劣を述べておられたことがある。

曰く、無線通信においては、Aが持っている情報をBに伝えるとき、Aの情報を電気信号に変え、無線装置によって電波に信号を乗せて、アンテナから空間に送り出す。Bは、空間を飛んでくる電波をアンテナで受け、無線装置によって電気信号を取り出し、Aの情報を受け取る。つまり、情報は乗客、電波は飛行機、アンテナは飛行場あるいは滑走路に例えられる。一方、光ファイバ通信においては、情報は乗客、光ファイバは新幹線の線路、列車はその名の通り「ひかり」である。

すなわち、「無線通信と有線通信にかかる初期設備コストや増設コスト等の比較の観点から、新たな場所に情報伝送設備を構築する場合、無線基地局を作る方が、土木工事に多大なコストを要する光ファイバを敷設するよりも簡単な設置工事のできるから利点がある。しかし、大容量伝送という点では無線は光に負けてしまう。」と言う主張であったと記憶している。

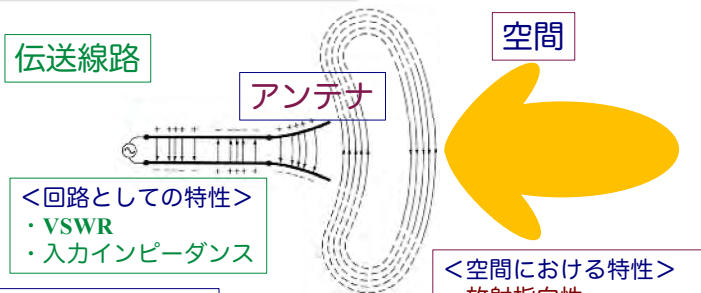
現在では、光ファイバ通信はインフラ系情報通信ネットワーク、無線通信はアクセス系情報通信ネットワークと棲み分けが確定され、上記のような両者の優劣を比較することも無くなっている。

公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



アンテナの概念と要求特性 (図2.1)

アンテナは伝送線路と空間との
インタフェース回路



<回路としての特性>
 ・ VSWR
 ・ 入力インピーダンス

<空間における特性>
 ・ 放射指向性
 ・ 利得
 ・ 交差偏波/楕円偏波率
 ・ 放射効率/開口能率
 ・ アンテナ雑音温度

語源： 昆虫の触角
 antennae (独、仏)
 антенна (露)
 aerial (英)
 空中線→アンテナ (日本)
 天線 (中国)

電磁波の発生とアンテナからの放射 (1)

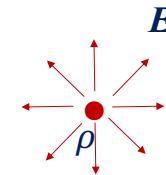
- ・ 静止している電子の周り

→ 静電界

- ・ Gauss's Law (ガウスの法則)

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \text{div } \mathbf{D} = \rho$$

(発散)

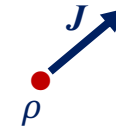


- ・ 電子が運動

→ 電流

- ・ 電荷保存則

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$



電磁波の発生とアンテナからの放射 (2)

- ・ 電子が等速運動 (電流が空間的・時間的に変化しない)

→ 定常電流界・静磁界

- ・ Ampere's Law (アンペアの法則)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

(回転)



- ・ 加速運動 (電流が空間的な移動、時間的な変動)

→ 電磁界・電磁波放射

- ・ 電流源 J が振動

$$\nabla \times \mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

- ・ 電流源 J が無いとき

$$\nabla \times \mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

(変位電流)

$$\nabla \times \mathbf{E} = \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

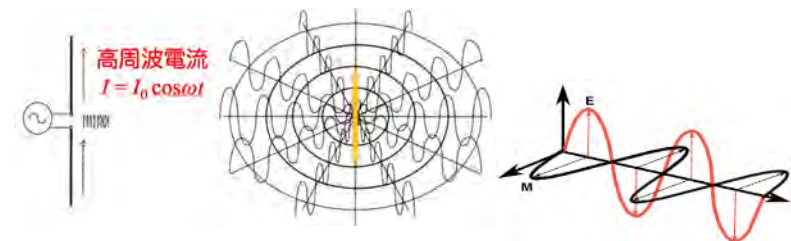
(ファラデーの法則)



電磁波の発生とアンテナからの放射 (3)

- ・ 電磁波発生における物理的な変動

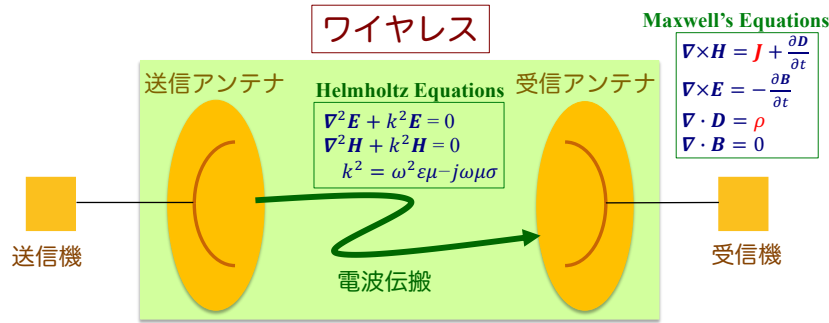
⇒ 導体 (アンテナ) に高周波電流を発生させる



【参考】 波の発生 ⇒ 物理的な変動を与える

- ・ 池に石を投げ込む
- ・ 綱の端を上下に振る

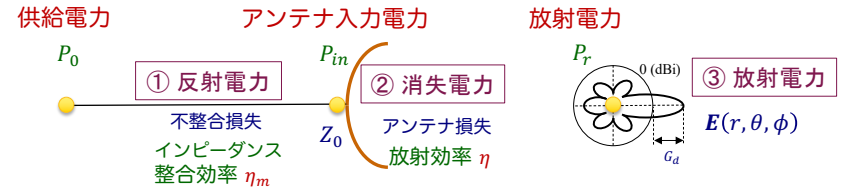
アンテナ・電波伝搬と Maxwell's Equation



電磁波の波動としての振る舞い → Maxwell's Equationで説明できる

アンテナ → 波源が存在 → ベクトルポテンシャルに対する Helmholtz型 波動方程式
電波伝搬 → 波源が無い → 電界・磁界に対する Helmholtz Equations

供給電力/アンテナ入力電力/放射電力



$$P_0 = \text{反射電力} + \text{消失電力} + \text{放射電力}$$

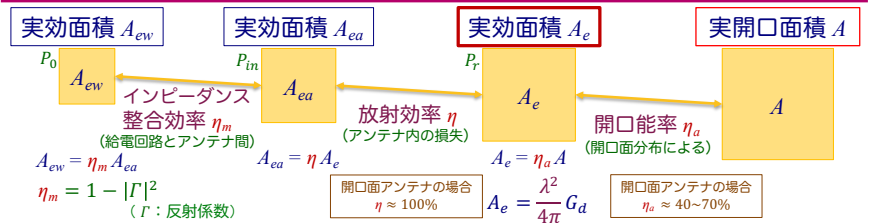
$$P_{in} = \eta_m P_0$$

$$P_r = \eta P_{in} = \eta \eta_m P_0$$

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{|E(r, \theta, \phi)|^2}{Z_0} r^2 \sin\theta d\theta d\phi$$

- ① 反射電力
- 反射して反射損となる電力
⇒ インピーダンス整合効率 η_m
- ② 消失電力
- 熱損失 (導体損・誘電体損) として消費される電力
⇒ 放射効率 η
- ③ 放射電力: P_r
- 空間に放射される電力

アンテナの開口面積と利得



動作利得 G_w (不整合損失を含む) $G_w = \frac{r^2 |E(\theta, \phi)|^2}{4\pi} \frac{Z_0}{P_0}$ (P_0 : 供給電力)

絶対利得 G_a (アンテナ損失を含む) $G_a = \frac{r^2 |E(\theta, \phi)|^2}{4\pi} \frac{Z_0}{P_{in}}$ (P_{in} : 入力電力)

指向性利得 G_d (指向性のみで決定される) $G_d = \frac{r^2 |E(\theta, \phi)|^2}{4\pi} \frac{Z_0}{P_r}$ (P_r : 放射電力)

100%指向性利得 G_{100} (均一分布の場合) $G_{100} = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$ (D : 開口径)

$$G_d = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |E(\theta, \phi)|^2 \sin\theta d\theta d\phi$$

$$G_w = \eta_m G_a, G_a = \eta G_d, G_d = \eta_a G_{100}, G_w = \frac{4\pi A_{ew}}{\lambda^2} = \frac{4\pi A_{ea}}{\lambda^2} \eta_m, G_a = \frac{4\pi A_{ea}}{\lambda^2} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \eta$$

(注) 各利得は真数表示であり、dB表示の場合は右辺の対数 (10 log₁₀) をとること。

「Maxwell の方程式」とアンテナの研究開発

【Maxwell の方程式】とアンテナの研究開発

マクスウェルは「無線通信の3祖」の1人であり、1864年に電波の存在を予言し、力学的電磁界理論を発表している。アンテナからの放射電磁界は、「Maxwell の方程式」に基づく波動方程式を解くことにより求めることが出来る。しかし、近年のアンテナ構造の複雑化に伴い、波動方程式を用いて解析的に放射電磁界を求めることは困難である。そのため、1940年代以降、波動方程式の漸近解を求める手法が用いられる。1970年代以降は、コンピュータの計算処理速度の高速化および大規模コンピュータの実現に伴い、モーメント法 (Method of Moments: MoM) や有限要素法 (Finite Element Method: FEM) を用いた周波数領域での数値解析、伝送線路行列 (Transmission Line Matrix: TLM) 法や時間領域差分 (Finite Difference Time Domain: FDTD) 法を用いた時間領域での数値解析が主流となってきている。

コンピュータを用いたアンテナ解析技術の発達により、アンテナ構造と給電法が明らかであれば、複雑な形状に対しても電磁界シミュレータを用いて簡単に放射電磁界を求めることができる。すなわち、「Maxwell の方程式」を理解せずとも、設計したアンテナの電気的特性を簡単に求めることが出来る時代が到来した。アンテナ開発技術者の中には、自作のアンテナの動作原理を理解せずにシミュレーション結果のみで実用・商用を行っている技術者も多く、アンテナの研究開発分野での大きな課題となってきている。

日本におけるアンテナ研究開発の黎明期

1925： 八木・宇田アンテナの発明

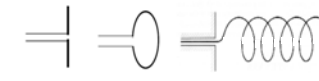


1930～1950：

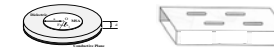
- 加藤ら： ビーム空中線リフレクタ
- 森田： 放物反射鏡
- 内田： 折返しアンテナ
- 水橋： 円形配列アレーアンテナ
- 松本： スロットアンテナ
- 虫明： 自己補対アンテナ

アンテナの分類（形状から見た分類）

・基本アンテナ
・線状アンテナ



・平面アンテナ



・開口面アンテナ



・アレーアンテナ



国内公衆無線通信へのアンテナの応用開発

1950～：

- 線状アンテナおよび開口面アンテナ
- 国内無線通信システムへの応用

1970～：

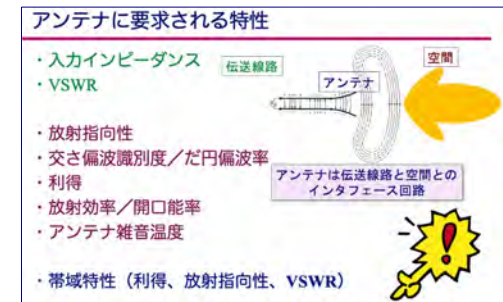
- 平面アンテナ
- 著しく研究開発が進み、多くのシステムに導入

1980～： 無線通信システムの多様化

- アレーアンテナ
- 新たな無線通信システムを切り開く基盤技術

アンテナの高性能化／高機能化技術

- ・高利得・低サイドローブ化
- ・広帯域・マルチバンド化
- ・マルチビーム化
- ・偏波共用・円偏波化
- ・低交さ偏波化
- ・低 VSWR 化
- ・小形化
- ・適応制御化



アンテナ・伝搬の研究開発が新たなシステムを切り拓く

- 方式設計ありき
- システムを理解したアンテナの研究開発

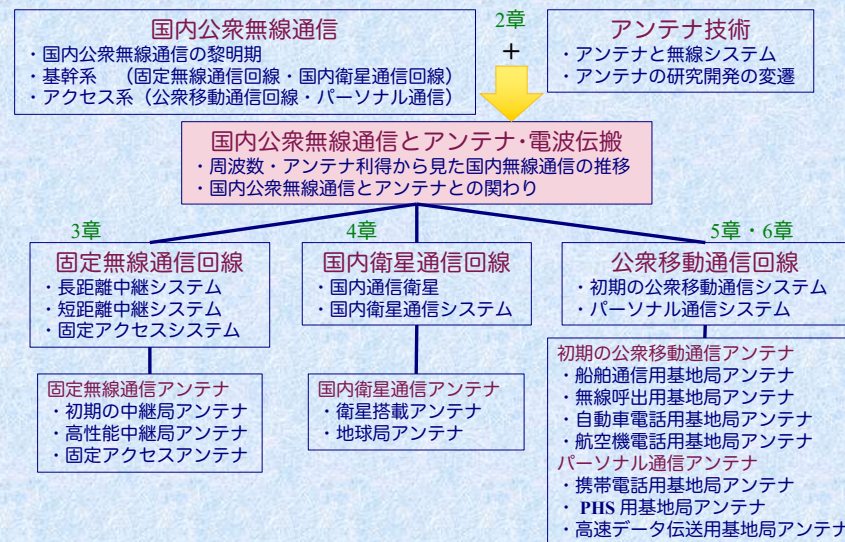


- アンテナ特性を活かす新たなシステム提案



- 伝搬特性を考慮した新たなシステム提案
 - >アダプティブアンテナ
 - >MIMO (Multiple Input Multiple Output)

公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査

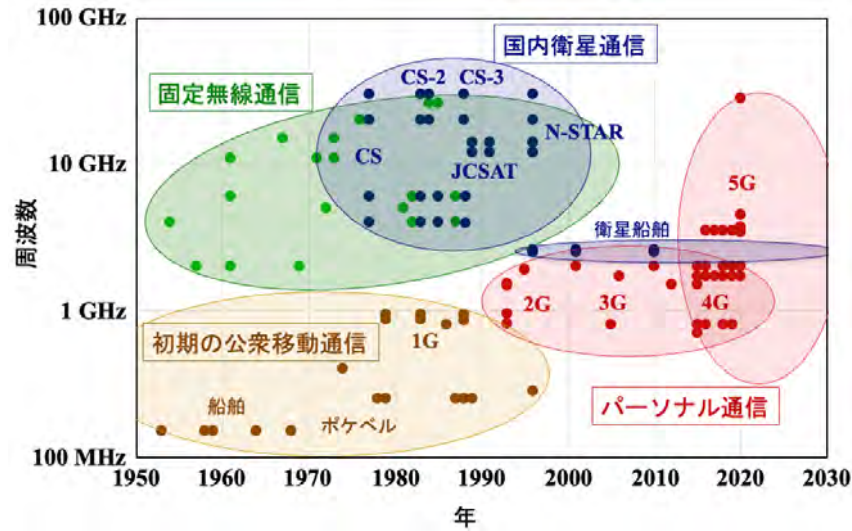


周波数・アンテナ利得から見た国内無線通信の推移

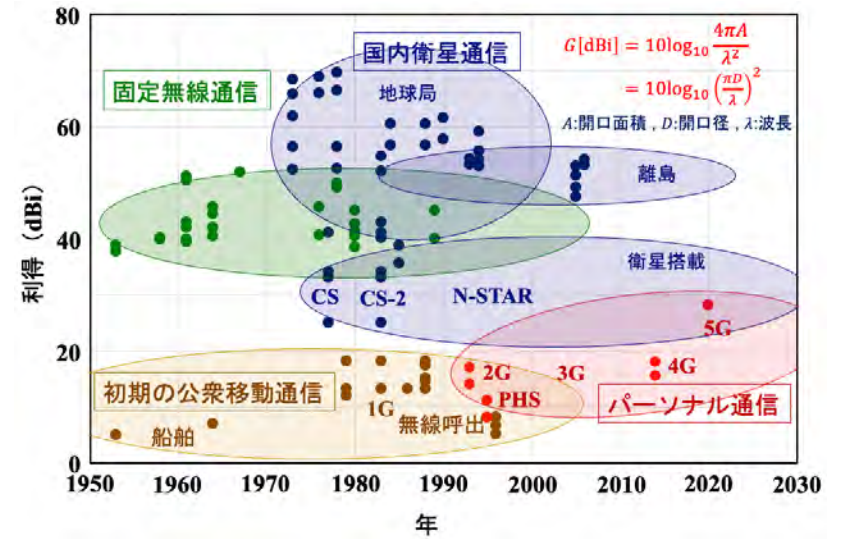
周波数帯と無線通信への適合性 (表2.1)

周波数帯	周波数・波長	電波伝搬特性	無線通信への適合性
超長波帯 (VLF)	3 ~ 30 kHz 10 ~ 100 km	伝搬損失が少ない 電離層の影響なし	地表波通信 潜水艦向け通信
長波帯 (LF)	30 ~ 300 kHz 1 ~ 10 km	電離層 D 層反射 (昼間) 電離層 E 層反射 (夜間)	無線電信 (1930 年頃まで)
中波帯 (MF)	300 kHz ~ 3 MHz 100 m ~ 1 km	電離層 D 層減衰 (昼間) 電離層 E 層反射 (夜間)	遠距離中波通信 昼間: 数 10 km 夜間: 数 100 ~ 1000 km 船舶通信
短波帯 (HF)	3 ~ 30 MHz 10 ~ 100 m	電離層 F 層反射 (昼夜で変化)	全世界向け短波通信 船舶通信
超短波帯 (VHF)	30 ~ 300 MHz 1 ~ 10 m	電波の窓 電離層 Es 層の影響 山岳回折 弱い直進性 ある程度の回折	超短波固定通信 船舶電話 無線呼出 列車電話
極短波帯 (UHF)	300 MHz ~ 3 GHz 10 cm ~ 1 m	電波の窓 山岳回折 直進性 ある程度の回折	地上固定中継回線 移動通信 (第 1 世代以降) 移動体衛星通信 無線 LAN
マイクロ波帯 (SHF)	3 ~ 30 GHz 1 ~ 10 cm	電波の窓 降雨減衰 (22 GHz 近傍) 強い直進性	地上固定中継回線 衛星通信 移動通信 (第 4 世代以降) 無線 LAN
ミリ波帯 (EHF)	30 ~ 300 GHz 1 ~ 10 mm	電波の窓 大気減衰 (酸素: 60 ~ 120 GHz) 非常に強い直進性	無線アクセス通信 電波天文
サブミリ波帯	300 GHz ~ 3 THz 0.1 ~ 1 mm	光に近い	電波天文 移動通信 (第 6 世代)

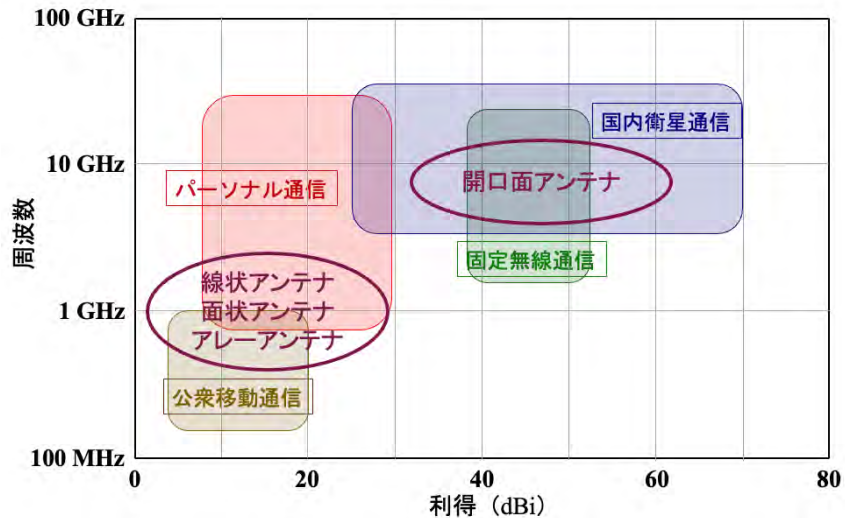
周波数から見た国内公衆無線通信の推移 (図2.3)



アンテナ利得から見た国内公衆無線通信の推移 (図2.4)



国内公衆無線通信用アンテナの利得と周波数



国内公衆無線通信と
アンテナ技術との関わり

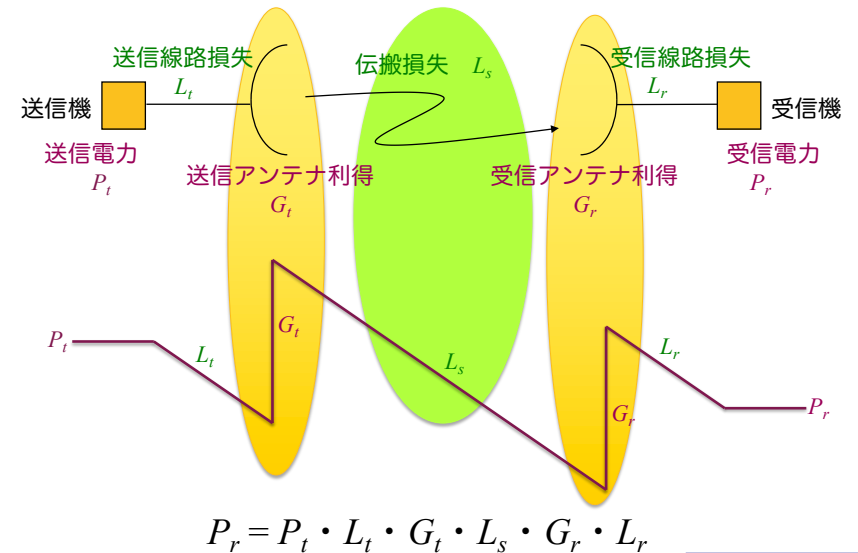
基幹系 NW システムにおけるアンテナ・伝搬

基幹系 NW システム

- ・ 放送TV／電話中継のための地上回線
- ・ 電話／データ中継のための衛星回線
- ・ 電波伝搬
 - 見通し伝搬
 - 衛星・地上局間、送受信局間
- ・ アンテナ（中継局・衛星・地球局）
 - 開口面アンテナ
 - ハードウェア中心
 - 狭ビーム、高能率化
 - 低サイドローブ



P2P の無線システムのレベルダイヤ



古き良き時代のアンテナ・伝搬設計

- ・ Ka 帯地球局アンテナ利得
 - 開口径 10m, 開口能率 60% → 67.7 dBi
 - ↓ スペック（システム要求値）
 - ↓ +1 dB
 - 開口径 11.5m → 68.9 dBi
 - コストアップ → + ???円（開口径比の3乗）
 - 利得の測定誤差： 0.1 dB

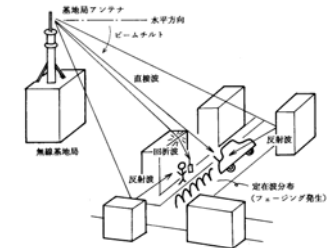


- ・ 電波伝搬
 - マージン 10 dB ???

アクセス系 NW システムにおけるアンテナ・伝搬

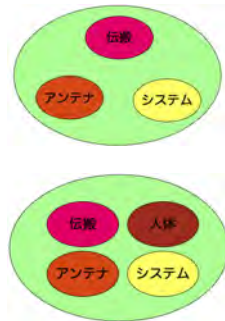
アクセス系 NW システム

- ・ 自動車／携帯通信のための移動通信回線
- ・ 電波伝搬
 - 多重波伝搬
 - 基地局・端末間
 - フェージング
- ・ アンテナ（基地局）
 - アレーアンテナ（線状・平面）
 - 広角ビーム、干渉波低減
 - ソフトウェア制御

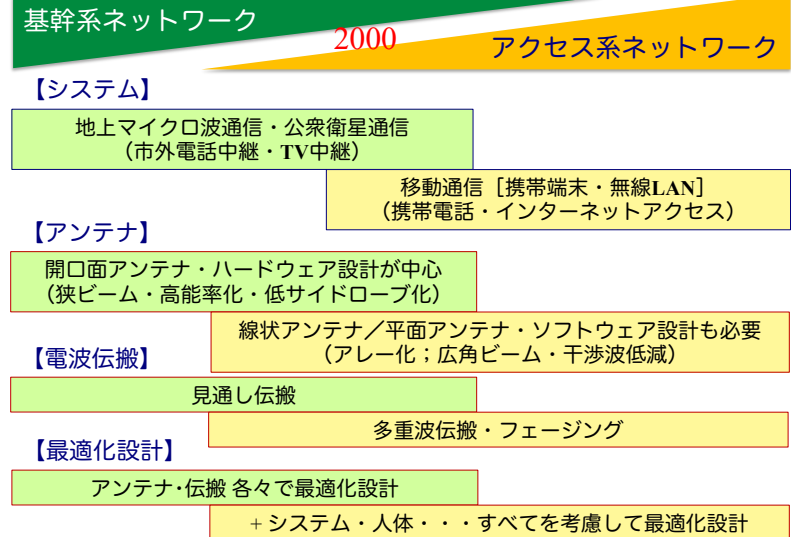


三位一体 / 四位一体 / N 位一体

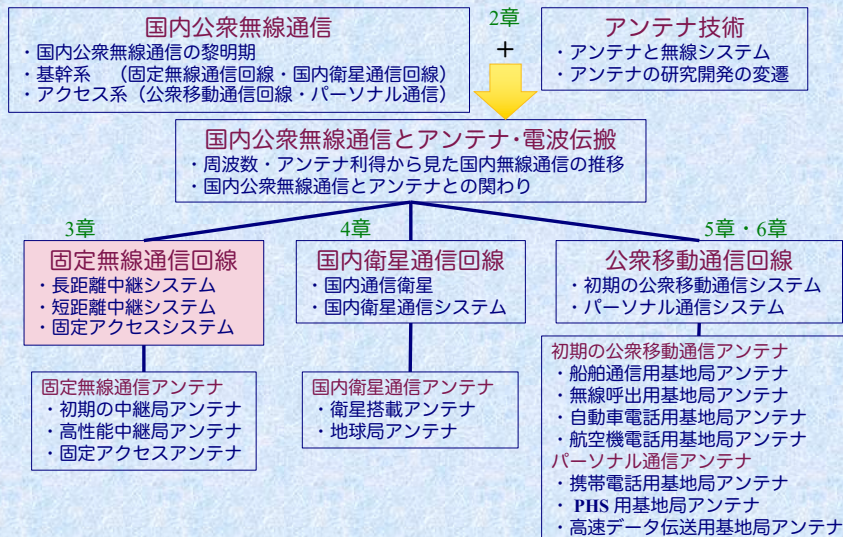
- ・「三位一体」説
 - ・アンテナ + 電波伝搬 + システム
 - ・池上文夫教授、1981 電気四学会連合大会
- ・「四位一体」説
 - ・アンテナ + 電波伝搬 + システム + 人体
 - ・藤本京平教授
- ・「N 位一体」説
 - ・「四位一体」 + FPGA・DBF・デジタル信号処理・制御アルゴリズム・ネットワーク制御・・・



NW システムの変遷とアンテナ技術との関わり

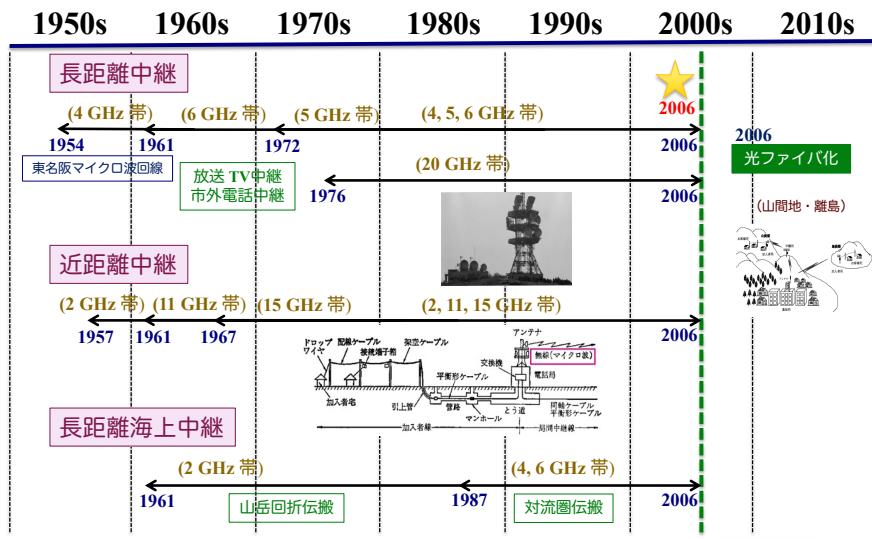


公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



固定無線中継システム

固定無線中継システムの変遷



固定無線中継システム（アナログ／デジタル）

・アナログシステム

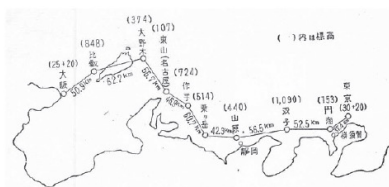
適用対象	使用周波数帯	導入時期	システム呼称
長距離中継	4 GHz	1954	SF-B1
	5 GHz	1972	SF-E1
	6 GHz	1961	SF-U1
短距離中継	2 GHz	1957	UF-B1
	11 GHz	1961	SF-T1
	15 GHz	1967	SF-F1
見通し外	2 GHz	1961	OH-21
災害対策	11 GHz	1971	

・デジタルシステム

適用対象	使用周波数	導入時期	システム呼称
長距離中継	4 GHz 帯	1982	4L-D1
	5 GHz 帯	1981	5L-D1
	6 GHz 帯	1982	6L-D1
短距離中継	20 GHz 帯	1976	20L-P1
	2 GHz 帯	1969	2S-P1
	11 GHz 帯	1973	11S-P1
長距離海上中継	15 GHz 帯	1973	15S-P1
	4/6 GHz 帯	1987	LS-200M

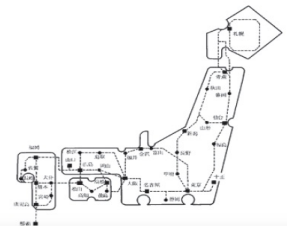
固定無線中継回線

・初期の 4 GHz 帯マイクロ波中継回線



- ・ 1954 導入時点（東名阪）
- ・ 無線局 10 局
- ・ 距離：40 ~ 60 km
- ・ その後、全国展開（長距離・短距離）

・ 4 GHz 帯を用いたアナログ放送テレビ中継回線

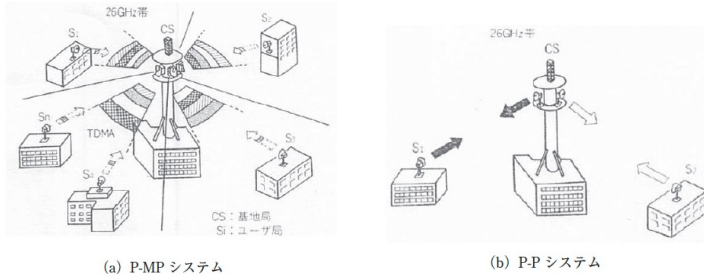


- ・ 2011 アナログ放送終了時点

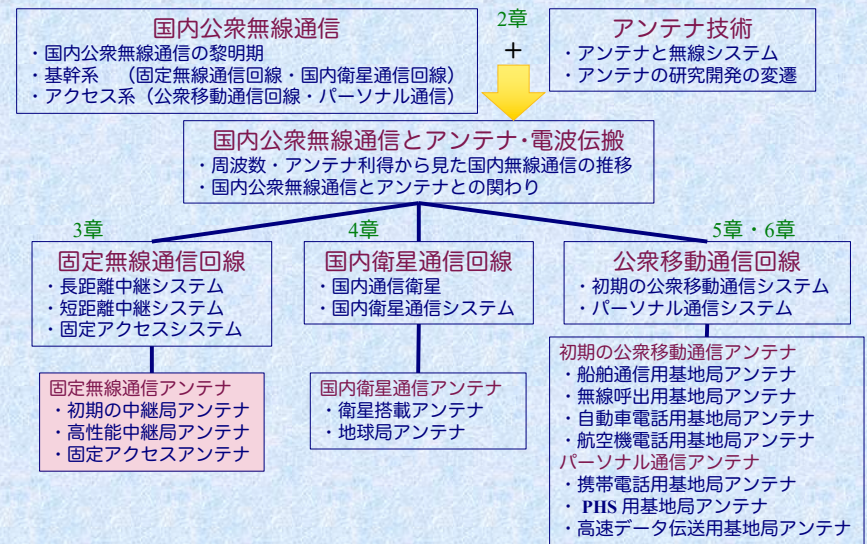
固定アクセスシステム

固定無線アクセスシステム

適用対象	使用周波数帯	導入時期	システム呼称
アナログ加入者無線	26 GHz	1984	26SS-A1
デジタル加入者無線		1984	26SS-D1
		1985	P-P

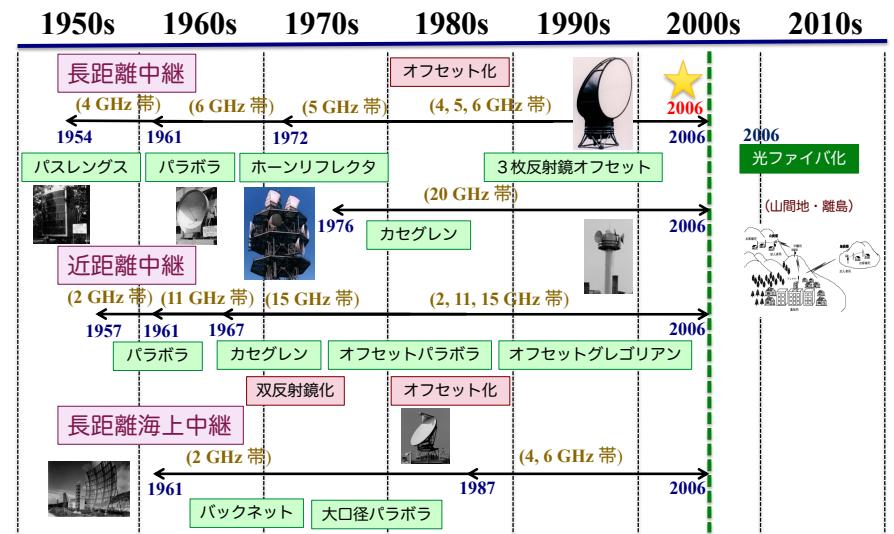


公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



固定無線中継システム用 中継局アンテナ

固定無線中継システム用アンテナの変遷

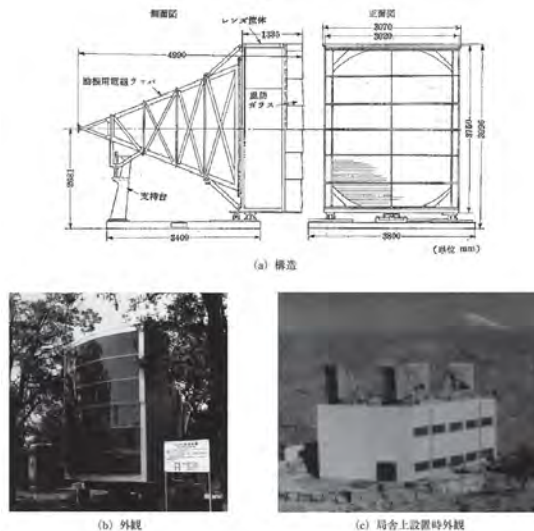


初期の固定無線中継のための中継局アンテナ

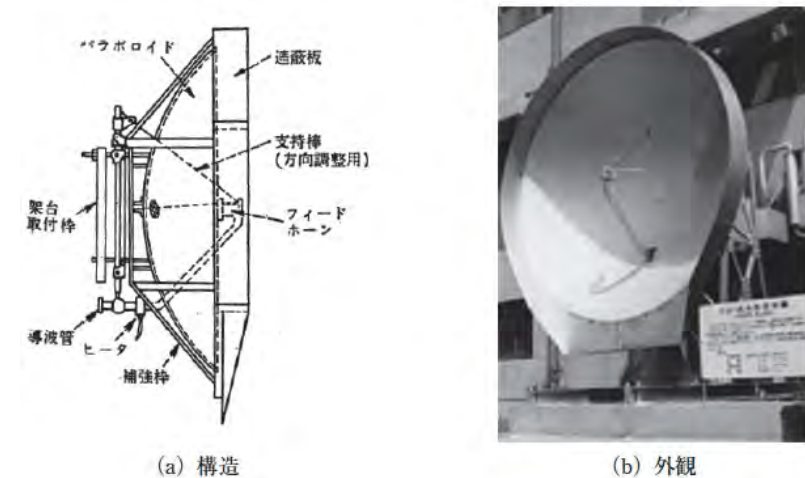
初期の固定無線中継局アンテナ技術の変遷

- ・長距離中継
 - ・1954 パスレングスレンズアンテナ (4 GHz帯)
 - ↓ 小形軽量化
 - ・1955 パラボラアンテナ (4 GHz帯)
 - ↓ 周波数共用化
 - (高開口効率・低相互結合度・低広角指向性・低VSWR)
 - ・1964 ホーンリフレクタアンテナ (4/6 GHz帯)
- ・短距離中継
 - ・1957 パラボラアンテナ (2 GHz帯)
 - ↓ 高能率・低サイドローブ化
 - ・1967 カセグレンアンテナ (15 GHz帯)

パスレングスレンズアンテナ (図3.4)



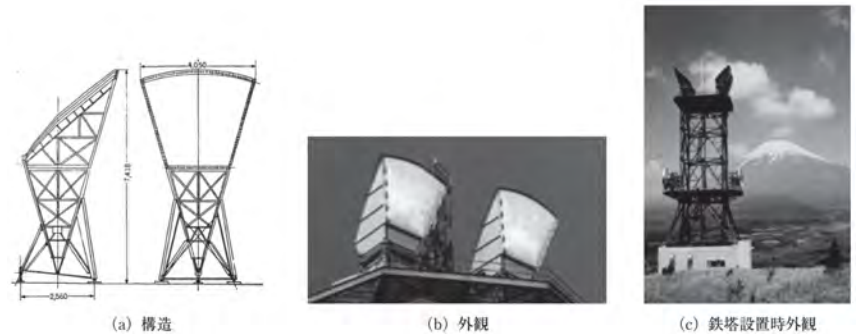
初期のパラボラアンテナ (図3.5)



パスレングスレンズとパラボラの性能 (表3.5)

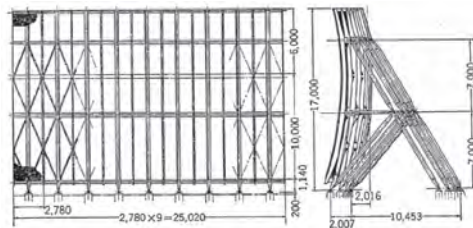
項目	パスレングスレンズ アンテナ	パラボラアンテナ
周波数帯	3.7 ~ 4.2 GHz	3.6 ~ 4.2 GHz
開口径	3.3 m × 2.8 m	3.3 m
指向性利得	37.7 ~ 38.7 dBi	39.8 ~ 40.2 dBi
前後利得比	65 ~ 75 dB	≥ 65 dB
側面相互結合減衰量	85 ~ 90 dB	≥ 85 dB
VSWR	≤ 1.15	≤ 1.07
重量	約 3,400 kg	約 500 kg

ホーンリフレクタアンテナ (図3.6・表3.6)

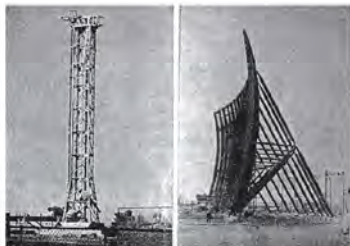


項目	4 GHz 帯	6 GHz 帯
周波数帯	3.6 ~ 4.2 GHz	5.925 ~ 6.425 GHz
開口面積	8.75 m ²	
指向性利得	40.4 ~ 41.9 dBi	44.4 ~ 45.6 dBi
サイドローブレベル	≤ -70 dB (@ θ > 60°)	
VSWR	≤ 1.03	≤ 1.02
重量	1.69 ton	

見通し外通信用大口径パラボラアンテナ (図3.7・表3.7)



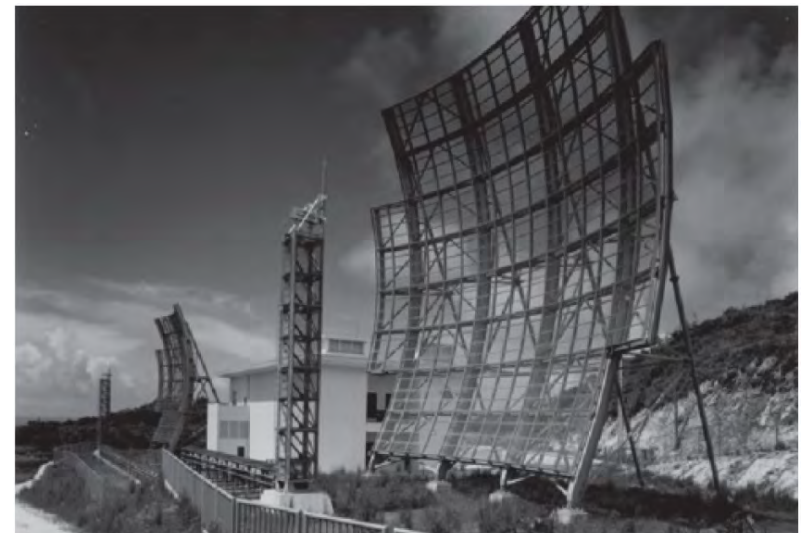
(a) 構造



(b) 外観

項目	700 Hz 帯	800 MHz 帯	2 GHz 帯	
周波数帯	698 ~ 737.6 MHz	749.2 ~ 896 MHz	2.115 ~ 2.300 GHz	
偏波	水平	垂直	水平	垂直
一次放射器	ダイポールアレー	ホーンアレー	4 分割ホーン	
反射鏡面	方形	回転放射物面	金属網 (透過率 -11 ~ -15 dB)	
開口径	25 m × 16 m			
指向性利得	39.4 ~ 39.8 dBi	42.0 ~ 42.8 dBi	50.2 ~ 50.7 dBi	50.9 ~ 51.0 dBi
VSWR	≤ 1.5			
電力容量	≥ 2 kW	≥ 5 kW	≥ 1 kW	
耐風速	瞬間最大風速 75 m/sec			

対流圏散乱伝搬を用いた見通し外通信用アンテナ (図3.8)



高性能化を図った 固定無線中継局アンテナ

高性能固定無線中継局アンテナ技術の変遷

・多周波数共用化

4 GHz 帯 (1954) ⇒ 2 GHz 帯 (1957)
 ⇒ 6 GHz 帯 (1961) ⇒ 11 GHz 帯 (1961)
 ⇒ 15 GHz 帯 (1967) ⇒ 5 GHz 帯 (1972)
 ⇒ 20 GHz 帯 (1976)



・高性能化

・双反射鏡化

カセグレン

・オフセット給電化

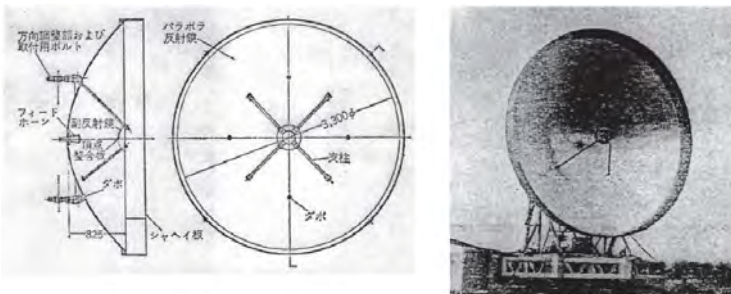
オフセットパラボラ・オフセットカセグレン

オフセットグレゴリアン・オフセット3枚反射鏡

- ・利得の向上
- ・VSWR低減
- ・広角指向性改善
- ・偏波共用
- ・多周波数帯共用

カセグレンアンテナ (図3.9・表3.9)

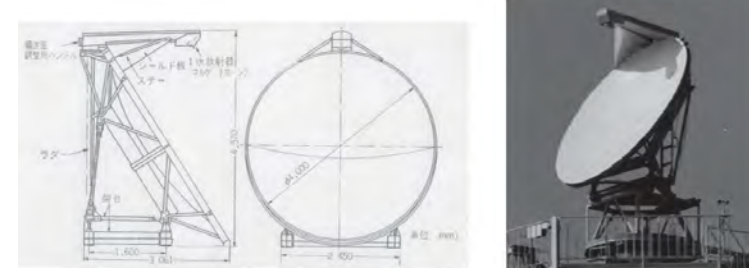
オフセットパラボラアンテナ (図3.10・表3.10)



(a) 構造

(b) 外観

項目	性能
周波数帯	3.7 ~ 4.2 GHz
開口径	3.3 m
指向性利得	51.8 dBi
開口効率	57 %
サイドロープレベル	-40 ~ -50 dB (0 ~ 30°)
	-50 ~ -60 dB (30 ~ 90°)
	≦ -65 dB (90 ~ 180°)
交差偏波	≦ -40 dB
VSWR	≦ 1.055

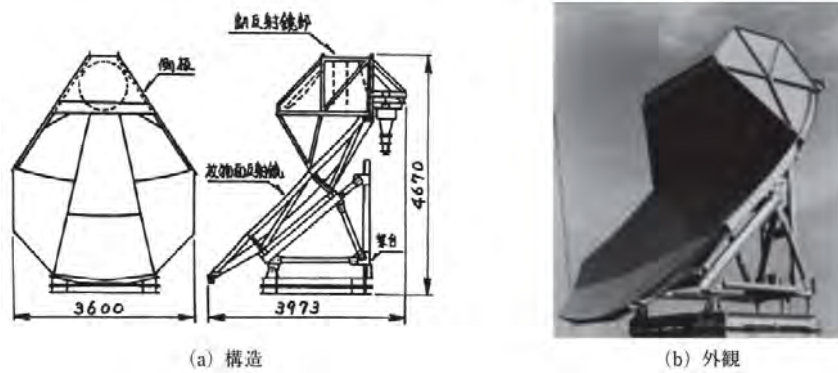


(a) 構造

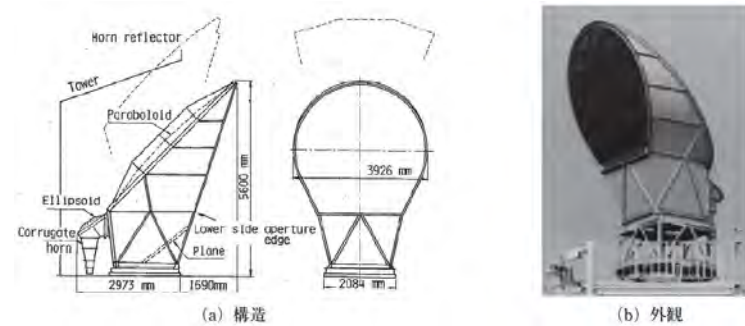
(b) 外観

項目	オフセットパラボラ アンテナ	カセグレン アンテナ	パラボラ アンテナ
周波数帯	3.7 ~ 4.2 GHz		
開口径	4 m		
一次放射器	コルゲートホーン	円錐ホーン	
指向性利得	49.0 dBi	50.8 dBi	50.8 dBi
開口効率	57 %		
サイドロープレベル	≦ -20 dB	≦ 0 dB	≦ 0 dB
交差偏波	≦ -40 dB	≦ -35 dB	≦ -30 dB
VSWR	≦ 1.06	≦ 1.055	≦ 1.07

折曲げホーンリフレクタアンテナ (図3.11)

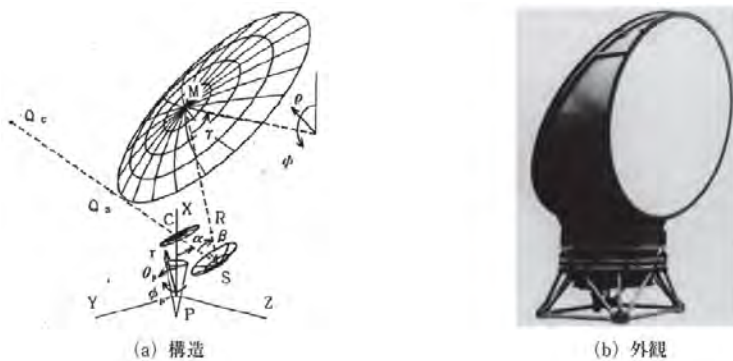


オフセット3枚反射鏡アンテナ (図3.12・表3.11)



項目	3枚反射鏡オフセット パラボラアンテナ		ホーンリフレクタ アンテナ	
周波数帯	3.6 GHz	6.425 GHz	3.6 GHz	6.425 GHz
指向性利得	40.4 dBi	45.4 dBi	40.6 dBi	45.5 dBi
交差偏波レベル	-24.4 dB	-28.0 dB	-18.5 dB	-18.5 dB
正面方向 XPD	≥ 43 dB		≥ 41 dB	
VSWR	≤ 1.025		≤ 1.035	
高さ	5,600 mm		7,482 mm	
幅	3,926 mm		4,016 mm	
奥行き	4,663 mm		3,299 mm	
重量	2.0 ton		2.8 ton	

鏡面修整オフセット3枚反射鏡アンテナ (図3.13・表3.12)



項目	性能
周波数帯	3.6 ~ 6.175 GHz
開口径	3.6 m
指向性利得	39.9 ~ 45.0 dBi
開口能率	53 ~ 64 %
交差偏波レベル	≤ -38 dB
VSWR	≤ 1.03

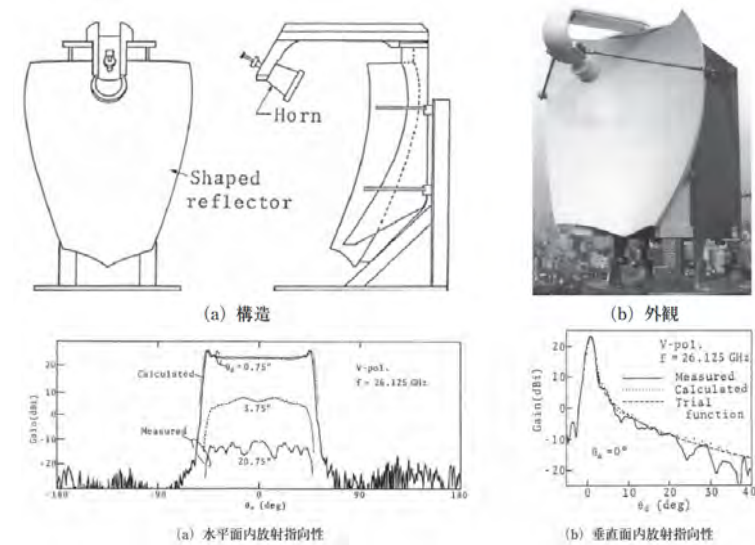
**固定アクセス用
無線固定局アンテナ**

固定アクセス用無線固定局アンテナ技術

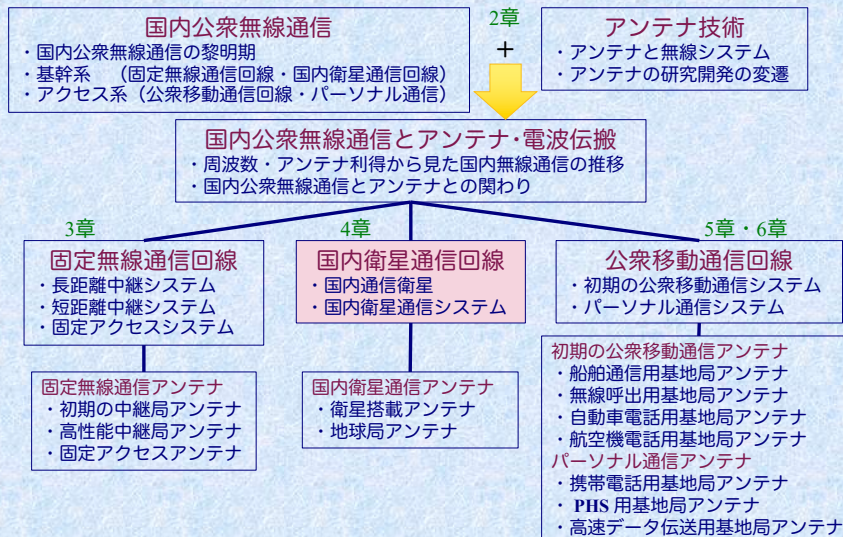
- ・ P-MP
 - ・ 90°扇形ビーム（水平面内）
 - ・ コセカント2乗ビーム（垂直面内）
- ・ P-P
 - ・ カセグレンアンテナ

適用対象	使用周波数帯	開口径	適用可能なアンテナ形式
P-MP	26 GHz	60 cm × 50 cm	90°扇形ビームアンテナ
P-P	26 GHz	30 cm 60 cm 120 cm	カセグレンアンテナ

扇形/コセカント2乗ビームを持つアンテナ（図3.16・図3.17）

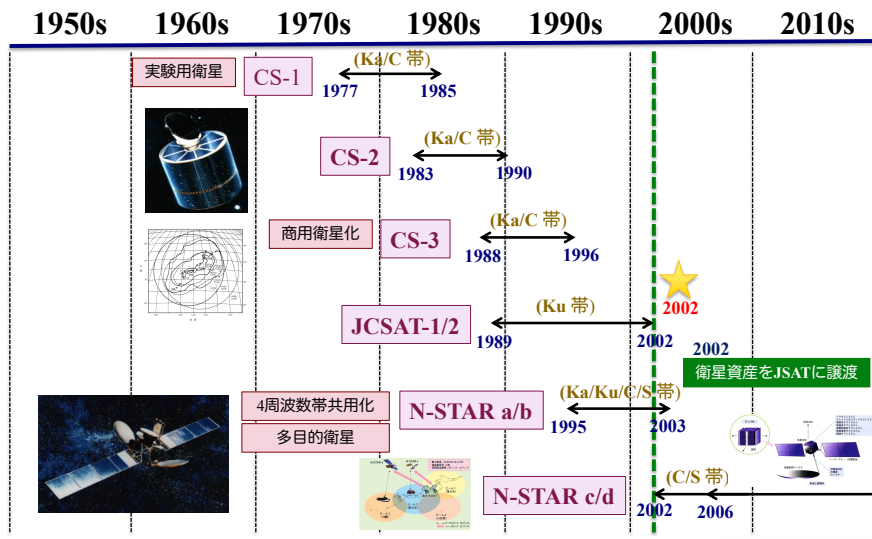


公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



国内通信衛星

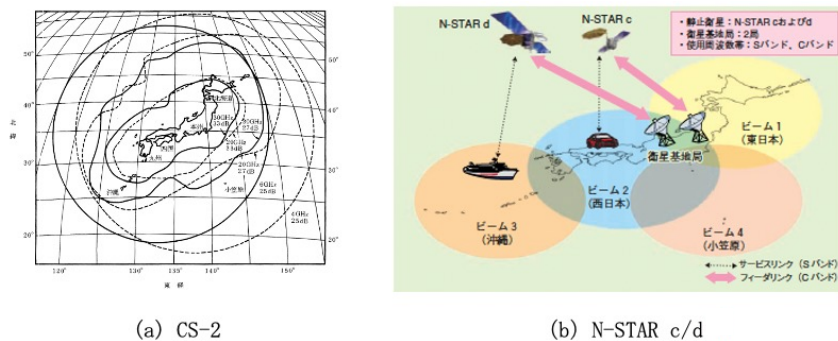
国内通信衛星の変遷



国内通信衛星 (表4.1)

衛星名称	打上げ時期	衛星重量	周波数帯	特徴
実験衛星 CS	1977.12	約 350 kg	Ka 帯 C 帯	・スピン安定衛星 ・CS 実験を 1978.3 に開始
実用衛星 CS-2 CS-3	CS-2a : 1983.2 CS-2b : 1983.8	約 350 kg	Ka 帯 C 帯	・スピン安定衛星 ・国産化
	CS-3a : 1988.2 CS-3b : 1988.8	約 550 kg		
実用衛星 JCSAT	JCSAT-1 : 1989.3 JCSAT-2 : 1990.1	約 1.37 ton	Ku 帯	・スピン安定衛星 ・JCSAT 調達
実験衛星 ETS-VI	1994.8	約 2 ton	Ka 帯 C 帯 S 帯	・3 軸姿勢制御衛星 ・2 ton 級衛星実現の実験用 ・移動体衛星実験
実用衛星 N-STAR	N-STAR a : 1995.8 N-STAR b : 1996.2	約 2 ton	Ka 帯 Ku 帯 C 帯 S 帯	・3 軸姿勢制御衛星 ・NTT 国際調達 (米国 SSL) ・2002 に JSAT に資産譲渡
	N-STAR c : 2002.7	約 1.6 ton	C 帯 S 帯	・3 軸姿勢制御衛星 ・NTT ドコモ調達 (米国 ロッキード・マーティン) ・2010.6 にスカパー JSAT に移譲
	N-STAR d : 2006.4			・3 軸姿勢制御衛星 ・JSAT 調達 (米国 ロッキード・マーティン)

実用衛星アンテナの照射エリア (図4.1)



【文献】山本、他：NTTDoCoMoテクニカル・ジャーナル, vol.18, no.2, pp.37-42, July 2010.

国内衛星通信システム

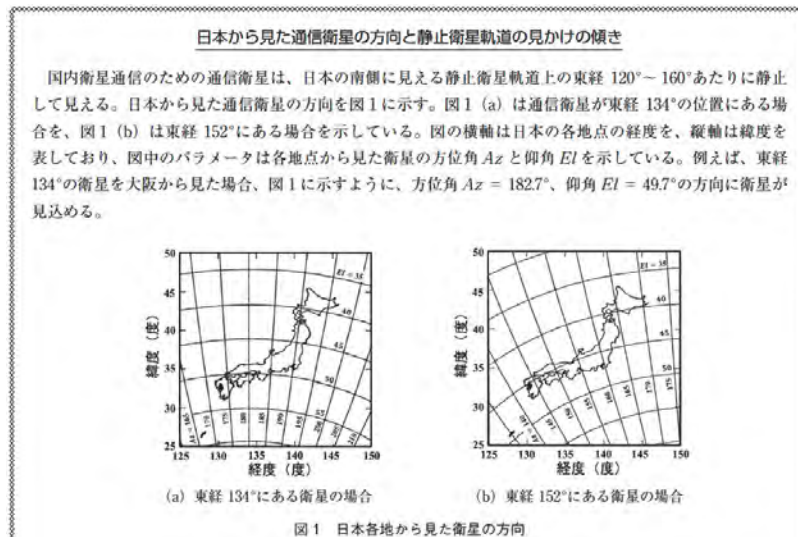
代表的な国内衛星通信システム (表4.2)

適用対象	導入時期	設置場所	衛星	周波数帯	用途 (呼称)	
総括局間中継回線	1983	中継局	CS-2, CS-3a	Ka 帯	8 総括局間 (SK-10)	
衛星中継網	1988	中継局	CS-3	Ka 帯	公衆網う回中継 (DYANET)	
	1996		N-STAR a/b	Ka 帯	公衆網 (DYANET-X)	
放送テレビ中継網	1989	中継局	JCSAT-2	Ku 帯	放送テレビ中継	
離島回線	1983	離島	CS-2, CS-3b	C 帯	小笠原・硫黄島 (SC-20)	
	1983			C 帯	小笠原・硫黄島 (SC-30)	
臨時回線 (車載)	1983	車載	CS-2, CS-3	Ka 帯	車載 (SK-01T)	
	1983			C 帯	車載 (SC-01T)	
	1996			N-STAR a/b	Ku 帯	デジタル車載 (DYANET-X)
孤立防止無線回線	1985	加入者	CS-2, CS-3b	C 帯	孤立防止 (SC-31)	
デジタル専用回線	1984	加入者	CS-2	Ka 帯	衛星専用網 (SDCS)	
	1989			JCSAT-1		Ku 帯
	1996			N-STAR a/b		Ku 帯
映像中継回線	1989	加入者	JCSAT-1	Ku 帯	映像 (SVCS)	
	1989			Ku 帯	映像 (車載)	
デジタル加入者回線	1996	加入者	N-STAR a/b	Ku 帯	デジタル映像 (EPOC)	
	1991			JCSAT-1	Ku 帯	加入者 (DYANET-II)
マルチメディア系回線	1996	加入者	N-STAR a/b	Ku 帯	加入者 (DYANET-X)	
	1996			Ku 帯	同報インタラクティブ	
移動体衛星回線	1996	加入者	N-STAR a/b	S 帯	船舶・自動車・航空機	
	2010			N-STAR c/d	S 帯	船舶・自動車

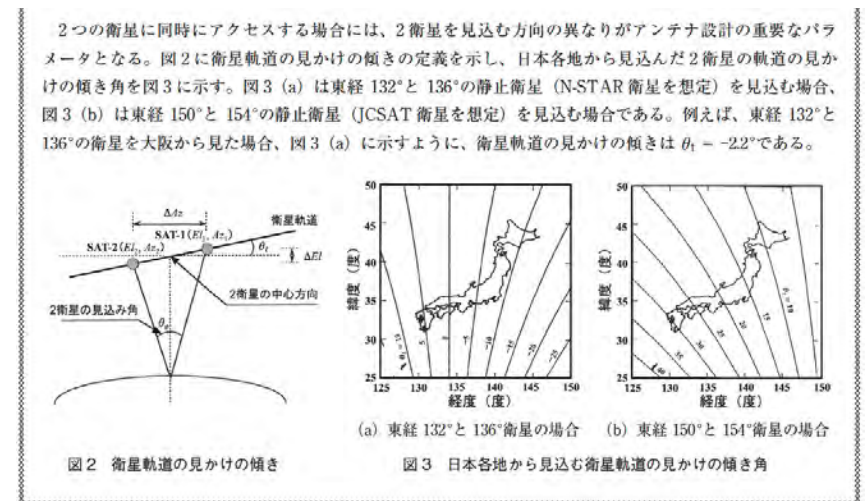
国内衛星通信システムで用いた周波数と偏波 (表4.2)

衛星名称	周波数帯	使用周波数 [GHz]		偏波	
		衛星⇒地球局	地球局⇒衛星	衛星⇒地球局	地球局⇒衛星
CS-2 CS-3	Ka 帯	17.7 ~ 21.2	27.5 ~ 31.0	右旋円	左旋円
	C 帯	3.70 ~ 4.20	5.925 ~ 6.425	右旋円	左旋円
JCSAT	Ku 帯	12.25 ~ 12.75	14.0 ~ 14.5	垂直 / 水平	垂直 / 水平
N-STAR a N-STAR b	Ka 帯	17.7 ~ 21.2	27.5 ~ 31.0	右旋円	左旋円
	Ku 帯	12.25 ~ 12.75	14.0 ~ 14.5	垂直 / 水平	垂直 / 水平
	C 帯	3.70 ~ 4.20	5.925 ~ 6.425	右旋円	左旋円
N-STARc N-STAR d	S 帯	2.505 ~ 2.535	2.660 ~ 2.690	右旋円	右旋円
	C 帯	4.12 ~ 4.20	6.345 ~ 6.425	左旋円	右旋円
	S 帯	2.505 ~ 2.535	2.660 ~ 2.690	右旋円	右旋円

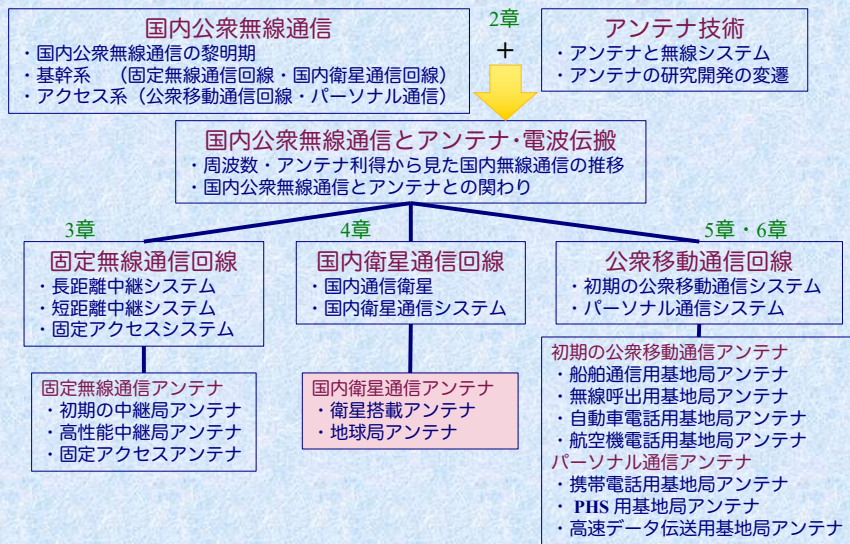
衛星の方向と静止衛星軌道の見かけの傾き (1)



衛星の方向と静止衛星軌道の見かけの傾き (2)

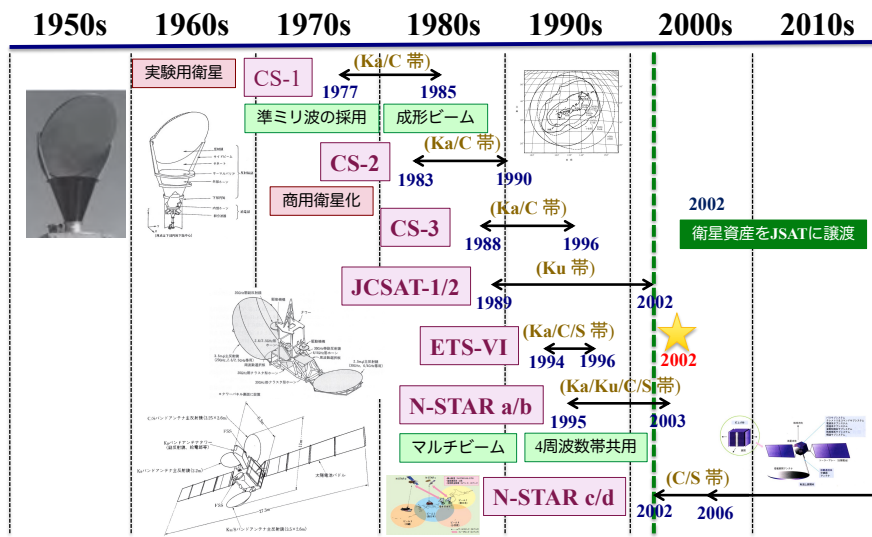


公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



衛星搭載アンテナ

衛星搭載アンテナの変遷

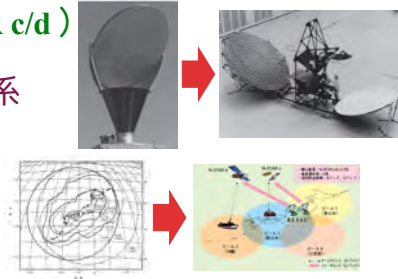
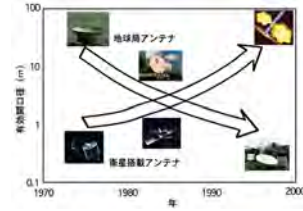


衛星搭載アンテナのビーム形状とアンテナ形式 (表4.4)

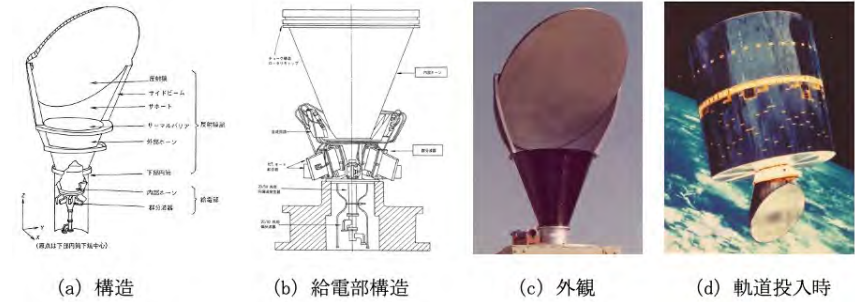
衛星名称	周波数帯	ビーム形状	有効開口径	アンテナ形式
実験衛星 CS	30/20 GHz 6/4 GHz	成形ビーム	1 m	鏡面修整成形ビーム ホーンリフレクタアンテナ
実用衛星 CS-2・CS-3	30/20 GHz 6/4 GHz	成形ビーム	1 m	鏡面修整成形ビーム ホーンリフレクタアンテナ
実用衛星 JCSAT	14/12 GHz	成形ビーム	2.4 m	周波数選択鏡面を用いた オフセットパラボラアンテナ
実験衛星 ETS-VI	30 GHz	マルチビーム	2.5 m	周波数選択鏡面を用いた オフセットカセグレンアンテナ
	6/4 GHz	成形ビーム	2.5 m	周波数選択鏡面を用いた オフセットカセグレンアンテナ
	20 GHz 2.6/2.5 GHz	マルチビーム マルチビーム	3.5 m	周波数選択鏡面を用いた オフセットカセグレンアンテナ
実用衛星 N-STAR a/b	30/20 GHz	成形ビーム マルチビーム	2.2 m	マルチホーン形式 成形ビーム/マルチビーム オフセットカセグレンアンテナ
	6/4 GHz	成形ビーム	2.6 m	マルチホーン給電オフセット 反射鏡形式成形ビームアンテナ
	2.6 GHz	マルチビーム		オフフォーカス給電オフセット 反射鏡形式マルチビームアンテナ
	14/12 GHz 2.5 GHz	成形ビーム マルチビーム	2.6 m	平面反射鏡を有する修整オフセット 反射鏡形式成形ビームアンテナ オフフォーカス給電オフセット 反射鏡形式マルチビームアンテナ
実用衛星 N-STAR c/d	6/4 GHz	スポットビーム	5.1 m	オフセットパラボラアンテナ
	2.6/2.5 GHz	マルチビーム		アクティブアレー 給電 オフセットパラボラアンテナ

衛星搭載アンテナ技術の変遷

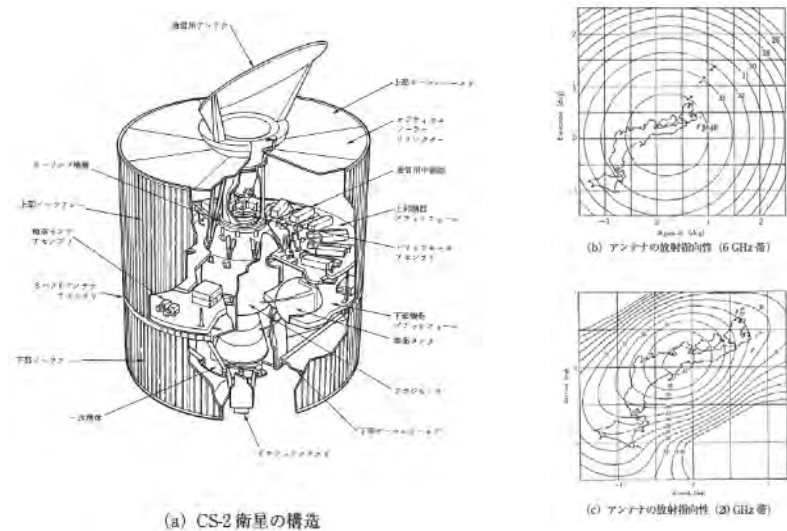
- ・ 小口径 ⇒ 大口径
- ・ 周波数共用
 - 1977：Ka/C 帯共用 (CS)
 - 1994：Ka/C/S 帯共用 (ETS-VI)
 - 1995：Ka/Ku/C/S 帯共用 (N-STAR a/b)
 - 2002：C/S 帯共用 (N-STAR c/d)
- ・ 単一反射鏡系 ➡ 複数反射鏡系
- ・ 成形ビーム ➡ マルチビーム
- ・ 展開アンテナの採用



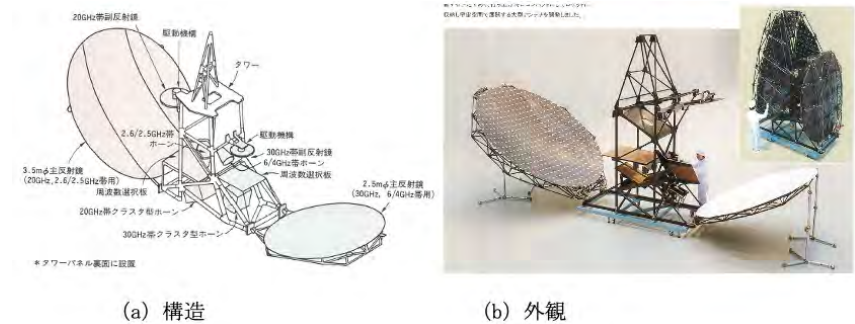
通信衛星 CS 搭載アンテナ (図4.2)



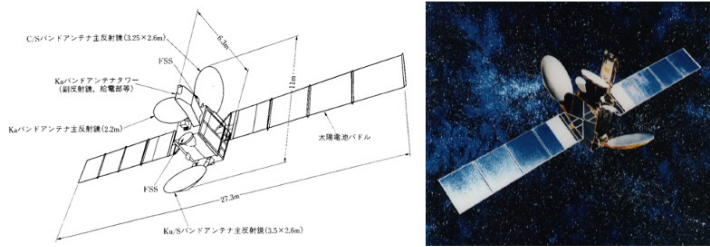
通信衛星 CS-2 搭載アンテナの放射指向性 (図4.3)



実験用衛星 ETS-VI 搭載アンテナ (図4.4)



実用通信衛星 N-STAR a/b (図4.5・表4.5)

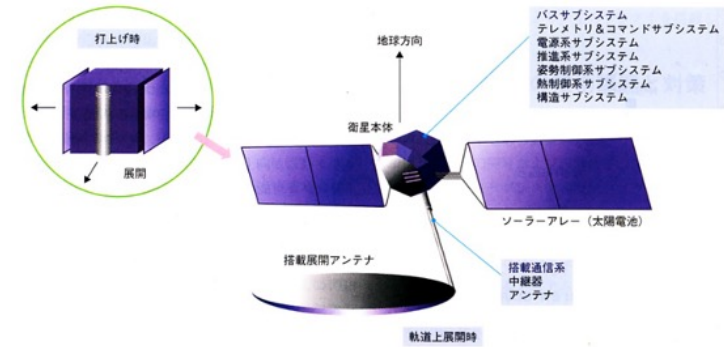


(a) 構造

(b) 軌道投入時

アンテナ	周波数帯	主反射鏡有効開口径	ビーム形状	一次放射器	周波数選択板
Ka	30/20 GHz	2.2 m	成形ビーム	ホーンアレー (周波数帯別)	透過 (30 GHz 帯)
			マルチビーム		反射 (20 GHz 帯)
Ku/S	14/12 GHz	2.6 m	成形ビーム (鏡面修整)	ホーン (周波数共用)	反射
	2.5 GHz		マルチビーム (オフフォーカス給電)	ヘリカルアレー	透過
C/S	6/4 GHz	2.6 m	成形ビーム (アレー給電)	ホーンアレー (周波数共用)	透過
	2.6 GHz		マルチビーム (オフフォーカス給電)	ヘリカルアレー	反射

実用通信衛星 N-STAR c/d (図4.6)



地球局アンテナ

地球局アンテナの変遷

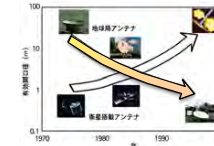
1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	
		衛星実験		実用サービス	2002	衛星資産をJSATに譲渡	
大口径	局間中継 (12.8 m)	カセグレン	オフセット化 (11.5 m)	オフセットカセグレン	★ 2002	(Ka 帯)	
小口径	専用回線	楕円ビーム化	オフセット化	小口径化	オフセットカセグレン	(Ka 帯)	
デュアルビーム	DYANET	ダブルトラス	放送TV中継	オフセットカセグレン	(4.2 m), (4.6 m), (5.5 m)	(Ka/Ku/C 帯)	
	離島通信・孤立防止	小口径化	楕円ビーム化 (3 m)	(1.8 m)	パラボラ	カセグレン (9.2, 7.6 m)	(C 帯)
	マルチメディア	加入者回線	簡易化	パラボラ (0.45 m)		(Ku 帯)	
		移動体通信	円錐ビーム化	プリント		アクティブフェイズドアレー (S 帯)	

代表的な地球局アンテナの形式 (表4.6)

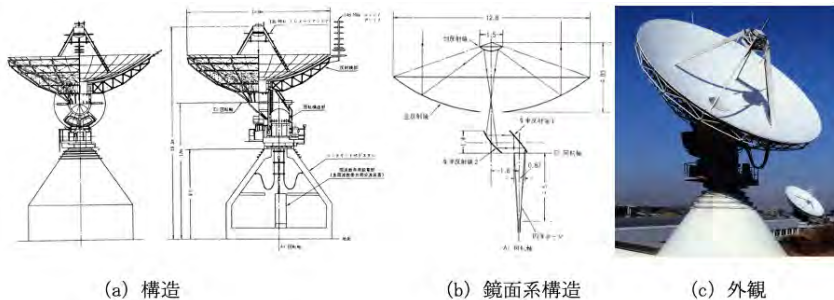
適用対象	周波数帯	有効開口径	アンテナ形式
総括局間中継回線	Ka 帯	11.5 m	・軸対称カセグレンアンテナ ・オフセットカセグレンアンテナ
衛星中継網	Ka 帯	4.2 m	4 枚反射鏡形式デュアルビームアンテナ
放送テレビ中継網	Ku 帯	6.5 m	3 枚反射鏡形式デュアルビームアンテナ
離島回線	C 帯	11.5 m	軸対称カセグレンアンテナ
		5.3 m × 5.7 m	3 枚反射鏡形式デュアルビームアンテナ
		3 m	楕円ビームオフセットパラボラアンテナ
孤立防止無線回線	C 帯	1.8 ~ 2.4 m	楕円ビームオフセットパラボラアンテナ
臨時回線 (車載)	Ka 帯	2.7 m	軸対称カセグレンアンテナ
	Ku 帯	2.5 m × 3.0 m	楕円ビームカセグレンアンテナ
	C 帯	3 m	軸対称カセグレンアンテナ
デジタル専用回線	Ka 帯	4.2 m	・オフセットカセグレンアンテナ ・垂直設置オフセットカセグレンアンテナ ・軸対称グレゴリアンアンテナ
映像中継回線	C 帯	4.5 m	軸対称パラボラアンテナ
デジタル加入者回線	Ku 帯	1.2 m	オフセットパラボラアンテナ
マルチメディア系回線	Ku 帯	45 cm ~ 4.5 m	オフセットパラボラアンテナ
移動体衛星回線	S 帯	棒状	2 線巻ヘリカルアンテナ
		平面状	プリントアンテナ

地球局アンテナ技術

- ・ 大口径 ⇒ 小口径
- ・ 高能率・低サイドローブ化 ⇒ オフセット形式の採用
- ・ 小口径オフセットの着水・着雪対策 ⇒ 縦型設置
- ・ 衛星追尾の簡易化 ⇒ 楕円ビームの採用 (小形地球局)
円錐ビームの採用 (移動体搭載)
- ・ 2 衛星同時追尾化 ⇒ デュアルビームの採用

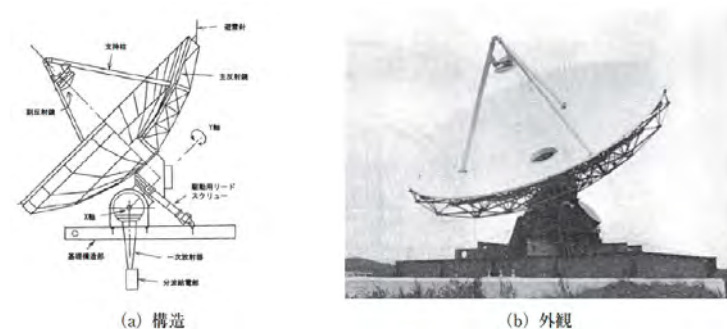


衛星通信実験用大口径地球局アンテナ (図4.7・表4.7)



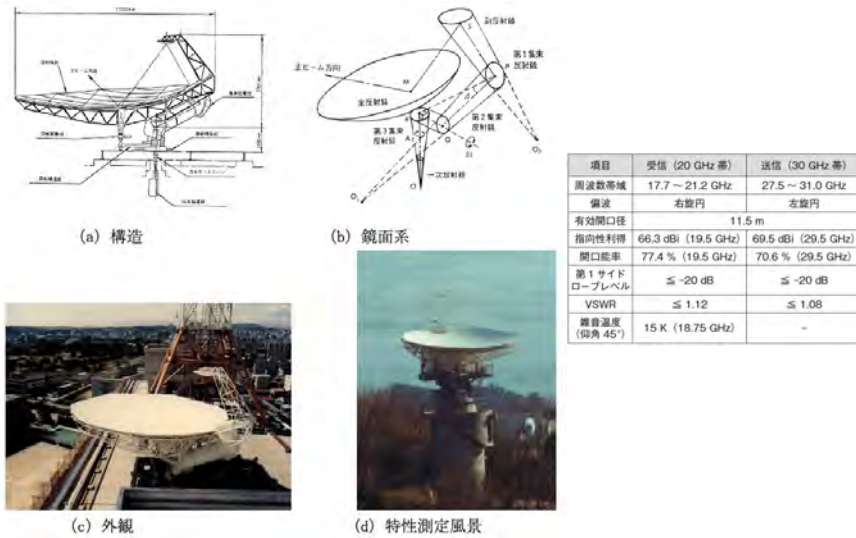
項目	性能			
	4 GHz 帯	6 GHz 帯	18 GHz 帯	26 GHz 帯
周波数帯	4 GHz 帯	6 GHz 帯	18 GHz 帯	26 GHz 帯
開口径	12.8 m			
指向性利得	52.2 dBi	56.3 dBi	65.7 dBi	68.2 dBi
開口能率	58 %	66 %	64 %	54 %
第 1 サイドローブレベル	≤ -14 dB			
VSWR	≤ 1.1			

大口径軸対称カセグレン地球局アンテナ (図4.8・表4.8)

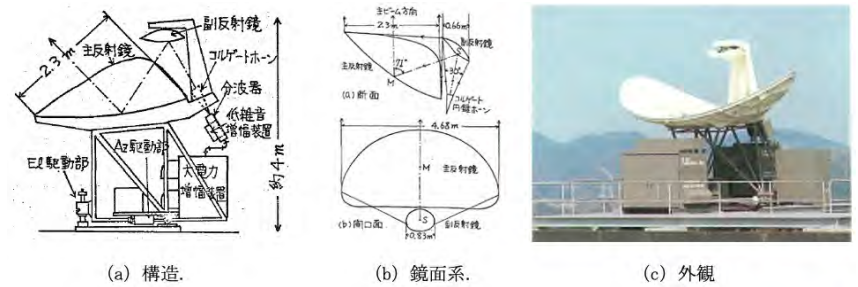


項目	受信 (20 GHz 帯)	送信 (30 GHz 帯)
周波数帯域	17.7 ~ 21.2 GHz	27.5 ~ 31.0 GHz
偏波	右旋円	左旋円
開口径	11.5 m	
指向性利得	66.0 dBi (19.5 GHz)	69.3 dBi (29.5 GHz)
開口能率	72 % (19.5 GHz)	68 % (29.5 GHz)
VSWR	≤ 1.10	≤ 1.08
雑音温度 (仰角 45°)	15 K (18.75 GHz)	-

大口径オフセットカセグレン地球局アンテナ (図4.9・表4.9)



楕円ビームオフセットカセグレン地球局アンテナ (図4.10)



地球局アンテナが記念切手に

地球局アンテナが記念切手に

衛星デジタル通信のために開発された高能率楕円ビームオフセットカセグレン地球局アンテナ (4.3.3項参照) は、その形状から羽を広げた優雅な白鳥に似ているとされ、1985年に発行された新電気通信制度発足の記念切手に、NTTのロゴマークとともに採用されている。

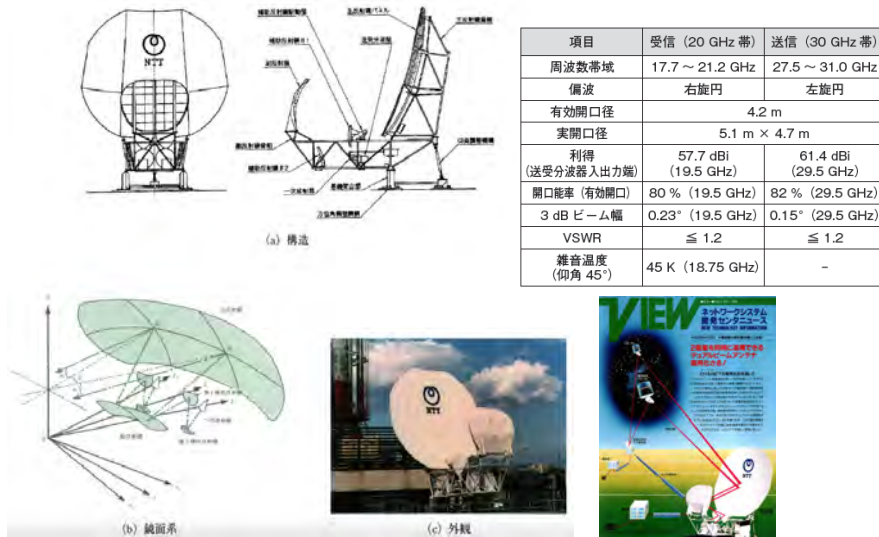


昭和60年版通信白書の「第1節 新しい電気通信秩序の形成」の冒頭には、「昭和60年4月1日、電気通信事業法、日本電信電話株式会社法等が施行されたことに伴い、我が国の電気通信分野は、明治以来百年有余にわたる一元的独占体制の歴史を脱し、民間の活力を導入した自由競争の時代に移行した。」と書かれている。この1985年4月1日に日本電信電話公社は民営化され、日本電信電話株式会社 (略称: NTT) が誕生した。

デジタル通信小口径地球局アンテナ (図4.11・図4.12・表4.10)



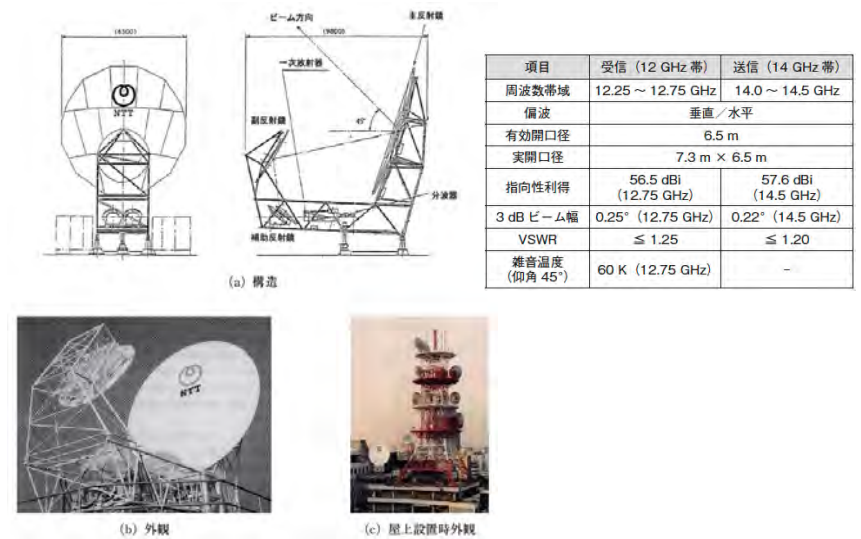
DYANET デュアルビーム地球局アンテナ (図4.13・表4.11)



- 101 - 電子情報通信学会 AP研 歴史TWS / Mar. 13, 2024

©2024 Toshikazu HORI

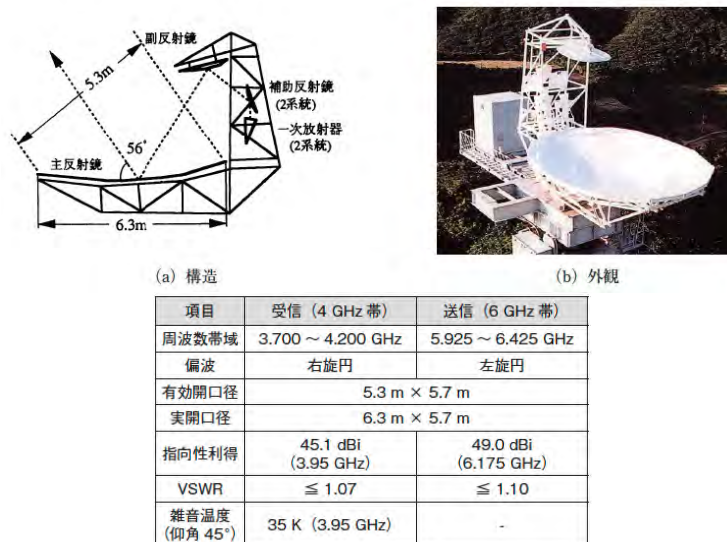
放送TV 中継デュアルビーム地球局アンテナ (図4.14・表4.12)



- 102 - 電子情報通信学会 AP研 歴史TWS / Mar. 13, 2024

©2024 Toshikazu HORI

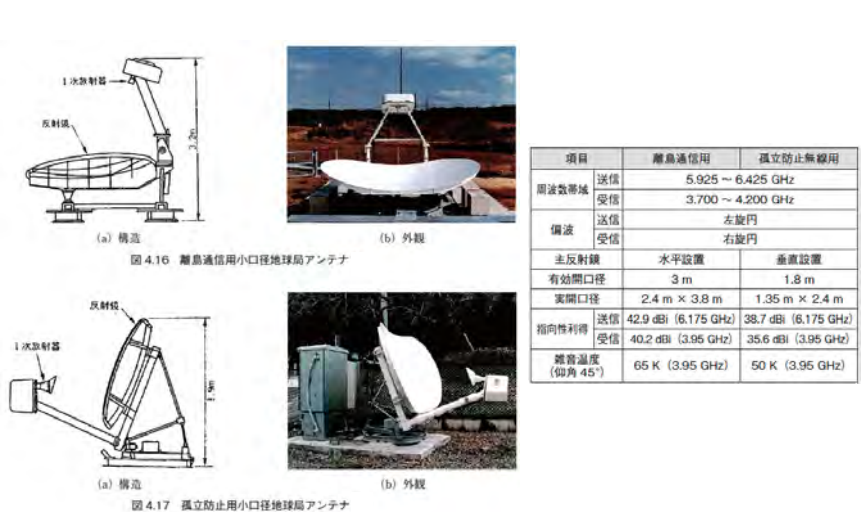
離島通信デュアルビーム地球局アンテナ (図4.15・表4.13)



- 103 - 電子情報通信学会 AP研 歴史TWS / Mar. 13, 2024

©2024 Toshikazu HORI

孤立防止用小口径地球局アンテナ (図4.16・図4.17・表4.14)



- 104 - 電子情報通信学会 AP研 歴史TWS / Mar. 13, 2024

©2024 Toshikazu HORI

幻の円錐ビームアンテナ

幻の円錐ビームアンテナ

1980年代に開始された船舶衛星通信方式の研究実用化において、2.6/2.5 GHz帯の衛星電波を用いた移動体搭載用アンテナの研究が行われた。メッセージ通信のための低利得で簡易な移動体搭載用アンテナとして、図1に示すように、船舶の旋回に対しても衛星追尾機構を不要とできる円錐ビームの採用が考えられた。

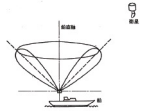


図1 円錐ビームの概念

新たに開発された円錐波円錐ビームを持つアンテナとして、図2にダイポールとパッチで構成したアンテナ (第4章文献 (46) 参照)、図3にマイクロストリップパッチで構成したアンテナ (第4章文献 (47) 参照)、図4に2線巻ヘリカルアンテナ (第4章文献 (48) 参照) をはじめとして、高次モード面振マイクロストリップアンテナ、ラジアル線路アンテナ等の平面アンテナや棒状アンテナを用いた多様なアンテナが開発され、円錐ビームアンテナが研究開発においてブームとなった時期があった。

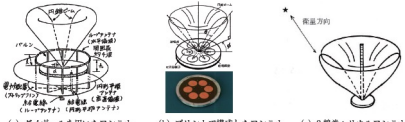
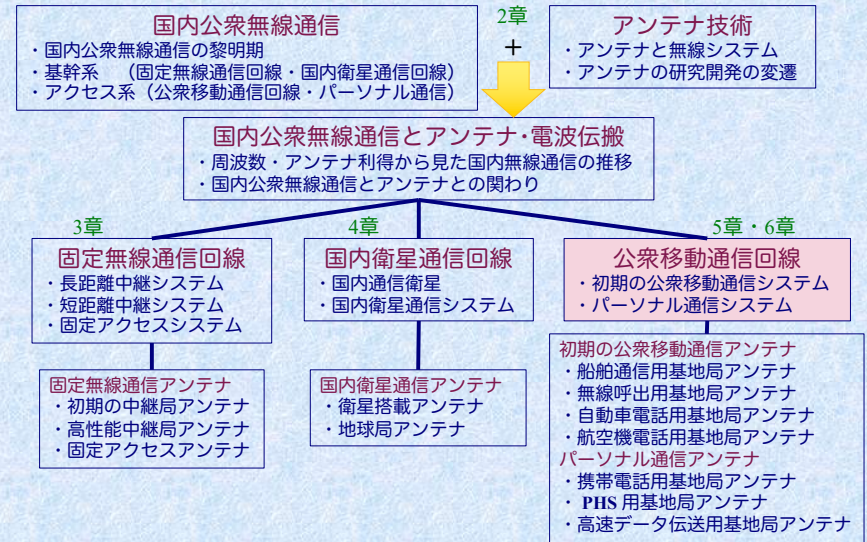


図2 円錐ビームを有する衛星移動局アンテナ

(a) ダイポールを用いたアンテナ (b) プリントで構成したアンテナ (c) 2線巻ヘリカルアンテナ

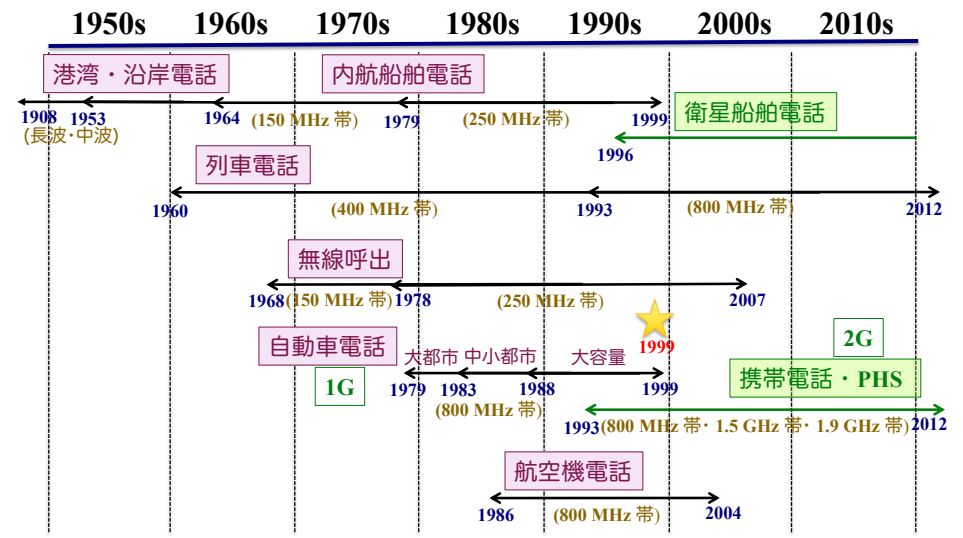
しかし、メッセージのみではなく電話や画像データの通信が主流となったマルチメディア時代に入り、移動体搭載用アンテナにも広帯域伝送のための高利得化が求められ、低利得な円錐ビームアンテナは幻の存在となった。

公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



初期の公衆移動通信システム

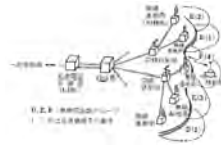
初期の公衆移動通信システムの変遷



船舶通信システムの変遷と適した周波数帯 (表5.1・表5.2・図5.3)

種類	システム名称	サービス時期	サービス地域	使用周波数帯	無線基地局数
電報	無線電報	1908.5 ~ 1999.1	日本近海 全世界海域	当初:長波・中波 1930年代以降:短波	
電話	無線電話	1923 ~	神戸港	中波	
	港湾電話	1953.8 ~ 1959	横浜港・神戸港 その後拡大	150 MHz	
	沿岸電話	1958 ~ 1959	瀬戸内海	150 MHz	6
	船舶電話	1959.3 ~ 1971	(港湾電話と沿岸電話を統合後、内航船舶電話へと拡大)		
	手動交換内航船舶電話	1964.11 ~ 1986.3	日本沿岸全域	150 MHz	50
	自動交換内航船舶電話	1979.3 ~ 1993.9	日本沿岸全域	250 MHz	80
	新内航船舶電話	1988.11 ~ 1999.3	日本沿岸全域	250 MHz	121

周波数帯	利点	欠点
長波 (LF) 30 ~ 300 kHz	・伝搬損失が最も少ない ・遠距離無線通信に適している	・アンテナおよび送信設備が大規模 (⇒ 1930年頃に降殆ど用いず)
中波 (MF) 300 kHz ~ 3 MHz	・伝搬損失が少ない ・遠距離通信に適している ・受信設備は長波に比べて簡単	・昼間と夜間で伝搬距離が異なる ・アンテナおよび送信設備が大規模 (⇒ 1930年頃に降殆ど用いず)
短波 (HF) 3 ~ 30 MHz	・電離層のF層で反射され、地球の裏側まで伝搬する ・遠距離通信に適している	・アンテナおよび送信設備が大規模 ・電離層の変化により受信信号不安定
超短波 (VHF) 30 ~ 300 MHz	・直進性に加えて、ある程度回折あり ・アンテナの小形化・簡易化 ・多くの情報を伝送可能	



無線呼び出しシステムの変遷 (表5.3・図5.4)

システム名称	サービス時期	伝送速度	使用周波数帯	特徴
トーン方式	1968.7 ~ 1986.8		150 MHz	東京 23 区⇒全国
デジタル 200 bps 方式	1978 ~	200 bps	250 MHz	秘話性重視
デジタル 400 bps 方式	1987.4 ~	400 bps	250 MHz	数字・記号表示
	1988.12 ~			かな・漢字表示
デジタル 1200 bps 方式	1989 ~ 2007.3	1200 bps	250 MHz	
高度無線呼出方式 (FLEX-TD)	1996.3 ~ 2007.3	6400 bps	280 MHz	東名阪⇒全国



自動車電話システムの変遷と使用周波数帯 (表5.4・表5.5)

システム名称	サービス時期	サービス地域	使用周波数帯	特徴
都市内自動車電話	(サービス無し)		400 MHz	1974年に「都市内災害対策用可搬無線方式」として首都圏に導入
大都市用自動車電話	1979.12 ~	東京・大阪など 大都市	800 MHz	加入者容量の増大 サービスの広域化 全国自動ダイヤル接続可能
中小都市用自動車電話	1983.3 ~	県庁所在地級の 中小都市		全国展開 新形移動機開発
大容量自動車電話	1988.5 ~	全国		加入者容量の大幅な増大 システムコストの一層の低減 移動機の一層の小形化

システム名称	使用周波数帯	
	基地局送信 (800 MHz 帯)	基地局受信 (900 MHz 帯)
大都市用自動車電話	870 ~ 885 MHz	925 ~ 940 MHz
中小都市用自動車電話	870 ~ 885 MHz	925 ~ 940 MHz
大容量自動車電話	860 ~ 885 MHz	915 ~ 940 MHz

航空機電話システムの変遷と使用周波数 (表5.6・表5.7)

システム名称	サービス時期	サービス地域	使用周波数帯	特徴
アナログ航空機電話	1986.5 ~	日本全土の上空	800 MHz	・アナログ自動車電話システムの交換/制御系を共用
衛星航空機電話	2001 ~ 2004	日本沿岸から 200海里(約370km)	2.6/2.5 GHz	・衛星電話ワイドスター

システム名称	使用周波数帯	
	基地局送信 (衛星⇒移動局)	基地局受信 (移動局⇒衛星)
アナログ航空機電話	870 ~ 885 MHz	925 ~ 940 MHz
衛星航空機電話	2.505 ~ 2.535 GHz	2.66 ~ 2.69 GHz



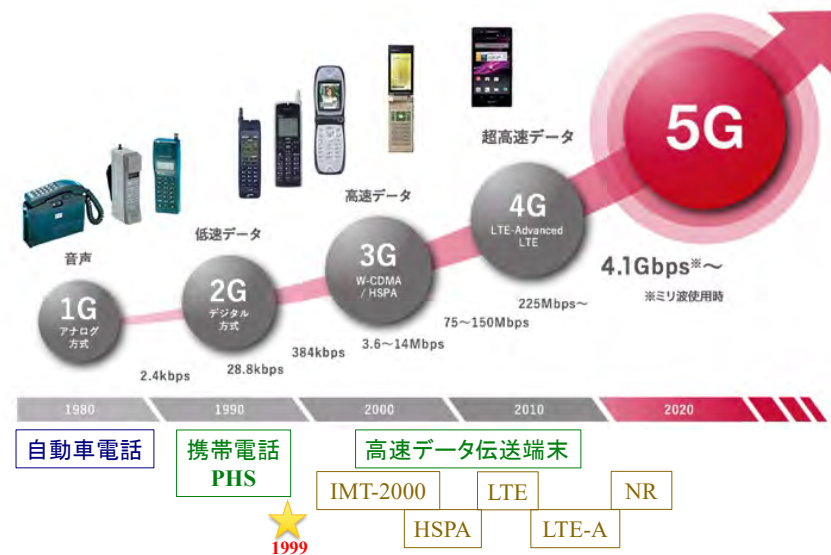
パーソナル通信システム

パーソナル通信で用いた周波数と伝送速度 (表6.1)

用途	移動通信	周波数帯	伝送速度*1)	
携帯電話	第2世代	800 MHz, 1.5 GHz	9.6 kbps ⇒ 42 kbps	
PHS		1.9 GHz	32 kbps ⇒ 128 kbps	
高速データ伝送	第3世代	700 MHz, 800 MHz, 1.5 GHz, 1.7 GHz, 2 GHz	下り	384 kbps ⇒ 100 Mbps
			上り	384 kbps ⇒ 37.5 Mbps
	第4世代	700 MHz, 800 MHz, 1.5 GHz, 1.7 GHz, 2 GHz, 3.5 GHz	下り	187.5 Mbps ⇒ 1.7 Gbps
			上り	37.5 ⇒ 112.5 Mbps
第5世代	3.7 GHz, 4.5 GHz, 28 GHz	下り	3.4 Gbps	
		上り	182 Mbps	

*1) 伝送速度の「下り」は「基地局から端末」の回線を、「上り」は「端末から基地局」の回線を意味している。通常、上り回線に比べて下り回線の方が多くの情報を伝送することが多いため、伝送速度が速く設定されている。

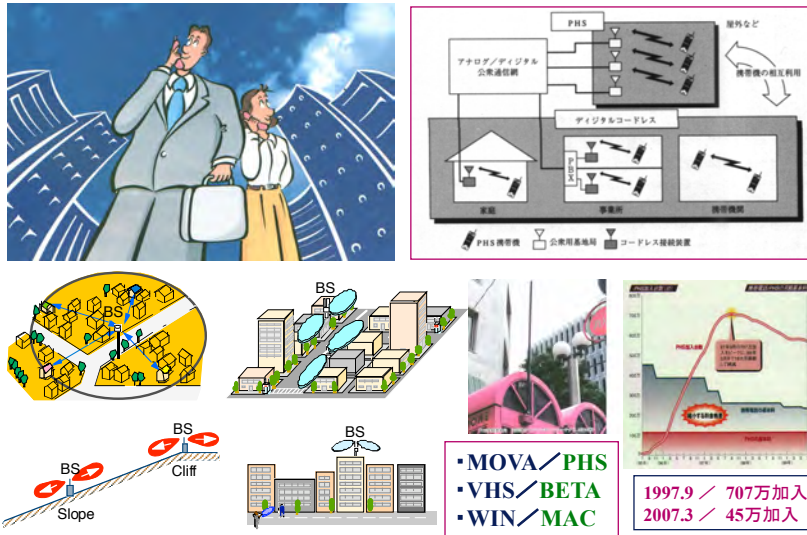
自動車・携帯通信の変遷



PDC + i-mode



PHS / 1995.7.1-2008.1.7 (4,574日間の命)



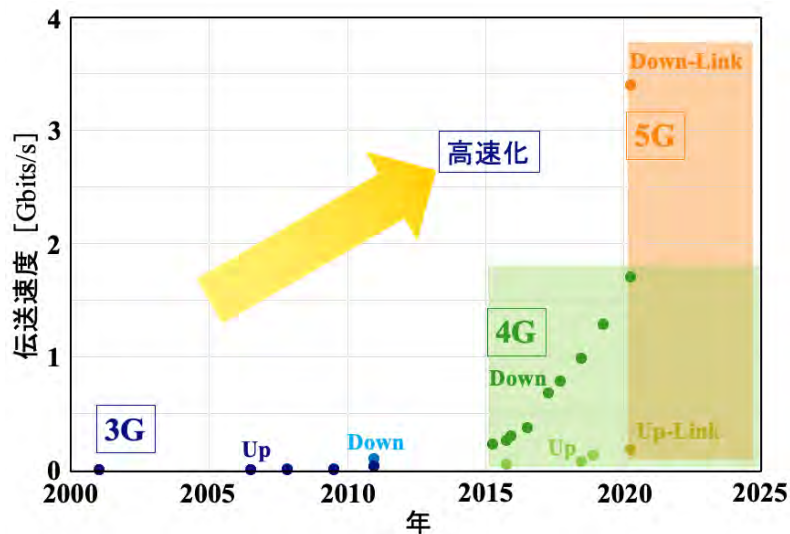
1990 年代後半におけるマイナーな優れもの

- MOVA/PHS
- VHS/BETA
- WIN/MAC

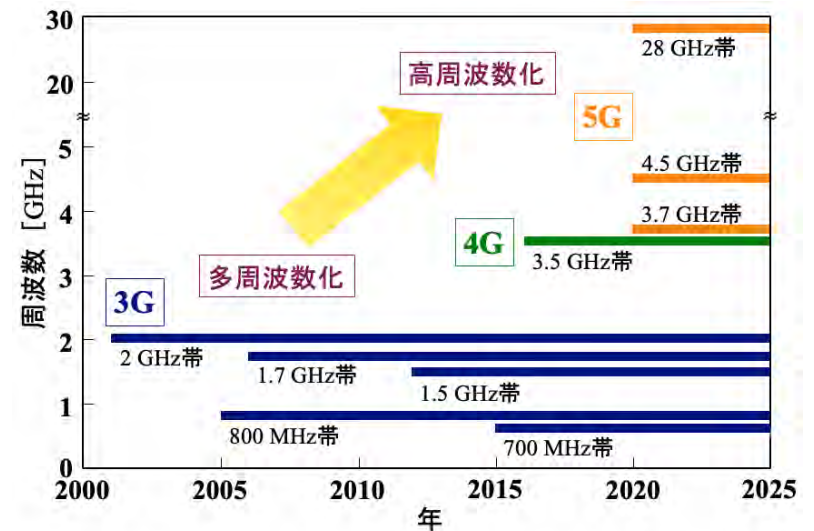
1990 年代後半におけるマイナーな優れもの

Mac, BETA, PHS, これらは言うまでも無く、パソコン、ビデオレコーダ、携帯端末の商標である。人によって受取り方が異なるのは取えて承知で、「My Information Tool 3種の神器」と呼ぶ。その時代に巷で流行していたのは、Windows, VHS, PDC (第2世代携帯電話)であった。それに抵抗するかのようになり、「My Information Tool 3種の神器」が、限られた利用者の間で根強く細々と人気を保っていた時代があった。その人気の理由やこだわりについては読者の判断にお任せしてここでは説明を省略する。その後の今日に到る変遷はご承知の通りであり、PHSが無くなった一方で、MacはiPhoneとの結びつきを得て利用者も増え、存在価値を高めてきた。

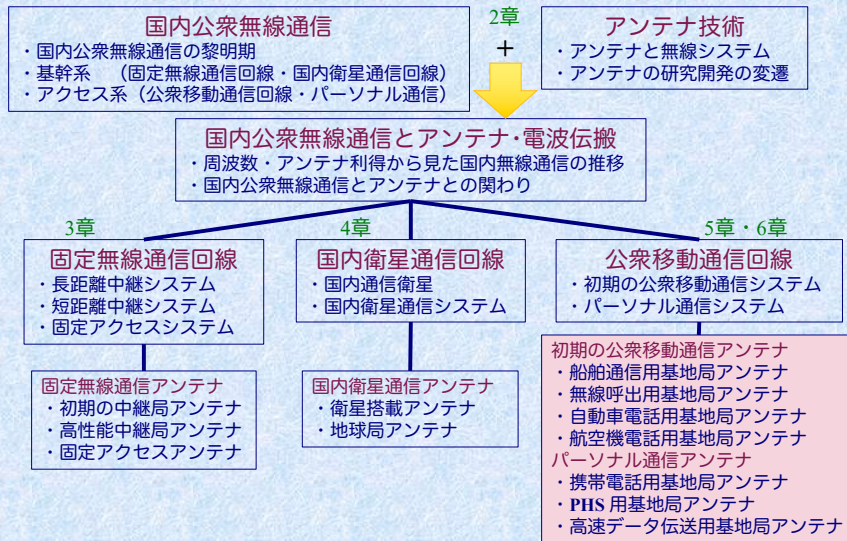
高速データ伝送における伝送速度の変遷 (図6.2)



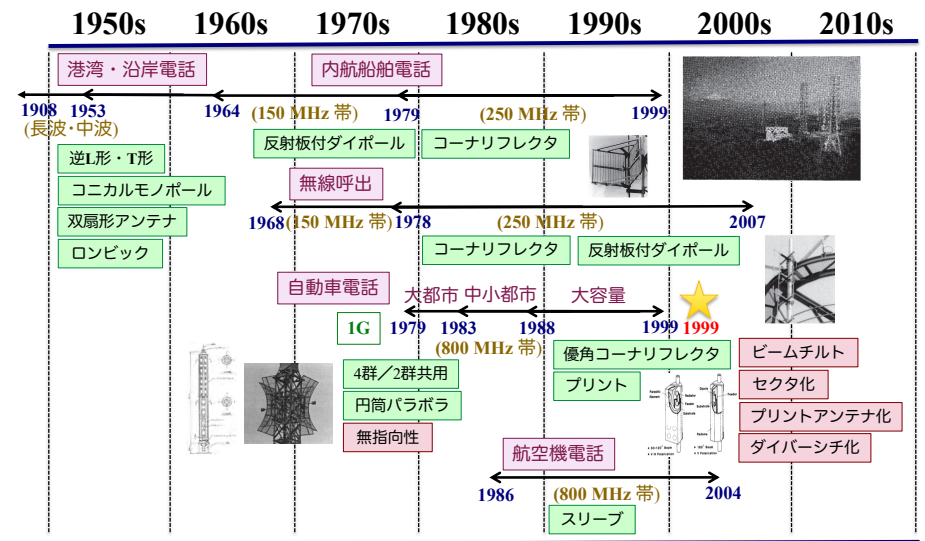
高速データ伝送における使用周波数帯の変遷 (図6.3)



公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



初期の公衆移動通信用基地局アンテナの変遷



船舶通信用基地局アンテナ

船舶通信に用いた無線基地局アンテナ (表5.8・図5.6・図5.7)

周波数帯	偏波	指向性	指向性利得	アンテナ形式
長波帯 (LF)	垂直	水平面内 無指向性	2 dBi	モノポールアンテナ 逆L形アンテナ T形アンテナ
中波帯 (MF)				
短波帯 (HF)	垂直	水平面内 無指向性	2 dBi	コニカルモノポールアンテナ
	単指向性	10 ~ 16.5 dBi	ロンビックアンテナ	
超短波帯 (VHF)	垂直	90°ビーム	5 ~ 8 dBi	反射板付ダイポールアンテナ
		90°ビーム	12 ~ 15 dBi	コーナリフレクタアンテナ



【参考】現用されている壮大なカーテンアンテナ

現用されている壮大なカーテンアンテナ

短波帯（HF帯）を用いた船舶通信の復旧が開始された頃、短波帯で用いる指向性アンテナとしてカーテンアンテナが有力候補の一つであった。しかし、522項で述べたように、船舶通信無線基地局アンテナとしては用いられなかった。

カーテンアンテナは、半波長ダイポール素子から1/4波長離れた背面に反射器を設けており、片方向に放射する単指向性を実現している。このため、指向性利得は双指向性を持つアンテナに比べて3 dB程度高くなっている。実ゲータは明らかでないが、横方向4素子、縦方向2～4素子の半波長ダイポール素子が配列されていたとして、15～17 dBiの指向性利得が実現されていたと考えられる。

このアンテナは、半波長ダイポールアンテナと反射器を用いているため、狭帯域な特性を持ち、放射指向性とインピーダンスが周波数の変化に伴い大きく変化する欠点を有している。このため、1つのアンテナだけでは、短波帯（4～22 MHz）の全周波数帯域で動作することは難しく、動作周波数の異なる複数のアンテナを切り替える必要があった。また、カーテンアンテナの名前のごとく、2つの支柱でアンテナを吊っているため、強風時のアンテナの揺れによりインピーダンス特性が大きく変化する。常時インピーダンス整合を行う必要があった。

現在、カーテンアンテナは茨城県吉河市にあるKDDI八俣送信所に現存しており、NHKの海外向け短波ラジオ国際放送のための送信アンテナとして現用されている。写真（左の写真はアンテナのモデル、右は実物：著者撮影）に示すように、KDDI八俣送信所では、100 m離れた高さ70 mの2本の鉄塔間に吊られたカーテンアンテナ12基と、50 m離れた高さ35 mの2本の鉄塔間に吊られたカーテンアンテナ3基が現用されており、広大な敷地に立つ壮大なカーテンアンテナの姿は一見の価値がある。





図1 カーテンアンテナのモデル（KDDI八俣送信所所蔵）の写真 図2 カーテンアンテナの外観

KDDI八俣送信所の概要

- ◆所在地 茨城県吉河市東山田4428
- ◆敷地面積 約1,000,000㎡(約303,030坪)
- ◆業務内容 国際放送の送信
全世界向け……………18言語(日本語・英語含む)
- ◆送信設備
送信機 7台
・300kW送信機……………5台
・100kW送信機……………2台
- アンテナ 18式
・カーテンアンテナ……………15式
・水平LPアンテナ……………3式
- 付属設備(端局類)……………1式
電力設備……………1式
局舎(送信機棟等)……………約8,250㎡

無線呼出用基地局アンテナ

無線呼出に用いた無線基地局アンテナ (表5.9・図5.8)

周波数帯	偏波	指向性・利得	アンテナ形式
150 MHz	垂直	水平面内 無指向性	ブラウンアンテナ
	垂直	5 dBi	すだれ反射器付アンテナ
	垂直	12 dBi	コーナリフレクタアンテナ
250 MHz	垂直	12～15 dBi	コーナリフレクタアンテナ
280 MHz	垂直	5～8 dBi	反射板付ダイポールアレーアンテナ



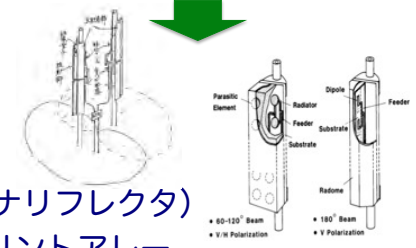
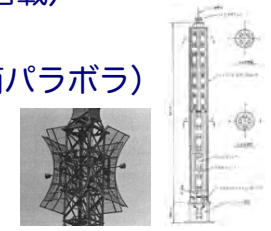
自動車電話用 基地局アンテナ

自動車電話に用いた無線基地局アンテナ (表5.10)

システム名称	偏波	指向性	利得	設置位置	アンテナ形式
大都市用 自動車電話	垂直	水平面内 無指向性	11 dBd	小鉄塔塔頂	4群共用 4面合成反射板付 ダイポールアレーアンテナ
			11 dBd	鉄塔塔側	4群共用 4面合成円筒パラボラアンテナ
中小都市用 自動車電話	垂直	扇形ビーム 90°ビーム	16 dBd	鉄塔塔側	2群共用円筒パラボラアンテナ
			11 dBd	小鉄塔塔頂	4群共用 4面合成反射板付 ダイポールアレーアンテナ
大容量 移動通信	垂直 水平	水平面内 無指向性	11 dBd	鉄塔塔側	4群共用円筒パラボラアンテナ
			11 dBd	鉄塔プラット	2面合成優角コーナリフレクタアンテナ
		扇形ビーム 90°~120°	13~16 dBd	鉄塔プラット	広帯域パッチアレーアンテナ

自動車電話用基地局アンテナ技術の変遷

- 1979：大都市用（塔頂搭載／塔側搭載）
 - 水平面内無指向性
 - ⇒ 4面合成（ダイポール・円筒パラボラ）
 - 扇形ビーム ⇒ 円筒パラボラ
- 1983：中小都市用
 - 小形軽量化
- 1988：大容量
 - 鉄塔プラット搭載
 - 水平面内無指向性
 - ⇒ 2面合成（優角コーナリフレクタ）
 - 扇形ビーム ⇒ 広帯域プリントアレー



自動車電話基地局アンテナ系の構成 (図5.9・図5.10)

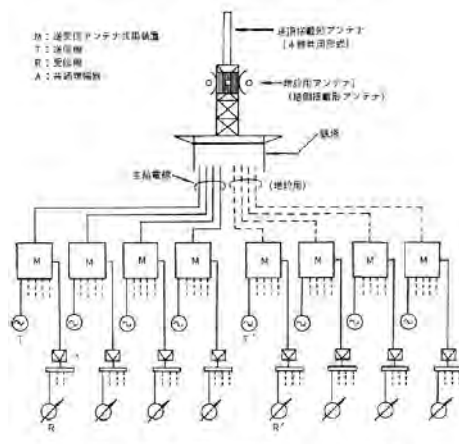


図 5.9 自動車電話基地局アンテナ系の構成

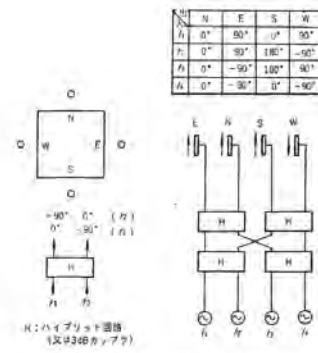
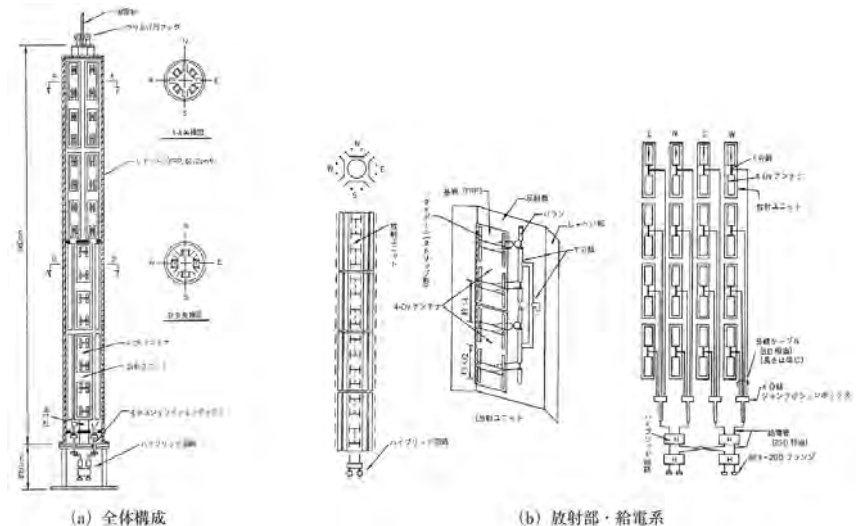


図 5.10 4群共用のための位相給電

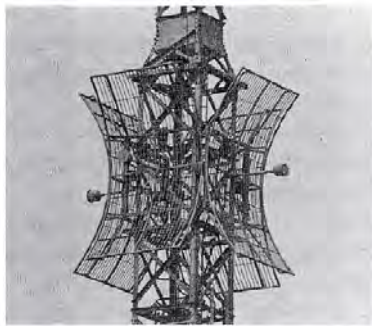
大都市用塔頂搭載型基地局アンテナ (図5.11)



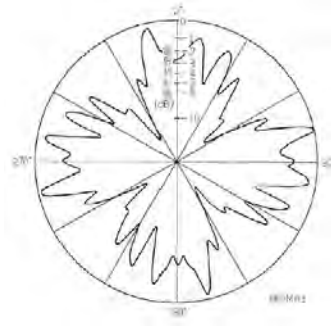
(a) 全体構成

(b) 放射部・給電系

大都市用塔側搭載型基地局アンテナ (図5.12)

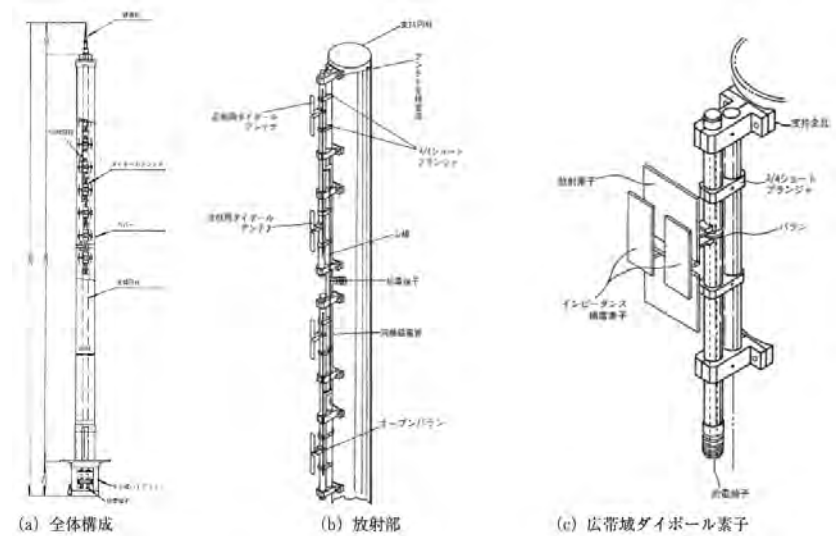


(a) 外観



(b) 水平面内放射指向性

中小都市用塔頂搭載型細径化アンテナ (図5.13)

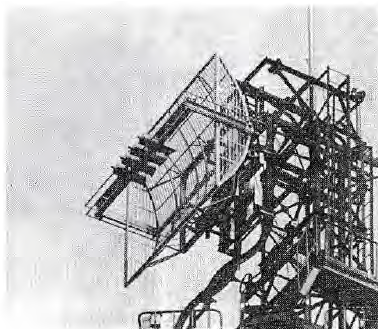


(a) 全体構成

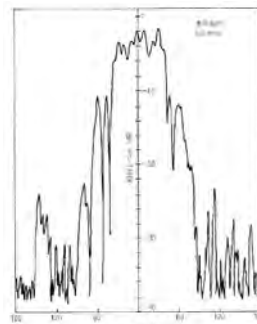
(b) 放射部

(c) 広帯域ダイエール素子

中小都市用塔側搭載型4群共用指向性アンテナ (図5.14)



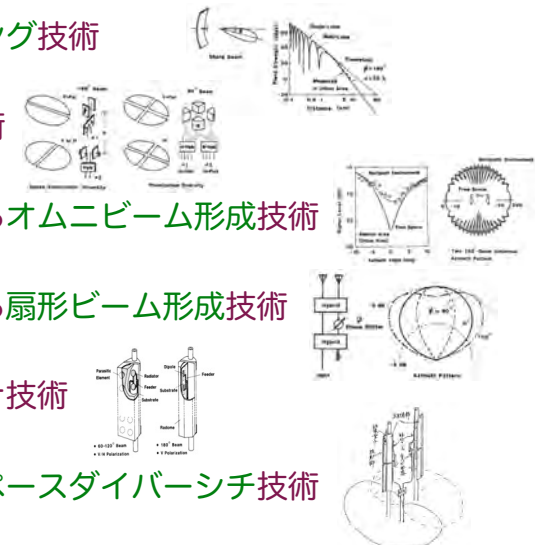
(a) 外観



(b) 水平面内放射指向性

大容量基地局アンテナに適用された新たな技術

- ・ **ビームチルティング技術**
- ・ **ダイバーシチ技術**
- ・ **アレー構成によるオムニビーム形成技術**
- ・ **アレー構成による扇形ビーム形成技術**
- ・ **プリントアンテナ技術**
- ・ **オムニゾンスペースダイバーシチ技術**



航空機電話用 基地局アンテナ

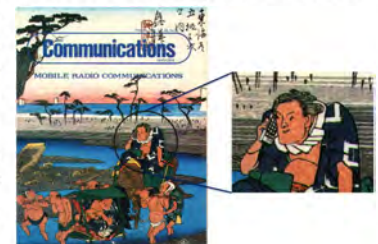
システム名称	周波数帯	偏波	指向性	利得	設置位置	アンテナ形式
アナログ 航空機電話	800 MHz	垂直	水平面内 無指向性	11 dBd	鉄塔塔頂	直列給電 スリーブアンテナ
衛星航空機電話	S	円	【4章を参 照】		N-STAR	【4章を参照】

日本の携帯電話が IEEE Magazine の表紙を飾る

携帯電話用基地局アンテナ

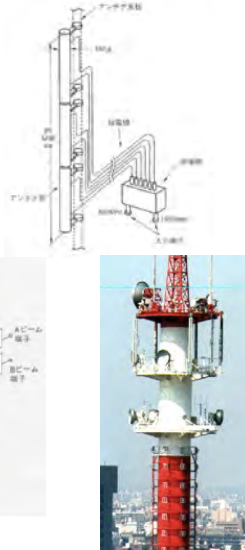
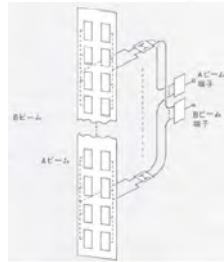
日本の携帯電話が「IEEE Communications Magazine」の表紙を飾る

米国電気電子学会 (IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers) の通信ソサイエティマガジンの1986年2月号の表紙に下記の図柄が掲載され、その説明には、「表紙イラストは、安藤広重が江戸時代(約200年前)の日本の旅人を描いた浮世絵である。当時の旅行には多くの時間がかかり、危険が伴うことも多かったため、旅行者は旅行中に家族や友人などと連絡が取れることを切望していた。携帯電話やファクシミリ端末のような通信設備は、彼らには想像もできなかった。」と書かれている。その雑誌には、5章の文献(28)が掲載されていた。その文献には、日本における自動車電話が大容量化を迎え、アナログ携帯電話が開発され、第2世代移動通信に進捗しつつあった状況が書かれている。



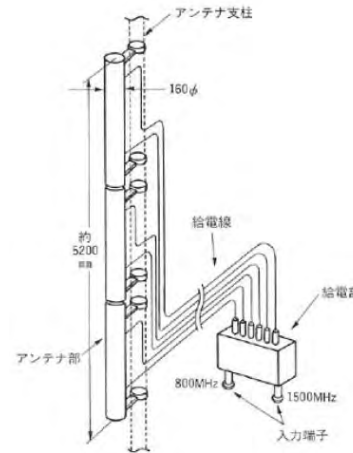
携帯電話用基地局アンテナ技術

- ・ 1993 : 2G
- ・ システム共用 (1.5 GHz帯・800 MHz帯)
⇒ 2周波数帯共用化
- ・ 小ゾーン化
⇒ ビームチルト機能
- ・ セクタ化
⇒ 扇形ビームの採用

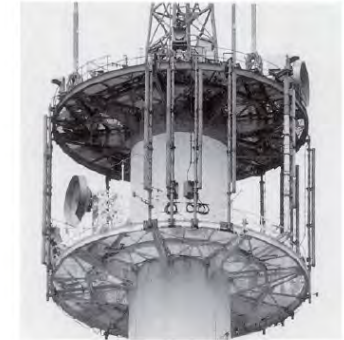


©2024 Toshikazu HORI

周波数共用携帯電話基地局アンテナ (図6.4)



(a) アンテナ構成



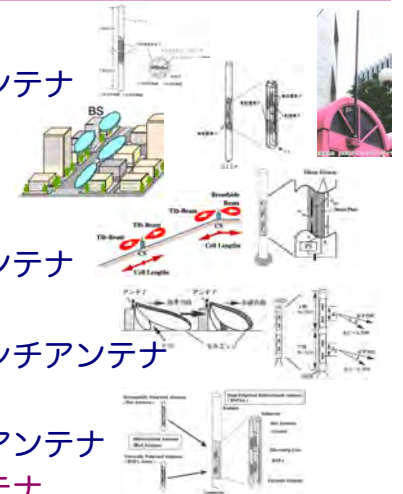
(b) 鉄塔搭載時の外観

- 142 - 電子情報通信学会 AP研 歴史TWS / Mar. 13, 2024

©2024 Toshikazu HORI

PHS 用基地局アンテナ技術

- ・ 水平面内無指向性アンテナ
 - ・ 空間給電円筒コリニアアンテナ
- ・ ストリートセル用アンテナ
 - ・ 双指向性ロッドアンテナ
- ・ 坂道・崖っ縁設置用アンテナ
 - ・ 非軸対称指向性ロッドアンテナ
- ・ 開放地用アンテナ
 - ・ 垂直面内指向性ダイバーシチアンテナ
- ・ 偏波の傾き補償アンテナ
 - ・ 偏波共用双指向性ロッドアンテナ
- ・ ダイナミック指向性制御アンテナ
 - ・ アダプティブアンテナ



- 144 - 電子情報通信学会 AP研 歴史TWS / Mar. 13, 2024

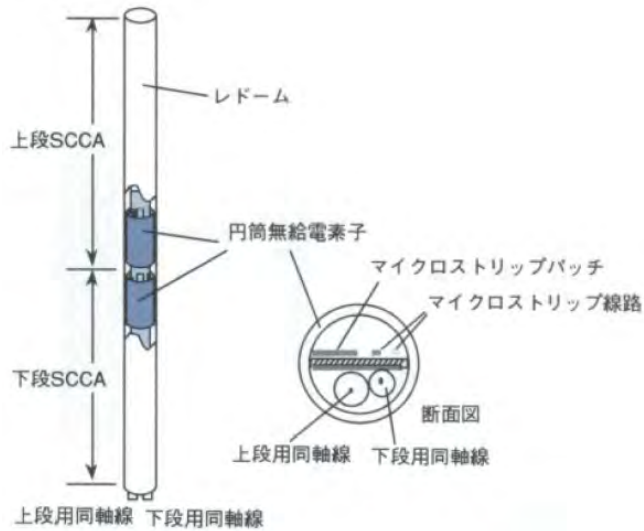
©2024 Toshikazu HORI

PHS 用基地局アンテナ

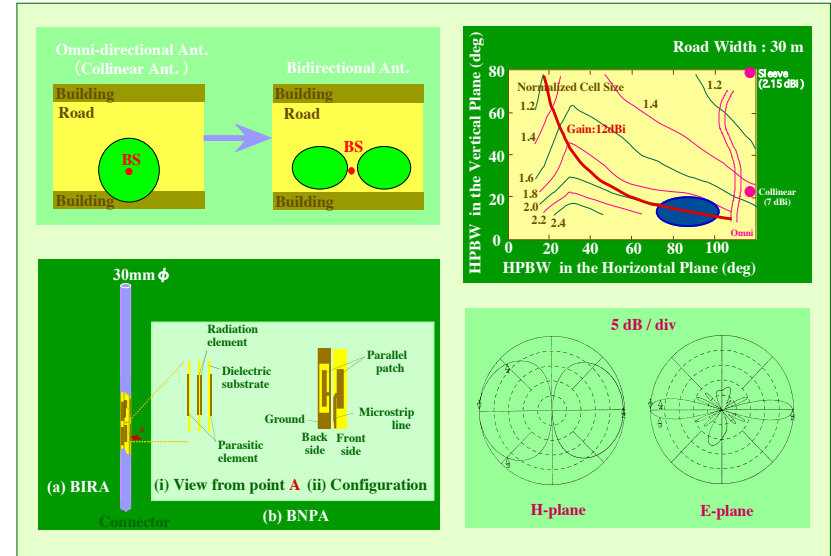
- 143 - 電子情報通信学会 AP研 歴史TWS / Mar. 13, 2024

©2024 Toshikazu HORI

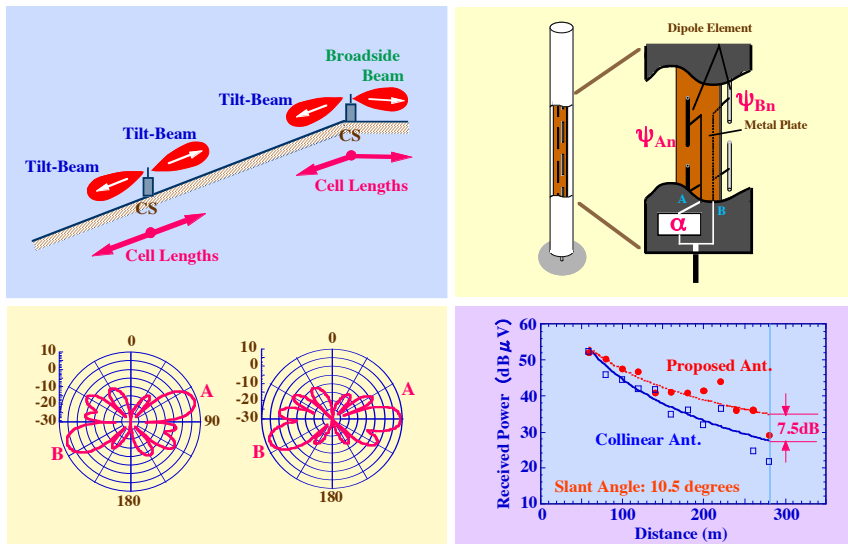
PHS 用空間給電円筒コリニアアンテナ (図6.6)



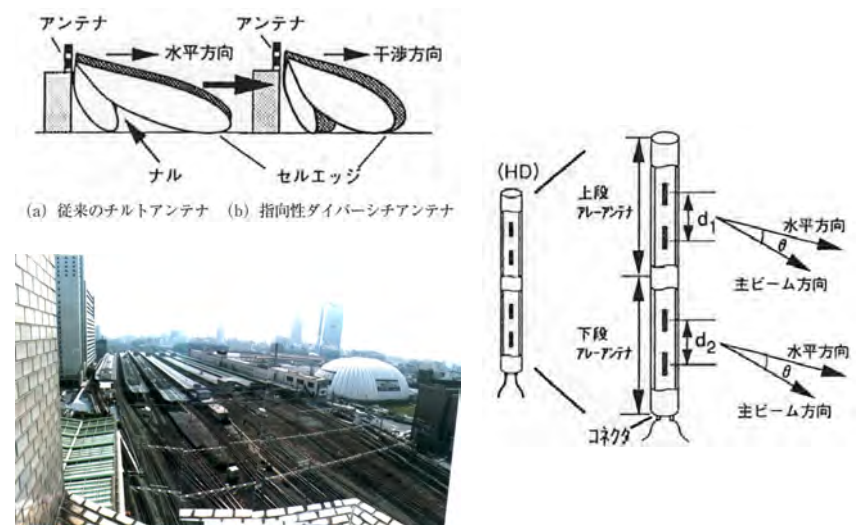
PHS 用双指向性ロッドアンテナ (図6.7)



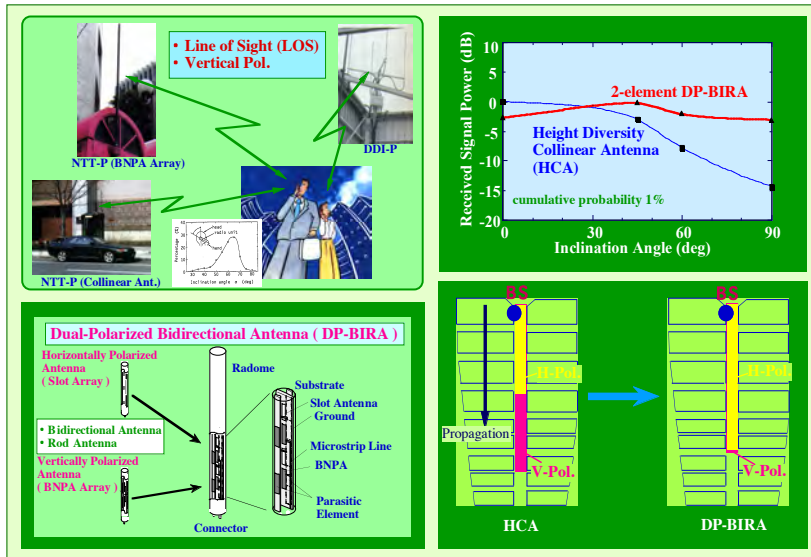
坂道や崖っ縁に置かれた PHS 用アンテナ (図6.8・図6.9)



PHS 用垂直面内指向性ダイバーシチアンテナ (図6.10・図6.11)



PHS 用偏波共用双指向性ロッドアンテナ (図6.12)



高速データ伝送用 基地局アンテナ

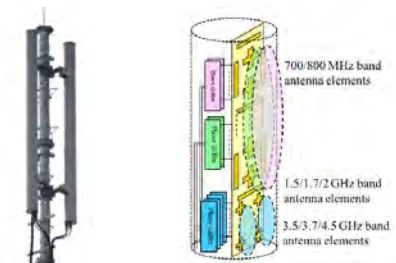
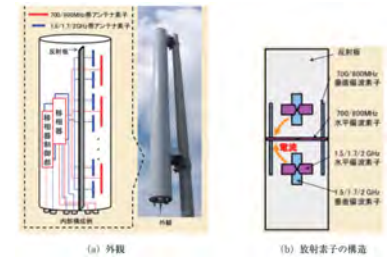
高速データ伝送用基地局アンテナ技術の変遷

- 多周波数共用化
 - 3G : 5周波数帯
- ↓
- 5G : 8周波数帯
- 高周波数化
 - 3G : 700MHz帯~2GHz帯
- ↓
- 4G : 3.5GHz帯
- ↓
- 5G : 3.7GHz帯・4.5GHz帯 (Sub6) 、28GHz帯



多周波数共用高速伝送用無線基地局アンテナ (図6.14)

- 5周波数帯共用 (3G)
 - 700/800 MHz帯
 - 1.5/1.7/2 GHz帯
- 8周波数帯共用 (5G)
 - 700/800 MHz帯
 - 1.5/1.7/2 GHz帯
 - 3.5/3.7/4.5 GHz帯



高周波数を用いた高速伝送用無線基地局アンテナ (表6.2)

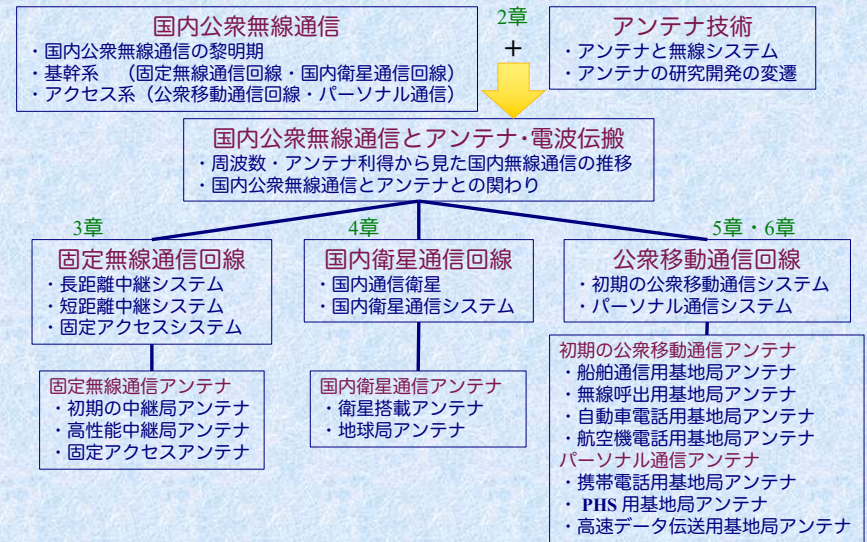
・3.5 GHz帯アンテナ

周波数帯	偏波	指向性	用途	アンテナ形式	備考
3.5 GHz 帯	垂直 水平	水平面内 無指向性	スモールセル	ロッドアンテナ	
		単指向性		平面アンテナ	
		扇形ビーム	マクロセル	セクタアンテナ	
3.5 GHz 帯 (1.5, 1.7, 2 GHz 帯共用)		単指向性	屋内	平面アンテナ	MIMO 対応

・28 GHz帯アンテナ

- ・スポットビーム
- ・Massive MIMO

公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査



国内公衆無線通信用アンテナ技術の系統図



Contact to T. HORI

Contact to T. HORI :

horit@m.ieice.org

horit@ieee.org

horit@u-fukui.ac.jp

ご静聴頂きまして
ありがとうございました。

