

コヒーレント 宇宙光通信入門

光でつなぐ次世代宇宙ネットワーク

高山 佳久

【編著】

安藤 俊行・向井 達也・原口 英介

竹中 秀樹・倉 伸宏

【共著】

コロナ社

まえがき

これまで電波で行われていた宇宙通信への光の適用は、1960年代に検討が始まり、1990年代には人工衛星との通信実験で成功が示されました。その後、多様な研究開発と実験によって、現在は宇宙光通信システムが実用化の段階に迫っています。

さまざまな研究開発で得られた知見は多数の論文や書籍として発行されているものの、和文の書籍はわずかであり、その書籍の発行からも長い年月が経っているそうです。本書はこうした状況を背景に、これから宇宙通信および光の空間伝搬を利用した通信技術に関する研究開発を行う技術者や研究者、同技術について学ぼうとしている学生に向けて執筆した入門書です。

まず、宇宙通信が必要とされる状況において、これまでの宇宙光通信の実施例や見出されている課題について整理します。2章では、本書で述べられる技術項目に共通する基礎事項として、電磁波の伝搬と回折について述べます。3章では、宇宙光通信システムについて概説し、システムの機能構成、捕捉追尾、通信方式について具体例を示します。4章では、光通信装置に含まれる各機能の詳細を述べ、宇宙環境で使用する装置に考慮することが不可欠な放射線の影響などについても説明を加えます。5章では、光の通信回線を確立するための捕捉追尾について紹介します。6章では、宇宙と地上とを光通信で結ぶ場合に避けられない大気の影響について解説します。7章では、宇宙光通信の運用について述べます。一般的な衛星運用と、光通信の運用に特有の事項について説明します。8章では、各国の宇宙機関が中心的な役割を担って進めている宇宙光通信の技術標準化の議論と、宇宙光通信の研究開発動向として現在進行中の事例および今後の計画について紹介します。

それぞれの章においては、重要項目をできるだけ丁寧に説明するとともに、

数式も導出過程を容易に追跡できるように意識しました。これにより、各説明に含まれる仮定や条件への理解が促進されると思われます。各章の執筆担当はそれぞれ、宇宙光通信の研究開発、運用および標準化に関する業務を経験しています。実務を通じて得た知見に基づく記述は、宇宙光通信の分野に関わる方々に大いに参考になるものと信じます。

最後に、宇宙光通信に関する書籍を発行することの意義を示唆し、執筆作業においても多大なるご協力を頂いたコロナ社の皆さんに御礼を申し上げます。また、互いに異なる組織、機関に所属しながらも、宇宙光通信の魅力と重要性を共有する同朋である本書の執筆者に感謝します。

2026年4月

編著者 高山佳久

【執筆分担】

●編著者

高山佳久（東海大学） 1章, 2章, 5.1節, 5.2節

●執筆者（執筆順）

安藤俊行（三菱電機株式会社） 1章, 3章

向井達也（宇宙航空研究開発機構） 1章, 7章, 8章

原口英介（三菱電機株式会社） 4章

竹中秀樹（東京都立大学） 5.3節, 5.4節, 6章

倉 伸宏（宇宙技術開発株式会社） 7章

（所属は2026年4月現在）

目 次

1. 宇宙光通信への期待

1.1 宇宙活動の状況	1
1.1.1 宇宙領域の利用	1
1.1.2 周波数分配	3
1.1.3 宇宙の環境	7
1.1.4 多層ネットワークの構築	10
1.2 宇宙光通信の実施例と宇宙活動への適用	11
1.2.1 宇宙光通信実施例	11
1.2.2 宇宙光通信の適用計画	12
1.3 宇宙光通信の課題	13
コラム：衛星通信と宇宙通信	15

2. 電磁波の伝搬と回折

2.1 電磁波の伝搬	17
2.1.1 波動方程式	17
2.1.2 干渉	21
2.1.3 偏波	21
2.1.4 平面波	23
2.1.5 球面波	24
2.1.6 ガウスビーム	25
2.2 回折	31
2.2.1 回折理論の進展	31
2.2.2 ホイヘンス-フレネルの原理	32

2.2.3 フレネル回折	33
2.2.4 フラウンホーファー回折	35
コラム：光による音声の伝送	38

3. 宇宙光通信システム

3.1 通信システムの仕組み	39
3.1.1 通信目的	40
3.1.2 衛星間, 宇宙・地上間の光通信システム	40
3.2 通信機器の構成と機能	41
3.2.1 捕捉追尾系の構成と機能	41
3.2.2 通信系の構成と機能	43
3.3 通信システム設計	44
3.3.1 捕捉追尾系設計	44
3.3.2 コヒーレント光通信設計	48
3.3.3 インコヒーレント光通信設計	50
3.4 通信方式設計	52
3.4.1 捕捉追尾シーケンス設計	52
3.4.2 コヒーレント光通信設計	56
3.4.3 インコヒーレント光通信設計	57
コラム：背景光の抑圧特性の違い	59

4. 宇宙光通信送受信器

4.1 宇宙機搭載側の光通信機器	60
4.1.1 光通信機器構成	60
4.1.2 ドップラ周波数シフト	63
4.1.3 構成部品	66
4.1.4 放射線の影響	81
4.1.5 民生部品の活用	84
4.2 機器制御用の電波通信機器	87

コラム：信頼性とは？	89
------------------	----

5. アンテナ・捕捉追尾系

5.1 宇宙機に搭載する光アンテナ	90
5.1.1 光アンテナの構成	91
5.1.2 光アンテナの指向制御	92
5.2 地上局の光アンテナ	95
5.2.1 光アンテナの構成	96
5.2.2 光アンテナの指向制御	96
5.3 捕捉追尾の仕組み	98
5.3.1 衛星-地上間光通信の通信リンク確立手順	98
5.3.2 捕捉におけるその他の捕捉方式	101
5.3.3 精追尾における方式の比較	102
5.4 捕捉追尾の例	103
5.4.1 衛星-地上間光通信	104
5.4.2 衛星-衛星間光通信	104

6. 大気の影響

6.1 大気による現象	107
6.1.1 大気による散乱と吸収	107
6.1.2 大気ゆらぎ	110
6.1.3 大気ゆらぎの高度モデル	113
6.2 大気ゆらぎによる影響と解析	116
6.2.1 シンチレーション	116
6.2.2 シンチレーションインデックス	117
6.2.3 ビームワンダー	119
6.2.4 到来角度変動	120
6.2.5 アイソプラナティック角	121
6.3 通信システムへの影響と対策	122

6.3.1	受信側における大気ゆらぎ対策	122
6.3.2	送信側における大気ゆらぎ対策	126
6.3.3	空間光通信におけるサイトダイバーシティ技術	128
6.4	空間光回線設計への大気ゆらぎの適用	129
6.4.1	C_n^2 とシンチレーションインデックスの計算	130
6.4.2	大気ゆらぎ確率分布モデル	130
6.4.3	大気ゆらぎの確率分布モデルからの適用	131
	コラム：大気レンズ	133

7. 宇宙光通信の運用

7.1	宇宙通信の運用種別と構成	134
7.1.1	ハウスキーピング運用	134
7.1.2	ミッションデータ運用	135
7.2	光通信技術の応用	135
	コラム：光通信の期待	136
7.3	光地上局の機能と構成	136
7.4	光地上局の分散配置	139
7.4.1	雲データ解析	140
7.4.2	衛星画像解析とサイトダイバーシティ導出	142
7.4.3	環境調査と運用調整	147
	コラム：光通信の地上局分散	149
7.5	雲回避ネットワーク	150
7.5.1	雲観測と判別	150
7.5.2	ネットワーク制御	153
	コラム：光通信の雲回避対策	155

8. 宇宙光通信の技術標準化と 研究開発動向

8.1 宇宙光通信の技術標準化	156
8.2 高速通信の必要性	157
8.2.1 周波数資源の不足	157
8.2.2 研究開発と運用実現	157
コラム：光通信の背景	161
8.3 光通信技術の技術標準化	161
8.3.1 技術標準の範囲	161
8.3.2 技術課題	162
コラム：技術標準の背景	163
8.4 研究開発動向	163
8.4.1 宇宙ネットワーク	164
コラム：光通信技術の利用事例	168
8.4.2 地上ネットワーク	169
コラム：光地上局ネットワークの運用に必要なもの	172
付 録	173
引用・参考文献	177
索 引	199

記号表

● 2 章

E	: 電界ベクトル [V/m]	n	: 媒質の屈折率
D	: 電束密度ベクトル [C/m ²]	v	: 媒質中の電磁波の位相速度 [m/s]
B	: 磁束密度ベクトル [T]		
H	: 磁界ベクトル [A/m]	c_0	: 真空中の光の速度 [m/s]
J	: 電流密度ベクトル [A/m ²]	λ	: 媒質中の波長 [m]
σ	: 導伝率 [S/m]	λ_0	: 真空中の波長 [m]
ρ	: 電荷密度 [C/m ³]	f	: 周波数 [Hz]
ε	: 媒質中の誘電率 [F/m]	ω	: 角周波数 [rad/s]
ε_0	: 真空中の誘電率 [F/m]	k	: 媒質中の波数 [rad/m]
ε_s	: 比誘電率	k_0	: 真空中の波数 [rad/m]
μ	: 媒質中の透磁率 [H/m]	I	: 光の強度 [W/m ²]
μ_0	: 真空中の透磁率 [H/m]	w_0	: ビームウエスト [m]
μ_s	: 比透磁率	$w(z)$: ビーム半径 [m]
u_x, u_y, u_z	: 直交座標系 (x, y, z) におけるそれぞれの方向の単位ベクトル	$R(z)$: 波面の曲率半径 [m]
E_x, E_y, E_z	: 電界の (x, y, z) 成分 [V/m]	$\varphi(z)$: Gouy 位相 [rad]
H_x, H_y, H_z	: 磁界の (x, y, z) 成分 [A/m]	θ_B	: ガウスビームの広がり角 [rad]

● 3 章

L_{total}	: 送受信間での全損失	L_{RX}	: 受信光学系の損失
G_{TX}	: 送信光アンテナ利得	L_{T}	: 追尾誤差による損失
L_{TX}	: 送信光学系の損失	$L_{\text{RX_WFE}}$: 受信光学系の波面誤差による損失
L_{P}	: 指向誤差による損失	L_{FC}	: 光ファイバの結合損失
$L_{\text{TX_WFE}}$: 送信光学系の波面誤差による損失	D_{TX}	: 送信光アンテナの開口径
L_{S}	: 空間伝搬損失	λ	: 光の波長
G_{RX}	: 受信光アンテナ利得	θ_{P}	: 指向誤差

σ_{TX}	: 送信光学系の波面誤差	σ_{H}^2	: コヒーレント光通信における雑音の分散
R	: 光の伝搬距離	σ_{LOshot}^2	: 局発光ショット雑音の分散
D_{RX}	: 受信光アンテナの開口径	$\sigma_{\text{SIGshot}}^2$: 信号光ショット雑音の分散
θ_{T}	: 追尾誤差	$\sigma_{\text{thermal}}^2$: 熱雑音の分散
σ_{RX}	: 受信光学系の波面誤差	σ_{RIN}^2	: 局発光相対強度雑音の分散
d	: 光ファイバのモードファイ ャー径	$\gamma_{\text{shot-noise-limit}}$: ショット雑音限界時の信号 対雑音比 (SNR)
$J_1(x)$: 第一種ベッセル関数	$N_{r\text{required}}$: 符号誤り率 P_e を実現する ために必要な単位ビット当 りの光子数
P_e	: 受信電力対符号誤り率	I_1	: IMDD 方式におけるマーク 時の信号の平均
γ	: ベースバンドでの信号対雑 音比 (SNR)	I_0	: IMDD 方式におけるスパー ス時の信号の平均
I	: コヒーレント光通信におけ る位相検波信号電流	σ_1	: IMDD 方式におけるマーク 時の雑音の標準偏差
η	: 光電検出器の量子効率	σ_0	: IMDD 方式におけるスパー ス時の雑音の標準偏差
e	: 電荷素量	M	: APD の増倍率
h	: プランク定数 ($= 6.63 \times 10^{-34}$ [J/s])		
ν	: 光の周波数		
P_s	: 受信信号光パワー		
P_{LO}	: 局発光パワー		

● 4 章

R_{earth}	: 地球半径	$f_{\text{DOP-GEO}}$: GEO 側の受信器から見た 視線方向のドップラシフト
z	: 地球中心から GEO までの 距離	λ_{LEO}	: LEO の送信波長
h	: LEO の高度	τ_{d}	: 自己遅延ヘテロダイン検波 における遅延時間
V_{LEO}	: LEO の軌道速度	$S_{\text{d}}(f)$: 自己遅延ヘテロダイン検波 における受信信号
θ	: LEO の軌道位置が地球中 心からなす角度	f_{s}	: 中間周波数
$\Delta\theta$: LEO の移動に伴って生じ る角度ずれ量	\mathbf{E}_{in}	: MZM 入力光電場
G	: 万有引力定数	ϕ_0	: 光位相
M	: 地球質量	$\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$: 各アームの光電場
V_{GEO}	: GEO の軌道速度	\mathbf{E}_{out}	: MZM 出力光電場
T_{GEO}	: 静止軌道での軌道周期	r	: 反射係数

記 号 表

t	：透過係数	P_{Lo}	：参照用レーザの光パワー
V_{π}	：半波長位相変調電圧	ν_0	：キャリア光周波数
ε	：楕円率	h	：プランク定数
δ	：直線偏光の偏光角	δf	：レーザ線幅（半値全幅）
n	：媒質の屈折率（差を取る）	$\delta(f)$	：デルタ関数
f_m	：変調信号の周波数		

● 5 章

α_G	：静止衛星から地心を指す方向と低軌道衛星を指す方向のなす角 [rad]	T_{LEO}	：低軌道衛星が地球を1周する時間 [s]
β_G	：低軌道衛星の天頂方向と低軌道衛星から静止衛星を指す方向のなす角 [rad]	G	：万有引力定数 [km ³ kg ⁻¹ s ⁻²]
γ_G	：低軌道衛星の軌道面の法線方向と地心から静止衛星を指す方向のなす角 [rad]	M	：地球質量 [kg]
R_E	：地球の平均半径 [km]	α_E	：低軌道衛星から地心を指す方向と、地上局を指す方向のなす角 [rad]
H_{LEO}	：低軌道衛星の高度 [km]	β_G	：地上局の天頂方向と地上局から低軌道衛星を指す方向のなす角 [rad]
H_{GEO}	：静止衛星の高度 [km]	γ_G	：低軌道衛星の軌道面の法線方向と、地上局の天頂方向のなす角 [rad]
R_G	：地心と静止衛星の距離 [km]		

● 6 章

T_{atm}	：透過率		る係数
τ	：大気減衰係数	R	：降雨量 [mm/h]
λ	：波長 [m]	α_{snow}	：雪による減衰量 [dB/km]
α	：吸収係数	a	：雪の性質に依存する定数
β	：散乱係数	b	：雪の性質に依存する定数
β_{fog}	：霧による減衰量 [dB/km]	S	：降雪量
V	：視程 [km]	n	：屈折率
p_{fog}	：霧の粒子のサイズ分布を表す係数	P	：大気圧 [hPa]
α_{rain}	：雨による減衰量 [dB/km]	T	：絶対温度 [K]
k_1, k_2	：波長や雨粒の特性に依存す	$\langle \rangle$	：平均
		l_0	：インナースケール [m]

L_0	: アウタースケール [m]		クス
$D_n(r)$: 屈折率構造関数	$\sigma_{I,pl}^2$: 平面波におけるシンチレーションインデックス
C_n^2	: 屈折率構造定数		
$\Phi(\kappa)$: Kolmogorov スペクトル	$\sigma_{I,sph}^2$: 球面波におけるシンチレーションインデックス
σ_R^2	: Rytov 分散		
h	: 高度 [m]	W_0	: ビームウエスト [m]
H	: 受信機/送信機の高度 [m]	F_0	: ビーム曲率
A	: 地表付近の C_n^2	${}_2F_1$: ガウス超幾何関数
w	: RMS 風速 [m/s]	W_{ST}	: 短期ビーム半径 [m]
θ_0	: アイソプラナティック角 [rad]	W_{LT}	: 長期ビーム半径 [m]
		β_a	: 到来角度 [rad]
r_0	: 大気フリードパラメータ (コヒーレンス直径) [m]	D_{RX}	: 受信開口径 [m]
		ζ	: 天頂角 [rad]
V_g	: 地上風速 [m/s]	A_m	: 開口平均効果
h_s	: 海拔基準での地表の高さ [m]	θ_p	: 光行差補正角量 [rad]
		V	: 相対速度 [m/s]
h_0	: 地上基準高度 [m]	Γ	: ガンマ関数
p, M	: スケーリングファクタ	$K_{\alpha-\beta}$: 修正ベッセル関数
I	: 照射強度 [W/m ²]	I_T	: 受信強度閾値
σ_I^2	: シンチレーションインデックス	D_S	: 位相構造関数

● 7 章

\bar{x}	: A, B, ..., N 局のグループにより計算される運用稼働率		がどこにもない: 0, または, t_{xi} 期間で晴れている場所が少なくとも一つ: 1
t_{xi}	: 全観測時間 T において A, B, ..., N 局のうち, 少なくとも一つが晴天と判断される時間	n	: 指定期間の画像枚数
		x_i	: A 点の i 番目の晴天時間
		\bar{x}	: A 点の平均の晴天時間
T	: 指定解析期間の全観測時間	y_i	: B 点の i 番目の晴天時間
y_i	: t_{xi} 期間で晴れている場所	\bar{y}	: B 点の平均の晴天時間

1

宇宙光通信への期待

宇宙活動には、ロケットの打上げや人工衛星の開発、通信、放送、地球観測など多岐にわたる活動が含まれ、有人宇宙探査や深宇宙領域の探査、多数の衛星による宇宙通信ネットワークの構築など、宇宙利用の可能性は年々広がっている。

人類の発展、宇宙空間の解明、地球環境保護など宇宙活動の理由はさまざまであり、近年は科学的知識の向上だけでなく、経済活動や社会基盤の整備、安全保障への貢献も注目されている。本章では、世界的規模で進められている宇宙開発や宇宙利用の活動の事例を挙げ、これらの活動を支える宇宙光通信の必要性および課題について述べる。

1.1 宇宙活動の状況

本節では、われわれの生活基盤に不可欠であり、科学、経済、安全保障などに関しても重要な宇宙領域の利用を概観し、さまざまな宇宙活動において使用される無線通信の周波数帯について述べる。使用する周波数帯の分配については、世界の国々が三つの地域に区分されていることを示し、そこで使用される周波数帯の名称を一覧にする。また、宇宙活動における留意すべき環境としてスペースデブリの現状を紹介し、本節の最後に、次世代の移動体通信ネットワークにおける人工衛星の役割を述べる。

1.1.1 宇宙領域の利用

1957年に最初の人工衛星が打ち上げられて以降、さまざまな人工衛星の開発

と運用によって、現在のわれわれの生活に不可欠な機能が提供されている。宇宙領域の利用は、これまでにない経済活動、社会活動、および安全保障に関わる活動を促進する手段となる。このため、国際的な競争と協力の重要性が急速に高まっており、わが国においても宇宙活動の自立性の確立、およびその維持と強化のための戦略的な宇宙政策が講じられようとしている^{1)†}。

すでに日常の基盤となっている気象観測、放送、通信、測位などは、人工衛星の利用によって提供される機能の代表例である。また、同時に広い範囲を覆うことができる人工衛星の特性は、地球規模で起きている環境課題の把握と解決に有益な情報収集を可能とし、持続可能な開発目標（sustainable development goals, SDGs）に沿った活動へも大きく貢献する²⁾。防災や減災、災害時にも、迅速な対応のための重要な情報の獲得と共有の手段として人工衛星は活用されている。これらは皆、経済活動や社会活動が宇宙システムへ強く依存していることの例証といえる。

宇宙科学の分野では、深宇宙が注目を集める領域の一つとなり、大型の望遠鏡を搭載した人工衛星や、小惑星のサンプルを採取して地球へ運ぶための探査機などが打ち上げられている。特に火星では、将来の人類の居住対象とみなした探査が進んでおり、欧米が計画する火星からのサンプルリターンに加えて、アジア圏においても日本や中国がサンプルリターンを計画している^{3)~6)}。宇宙科学の分野には、多くの国々と民間事業者の参画が求められており、低軌道を周回する国際宇宙ステーション（International Space Station, ISS）の運用と並行して、月の探査計画が推進されている^{7)~9)}。

宇宙領域は近年、安全保障に関連した活動の場となっており、人工衛星の情報収集機能、測位機能、通信機能などへより一層の強化が求められている。また、宇宙への輸送システムを保有することは、宇宙活動の自立性の確保に必須であるため、世界的には、宇宙へ大型貨物を輸送できるシステムの開発が盛んとなっている。これまではアメリカ、中国、ロシアのみが実施できていた有人

† 肩付数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

輸送についても、欧州やインドが独自に必要な技術の獲得を目指している¹⁾。

1.1.2 周波数分配

宇宙領域におけるさまざまな活動を行うには、無線通信技術が不可欠である。多数の無線通信システムが同時利用される状況では、送受される無線信号間の干渉や混信による影響を回避するため、国際的に地域別、目的別などで割り当てられている周波数利用の遵守が求められる。

使用する周波数の割当ては、国際電気通信連合の無線通信規則第5条に図1.1のように示されている¹⁰⁾。この割当てでは世界を三つの地域に区分しており、日本は第三地域に含まれている。

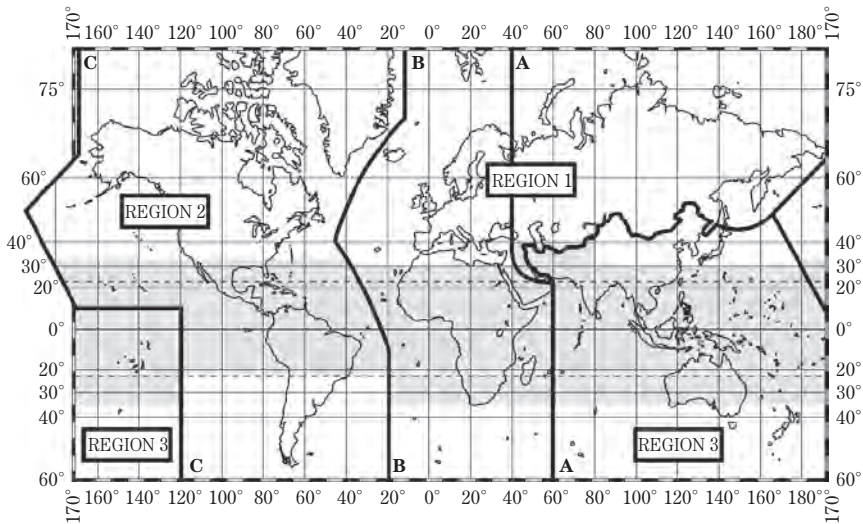


図 1.1 周波数分配のための地域区分¹⁰⁾

また、国際電気通信連合による周波数の国際分配に基づいて決められる日本国内での周波数の分配を図1.2、表1.1に示す¹¹⁾。同図表において、衛星通信は極超短波、マイクロ波およびミリ波の区分に記されている。

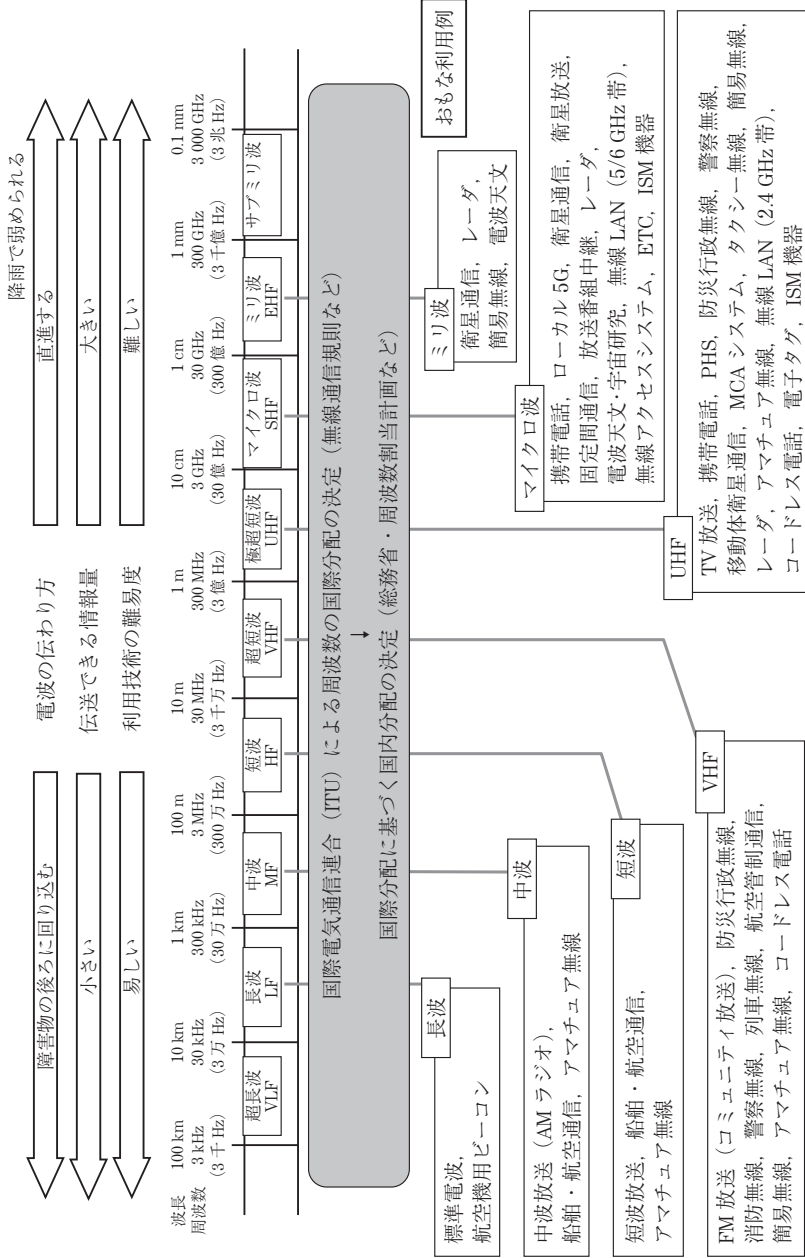


図 1.2 わが国の周波数帯ごとのおもな用途¹⁾

表 1.1 電波の特徴¹⁾

周波数帯	波長	特徴
超長波	10~100 km	地表面に沿って伝わり低い山をも越えることができる。また、水中でも伝わるため、海底探査にも応用できる。
長波	1~10 km	非常に速くまで伝わる可以利用。電波時計などに時間と周波数標準を知らせるための標準周波数周波数局に利用されている。
中波	100~1 000 m	約 100 km の高度に形成される電離層の E 層に反射して伝わる利用。おもにラジオ放送用として利用されている。
短波	10~100 m	約 200~400 km の高度に形成される電離層の F 層に反射して、地表との反射を繰り返しながら地球の裏側まで伝わっていくことができる。遠洋の船舶通信、国際線航空機用の通信、国際放送およびアマチュア無線に広く利用されている。
超短波	1~10 m	直進性があり、電離層で反射しにくい性質もあるが、山や建物の陰にもある程度回り込んで伝わる利用。防災無線や消防無線など多種多様な移動通信に幅広く利用されている。
極超短波	10 cm~1 m	超短波に比べて直進性がさらに強くなるが、多少の山や建物の陰には回り込んで伝わる利用。携帯電話をはじめとした多種多様な移動通信システムを中心に、デジタルテレビ放送、空港監視レーダーや電子レンジなどに幅広く利用されている。
マイクロ波	1~10 cm	直進性が強い性質を持つため、特定の方向に向けて発射するのに適している。おもに固定の中継回線、衛星通信、衛星放送や無線 LAN に利用されている。
ミリ波	1~10 mm	マイクロ波と同様に強い直進性があり、非常に大きな情報量を伝送することができるが、悪天候時には雨や霧による影響を強く受けてあまり遠くへ伝わる利用。このため、比較的短距離の無線アクセス通信や画像伝送システム、簡易無線、自動車衝突防止レーダーなどに利用されているほか、電波望遠鏡による天文観測が行われている。
サブミリ波	0.1~1 mm	光に近い性質を持った電波。通信用としてはほとんど利用されていないが、一方では、ミリ波と同様に電波望遠鏡による天文観測が行われている。

索引

【あ行】

アイソプラナティック角	114, 121
アウトースケール	111
アクチュエータ	123
アダプティブオプティクス	124
アナログコヒーレント方式	62
位相変調	60
インナースケール	111
宇宙機関間運用諮問グループ	12
宇宙通信の運用	134
宇宙データシステム	
諮問委員会	12, 136
エアリーパターンの	37
エルビウム / イッテルビウム	
共添加ファイバ	78

【か行】

開口平均効果	122
回折	31
外部変調 RZ-IMDD 方式	50
ガウスビーム	30
カセグレン焦点	96
干渉	21
ガンマガンマ分布	130
気象衛星	142
気象衛星ひまわり	142
逆フーリエ変換	26
球面波	24
強度変調・直接検出方式	48
グレイ位相	30
空間伝搬損失	46
クーデ焦点	96
屈折率構造関数	111
屈折率構造定数	111
雲回避ネットワーク	150

経緯台型	92
結合損失	47
光行差角	100
光行差補正	127
光行差補正部	42
高速駆動鏡	103, 123
小型アクチュエータ型	103
国際単位系	17
国際電気通信連合	135
コヒーレント光レシーバ	72
コマンド受信機	88
コンステレーション	7

【さ行】

サージ	131
サージ確率	131
サイトダイバーシティ	14, 128, 139, 150
雑音指数	57
軸ずらし型	91
指向誤差	45
指向・捕捉・追尾	41
自己遅延ヘテロダイン検波	67
シャック・ハートマンセンサ	124
自由空間光通信	39
周波数雑音	66
周波数分配	3
周波数変調	60
受信アンテナ利得	46
ショットノイズ限界検出	48
シングルイベント効果	81
信号対雑音比	48
シンチレーション	113, 116
シンチレーション	
インデックス	117
振幅変調	60
スパイラルスキャン	101
スパイラル走査	52

スペースグレード品	60
スペースデブリ	7
制御システム	124
静止軌道	63
静止軌道衛星	40
精追尾	102
精追尾機構	42, 123
精追尾センサ	42
前方誤り訂正符号	126
送信アンテナ利得	45
相対強度雑音	66, 75
粗指向・追尾	102
粗捕捉機構	42
粗捕捉追尾センサ	42

【た行】

大気差	133
大気の屈折率	111
大気ゆらぎ	110
大気レンズ効果	133
縦モード線幅	66
中間周波数	67
直交位相振幅変調	48
直交位相偏移変調	48
追尾誤差	47
低軌道	63
低軌道周回衛星	40
デジタルコヒーレント方式	62
テレメトリ・コマンド	87
電界吸収変調レーザ	69
透過ウィンドウ	108
透過率	20
同相抑圧比	74
到来角度変動	113, 120
トータルドーズ効果	81
ドップラ周波数シフト	63

【な行】

ナスミス焦点	96
--------	----

二位相偏移変調	48	フェード	131	ミー散乱	108
【は行】		フェード確率	131	ミッション運用	134
ハウスキーピング運用	134	フラウンホーファー回折	35	民生品	85
波長可変光源	80	プランク定数	75	無線通信規則	135
波長可変レザ	69	フリードパラメータ	114	モードホップ	69
波面誤差	45	フレネル回折	33	【や行】	
ビーコン方式	100	平面波	23	ヤコビアン	35
ビーコンレス捕捉追尾方式		ペリスコープ型	92	誘電率	20
	52	ヘルムホルツ方程式	25	【ら行】	
ビームウェスト	30	変位損傷	81	ラスタースキャン	101
ビームワンド	116, 119	偏波	21	レイリー散乱	108
光90度ハイブリッド	60, 72	ホイヘンスの原理	31	レイリー長	30
光衛星通信機器	41	ホイヘンス-フレネルの原理	33	ログノーマル分布	130
光低雑音増幅器	57	【ま行】			
光の速度	20	マクスウェルの方程式	17		
光ファイバ増幅器	77	マッハツェンダ型変調器	70		
フーリエ変換	26				

【数字】		FSK	60	OLSG	12
3rd Generation Partnership Project (3GPP)	10	FSM	103, 123	Optical Link Study Group	12
4分割センサ	123	FSO	39	【P, Q, R】	
【A, B, C】		【G, H, I】		PAA	42, 100
ADC	79	GEO	63	PAT	41
AO	124	HAPS	130	PLC	74
AoA	113	HAP モデル	114	PSK	61
Artemis プログラム	13	Hufnagel-Valley モデル	113	QAM	48
ASE 雑音	78	HV モデル	113	QD	123
ASK	60	ICAO	148	QPSK	48
Beam wandering	148	IF	68	RIN	66, 74
BPSK	48	IMDD	48	RR	135
CCSDS	12, 136	IOAG	12	Rytov 近似	113
CMRR	74	IQ 信号	62	【S, T, V, W】	
COTS	85	ITLA	69, 80	SDA	12
CPA	42	ITU	135	SEE	81
【D, E, F】		【J, K, L】		SH センサ	125
DDD	81	JAXA	135	SI	17
EDFA	77	Kolmogorov スペクトル	111	SLC モデル	114
EML	70	Kolmogorov の乱流理論	111	SNR	48
ESA	135	LCT	41	Space Development Agency	
EYDF	78	LEO	40, 63		12
FEC	126	【M, N, O】		TIA	79
FPA	42, 123	MZM	70	TID	81
FPS	42	NF	57, 77	von Karman スペクトル	112
		OLNA	57	WMO	140

——編著者・著者略歴——

高山 佳久（たかやま よしひさ）

1992年 北海道大学工学部電子工学科卒業
1994年 北海道大学大学院工学研究科修士課程
修了（電子工学専攻）
1994年 松下通信工業株式会社勤務
1998年 北海道大学大学院工学研究科博士後期
課程修了（電子情報工学専攻）
博士（工学）
1999年 郵政省通信総合研究所（現 情報通信
研究機構）勤務
2004年 宇宙航空研究開発機構出任
2007年 情報通信研究機構帰任
2015年 東海大学教授
現在に至る

向井 達也（むかい たつや）

1998年 宇宙開発事業団勤務
2003年 宇宙航空研究開発機構勤務（名称変更）
現在に至る
2008年 信州大学工学部情報工学科卒業
2011年 信州大学大学院工学系研究科修士課程
修了（情報工学専攻）
2012年 ドイツ航空宇宙センター航法通信研究
所光通信研究室（留学）

竹中 秀樹（たけなか ひでき）

2008年 東京工業高等専門学校専攻科修了
（機械情報システム工学専攻）
2010年 電気通信大学大学院情報システム研究
科修士課程修了（情報メディアシステ
ム学専攻）
2010年 情報通信研究機構有期技術員
2014年 電気通信大学大学院情報システム研究
科（情報メディアシステム学専攻）博
士課程修了
博士（工学）
2015年 情報通信研究機構有期研究員
2021年 東京都立大学助教
現在に至る

安藤 俊行（あんどう としゆき）

1996年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課
程修了（応用物理学専攻）
博士（工学）
1996年 日本学術振興会特別研究員（PD）
1998年 三菱電機株式会社情報技術総合研究所
勤務
2005年 三菱電機株式会社通信機製作所勤務
2006年 三菱電機株式会社情報技術総合研究所
勤務
2022年 三菱電機株式会社鎌倉製作所勤務
現在に至る

原口 英介（はらぐち えいすけ）

2006年 北海道大学工学部応用物理学科卒業
2008年 北海道大学大学院工学研究科修士課程
修了（応用物理学専攻）
2008年 三菱電機株式会社情報技術総合研究所
勤務
2019年 三菱電機株式会社鎌倉製作所勤務
2020年 北海道大学大学院工学研究科博士後期
課程修了（応用物理学専攻）
博士（工学）
2022年 三菱電機株式会社情報技術総合研究所
勤務
現在に至る

倉 伸宏（くら のぶひろ）

1990年 宇宙技術開発株式会社勤務
2001年 宇宙開発事業団（現 宇宙航空研究開
発機構）勤務
2002年 宇宙技術開発株式会社勤務
2004年 宇宙航空研究開発機構勤務
2007年 宇宙技術開発株式会社勤務
現在に至る

コヒーレント宇宙光通信入門 — 光でつなぐ次世代宇宙ネットワーク —

Introduction to Coherent Space Optical Communications :
Laser-Linked Space Network for the Next Era

© Takayama, Ando, JAXA, Haraguchi, Takenaka, Kura 2026

2026年6月8日 初版第1刷発行



検印省略	編著者	高山佳久
	著者	安藤俊行
		向井達也
		原口英介
		竹中秀樹
	倉伸宏	
発行者	株式会社	コロナ社
	代表者	牛来真也
印刷所	新日本印刷株式会社	
製本所	株式会社	愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01503-4 C3055 Printed in Japan

(松岡)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつと事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。