

波動と光

第1回 波動と光 ～概論～

情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻

松浦 基晴

アウトライン

✓ はじめに

講義情報から “波動と光” を学ぶ上での心構え

✓ 波とは？

波の本質と身近な波の現象

✓ 波を利用した技術

波の周波数から見る波を利用した技術

✓ まとめ

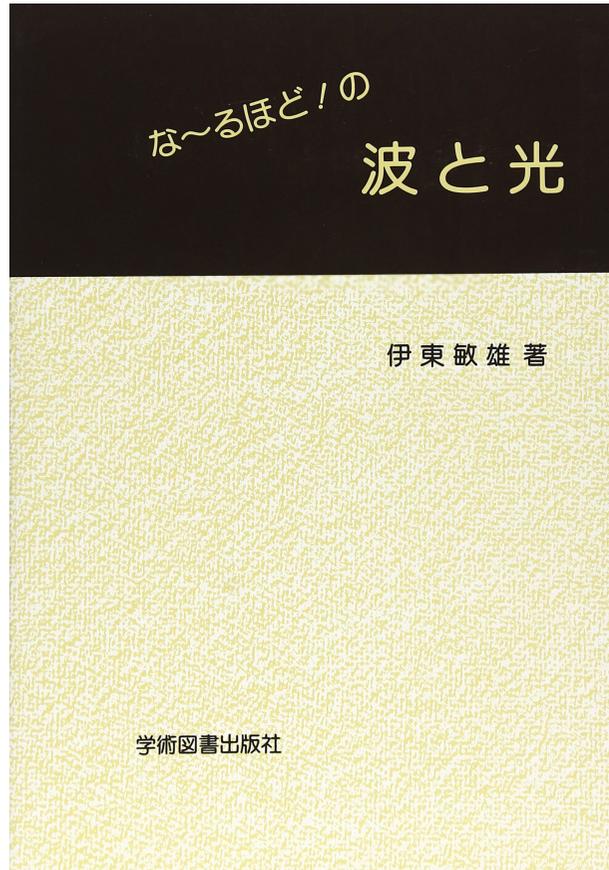
講義情報

担当教員：松浦（II類融合系 情報通信工学プログラム）
専門：光通信システム, 光信号処理, 光・無線融合技術
Email: m.matsuura@uec.ac.jp

講義計画（予定）

- 第1回：波とは？ 本講義および波に関するイントロダクション
- 第2回：単振動と連成振動
- 第3回：様々な媒質を伝わる波
- 第4回：波動方程式（重ね合わせの原理, 正弦波）
- 第5回：フーリエ級数とフーリエ変換
- 第6回：波のエネルギー
- 第7回：波の反射と透過
- 第8回：分散と群速度
- 第9回：音波
- 第10回：電磁波と光（光とは）
- 第11回：屈折率と偏光
- 第12回：光の干渉
- 第13回：光の屈折
- 第14回：波動と光の応用

講義の進め方と成績評価



な～るほどの!の波と光
伊東 敏雄著 (学術図書出版社)

• 講義（オンライン）

スライドや板書を用いて教科書の内容を中心に講義を行う。

積み上げ型の講義になるので、欠席が続くと従っていけなくなる。

• 演習（自主学習）

講義の進捗状況を見て、演習問題を解く。次週に答え合わせ。

試験対策として良く復習しておくこと。

• 成績評価

演習問題と期末試験

期末試験は必須。未受験は不可。

本講義について

- **波（と光）の本質を理解する**

波の仕組みや波の特性を利用した現象などをしっかり理解する。数式を追うだけでなく、現象そのものを頭で理解する。積み上げ型の講義なので復習を忘れない。

- **波（と光）は実際に何に使われているか**

波を身近なものと感じ、その重要性を理解するために、実際に利用されている波を利用した技術を紹介・学習する。

- **演習問題を通して、より理解を深める**

基本的には波の本質的な理解を目的とした講義になるので、演習や自主的な学習で波やその応用技術の理解をより深める。

アウトライン

はじめに

講義情報から “波動と光” を学ぶ上での心構え

✓ 波とは？

波の本質と身近な波の現象

波を利用した技術

波の周波数から見る波を利用した技術

まとめ

波とは？

▼ 波の特徴

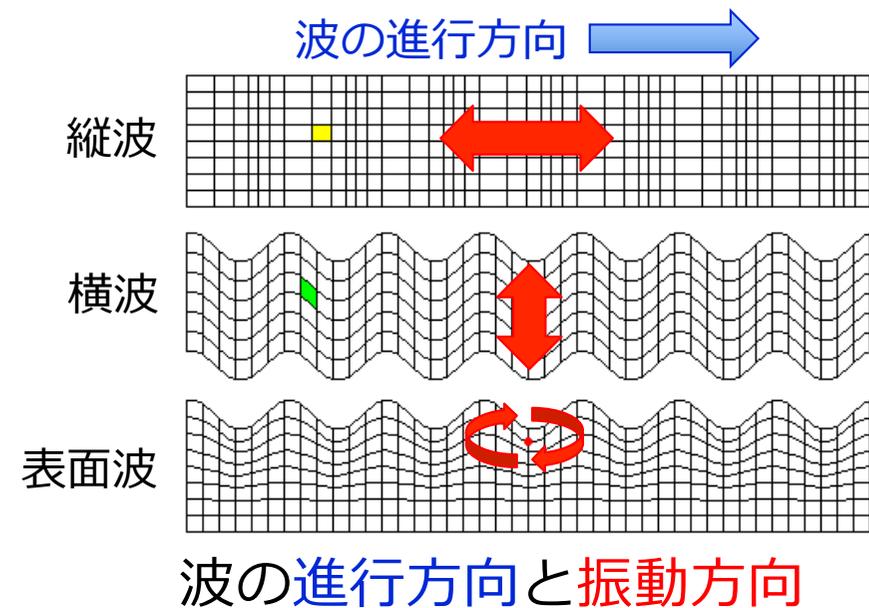
- ほとんどの波は目に見えない.
- ものが移動しないのに状態の変化（エネルギー）が伝わる.
- 波を伝えるものに復元力がある.
(例：ばねの振動)



海の波（表面波）

▼ 波の種類とその振動

- 縦波（音, 地震波など）
波自体の振動が波の進行方向と同じ
- 横波（電波, 光, 地震波）
波の進行方向に直交して振動
- 表面波（海の波, 地震波）
進行方向に対して楕円（円）



波の3要素

- 正弦波の時間関数

$$x(t) = \underbrace{A}_{\text{振幅}} \sin(2\pi \underbrace{f}_{\text{周波数}} t + \underbrace{\alpha}_{\text{位相}})$$

- ✓ 振幅 (Amplitude)

波の大きさ (振り幅) を表す。単位は波の種類によって異なる
【例】電波の場合は一般に電圧, 光の場合は電力など。

- ✓ 周波数 (Frequency)

単位時間に波は振動する回数。単位としては1秒間に振動する回数として, Hz (ヘルツ) が用いられる。

- ✓ 位相 (Phase)

波の周期の中でどの位置 (タイミング) にいるかを示す量。
単位はラジアン。

アウトライン

はじめに

講義情報から “波動と光” を学ぶ上での心構え

波とは？

波の本質と身近な波の現象

✓ 波を利用した技術

波の周波数から見る波を利用した技術

まとめ

実際に利用されている技術

✓ 通信

波の3要素である振幅, 周波数, 位相のいずれかを伝送したい情報に合わせて変化（変調）することで、波の伝搬によって情報の伝送を行う。

✓ 計測

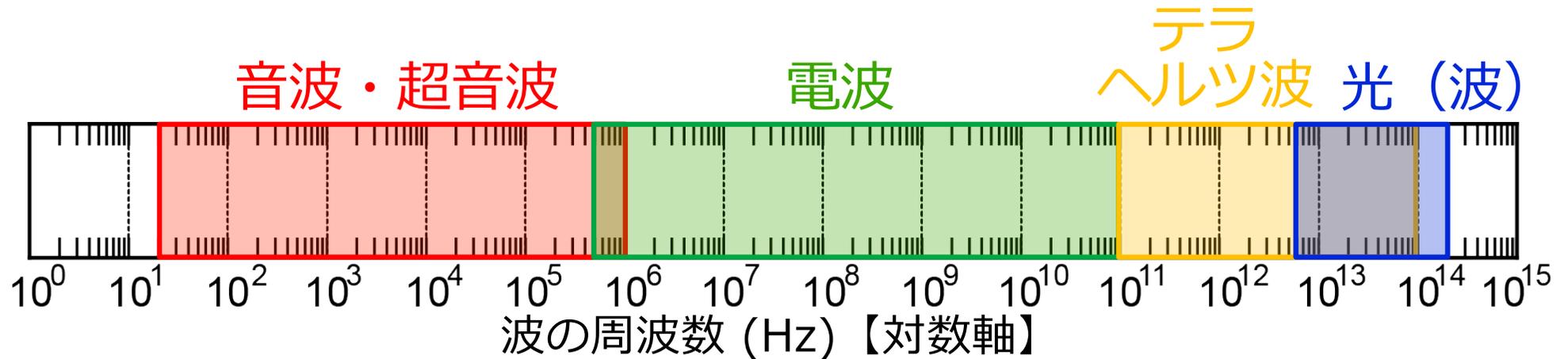
波の特徴である反射, 屈折, 干渉を利用することで物質の計測を行う。周波数によって、被計測物の大きさ（分解能）も異なってくる。

✓ エネルギー

伝搬する波のエネルギーそのもので物質等の状態を変化させる。周波数によって、変化の対象が異なってくる。

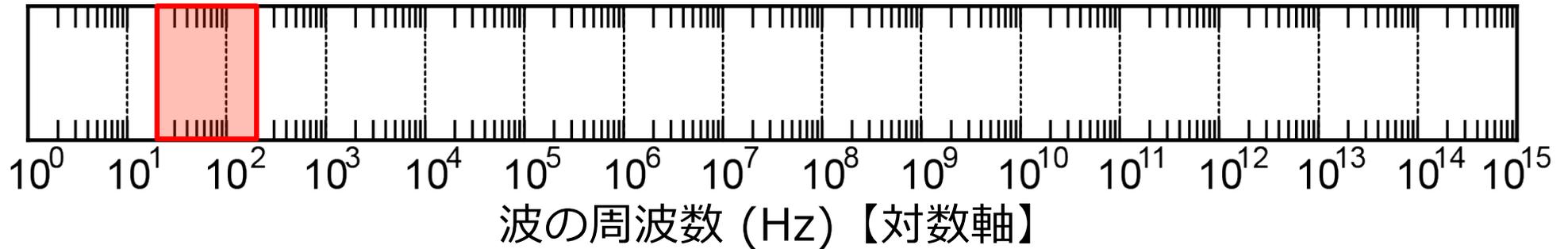
波の周波数

波はその周期（周波数）に応じて，様々な役割を果たす



- 波が実際にどのような技術に利用されているかを理解する
- 利用されている技術と周波数の関係性がイメージ出来るように

周波数帯：20～20 kHz



音（音波）

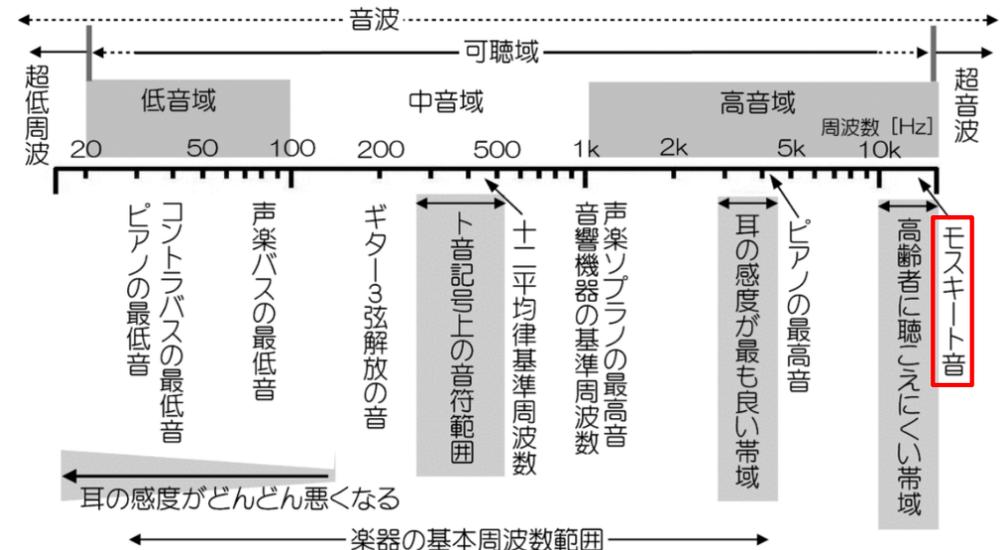
一般に空気を振動させることで、圧縮と膨張の状態が連なって伝わる。特定の範囲の周波数帯が音と認識されて伝わる

伝搬媒体

気体、液体、固体の全て

伝搬速度（音速）

空気中, 20℃, 一気圧で
340 m/s（毎秒）



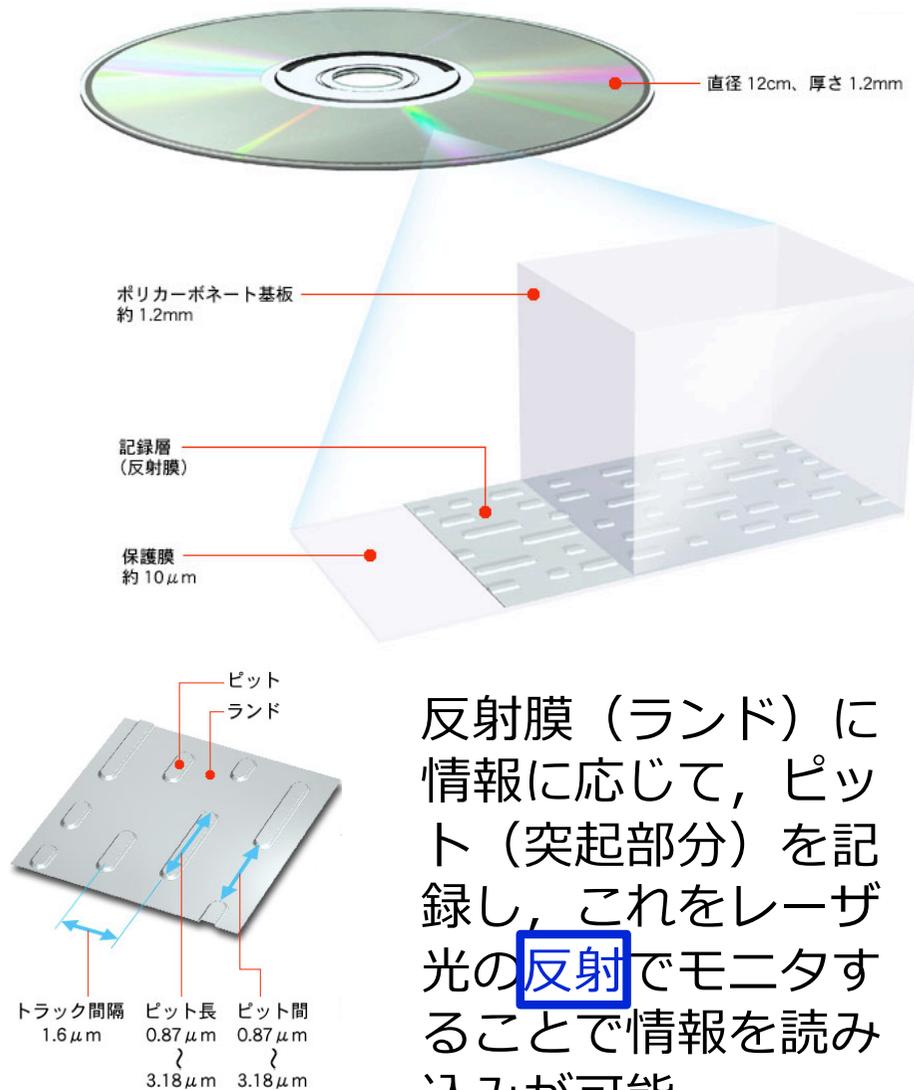
様々な楽器・声の周波数帯

引用: <https://acoutis.jimdo.com>

【余談】モスキート音（13～19 kHz）

CD (コンパクト・ディスク)

デジタル情報の記録媒体



反射膜 (ランド) に情報に応じて、ピット (突起部分) を記録し、これをレーザー光の**反射**でモニタすることで情報を読み込みが可能

CDの最大収録時間

- ・ サンプル周波数 : 44.1 kHz
可聴域20 kHzを再現するには、標本化定理より、最低その倍のサンプル周波数40 kHzが必要
- ・ ビット深度 : 16 bit
- ・ チャンネル数 : 2 ch (ステレオ)

1秒間のデータ量は

$$16 \times 2 \times 44100 \div 8 = 176,400 \text{ (B/s)}$$

記憶容量700 MBの最大収録時間は

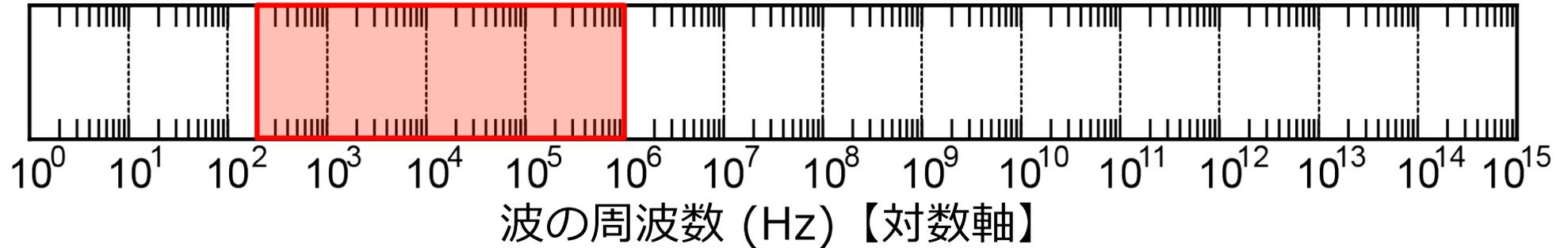
(1 MB = 1024 kB, 1 kB = 1024 B 換算)

$$700 \times 1.15 \times 1024^2 \div 176400 \div 60 \approx 79.75 \approx \underline{80 \text{ 分}}$$

$$4785 \text{ 秒} \div 60 = 79.75 \approx \underline{80 \text{ 分}}$$



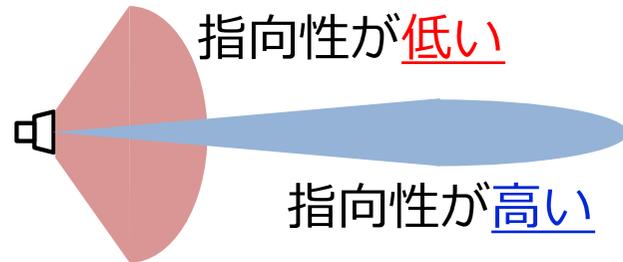
周波数帯：20 kHz～数 GHz (?)



✓ 人間の耳に聞こえない音
(高周波数の音波)

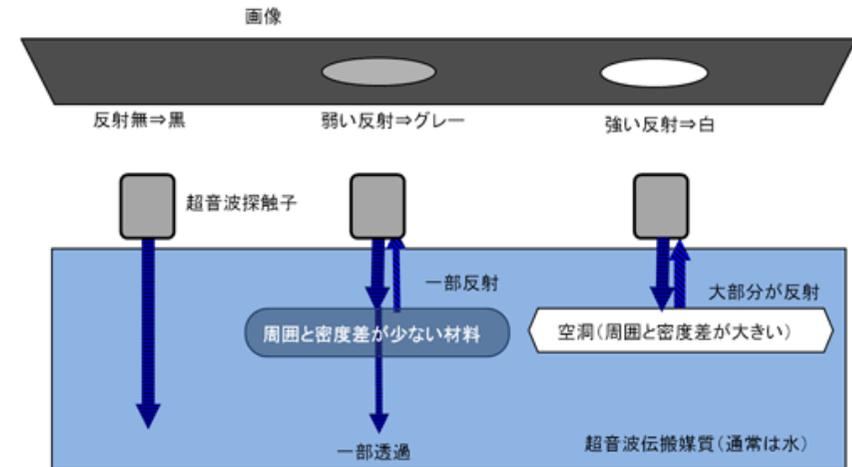
✓ 超音波の特長

- 波長が短いので小さいものにも反射する
- 特定方向に進む (指向性が高い)



✓ 超音波の応用

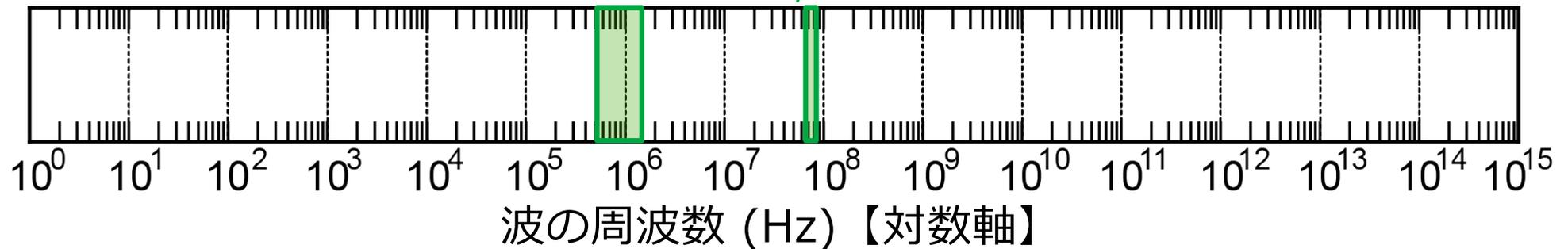
- 超音波検査 (エコー)



引用: <http://www.hitachi-power-solutions.com/finesat/kiso.html>

- 超音波洗浄機 (数十kHz, 数MHz)

周波数帯：およそ500～1600 kHz, 75～90 MHz



▼ 電波（電磁波）

電磁界を伴って進行する電気的な波（電気信号）

▼ 伝搬媒体

気体, 液体, 固体の全て
(但し, 周波数によって異なる)

▼ 伝搬速度

光と同じ, およそ300,000 km/s
(音波のおよそ88万倍高速)

▼ AMラジオ（500～1600 kHz）

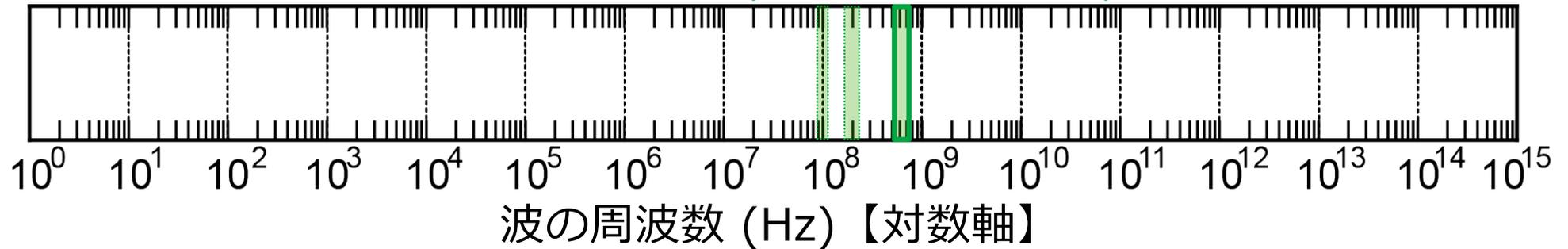
- ・ 振幅変調（Amplitude Modulation）方式のラジオ
- ・ 海外に届くほど伝搬距離は長いが雑音に弱い

▼ FMラジオ（75～90 MHz）

- ・ 周波数変調（Frequency Modulation）方式のラジオ
- ・ 伝搬距離は数十km～数百kmで雑音に強い

地上デジタル放送【通信】

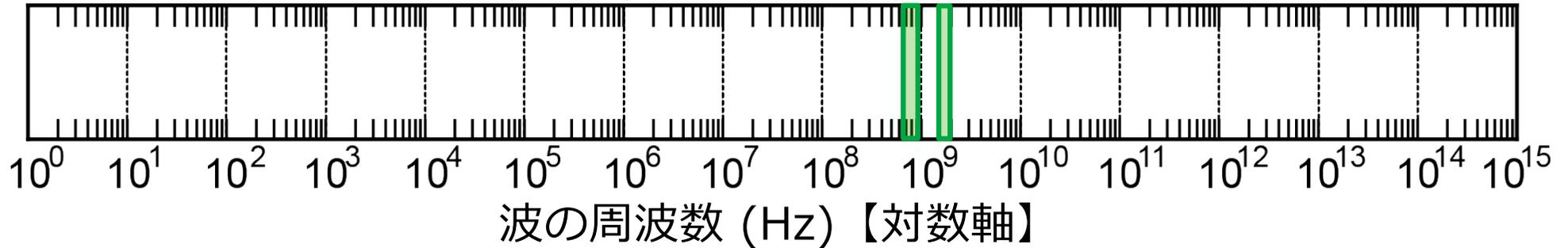
周波数帯：およそ90～108 MHz, 170～222 MHz, 470～770 MHz



2011年地デジ化（前）後の周波数割り当て

帯域名	ch	周波数	地デジ化後の周波数（幅）	地デジ化後の用途
VHF-L	1～3	90～108 MHz	90～108 MHz (18 MHz)	携帯向けデジタル放送
VHF-H	4～12	170～222 MHz	170～205 MHz (35 MHz)	災害対策用（自営）通信
			(202.5～207.5 MHz)	与干渉制限（5 MHz想定）
			205～222 MHz (17 MHz)	携帯向けデジタル放送
UHF	13～62	470～770 MHz	470～710 MHz (300 MHz)	地上デジタル放送
			710～715 MHz (5 MHz)	ガードバンド
			715～725 MHz (10 MHz)	ITS（高度道路交通システム）
			725～730 MHz (5 MHz)	ガードバンド
			730～770 MHz (10 MHz)	携帯電話

周波数帯 : 700, 800, 900 MHz帯, 1.5, 1.7, 2.0 GHz帯



各事業者がLTEで使用している周波数帯

事業者	700MHz帯		800MHz帯		900MHz帯	1.5GHz帯		1.7GHz帯	2.0GHz帯
	バンド28	バンド18/26	バンド19	バンド8	バンド11	バンド21	バンド3	バンド1	
NTTドコモ	○		○			○	○	○	
KDDI (au)	○	○				○		○	
ソフトバンク (※Y!mobile含む)				○			○	○	

引用: http://www.soumu.go.jp/main_content/000385478.pdf

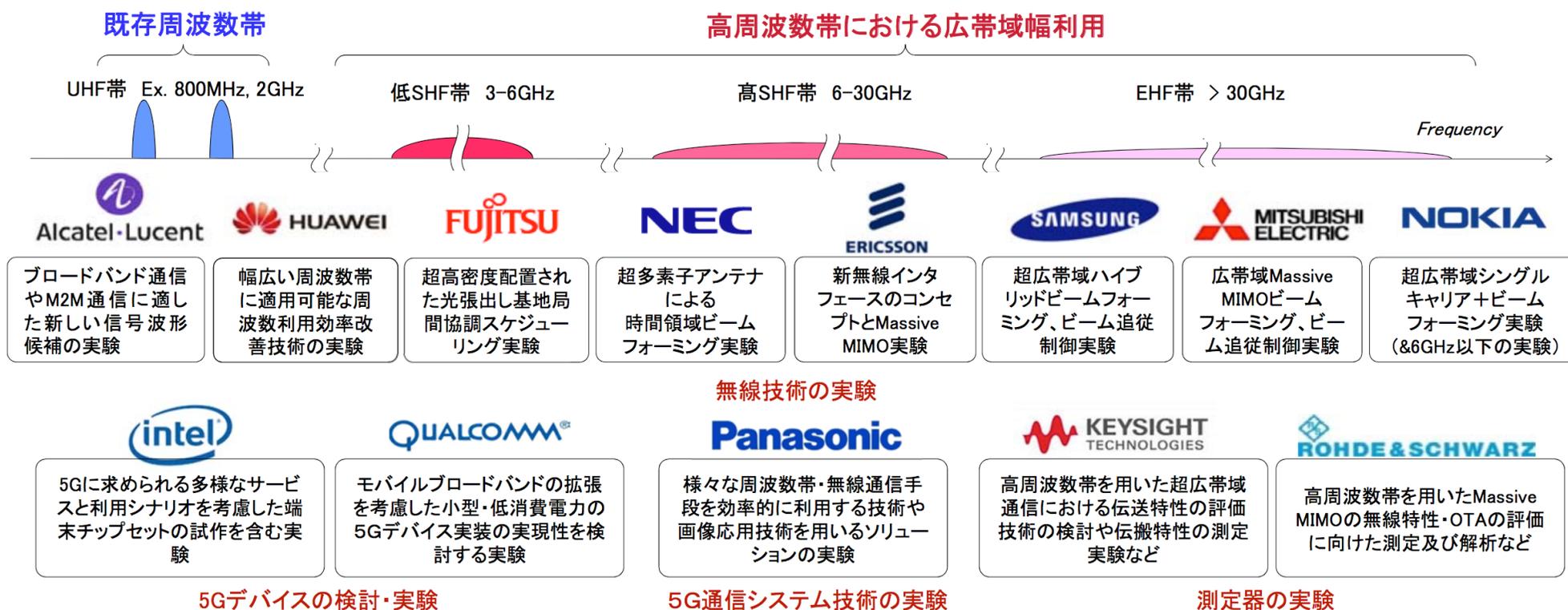
プラチナバンド (モバイル通信に特に適した周波数帯)

第五世代（5G）に向けての検討

✓ 電波（無線信号）の高周波数化

- ・ 無線周波数帯の枯渇
- ・ モバイル通信データの高速・大容量化の必要性

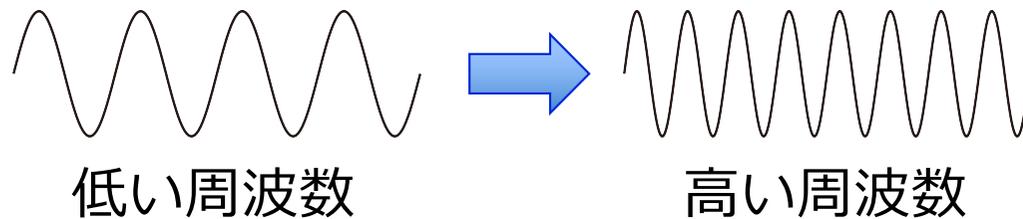
世界の主要ベンダとの5Gに関する実験協力に対する取り組み



引用: https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/tech/5g/openhouse2015_5g_docomo.pdf

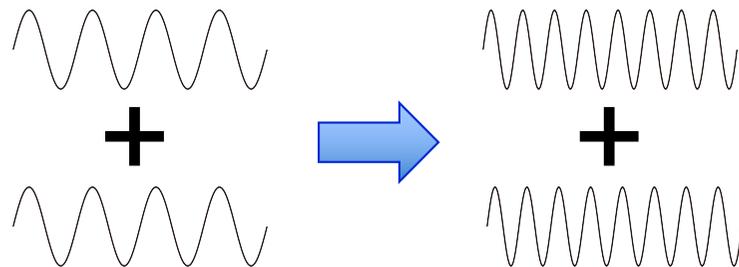
波の周波数が高くなると・・・

▼ より多く情報が送りがやすくなる



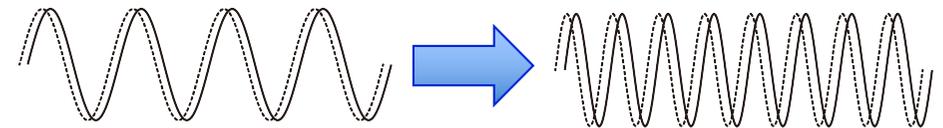
波の同じ時間間隔においても振幅・周波数・位相（波の3要素）を変化させやすくなる

▼ 制御が困難になる



波を干渉させる際には、より高精度な位置制御が必要になる

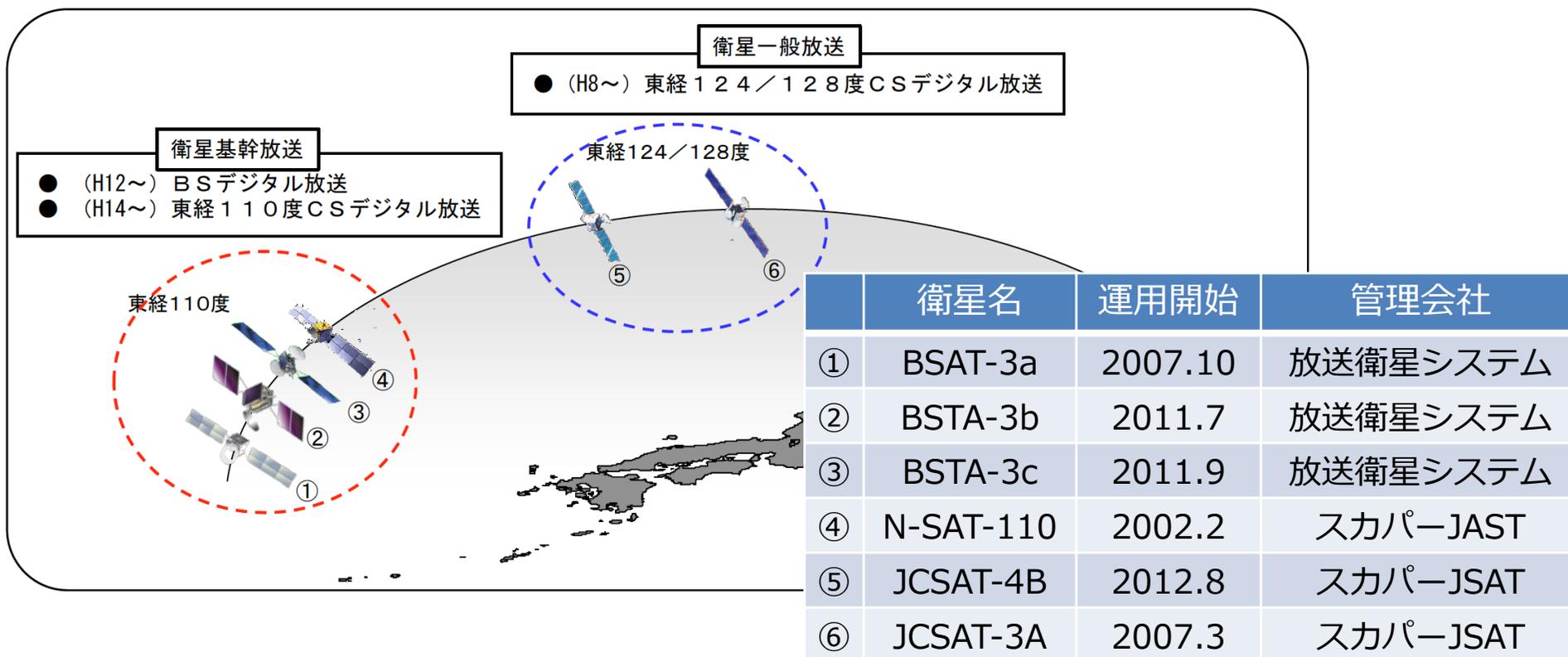
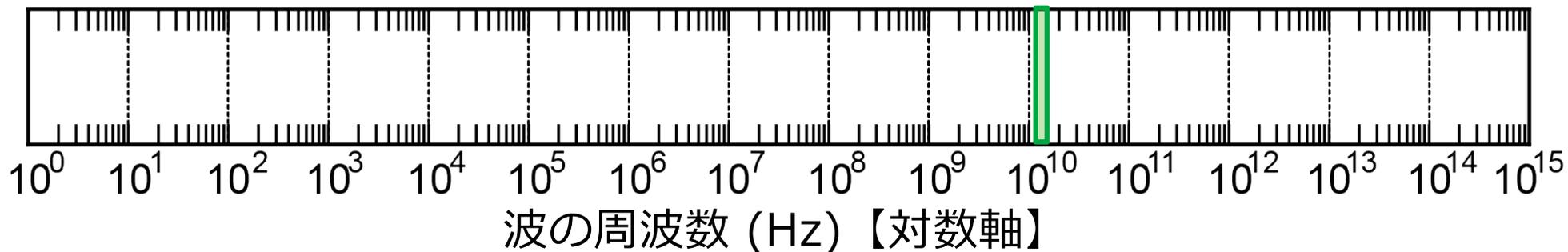
▼ 指向性が高くなる



少しの波のズレで干渉条件が大きく変化するため、回折が起こりにくい

衛星放送【通信】

周波数帯 : 11.72~12.73 GHz



引用: http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/eisei/eisei.pdf

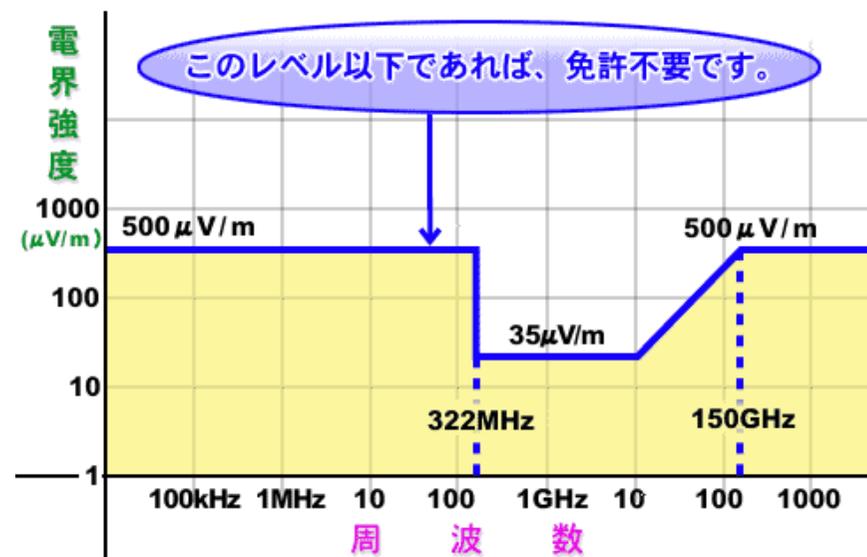
周波数は貴重な資源 - 電波法

引用: <http://www.tele.soumu.go.jp/index.htm>

電波の公平且つ能率的な利用を確保すること
によって公共の福祉を増進することを目的

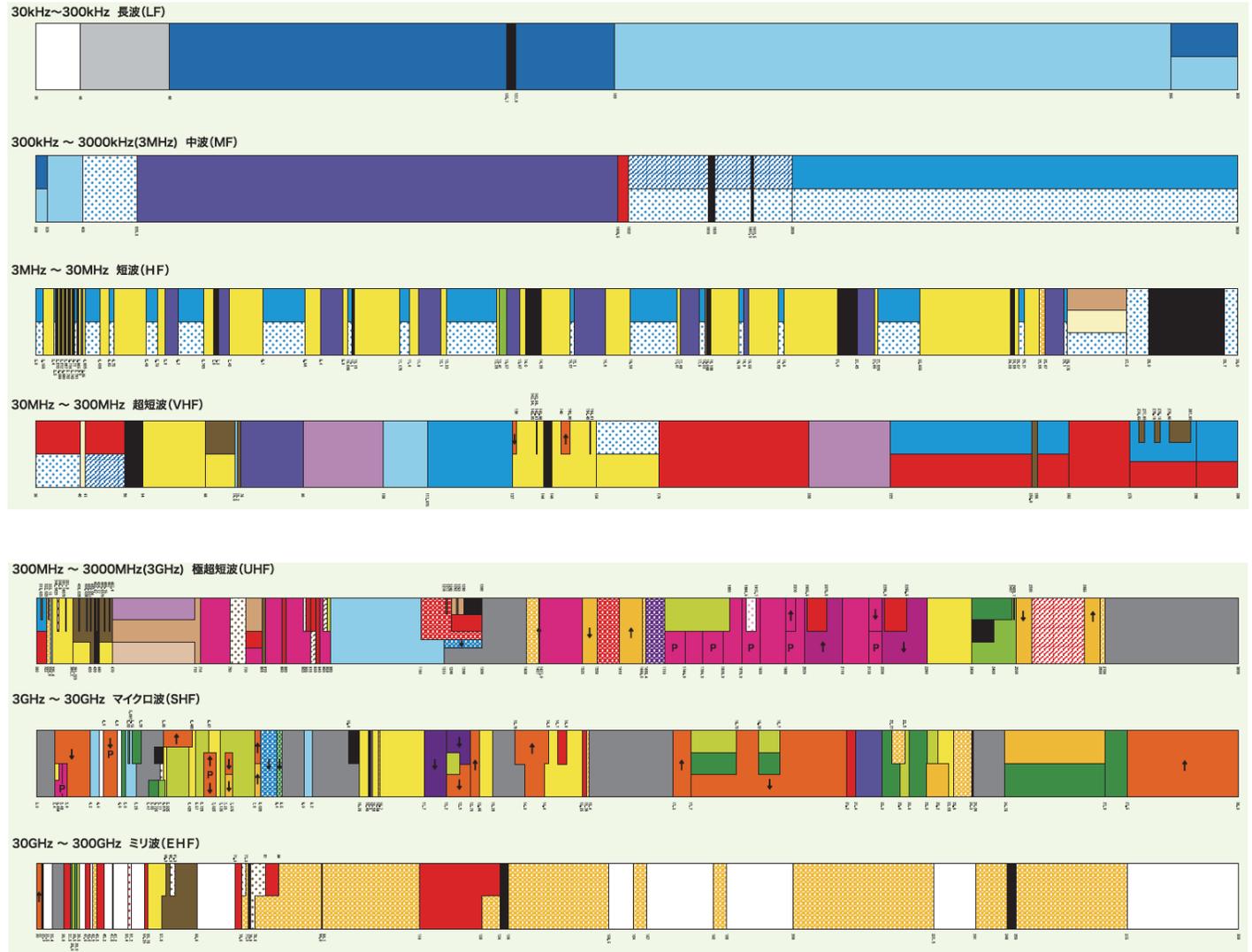
- 第1章 総則
- 第2章 無線局の免許等
- 第3章 無線設備
- 第3章の2 特定無線設備の技術基準適合証明等
- 第4章 無線従事者
- 第5章 運用
- 第6章 監督
- 第7章 異議申立て及び訴訟
- 第7章の2 電波監理審議会
- 第8章 雑則
- 第9章 罰則
- 附則
- 別表

【図：微弱無線局の3mの距離における電界強度の許容値】

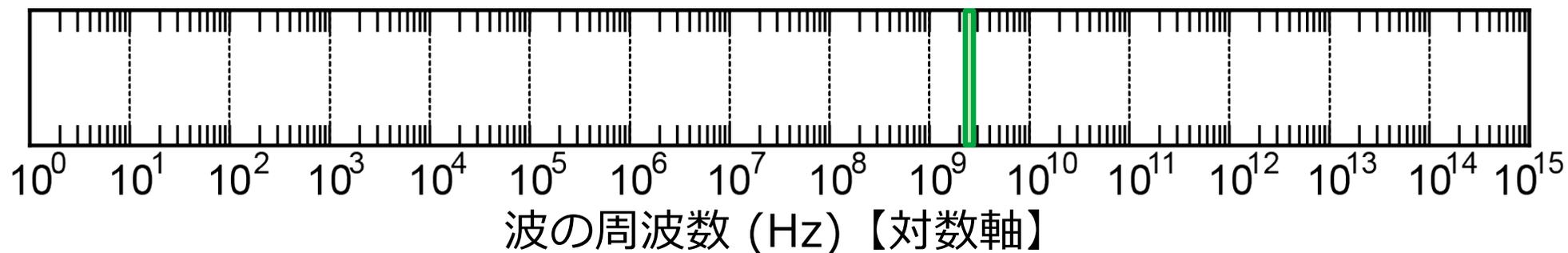


我が国の電波の使用状況

引用: <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/index.htm#4000294>



周波数帯 : 2.45 GHz



✓ 電子レンジの原理

2.45 GHzの周波数を持つ電磁波（マイクロ波）を加熱対象物に照射することで、対象物の水分子を振動させ、そのとき発生する熱で加熱を行う

✓ 使用周波数 2.45 GHz

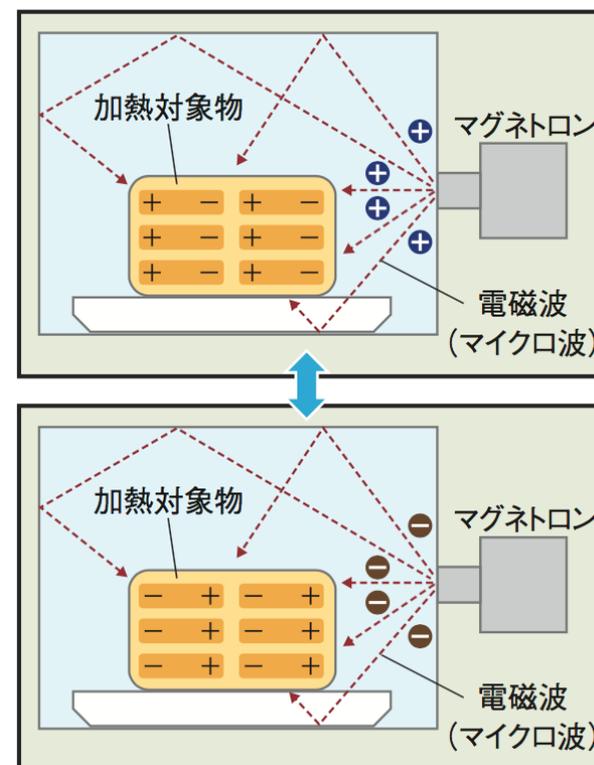
無線LANの信号周波数と同じ

✓ 出力パワー

電子レンジ : 500~1000 W

無線LAN : 最大10 mW

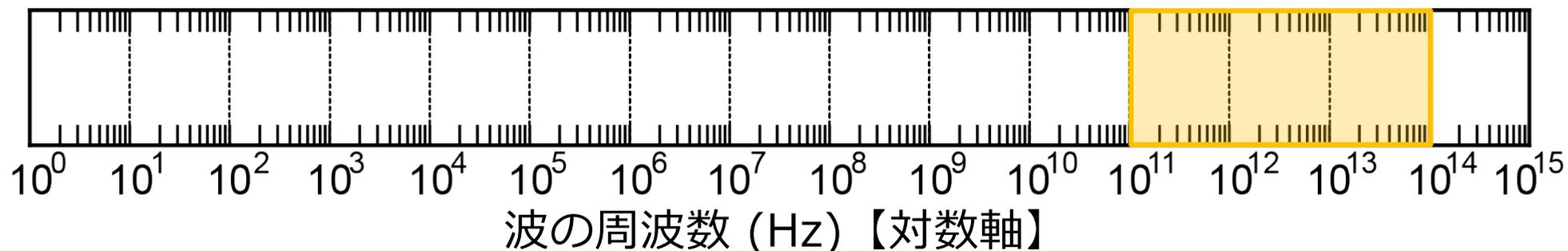
電子レンジは英語で [Microwave oven](#)



引用: http://www.kokusen.go.jp/wko/pdf/wko-201507_06.pdf

テラヘルツ波【計測・通信】

周波数帯：100 GHz～100 THz



▼ テラヘルツ波とは

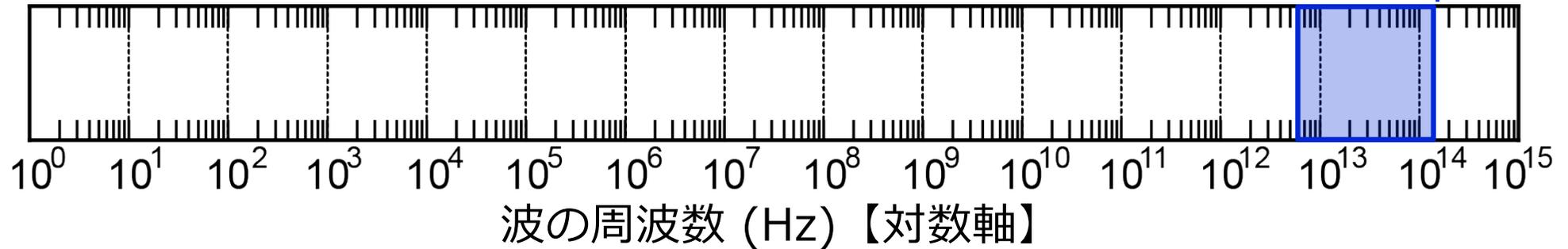
周波数0.1～100 THzの波で電波と光（波）の中間帯に位置し、
[電波と光の両方の性質](#)を持っている

▼ テラヘルツ波に関する研究開発

これまで、良質の光源や信号源がなく、水の吸収が大きかったため、
利用が困難な未開拓領域とされてきた

▼ テラヘルツ波の応用

- ・ 100 GHzを超える超高速無線通信技術
- ・ 不透明物質の内部検査
- ・ 単純な分子構造のものから生体高分子までの生体・医療計測

周波数帯：6~120 THz（波長：50~2.5 μm ）

▼ 遠赤外線加熱

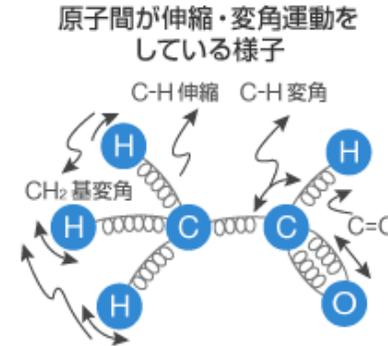
放射による熱エネルギーを利用した加熱方式。セラミックは200~600°Cで2.5~30 μm の電磁波を発生。

▼ 発熱の原理

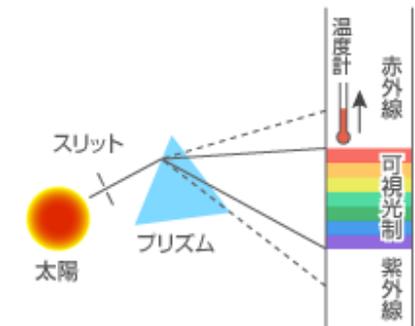
同じ原子どうしの振動数に対応した波長の遠赤外線を吸収すると振動が激しくなり熱を発生

▼ 太陽からのエネルギー

紫外線（10%）：日焼けを起こす
赤外線（40%）：熱を感じる



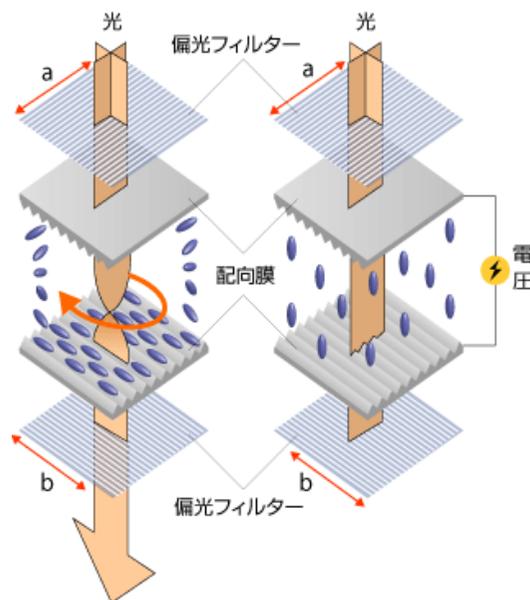
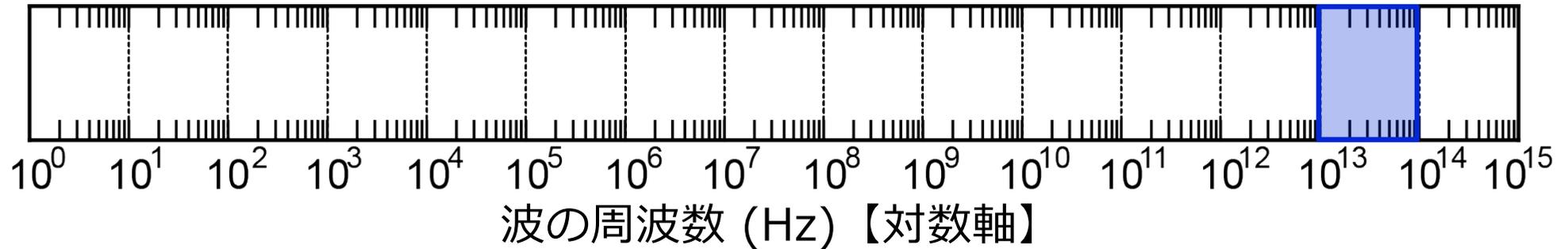
遠赤外線による
発熱の原理



太陽からの
エネルギー

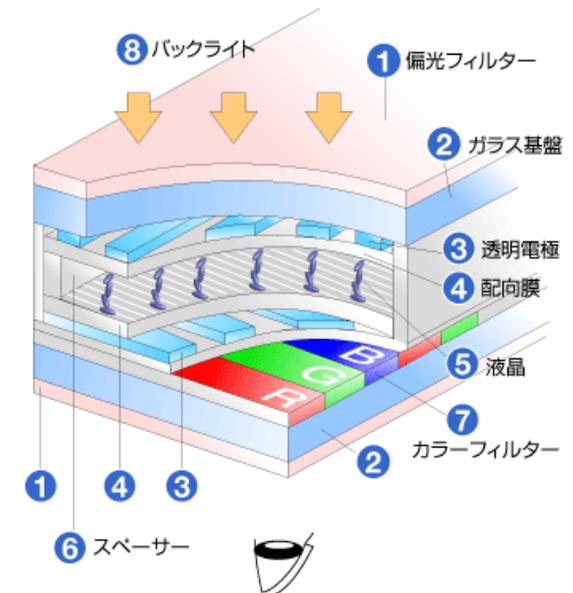
引用: http://www.jeh-center.org/example_product/farred.html

周波数帯：10～100 THz（波長：400～700 nm）



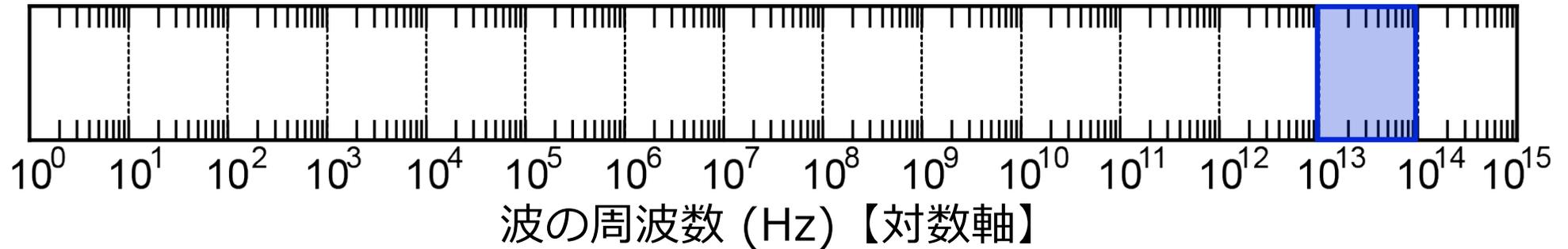
✓ 液晶ディスプレイの原理

- 直交した2枚の**偏光**フィルタの間に液晶を挟むことで光は透過。
- 液晶に電圧を加えると**ねじれ**が取れ，光が遮断。
- バックライトを液晶の原理で透過/遮断（ON/OFF）することで一つのドットとして表示

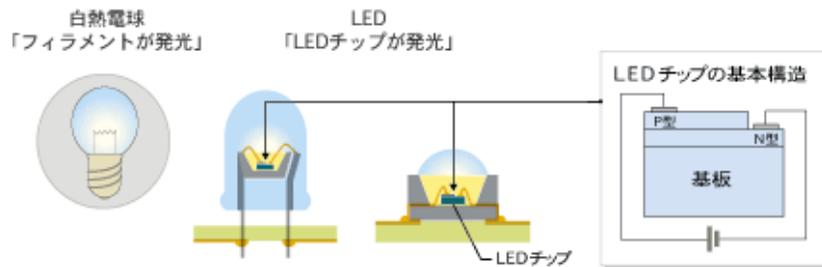


引用: <http://www.sharp.co.jp/products/lcd/tech/index2.html>

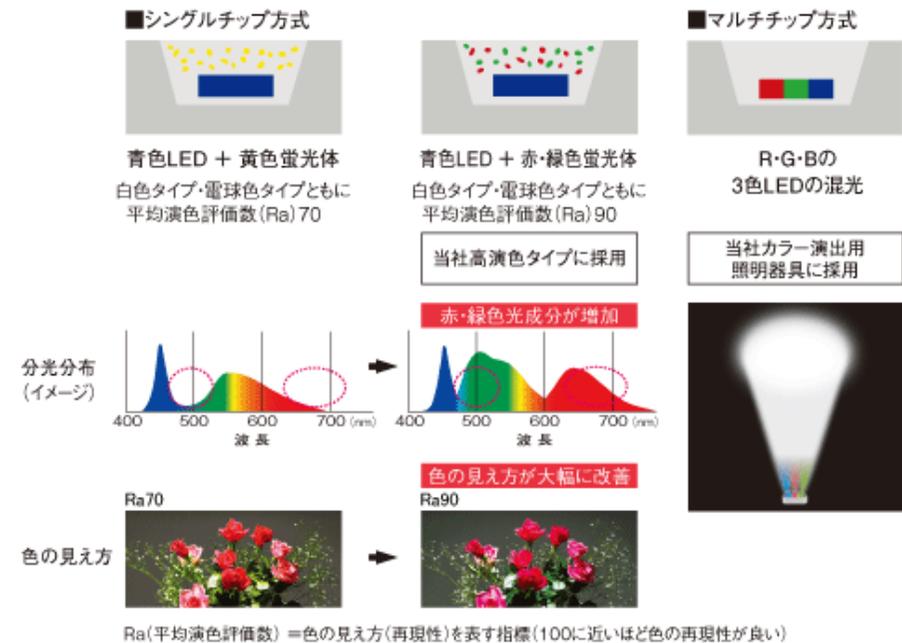
周波数帯：10～100 THz（波長：400～700 nm）



LED（発光ダイオード）



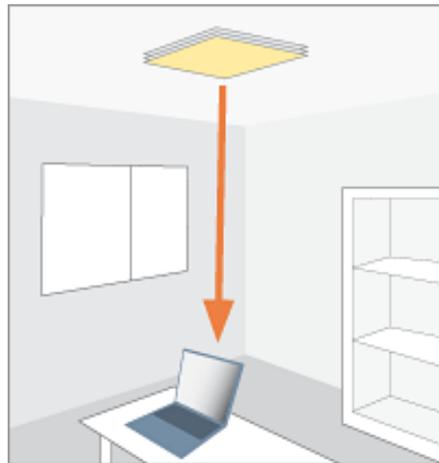
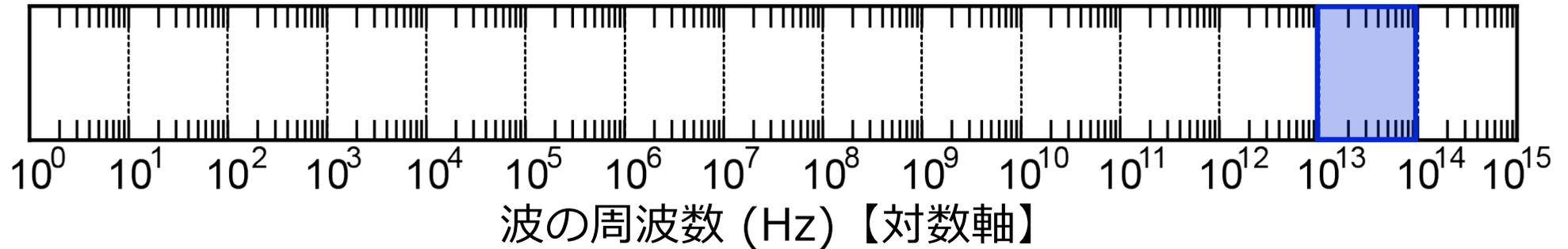
- ・半導体内の電子・正孔の再結合で光エネルギーとして発光
- ・白熱電球の約10分の1の消費電力
- ・寿命が長く、点灯の応答性が良い



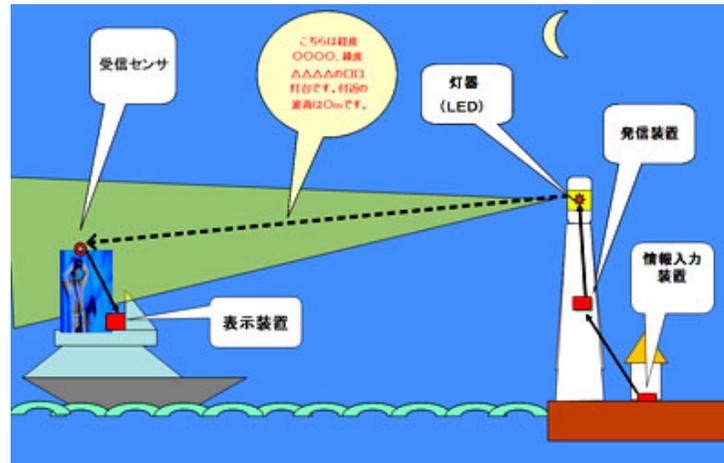
引用: <http://www2.panasonic.biz/es/lighting/led/led/index.html>

可視光通信【エネルギー/通信】

周波数帯 : 10~100 THz (波長 : 400~700 nm)

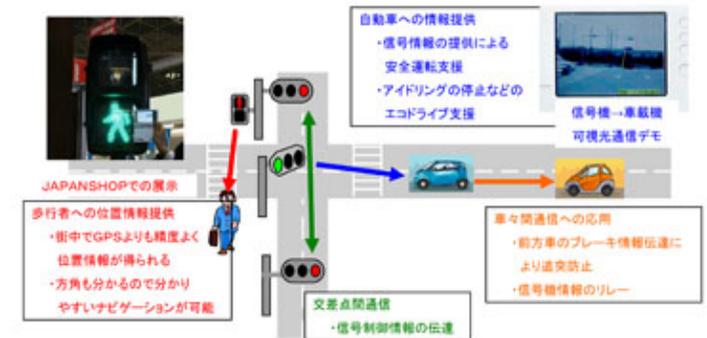


室内照明を利用した
高速光無線通信



灯台の照明を利用した
船舶との光無線通信

交差点周辺での可視光通信の応用

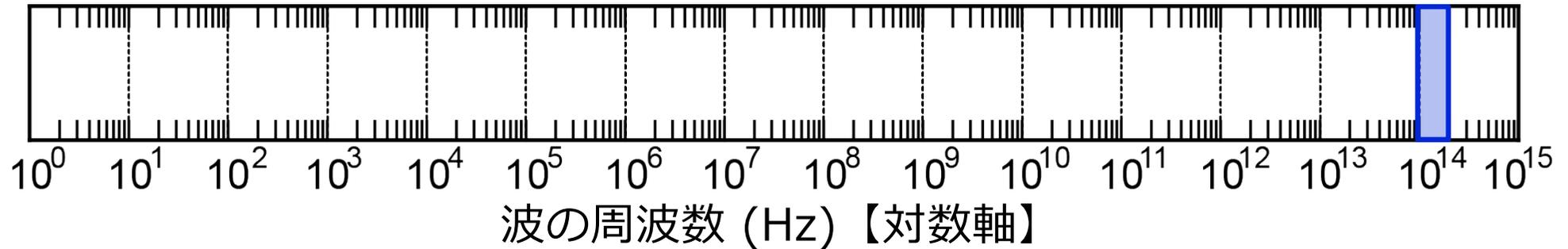


信号機の照明を利用した
路車間、車車間光無線通信

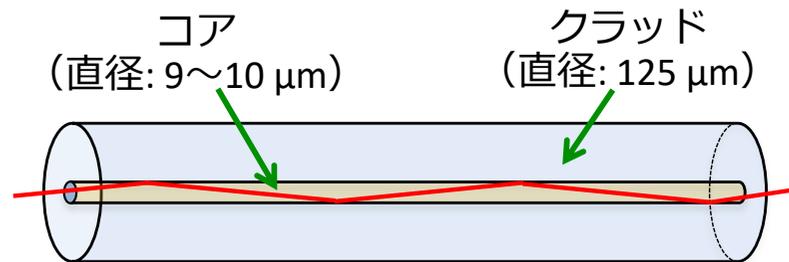
引用: <http://www.vlcc.net>

- LED点灯の高速応答性を活用し、信号伝送を行い通信システム

周波数帯：100～200 THz（波長：800～1700 nm）



▽ 光ファイバの構成



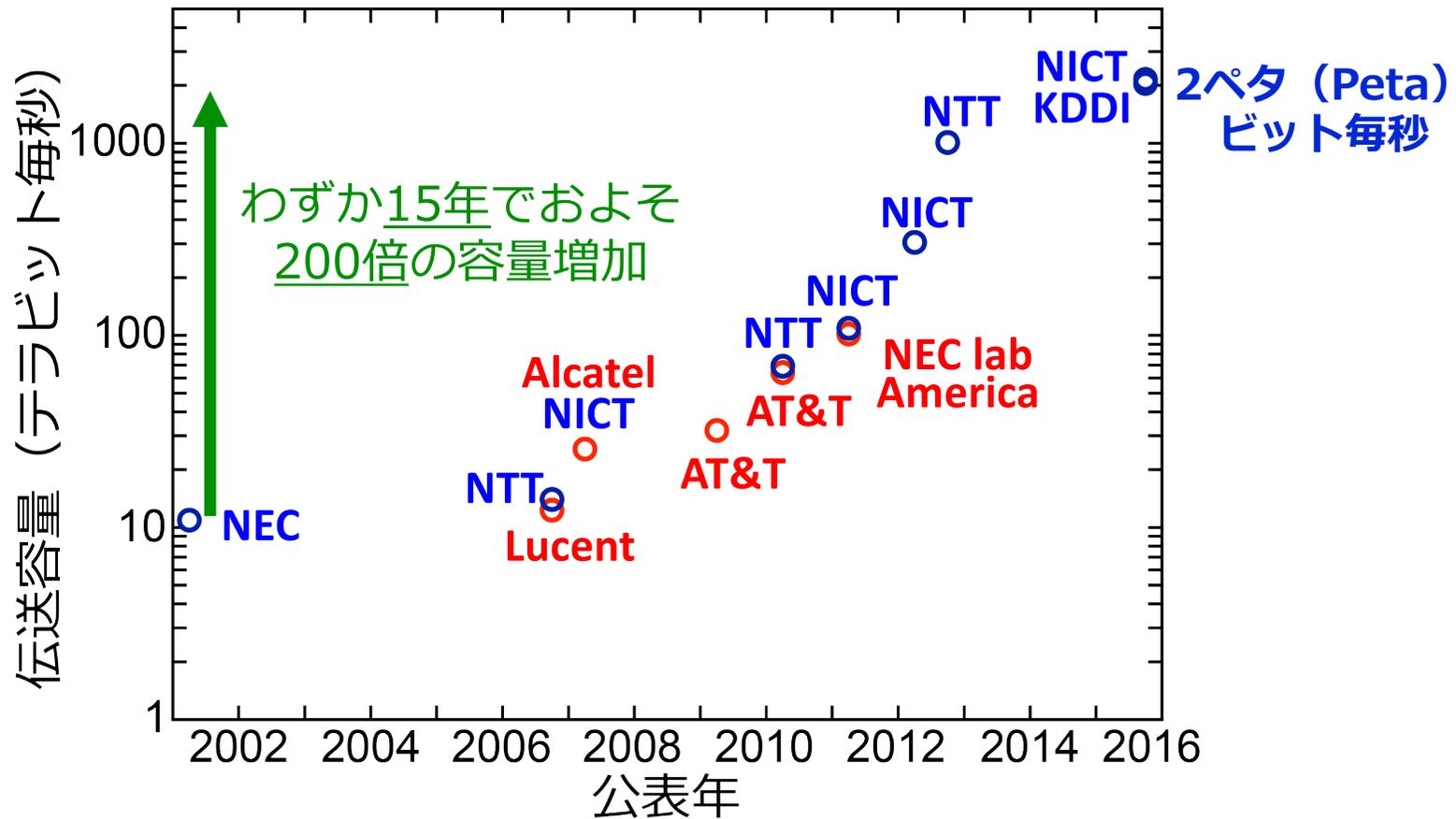
- ・クラッドより屈折率の高いコアを全反射することで光信号が伝搬
- ・純度を高めることで究極的に透明なガラスを使用
 - 高透過ガラス：0.41 dB/1 cm (約91%)
 - 光ファイバ：0.2 dB/km (約95.5%)

▽ レーザ光源

	LED	LD
スペクトル幅	広い	狭い
指向性	低い	高い
偏光	無し	直線偏光
変調速度	500 MHz	50 GHz

- ・LED (Light Emission Diode)
- ・LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
 - 共振条件を満たし、周波数や位相の揃った低雑音な光源

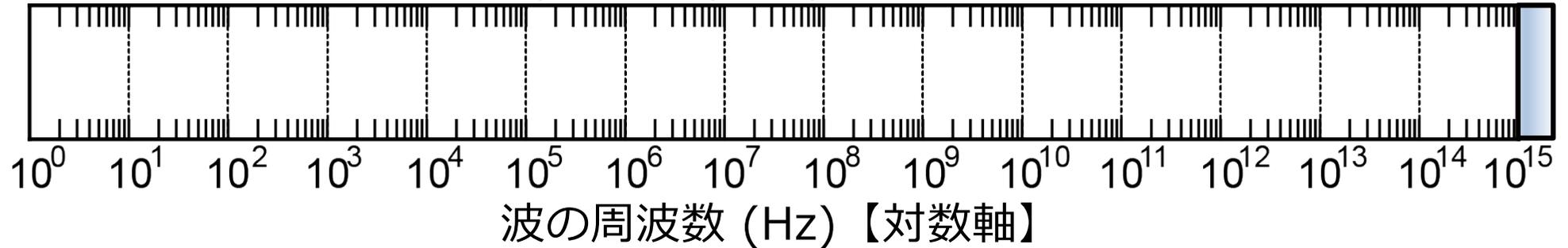
1本の光ファイバでどれだけの情報が送れる



- 最新の光ファイバ通信技術の全てを集結した研究開発競争
- 現行インターネット回線 (100 Mb/s) のおおよそ200万倍
- 2ペタビット毎秒はハイビジョン映画10,000本を1秒間で伝送
(Blu-ray 1層1枚分 : 25GB)

放射線【計測・エネルギー】

周波数帯 : 30,000~3,000,000 THz (波長 : 0.001~10 nm)



✓ X (エックス) 線

- 電磁波の一種. 1895年にレントゲンによって発見.
- 透過力が強く, 結晶による回折を利用して, 物質の構造解析に用いられる.
- 発生方法① : 陰極のフィラメントに電圧をかけて, 陽極の金属板に電子をぶつけて発生. 微弱.
- 発生方法② : 電子加速器によって発生. 装置が複雑で巨大.

✓ ガンマ線

- 電磁波の一種.
- 透過力が極めて強く, 原子や素粒子から放出される.
- 滅菌やがんの放射線治療等に利用されている.

他にベータ線, アルファ線なども

アウトライン

はじめに

講義情報から “波動と光” を学ぶ上での心構え

波とは？

波の本質と身近な波の現象

波を利用した技術

波の周波数から見る波を利用した技術

▼ まとめ

まとめ

✓ この講義について

この講義の内容, 進め方, 成績評価など

✓ 波とは？

これから波動と光を学ぶ上でのイントロダクション

✓ 周波数に依存する波の技術

自分で様々な波の技術を調べてみる