

Quoraオンライン講演会

電磁波と物理学・工学

~電磁波の発見が人類の文明を飛躍的に進展させた~

2022年 10月 15日

Yukinobu Tokieda



発表者: **Tokieda Yukinobu**

Quora活動: 2018年8月～

主に物理・数学部門で回答

Quoraトップライター 2019年・2020年・2021年

代表的な保有資格

技術士（電気電子部門） – Professional Engineer, Japan (Elec.)

第一級陸上無線技術士

プロダクションエンジニア（現 システムアーキテクト）

科学工業英語検定（TEP Test）1級

[1] 時枝幸伸, “MIMO方式を採用した船舶レーダの干渉除去,” 科学情報出版, 月刊EMC No.339, 2016.

[2] 時枝幸伸, 星将広, “ミリ波レーダを用いた物標識別の検討,” シーエムシー出版, 自動運転・う年支援の実現に向けたセンサ開発, ISBN 978-4-7813-1498-3, 2020.

1. 人類と電磁波の付き合い
2. 電磁放射の原理
3. 科学技術による電磁放射
4. 物体の熱による電磁放射
5. まとめ

1. 人類と電磁波の付き合い

[4]

電気との関わり

BC600 [ギリシア] タレス 静電気の発見

1600 [ドイツ] ゲーリケ 硫黄球の摩擦
起電器の発明

1745 [オランダ] ライデン大学 雷電ではない
ライデン瓶 (蓄電器) の発明

1776 [日本] 平賀源内 エレキテルの発明

1799 [イタリア] ボルタ 電池の発明

磁気との関わり

~BC1000 [ギリシア] 鉄にくっつく魔法の石
マグネシア地方 (→マグネット)

~AD100 [中国] 羅針盤 (方位磁石) の発明

1600 [英国] ギルバート 磁石論

電気・磁気の融合

1820 [デンマーク] エルステッド 電流と磁気の関係

1822 [フランス] アンペール 電流と磁石の法則 (電磁石の原理)

1831 [英国] ファラデー 電磁誘導の法則 (発電機の原理)

1864 [英国] マクスウェル 電磁気学の基本方程式 電磁波の存在を予言

1888 [ドイツ] ヘルツ 電磁波の存在を検証

光は電磁波の一種である

1897 [イタリア] マルコーニ 無線電信装置の発明

1900 [フランス] リエナール [ドイツ] ヴィーヘルト 運動する荷電粒子の電磁場

1920 [米国] ラジオ放送開始

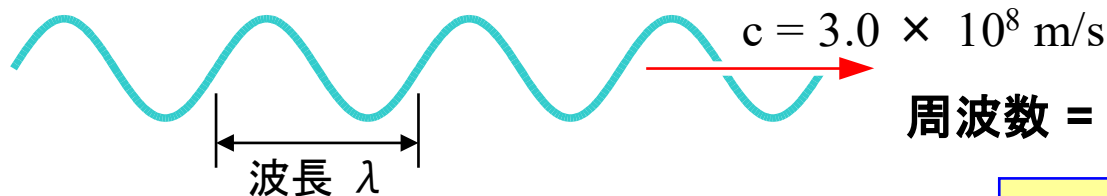
1935 [ドイツ] テレビ放送開始

人類が電磁波を操る時代へ

1. 人類と電磁波の付き合い

[5]

電磁波は 30万km/s で伝搬する。(1秒間に地球を7周半)



周波数 = 1秒間に通過する波の数

電磁波は周波数によって性質が異なる。
だから用途も異なる。

一般に光と呼んでいるのはココ

周波数	名称	波長・用途	
	ガンマ線 X線		
3×10^{18}			
3×10^{17}			
3×10^{16}	紫外線		
3×10^{15}		100nm	
3×10^{14}	可視光線		
3×10^{13}	赤外線		
3×10^{12}		0.1mm	
3THz			
300GHz	サブミリ波	1mm	
30GHz	ミリ波 (EHF)	1cm	近距離レーダ
3GHz	センチ波 (SHF)	10cm	電子レンジ・レーダ
300MHz	極超短波 (UHF)	1m	警察消防無線・テレビ放送
	超短波 (VHF)	10m	FM放送・テレビ放送
	短波 (HF)	100m	民間無線・トランシーバ
	中波 (MF)	1km	AM放送・アマチュア無線
	長波 (LF)	10km	海上無線
3000	超長波 (VLF)	100km	長距離通信

電波

周波数利用の代表例

用途	周波数
ラジオ放送 AM	500 ~ 1000kHz
FM	70 ~ 90MHz
テレビ放送 VHF	100 ~ 200MHz
UHF	450 ~ 600MHz
衛星通信	11 ~ 13GHz
GPS信号	1.6GHz
無線LAN	2.4GHz, 5GHz
5G通信	3.7GHz, 4.5GHz, 28GHz
車速度超過取締り	10GHz
自動車 衝突防止レーダ	24GHz, 76GHz
ボイジャー1号・2号	2.1GHz, 8.4GHz

大気圏上層 (電離層) で反射され
遠方 (水平線のかなた) に
回り込む。

高い周波数を使うと…

- ・多くの情報を伝送できる。
- ・直進性が高くなり,
山陰 (やまかげ) に回り込めない。
- ・高すぎると雨霧で減衰する。

2. 電磁放射のしくみ

[7]

電磁場 (電気と磁気) は
マクスウェルの方程式 にしたがう。

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

ガウスの法則: 電荷の周囲に
電場が発生する。

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}$$

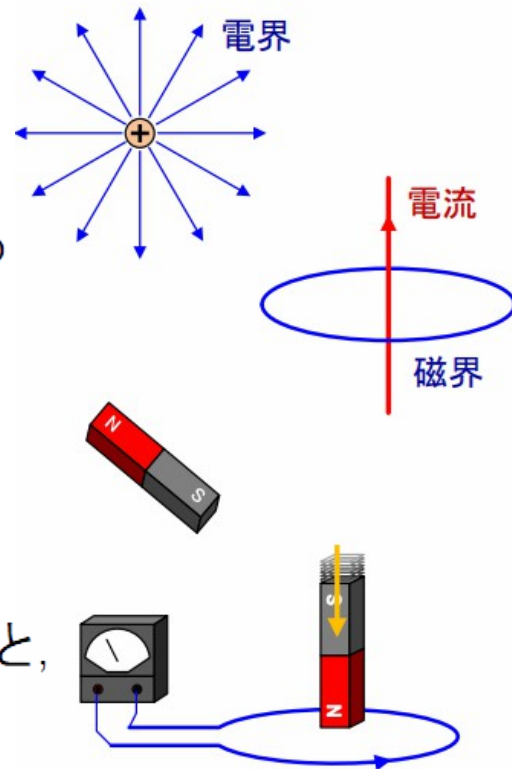
アンペールの法則: 電流を周回する
磁場が発生する。(電磁石の原理)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

ガウスの法則 (磁場): 単磁極は
存在しない。必ず, S と N がペアで
存在する。

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

ファラデーの法則: 磁場が変動すると,
変動を周回する起電力 (電場) が
発生する。(発電機の原理)



ウラ話: マクスウェルの法則はもともと9個の方程式。
後にヘビサイドが4つにまとめた。

2. 電磁放射のしくみ

[8]

マクスウェルの方程式からの数式変形によって
電磁波の存在 を予言。

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

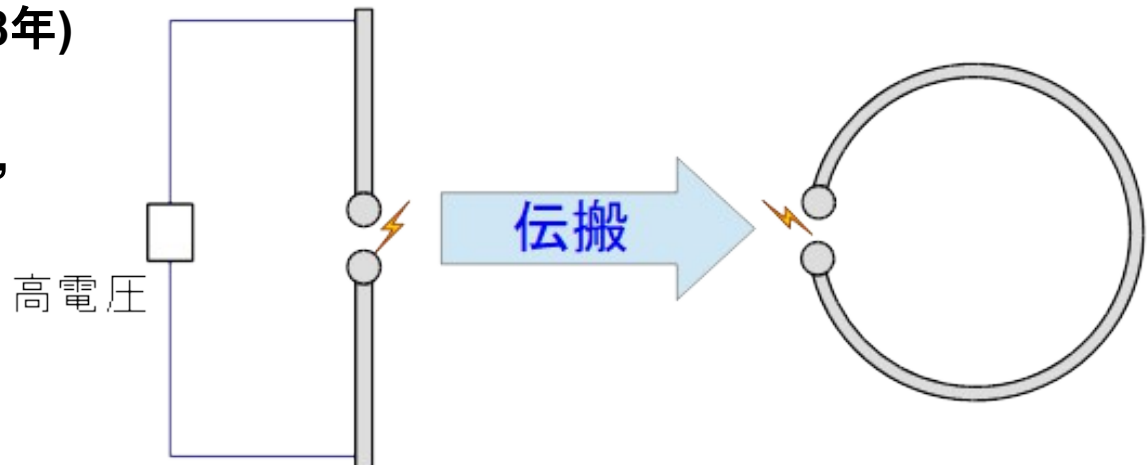
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2.99792548 \times 10^8 \text{ m/s}$$

電場や磁場は、約30万km/s で伝搬する。
「光は電磁場だったのか?!」 (マクスウェル)

ヘルツの実験 (1888年)

ギャップに高電圧を印加し、
火花を飛ばす。

離れて配置したギャップに
火花が飛んだ。



電磁作用の空間伝搬が検証された。(電磁波は存在した!)

→ 後に 火花式 無線電信機の発明につながる。

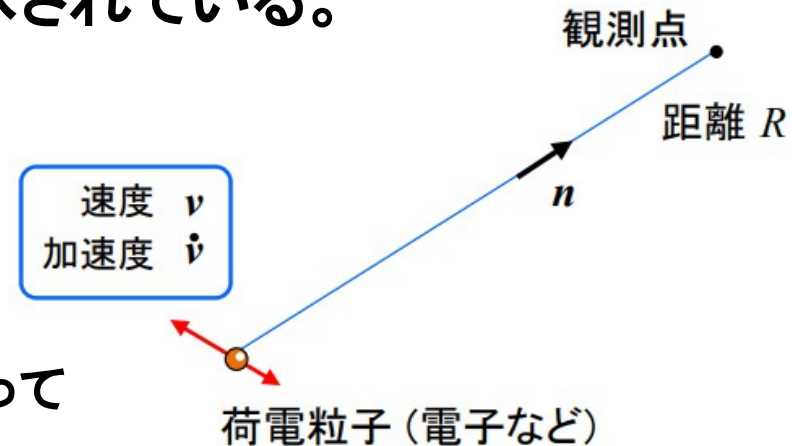
2. 電磁放射のしくみ

[9]

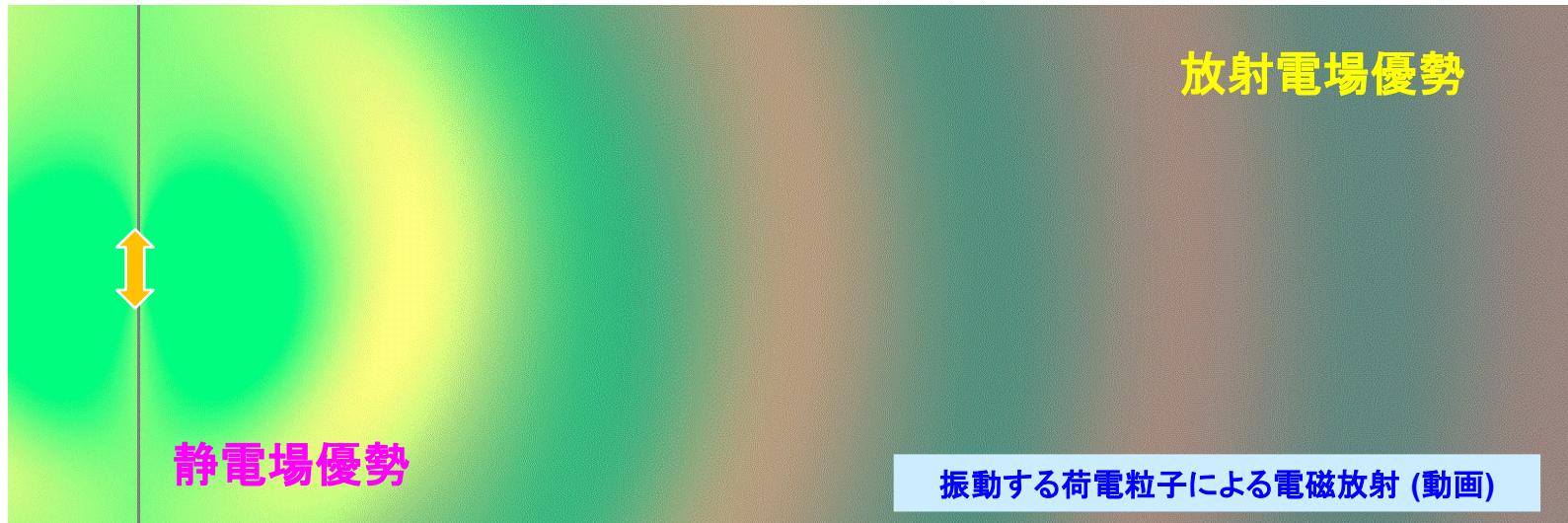
なぜ電磁波は放射されるのか？

波動方程式の解 にメカニズムが示されている。

$$E = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \left(\underbrace{\frac{n}{R^2}}_{\text{静電場}} + \underbrace{\frac{n \times (n \times \dot{v})}{c^2 R}}_{\text{放射電場}} \right)$$



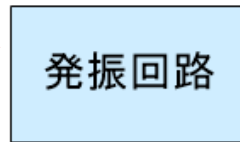
荷電粒子 (電子など) の**加速度運動**によって
電磁波が放射 される。



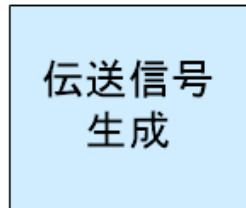
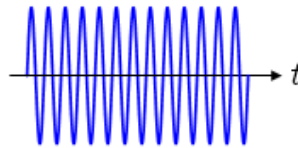
典型的な無線送信機の構成

搬送波の生成

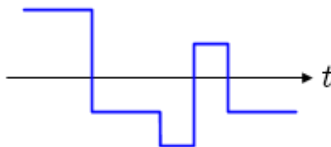
無線伝送に適した周波数の波形を生成する。
LC共振回路などを利用。



発振回路



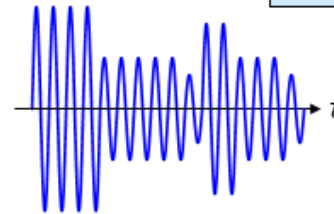
送信信号生成



送信信号の準備

伝送したい情報を電気信号に変換する。
音声: 数十kHz
画像・映像: 数MHz

変調回路

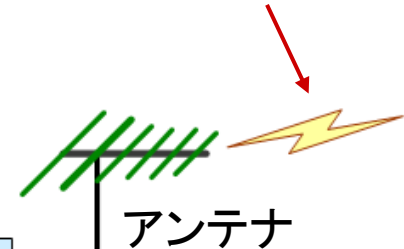


搬送波に情報を載せる

振幅変調, 周波数変調, 位相変調など 用途に応じて情報を載せる。

無線伝送

アンテナか高周波電流がアンテナに流れるので, 電磁波が空間に放射される。



アンテナ

伝送の最終準備

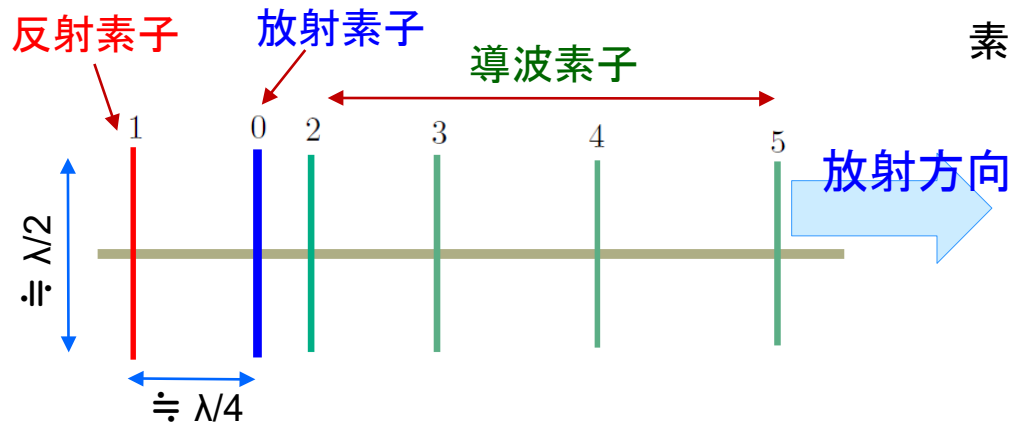
空間に伝搬できる程度まで電力レベルを増幅する。

受信機は送信機と逆の操作をする装置。本講義では説明省略。

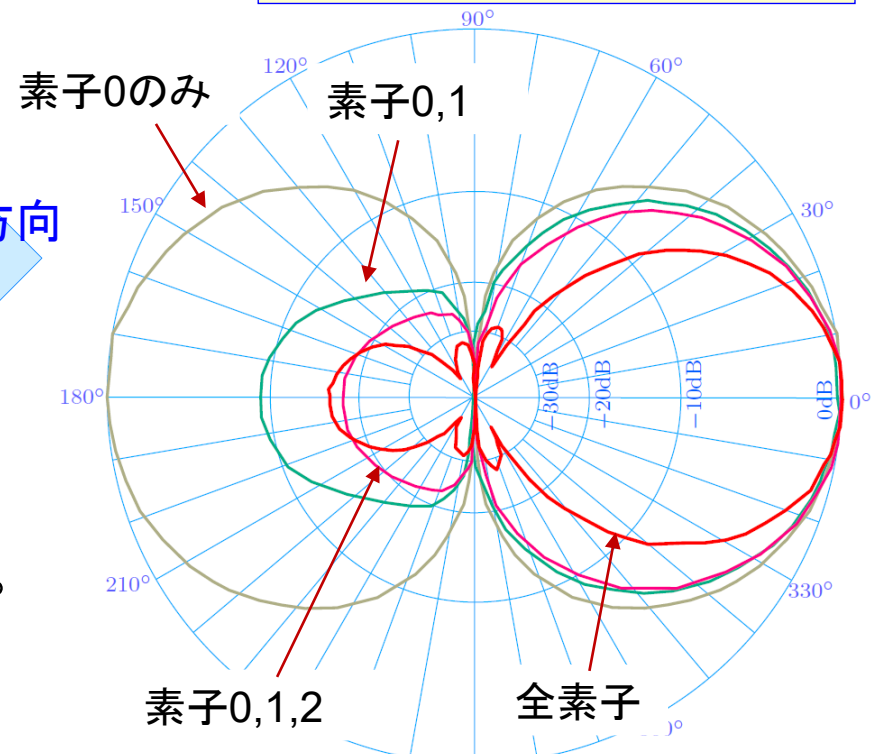
3. 科学技術による電磁放射

八木・宇田アンテナ

1926年に日本で発明され、現在も使われて続けているアンテナ。
基本形は半波長ダイポールアンテナ。
複数素子で指向性をつくる。



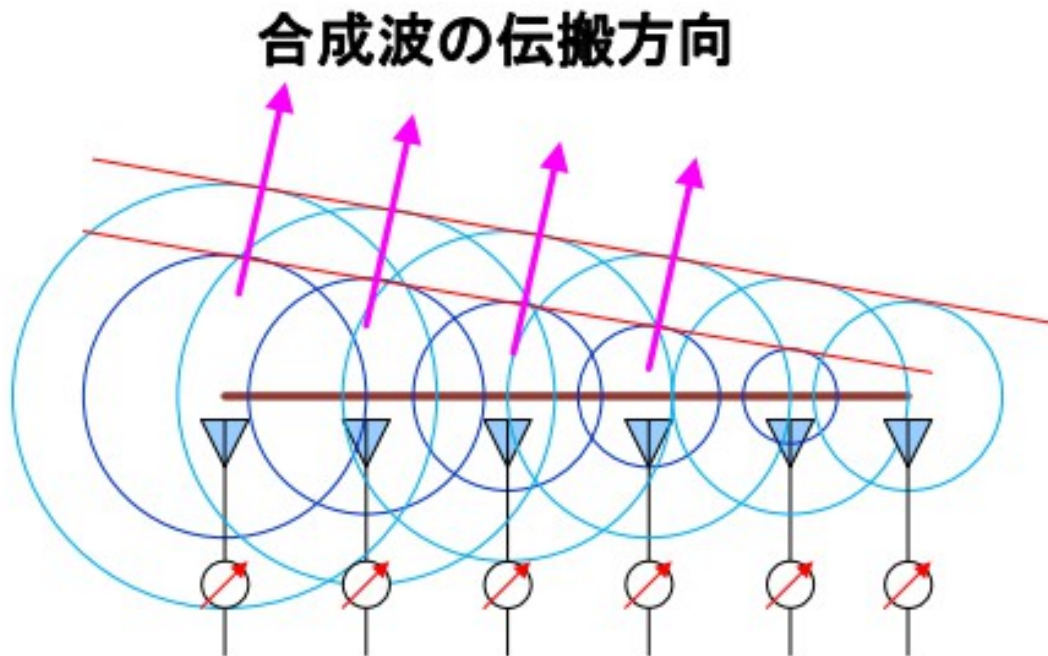
反射素子 で放射方向にビームを向ける。
導波素子 を重ね、
ビームを絞り利得を上げる。



八木・宇田アンテナの指向性

アンテナ技術

複数放射器を利用した放射方向の制御。
各放射器の位相を設定すれば任意方向への
電磁波放射が可能。



ホイヘンスの原理 を
利用した技術

超高級なアンテナでは、
放射方向を
動的に切り替えることができる。
(Active Phased Array)

電磁波を放射する放射源の列

3. 科学技術による電磁波放射

[13]

テレビ放送の電波の強さ

日本テレビ 545MHz

送信所 東京スカイツリー

送信出力 10kW

アンテナ利得 19dBi *

* <https://www.hcnet.co.jp/solution/broadcast/bcasttower.html>
に記載のビーム幅情報等から推測

三鷹市で受信した場合

距離 22.9km

電力密度 0.00012 W/m^2
($= 120 \text{ } \mu\text{W/m}^2$)

テレビアンテナでの受信強度

アンテナ利得 9dBi (マスプロ電工を参考)

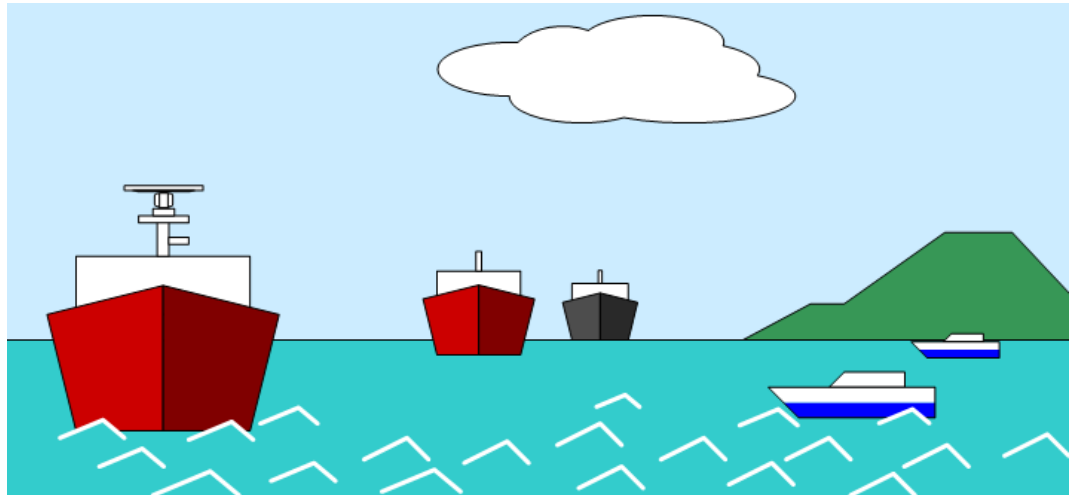
受信電力 0.000023 W ($= 23 \text{ } \mu\text{W}$)

無線機が受信する信号の強度は弱い。
送信エネルギーはほとんど空間に逃げる。



船舶用レーダ

送信パルス 30kW
周波数 9.41GHz
(波長 3.2cm)
アンテナ利得 30dBi
(エネルギーを1000倍濃度で絞り
鋭いビームを放射)



距離 3海里 (5600m) の大型貨物船を見た場合

受信電力 $0.8 \mu W$ (送信パルスの300億分の1)

漁船のような小型船舶は $1 \mu W$ の1万分の1...

最小受信レベルは $1 \mu W$ の1000万分の1程度

レーダの受信信号の強度は著しく弱い。

往復で電波が拡散するので、距離の4乗で信号が減衰する。

高利得アンテナ, 低雑音受信機, 信号処理による雑音抑圧が重要。

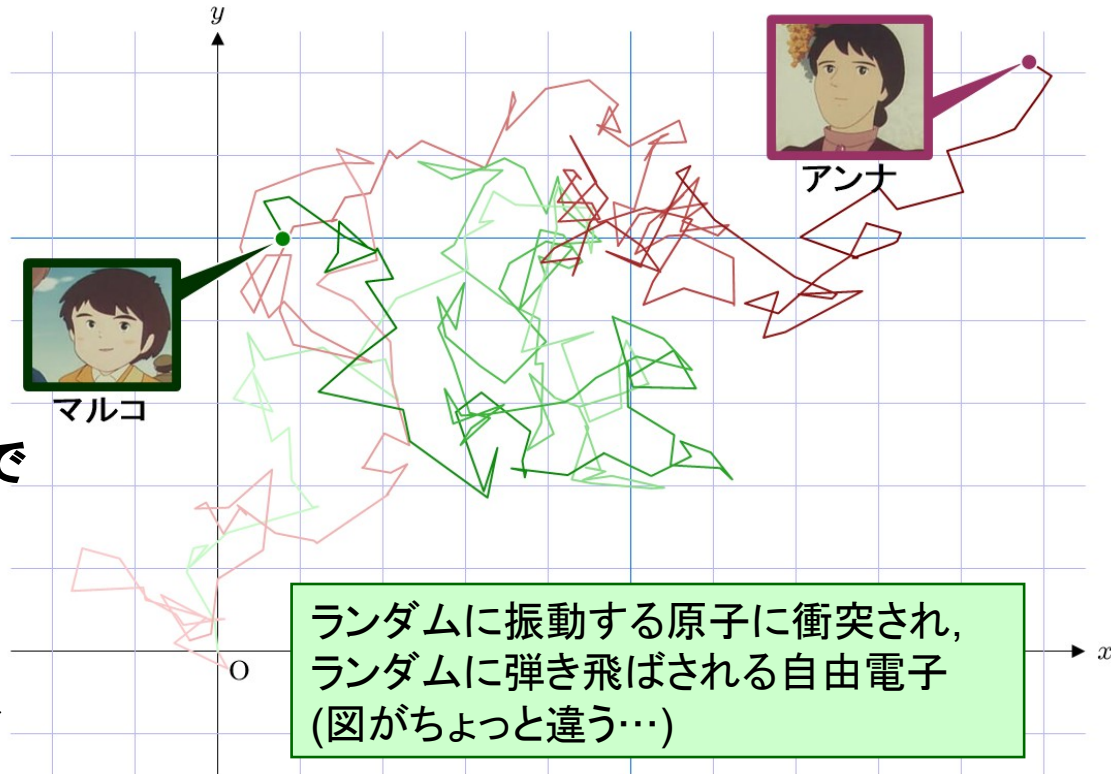
4. 物体の熱による電磁波放射

[15]

あらゆる物体は
自然の状態で
電磁波を放射している。

物体は原子で構成されている。
原子は電子核と電子(荷電粒子)で
構成されている。

原子は熱振動する。
荷電粒子の振動 (加速度運動) で
電磁波が放射される。



黒体放射理論 が物体の電磁波放射を定式化した。

そもそものモチベーションは、製鉄所の熟練工のワザを
共有財産としてノウハウ化することだった。

結果として、**20世紀の物理学を大躍進** させた。

4. 物体の熱による電磁波放射

[16]

プランクの共振子

熱の伝導

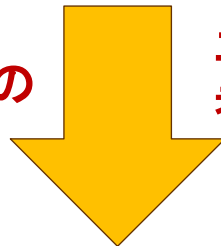
$$m\ddot{z} + 2m\rho\dot{z} + m\omega_0^2 z = F_z$$

電磁放射による
ブレーキ

分子間力

エネルギー分布の
考察

エントロピーの
考察



電磁放射 によって
外部へ 熱が放射 され、
内部の 熱が冷める。

熱が冷めるのは
電磁気現象だった。

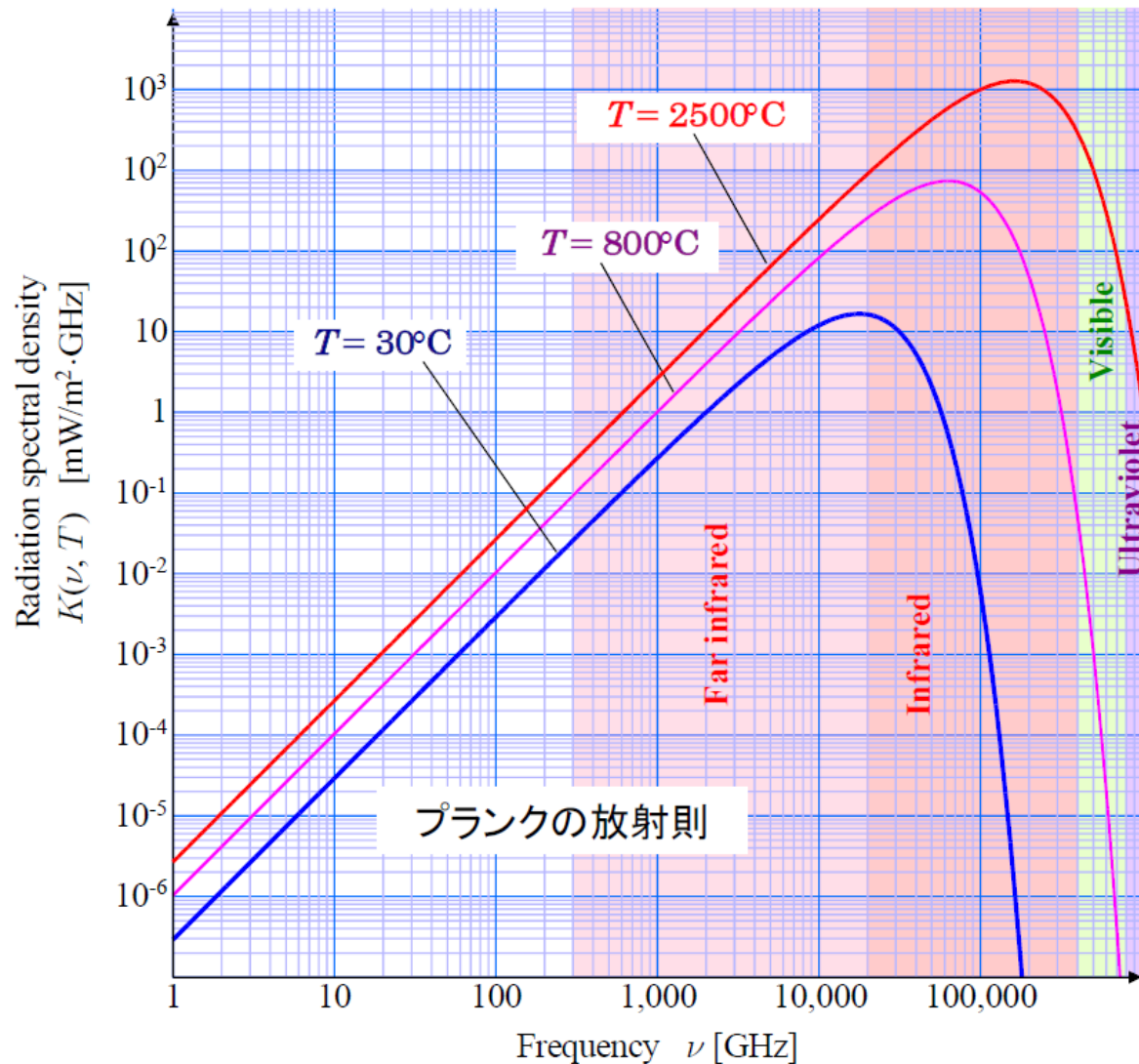
プランクの放射法則

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

温度に依存するが、
放射される電磁波のエネルギーは、
さまざまな周波数にわたって
分散している。

4. 物体の熱による電磁波放射

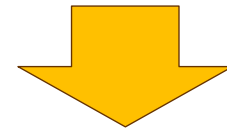
[17]



電球が輝く理由

白熱電球のフィラメントは
2500°Cまで加熱

可視光 (Visible) 領域の
スペクトル強度が
見える程度まで大きくなる。



光が見える。

体温程度でも電磁放射が
発生しているが, 可視光の
スペクトルが見えないくらい
小さい。

4. 物体の熱による電磁波放射

[18]

ステファン・ボルツマンの法則

単位面積から単位時間あたりに放射されるエネルギーは絶対温度の4乗に比例する。

$$K = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} T^4$$

比例係数 = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$

例題: 太陽の表面温度を推定する。

地球近傍 (宇宙空間) での太陽照射強度

太陽を中心とする半径1天文単位の球殻の面積

太陽から単位時間あたりに放射されるエネルギー

太陽の表面積

太陽表面の単位面積から

単位時間あたりに放射されるエネルギー

1370 W/m^2

$2.81 \times 10^{23} \text{ m}^2$

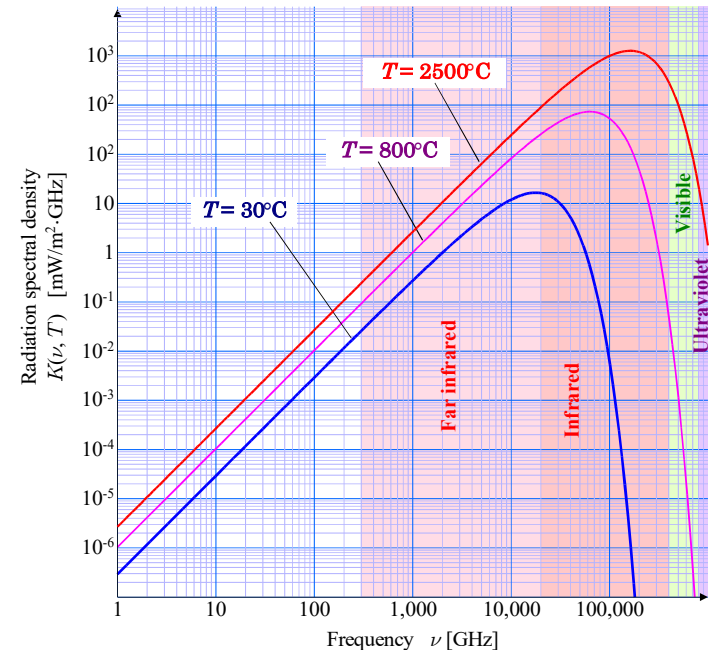
$3.85 \times 10^{28} \text{ W}$

$5.98 \times 10^{18} \text{ m}^2$

$6.44 \times 10^7 \text{ W/m}^2$

ステファンボルツマンの法則に基づいて計算:

$$(6.44 \times 10^7 \div 5.67 \times 10^{-8})^{-1/4} = \underline{\underline{5800 \text{ K}}}$$



4. 物体の熱による電磁波放射

[19]

太陽系の惑星表面の温度も推定してみた。

惑星	軌道長半径 [au]	反射能	黒体放射温度 [°C]
水星	0.387	0.11	342
金星	0.723	0.75	55
地球	1.000	0.37	78
火星	1.524	0.15	34
木星	5.203	0.52	−129
土星	9.537	0.47	−164
天王星	19.189	0.51	−198
海王星	30.070	0.41	−210
月	1.000	0.07	114

上記の地球の表面温度は、真夏のアスファルト表面と考えるとよい。

4. 物体の熱による電磁波放射

[20]

炎天下の車内の温度

外気温 35°C でフロントガラスから日光を浴びたとき、
車内の温度はどれくらいになるか？

太陽照射強度	800 W/m^2
車体の底面積	6 m^2
車体の側面積+上面積	17 m^2
そのうちフロントガラス	1 m^2

太陽照射の吸収率

フロントガラスから	85%
それ以外の側面・上面	25%
底面から	0%

周囲温度の影響

車体のすべての表面から
 35°C 相当の熱放射を受ける。

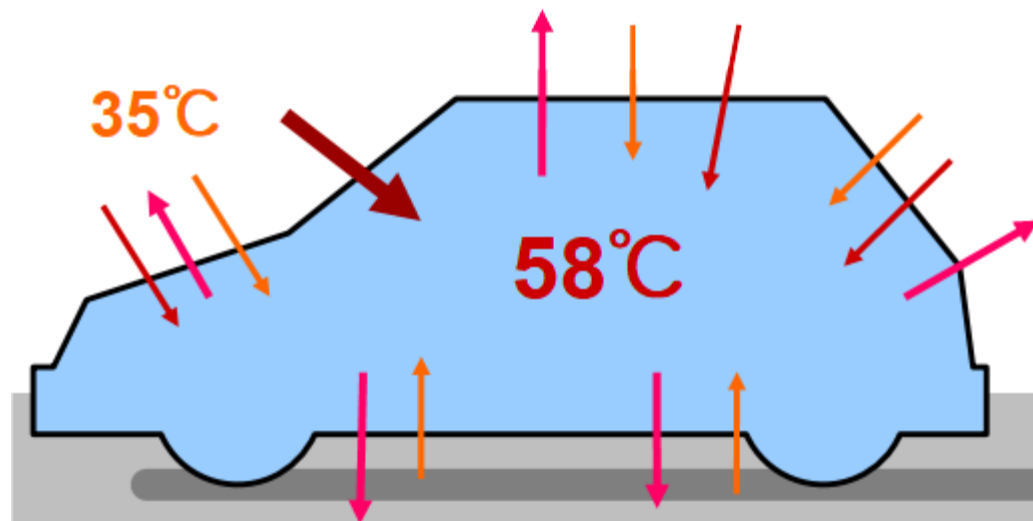
車体からの熱放射

車体全体が同じ温度で平衡状態。
巢の本土に相当する電磁放射が発生。

車体からの熱放射量

$$\begin{aligned} &= 0.68 \text{ kW} + 3.20 \text{ kW} + 11.76 \text{ kW} \\ &= 15.64 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\text{放射密度} = 679 \text{ W/m}^2 \rightarrow 58^{\circ}\text{C}$$



電磁波は学問の中で存在がわかり, その後に実証された。
その存在がわかると, 学問や科学技術が飛躍的に進展した。

電磁気学の成果	派生した学問	技術発展
電磁波の存在	無線工学	無線通信技術
	放射線工学	放射線医療・工業CT
	黒体放射	熱設計
	↳ 量子力学	半導体技術
電磁波の伝搬速度	相対性理論	GPS
	↳ 天文学	観測技術・信号処理技術

新たな現象発見は, 偶然の産物では得られないところまで
学問は進んできた。物理学や技術の積み重ねで, 新たな発見
を予言することは, 物事を追求する楽しみにつながる。
そのような変化をもたらした人類の英知は偉大である。

ご静聴 ありがとうございました。
物理・数学解説サイトを運営しています。
ご興味がありましたら訪問ください。



数理の楽しみ

<http://www.wannyan.net/scidog/>

