

# 視覚(物理現象)から学ぶ電磁気学

AMPLET Communication Laboratory

**Dr. NEBIYA Hideyuki**

AMPLET Communication Laboratory

Human Body Communication  
Millimeter Wave Radar  
Small Antenna  
RF Circuit  
RFID

President and C.E.O., AMPLET Communication Laboratory  
Special Lecturer, Graduate School, Nihon University  
Part-time Lecturer, Industrial Technology, Nihon University  
Amateur 1st Class Radio Operator, JE1BQE, JA9QZH, JD1B00  
QRV from DL/JE1BQE HL3ZCG KK6RT/KH0 W6/JE1BQE  
Inventor of the Spiral Ring Antenna



第9回 先端科学技術特論

担当 根日屋 英之

2024年6月13日 5時限

# 目次

はじめに

1. オームの法則と電磁気学の関係
2. 電界と磁界
  - 2-1. 磁界って何？
  - 2-2. 電界って何？
3. 物理現象と数式を結びつける
4. Maxwell の方程式を理解していただきます
5. 伝送路  $\doteq$  or  $\neq$  アンテナ
6. イメージ(映像)って何？
  - 6-1. 何故、グラウンドがあるとイメージアンテナができてしまうのか
  - 6-2. グラウンド、金属板があるときはアンテナは半分でよい
7. 雑音対策は目で見ればわかる



はじめに

# 根日屋英之の職業・研究経歴

AMPLET Communication Laboratory

1980年4月 ~ NISSAN MOTOR CORPORATION



1981年4月 ~



**Institute of Industrial Science,  
the University of Tokyo**

東京大学生産技術研究所

1983年5月 ~

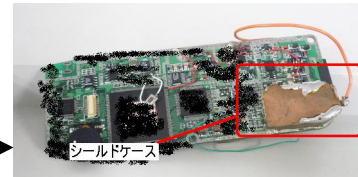
**HITACHI**  
Inspire the Next



1987年9月 ~

President of

**AMPLET**



The World's First cdmaOne (IS-95) Cellular Telephone  
(1996 in Korea)

2016年4月 ~

Director of

**AMPLET Communication Laboratory**

→ **HBC or Something New ?!**

研究と講義(教員)



2002年 ~ 2017年



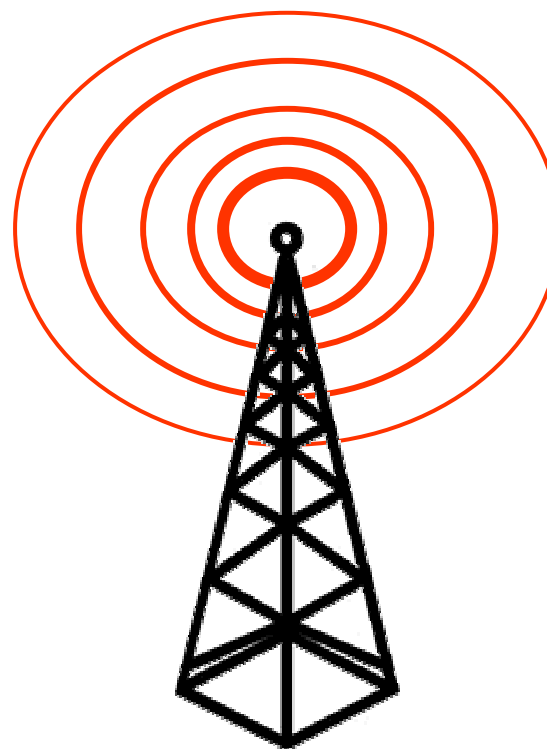
2011年 ~ 2017年



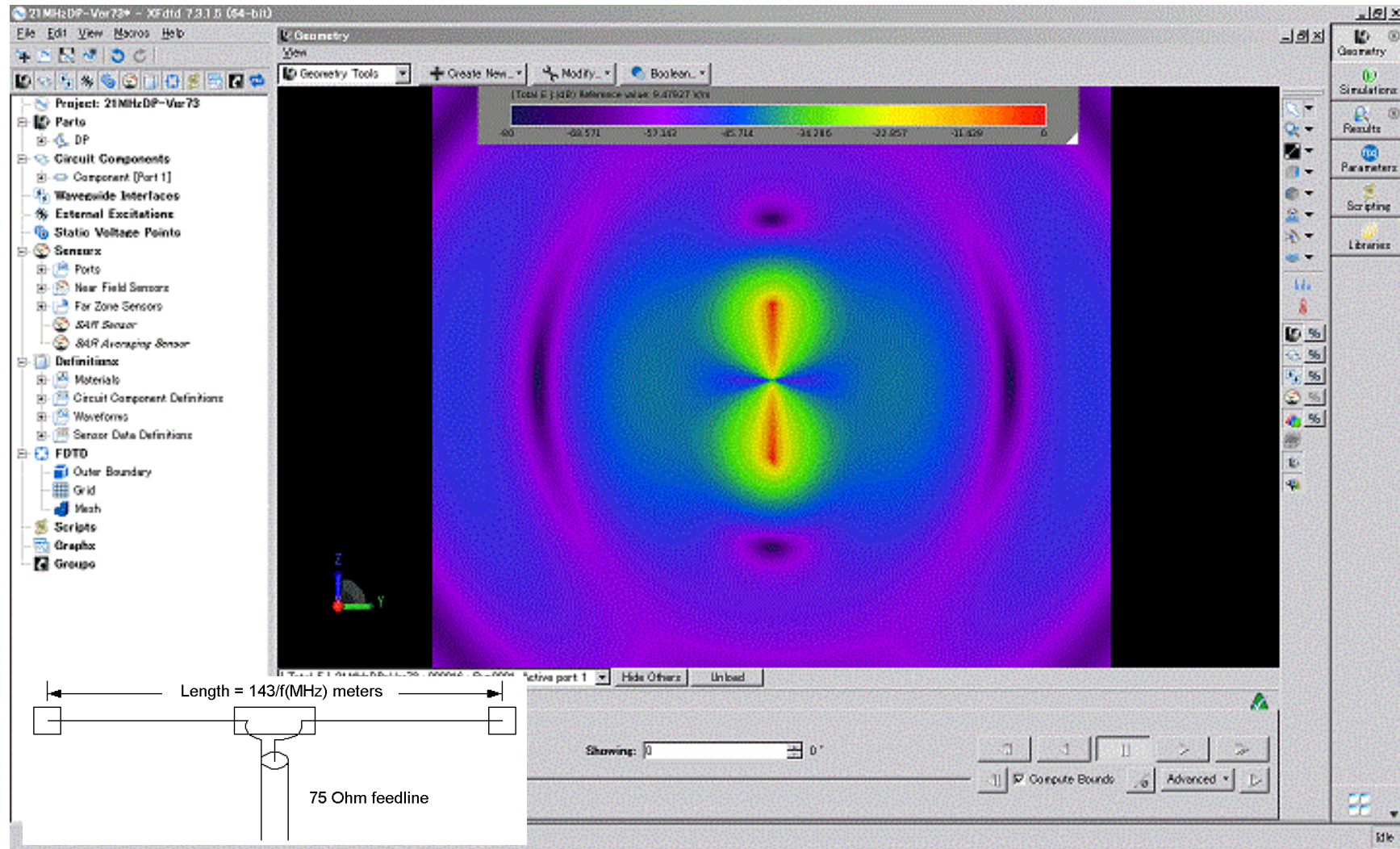
2015年 ~

2024年6月13日 5時限

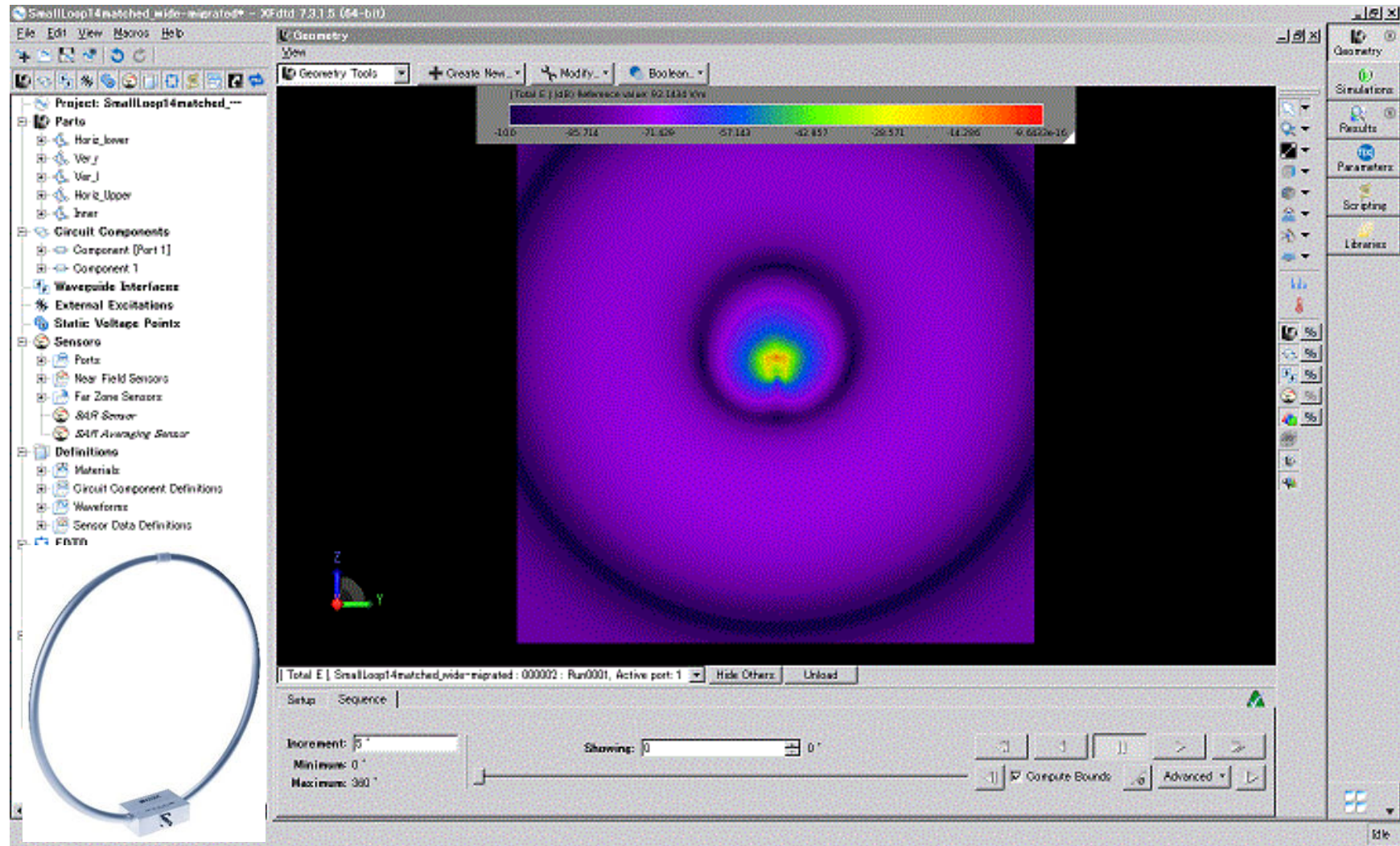
# 電波の放射はどちらか？



# ダイポールアンテナからの放射



# ループアンテナからの放射



# 1. オームの法則と電磁気学の関係



# 電磁気学もオームの法則で解けるのか？

# 直流回路のオームの法則 : $V = I \cdot R$ と $W = V \cdot I$

$$\text{電圧 (V)} = \text{電流 (I)} \times \text{抵抗 (R)}$$

$$\text{電力 (W)} = \text{電圧 (V)} \times \text{電流 (I)}$$

$$= \text{電圧 (V)}^2 \div \text{抵抗 (R)}$$

$$= \text{電流 (I)}^2 \times \text{抵抗 (R)}$$

# 電磁気学もオームの法則でできるのか？

できる！

球面において、各部の電力密度  $P_d$  [W/m<sup>2</sup>] を全球面で積分すると放射源の電力と等しくなる。電界強度を  $E$ 、磁界を  $H$ 、自由空間のインピーダンスを  $377$  ( $\doteq 120\pi$ ) [ $\Omega$ ] とすると、 $E=377H$  なので、

$$P_d = EH = \frac{E^2}{377} = 377H^2 \quad \longleftrightarrow$$

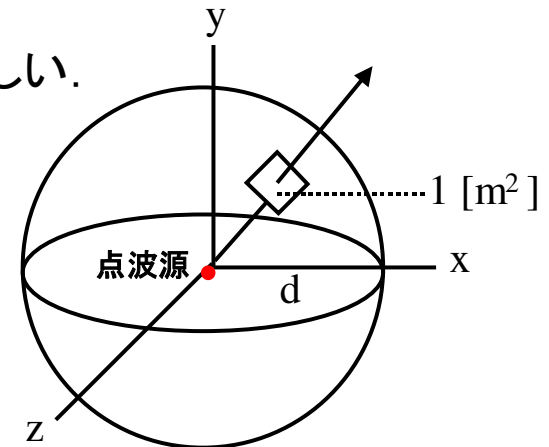
オームの法則

$$P = VI = \frac{V^2}{R} = RI^2$$

となる。等方性アンテナ(点波源)は、 $P_d$  はどの点でも等しい。ここで、半径= $r$ の球では、その表面積 $S$ は  $4\pi r^2$  なので、

$$P = 4\pi r^2 P_d$$

となる。



# 蛇足

空間インピーダンス  $\eta = 376.730314$  が正しくて、 $120\pi$  は近似値.

それを知る学生も大人も少なく、逆と思っている人が多い.

わずかに  $0.69/1000$  の違いであるが、私も学校で習った記憶が無い.

蛇足:

光速  $c = 299,792,458$  [m/s] で、人間が透磁率  $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  と決めた.

$c = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$  より、誘電率  $\varepsilon = 1/(\mu c^2) = 8.85418782 \times 10^{-12}$  なので、

$\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon} = 376.730314$  [ $\Omega$ ] (あるいは  $\eta = \mu c$ ) と半端な数となる.

\* 時間も長さも、単位を人間が勝手に決めた.  $\mu$  だけは数学の美を持たせたけれど、手遅れでした.

## 2. 電界と磁界

# 「界」とは何か？

目に見えない不思議な力が存在する空間を



カイ

「界」

という.



## 2-1. 磁界って何？

# 磁石の力・・・磁界(磁場)

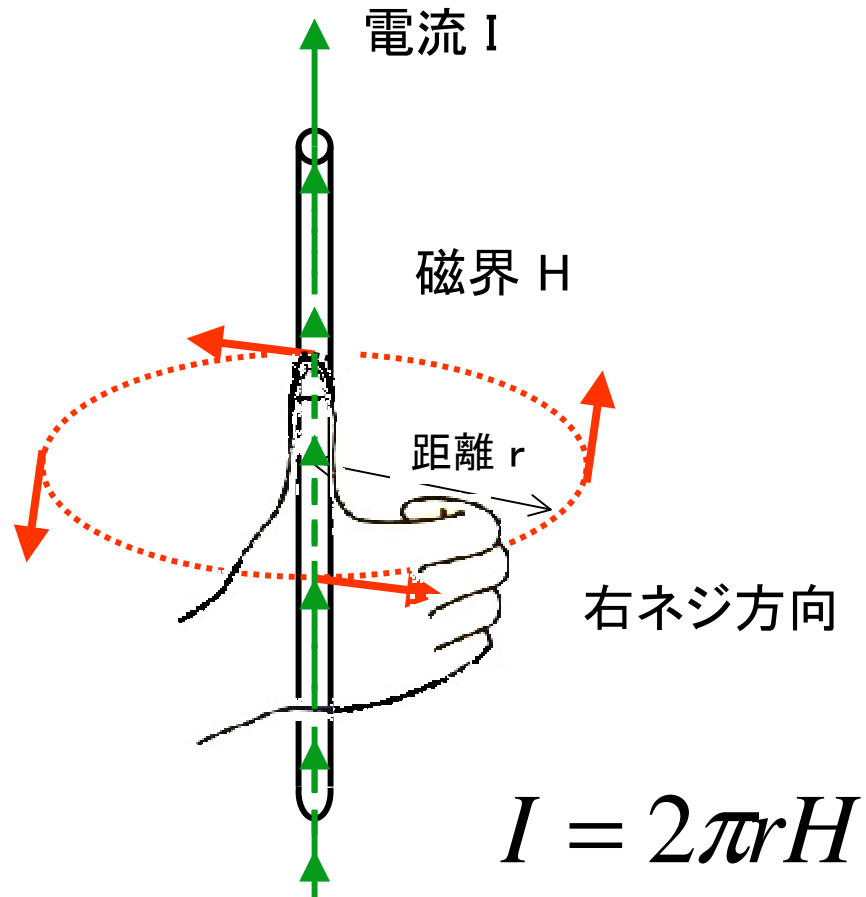


磁石はS 極とS 極,あるいはN 極とN 極は反発し, S 極とN 極は引き合う. このとき目に見えない力が発生している.

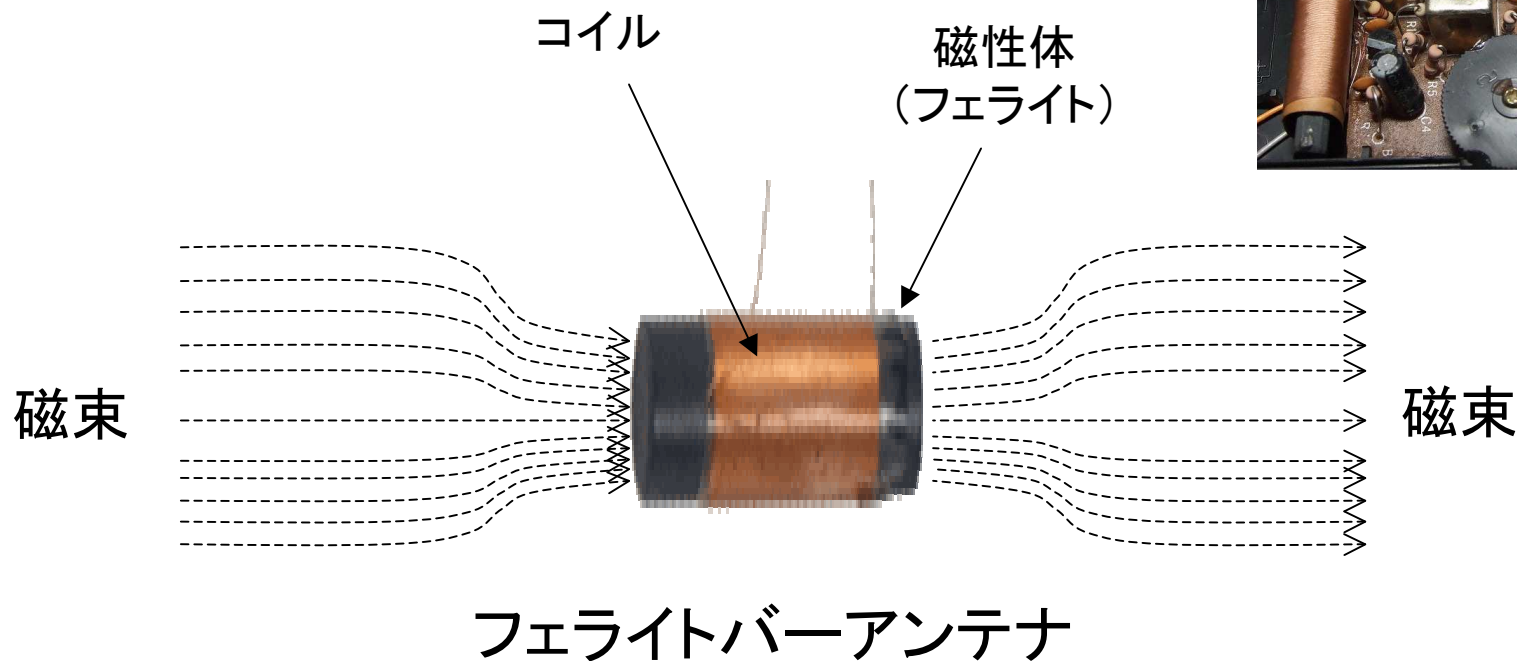
この力が存在している場所のことを, **磁場**とか**磁界**という.



# アンペールの法則



# 磁性体をアンテナに用いる



磁性体を用いるとアンテナのインダクタンス(コイルの巻き数)が増えたように見える

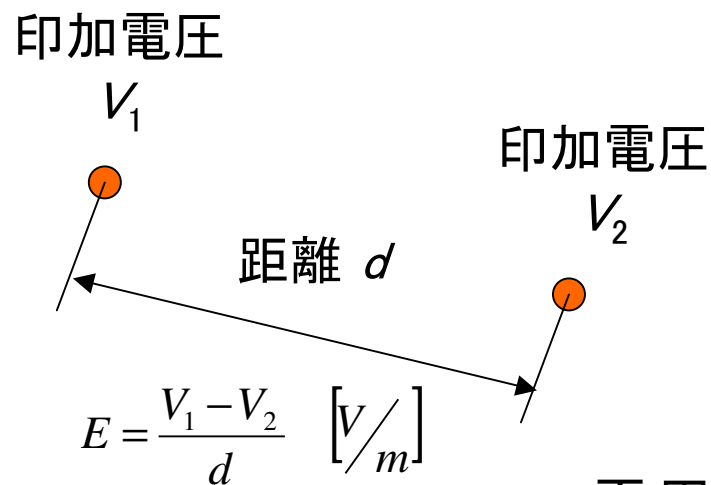
## 2-2. 電界って何？

# 静電気の力



子供の頃に、静電気を使って、こんな遊びをしたことはありませんか？

# 電界の発生

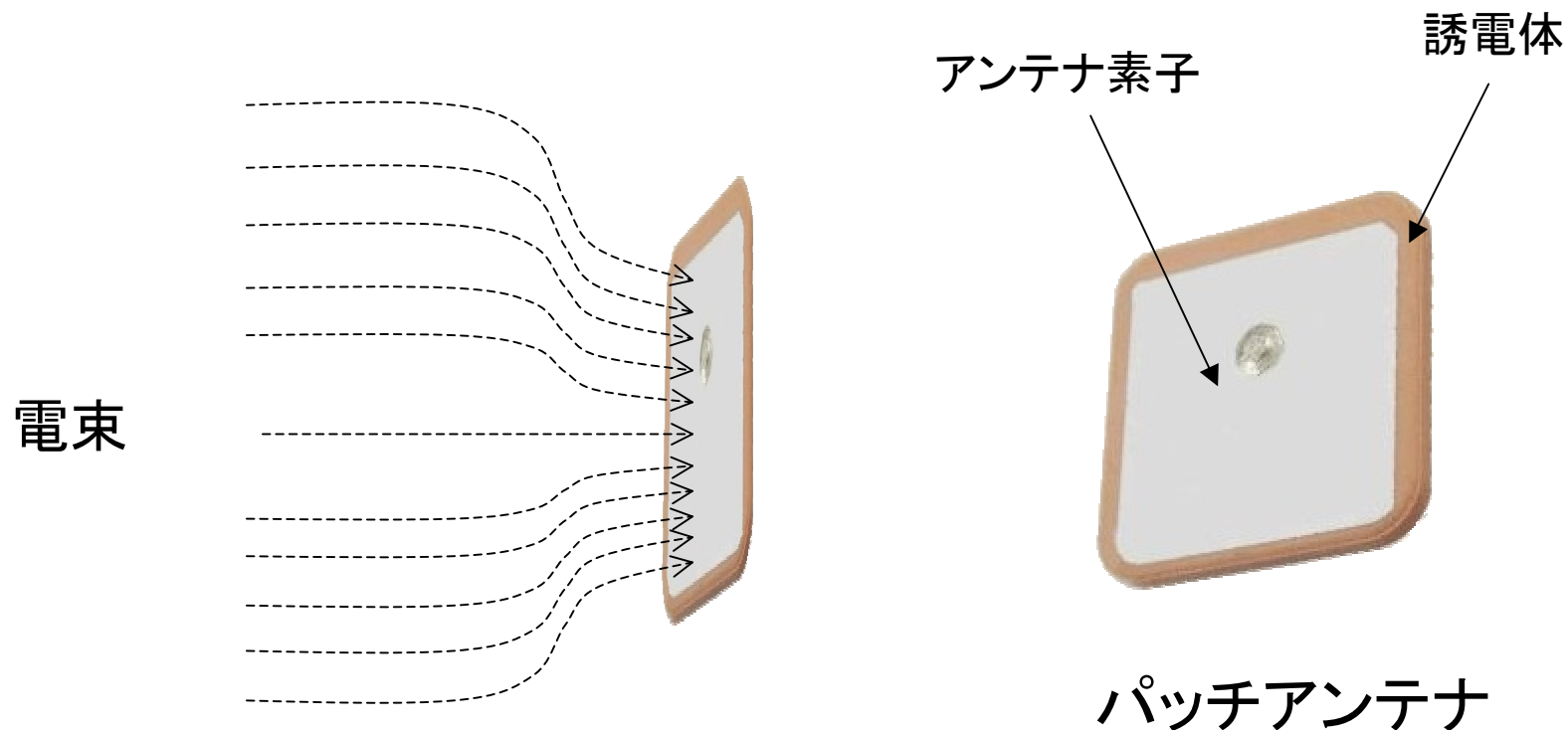


## 電界の定義

2点間の電位差を、その2点の距離で割った値

$$\text{電界強度 } E = \frac{V_1 - V_2}{d} \quad [V/m]$$

# 誘電体をアンテナに用いる

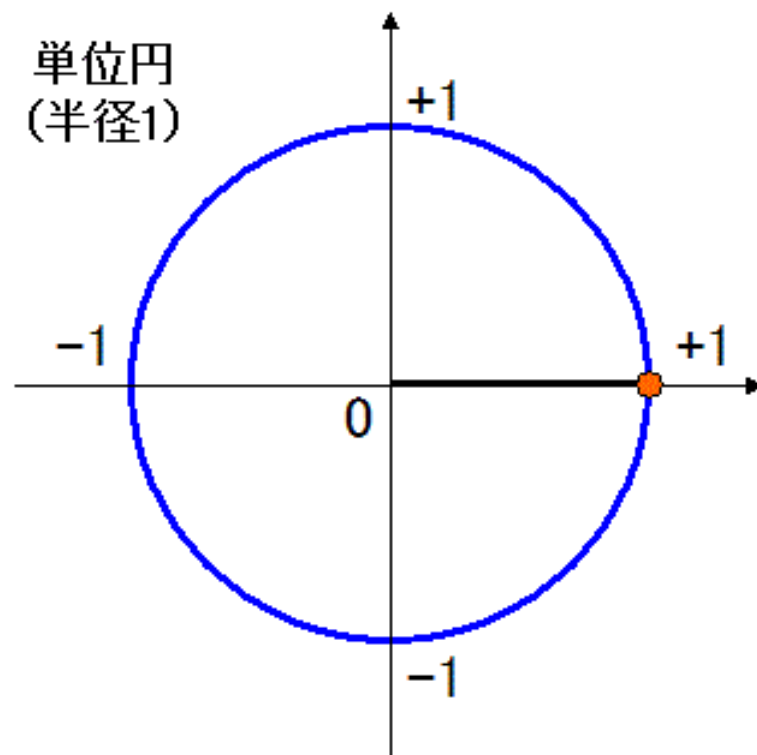


誘電体を用いるとアンテナは小形化できる

### 3. 物理現象と数式を結びつける

# 数学と物理現象を結びつけるもの

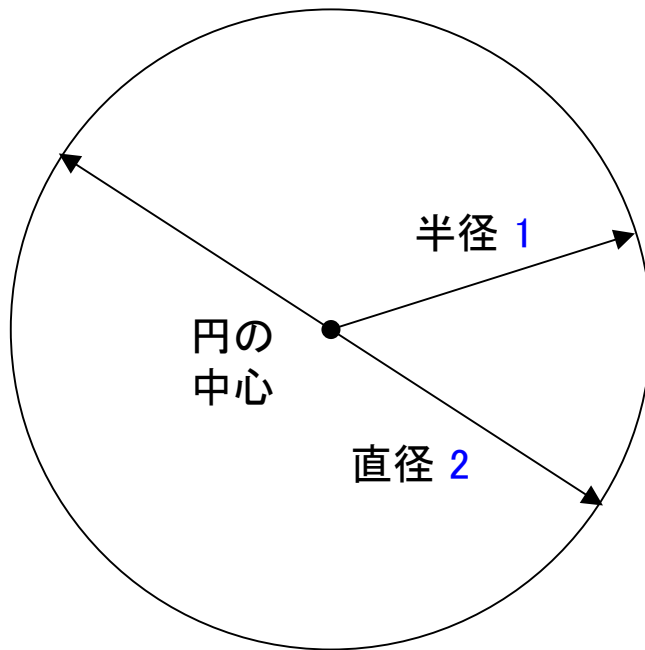
→ それは半径1の単位円





# 全ての基本は半径「1」の円(単位円)から始まる

## 単位円



円周の長さ  $2\pi$

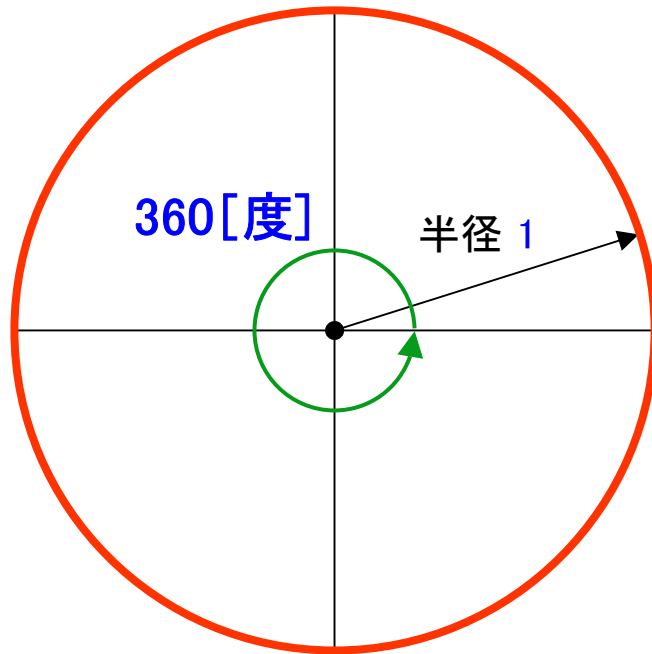
## 半径 1 の円(単位円)において

$$\begin{aligned}\Rightarrow \text{直径は} & \text{半径} \times 2 \\ & = 1 \times 2 \\ & = 2\end{aligned}$$

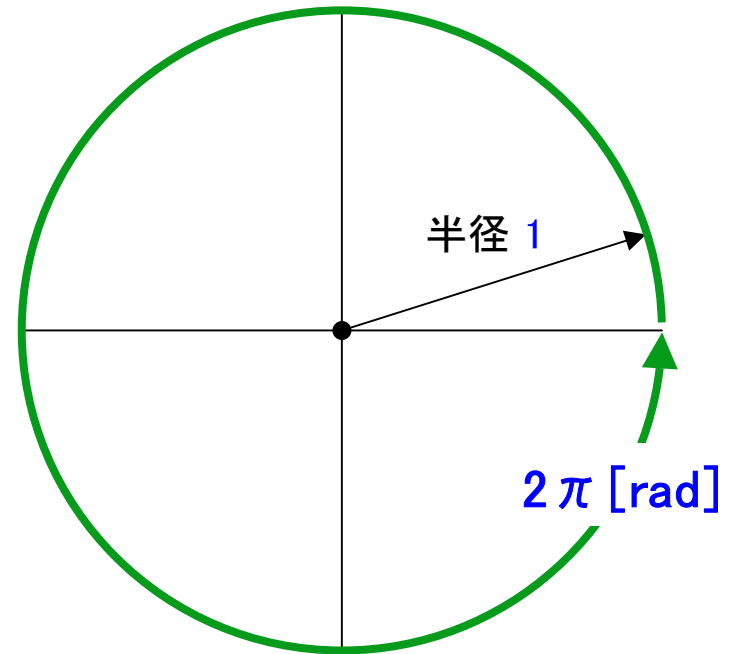
$$\begin{aligned}\Rightarrow \text{円周の長さは} & \text{直径} \times \text{円周率} \\ & = 2 \times \pi \\ & = 2 \times 3.14\end{aligned}$$

# 数学屋さんと物理屋さんが共通認識を持つには・・・

単位円

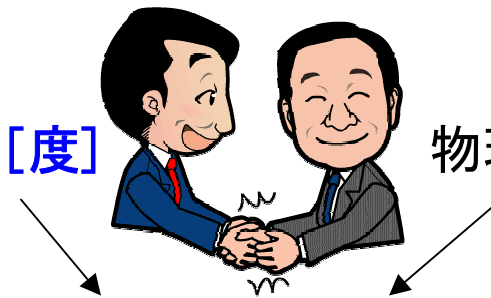


単位円



数学屋さんの1周は 360[度]

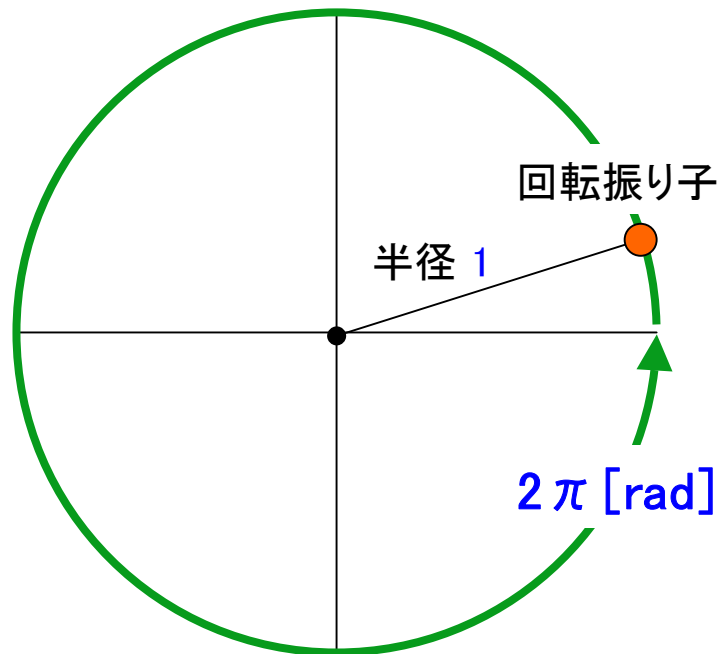
物理屋さんの1周は  $2\pi$  [rad]



$$360[\text{度}] = 2\pi [\text{rad}]$$

# 周波数 $f$ と角速度 $\omega$

## 単位円



1周は  $2\pi$  [rad]

### 回転振り子を考える.

1秒間に回転振り子が  $f$  周回転すると

その回転振り子が動いた距離  $\omega$  は

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi (1\text{周の長さ}) \times f (\text{回転}) \\ &= 2\pi f\end{aligned}$$

となる.

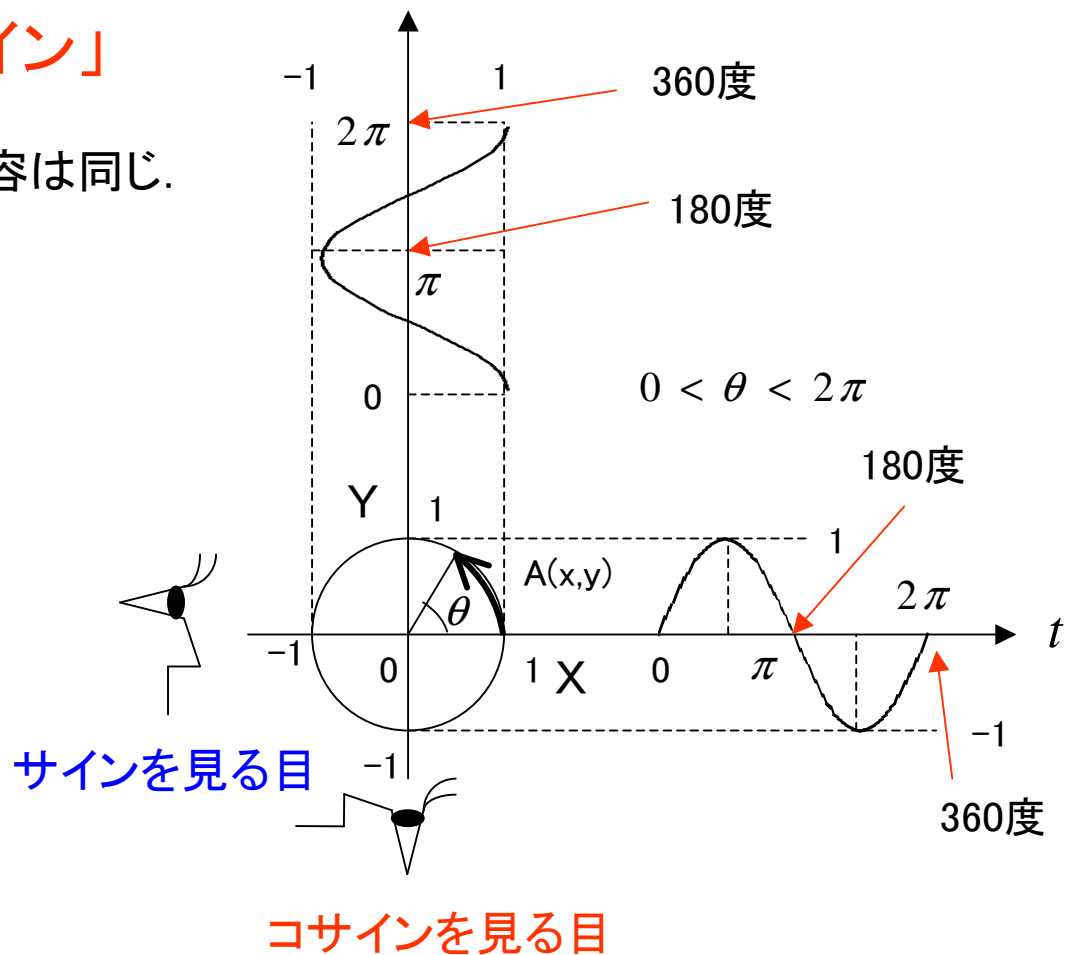
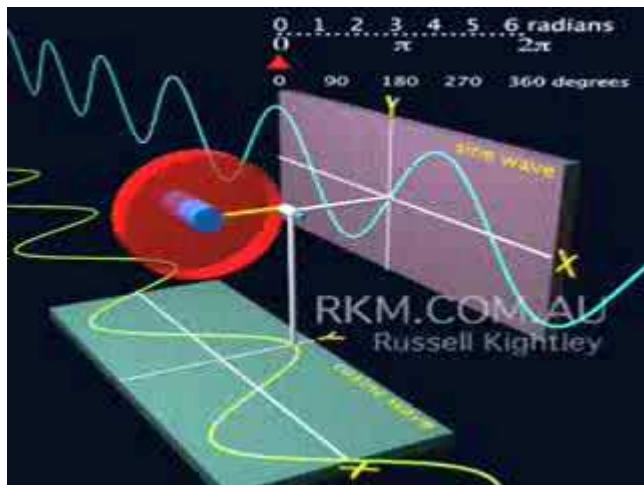
ここで  $f$  を周波数 (単位は Hz),

$\omega$  を角速度 (単位は rad/秒) と呼ぶ.

# 正弦関数(サイン)と余弦関数(コサイン)

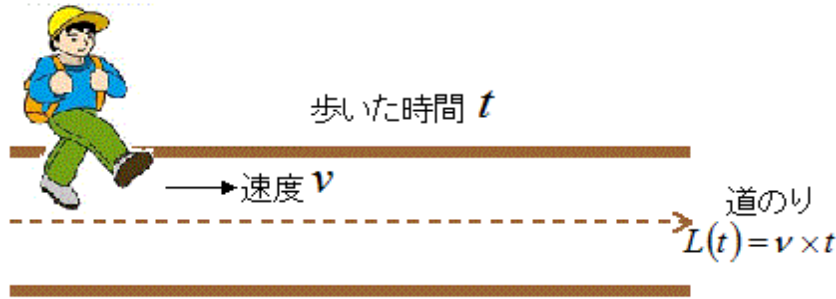
## 「サイン」と「コサイン」

は見つめる方向が違うだけ. 内容は同じ.



中学生でもわかる  
波動方程式は「道のり＝速度×時間」

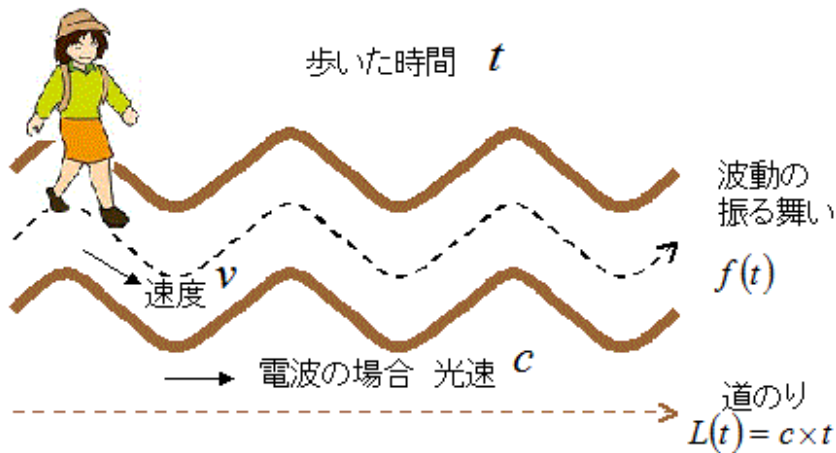
# 波動関数は「道のり＝速度×時間」のようなもの



歩いた道のり  $L(t) = v \times t$

↑ 速度

↑ 歩いた時間



波動の振る舞い  $f(t) = \sin(v \times t)$

↑ ぐねぐね歩いたという意味

↑ 速度

↑ 歩いた時間

$= \sin(2\pi f \times t)$

↑ 1秒間に進む距離 = 円周長 × 周波数

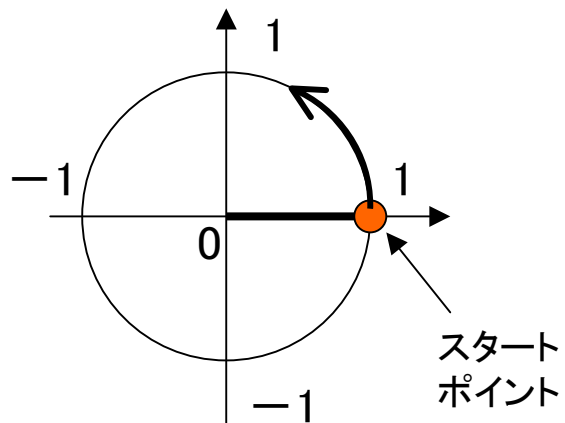
$= \sin(\omega \times t)$

↑ 角速度

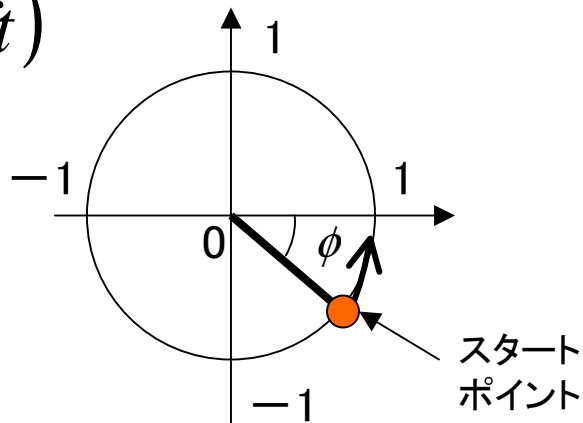
↑ 歩いた時間

歩いた道のり  $L(t) = c \times t$

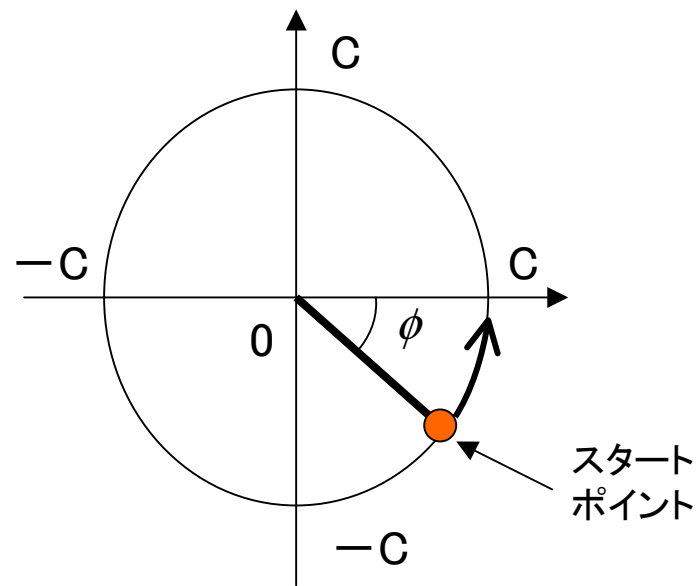
# 波動方程式



$$f(t) = \sin(2\pi ft)$$

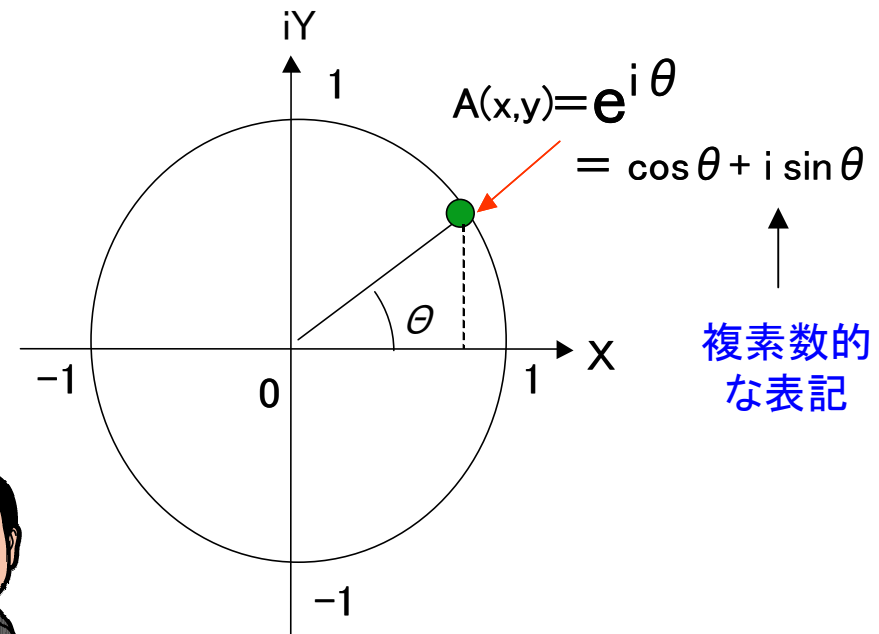
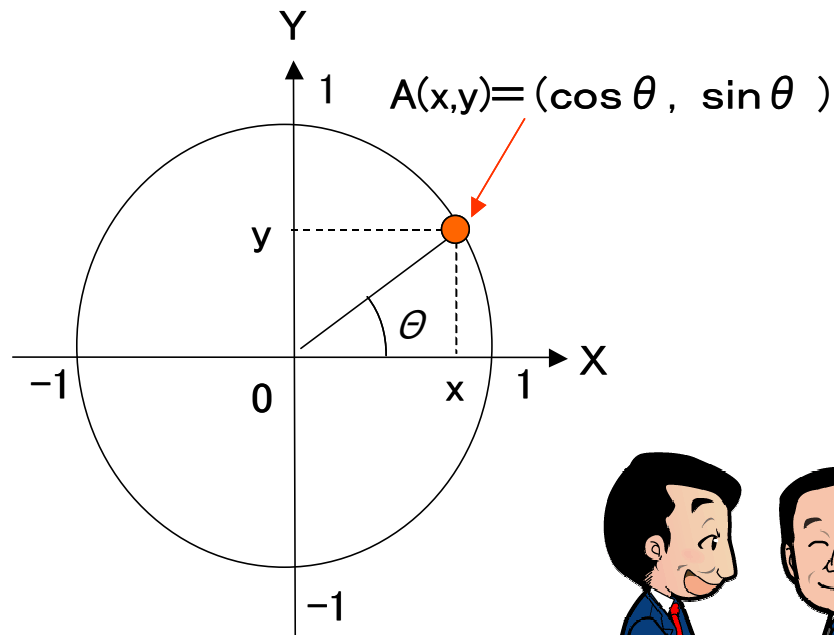


$$f(t) = \sin(2\pi ft - \phi)$$

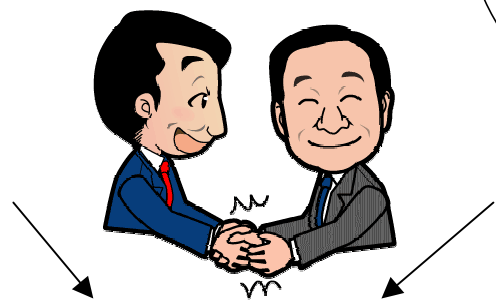


$$f(t) = C \sin(2\pi ft - \phi)$$

# オイラー表記



↑  
複素数的な表記

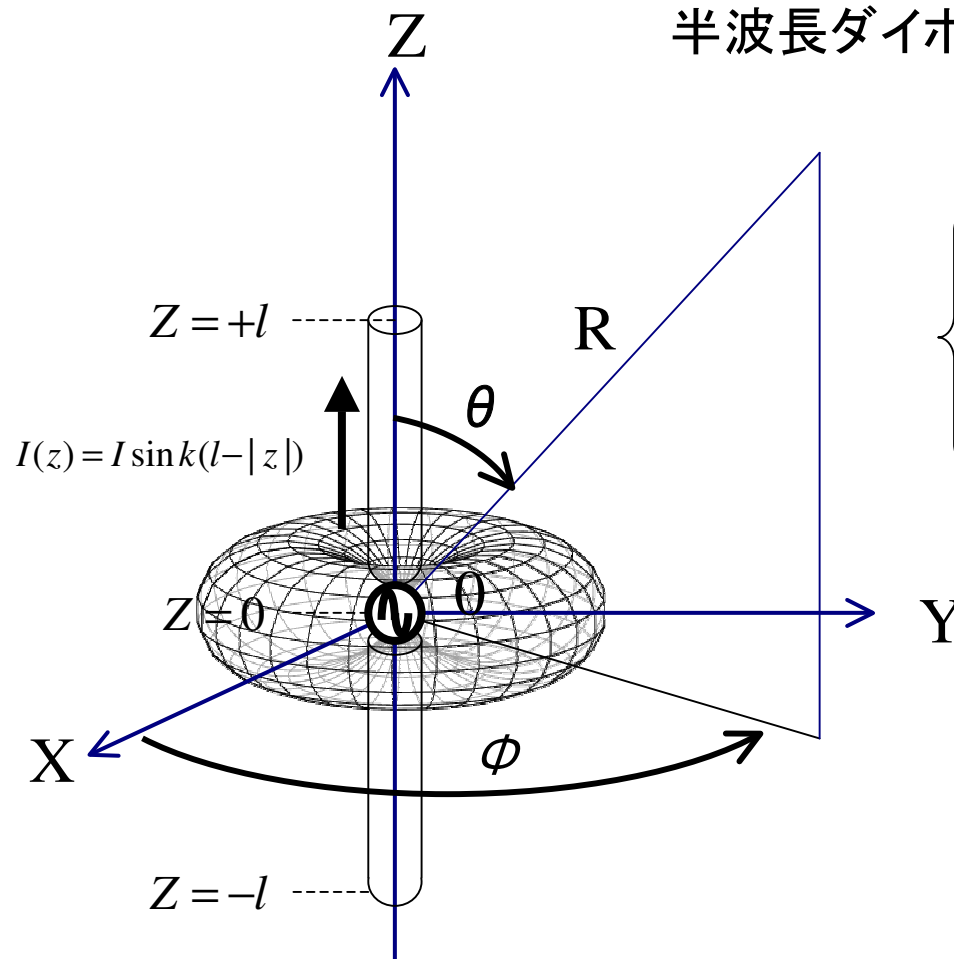


どちらの表現も振り子 ● の位置を示している。



# オイラー表記

半波長ダイポールアンテナの遠方放射界



$$\begin{cases} E_{\theta} = j60 \frac{I}{R} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} e^{-j\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)} \\ H_{\phi} = \frac{E_{\theta}}{120\pi} \end{cases}$$

## 4. Maxwell の方程式を 理解していただきます

# マックスウェルの方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad \dots (1) \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad \dots (2) \\ \text{div} \vec{B} = 0 \quad \dots (3) \\ \text{div} \vec{D} = \rho \quad \dots (4) \end{array} \right.$$

$\vec{H}$ : 磁界ベクトル [A/m]

$\vec{D}$ : 電束密度ベクトル [C/m<sup>2</sup>]

$\vec{E}$ : 電界ベクトル [V/m]

$\vec{B}$ : 磁束密度ベクトル [Wb/m<sup>2</sup>]

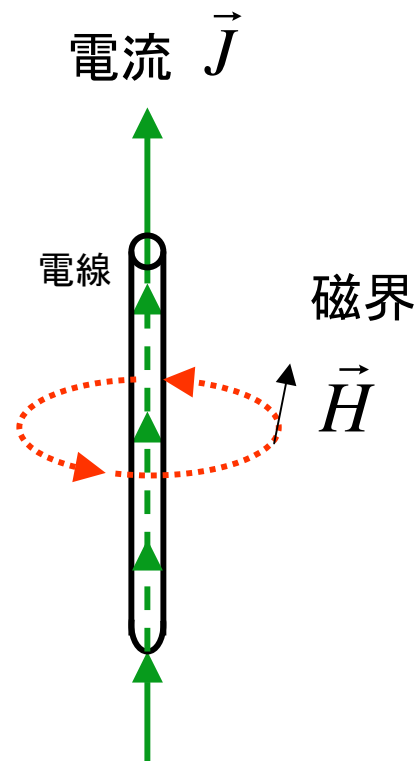
$\vec{J}$ : 電流面密度ベクトル [A/m<sup>2</sup>]

$\rho$ : 電荷密度 [C/m<sup>3</sup>]

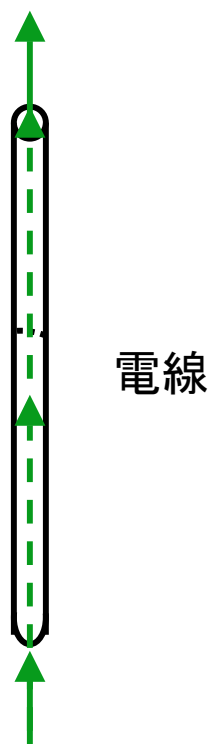
# アンペールの法則

ご存知, アンペールの法則

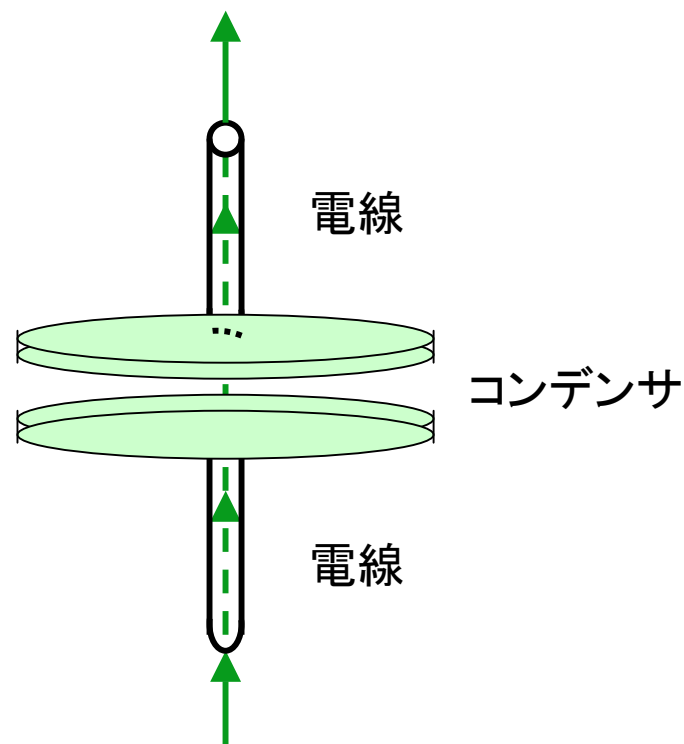
$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J}$$



# 電線とコンデンサを流れる電流



電線には、直流電流も  
交流電流も流れる。



コンデンサには、直流電流は  
流れず、交流電流は流れる。

# アンペールの法則

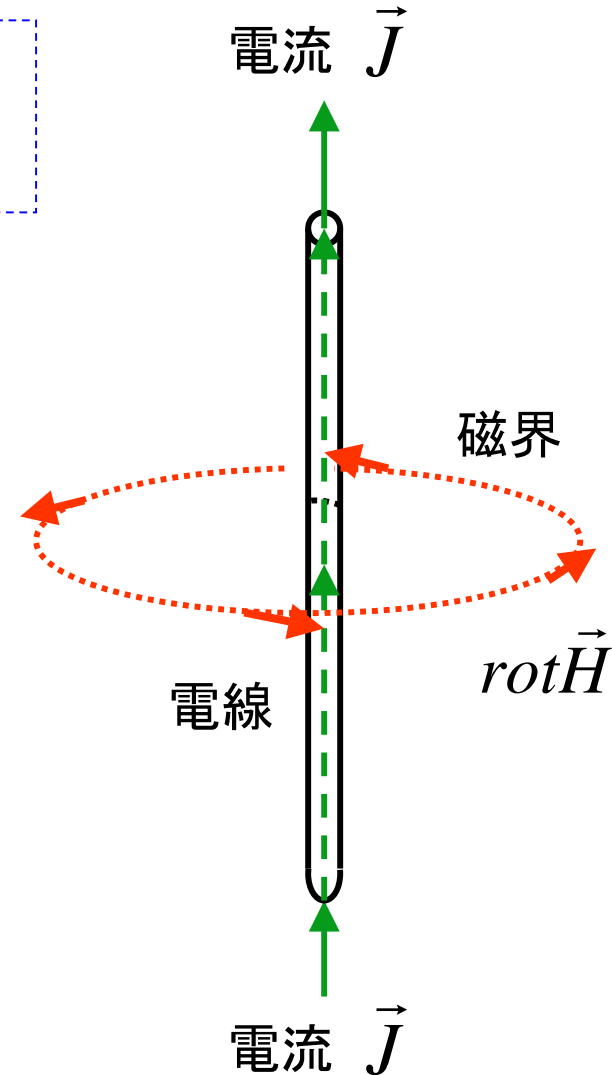
マックスウェルの方程式  
の第1番目の式

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J}$$

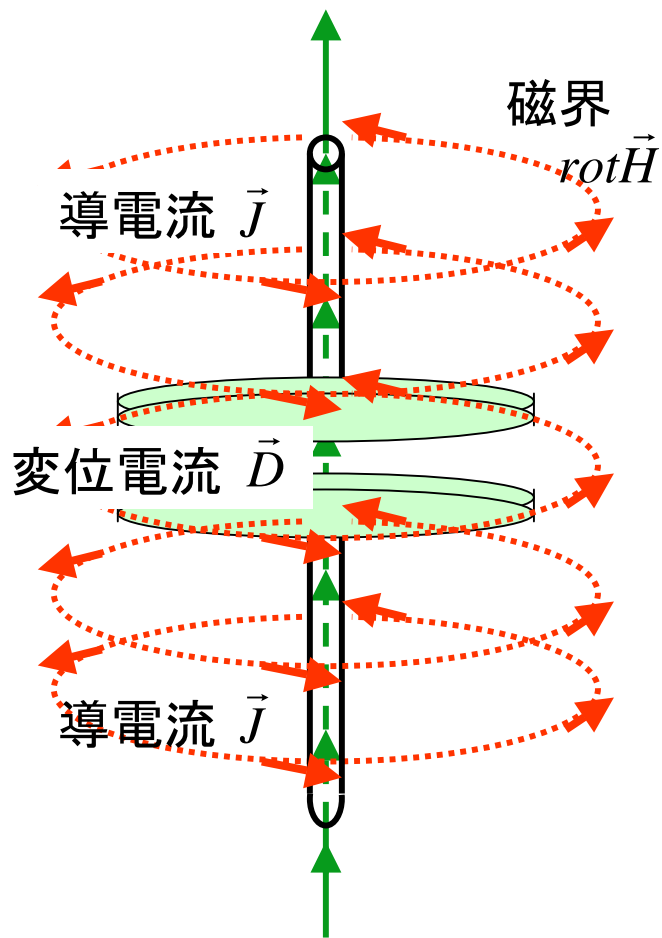
$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J}$$

$\text{rot}$  は、右ネジ方向に回転  
しているという意味です。

by 根日屋



# マックスウェルの変位電流



マックスウェルの方程式  
の第1番目の式

$$\text{rot}\vec{H} = \frac{\partial}{\partial t}\vec{D}$$

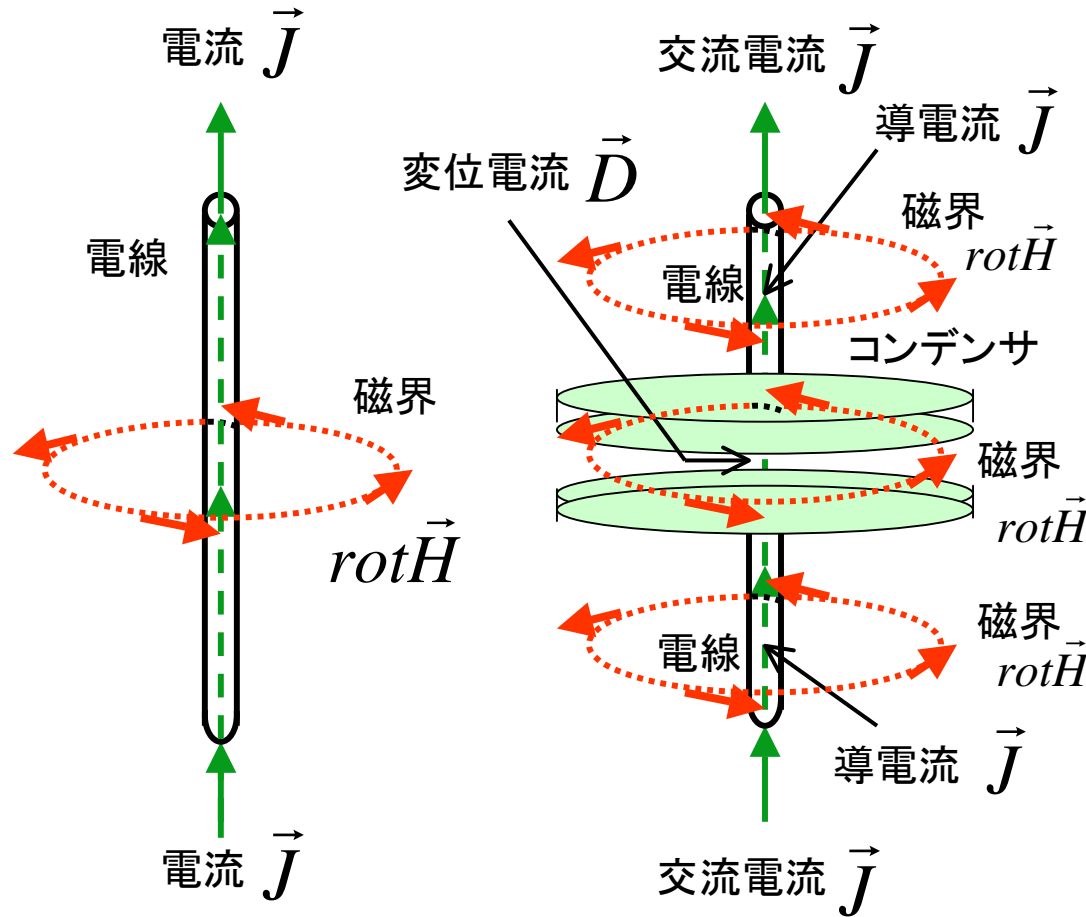
$$\text{rot}\vec{H} = \frac{\partial}{\partial t}\vec{D}$$

$\frac{\partial}{\partial t}$  は、時間と共に変化する、すな

わち、**交流の世界**のことを示す。

by 根日屋

# アンペールの法則 & マックスウェルの変位電流



$$rot\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

↑                    ↑                    ↑  
 磁界を誘起 [A/m]    導電流 [A/m]    変位電流 [A/m]

↑  
 意味的には変位電流密度  
 (電束密度の時間変化)

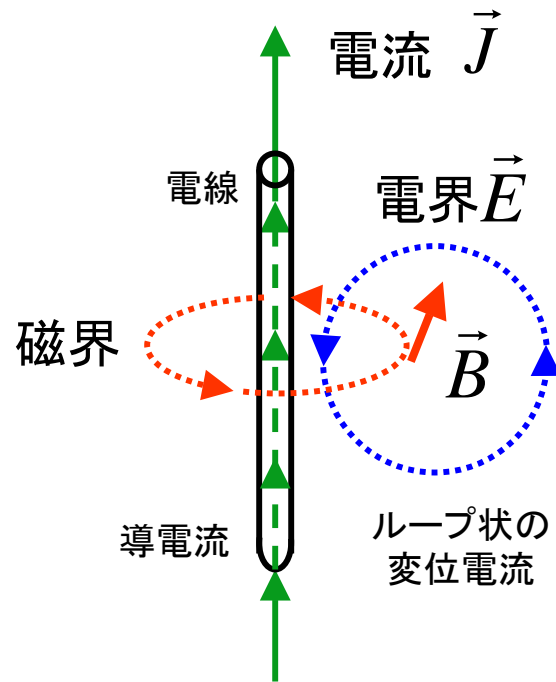
(a) 電線を通る  
導電流と磁界

(b) 変位電流と磁界



# マックスウェルの方程式の第2番目の式

# ファラデーの法則



右ネジの法則と逆向き

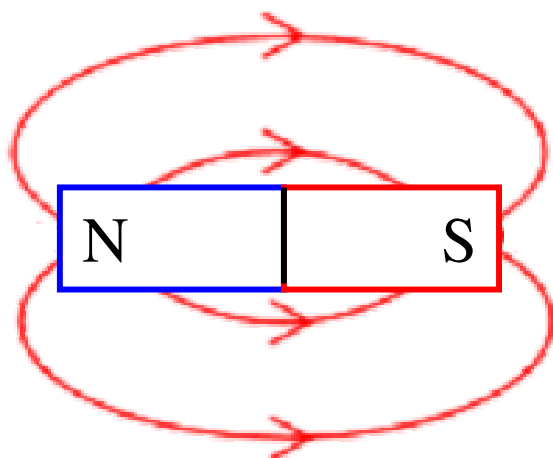
$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$$

交流のとき、磁界の周りには、くるくる回る電界が発生する。

# マックスウェルの方程式の第3番目の式

# 単極磁化の否定法則

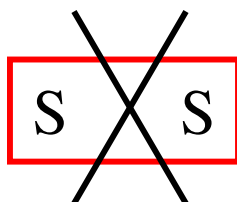
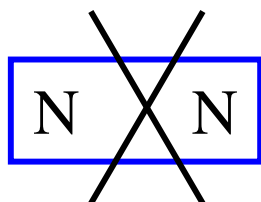
磁力線



磁力線

div は「発散する」こと.

現代の電磁気学では、今のところ、単極（N 極だけとか S 極だけ）の磁石は存在せず、必ず磁石は N 極と S 極が同居している。この場合、磁力線は N 極から出て S 極に入るので、磁力線は発散しない。

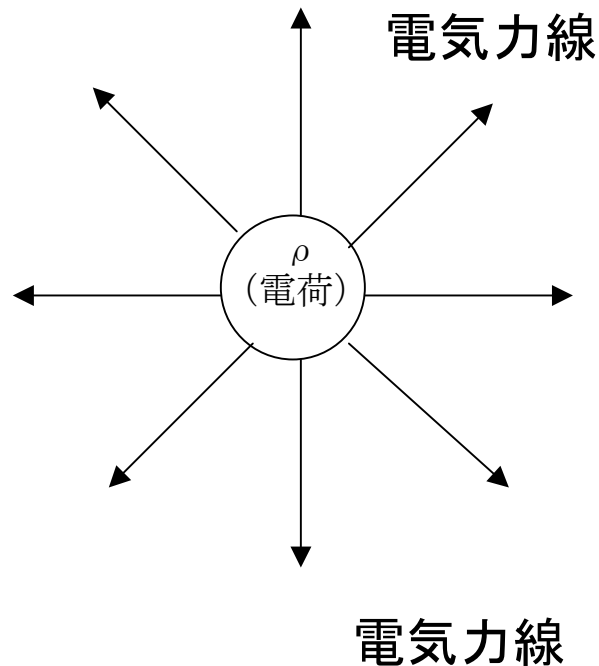


$$\text{div} \vec{B} = 0$$

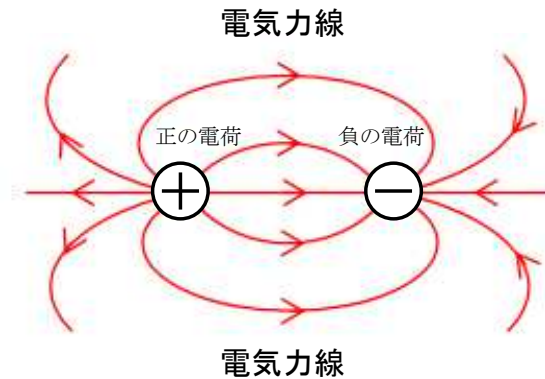
# マックスウェルの方程式の第4番目の式

# クーロンの法則

空間に正の電荷( $\rho$ )を置くと、そこから電気力線が発散(湧き出す)する。正の電荷は湧き出し口、負の電荷は吸い込み口と考える。

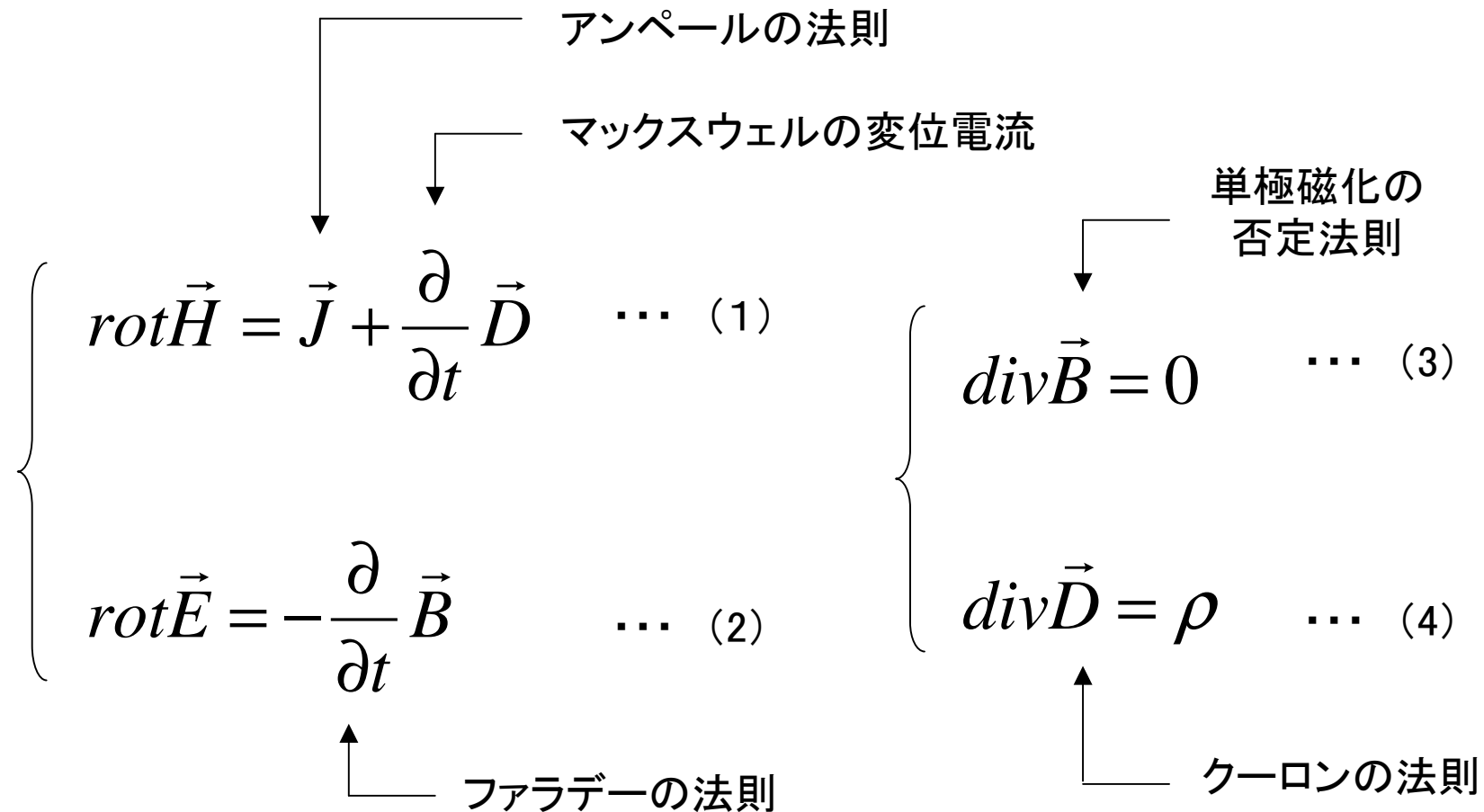


$$\text{div} \vec{D} = \rho$$



# Maxwell の方程式のまとめ

# マックスウェルの方程式は・・・先人の集大成 + 変位電流



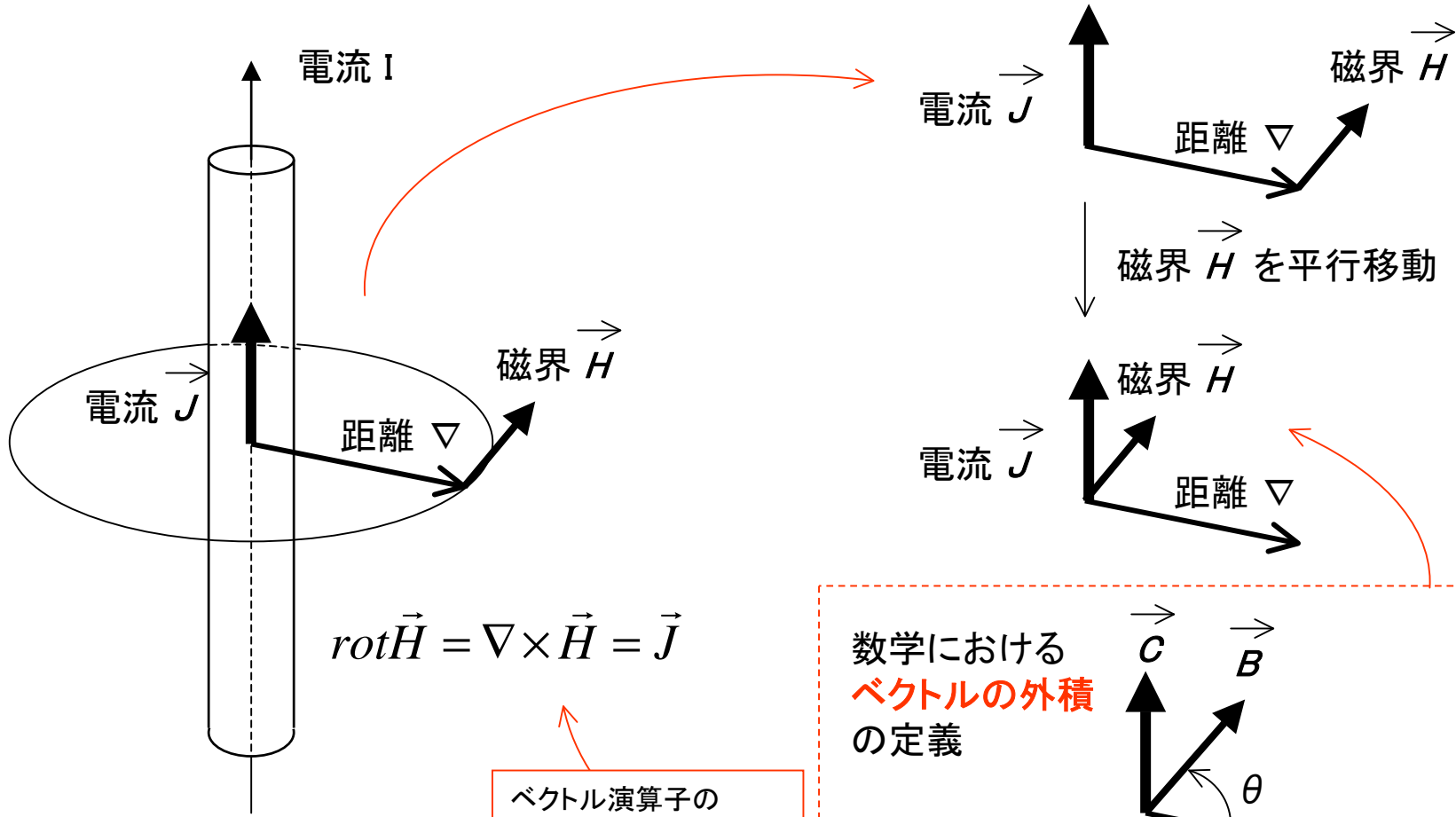


# マックスウェル の方程式に出てくる数式

- $rot$  : 回転(ローテーション)
  - ベクトル演算子の外積
  - ⇒ 「右ネジ方向にくるくる回っている」と理解しよう.
- $\frac{\partial}{\partial t}$  : 時間  $t$  の偏微分の表記
  - 時間  $t$  とともに値が変わってる.
  - ⇒ 極論であるが, この偏微分の表記を見たら, 「交流のときに起こるのだ」と思ってよい.
- $div$  : 発散(ダイバージェンス)
  - ベクトル演算子の内積
  - 二つのベクトルの強さの合計
  - ⇒ 「湧き出すか」か「吸い込むか」の状態を示している.

# 雜談

# マックスウェルの方程式に出てくる数式 “rot (外積)”



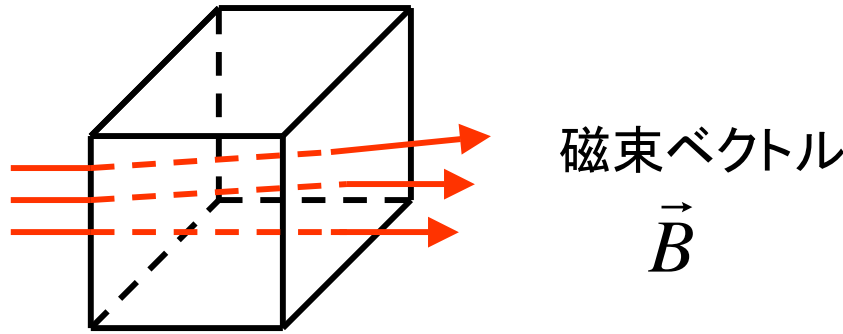
ベクトル演算子の意味が納得できた！！

ベクトルの外積 (rot) は、ただ、回転を意味しているだけ。

数学におけるベクトルの外積の定義

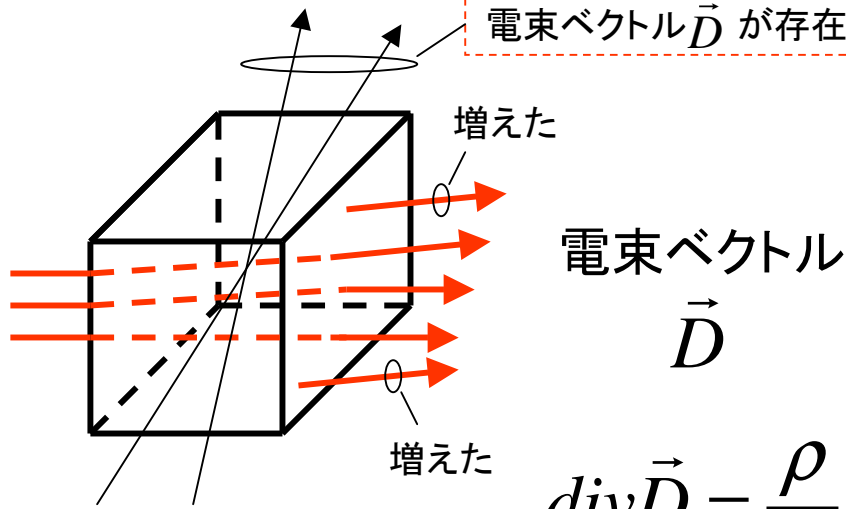
$|\vec{C}| = |\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}| |\vec{B}| \sin \theta$

# マックスウェルの方程式に出てくる数式 “div (内積)”



$div \vec{B} = 0$  ← 0 は増えていないことを示す.

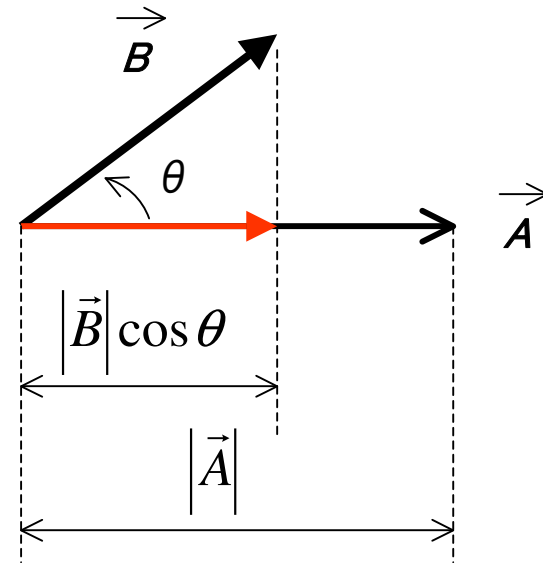
自然界にはこんな電束ベクトル  $\vec{D}$  が存在



$div \vec{D} = \frac{\rho}{e_0}$  ←

数学における **ベクトルの内積** の定義

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \theta$$



有限値を持つことは、増えた(減った)ことを示す.

# ご清聴ありがとうございました。

AMPLET Communication Laboratory



根目屋英之の著書

Hideyuki Nebiya

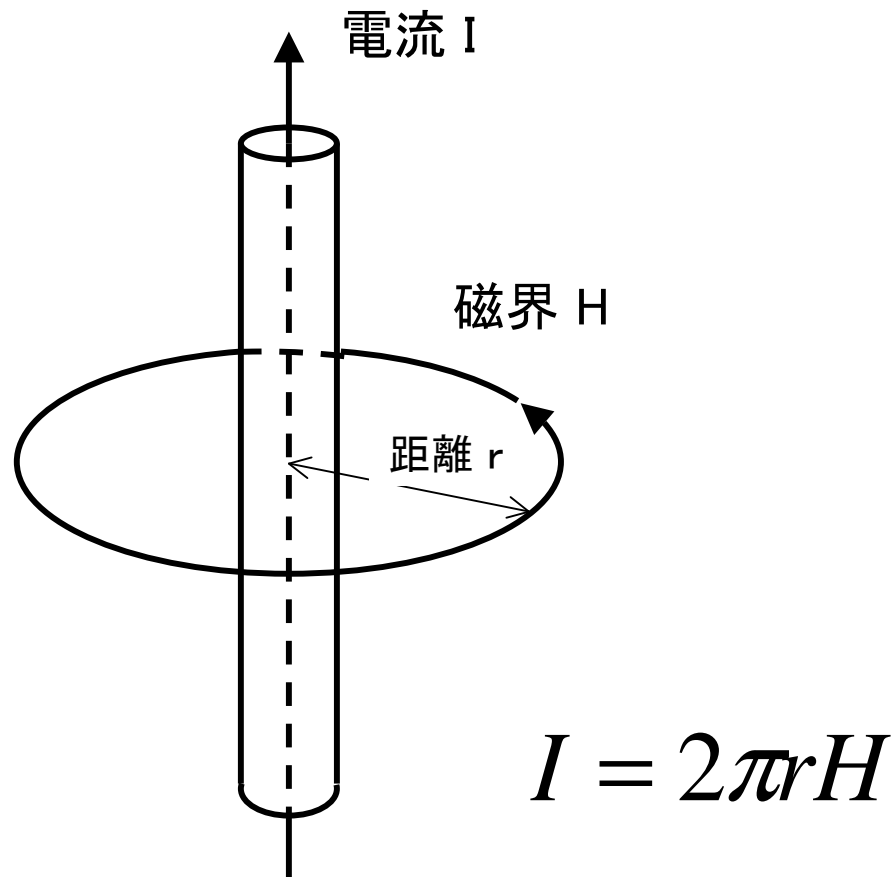
nebiya@amplet.sakura.ne.jp

AMPLET  
Communication Laboratory

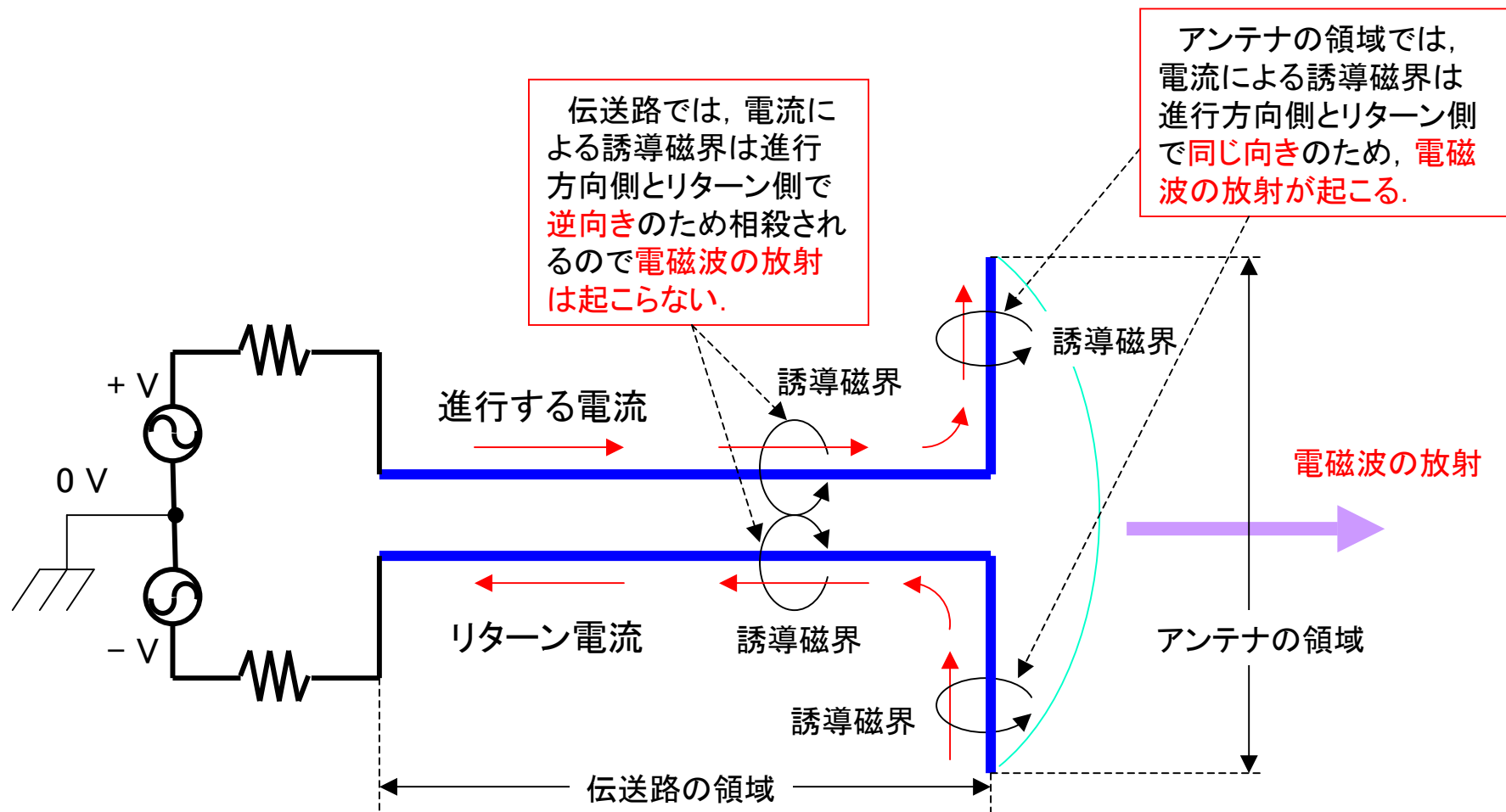
2024年6月13日 5時限

## 5. 伝送路 $\doteq$ or $\neq$ アンテナ

# アンペールの法則

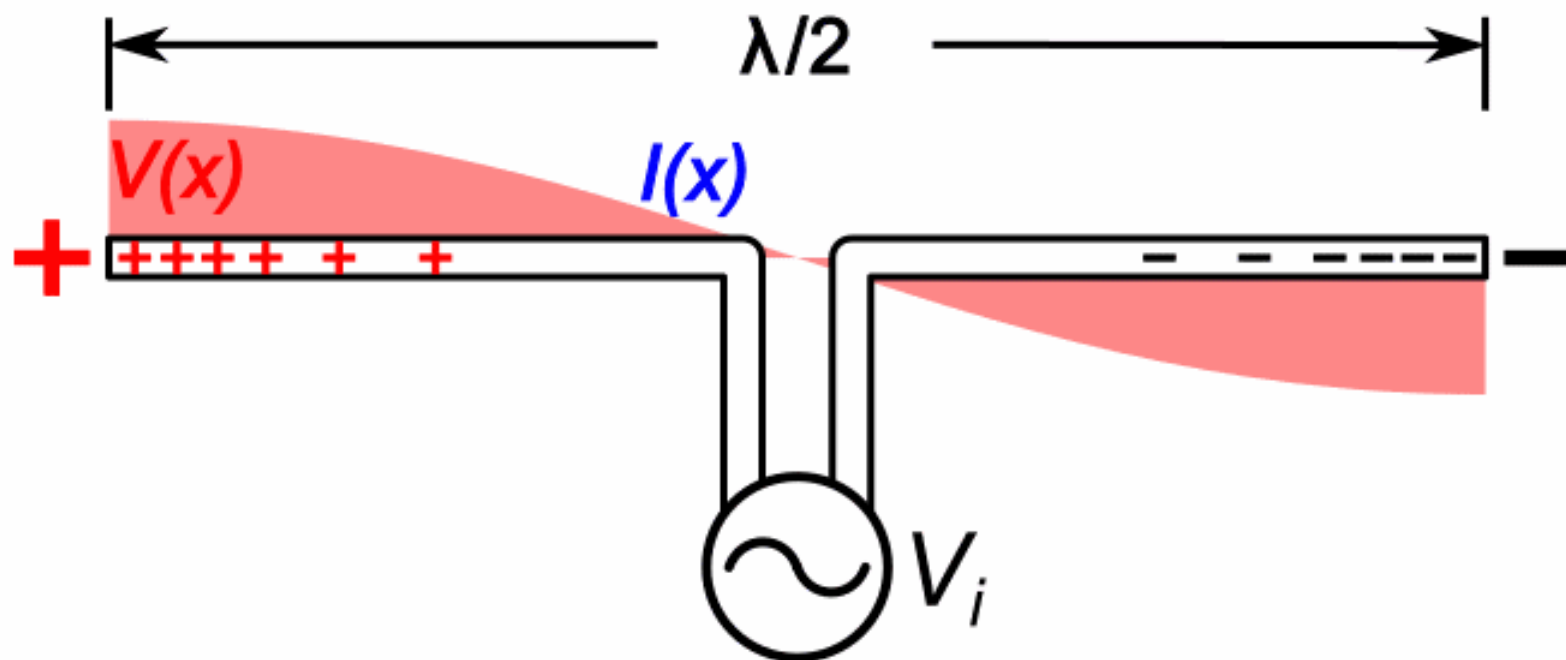


# アンテナと伝送路は、共に2本の電線で実現できる しかし、その振る舞いは異なる





# ダイポールアンテナの電流分布・電圧分布

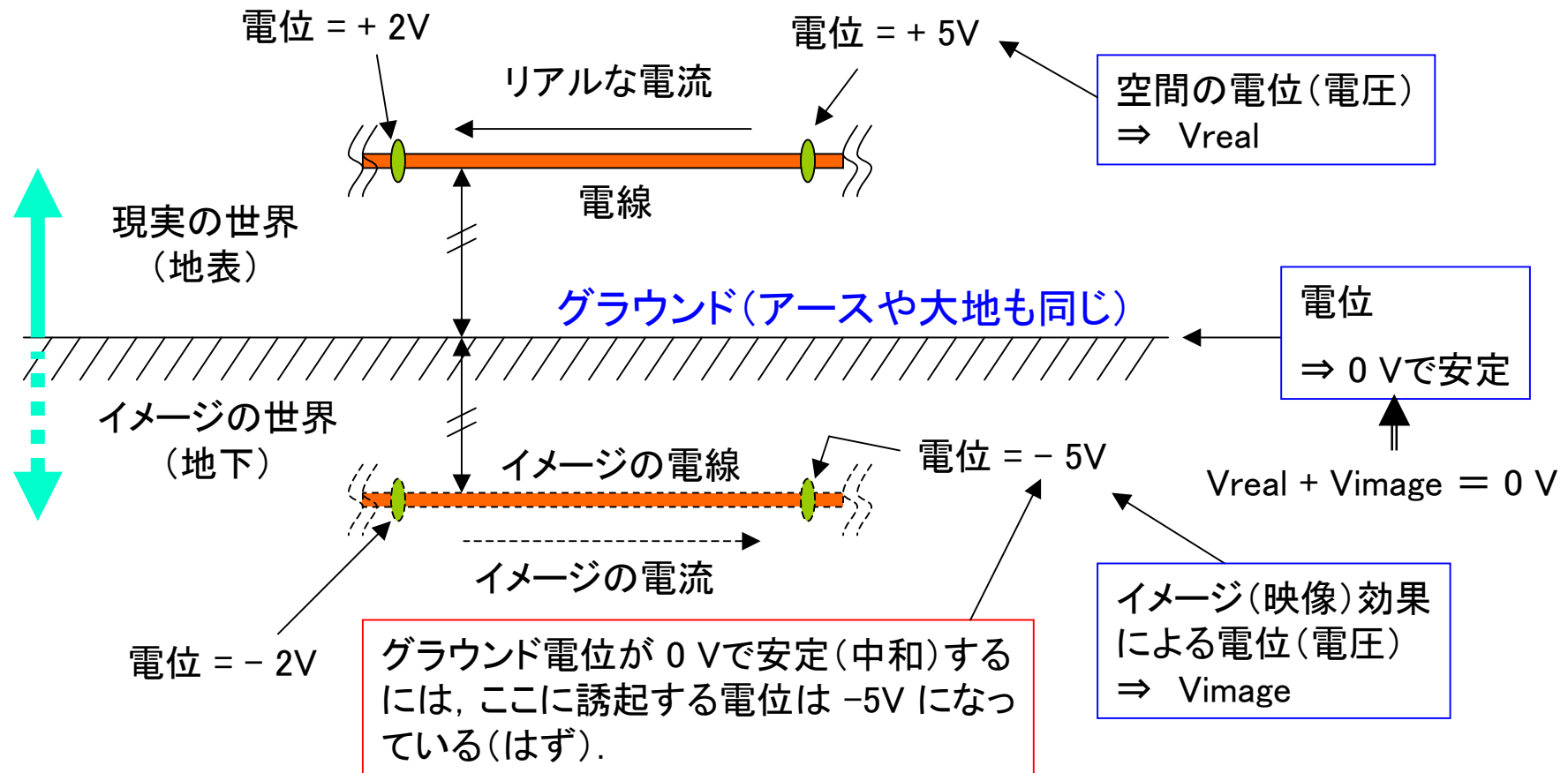


## 6. イメージ(映像)って何？

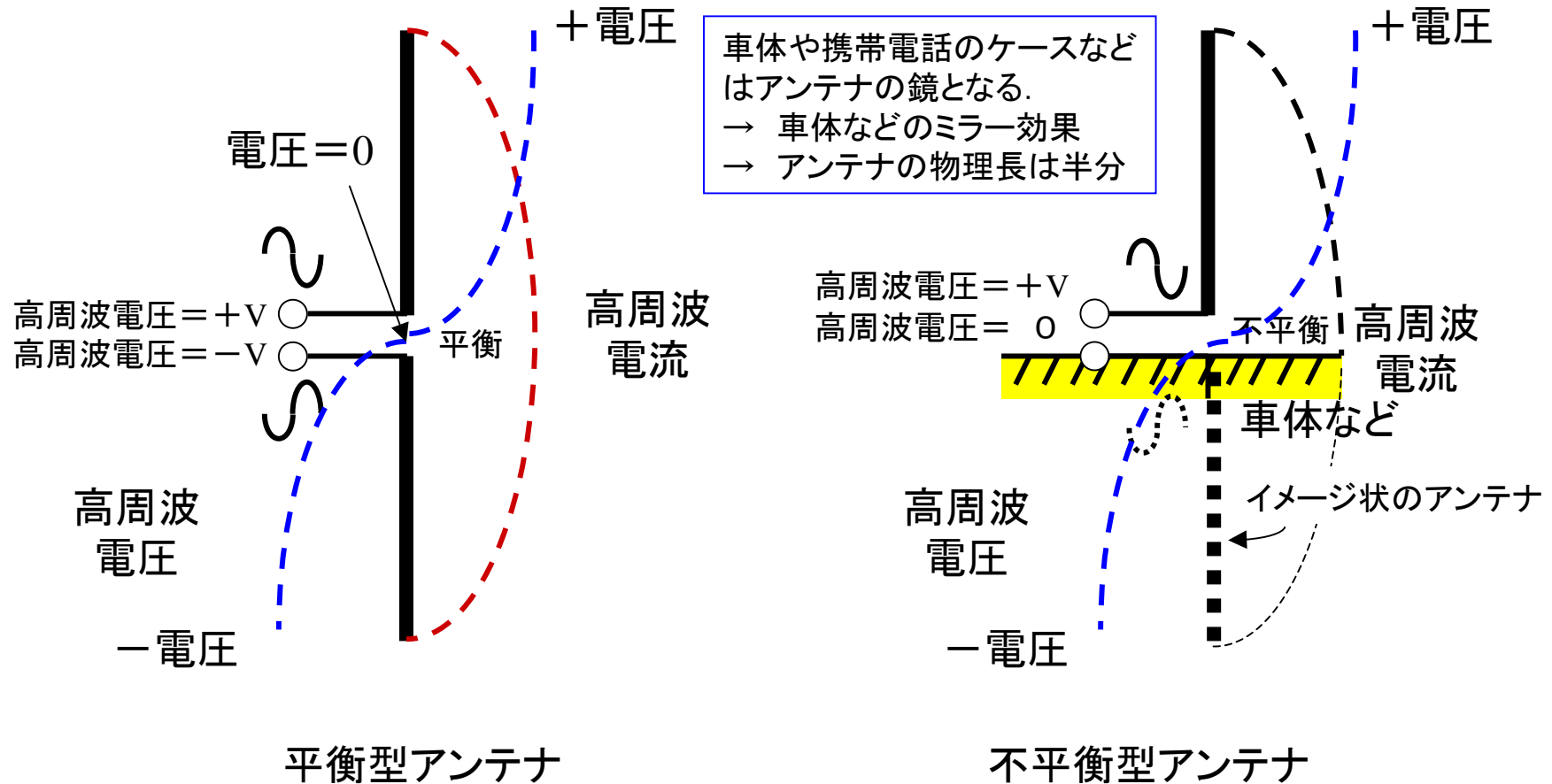
## 6-1. 何故、グラウンドがあると イメージアンテナができてしまうのか

# グラウンドは電気信号では鏡と考えられる

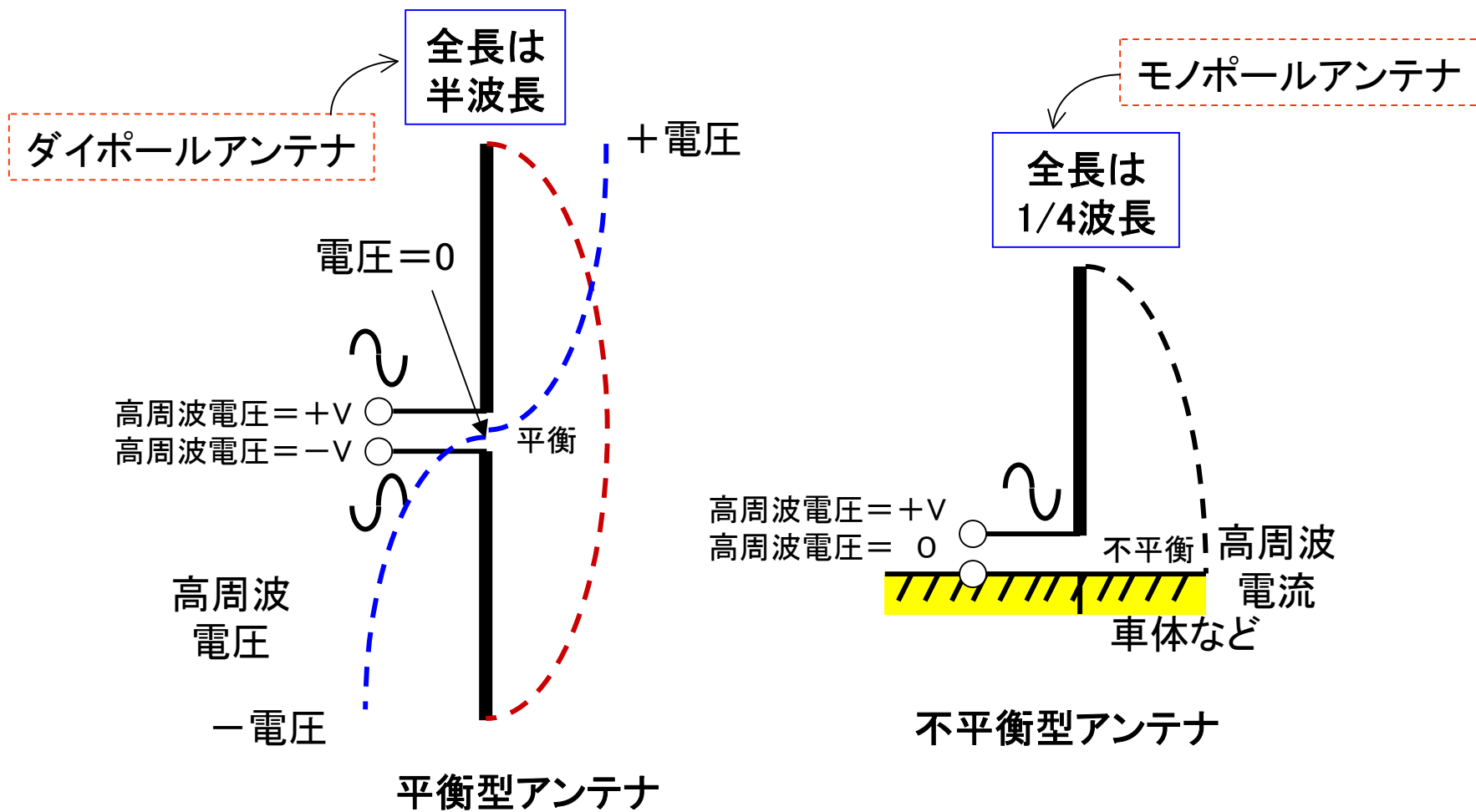
その理由は、グラウンド電位は0Vで安定しているから



# 平衡型アンテナと不平衡型アンテナ



# アンテナの原点がわかった！！

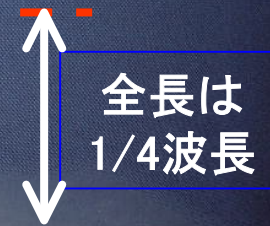


# アンテナの原点がわかった！！

全長は半波長



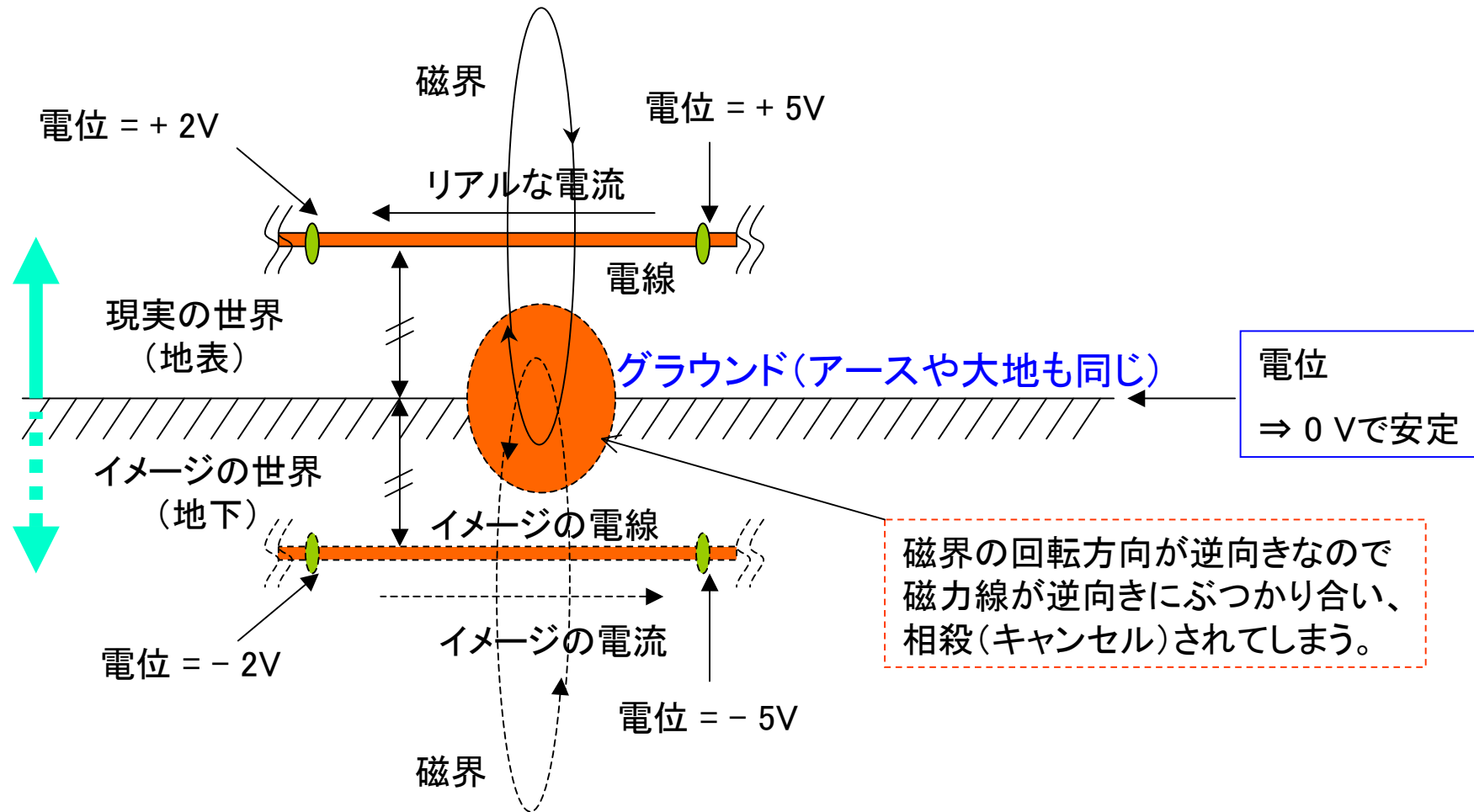
平衡型アンテナ



全長は  
1/4波長

不平衡型アンテナ

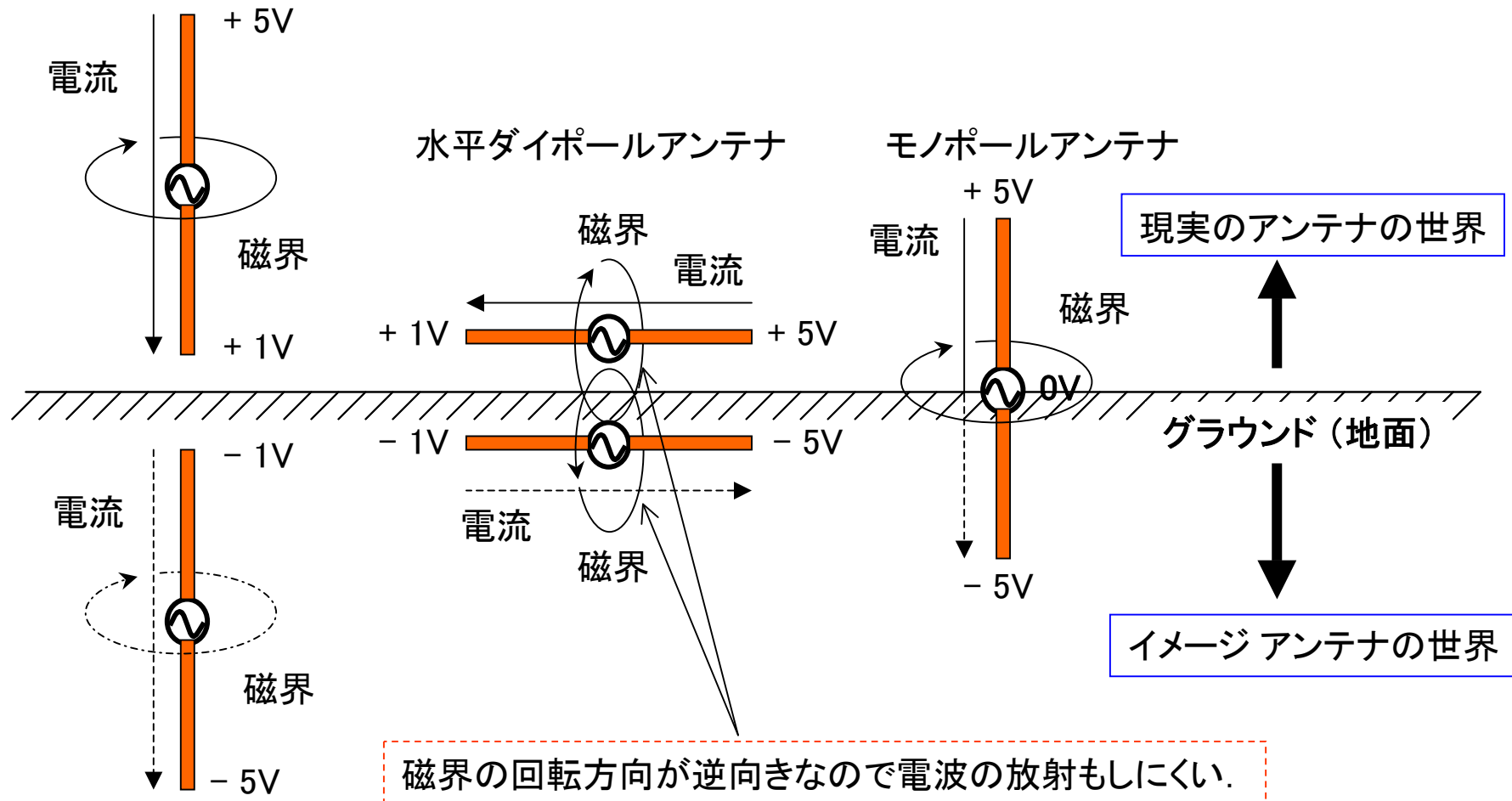
# イメージの電流で発生する磁界が電波の放射を妨げる



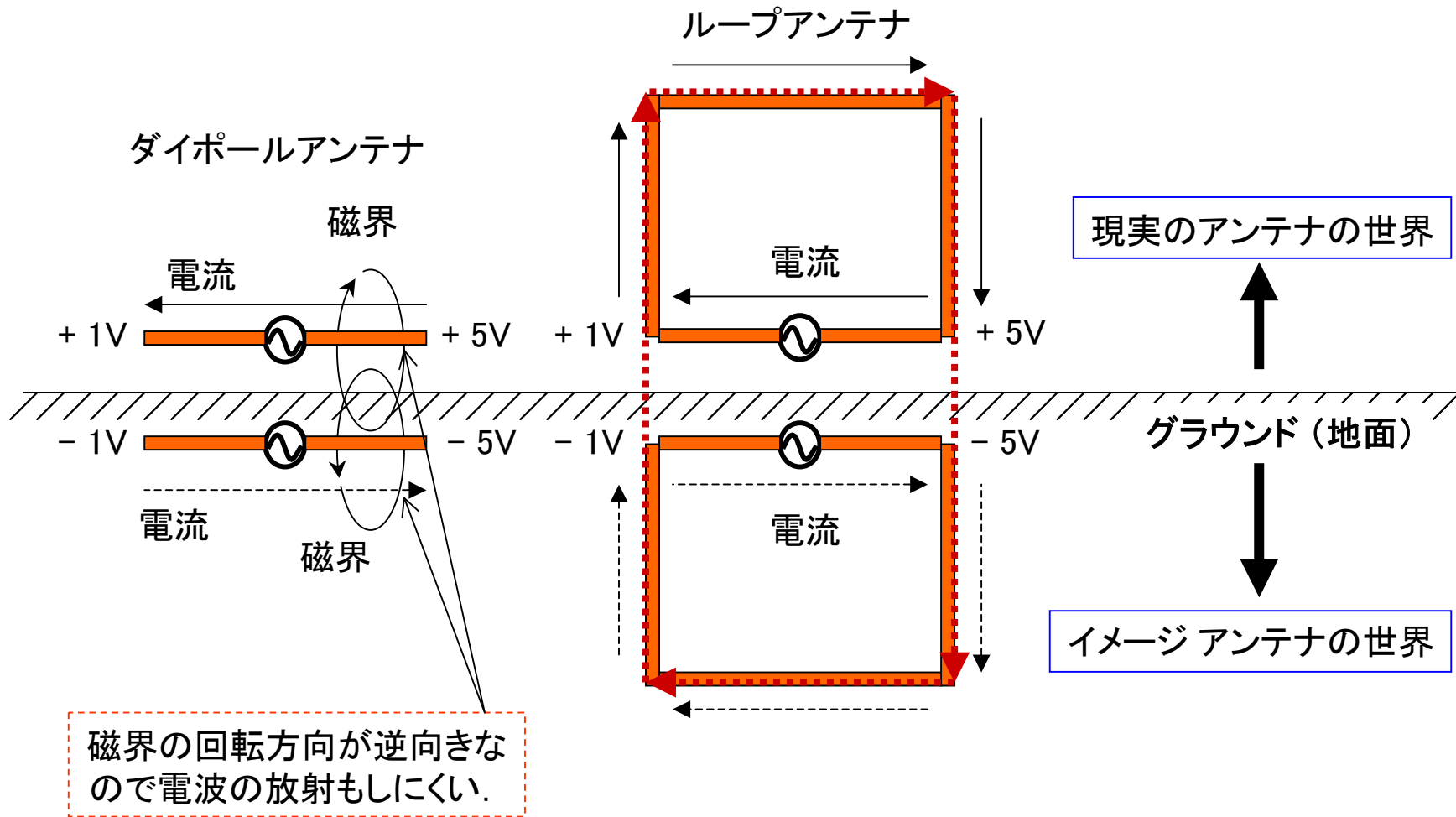


# ダイポール(モノポール)アンテナとグラウンドの関係

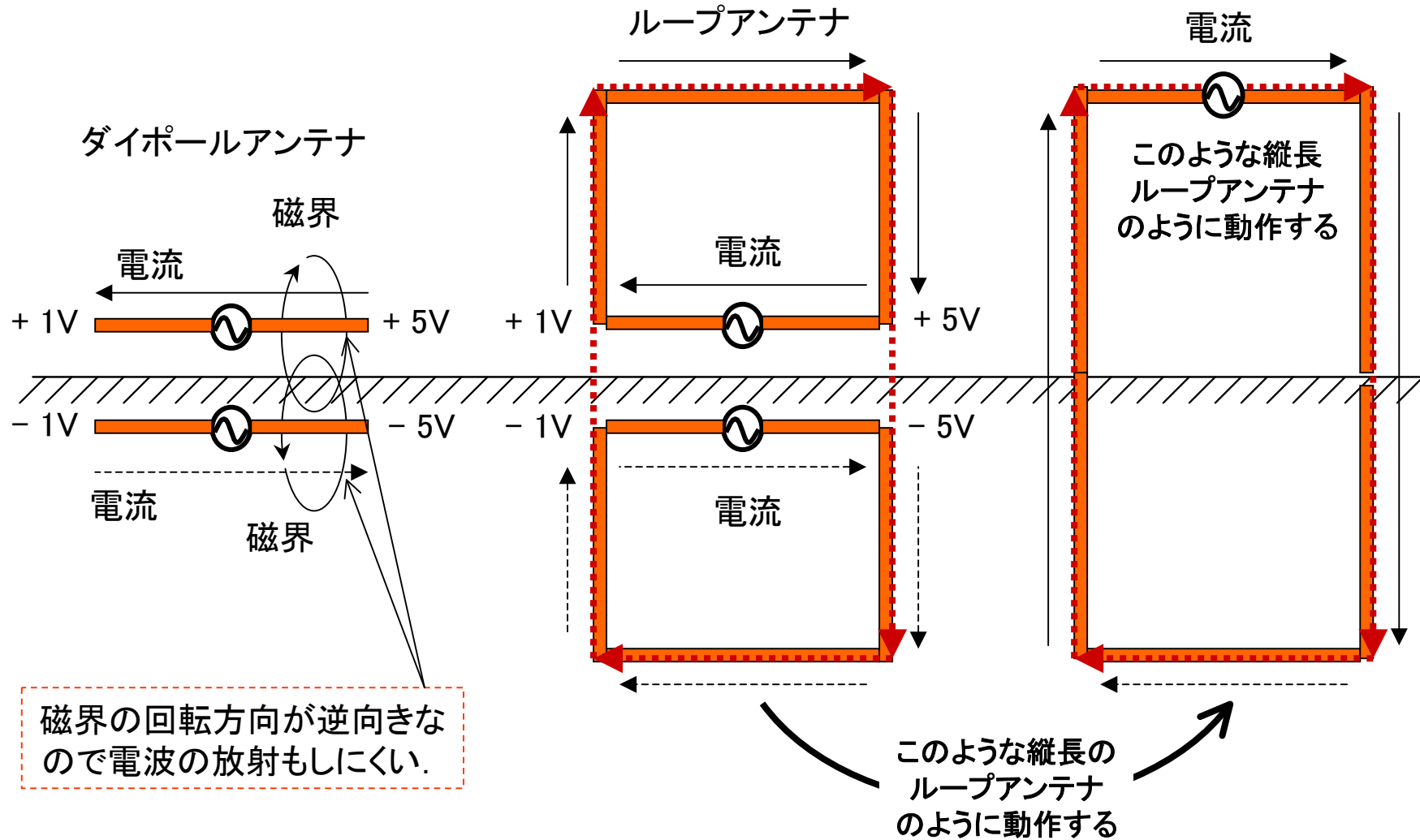
垂直ダイポールアンテナ



# 金属に強いアンテナはループアンテナ

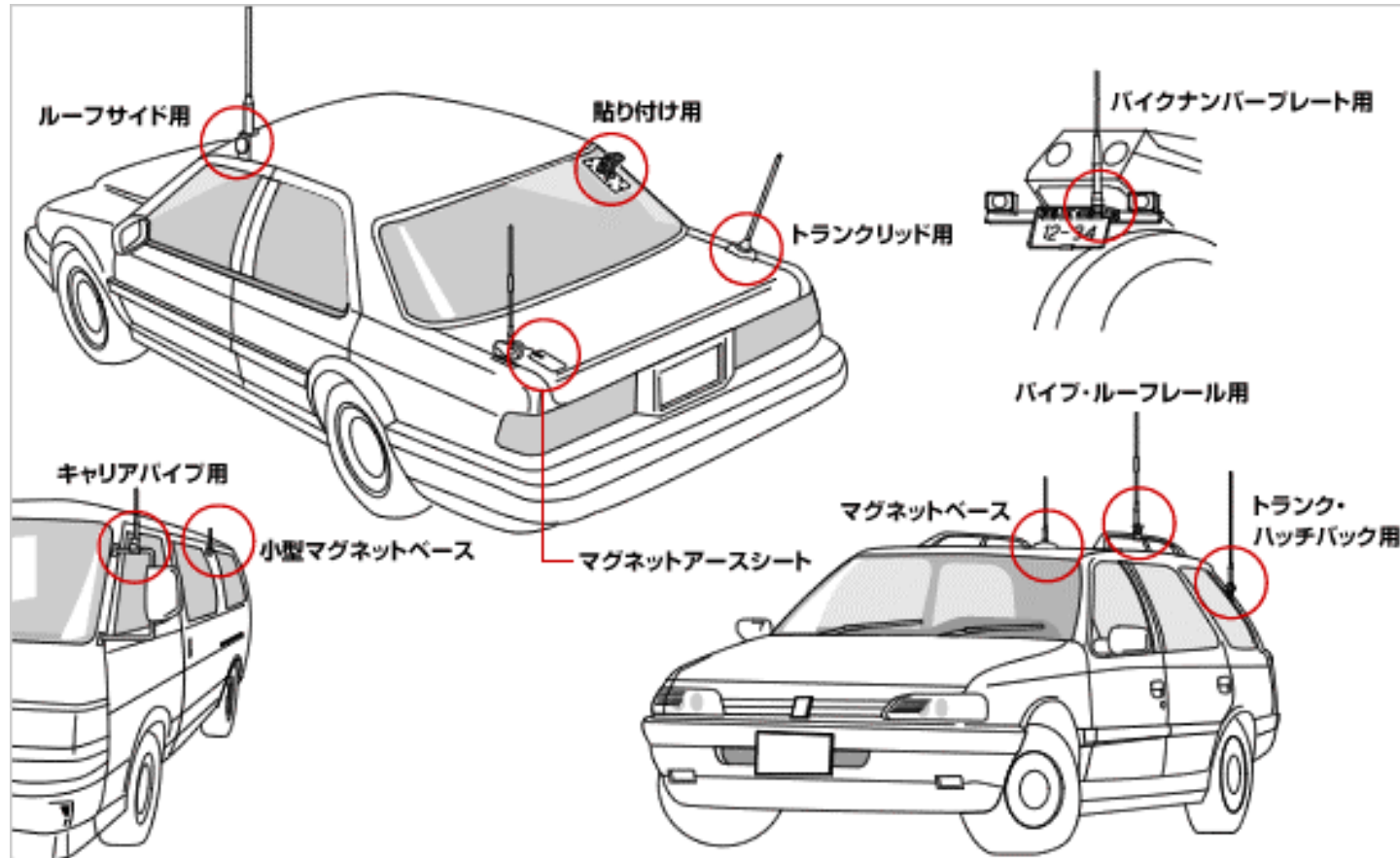


# 金属に強いアンテナはループアンテナ



## 6-2. グラウンド、金属板があるときは アンテナは半分でよい

# 車載用アンテナの設置事例

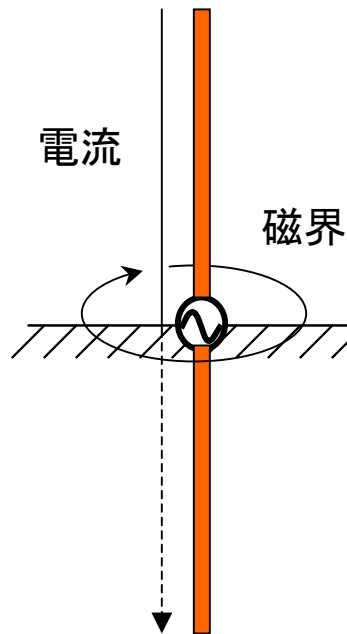


上図は第一電波工業株式会社（ダイヤモンドアンテナ）様のご好意で、  
[http://www.diamond-ant.co.jp/product/ama/stand/stand\\_index.html](http://www.diamond-ant.co.jp/product/ama/stand/stand_index.html) からの  
転載をご了承をいただきました。

# モノポールアンテナ(不平衡型アンテナ)の低姿勢化

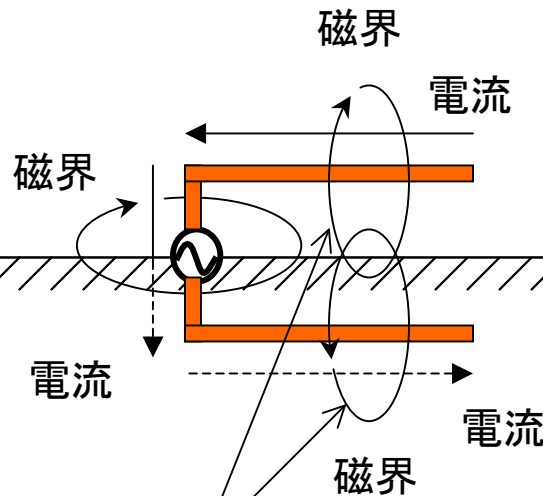
モノポールアンテナ

balanは不要



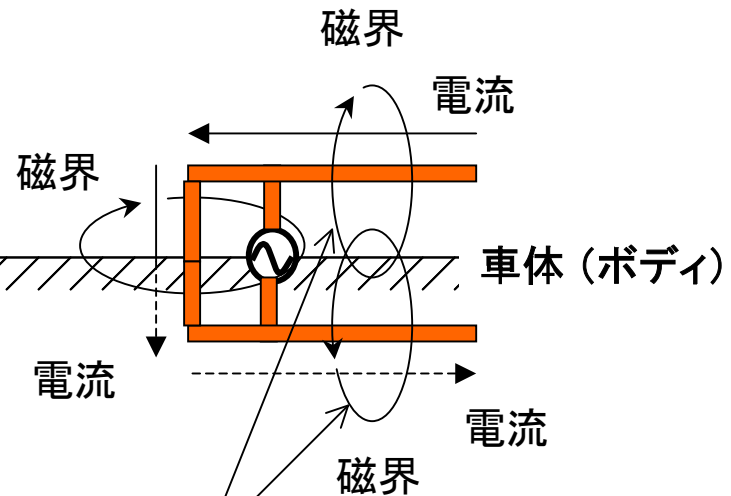
逆L型 アンテナ

balanは不要



逆F型 アンテナ

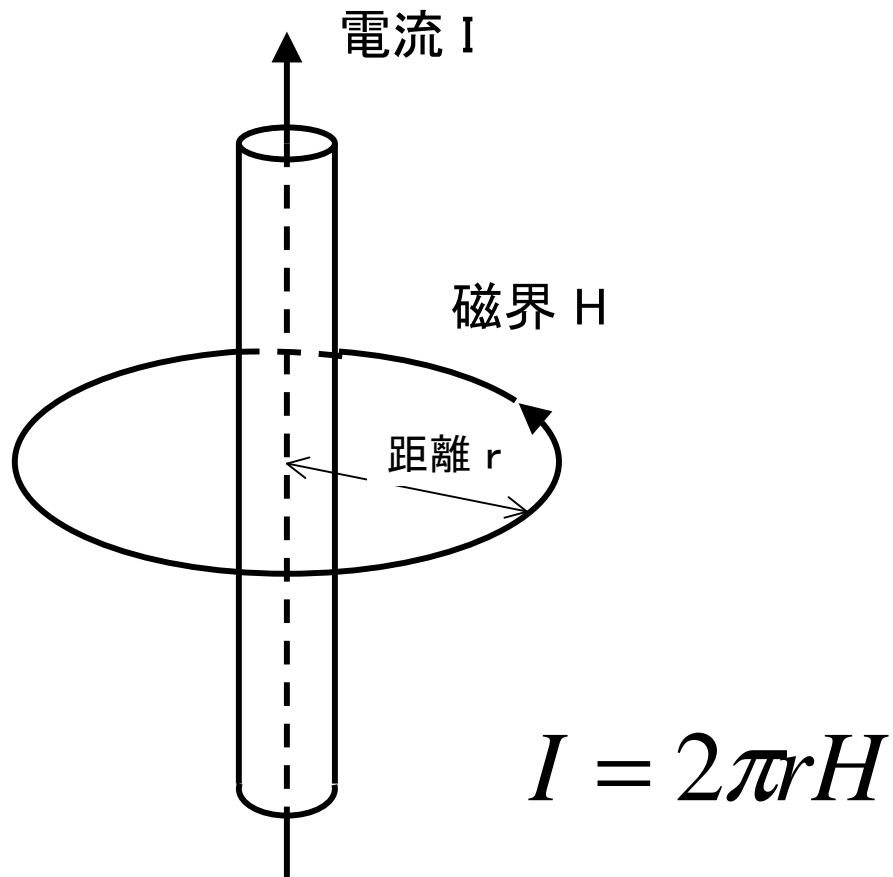
balanは不要



車体(ボディ)に平行な水平方向成分の放射素子が発生する磁界の回転方向は各々が逆向きなので電波の放射もしにくい。

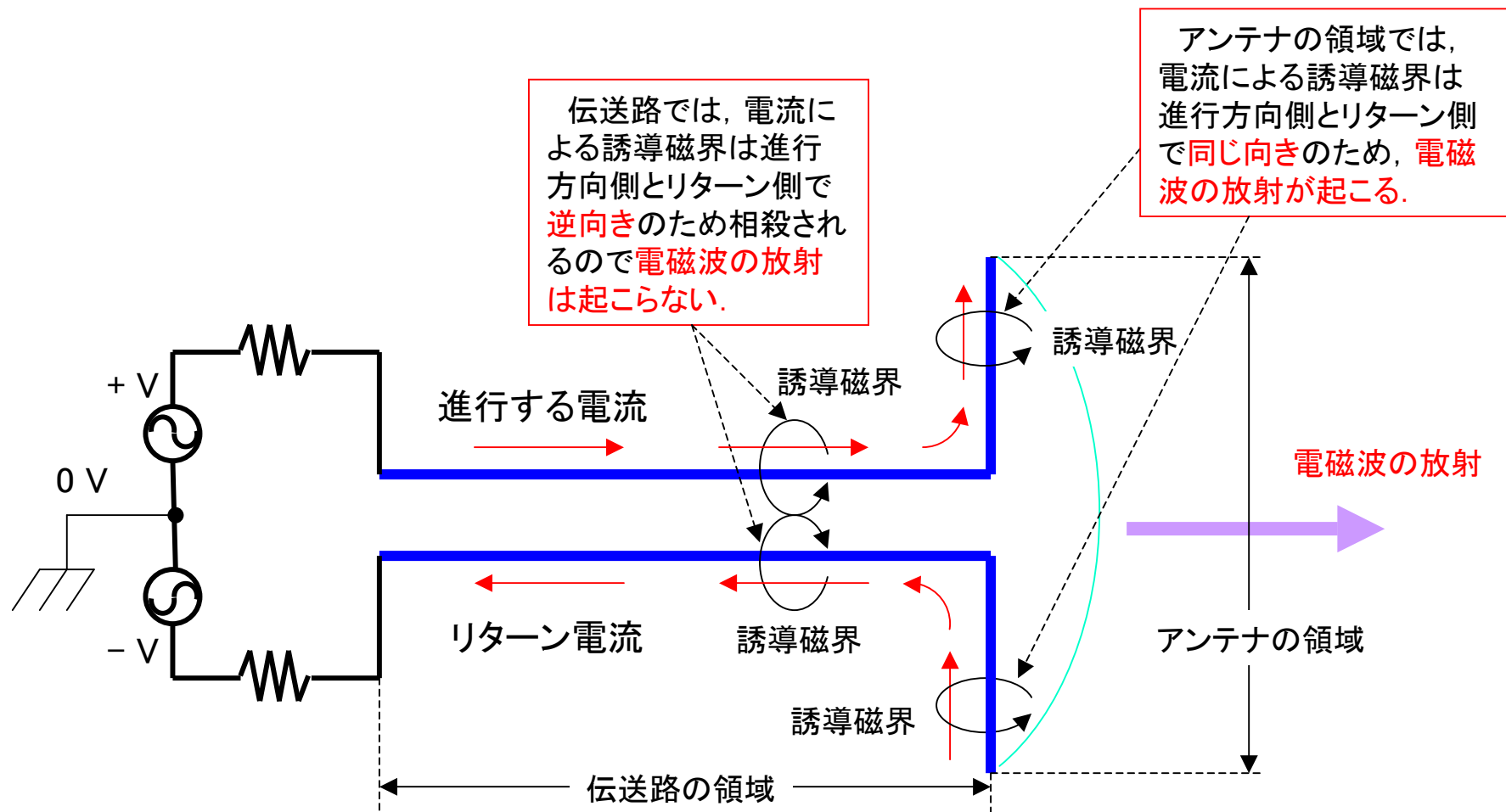
## 7. 雑音対策は目で見ればわかる

# アンペールの法則

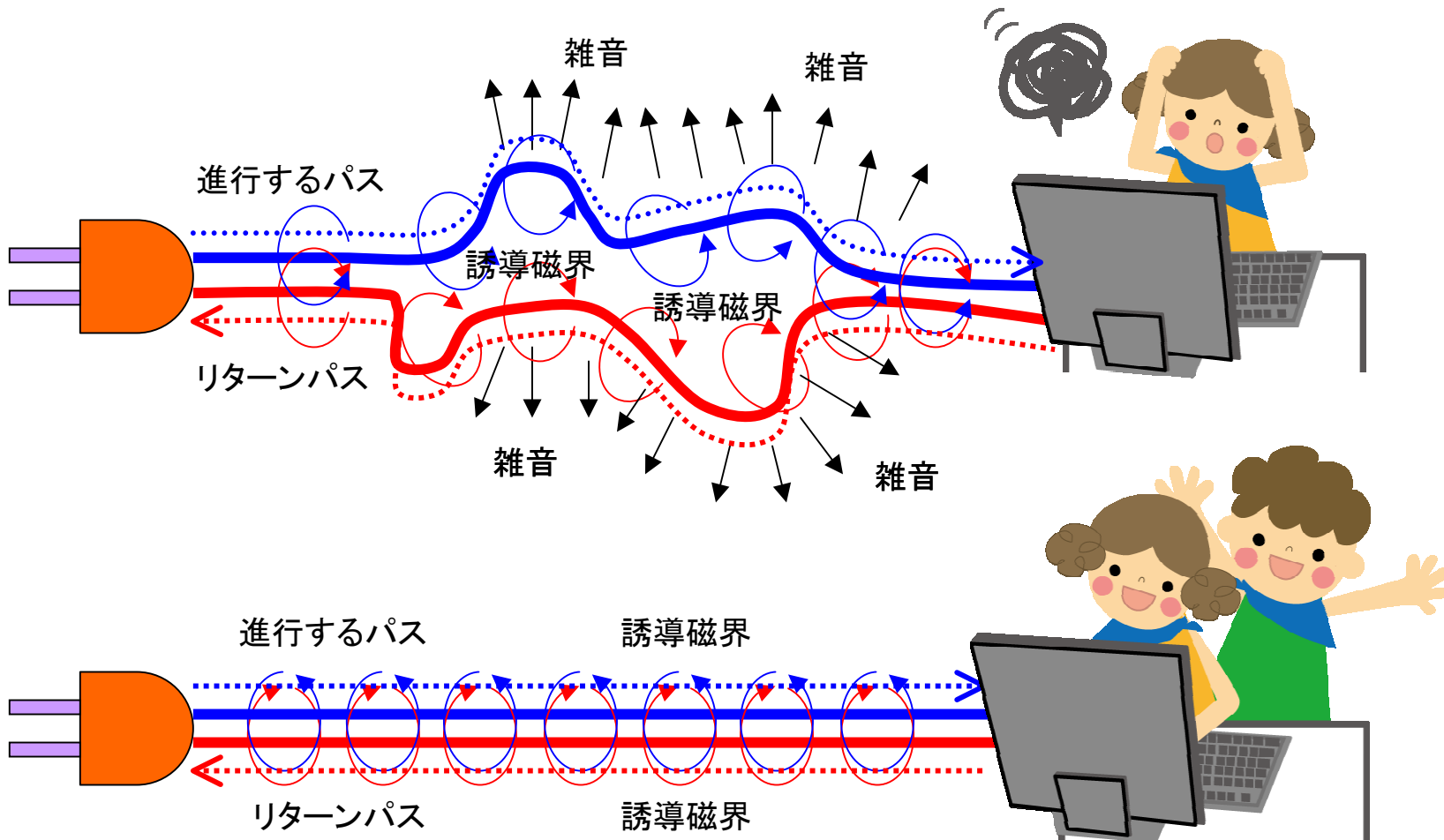




# アンテナと伝送路は、共に2本の電線で実現できる しかし、その振る舞いは異なる



# AC 100V 電源ケーブル



誘導磁界の双方の距離が近いとキャンセルされる。

# 平衡伝送ケーブル



AC 100V 電源ケーブル



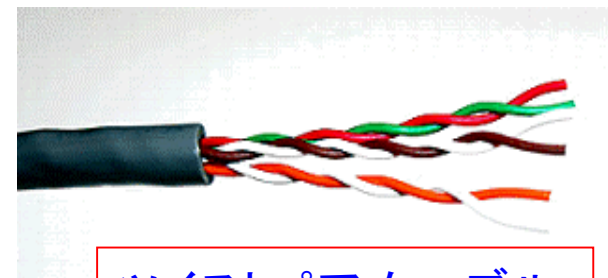
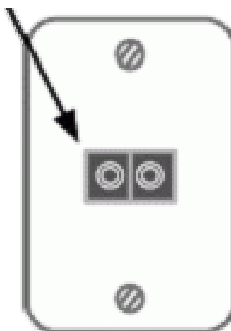
スピーカー用ケーブル

300 Ω 端子の例

昔のTVアンテナ用ケーブル



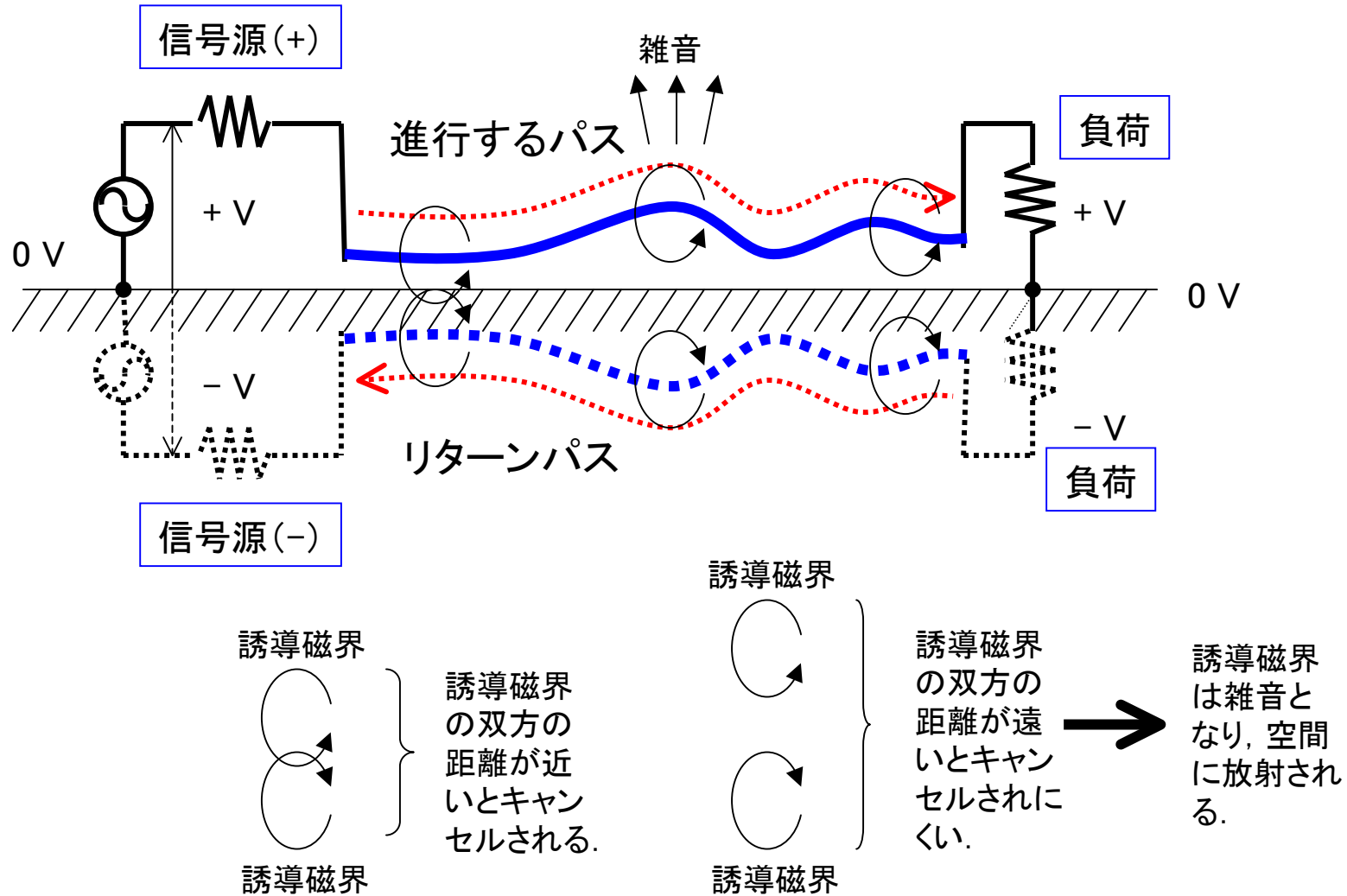
300 Ω リボンフィーダー



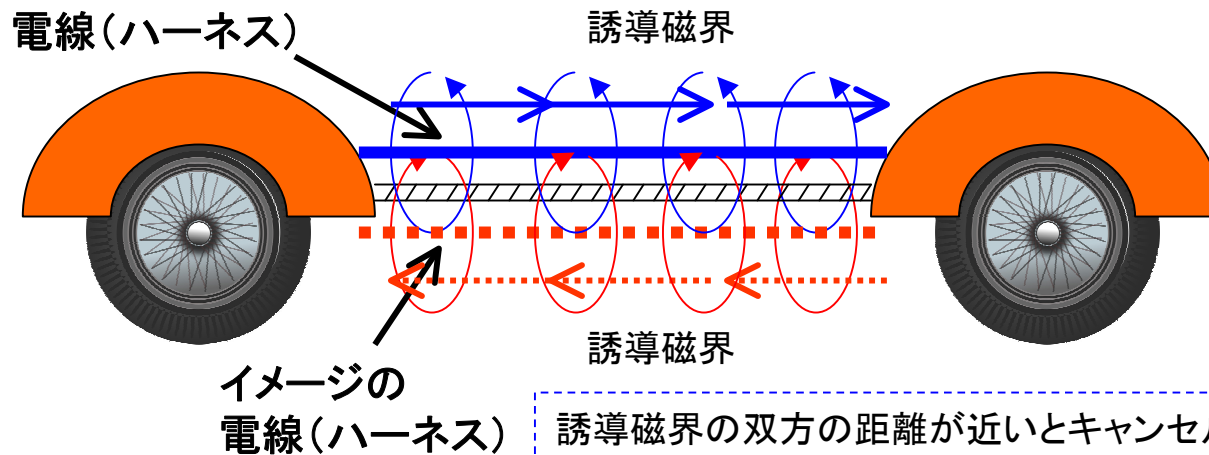
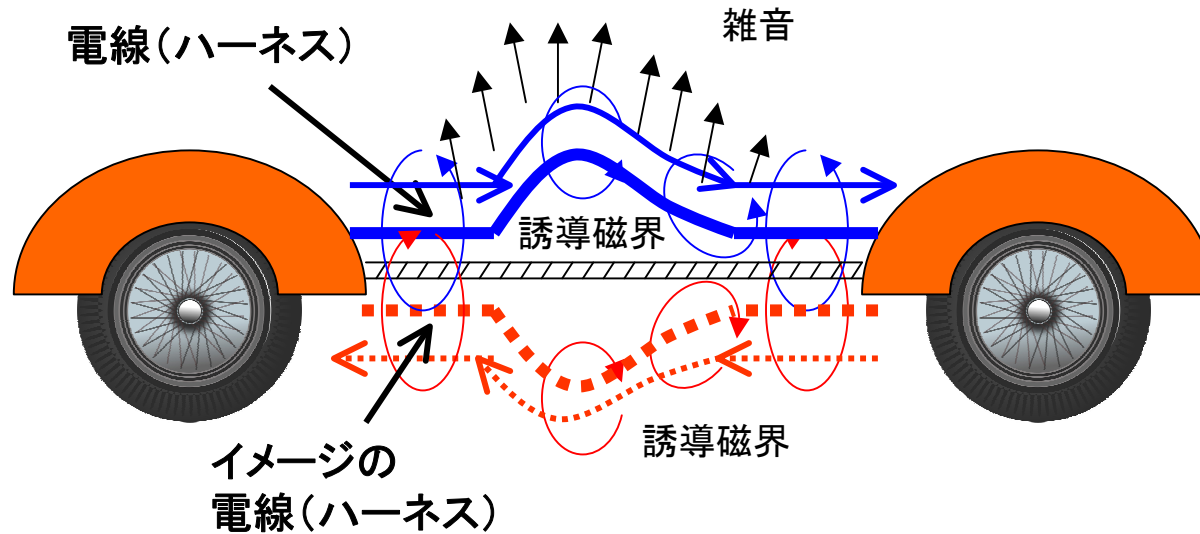
ツイストペア ケーブル

# 雑音対策

# 雑音が出やすい場所



# 自動車内の電線(ハーネス)の配線



# ご清聴ありがとうございました。

AMPLET Communication Laboratory



根目屋英之の著書

Hideyuki Nebiya

nebiya@amplet.sakura.ne.jp

AMPLET  
Communication Laboratory

2024年6月13日 5時限