

(2026.01 改訂版)

# 謎解き電磁気学

～苦手な科目が好きになる～

唐沢 好男

## 〔電磁気学にはこんな不思議が〕

- ・ガウスの定理とガウスの法則、同じように見えるのに何が違うの
- ・観測者によって電磁界の見える景色が違う
- ・その結果、電磁力学（ローレンツ力）にパラドックスが
- ・ベクトルポテンシャルは透明人間
- ・磁界がないところにも電磁誘導は起きる
- ・変位電流は磁界を作らない
- ・電線の中、のろまな電子が光速でエネルギーを運ぶ
- ・帯電した棒磁石の周りにはエネルギーの還流がある  
(静電磁界にもエネルギーの流れが埋め込まれている)
- ・アンテナ素子を近づけると利得が上がる（スーパーゲインアンテナ）

---

本書の利用に関するルールと著者からのお願い

- 1) 本書の著作権は著者（唐沢）に帰属
- 2) PDF の複製や紙面の印刷は自由
- 3) 他の著作物への無断転載は禁止（\*）
- 4) 記述内容の引用については、出典(\*\*)を明示する

\*: 図面等の転載希望は e-mail: [karasawa@mail.ucc.jp](mailto:karasawa@mail.ucc.jp) まで（内容に関するコメントや質問等についてもこのアドレスに）

\*\*： 出典引用：唐沢好男，謎解き電磁気学，Open Access Book, TR-YK-075, Jan. 2023,  
[http://www.radio3.ee.ucc.ac.jp/ronbun/TR-YK-075\\_EM\\_Wonderland.pdf](http://www.radio3.ee.ucc.ac.jp/ronbun/TR-YK-075_EM_Wonderland.pdf)

## まえがき

この本は、学部で一通り電磁気学を学んだ人が、もう一回、電磁気学をしっかりとおさらいしたい、電磁気学の面白さを再発見したいと言う人向きにまとめた電磁気学啓蒙書である。学部授業で使われる電磁気学の教科書は組み立てが大体決まっており、面白さが見えてこないと感じる人が多いと思う。でもこの本は違う。電磁気学を学ぶ人に対して、電磁気学にはこんな不思議がある、こんな巧妙なからくりがある、と言う部分を掘り起こし、電磁気学、すなわち、マクスウェルの方程式が織りなす幽玄な世界を浮かび上がらせている。そして、その不思議、あるいは、パラドックス的なことの解決には、どうしても相対性理論を持ち出さないと辻褃を合わせることができない、逆に言うと、電磁現象には相対論的性質が随所に隠れている、ということである。本書の前半（第1章から第5章）はマクスウェルの方程式で表される電磁気学のおさらいに、後半（第6章以降）は、学習の過程で浮かび上がる様々な疑問を、相対論も武器にして謎解きの形で掘り下げている。故に、本書は決して入門書ではない。説明に必要な数式は省いていないし、ベクトル解析の最小限の知識を期待している。しかし、じっくり読んでもらえればわかるようにまとめたつもりである。基礎的なところから、ときどき奥深いところにも寄り道しながら、電磁気学の世界を案内するので、その景色をおおいに楽しんでほしい。

本書の副題を「苦手な科目が好きになる」としている。あえて「苦手」としたのは、著者の学生時代の電磁気学授業に対する挫折経験（単位を取るのに汲々とした）にある。「好きになる」はこの本の願いであり、意気込みである。晩年、縁あって電磁気学を教える立場になって電磁気学の奥を調べてゆくと、好奇心を呼び起こすこと、常識では受け入れがたいことなど、不可思議なことがいっぱい現れ、それと格闘しているうちに、電磁気学の魅力にとりつかれた。本書は、このときの著者の不思議探検をまとめている。好奇心溢れる皆さんであれば、絶対好きになると信じているので、騙されたと思って読んでほしい。

なぜ苦手意識が芽生えるのかと言うことと、それに対する本書での対処（→で表記）をまとめておく。

① 微分・積分、ベクトル解析など、法則などを表現する数学が難しい → 第1章に必要最低限のことをまとめているので、ここだけはおさらいしてほしい。式の展開が難しいのは微分や積分などの数学部分であって、それは電磁気学そのものではないと割り切る。重要なのは、式がどのようにして立てられたかと言うことと、得られた結果式がもつ意味であり、その説明に注力している。

② 内容や理屈が難しい → 電磁気学の躰きの始まりは、誘電体、磁性体、導電体などの媒質内での電磁界の振る舞いが出てくるあたり。本書ではこれには触れず、電磁気学の本質である自由空間での電磁現象を、4つの法則を中心にして体系的にまとめている。まずは自由空間での電磁気学を理解しよう。

③ イメージが掴みにくい → 電磁気学の主役は電界と磁界。目には見えない両者の関係を、あの手この手で説明している。その主役を支える脇役も一筋縄では行かない曲者揃い。ベクトルポテンシャル、電磁誘導、変位電流、ポインティングベクトルなど。これら曲者達に様々な角度か

らスポットライトを当て、その姿を浮かび上がらせている。

④ パラドックスが多い → 数ある電磁気学のパラドックスの背景には相対性理論が隠れている。でも、ここに出てくる話は相対論の入門、特殊相対性理論なので、ローレンツ変換を学べば大丈夫。アインシュタインが行った電磁力学の思考実験を一緒に考えよう。

⑤ 電磁気学（マクスウェルの方程式）を知らなくても情報通信の仕事に困らない → これは、著者自身が若いころ抱いていた感覚。でも、無線伝送を扱う第11章と12章で、その技術を電磁気学がしっかり支えている姿を見てほしい。

著者晩年の大学教員時代、担当した電磁気学の授業では、限られた時間の中で身に付けてほしい内容が盛りだくさん、時間に追われながらひたすら教えまくったと言うのが正直なところ。電磁気学は楽しいと言う思いを伝える余裕がなかった。定年後、著者自身にも時間的余裕ができ、電磁気学の奥深くに漲る不可思議が見えるようになって来た。同時に、教員としての現役時代、本来のそういうわくわく感を伝え切れていなかったという自責の念もこみ上げて来た。本書はその反省に立って、これならどうだと言う意気込みでまとめている。ただし、電磁気学の体系的な教科書ではなく、学びなおすときのヒントをつめている。好奇心は学びの原動力。読者の皆さんにも、ぜひ、電磁気学のからくりとその謎解きを楽しんでいただきたい。もう一度時計の針を巻き戻せるなら、また別な形の授業ができると思うが、それはかなわないこと。本書にその役割を託したい。

2023年1月

唐沢好男

(注:本書は以前に公開した Open Access Book 「電磁気学のからくり」の書き直し版(差換え版)である。このまえがきの記述も、本書の内容にも重複が多いが、そういう位置付けにある本としてみてほしい)

目次 (本文総ページ数 209 ページ)

1. 電磁気学を学ぶための準備 (ページ数: 15)  
～マクスウェル山への登頂を目指して～
  - 1.1 物理法則とは
  - 1.2 ベクトル解析
  - 1.3 物理量と単位
    - 1.3.1 電磁気関係の物理量
    - 1.3.2 MKSA 単位系と組立単位
  - 1.4 場の概念 (遠隔作用と近接作用)
  - 1.5 マクスウェル山の頂を目指して
  - 1.6 電磁気学創生のパイオニア
  
2. マクスウェルの方程式 (21)  
～4つの法則が織り成す電磁気学の不思議な世界～
  - 2.1 電磁気学の全貌
  - 2.2 電界と磁界
    - 2.2.1 電磁気学の基本物理量
    - 2.2.2  $E$ - $H$ 対応と  $E$ - $B$ 対応

ティータイム 電磁気学は砂上の楼閣?

  - 2.3 電束密度に関するガウスの法則
  - 2.4 磁束密度に関するガウスの法則
  - 2.5 電磁誘導の法則
  - 2.6 アンペア・マクスウェルの法則
    - 2.6.1 ビオ・サバールの法則
    - 2.6.2 アンペアの周回積分の法則
    - 2.6.3 電荷保存則
    - 2.6.4 変位電流

ティータイム マクスウェル・ヘビサイド方程式
  
3. 数学が支える電磁気学の法則 (19)  
～“ガウスの発散定理とガウスの法則”, “ストークスの定理とアンペアの法則”にみる定理と法則の  
関係～
  - 3.1 定義
  - 3.2 ガウスの発散定理
    - 3.2.1 ガウスの発散定理とは
    - 3.2.2 ガウスの発散定理からの帰結
  - 3.3 ガウスの発散定理が支える電磁気学の法則
    - 3.3.1 クーロンの法則
    - 3.3.2 電界に関するガウスの法則

ティータイム 幻のキャベンディッシュの法則

  - 3.4 ストークスの定理
    - 3.4.1 ストークスの定理とは
    - 3.4.2 2次元問題による直感的な理解
  - 3.5 ストークスの定理が支える電磁気学の法則
    - 3.5.1 アンペアの法則

- 3.5.2 変位電流 (アンペア・マクスウェルの法則)
- 3.5.3 保存場
- 3.6 ガウスの発散定理とストークスの定理のアナロジー
- 3.7 時空間で双対な二つのベクトル関数が作り出す世界
  
- 4. 電磁波 (17)
  - ～様々な視点で見る平面波伝搬～
  - 4.1 平面波の伝搬
  - 4.2 導波路内の電磁波と群速度
    - 4.2.1 境界条件
    - 4.2.2 伝搬モード
    - 4.2.3 位相速度と群速度
  - 4.3 LC 伝送線路と平面波伝搬のアナロジー
    - 4.3.1 伝送原理
    - 4.3.2 LC 伝送線路
    - 4.3.3 円管同軸線路
    - 4.3.4 自由空間における平面波の伝搬
  - ティータイム ヘルツによる電波の実証
  
- 5. ベクトルポテンシャル (19)
  - ～透明人間の正体を探る～
  - 5.1 ベクトルポテンシャルの描像
  - 5.2 スカラーポテンシャルとの関係
    - 5.2.1 ポテンシャルの意味
    - 5.2.2 両ポテンシャルの類似性
  - 5.3 ベクトルポテンシャルの実在問題
  - 5.4 電磁ポテンシャルで表すマクスウェルの方程式
    - 5.4.1 ゲージ変換
    - 5.4.2 電磁ポテンシャルを用いたマクスウェルの方程式
    - 5.4.3 ローレンツゲージを用いたマクスウェル方程式の美しい形
  - 5.5 アンテナの放射界
  - 5.6 平面波伝搬：もう一つの描像
    - 5.6.1 平面波伝搬のおさらい
    - 5.6.2 ベクトルポテンシャルを主役とする視点
  
- 6. 電磁気学と相対論 (26)
  - ～観測者によって異なる電磁界の景色、共通する法則～
  - 6.1 不思議発見
  - 6.2 慣性系の座標変換
    - 6.2.1 物理法則は慣性系に対して不変であるべき
    - 6.2.2 ガリレイ変換では
    - 6.2.3 ローレンツ変換では
  - 6.3 マクスウェルの方程式のローレンツ変換
  - 6.4 ローレンツ力のローレンツ変換
    - 6.4.1 ローレンツ力について
    - 6.4.2 共変性の確認

## 6.5 電磁気学のパラドックス

### 6.5.1 ケース 1 :

### 6.5.2 ケース 2 : 電流が流れる並行導線に働く力

### 6.5.3 ケース 3 : 電流と共に走る電荷に対する力

### 6.5.4 ケース 4 : 電流ループの中の電荷

## 6.6 電磁界解析の武器としての相対論

ティータイム アインシュタインの光時計

付録  $\mathbf{F}' = q\mathbf{E}' - \mathbf{v}' \times \mathbf{B}' \rightarrow 0$  の確認

## 7. 電磁誘導の法則 (18)

～ファラデーのパラドックスを考える～

### 7.1 電磁誘導の発見

### 7.2 電磁誘導の法則を表すマクスウェルの方程式

#### 7.2.1 磁束変化則

#### 7.2.2 相対性原理

#### 7.2.3 例題

### 7.3 磁力線切断則

#### 7.3.1 ファラデーの確信：起電力は導線が磁力線を切るときに生まれる

#### 7.3.2 検証

## 8. 変位電流 (12)

～「変位電流は磁界を作らない」って本当？～

### 8.1 変位電流は磁界を作らないって本当？

### 8.2 磁界の由来は定まらない

### 8.3 半直線電流が作る磁界に見る不思議

### 8.4 ビオ・サバルの式の意味

### 8.5 マクスウェルの方程式の一般解

### 8.6 「作る」ということの意味：因果関係と相互関係

### 8.7 まとめ

## 9. 電線に流れる電流の速さ (14)

～歩みの鈍い電子が電気信号を超特急で運ぶ～

### 9.1 電気エネルギーの伝送

### 9.2 直流電力の伝送

### 9.3 分布定数回路の基本伝送モード

#### 9.3.1 基本伝送モード

#### 9.3.2 不整合負荷が接続される場合の伝送特性

### 9.4 エネルギー伝送の描像

### 9.5 電荷と電子の移動速度

ティータイム 回路素子へのエネルギーの流入

## 10. ポインティングベクトル (18)

～静かなところにもエネルギーの風が吹く～

### 10.1 電磁気学のパラドックス

### 10.2 ポインティングベクトルとは

### 10.3 静電磁界におけるポインティングベクトルの推論

- 10.3.1 対象環境と前提条件
  - 10.3.2 静電磁界のポインティングベクトルとエネルギー流
  - 10.4 電磁エネルギー流動のメカニズム
    - 10.4.1 電界と磁界が直交している場合
    - 10.4.2 電界と磁界が非直交の場合
  - 10.5 交流信号に対する分布定数回路では
  - 10.6 導波管内の電磁界とエネルギー伝送
  - 10.7 動く観測者がみるエネルギー流動
  - 10.8 電磁界の描像
- ティータイム 本当はどうか？

## 11. フリスの伝達公式 (16)

～電波の送受信の仕組み～

- 11.1 ワイヤレス情報伝送
- 11.2 アンテナの働き
  - 11.2.1 アンテナ利得
  - 11.2.2 実効面積
  - 11.2.3 アンテナ利得と実効面積の関係
- 11.3 フリスの伝達公式：送受信電力の関係
- 11.4 フリスの伝達公式の構造分析
- 11.5 受信電力の電磁気学的算定とfrisの伝達公式との関係
  - 11.5.1 フリスの伝達公式を利用する
  - 11.5.2 電磁気学的算定
  - 11.5.3 両算定手法を結ぶもの

## 12. アレーアンテナの利得 (14)

～スーパーゲインアンテナのからくり～

- 12.1 アレーアンテナ利得のパラドックス
  - 12.2 半波長ダイポールアレーで考えてみよう
    - 12.2.1 相互インピーダンス
    - 12.2.2 2素子同相給電ブロードサイドアレー
    - 12.2.3 2素子逆相給電エンドファイヤアレー
  - 12.3 アレーアンテナの利得とスーパーゲインアンテナ
    - 12.3.1 アレーアンテナの利得
    - 12.3.2 最大利得
    - 12.3.3 エンドファイヤアレーに見るスーパーゲイン特性
- ティータイム レクテナアレーとインコヒーレント合成

## 付録 電磁気学の不思議発見 (電波技術協会報 FORN 誌の連載記事)

1. 不思議発見の旅に出よう
2. 電磁気学を支える相対性理論
3. 静電磁界に吹くエネルギーの風
4. ファラデーに学ぶ電磁誘導の法則
5. ベクトルポテンシャル：透明人間の正体
6. 変位電流は磁界を作らないって本当？
7. 電波送受信のからくり

## 8. スーパーゲインアンテナのからくり

本書は章毎に、PDF で公開しています。

[PDF 入手のページはこちら](#)