

エネルギーの流れを 中心とした

電磁気学の統一的理解

—電気回路と電磁場の統一的理解に向けて—

日本エネルギー環境教育学会第12回全国大会

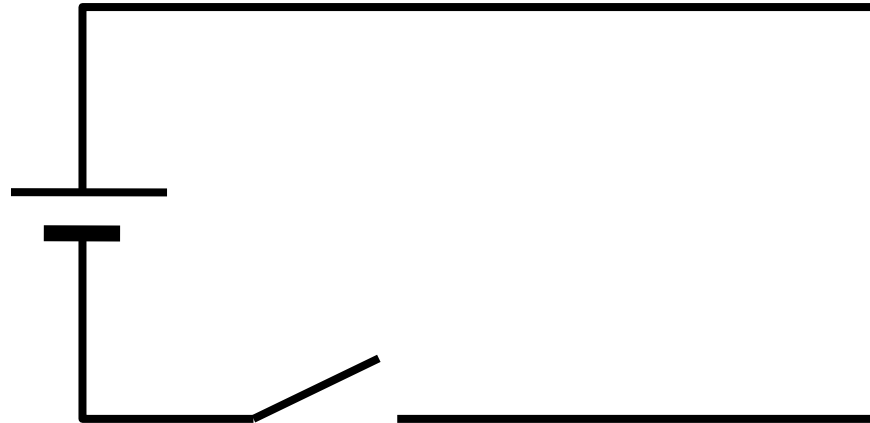
常葉大学 出口 憲

発表内容

- はじめに一問題提起
- 電磁気におけるエネルギー
- 電気回路のエネルギー伝達の誤解
- 電気回路でのエネルギーの流れ
- 電磁場と電気回路の統一的な理解
- まとめと今後の課題

はじめに一問題提起

- 以下の回路でスイッチを閉じたら電流はどこから流れるか？



電磁気学の内容

- 小学校：磁石、電気回路
- 中学校：電気回路、電流と磁場（磁界）、電磁誘導
- 高校：クーロン力から電場・磁場、電気回路
- 大学：電磁気学では電磁場が主役→マクスウェル方程式

問題提起

- 電気回路では電圧（電位差）、電流が主役
- 電磁場では電場、磁場が主役
- 電気回路では電場、磁場はあまり登場しない
- 電気回路の話と電磁場の話が繋がっていないように思える→気持ち悪い

電磁場のエネルギー

- 電磁場とは空間が変化した状態（時間・空間の関数）
- 電磁場そのものがエネルギーを持つ
- 当然、エネルギー保存則に従うはず
- ただし、電磁場は時間・空間で変化し、単純な形でエネルギーが保存しない

エネルギー保存則の一般化

- ある場所であるエネルギーが変化する場合
 - あるエネルギーが別のエネルギーに変化
 - 他から（へ）エネルギーが流入（流出）
- 一般的なエネルギー保存則

ある場所のエネルギーの時間変化

= 別のエネルギーへ変化

+ エネルギーの流出入

電磁場のエネルギー

- 電磁場が空間に持つエネルギー

$$= \text{電場の2乗}/2 + \text{磁場の2乗}/2$$

- 電磁場のエネルギーの流れ

$$= \text{ポインティングベクトル} : \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

- 電磁場のエネルギー変化

= ジュール熱や力学的なエネルギーなどへ変わる

電気回路のエネルギー伝達の誤解

- 「電気回路では電流がエネルギーを運ぶ」というのは正しいか？
- 結果だけ見るとそう考えても間違いではない
- だが、正確に考えるとエネルギーを運ぶのは導線の周囲にある電磁場
- 「電流がエネルギーを運ぶ」という概念は実は間違い

電気回路と電磁場の関係

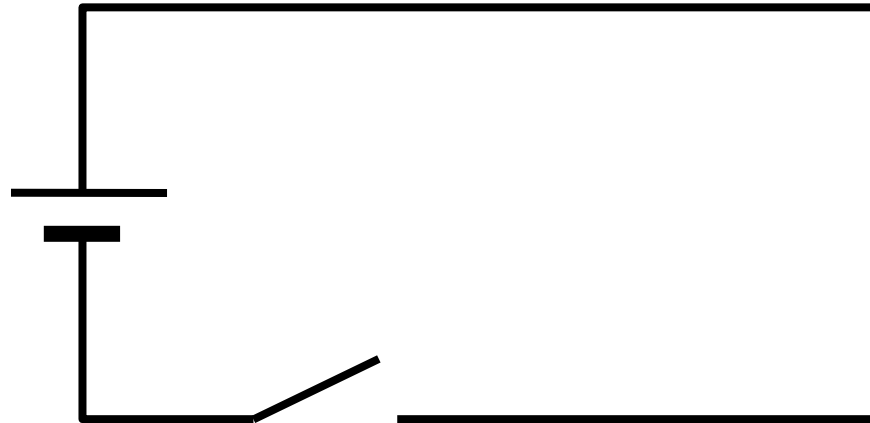
- 抵抗：電磁場のエネルギーがジュール熱に変わる場所
- コイル：磁場のエネルギーが集まる場所
- コンデンサー：電場のエネルギーが集まる場所
- 電源：電磁場のエネルギーを発生させる場所
- 電気回路理論は電磁場を集中定数（大きさを考えない）で置き換える近似

電気回路と電磁場の関係

- 電気回路理論は電磁場を簡単に扱うための近似
- 電磁場はベクトルなので扱うのは大変
- 電気回路では電流と電圧という量で記述可能
(スカラー：中学生にもわかる)
- マクスウェル方程式から考えると、
 - 磁場を線積分すると電流
 - 電場を線積分すると電圧(電位差)

電流はどこから流れるか？

- 電気回路は回路の大きさを考えない近似なので、電流がどこから流れるかを考える場合、無理がある！



伝送線路という考え方

- 電気回路を現実に近づける = 伝送線路：分布定数
- 導線の色々な場所に抵抗、コイル、コンデンサーなどが分布していると考える近似
- 電気回路の大きさを考えるので、電流が時間をかけて流れる場合を扱える
- 海底ケーブル、ネットワークケーブルなどの解析
- 電磁場を直接扱わず、電気回路的に考える近似理論

電磁場で考える必要性

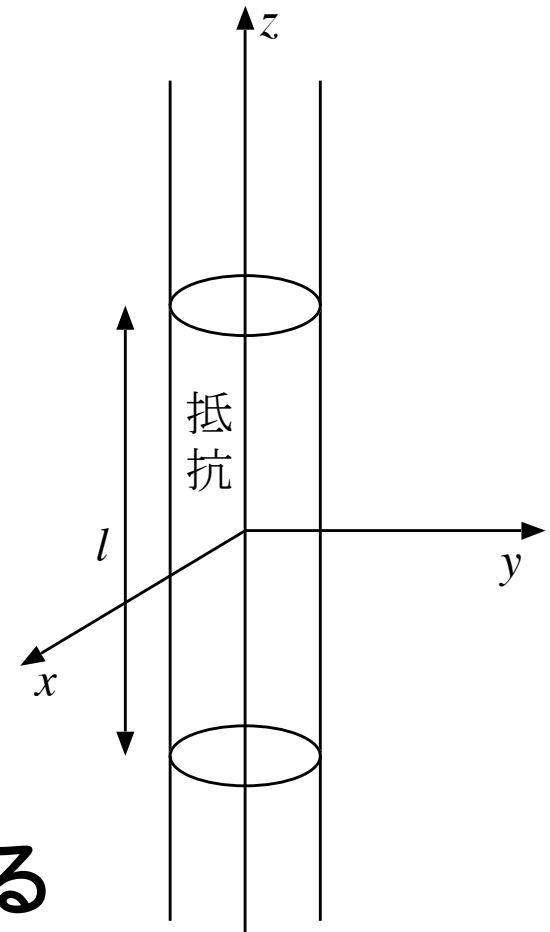
- マイクロ波の伝送に用いられる導波管は電気回路的に扱えない
- 電流と電圧という概念は、TEM（電磁場の進行方向と電場と磁場が互いに直交する波）の場合のみ使える
- 一般的な場合、電磁場を直接考える必要あり

電気回路でのエネルギーの流れ

- 電気回路の周囲に電磁場が存在する
- 電磁場のエネルギーの流れであるポインティングベクトルを計算してみる
- 今回は簡単のため定常電流（直流）の場合のみ

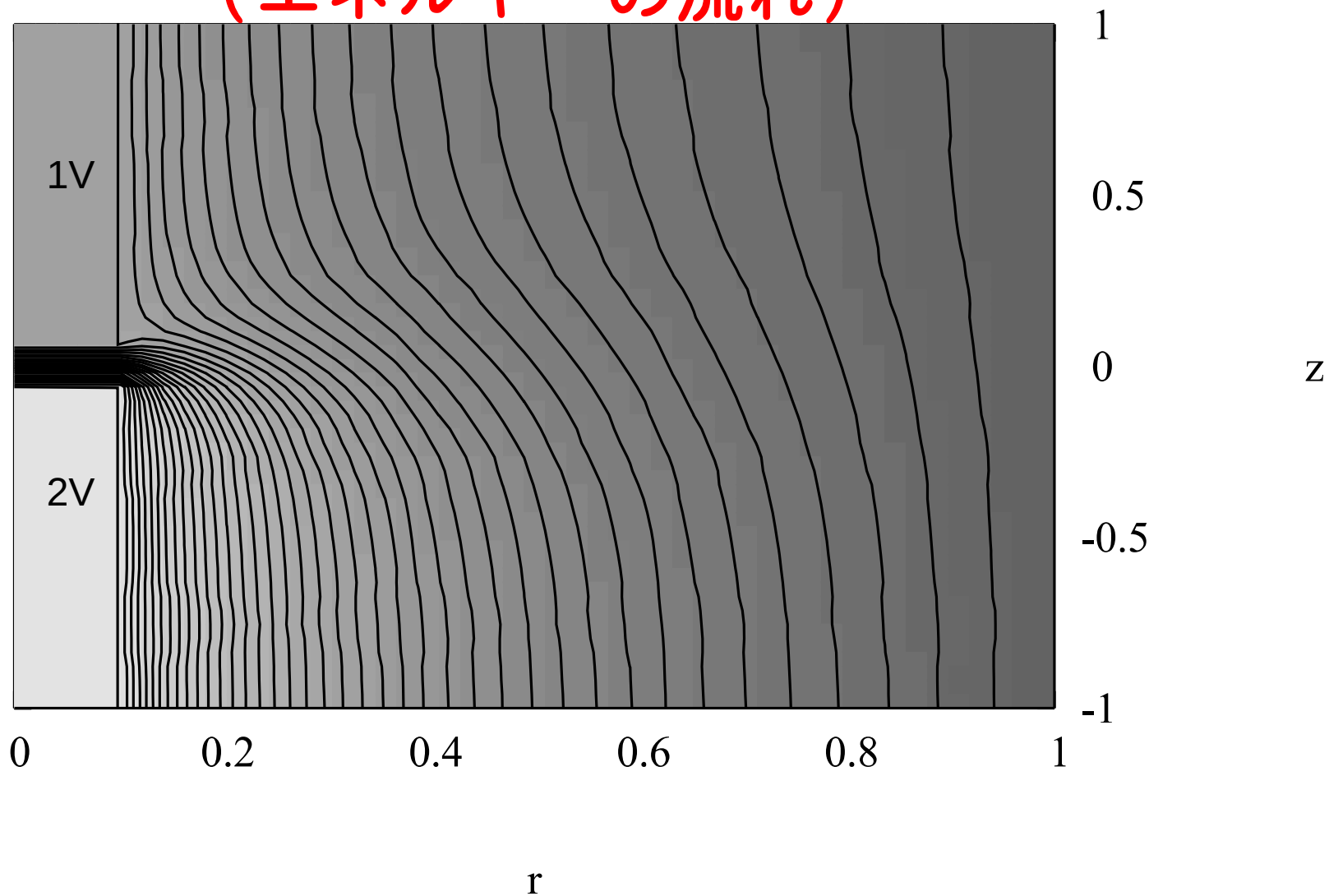
モデル設定

- 無限に長い半径 a の導線
- 中心は z 軸に沿っている
- $|z| \leq \frac{l}{2}$ の範囲だけ抵抗がある
- $z = \infty$ に - 電極
- $z = -\infty$ に + 電極
- 一定の直流電流 I が流れている



グラフで考える

ポインティングベクトルの流線
(エネルギーの流れ)



計算結果から分かること

- 電磁場のエネルギーは導線周囲の何もない空間を伝わる
- 抵抗でジュール熱として消費される電磁場のエネルギーは、抵抗周囲の空間から流れ込んで供給される
- 抵抗がないところでエネルギーの消費はないため、エネルギーは流れ込まない

つまり…

- 抵抗にエネルギーを運ぶのは電流ではない
- 抵抗に流れ込むエネルギーの流れ = ポインティングベクトルを積分すると電力 = 電流 × 電圧と等しい
- 中学で習う電力と同じ結果だが、考え方は違う
- 小中高で習うのは電気回路理論 = 近似理論
- 電気回路でエネルギーを運ぶのは回路の周囲の電磁場

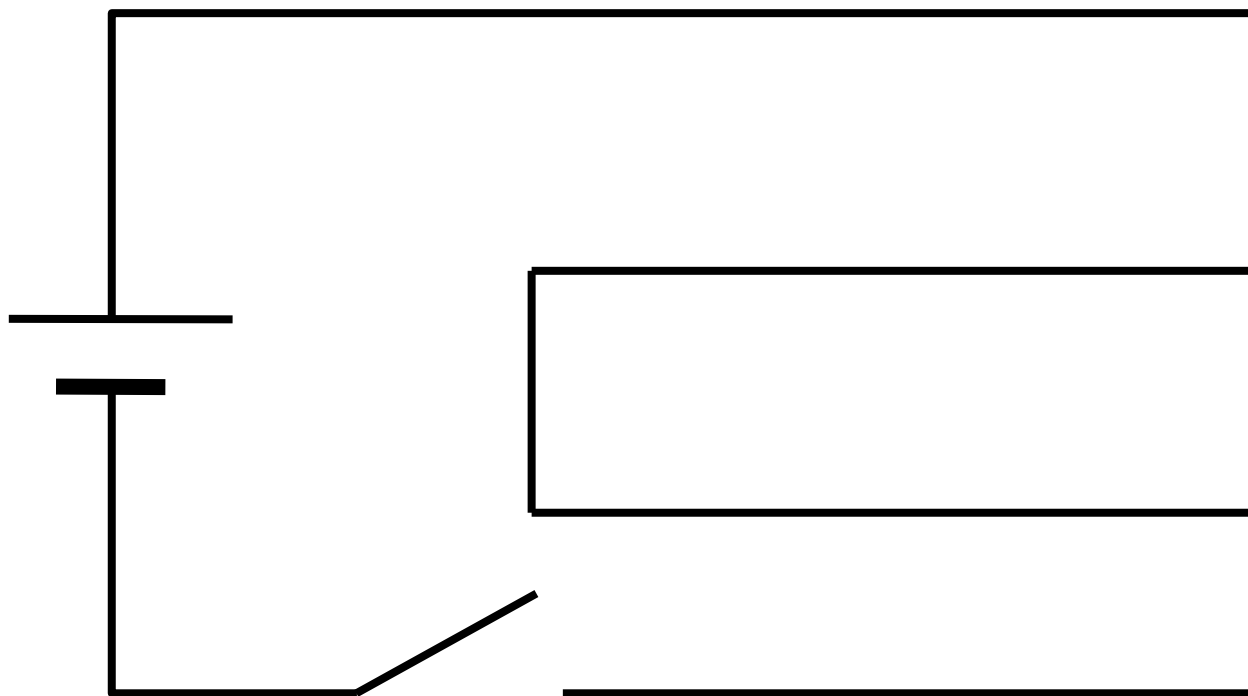
今までのまとめ

- エネルギーを運ぶのは電磁場であり電流ではない
- 結果だけ見ると、電力 = 電流 × 電圧なので電気回路理論は有効な考え
- 電流がどこから流れるかというような問題を考える場合、電気回路理論は有効でない

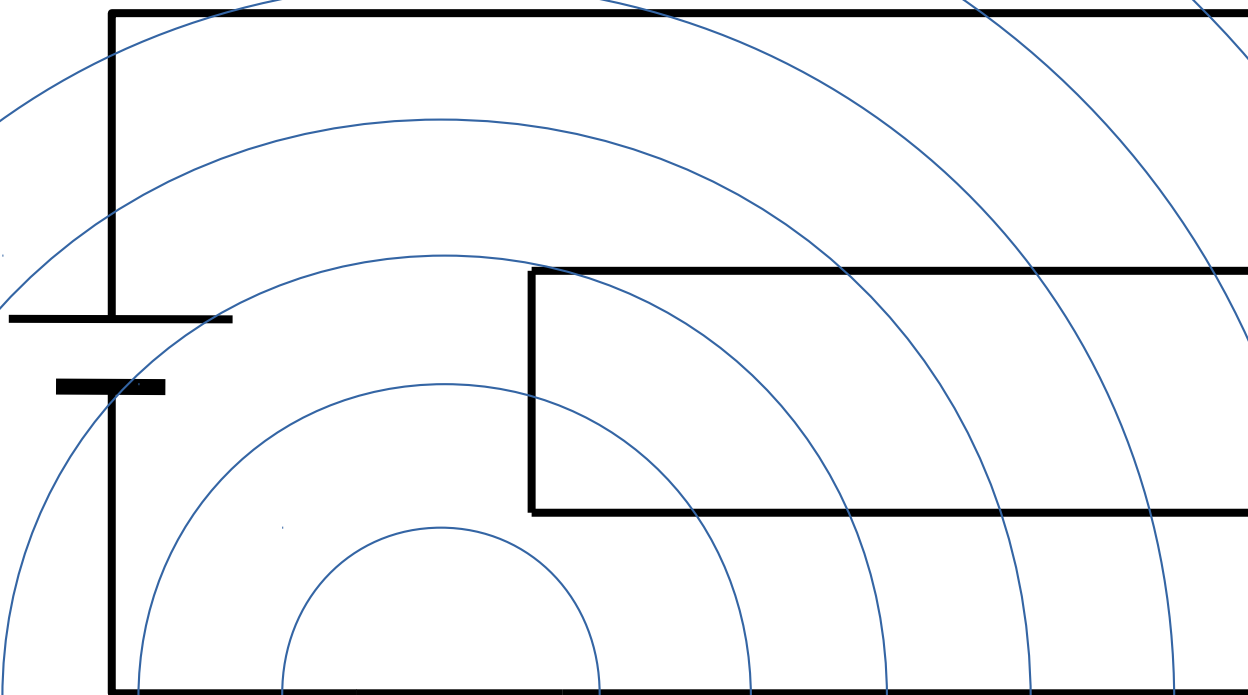
電気回路と電磁場の統合

- 導線の周囲にある電磁場がエネルギーを運ぶ
- 電磁場がエネルギーを運び、導線で電流に変わる（テレビやラジオのアンテナと同じ）
- スイッチを入れるとその周辺の電磁場が変化
- 電磁場の変化は周囲に光速で伝わる
- 電磁場の変化により導体に電流が流れる \Leftrightarrow 導体の電流はさらに電磁場を発生させる

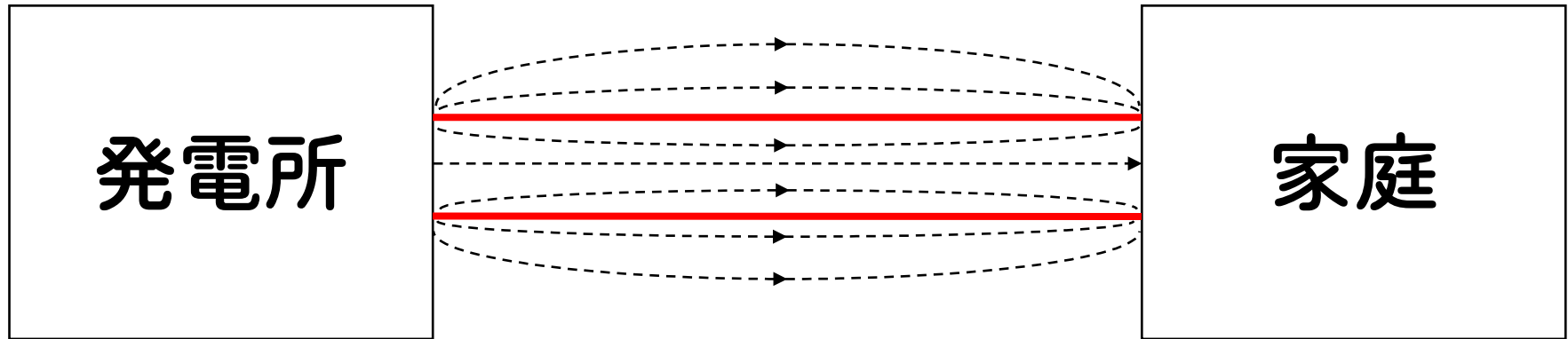
電流はどこから流れるか（予想）



電流はどこから流れるか（予想）



送電のエネルギーの流れ



赤い実線が送電線、破線がエネルギーの流れ
送電線周囲の空間をエネルギーが伝わる

まとめと今後の課題

- 電気回路理論：電磁場から見ると近似
- 電磁場がエネルギーを持ち、エネルギーを伝える→直流の電気回路から電磁波の伝搬まで電磁場のエネルギーで統一的に理解できる
- もっと一般的な場合を考えたい（物理屋としてはなるべく厳密に考えたい）

参考文献等

- A. ゾンマーフェルト、伊藤大介 訳「ゾンマーフェルト理論物理学講座第 3 巻・電磁気学」、講談社、1969年
- 松田卓也「電流のエネルギーは電線の外を流れる」、
<http://jein.jp/jifs/scientific-topics/487-topic8.html>
- 松田卓也「間違いだらけの物理学」、学研教育出版、2014年
- R.P. ファインマン、R. レイトン、M.L. サンズ、戸田盛和 訳
「ファインマン物理学4・電磁波と物性」、岩波書店、1971年
- 詳細については、出口 憲「電力はどのように伝わるか」、
常葉大学教育学部研究紀要、2016年3
月、<http://ci.nii.ac.jp/naid/120005826635>