

# 電磁気学応用 ガイダンス：文字起こし

April 21, 2020

## [電気と磁気にまつわる現象-電磁気学と医療技術]

ご存じのように世の中の先端テクノロジーというのは電気と磁気の現象を利用しています。コンピューターやスマートフォンの中の情報処理というのは電場をつかって、半導体中の電子をうまく制御することによって行われています。もちろん wifi などの情報通信というのは電磁波にデジタル信号を載せて情報を提供しています。移動手段である電車も電気や磁気の利用したモーターで動いているわけなんですけど、最近では自動車の電動化、さらには飛行機さえも電動化しようという研究開発がなされています。1:48

この電磁気現象を利用したテクノロジーというのは当然私たちの健康を守る医療の分野でも利用されています。体脂肪率や心電図、そういったものを測る比較的簡単な装置から、超音波や MRI や X 線 CT などの診断画像化装置、こういったものも電気制御の塊です。2:12

また注意して頂きたいことは、電磁気学の知識というのは、ただ電気回路や電子回路といったエレクトロニクスの理解に必要なだけでなく、様々な既存の医療技術の仕組みを理解することでも必要です。さらに今後みずから新しい医療技術を開発しようとする場合、電気や磁気の現象を受け身に理解しているだけじゃなくて、それを活用できる力ということも必要になってきます。2:50

また身体の中で生じている様々な生命現象を明らかにする目的でも電気や磁気というのは非常に重要な情報源になります。特に脳をはじめとする神経回路網、脳から様々な電気信号を身体の中に送って我々は運動器というのを動かしています。視覚や聴覚といったものも、外部から入った光や音を生体センサーによって電気信号に変換して脳に伝えて情報処理をしています。3:28

私達の脳というのはいわゆるコンピューターとは仕組みが異なるんですが、天然のコンピューターであって、いま最先端の分野では、この脳の仕組みを理解して、さらに脳とよく似た脳型コンピューターをつくらうという開発も進められています。3:54

## [電気と磁気を利用した医療技術(診断編)]

それではここで電気と磁気を利用した医療技術を紹介します。4:00

医療技術といっても治療や診断技術や人工知能によるビックデータの解析だったり、薬の開発、手術道具やあるいは人工骨のような人工的な生体材料の開発など、様々な視点があります。今回取り上げるのは代表的な診断技術です。この診断技術を電気磁気の観点でまとめてみました。4:28

まず電場、静電場あるいは非常に低周波の電場を測定する技術として心電図や脳波計というのがあります。最近ではブレインマシーンインターフェースと呼ばれる、頭の中で考えたことを脳波を通して検出して機械(マシーン)を動かす、そんな技術が盛んにおこなわれています。まあ本当に脳波を測っていないケースも多くて、目の動きや周りの筋肉の電位を動かして外部のマシーンを動かす、そういうことも多くされています。 5:12

1980年代のクリントイーストウッドが主演している少し古い映画のファイアフォックスという映画(1982年)があります。冷戦時代に米軍兵士扮するクリントイーストウッドがソビエトが開発した最新戦闘機を強奪する、そんなストーリーです。でその最新戦闘機というのが、もちろん架空の戦闘機なんですが、ブレインマシーンインターフェースが導入されてて、スイッチや操縦桿やボタンというのが考えるだけで迅速に的確に操作できる、そんな機能をもったものです。もう40年ほど前の私が子供のころに観た映画なんですが、既に脳波を使って考えるだけでマシーンを動かすという概念というのが定着していて、それが近年少しずつ現実味を帯びてきています。考えるだけでテレビのチャンネルを変えたり、パソコンにテキストを書いたり、義足や義肢を動かしたりできるようになってきています。 6:29

次にMRIと脳磁計の話をしていきます。これは磁気と量子力学的な現象を利用した技術です。この2つの技術に関しては電磁気学だけではなくて、量子力学という現代の最先端の物理学を学ぶ必要があります。MRIにはfunctional MRIという脳機能を計測する技術があります。脳磁計と同様、脳のどこの部分をいま使っているか(活性化しているか)、そういったことがわかるような技術です。MRIと超音波というのは電波と呼ばれる電磁波の帯域を測定している技術です。また、光も電磁波の一種なんですが、とくに赤外光に関しては、最近コロナウイルス対策で空港にほとんど完備されているサーモグラフィと呼ばれるものがあり、発熱している人を自動的に認識できるようになってきています。 7:56

あと、光トポグラフィと呼ばれる技術は、まず、ある波長領域の赤外の光が頭蓋骨を透過するということがわかりました。そして、血液中のヘモグロビンに酸素が結合しているかしていないかということその赤外の分光でわかるということがわかりました。その2つの知識が融合して、非侵襲に頭蓋骨の外から赤外を当てて血流の酸素量を測れるようにしたという技術です。で、酸素量がわかると、脳のどの部分が活性化しているのかというのがわかります。つまり、脳機能というのを非侵襲に計測する技術です。この光トポグラフィというのは日立中央研究所の小泉さんという人が発明しました。その小泉さんという方は元々MRI, functional MRIのようなMRIの開発をしてきた人です。元々基礎物理の出身の人でこのMRIの開発に随分貢献したあと、さらにMRIの欠点である、もっと簡便に脳機能を測ろうということでこの光トポグラフィというのを発明しました。で物理学

の人が原理的に開発してきたというのは結構多くて、この MRI ももちろんそうですし、もうノーベル賞を4つぐらいとってるんですが、この MRI に関することも脳磁計もあと X 線に関して光トポグラフィも物理の人達が開発していった技術です。9:50

で、こちらの放射線の方は医療でよく使われていると思うのですが、レントゲンというのはほとんどの病院に導入されています。この画像化診断装置としては X 線 CT や PET というのがあるんですが、PET というのは positron emission tomography と呼ばれるものです。この PET というのは、これも脳の機能を画像化するもので、functional MRI や光トポグラフィと同じように脳機能の技術となります。PET の原理を簡単にお話しするとまず放射性物質を服用します。その放射性物質はたとえば元素の 1 部が放射性元素に置換したグルコース、まあ糖です。その放射性元素から陽電子、Positron という素粒子が放出されます。陽電子というのは電子と全く同じ質量なんですが、+ の電荷をもった素粒子です。電子の反粒子に相当します。この陽電子というのは不安定で、近くに電子があるとすぐくっついて無くなってしまいます。電子と陽電子がくっついて無くなってしまいうんですが、エネルギー保存則は満たされないとだめで、つまり元々の電子と陽電子の質量分だけのエネルギーというのが電磁波のエネルギーに変換されます。有名なアインシュタインの  $E = mc^2$  という法則です。この電子と陽電子の対消滅によって出てくる電磁波というのがガンマ線と呼ばれていて非常にエネルギーの高い電磁波です。このガンマ線を検出して、今どこにその放射性元素に置換されたグルコース(糖分)が、いま脳のどの場所にあるのかというのを判定して、脳の今考えているのがどの部分かというのがわかるようになっていきます。この PET というのが MRI や光トポグラフィと同様ブレインサイエンスの研究だけじゃなくて認知症の診断などにもつかわれています。12:22

## [電気と磁気は絡み合う]

ではちょっとだけ電磁気学の話をしてしまおう。12:30

皆さん高校物理で習ったファラデーの法則とアンペールの法則というものがあります。ファラデーの法則っていうのは磁場を変化させるとそこに金属の閉回路があれば起電力が生じて電流が発生するというものです。まあ磁場を変化させると起電力が発生する。本質的には電場が生じることとなります。電場の rotation と磁場の時間変化というのが等しいというマクスウェル方程式の1つに対応します。で、アンペールの法則っていうのは、これとは反対で、電流を流すと周りに磁場ができますよ。という法則です。これも本質的には電場によって磁場が生じますよ、ということに関係してきます。電場の時間変化というのが、磁場の rotation とこのような関係にあるというのがマクスウェル方程式の1つです。13:45

結局、電場の変化と磁場の変化というのが密接に絡み合うということが起こって、その結果、電磁波と呼ばれる、こういった電場と磁場が直交するような電磁気的な波動というのが生まれます。これを我々は電磁波、Electromagnetic wave と呼んでいます。14:17

電磁波というのは波長または周波数によって呼び名が変わります。しかし本質的には Maxwell 方程式に従う同じ物理現象です。先程の医療診断技術を電磁波の帯域別に見てみましょう。14:39

心電図や脳波、あるいは脳磁計といったものは、ほぼ静電場や静磁場に近い、極限に低い周波数の電磁気学を想定しています。したがってマクスウェルの方程式でいうと静電気学とか静磁気学という、4つの方程式のうち2つだけをつかえばよいような、時間変化のない電磁気学の話になってきます。一方 MRI や超音波、こういったものというのは電波と呼ばれる波長にすると1m ぐらいの帯域です。ラジオ波帯とかマイクロ波帯と呼ばれる帯域です。この帯域になりますと電場や磁場の時間変化というのが非常に重要になってきて、波長はまだ長いので波としての性質はそれほど顕著ではないのですが、時間変動する電場や時間変動する磁場というのをきちんと考えないとだめという領域になってきます。16:00

一方もう少し波長が短くなると、サーモグラフィとか光トポグラフィといった光の帯域になってきます。この帯域になってきますと波動の特徴が特に出てきます。さらに波長が短くなるとX線やγ線といった放射線になってきます。でもこの放射線になってきますと、波長が原子サイズのスケールになります。この放射線の帯域というともはや波というよりはエネルギーの高い塊の粒子とみなすことができます。まあ量子力学の言葉でいうと、光には粒子と波動の二重性というのがあります、両方の性質を電磁波はもっていて、この放射線の領域になるとどちらかという粒子性が顕著になる。電波や光といった領域になるとどちらかという波の性質が顕著になってきます。17:24

この波長の帯域、長い方からラジオ波、ラジオをつかうところをラジオ波と呼んでいて、携帯電話のところではマイクロ波という呼び方がされています。さらに波長が短くなるとミリ波となって、そのあと赤外光といって光の名前がつきます。ここでちょっと注意しないといけないのは、このミリ波というのは波長がミリだからミリ波と呼ぶんですけど、マイクロ波というのは波長はマイクロメートルではなくてセンチメートルです。まあ本来はセンチメートル波というべきなんですけど、元々は第二次世界大戦のときにこのラジオ波というのがすごい発展して、さらに周波数が高くなると波長が短くなるので、ラジオ波よりマイクロスコピック、すなわちより微小な波長の電波ということで、マイクロ波とつけちゃったんですけど、その後技術がどんどん発展していってもっと波長の短いミリ波、レーダーなんかにつかわれるミリ波が開発されました。マイクロ波はセンチメートル波なんですけど、電子レンジもマイクロウェーブと言われるようになって、もうこれは慣習的にマ

マイクロ波という名前になっています。携帯電話の電波もマイクロ波，wifi もマイクロ波です。まあこのマイクロ波とミリ波の順番というのを間違えがちなんですけどご注意ください。19:13

——ここから先は，マクスウェル方程式から始める電磁気学の意義とシラバスについて——