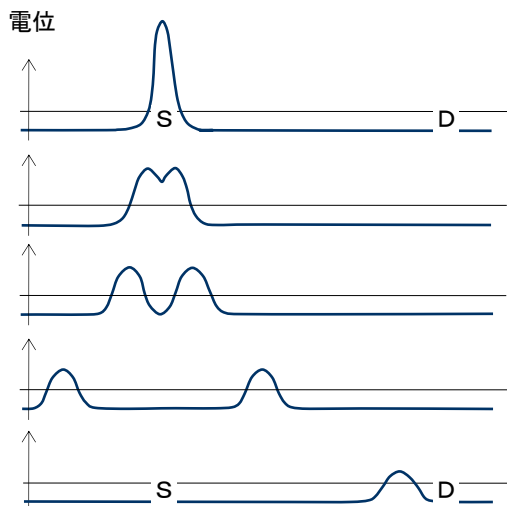
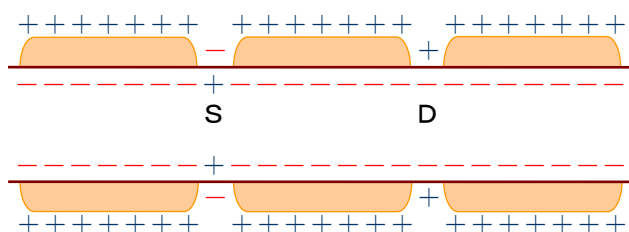


跳躍伝導についての 本当のお話

～ そもそも、「活動電流」などというものは初めから存在しない ～

しのだけ 著

(ver. 8.0)



① Na^+ Na^+ がSの付近に流れ込む(Sは軸索内の壁から数nmのところ)。

② Na^+ Sの付近にあった陽イオンが周囲に押しやられる。

③ Sの周囲の陰イオンが Na^+ に引き付けられ、Sの付近の「+」と「-」の電気が打ち消しあう。

④ ③の陽イオン濃度の高い部分は、さらにその周囲に陽イオン濃度の高い部分を生み出す。

もくじ

(0) はじめに	2
(1) いくつかの教科書の記述内容	2
(2) 教科書の記述の問題点	4
(A) 一つ目の問題点／(B) もう一つの問題点	
(3) 物理の学習	7
(A) 電荷と電気量／(B) クーロンの法則／(C) 電場／(D) 電位／	
(E) 電位と電位差(電圧)／(F) 導体内部の電場と電位／(G) コンデンサ／	
(H) 電流／(I) 導線中の電子の移動速度／(J) 溶液中のイオンの移動速度／	
(K) 神経繊維内のイオンの移動速度／(L) 波	
(4) いよいよ、跳躍伝導についての本当のお話	16
(A) まずは、神経繊維内の伝導から／(B) 次に、神経繊維の外での現象	
(5) 「活動電流」などというものは存在しない	19
(A) 電荷が通過しなければ、電流は流れない／(B) 「活動電流」のイオンの流れを説明できない	
(6) 跳躍伝導だと、なぜ伝導速度が大きいのか	22
(7) 興奮はどこまで伝えられるか	24
(8) 生物の進化との関連で考えてみました	25
(9) 神経繊維が太いほど、なぜ伝導速度が大きいのか	25
(A) 第1のタイプ(無髄神経繊維)の場合／(B) 第2のタイプ(有髄神経繊維)の場合／	
(C) 「軸索が太いほどイオンチャンネルがたくさん分布しているから、伝導速度が大きい」という考え／	
(D) 「軸索が太いほど電気抵抗が小さくなり、伝導速度が大きくなる」という考え	
(10) 無髄神経繊維の伝導を説明するところから、すでに間違いが始まっている	28
(11) なぜ、教科書の記述は、奇妙な(理解しにくい、実は間違っている)説明になってしまったのか	30
(A) 髄鞘の部分の電荷を無視したことが、最大の原因／(B) 「まず電流ありき」から出発した／	
(C) 「閉じた回路」を作る必要はない／(D) 「電気回路モデルで電流が流れるから」は、本末転倒	
(12) 付録(本文に対する追加および補足の説明)	31
(付録1) (2)(B)の記述内容に対する追加説明／	
(付録2) (6)についての補足説明／(付録3) 有髄神経繊維の断面の顕微鏡写真／	
(付録4) ケーブル理論／(付録5) ケーブル理論を神経繊維に適用できない理由／	
(付録6) 「遠くまで電流が流れる」という表現に置き換えるところから、誤りの一歩が始まる	
(13) おわりに	38

このレポートは、最初から順に読み進めていただくことを前提に記述しています。できるだけ、途中をとばしたりしないでお読みください。なお、とくに下記の項目には、私の主張するところが端的に示されています。

(4) いよいよ、跳躍伝導についての本当のお話 (A) (B)

(5) 「活動電流」などというものは存在しない (A) (B)

(10) 無髄神経繊維の伝導を説明するところから、すでに間違いが始まっている

(12) 付録(本文に対する追加および補足の説明) (付録5) (付録6)

(0) はじめに

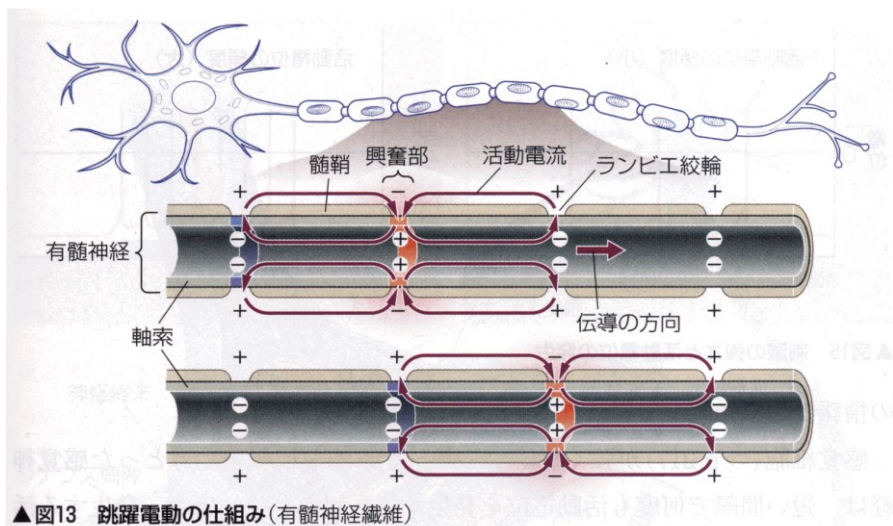
私は、高等学校で物理と化学を担当していました(2014年に退職しました)。何十年と教師をやってきましたが、生物だけは教える気もなかったし教えるはずもありませんでした。ところが、最後の勤務校となる学校に赴任してきて2年目に、諸般の事情から生物Ⅰを担当しなければならないことになってしまい、四苦八苦しながら授業を進めていました。そんな中で、3学期になって跳躍伝導という現象を説明することになり、教科書を読んでいくと、物理を専門とする私の目にはとても奇妙な(理解しにくい、実は間違っている)説明のされているところが2か所ありました。使用していた教科書は第一学習社のものですが、他の出版社の教科書の記述内容もほとんど同じであることがわかりました。

このレポートは、跳躍伝導という現象についての、高校生物教科書の奇妙な(理解しにくい、実は間違っている)説明を指摘し、正しい考え方を紹介することを目的としています。「生物の教科書が間違っているなどと、物理の教師が何を偉そうに言っているのか」とお叱りを受けそうですが、最後まで読んでくだされば、私の考え方が正しいことを理解していただけるものと確信しています。

(1) いくつかの教科書の記述内容

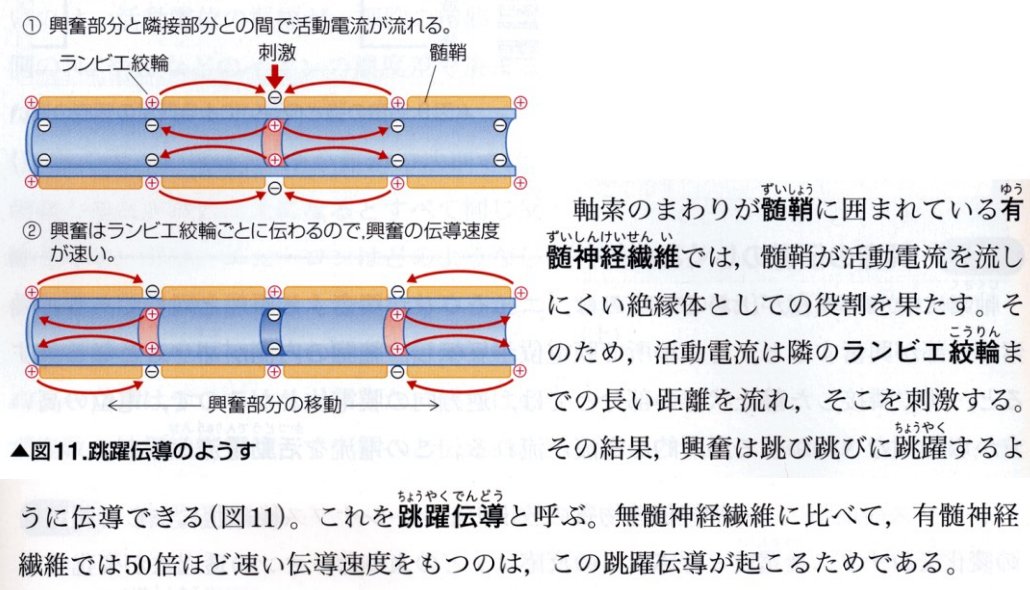
上記のように、私が生物を担当したのは「生物Ⅰ」「生物Ⅱ」という科目構成の時代でした。現在は教育課程が新しくなっていて「生物基礎」「生物」という科目構成になっています。「生物Ⅰ」「生物Ⅱ」の時代には跳躍伝導の分野は「生物Ⅰ」で学習していましたが、現教育課程の「生物基礎」「生物」では(「基礎」のつかない)「生物」で学習することになっています。そこで、ここでは現教育課程の「生物」の教科書の記述内容を抜粋してみることにしました。私が勤務していた当時の学校には、教科書採用のための見本として、啓林館、東京書籍、数研出版および第一学習社の4社の教科書がありましたので、これらの教科書を利用させていただきました。

啓林館の記述内容(平成24年12月10日発行[61 啓林館 生物 302])(p.227)：



有髄神経繊維では、興奮はランビエ絞輪の部分だけで起こり、絞輪から絞輪へと興奮はとびとびに伝導するので跳躍伝導とよばれる(図13)。髄鞘が電気的絶縁体として働くため、ランビエ絞輪部でのみ興奮が起こるのである。このようにすると伝導速度が非常に速くなり120m/秒にも達する(同じ太さの無髄神経繊維では、数m/秒の速さ)。

東京書籍の記述内容(平成25年2月10日発行[2 東書 生物 301])(p.224):



数研出版の記述内容(平成25年1月10日発行[104 数研 生物 303])(p.208):

■B 興奮の伝導速度 ■ 興奮

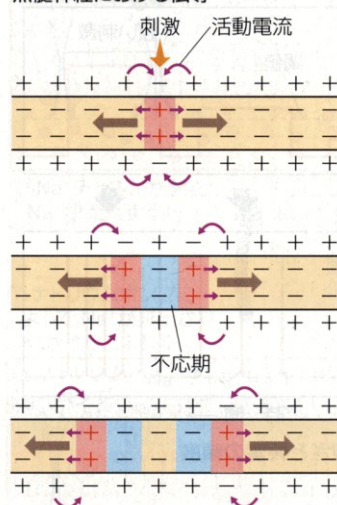
表1 いろいろな動物の伝導速度

が軸索を伝導する速度は、無髄神経繊維よりも、有髄神経繊維のほうがはるかに大きい(表1)。これは、有髄神経繊維では髄鞘が電気的な絶縁体

神経繊維	伝導速度(m/s)	直径(μm)	温度(℃)
ヤリイカ(無髄)	35	520	23
ザリガニ(無髄)	15~20	100~250	20
カエル(有髄)	40	20	24
ネコ(有髄)	110	20	37

としてはたらき、興奮が髄鞘の切れ目であるランビエ絞輪をとびとびに伝導するからである。このような伝導を跳躍伝導という(図8)。

無髄神経における伝導



有髄神経における伝導

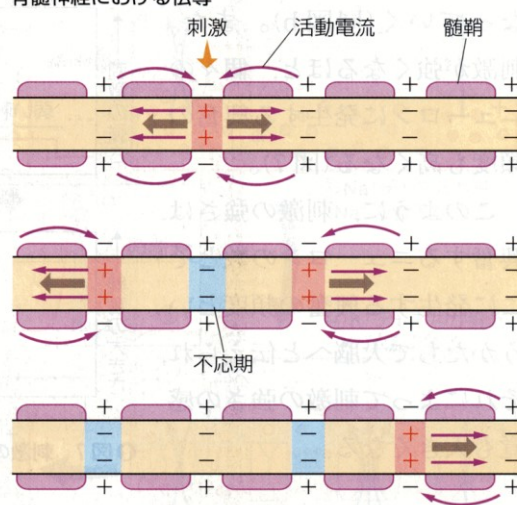


図8 興奮の伝導

①ほかに、温度が高く軸索が太いほど電気抵抗が小さくなり、伝導速度は大きくなる。

第一学習社の記述内容

(平成25年2月10日発行

[183 第一 生物 304]) (p.285):

有髄神経繊維では、髄鞘が電流を通しにくいので、興奮はランビエ絞輪からランビエ絞輪へ伝わる**跳躍伝導**がみられる(図22)。このため、有髄神経繊維の興奮の伝導速度は、無髄神経繊維に比べて大きい(表2)。伝導速度は、神経繊維の太さや温度に影響される。

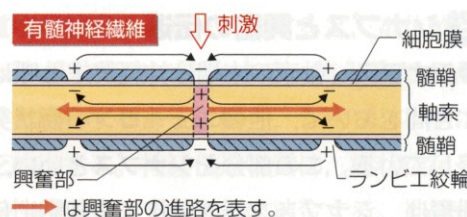


図22 跳躍伝導

表2 興奮伝導の速度

神経繊維	伝導速度 (m/秒)	太さ (μm)	測定温度 ($^{\circ}\text{C}$)
イカ (無髄)	25.0	600	18
カニ (無髄)	4.0	30	21
カエル(有髄)	30.0	15	22
ネコ (有髄)	100.0	15	37
ネコ (無髄)	1.0	0.8	37

(2) 教科書の記述の問題点

(A) 一つ目の問題点

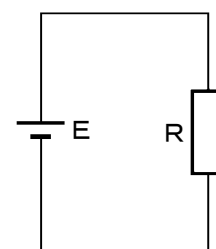
これらの教科書の記述のどこが問題なのでしょう。その一つ目は、どの教科書も、神経繊維内では興奮部からその隣のランビエ絞輪に向かって矢印で示されるような「活動電流」が流れ、神経繊維外ではその逆向きに流れるとしていることです。ここでは、神経繊維の内部を流れる「活動電流」について、これが右向きに流れる(つまり興奮が右向きに伝えられる)部分について考えることにします。また、興奮部の内側の「+」になっている部分(Na^+ が流れ込んだ部分)をS、興奮部の隣のランビエ絞輪の内側の「-」になっている部分をDと表記することにします。

このような電流が流れると考える人たちは、そのしくみを、Sの「+」とDの「-」が互いに引き合うからだとして説明します。ということは、その「+」は右向きに動き出し、「-」は左向きに動き出し、互いに引き合いながらSとDの間を移動していくと考えておられるようです。しかし、神経繊維内の細胞液中をイオンが移動するときには、水分子や他の陽イオン、陰イオンなどとの衝突や反発、引き合いを繰り返しながら、イメージとしては「ずるずる」という感じでゆっくりと移動していきます。つまり、**神経繊維内の細胞液中を移動するイオンの速さはきわめて小さく(※)、興奮が神経繊維を伝わる速さにはとても及びません。**

(※) このことについては、このあとの(3)物理の学習で具体的に計算してみたいと思います。

これに対して、「Sの『+』が直接Dにまで移動するのではない。S付近に興奮が生じたときSの電位はDより高くなり、この電位差によってSからDに向かう電流が流れる。つまり、SとDの間のイオンが全体として移動する。電流とはそういうものだ。」と考える人もおられます。このような、「SとDの間のイオンが全体として移動する」という考え方を、「ところてん方式」と呼ぶことにします。

図(2)-1を見てください。これは、電池Eに抵抗器Rをつないだだけの電気回路です。Eの下側が負極(つまりマイナス極)、上側が正極(プラス極)です。電池は電子を押し出す装置ですから、図のEの下側から電子が出てきます。このとき、この電気回路を構成している導線や抵抗器の中にもたくさんの電子があり、電池から電子が押し出されると導線や抵抗器の中の電子が一斉に動き出します。**回路中のすべての電子が、図の反時計回りにずるずると移動します。**ちょうど、ところてんを押し出すときのように(※)、ところてんの入った筒の上側を押すと、筒の中のところてん全体がずるずると動いて筒の下の方から順番に出てくる様子に似ていることから、このような回路の中の電子の流れを「ところてん方式」と呼ぶことにします。



図(2)-1

(※) <http://ja.wikipedia.org/wiki/ところてん>

神経繊維の中のイオンの移動の話に戻しましょう。神経繊維の中の**S**から**D**に向かって「ところてん方式」でイオンが移動するためには、移動するイオンは神経繊維の中の**S**から**D**までの全体（つまり軸索の断面全体）を埋め尽くしていて、これらのイオン全体がずるずると移動する必要があります。跳躍伝導のときに、このようなイオンの流れが生じるのでしょうか。神経繊維内に Na^+ が流れ込んで興奮が生じたとき、これらの Na^+ は神経繊維内全体（軸索の断面全体）を埋め尽くすほど大量には流れ込まないと言われています（※）。神経細胞膜の内側表面近くのごく狭い範囲に Na^+ が集中して Na^+ の濃度が急激に高くなった部分が**S**であり、したがって、確かに**S**の電位は**D**より高くなり、**S**と**D**の間には電位差が生じます。しかし、だからと言って、**S**と**D**の間にある陽イオン全体がこの電位差によって「ところてん方式」でずるずると**D**に向かって移動することなどありえません。**Sの狭い範囲に集中している Na^+ は、SとDの間にある陽イオンをSからDに向かって押し流そうとしますが、これらの陽イオンは必ずしもDに向かう必要はなく、S→Dに向かうライン上から外れた方向に押し出されてしまう**はずです。

（※） <http://ja.wikipedia.org/wiki/活動電位>

「**D**にある『ー』が引っ張るじゃないか」と言われるかもしれません。しかし、**S**付近に興奮が生じたときの**D**の「ー」は、**S**付近に興奮が生じる前の静止電位の際の「ー」のままです。**S**に Na^+ が流れ込んだからといって、その途端に**D**の「ー」が**S**と**D**の間の陽イオンを引っ張り始めることなどありえません。そんなことが起こるなら、「**S**付近に興奮が生じた」という何らかの情報が即座に（瞬時に）**D**に伝わったことになってしまいます。それはありえないことです。

なぜ、教科書の図のような「活動電流」が流れるという考えが生まれたのでしょうか。おそらくそれは、「まず電流ありき」だからではないかと思います。**S**付近に興奮が生じるとき軸索内に Na^+ が流れ込みます。イオンの流れは、すなわち電流です。また、**S**と**D**の間には電位差が生じますが、電位差があれば電流が流れるという思い込みが教科書の図のような「矢印で表される」電流を生み出したのだと思います。他にもいくつかの原因が考えられますが、それらについてはまとめて最後に述べてみたいと思います。

ところで、私はこれまでの説明の中で、教科書に描かれている「活動電流」は普通の電流として描かれているものと理解してきました。ここで言う「普通の電流」とは、図(2)-1のような直流の電気回路を流れる電流のことです。電流の強さが多少変化することはあっても、**一定の向きにイオンや電子がずるずると流れていく電流**（※）というイメージでとらえています。おそらく、このレポートをご覧の皆さんもそのような電流をイメージしておられると思います。

（※） 溶液中を流れるのがイオン、導体（金属、導線）中を流れるのが電子です。溶液中を電子が流れることはありません。

でも、ひょっとすると、教科書の執筆者の人たちは、教科書に描かれている電流はそんな電流ではないとおっしゃるかもしれません。電流にもいろいろな電流がありますから。しかし、もしも「そんな電流ではない」とおっしゃるのでしたら、教科書に描かれている電流がどんな電流なのかがわかるように分かりやすく説明をしておくべきだと思いますが、そのような説明はどこにもありません。したがって、これから後の私の説明も、教科書に描かれている電流は「一定の向きにイオンや電子がずるずると流れていく電流」というイメージで理解してよいものとして進めていこうと思います（※）。

（※） 実は、このあとの議論で「容量性電流」という特別な電流についての知識が必要になります。この電流については、**(3) 物理の学習**の中で説明します。

(B) もう一つの問題点

もう一つの問題点は、「髄鞘が絶縁体として働いている」という記述です。どんな細胞も基本的には絶縁体です。神経細胞の細胞膜も（イオンチャネルなどの細かな構造を気にしなければ）間違いなく絶縁体です。**絶縁体だからこそ、神経繊維の外側と内側で電位の違う状況が維持できているのです。**髄鞘もまた細胞

の一つです。この髄鞘がことさらに「絶縁体として働く」とあり、しかも「絶縁体だから」興奮が跳躍すると書かれているのです。これは何とも理解しにくい説明です。具体的に見ていくと、

啓林館では、

「髄鞘が電氣的絶縁体として働くため、ランビエ絞輪部でのみ興奮が起こるのである。」

東京書籍では、

「髄鞘が活動電流を流しにくい絶縁体としての役割を果たす。そのため、活動電流は隣のランビエ絞輪までの長い距離を流れ、・・・興奮は跳び跳びに跳躍するように伝導できる。」

数研出版では、

「髄鞘が電氣的な絶縁体としてはたらき、興奮が髄鞘の切れ目であるランビエ絞輪をとびとびに伝導する」

第一学習社では、

「髄鞘が電流を通しにくいいため、興奮はランビエ絞輪からランビエ絞輪へ伝わる跳躍伝導がみられる。」

とあります(※)。

(※) いずれも、前記の(1)いくつかの教科書の記述内容に抜粋した部分の記載内容です。

「活動電流」は軸索の中を軸索の方向に流れることになっています(どの教科書でもそのように描かれています)。その流れに逆らうように絶縁体があるのなら、「絶縁体としてはたらくから」は意味のある表現だと思います。たとえば、絶縁体が軸索の中のどこかにあってそのために「活動電流」が流れにくいというのであれば、「絶縁体」という表現が使われることに意味があります。あるいは、髄鞘は神経細胞膜を包み込むように巻きついているのですから、髄鞘を突き抜けて電流が流れない、つまり神経繊維の中から外へ電流が流れ出す(あるいは外から中へ流れ込む)のを妨げているというのであれば、これもわかります。

しかし、**ここでの絶縁体は「活動電流」の流れる方向と「平行」に存在している**のです。軸索内を流れる「活動電流」を包み込むように外側に巻きついている絶縁体が、その内側を流れる電流の流れ方に一体どのような影響を与えるというのでしょうか(※)。とくに東京書籍の教科書は、髄鞘が「活動電流を流しにくい」絶縁体としての役割を果たすと明言しています。髄鞘が「活動電流」を流しにくくしているのなら、髄鞘の存在は興奮の伝導を遅くすることになってしまいます。これは明らかに矛盾しています。

(※) ここでの「絶縁体」は、電流を通さない(あるいは、通しにくい)物質という意味です。

どの教科書も、「髄鞘が絶縁体だから『活動電流』が遠く離れたランビエ絞輪まで流れる」とか、「髄鞘が絶縁体だから興奮が遠く離れたランビエ絞輪まで(とびとびに)伝えられる」などというように、「髄鞘が絶縁体だから」跳躍伝導が起きると述べています。髄鞘が絶縁体であることに間違いはないのですが、そんなことよりも、髄鞘が神経細胞膜の外側を包み込むように巻きついていて、髄鞘が巻きついた部分の神経細胞膜にある Na^+ チャネルや K^+ チャネルなど(※)が機能しなくなっている、ということの方が重要なのです。髄鞘が絶縁体であることの意味は、軸索内を流れる「活動電流」の流れ方に影響を与えていることにあるのではなく、髄鞘によってふさがれてしまっているチャネルの部分でイオンが通れない(あるいは、髄鞘が巻きついている部分にはイオンチャネルがほとんどないためにイオンが通れない)、したがってこの部分では興奮が起こらない、ということにあるのです。

(※) 髄鞘が巻きついた部分の神経細胞膜にはイオンチャネルはほとんど無いと言われていますが、この部分の神経細胞膜にイオンチャネルがあってもなくても、髄鞘の存在によってこの部分をイオンが出入りできないことが重要なのです。

ここでの話は、次のように3段階になっています：**(1)髄鞘は絶縁体である → (2)絶縁体が巻きついている部分ではイオンの出入りがなく、興奮が起こらない → (3)興奮は遠く離れたランビエ絞輪まで伝えられる**。この3つの段階のうち、(1)は(2)の根拠であって、直接(3)の根拠にはなりません。「髄鞘が絶縁体(電気を通さない、または通しにくい物質)である」ことが、その内側を流れる「活動電流」や伝えられる

興奮に対して直接の影響を及ぼすことはありません。ところが、**どの教科書も(2)をとばしてしまい、(1)だから(3)だと述べている**のです。だから理解しにくいのです。

以上が、私が高校生物教科書の跳躍伝導の分野で奇妙な(理解しにくい、実は間違っている)説明だとする部分の内容です。一つ目の問題点についてはこのあとで詳しく説明をし、正しい考え方を紹介しようと思います。二つ目の問題点は間違いというよりも理解しにくい説明のしかたがされている(省略してはいけないことが省略されている)のであって、ここでその「本当の」意味を紹介しました。

ところで、これらの問題点以外にも、私が不満に思っていることがあります。それは、どの教科書も、髄鞘が巻きついていることによって伝導速度が大きくなることについて、その理由を説明していないことです。跳躍伝導だから(興奮がとびとびに伝わるから)伝導速度が大きいとしか述べられていないのです。また、神経繊維が太いほど伝導速度が大きいとも書かれていますが、その理由も述べられていません。神経繊維が太いというのは2つのタイプがあります。無髄神経繊維の場合で神経繊維の軸索が太いタイプと、有髄神経繊維の場合で髄鞘の厚みが大きくて神経繊維全体が太いタイプです。それぞれに伝導速度が大きくなる理由があるのに、教科書では何も述べられていません。

実は、一つ目の問題点の正しい考え方を学習していく中で、神経繊維が太いほど伝導速度が大きいことも理解できるようになります。ただし、これらの問題を理解するためには、高校の物理分野の学習が必要になります。このレポートの読者の多くが物理(現在の教育課程であれば、「基礎」のつかない「物理」)を選択しておられないと思われるのですが、このあとの議論の中で必要なことがらばかりですので、少し勉強していただきたいと思います(かなり難しい内容もありますから、十分に理解できないかもしれません。それでも一通り目を通していただいて、太字の部分だけでも記憶のどこかに残してください)。

(3) 物理の学習

(A) 電荷と電気量

皆さんは、私たちの身の回りのすべての物質が原子でできていることや、その原子の中には負の電気を持つ電子が含まれていること、原子が電子を受け取ったり失ったりしたものをイオンとよぶことなどを、中学校から高校の理科の授業の中で学んだことでしょう。

電子やイオンのように、「電気を持っている物質」あるいは「電気を帯びている物質」を一般に「電荷」といい(※)、電荷が持っている電気の量を「電気量」といいます。電子や陰イオンのようにマイナスの電気を持っている電荷を「負電荷」、陽イオンのようにプラスの電気を持っている電荷を「正電荷」といいます。また、電気量の単位は[C]という記号で表して、これを「クーロン」と読みます。

(※) 電荷の大きさがほとんど無視できるほど小さい場合、この電荷をとくに「点電荷」と呼びます。また、粒子であることを意識する場合には、「荷電粒子」という言い方もされます。

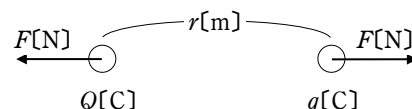
(B) クーロンの法則

正電荷または負電荷が互いに力を及ぼしあうことを詳しく調べたのが、クーロンという人です。クーロンは電荷どうしが互いに及ぼしあう力の大きさについて、クーロンの法則とよばれる重要な法則を発見しました。

図(3)-1のように、二つの点電荷 Q と q があって、それぞれの電気量が $Q[C]$ 、 $q[C]$ で、これらの電荷が距離 $r[m]$ だけ離れているとき、二つの電荷が互いに及ぼしあう力の大きさ $F[N]$ は

$$F = k \frac{Qq}{r^2}$$

… 【B①】



図(3)-1

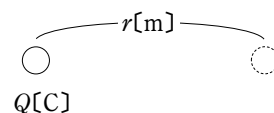
と表されます。この力をとくにクーロン力といい、式【B①】はクーロンの法則を式で表したものです。 k は比例定数で、二つの電荷が存在している空間の状況により決まります。 Q と q がともに正電荷、またはともに負電

荷のときには、二つの電荷は互いに反発します。Q と q の一方が正電荷で他方が負電荷のときは、互いに引き合う力となります。

この式そのものを覚えていただく必要はありませんが、この式の示している重要なポイント、すなわち**二つの電荷が互いに及ぼしあう力の大きさは、二つの電荷の間の距離の2乗に反比例する**ということはしっかりと覚えておいてください。力の大きさが距離の2乗に反比例するというのは、距離が大きくなるにつれて急激に力が弱くなるということを意味します。たとえば、二つの電荷の間の距離が2倍になると力の大きさは4分の1になり、距離が3倍になると力の大きさは9分の1になります。

(C) 電場

クーロンの法則は、二つの電荷の間に及ぼされる力の大きさについて述べたものですが、これを別の見方で考えることができます。図(3)-2のように、空間内に電荷 Q だけがある場合を考えます。この電荷 Q から r[m]離れた点に別の電荷 q を置くとうなるでしょうか。上のクーロンの法則の図と同じ図になりますから、電荷 q は力を受けることになります。



図(3)-2

このとき、電荷 q が受ける力は「誰から」受けるのかが問題になります。「電荷 Q から受けるに決まってるじゃないか」と言われそうですが、実は、電荷 Q から力を受けるのではなく、電荷 q が置かれた場所(空間)から力を受けるという考え方があります。電荷 Q から力を受けると考える場合には、「なぜ離れたところから力を受けるのか」という疑問が生じます。これに対して、電荷 q が置かれた場所(空間)から力を受けると考えれば、力は常に接触している物体や物質(空間をも含めて)から力を受けるというように統一的に考えることができ、都合がよいというのです。このように考える立場では、電荷 q が置かれた(あるいは、これから置かれる)点の空間は電荷 q が力を受けるという「特別な空間」になっていると考えます。電荷 q が受ける力は電気力ですから、このような空間には「電場(または電界)(※)」があるといえます。では、この電場は「誰が」作っているのでしょうか。それが電荷 Q だというわけです。つまり、電荷 Q が存在する空間にはその周囲に電場ができ、この電場の中に置かれた他の電荷 q は電場から力を受けるのです。

(※) 昔から、理学部の人たちは「電場」と表現し、工学部の人たちは「電界」と表現します。

点電荷 Q がその周囲に生み出す電場の強さ E [N/C] は、次のような式で表されます。

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{Q}{r^2} \quad \dots \text{【C①】}$$

また、電場は、正電荷から負電荷に向かう「向き」をもちます。この式もまた、電場の強さは電荷 Q から離れるにつれて急激に弱くなることを示しています。以上のことをまとめると、次のようになります。

電荷があればその周囲に電場が生じる。

電場は、その電場に置かれた他の電荷に力を及ぼす。

電場がなければ(電場の強さが 0 なら)電荷は力を受けない。

電場の大きさは電荷 Q の電気量が大きいほど大きい(電場が強い)。

電荷 Q の存在する点の電場がもっとも強く、電荷 Q から離れるにつれて電場が急激に弱くなる。

(D) 電位

上記で、電荷 Q が存在する空間には電場ができたと書きましたが、電場は、その中に置かれた他の電荷に力を及ぼすだけでなく、エネルギーも持っています。この「力」と「エネルギー」の関係は、地球上で物体が受ける力とエネルギーとの関係に似ています。地球の周囲には「重力場」があるといえます。「重力が及ぼされる特別な空間」という意味です。この地球上で、物体を高いところに持ち上げると「その物体は位置エネルギーを持つ」ということを、中学校理科の第一分野や高校の物理分野(理科総合 A、物理基礎など)で学んだでしょう。この位置エネルギーは物体が持つと考えることも、地球の周囲の空間つまり重力場にたくわえられると考えることもできます。

この重力場の位置エネルギーに相当するものが、電場の位置エネルギーです。点電荷 Q の作る電場の中で点電荷 Q から $r[\text{m}]$ 離れた点に点電荷 q が存在するとき、「その点電荷 q がもつ位置エネルギー」または「点電荷 q の存在する空間(電場)にたくわえられる位置エネルギー」 $U[\text{J}]$ は、

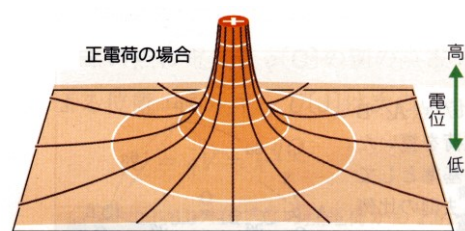
$$U = k \frac{Qq}{r} \quad \dots \text{【D①】}$$

という式で表されます。このとき、

$$V = \frac{U}{q} = k \frac{Q}{r} \quad \dots \text{【D②】}$$

で表される $V[\text{V}]$ を、点電荷 Q から距離 $r[\text{m}]$ 離れた点の「電位」といいます。つまり、点電荷 Q はその周囲の空間に「電場」と「電位」という2つの物理量を生み出します。電場と電位はまったく違った概念ですが、ともに、電荷 Q の周囲の空間に生じ「空間の性質を表すもの」という点では共通しています。

正電荷の周囲にできる電位の様子は、図(3)-3(※)のように表されます。この図の縦軸は電位の大きさ(高さ)、横軸は正電荷からの距離を表します。この図および電位の式【D②】からわかるように、正電荷の作る電位は、正電荷に近いところほど大きく(高く)、正電荷から離れるにつれて小さく(低く)なります。



図(3)-3

(※) 数研出版「物理」(p.218)より引用

なお、電場と電位との関係を別の形で表現すると、「電位の傾きの大きさが電場の強さに等しい」という言い方があります。図(3)-3の正電荷に近いところでは電位のグラフの傾きが大きいので、それだけ電場が強いということになります。以上のことをまとめると、次のようになります。

電荷があればその周囲に電位が生じる。

電位は、電場の存在する空間に生じる。電場がなければ、その空間は等電位となる。

電位の大きさ(高さ)は電荷 Q の電気量が大きいほど大きい(高い)。

正電荷の存在する点の電位がもっとも高く、負電荷の存在する点の電位が最も低い。

正電荷・負電荷ともに、電荷から離れるにつれて電位は0に近づく。

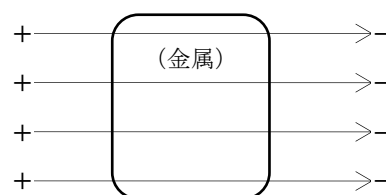
(E) 電位と電位差(電圧)

通常、電位を表すときには、必ず電位の「基準点」を定めておきます。基準点は任意に定めることができ(つまり、好きなところを基準点にすることができ)、基準点の電位は、ふつう $0[\text{V}]$ とします。電位はその基準が定められているので、たとえば「A点の電位」のように、ある1点だけを指定してその点の電位を表現することができます。

これに対して、電場内の2点の電位の差を「電位差」または「電圧」といいます。電位差(電圧)を表現するときには、電位の基準点はどこにあってもかまいません。そのため、必ず2点を考えて、それら2点の間の電位差(電圧)を表現します。たとえば、「2点ABの電位の差」または「AB間の電圧」などと表現します。

(F) 導体内部の電場と電位

図(3)-4のように、電場(右向きの矢印で示されています)がある空間内に金属の塊を置いたときの状況を考えます。金属の中にはたくさんの電子(負電荷)があります(※1)。これらの電子は電場から力を受けますから、図(3)-5のように、電場の向きに応じて金属内の電子が移動します。その結果、電子は必ず金属表面に分布することになります。電子が移動した反対側は、負電荷である電子



図(3)-4

が減少したため相対的にプラスになります。このことを、電子の反対側に正電荷が生じたと表現します(※2)。移動した電子とその反対側に分布した正電荷は、新たに別の電場(図(3)-5の左向きの破線の矢印で示されています)を生み出します。

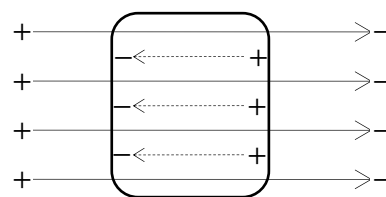
(※1) 金属内を自由に移動できるので、自由電子とよばれます。金属が電気をよく伝えるのは、この自由電子があるからです。

(※2) 正電荷が電子の反対側に移動したのではありません。移動したのはあく

までも電子だけです。負電荷が移動してなくなったので、もともとそこにあった正電荷(具体的には金属内の原子のことです。金属原子は、自由電子を出したために陽イオンの状態になっています。だから正電荷なのです。)の方が多くなって、相対的に正になったという意味です。このような考え方はこの後にも出てきますから、ぜひとも理解して下さい。

このとき重要なことは、もともと空間内に存在していた電場と、金属内で電子が移動したことによる新たな電場とが互いに打ち消しあい、金属内部には電場が存在しなくなっていることです。もしも、少しでも電場が存在していたなら、その電場によって金属内の電子がさらに移動します。最終的に金属内の電場が 0 になるまで電子が移動します。電場が存在しなければ、金属内は至るところ同じ電位になります。

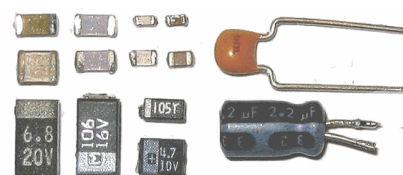
導体(金属)内部には電場が存在せず、導体内部全体が等電位になる。



図(3)-5

(G) コンデンサ

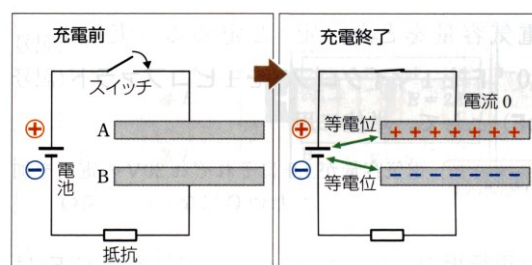
私たちの身の回りの電気製品の中には、数多くの電気部品が使われています。それらの部品のひとつに図(3)-6(※)のようなコンデンサがあります。コンデンサは、昔は「蓄電器」と訳されていました。この訳語からわかるように、コンデンサは電気をたくわえる装置です。このコンデンサについて学習してみましょう。



図(3)-6

(※) <http://ja.wikipedia.org/wiki/コンデンサ> から一部引用

図(3)-7(※1)は**平行平板コンデンサ**と呼ばれるものです。2枚の金属板AとBを平行に向かい合わせ、それぞれに電極をつけて電池の正極と負極につなぎます。このときの金属板を、とくに「極板」といいます。このようにすると、回路の中を電子が移動し、2枚の極板に電荷がたくわえられるようになります。具体的には、電池の正極につながれた極板の表面に正電荷(※2)が、負極につながれた極板に負電荷(つまり電子)が分布します。これらの正電荷と負電荷は、2枚の極板の間を隔てて互いに引き合います。また、これらの正電荷と負電荷により2枚の極板の間には電場が生じ、したがって両極板間には電位差が生じます。この電位差(電圧)が電池の電圧に等しくなった時点で、回路の中を電子が移動しなくなります。つまり、コンデンサへの充電が完了します。



図(3)-7

(※1) 数研出版「物理」(p.225)より一部引用

(※2) **物理の学習(F)**の(※2)で説明したように、この場合の正電荷も、「プラスの電気を持った荷電粒子」が極板の表面に移動してきたのではありません。金属内を実際に移動するのは電子だけです。負電荷である電子が出て行ったので、極板の表面には相対的に正電荷(自由電子を出して陽イオン状態になっている金属原子)が多くなったという意味です。

このとき、両極板の表面に分布した正と負の電気量の絶対値は、必ず等しくなります。「コンデンサに電気量 $Q[C]$ がたくわえられる」というとき、具体的には、正極板に $+Q[C]$ 、負極板に $-Q[C]$ がたくわえられています。一般に、コンデンサにたくわえられる電気量 $Q[C]$ は、両極板間の電圧の大きさ $V[V]$ を用いて、次のように表すことができます。

$$Q = CV$$

…【G①】

ここで、 $C[\text{F}]$ はコンデンサの電気容量とよばれ、コンデンサがどの程度電気をたくわえることができるかを表す量です。単位記号 $[\text{F}]$ は「ファラド」と読みます。この電気容量 $C[\text{F}]$ は、極板の面積 $S[\text{m}^2]$ 、両極板間の間隔 $d[\text{m}]$ を用いて、次のように表されます。

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad \dots \text{【G②】}$$

ここで、見たこともないような記号 $\varepsilon [\text{F/m}]$ はギリシャ語の文字で、「エプシロン」と読みます。両極板間にはさまれている物質によって決まる定数で、「誘電率」といいます(※)。

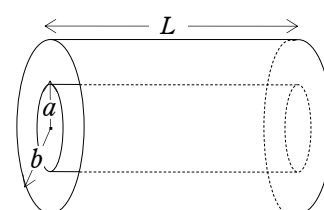
(※) 普通のコンデンサでは両極板の間に絶縁体をはさみます。この絶縁体の種類によって、様々なコンデンサが作られています。また、絶縁体の表面および内部に、正電荷と負電荷の部分的な「ずれ」や「かたより」が生じる現象を誘電現象(誘電分極)といい、このような絶縁体のことを誘電体とも言います。「誘電率」という用語はここから来ています。

式【G①】と【G②】を組み合わせると、次のような式になります。

$$Q = CV = \varepsilon \frac{S}{d} V \quad \dots \text{【G③】}$$

この式から、平行平板コンデンサにたくわえられる電気量 $Q[\text{C}]$ は極板間隔 $d[\text{m}]$ に反比例することがわかります。つまり、 ε 、 S 、 V が変わらなければ、2枚の極板の間隔を大きくすると極板表面に分布する電荷(正電荷と負電荷)が少なくなるということです。

ここまでは高校物理の範囲なのですが、次に、図(3)-8のような**同軸円筒コンデンサ**という、少し変わったコンデンサについて考えてみたいと思います。2つの極板がそれぞれ円筒状になっていて、それらの中心軸が共通している(つまり同軸)構造をしています。内側の極板の半径が $a[\text{m}]$ 、外側の極板の半径が $b[\text{m}]$ 、円筒の長さが $L[\text{m}]$ です。両極板の間にはさまれている物質の誘電率を $\varepsilon [\text{F/m}]$ とすると、このコンデンサの電気容量は、次のように表されます。



図(3)-8

$$C = \varepsilon \frac{2\pi L}{\log \frac{b}{a}} \quad \dots \text{【G④】}$$

ここで、分母の $\log \frac{b}{a}$ は、 a に比べて b が大きいほど大きい値になります。分母が大きくなるということは、分数全体つまり電気容量 $C[\text{F}]$ が小さくなるということを意味します。また、式【G①】と【G④】を組み合わせれば、 a に比べて b が大きいほど両極板にたくわえられる電気量 $Q[\text{C}]$ が小さくなることもわかります。

「 a に比べて b が大きい」というのは、両極板間の間隔が大きいということです。あるいは、極板の間にはさまれている絶縁体が厚いということです。つまり、平行平板コンデンサの場合も、同軸円筒コンデンサの場合も、ともに極板間の間隔が大きいほど(絶縁体が厚いほど)、両極板にたくわえられる電気量が小さくなり、両極板の表面に分布する電荷(正電荷および負電荷)が少なくなることがわかります。

ここで、この後で使うことになる重要な結論をまとめておきます。必ず記憶しておいてください。

コンデンサでは、両極板にかかる電圧が変わらなければ、極板間の間隔が大きいほど(絶縁体が厚いほど)両極板の表面に分布する電荷が少なくなる。

(H) 電流

電気現象についての基本的なことがらを学習しましたので、ここからは、電荷が移動する現象つまり電流について考えてみたいと思います。一言で「電流」といってもいろいろな電流がありますが、Wikipedia には次のように定義されています(※)。

電流は、電子に代表される荷電粒子の移動に伴う電荷の移動(電気伝導)のこと、およびその物理量として、ある面を単位時間に通過する電荷の量のことである。電流における電荷を担っているのは、電線などの電気伝導体では移動する電子であり、電解液ではイオンであり、プラズマでは両方である。

(※) <http://ja.wikipedia.org/wiki/電流>

つまり、**ある断面を電荷が通過して初めて、電流が流れたということが出来ます**。このことは当たり前のことであるとともに、実はとても重要なことです。このレポートの論拠の根幹の一つをなしています。

いま、電流 I [A] が流れている導線の中で、時間 t [s] 間にその断面を通過した電荷の電気量を Q [C] とすると、一般に、

$$Q = It \quad \text{または} \quad I = \frac{Q}{t} \quad \dots \text{【H①】}$$

が成り立ちます。これは、通過した電荷の電気量 Q [C] と電流の強さ I [A] との間に成り立つ基本式です。この式は、電池から流れ出てくる電流のように、常に一定の大きさの電流(※1)が流れているときに使える式です。とくに、非常に短い時間 Δt [s] の間にわずかな電気量 ΔQ [C] の電荷が通過した場合には(※2)、

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \dots \text{【H②】}$$

のように表し、瞬間の電流の強さを求めることができます。重要なことは、このような**瞬間的な電流であっても「電流が流れる」と言う限りは、ある断面を電荷が通過することが条件**だということです。

(※1) このような電流を、とくに「定常電流」といいます。電流の大きさが変化する場合でも、電流の流れる向きが変わらなければ、一般に「直流電流」といいます。

(※2) Δt は「デルタ ティ」と読み、 t の値が非常に小さいときに使う表現方法です。 Δt で一つの記号であり、 Δ と t の掛け算という意味ではありません。 ΔQ についても同様です。

ところで、**(2)(A)一つ目の問題点**の最後のところでも断っていますが、このレポートの中で考えている電流は、その強さが多少変化することはあっても「一定の向きにイオンや電子がずるずると流れていく電流」というイメージでとらえています。しかし、この後の議論で必要になる特別な電流がありますので、ここでまとめておきたいと思います。

もういちど図(3)-7をご覧ください。この図の左側の回路でスイッチをONにすると、回路の中を電子が移動し、2枚の極板に電荷が蓄えられるのでした。このとき電子は、回路全体を反時計回りにぐるっと一斉に移動します。**回路内のすべての電子が同時に移動します**。電子の移動する向きと逆の向きを電流の流れる向きと約束していますから、この回路を時計回りに電流が流れると表現します。

このとき注意していただきたいことは、**コンデンサの極板の間を電子が移動(通過)していない**ことです。コンデンサの中の構造や現象に目をつむって、コンデンサの一方の極板(図の極板B)に電子が入り他方の極板(図の極板A)から電子が出ていくことから、(極板間を電子が通過しないにもかかわらず)これで「コンデンサを電流が流れる」と考えるのです。このような電流のことを、とくに**容量性電流**と呼んでいます。

この容量性電流は、いつまでも流れ続けることのない電流です。図(3)-7の電流は、両極板の電位差が電池の電圧に等しくなった時点、つまりコンデンサの充電が完了した時点で流れなくなります。ということは、直流電流はコンデンサを流れないことになり、コンデンサを流れる電流は交流またはごく短い時間だけ流れる電流ということになります(※)。

(※) 直流電流の回路であっても、図(3)-7の場合のように、スイッチを入れた直後のごく短い時間であれば流れます。いつまでも一定の向きに流れ続けることがないという意味です。

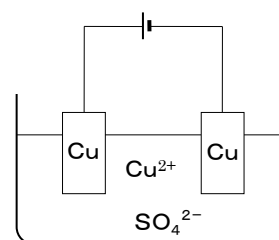
また、図(3)-7の電池はその電圧が一定ですが、この図の右の回路で、電池を電圧の調整できる直流電源装置に置き換えてその電圧を少し高くするとどうなるかを考えてみてください。コンデンサに加えられる

電圧が少し高くなり始めると同時に、回路中の電子が図の反時計回りに一斉に移動し始めます。つまり、再び容量性電流が流れるようになり、この電流によってコンデンサの極板に追加の電荷が蓄えられていくにつれて、その極板間の電圧が上昇していきます。しばらくして、少し高くなった電源装置の電圧とコンデンサの極板間の電圧とが等しくなった段階で、電子の移動が止まります。つまり、容量性電流が流れなくなります。

このとき重要なことは、容量性電流が流れるためには、コンデンサに加えられる電圧が変化しなければならないということです。**まず、コンデンサに加えられる電圧が変化し、それによって電子が移動します(つまり、容量性電流が流れます)。**コンデンサの極板間の電圧が、電子の移動の原因となった電圧(直流電源装置に置き換えて少し高くなった電圧)に等しくなった時点で、電子の移動がストップします。**コンデンサに加えられる電圧が変化しないのに、先に容量性電流が流れ始めるということはありません。**

(I) 導線中の電子の移動速度

電流について学習したついでに、導線中を移動する電子の速度と溶液中のイオンの移動速度がどのくらいのものなのかを、具体的に計算してみたいと思います。ここでは、図(3)-9のような、硫酸銅(II)水溶液の電気分解の装置(※)で考えます。このような装置で考えると、電子の速度とイオンの速度を同じ考え方で説明できるからです。



図(3)-9

(※) 両電極には銅板を使います。つまり「電解精錬」と呼ばれる装置です。

図(3)-9の回路を流れる電流の強さを I [A]、導線の断面積を S [m²]、導線中を移動する電子の平均の速さを v [m/s] とします。このとき、時間 t [s] の間に導線のある断面を通過する電子は、

$$Svt \text{ [m}^3\text{]} \quad (\text{導線の断面積: } S \times \text{電子の移動距離: } vt) \quad \dots \text{【I①】}$$

の体積中に含まれることになります。導線の単位体積中の電子の個数を n [/m³] とすると、導線のある断面を通過した電子の個数は

$$Svt \text{ [m}^3\text{]} \times n \text{ [/m}^3\text{]} \quad (\text{上で求めた体積: } Svt \times \text{単位体積中の電子の個数: } n) \quad \dots \text{【I②】}$$

となります。また、電子1個あたりの電気量の絶対値を電気素量といいますが、これを e [C] で表すと、時間 t [s] 間に導線の断面を通過した電子の電気量の絶対値は

$$Svt \text{ [m}^3\text{]} \times n \text{ [/m}^3\text{]} \times e \text{ [C]} \quad (\text{上で求めた電子の総数: } Svt n \times \text{電気素量: } e) \quad \dots \text{【I③】}$$

となります。この電気量は、回路を流れる電流の強さ I [A] とその流れた時間 t [s] を用いて、式【H①】の左の式によって表すことができますから、【I③】 = It つまり $Svtne = It$ となり、これから、

$$v = \frac{I}{Sne} \quad \dots \text{【I④】}$$

が得られます。ここで、 n の値は金属により異なりますが、導線に使われる銅の場合には $n = 7.5 \times 10^{26}$ [/m³]、 e の値は定数で $e = 1.6 \times 10^{-19}$ [C] です。

回路に流す電流の強さを $I = 1.0$ [A]、導線の断面積を $S = 1.0$ [mm²] = 1.0×10^{-6} [m²] と仮定して、これらの数値を式【I④】に代入すると、

$$v \doteq 8.3 \times 10^{-3} \text{ [m/s]} = 8.3 \text{ [mm/s]} \quad \dots \text{【I⑤】}$$

という値になります。**1秒間に8.3mmの速さです。ずいぶん遅いと思いませんか。**

(J) 溶液中のイオンの移動速度

図(3)-9のような電気分解のときに溶液中を移動するイオン(ここでは、銅(II)イオン、 Cu^{2+} について考えることにします)の速さも、導線中の電子の速さを求めるのと同じような考え方で求めることができます。式【I①】～【I④】の導線の断面積 S [m²] は、電極の間をイオンが移動する領域の断面積に相当します。両電極の間隔を十分に小さくすれば、電極の間をイオンが移動する領域の断面積は電極の面積(一方の電極の片側の表面積)に等しいとして差し支えありません。

溶液中の Cu^{2+} が平均の速さ $v[\text{m/s}]$ で時間 $t[\text{s}]$ 間移動したとき、溶液中のある断面を通過した Cu^{2+} は、式【I①】と同じく、 $Svt[\text{m}^3]$ の体積中に含まれることになります。

したがって、硫酸銅(Ⅱ)水溶液のモル濃度を $c[\text{mol/L}]$ とすると、この $Svt[\text{m}^3] = Svt \times 10^3[\text{L}]$ の体積中に含まれる Cu^{2+} の物質量は、

$$c[\text{mol/L}] \times Svt \times 10^3[\text{L}] \quad \dots \text{【J①】}$$

となり、これに、物質 1mol あたりの粒子数であるアボガドロ定数 $N[\text{mol}]$ をかけたもの

$$c[\text{mol/L}] \times Svt \times 10^3[\text{L}] \times N[\text{mol}] \quad \dots \text{【J②】}$$

が、その体積中に含まれる Cu^{2+} の総数、つまり、式【I②】に相当する式になります。このあとは式【I③】以降の議論と同じになりますが、 Cu^{2+} の1個あたりの電気量が $2e[\text{C}]$ であることに注意すると、

$$c[\text{mol/L}] \times Svt \times 10^3[\text{L}] \times N[\text{mol}] \times 2e[\text{C}] = It \quad \dots \text{【J③】}$$

となつて、これから

$$v = \frac{I}{cSN \times 2 \times 10^3} \quad \dots \text{【J④】}$$

が得られます。回路に流す電流の強さを $I = 1.0[\text{A}]$ 、硫酸銅(Ⅱ)水溶液のモル濃度を $c = 1.0[\text{mol/L}]$ 、極板の面積を $S = 10[\text{cm}^2] = 10 \times 10^{-4}[\text{m}^2] = 1.0 \times 10^{-3}[\text{m}^2]$ と仮定し、これらの値と $N = 6.0 \times 10^{23}[\text{mol}]$ 、 $e = 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]$ を式【J④】に代入すると、

$$v \doteq 5.2 \times 10^{-6}[\text{m/s}] = 5.2 \times 10^{-3}[\text{mm/s}] = 0.0052[\text{mm/s}] \quad \dots \text{【J⑤】}$$

という値になります。何と、**1 秒間に 0.0052[mm]です。溶液中を移動するイオンの速さは、とてつもなく小さいのです。**

(K) 神経繊維内のイオンの移動速度

このイオンの速さは図(3)-9のような電気分解の場合の値ですが、神経繊維の中を移動するイオンであればどうなるのでしょうか。

まず、電流の強さですが、神経繊維の中を興奮が伝わるときの「活動電流」はきわめて微弱とされていますから、ここでは $I = 1.0[\mu\text{A}] = 1.0 \times 10^{-6}[\text{A}]$ 程度と仮定しましょう。私たちの身の回りの電子回路でも $1.0[\text{mA}] = 1.0 \times 10^{-3}[\text{A}]$ 程度の電流は普通に流れていますから、神経繊維の中を流れる電流は $[\mu\text{A}]$ のレベルと見積もることにします。

また、イオンが流れる部分の断面積ですが、イオンは軸索の断面全体を使って流れると仮定して(※1)、軸索の断面積を使うことにします。神経繊維の太さは、直径が数10 $[\mu\text{m}]$ のものが多いようですから(※2)、 $S = 100[\mu\text{m}^2] = 100 \times 10^{-12}[\text{m}^2] = 1.0 \times 10^{-10}[\text{m}^2]$ と見積もることにします。

(※1) 興奮が伝わる時イオンが軸索の断面全体を使って流れることはない、すでに指摘しました。ここでは、イオンの速さを計算するためにひとまずこのような設定にして考えると理解してください。

(※2) **(1)いくつかの教科書の記述内容**のところで紹介した、数研出版と第一学習社の教科書の表を参照。

溶液の濃度はどうなるのでしょうか。生理食塩水の濃度 0.9%をモル濃度に換算すると $0.15[\text{mol/L}]$ 程度になりますから、この値を参考にして、神経繊維内の溶液のモル濃度を $c = 0.15[\text{mol/L}]$ と見積もることにします。

最後に、電気分解の例では Cu^{2+} で考えましたが、神経繊維内では Na^+ (または K^+)の移動を考えることにして、これらのイオン1個あたりの電気量が $e[\text{C}]$ であることに注意します。

以上の各数値を式【J④】に代入することにより(分母の2は1になります)、神経繊維内のイオンの移動の速さは、

$$v \doteq 6.9 \times 10^{-4}[\text{m/s}] = 6.9 \times 10^{-1}[\text{mm/s}] = 0.69[\text{mm/s}] \quad \dots \text{【J⑥】}$$

と求めることができます。**1 秒間に 0.69[mm]。やはり、とてもとても遅いのです(※)。**

(※) ここで議論は、各種の数値をそれらしい根拠を示しながら「これくらいだろう」と見積もることで進めてきました。実際の値がどのくらいなのか、私にはよくわかりません。電流の強さ I も、イオンの流れる断面積 S も、どちらももっと小さい値のような気

もします。その場合、 I と S の値がともに小さくなれば、式【J④】からわかるように、やはり神経繊維の中を移動するイオンの速さはとても小さいことには変わりはありません。

(L) 波

電気の分野の学習はこのくらいで終わりにして、次に「波」について考えてみたいと思います。神経繊維の中のイオンの動きについて考えようとしているのに、なぜ波の分野の学習が必要なのかと不思議に思われる方も多いと思いますが、その種明かしは後ほど行うことにして、ここでは音波について考えることから始めたいと思います。

太鼓をたたくと大きな音がします。この音は、空気中を音波となって伝わっていきます。このとき、太鼓の皮の周囲の空気がどのようなのかを描いたものが図(3)-10(※)です。

(※) 第一学習社「新物理基礎」(p.102)より一部引用。

図において、太鼓の左側の皮をたたくと右側の皮が振動します。右側の皮がふくれた瞬間に、その皮に接していた空気分子(※)は皮と一緒に図の右側に押されます。空気分子は瞬間的に押されますから、皮のすぐ右側の空気は圧縮された状態、すなわち密度の高い状態になります。このような状態のことを、波の分野では「密(みつ)」の状態といいます。この、空気の分子が密集した部分は圧力が高い状態になっていますから、そのすぐ右隣の(まだ圧縮されていない)空気を押すことになります。ちょうど、太鼓の皮がその右側に接触していた空気分子を瞬間的に押したときと同じ現象が起きます。つまり、まだ圧縮されていない「右隣の空気」が圧縮されて、新しい密の状態になります。このようにして、**太鼓の皮の右側の空気は、瞬間的に密になった状態が次々とその右側に伝えられていきます。このような現象を、「波の伝播(でんぱ)」といいます。**

(※) 「空気分子」という特別な分子はありません。ご存知のように、空気は窒素と酸素、それに少量の二酸化炭素や水蒸気、その他の気体分子から成っています。ここでは、そういった様々な分子をひとまとめにして「空気分子」と呼んでいます。

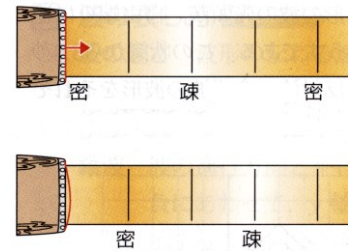
太鼓の右側の皮は、右側に膨れた直後に、その弾性によって左側に「へこみ」ます。このとき、皮は急に「へこみ」ますから、太鼓の皮から離れたところの空気はそのままの位置にとどまり、皮の右側に接触していた空気だけが皮の動きとともに左側に引き寄せられます。その結果、皮のすぐ右側付近の空気は「薄い空気」になり、一定体積当たりの空気分子数が少なくなった状態になります。このような状態のことを「疎(そ)」の状態といいます。疎の状態の空気は圧力が低い状態ですから、そのすぐ右隣の空気を引き寄せます。ちょうど、太鼓の皮がその右側に接触していた空気を瞬間的に引き寄せたのと同じことが起き、まだ疎の状態になっていない「右隣の空気」が新しい疎の状態になります。このようにして、疎の状態もまた次々とその右側に伝えられていきます。

このように、空気中を、疎の状態と密の状態を繰り返しながら、次々とその周囲に広がっていく(伝播していく)現象を、音または音波といいます。疎と密の状態が繰り返されるので、このような波を「疎密波(そみつは)」とも言います。

このとき**空気中を伝えられるのは、空気の疎と密の「状態」であることに注意してください。音波が伝わるのと一緒に、空気分子そのものが移動していく(飛んでいく)ではありません。**疎と密の「状態」を作っているのは空気分子であり、空気分子自体は波がやってきたときに小さく揺れ動く(※)だけです。この「揺れ動き」は、実は、太鼓の皮の振動と同じ動きです。つまり、音波が空気中を伝わる時、空気中のどの部分の空気分子も小さく振動するだけで、空気全体が音波とともに動いていくわけではありません。

(※) 図(3)-10であれば左右に、つまり音波の進行方向に揺れ動きます。

空気分子のように、疎と密の「状態」を伝えるだけで自身は移動しないものを、波の「媒質(ばいしつ)」といいます。

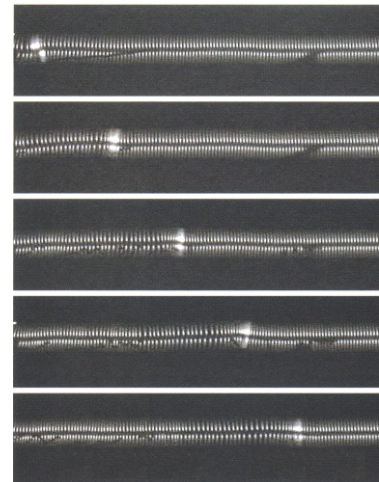


図(3)-10

音波は目で見ることはできませんが、音波とよく似た現象で目に見えるものがあります。図(3)-11(※1)を見てください。これは、長いつるまきばねの左端をばねに向かって(つまり右向きに)瞬間的に押し、その直後に引き戻すという操作をした時の写真です。時間の経過とともに上の写真から下の写真へと移ります。瞬間的に押された部分では、ばねが密集しています。つまり、音波の密の部分に相当します。このばねの密集した部分は、時間の経過とともに次々と右の方に伝えられていきます。つまり波として伝えられていくのです。このとき、つるまきばね全体は移動していないことに注意してください。**ばねは波を伝えるための媒質であり、媒質は全体として移動しない**(※2)のです。

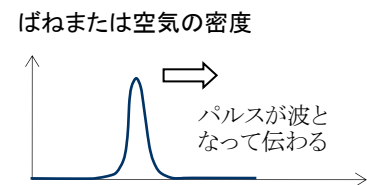
(※1) 数研出版フォトサイエンス物理図録(p.59)より一部引用。

(※2) ばねの各部分はまったく動かないわけではありません。密集した部分がやってきたときだけ、その部分のばねは波の進行方向(写真では左右方向)に振動します。しかし、ばね全体として動いていくわけではありません。このことを、「媒質は全体として移動しない」と表現しています。



図(3)-11

図(3)-11のばねを伝わる波は、ばねの密集した部分が一つだけの場合を示しています。このとき、この密集した部分は幅がせまく、そのせまい幅の中に密度の高い部分が集中しています。音波の場合にも、空気の密の部分はせまい幅の中に空気の分子が高密度で集まっています。これらの様子を、縦軸に密度をとってグラフに表すと図(3)-12のようになります。このような、**幅がせまく高い山のように表されるものを「パルス」といい、パルスが波となって伝わる時これを「パルス波(パルスは)」**といいます。

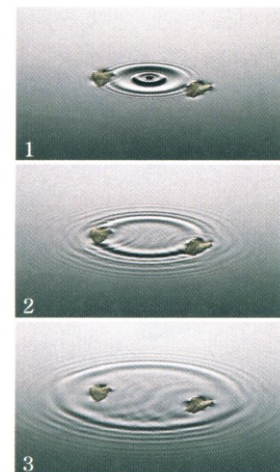


図(3)-12

もう一つ具体例を挙げてみましょう。図(3)-13(※1)のように、水面を伝わる波を「水面波」といいます。波が伝わる時、水面の各部分は上下に振動します(※2)が、水全体が移動することはありません。その証拠に、水面波が生じている水の表面に木の葉のようなものを浮かべてみると、木の葉は水面波の伝わる向きに移動することなく、浮かべられたその場所で上下に振動するだけです。すなわち、木の葉を浮かべている水が移動しないことを示しています。この場合の媒質は水で、**どんな波でも、媒質は全体として移動しない**のです。

(※1) 東京書籍「物理基礎」(p.135)より引用

(※2) 水面波が伝わる時、水面近くの水分子は厳密には上下運動ではなく楕円運動をしています。



図(3)-13

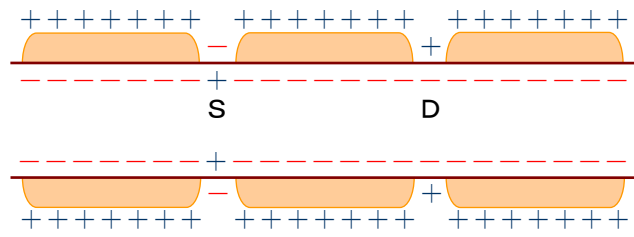
(4) いよいよ、跳躍伝導についての本当のお話

物理分野のさまざまな現象や法則についての学習ができ、跳躍伝導についての説明をする準備が整いましたので、いよいよ「本論」に入ることとしましょう。

(A) まずは、神経繊維内の伝導から

跳躍伝導についての私の説明は、図(4)-1から始まります。この図は、Sの近くのランビエ絞輪の神経細胞膜にある Na^+ チャネルが開いて Na^+ が軸索内に流れ込み、興奮を起こした状態を表しています。Dは興奮部の隣のランビエ絞輪の内側の部分です。

この図と、これまで見慣れてきた教科書の図とどこが違うのでしょうか。教科書の図では、イオン(「+」と「-」)はランビエ絞輪のところだけに分布しているように表されていますが、この図では髄鞘の部分も含めて神経繊維全体(外側および内側)のイオン分布が表されています。たったこれだけのことが、実は「決定的な」違いなのです。



図(4)-1

神経繊維の外側と内側では、 Na^+ や K^+ などのイオン濃度の違いにより電位差が生じています。その電位差が生じている外側と内側の間に、絶縁体である神経細胞膜や髄鞘がはさまっています。この状態は、**物理の学習(G)**で学んだように、神経細胞膜や髄鞘がコンデンサを形成していることを示しています(※1)。髄鞘の部分もランビエ絞輪の部分もすべての部分がコンデンサです(※2)。当然、**その両側(外側と内側)に正電荷と負電荷、ここでは陽イオンと陰イオンがびしりと分布します。ランビエ絞輪部だけに分布するのではありません。**

(※1) この場合のコンデンサは、同軸円筒コンデンサに相当します。

(※2) ランビエ絞輪はコンデンサではないと言われるかもしれません。ここではイオンチャネルが閉じている状態と理解してください。ランビエ絞輪の詳細な構造は考えていません。細胞である限りは基本的に絶縁体だという考え方です。

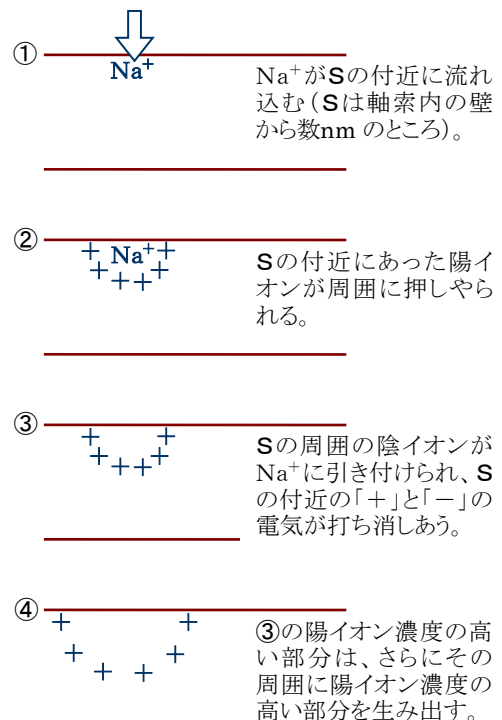
図(4)-1を見れば、もはや、**S**にある「+」と遠くにある**D**の「-」とが引き合うなどという考えは起きないでしょう。また、**S**にある「+」から遠くにある**D**の「-」に向かって電流が流れていくという考えも起きないでしょう。**物理の学習(B)**で学んだように、「+」と「-」が引き合う力すなわちクーロン力は、「+」と「-」の距離が大きくなればなるほど急激に弱くなります(距離の2乗に反比例するのです)。つまり、**Sにある「+」は遠くにあるDの「-」などにはほとんど力を及ぼすことはなく、Sのすぐ周囲のイオンに力を及ぼすのです。**

ここで私は、「Sのすぐ周囲のイオン」と書きました。軸索内は細胞液で満たされています。細胞液はただの水ではありません。陽イオンも陰イオンも含めて、様々なイオンが含まれています。軸索内はイオンだらけです。図(4)-1には描かれていないだけです。

Na^+ が**S**の付近に流れ込んできたとき(図(4)-2の①)、これらの Na^+ はもともと**S**の付近にあった他の陽イオンを反発して周囲に押しやり(同図②)、もともと**S**の付近やその周囲にあった陰イオンを引き付けます。その結果、**S**の付近のすぐ周囲に陽イオン濃度の高い部分が生じ、同時に、**S**の付近の「+」と「-」の電気は打ち消しあいます(同図③)(※)。実際には①～③はほとんど同時に起こります。

(※) 流れ込んできた Na^+ がその周囲の陰イオンを引きつけたために「+」と「-」の電気が互いに打ち消しあうだけで、 Na^+ そのものがなくなるわけではありません。

引き続き、同図③の「陽イオン濃度の高い部分」は、さらにその周囲に新しい「陽イオン濃度の高い部分」を生み出します(同図④)。これを繰り返すことにより、陽イオン濃度の高い部分が次々と周囲に広がっていくのです。



図(4)-2

ところで、この現象は、すでに学んだ物理現象の何かに似ていませんか？ そうです。**物理の学習(L)**で

学んだ、音の伝播と同じ現象です。**軸索の中の陽イオン濃度の高い部分が次々と周囲に広がっていくという現象は、音波にたとえると、空気の濃度の高い部分(「密」の部分)がその周囲に次々と伝わっていくことに相当します。**

物理の学習(D)で学びましたが、陽イオンがたくさん集まっている部分は電位が高い部分です。上記のように、陽イオン濃度の高い部分が周囲に広がっていくということは、電位の高い部分が広がっていくということにほかなりません。この様子をグラフに表すと、**図(4)-3**のようになります(時間の経過とともに上の図から下の図へと移ります)。この図の縦軸は電位の高さを、横軸は**S~D**のライン上を、それぞれ表しています。電位の高い部分が、興奮部の**S**から軸索の中を波のように広がっていく(※)様子が見てとれます。このとき注意していただきたいことは、**興奮部のSから軸索の中を広がっていくのは電位の高い部分であって、陽イオンそのものではない**ということです。

(※) この場合の波は、パルス波です。

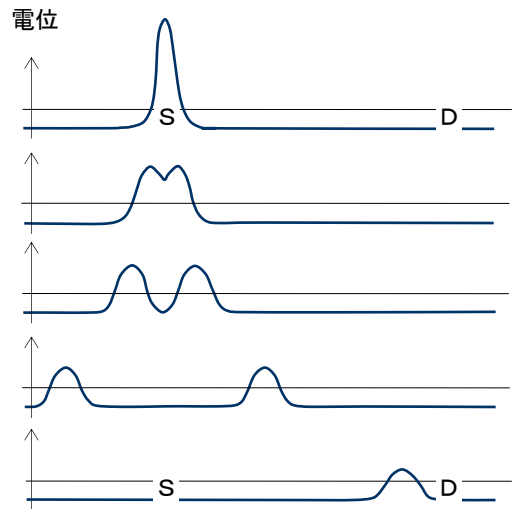
「電位の高い部分」が広がるというよりも「電位の高い状態」が広がるという方がより適切かもしれません。軸索の中の細胞液やそこに含まれる各種の陽イオンや陰イオンは、電位の高い状態を波として伝えるための媒質であって、波のところで学んだように、媒質は移動しないのです。**軸索内のすべてのイオンが、全体として移動することはありません**(※)。

(※) 「電位の高い状態」が伝わってきた瞬間には、媒質であるイオンは小さく振動します。つまり、わずかに動きます。しかし、「電位の高い状態」が通り過ぎたあとは、元の位置に戻ります。このことを、「全体として移動しない」と表現しています。

神経繊維が興奮した際に**S**の付近に流れ込んだ Na^+ は、その興奮が周囲に伝わってしまった後にはそのまま**S**の付近に残っていて(ただし、少しずつ拡散していきます)、最終的には Na^+-K^+ ポンプによって神経繊維の外に汲み出されます。決して、**S**から**D**などに向かって Na^+ が移動していくことはありません。また、**S**と**D**の間の陽イオンが**D**に向かって移動していくこともありません。

ところで、**物理の学習(F)**の最後のところで、「導体内部には電場が存在せず、導体内部全体が等電位になる」とまとめておきました。導体内部にはたくさんの自由電子があり、仮に電場が存在したとするとその電場から自由電子が力を受けて移動し、結局のところ電場の強さが0になるということでした。では、軸索内部の電位はどうなっているのでしょうか。軸索内にはたくさんのイオンがあり、これらのイオンも軸索内を自由に移動できます。したがって、静止状態では、仮に軸索内に電場があるとするとその電場からイオンが力を受けて移動し、結局のところ電場の強さが0になります。電場が存在しなければ、軸索内の全体が等電位になります。つまり、「静止電位が -70mV 」というのは、軸索内の至るところが -70mV の等電位になっていることを示しています。

この状態のところで、**S**付近に興奮が起きたとしてください。軸索内に Na^+ が流れ込んだ瞬間の軸索内の電位の分布は、**図(4)-3**の一番上の図のようになります。さきわめて短い時間の間に Na^+ が流れ込むわけですから、電位の高い部分は**S**付近のごくせまい範囲に限られます。つまり電位のグラフはパルス状になります(※1)。言い換えれば、**S**付近以外の軸索内の電位は、至るところ -70mV の静止電位のまま、つまり等電位のままです。電場も生じません。電場がなければイオンは力を受けないのですから、 Na^+ が軸索内に流れ込んだ瞬間には、**D**付近のイオンは言うに及ばず、**S付近以外の軸索内のすべてのイオンが何の力も受けない**のです。**D**付近の「 $-$ 」が**S**付近の「 $+$ 」に引かれて動き出したり、**S**と**D**の間の陽イオンが**D**に向かって移動し始めたりするなどということがまったく起こりえないことを理解していただけるでしょうか(※2)。



図(4)-3

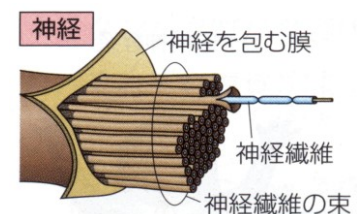
- (※1) S付近に集中している Na^+ はほとんど点電荷に近い状態ですから、電位の様子は図(3)-3のようになるという意味です。
- (※2) S付近に興奮が起きて少し時間がたち、その興奮(電位の高い状態)がD付近にやってきたとき(つまり、図(4)-3の一番下の図のとき)に初めて、D付近の「-」が力を受けます。それまでは、D付近の「-」は何の力も受けません。

(B) 次に、神経繊維の外での現象

神経繊維内の興奮の伝わり方を理解していただいたところで、神経繊維の外はどうなるのかについて考えてみたいと思います。興奮を起こしたランビエ絞輪部の外側がどうなるのかということです。図(4)-1に示されているように、興奮が起きたときこの部分は「-」になっています。 Na^+ が軸索内に流れ込んだ結果、その外側の部分の Na^+ が急激に少なくなり相対的に「-」になるのです。陰イオンが急に増えるわけではありません。このとき、軸索内のS付近の電位が急激に高くなると同時に、その外側の電位は急激に低くなります。電位が「高い」と「低い」の違いはありますが、神経繊維の外に電位の低い部分が生じたあとのその周辺の状況は、基本的には軸索内の場合と同じになります。つまり、電位の低い部分(電位の低い状態)が次々とその周囲に広がっていくのです。まわりから陽イオンが次々と流れ込んでくるわけではありません。神経繊維の外側の液体もまた細胞液と同様に多数の陽イオンや陰イオンを含んでいますが、これらのイオンは電位の低い状態を波(下に凸のパルス波)として伝えるための媒質であって、移動することはありません。

ただし、軸索内の状況と一つだけ違う点があります。それは、神経繊維の外側は、そこに他の神経繊維が密着していなければ広い空間になっているということです(もちろん多くのイオンを含む体液で満たされています)。興奮を起こしたランビエ絞輪部のすぐ外側の「-」から電位の低い状態が周囲に広がるとき、電位の低い状態はその「-」を中心にして半球面状に広がります。球面というのは半径が大きくなれば急速に表面積が大きくなりますから、陰イオン濃度に置き換えて考えるならその濃度は急速に小さくなります。つまり、電位の低い状態のピーク(最も電位の低い部分の電位)は急速にゼロ(神経繊維の外側の電位)に近づき、電位の低い状態は急速に減衰します。

ただ、実際には神経は何本もの神経繊維が束になっているものです(図(4)-4(※))。そうであれば、ある神経繊維の外側は他の神経繊維と密着していることになります。このような場合、興奮を起こしたランビエ絞輪部のすぐ外側の電位の変化はどのようになるのでしょうか。電位の低い状態がどのように「広がる」のか想像もつきません。



図(4)-4

(※) 第一学習社「生物」(p.282)より一部引用。

しかし、電位の低い状態がどのように広がろうが(あるいは広がらないとしても)、つまり神経繊維の外側の電位がどのようになろうとも、何の問題もありません。神経繊維の外側の電位の変化のしかたは、神経繊維の中の電位の高い状態の広がり方(つまり興奮の伝わり方)に何の影響も及ぼさない(※)からです。**神経繊維の中と外の現象は同時に始まりますが、それぞれが独立した現象(波動現象)で、互いに影響を及ぼしあうことはありません。**

(※) (4)の(A)で、神経繊維の中の伝導のしかたを考えると、神経繊維の外側の現象については何も考慮しませんでした。このことは、すなわち、神経繊維の外側の状況の変化が中の伝導のしかたに何の影響も及ぼさないことを示しています。

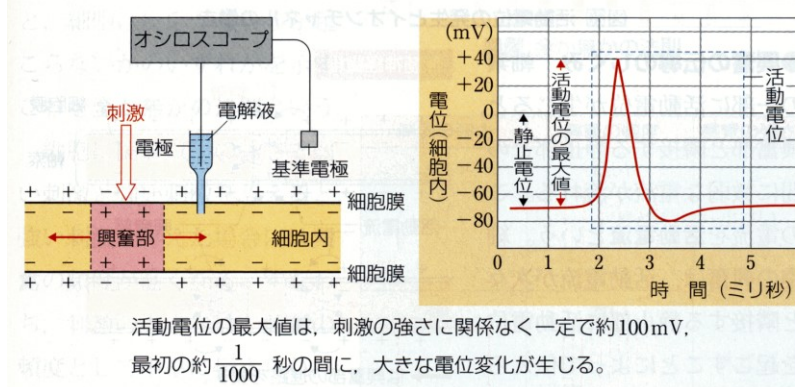
(5) 「活動電流」などというものは存在しない

(A) 電荷が通過しなければ、電流は流れない

物理の学習(H)で学びましたが、電流が流れるということは「ある面を電荷が通過すること」です。神経繊維内であれば、その断面をイオンが通過することです。ところが、これまで私は、神経繊維内のイオンは「電位の高い状態」を波として伝えるための媒質であって、媒質は全体として移動しないと繰り返し説明してきました。つまり、神経繊維内のどの断面をもイオンが通過することはないのです。すなわち、神経繊維の中を電流など流れていないことになります。**そもそも、「活動電流」などというものは初めから存在しない**のです。

存在するのは「活動電位」で

す。これは実際に測定されています。図(5)-1(※)は、興奮が伝わってきたときの、神経細胞内のある点での電位の変化を測定したものです。このような電位の変化が神経細胞内を次々と伝わっていくのです。その様子を表したものが図(4)-3です。



図(5)-1

(※) 第一学習社「生物」(p.283)より引用。

これに対して、「活動電流」の測定値はどこにも示されていません。「微弱な電流が流れる」などと、根拠もなく思いつきで書かれているだけです。書物を調べても、インターネットを調べても、私が調べた範囲では、「活動電流」がどの程度の大きさの電流なのか、その測定値がどこにも示されていません(※1)(※2)。それは当然のことで、**そもそも「活動電流」なるものが存在しないのですから、測定のしようがないのです。**

(※1) 大辞林(第三版)には、「活動電流」の項で、「生体内部に活動電位が生じた時に流れる微弱な電流。心電図や脳波はこれを記録したもの。」とありますが、心電図や脳波は「活動電流」を記録したものではありません。心電図は[mV]の単位、脳波は[μV]の単位で測定されているものであり、すなわち活動電位を記録したものです。

(※2) インターネット上に、「活動電流」を測定したものとしているサイトがいくつか見られますが、それらのサイトに示されている測定回路や測定方法を詳しく調べてみれば、いずれも電位(または電圧)を測定しているものばかりです。また、この電位(または電圧)をもとに「活動電流」を計算しているというサイトであっても、導体(測定回路の導線や抵抗器)内を流れる電流を計算していて(これはもちろん「活動電流」などではありません)、軸索内を流れる「活動電流」を計算しているものはありません。

(B) 「活動電流」のイオンの流れを説明できない

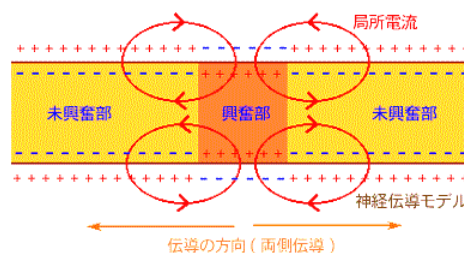
ここで、「活動電流」などというものが流れないことをもう少し別の観点から考えてみたいと思います。軸索内(一般に溶液内)を電流が流れるというとき、それはイオンの流れです。興奮部から隣の静止部にイオンが流れていったとき(ここでは、陽イオンの流れとします)、そのイオンの流れは、その先どうなるのでしょうか。いくつかの場合が考えられます。

- 【①】 隣の静止部で、神経細胞膜を通り抜けて神経繊維の外側に流れ出る。
- 【②】 隣の静止部にイオンがたまっていく(集まる)。
- 【③】 隣の静止部を通り越して、さらに先の静止部に向かって流れていく。

上記の【①】の考え方にもとづいて描かれているのが、図(5)-2(※)です。しかし、「活動電流」は、SとDの間の電位差によって、電位の高い部分から低い部分に向かって流れるという考えから出発しているのに、この図の電流は、電位の低い部分(未興奮部)から高い部分(その外側)に向かって流れ出ています。一体どういうしくみで、電位の低いところから高いところへ「活動電流」が流れていくのでしょうか。

(※) <http://www2.oninet.ne.jp/ts0905/emg/emg05.htm> より引用。

おそらく、濃度勾配により流れ出すと考えておられるのだらうと思います。しかし、この「活動電流」は、興奮部と未興奮部の間の陽イオンがそのまま全体として移動するだけで、図の未興奮部の静止状態でのイオン濃度のままです。静止状態というのは、何らかのイオンがそれぞれのイオンチャネルを通して「同数個ず



図(5)-2

つ」神経繊維の内外に出入りしている状態で、見かけ上イオンの出入りがない状態すなわち「平衡状態(※)」とも呼ばれる状態です。この平衡状態のイオン濃度のままでは、「活動電流」が濃度勾配によって神経繊維の外側に流れ出すことはありません。また、あとで説明しますが、軸索の中を興奮部から未興奮部へと「活動電流」が流れたとしても、その「活動電流」の正体である陽イオンの濃度が上昇することはありません。

(※) この状態は、陽イオンが濃度勾配により未興奮部の中から外に向かって押し出されようとする「力」と、電位勾配により未興奮部の外から中に向かって押し込まれようとする「力」がつりあっている状態のことです。

さらに、このような電流が流れるためには神経細胞膜にイオンを通すチャネルが必要ですが、一体どのようなチャネルが存在するのでしょうか。仮に、「活動電流」を神経繊維の外に流し出す何らかの「イオンチャネル」が未興奮部に存在するとすると、当然、興奮部にも同様の「イオンチャネル」があるはずです。そうであれば、「活動電流」は遠くの未興奮部の「イオンチャネル」でなく近くの興奮部の「イオンチャネル」を通することもでき(どちらかと言えば、近くのチャネルを通る方が自然でしょう)、その場合には、この図に描かれているような電流は流れないことになります。また、そのような「イオンチャネル」が存在しないのであれば、やはり、この図のような電流は流れないことになります(※)。

(※) なお、この図は、おそらく「電流が流れるためには回路が閉じている必要がある」という考え方にもとづいているものと思います(ぐるっとひとつながりになった回路のことを、「閉じた回路」と言います)。この場合、「閉じた回路」を流れる電流はその回路全体の電流が同時に(一斉に)ぐるっと流れるからこそ「閉じた回路」と言います。図(5)ー2の興奮部で外から流れ込む電流は興奮が伝えられた時の Na^+ の流れであり、未興奮部で外に流れ出すのは「活動電流」です。図に描かれているように、これらの「電流」が興奮部と未興奮部で同時に流れるのであれば、興奮部に興奮が生じると同時に、未興奮部では「活動電流」が外に流れ出すことになります。そんなことが起こるのなら、興奮部で興奮が生じたという何らかの「情報」が、その興奮と同時に未興奮部に届けられたことになってしまいます。それはありえないことです。

ひょっとすると、神経繊維に興奮が生じるときに軸索内に流れ込む Na^+ の流れは一瞬だから「活動電流」もまた一瞬だけ流れ、したがって、ここでは容量性電流(※)が流れると考える方がおられるかもしれません。短時間であれば、未興奮部で神経細胞膜というコンデンサを通してその内側から外側に容量性電流が流れ出るというのです。容量性電流であれば、イオンチャネルなどなくても電流が流れるからです。

(※) 容量性電流については、**物理の学習(H)**をご覧ください。

前述のように、神経繊維の静止状態というのは、神経細胞膜を通して見かけ上イオンの出入りがない状態すなわち「平衡状態」とよばれる状態です。この状態では、神経細胞膜の内側と外側の表面に一定量の電荷が分布しています。したがって、この状態から容量性電流が流れ出るためには神経細胞膜の両表面に分布している電荷が移動し始める必要がありますが、そのためには、まずその両表面にかかる電圧に変化が生じなければなりません(※)。しかし、あとで説明しますが、軸索の中を興奮部から未興奮部へと「活動電流」が流れたとしても、興奮部と未興奮部の間のイオンが全体として移動するだけで、そのことで未興奮部の電位が上昇するということはありません。**未興奮部の電位に変化がなければ(すなわち、細胞膜の両表面にかかる電圧に変化がなければ)、その神経細胞膜を通して容量性電流が流れ出ることもありません。**

(※) 神経細胞膜(コンデンサ)にかかる電圧に変化が起きないのに、容量性電流の方が先に流れ始めるということはありません。

神経繊維はその細胞膜全体がコンデンサですから、軸索内に電位の高い部分(状態)が生じたときには、短い時間であれば髄鞘の部分も含めてその細胞膜のいたるところ(電位が高くなったところ)で容量性電流は流れます。つまり、興奮部に Na^+ が流れ込んで軸索内に高い電位が生じた直後に、その興奮部のすぐ近くの電位が高いところであれば神経繊維の外に向かって容量性電流が流れ出ることも考えられます。抵抗のある軸索の中を通して遠くの未興奮部で容量性電流が流れ出ると考えるよりも、興奮部の近くやその周辺の髄鞘部分の電位が高くなったところで容量性電流が流れ出ると考える方が自然です。結局のところ、たとえ容量性電流を考慮に入れたとしても、電位の高い状態(陽イオン濃度の高い状態)が伝えられるよりも前に未興奮部(ここは静止電位のままです)を外に出る電流は流れないことになります(※)。

(※) 多くの研究者がこの容量性電流について誤解しておられます。繰り返しますが、電位の高い状態が伝播してきて初めて、その電位の高くなった部分(未興奮部に限らず、どの部分でも)で容量性電流が流れ出ます。「容量性電流が流れ出る(外向き電流が流れる)ことによって膜電位が上昇し、脱分極が起きる」という考え方は、因果関係の説明が逆転しています。

さすがに、上記【①】のような電流が流れるとするには無理があると見えて、ほとんどの教科書やインターネット上のサイトでは、図(5)-3(※)のような「活動電流」が描かれています。つまり、神経繊維の中でも外でも、「活動電流」は「+」から「-」に向かって流れるとされています。隣の静止部で、中と外の電流はつながっていないのです。この場合、神経繊維の中を隣の静止部まで流れていった「活動電流」つまり陽イオンの流れは、その先どうなるのでしょうか。上記【②】のように、隣の静止部に「たまっていく」のでしょうか。

(※) 東京書籍「生物」(p.224)より引用。

「たまる」とすると、隣の静止部でイオンの流れがストップしなければなりません。なぜそこでストップするのでしょうか。ストップする理由がありません。また、神経繊維内の電荷の分布は、実際のところは図(4)-1のようになっているのです。この図を見れば、「活動電流」が興奮部から(遠くにある)隣の静止部の「-」に向かって流れる必然性のないことがわかります。つまり、**「活動電流」が(遠くにある)隣の静止部に向かって流れていき、そこでイオンの流れがストップするなどということは起こりえない**のです。

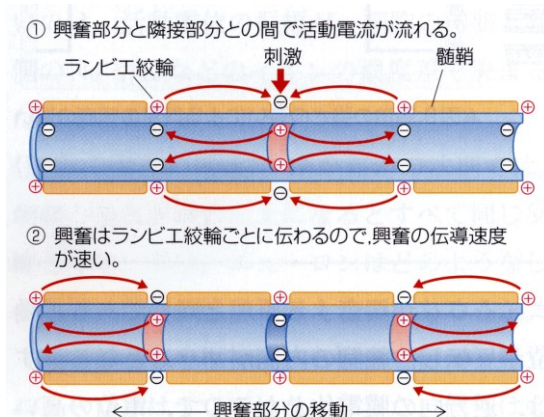
仮に隣の静止部に先に流れ着いた陽イオンがそこでストップしたとしても、その陽イオンとあとからやってくる陽イオンとが互いに反発し合い、隣の静止部に「たまっていく」ということにはなりません。

上記【②】も起こらないとすると、【③】の現象が生じるのでしょうか。そういうことになると、「活動電流」は軸索の中をどこまでも流れ続けていくことになります。どこまでも流れ続けていくのなら、神経細胞膜の途中に、興奮を起こす部分(電位依存性 Na^+ チャネル)など必要なくなります。また、どこまでも流れ続けていって神経繊維の「終端」に達したとき、「活動電流」として流れてきた陽イオンはその先どうなるのでしょうか(※)。

(※) 神経繊維の「終端」すなわち軸索末端(シナプス前終末)での現象に関する現在の知見によれば、軸索末端から活動電流(陽イオン)が流れ出すことはありません。それどころか、軸索末端に興奮が達したときには軸索末端内に(陽イオンである) Ca^{2+} が流れ込み、これがシナプス伝達物質の放出のきっかけになることが知られています。

結局のところ、神経繊維の中を「活動電流」が流れるとすると、その「活動電流」の正体である陽イオンの流れを説明することができなくなってしまいます。つまり、「活動電流」などというものは流れていないと結論づけるしかありません(※)。

(※) 神経繊維の中を「活動電流」などというものが流れないのですから、その外側もまた流れるはずがありません。ところで、神経は何本の神経繊維が束になっているものであるのに、どの教科書も興奮の伝導を説明する図では神経繊維1本だけを描いています。そのように描くことによって、「活動電流」が他の神経繊維に邪魔されることなく、神経繊維の外側を流れているかのように説明しているのです。「活動電流」が流れるとすると人たちは、図(4)-4のように神経繊維が束になっている状態で、神経繊維の外側をどのように電流が流れると説明されるのでしょうか。



図(5)-3

(6) 跳躍伝導だと、なぜ伝導速度が大きいのか

まず、インターネット上で次のサイトをご覧ください。

<http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0220c/contents/7h/d/d10.html>

このサイトは、独立行政法人科学技術振興機構というところが「理科ネットワーク(一般公開版)」というページ

を作って公開しているものの一つです。画面右下の「次へ」を2回クリックすると、有髄神経繊維と無髄神経繊維の伝導速度の違いをわかりやすく動画で見せてくれます。**ポイントは、興奮が起こる部分では伝導が「小休止し、時間がかかっているという点です。**つまり、隣から電位の高い状態が伝わって来たとき、「Na⁺チャネルが開いてNa⁺が軸索内に流れ込む」という一連の処理には時間がかかることを、この動画は示しています。

この「一連の処理には時間がかかる」のはなぜなのでしょう。Na⁺が軸索内に流れ込むということは、開いたNa⁺チャネル(その通路は細胞液で満たされています)を通してNa⁺が神経繊維の外から中へと移動することです。この「一連の処理」に時間がかかるのは、このようにNa⁺チャネルを実際にイオンが移動する必要があるからです(※)。また、Na⁺チャネルが電位の変化を感知して、そのNa⁺チャネルを構成しているタンパク質が変形しチャネルを開くという現象にも時間が必要になります。

(※) Na⁺チャネルを実際にイオンが移動するということは、この部分を電流が流れるということです。ただし、この電流は「活動電流」などではありません。この電流は、神経繊維の外から中へごく短い距離(神経細胞膜の厚さ、あるいはNa⁺チャネルの通路の長さ)を流れます。一方、「活動電流」というのは、軸索の中を隣の静止部に向かって流れていくとされる電流のことです。

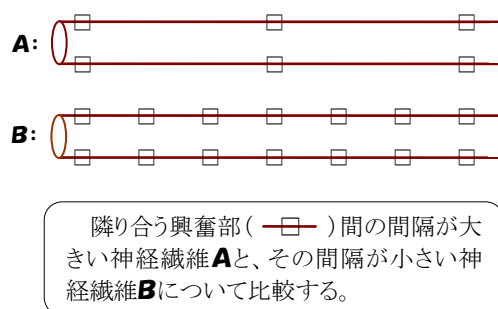
これに対して、軸索内を興奮が伝わるときには、電位の高い状態がパルス波となって伝わります。**電位の高い状態が波となって伝えられるからこそ、大きな伝導速度が実現しているのです。**

なお、このパルス波が伝えられる速さは、軸索内に含まれるイオンの濃度や温度による影響が大きく、有髄神経繊維か無髄神経繊維かの違いにかかわらずほとんど同じと考えてよいと思います。

以上のように、興奮が軸索内を伝わるときには2つの現象が交互に起こり、それが繰り返されます。1つ目の現象は、隣から興奮(電位の高い状態)が伝わってきたとき、Na⁺チャネルが開き軸索内にNa⁺が流れ込むという「時間のかかる」現象です。2つ目の現象は、軸索内に流れ込んだNa⁺の周囲に電位の高い状態ができ、この状態が軸索内をパルス波として伝わる現象です。このパルス波が隣の静止部に達すると、そこで再び1つ目の現象が起き、続いて2つ目の現象が生じ・・・というようにして、次々と興奮が伝えられていきます。この場合、**1つ目の現象は時間がかかるということは、軸索内を興奮が伝えられるときに1つ目の現象が起きるたびに興奮の伝導が「小休止」することを意味します。**その「小休止」の様子を動画で見せてくれるのが、上記の独立行政法人科学技術振興機構が公開しているサイトというわけです。

いま、図(6)-1のように同じ長さの神経繊維AとBがあるとください。両者の違いは、興奮を起こす部分(Na⁺チャネルが存在する部分)間の間隔の大きさの違いです。この図は、神経繊維Aのように、興奮を起こす部分間の間隔が大きいほど「小休止」する部分の数が少ないことを示しています。

すなわち、有髄神経繊維のように**興奮を起こす部分間の間隔(隣り合うランビエ絞輪間の間隔)が大きくて「時間のかかる一連の処理」の回数が少ないほど、伝導の「小休止」が少なくない神経繊維全体としての伝導の速さが大きくなる**ことになります。跳躍伝導の伝導速度が大きいことの本質は、まさにこの点にあるのです(※1)(※2)(※3)。



図(6)-1

(※1) 有髄神経繊維の伝導速度が大きいというのは、神経繊維全体で考えたときの速度が大きい(「小休止」が少ないから)ということであって、髄鞘部分の伝導速度が大きいというわけではありません。パルス波が伝えられる速さは、髄鞘があろうがなかろうが、どの部分でも同じだと考えられるからです。

(※2) 有髄神経繊維と無髄神経繊維の違いは、髄鞘があるかどうかということです。しかし、ここで重要なのはそのことではなく、興奮を起こす部分間の間隔が大きいかどうかということなのです。

(※3) たとえを挙げるなら、各駅停車の電車が有髄神経繊維で、急行列車が有髄神経繊維に相当します。どちらの電車も駅間の速度にそれほど違いはありません。急行列車が早く(先に)目的地に到着できるのは途中の停車駅が少ないからです。

なお、多くの場合、「髄鞘が電氣的な絶縁体として働く」から跳躍伝導となり、伝導速度が大きくなると説明されます。しかし、上記の説明で明らかのように、「髄鞘が電氣的な絶縁体」であることは、跳躍伝導の伝導速度が大きくなることの直接の原因ではありません。つまり、**跳躍伝導の伝導速度が大きくなることを説明するのに、「髄鞘が絶縁体である」ことをことさらに述べる必要はどこにもありません**。繰り返しになりますが、「有髄神経繊維(跳躍伝導)では興奮を起こす部分間の間隔(隣り合うランビエ絞輪間の間隔)が大きい、したがって興奮の伝導の『小休止』が少ない」・・・このことが跳躍伝導の伝導速度が大きくなることの本質なのです。

(7) 興奮はどこまで伝えられるか

もう一度、図(4)-3を見てください。この図は、興奮が伝わるのは電位の高い状態がパルス波となって伝わることだということを説明するものでした。この図を少し詳しく見てみると、電位の高い状態が周囲に伝わるにつれて、その電位のピークの高さ(パルスの高さ)が次第に低くなるように描いてあります。これは、興奮の強さが次第に弱くなる、つまり減衰することを表しています。なぜ興奮の強さが減衰するのでしょうか。

図(4)-1に示されているように、神経繊維の外側と内側には、陽イオンと陰イオンが多数分布しています。興奮が伝わってきた結果、S付近に生じた Na^+ の濃度の高い部分からその周囲に向かって陽イオン濃度の高い部分が広がっていくとき、その広がり方はS付近を中心とする球面波のようになります。図(4)-2はその断面を描いたものです。このとき、この球面波(パルス波)は、軸索の中を進むにつれて軸索の壁すなわち神経細胞膜の内側表面に衝突し反射することを繰り返しながら、遠くまで伝わっていくことになります。その際、**陽イオン濃度の高い部分は、神経細胞膜の内側表面に近づくときにそこにある陰イオンに引き寄せられ、そのたびに、衝突後に反射する「イオン濃度の高い部分」の濃度が減少していきます**。その結果、陽イオン濃度の高い部分は全体として次第に小さくなり、軸索内を伝えられる興奮の強さが徐々に減衰していきます(*)。「陽イオン濃度の高い部分」は、すなわち「電位の高い部分」です。興奮の強さが減衰するということは、電位の高い部分のピーク(パルスの高さ)が低くなるという意味です。

(※)「興奮伝導の三原則」というのがあって、その一つに「不減衰伝導」というのがあります。「軸索の直径が一定ならば興奮の大きさは減衰せず一定の大きさで伝導する」という内容ですが、これは神経繊維全体としての伝導において減衰がないことを述べているのであり、興奮部からその隣の静止部までの伝導は上記のように常に減衰していきます。興奮が次の静止部に到達したとき、そのこの Na^+ チャネルが開いて Na^+ が軸索内に流れ込み「再びもとの高い電位に復活する」、これが繰り返されることにより神経繊維全体としての伝導は減衰がないということなのです。

もしも、興奮部からその隣の静止部までの伝導が減衰しないというのであれば、それはすなわち神経繊維内のあらゆる部分で常に減衰しないことを意味するわけですが、そうだと、神経繊維の途中で電位依存性の Na^+ チャネルなど必要がなく、神経繊維の「入口」から「出口」までずっと興奮が減衰しないで伝わることになります。実際には減衰が起こるからこそ、「興奮の強さを復活させる」ために、興奮を起こす部分(電位依存性 Na^+ チャネル)が一定の間隔で必要になるのです。

興奮が隣のランビエ絞輪にまで達したとき、そこにある Na^+ チャネルを開かせるには、ある一定の電位すなわち閾値(いきち)以上の電位にする必要があります。興奮が隣のランビエ絞輪に達するまでに減衰してしまって Na^+ チャネルの電位を閾値以上にできなければ、興奮はそれ以上伝えられなくなってしまいます。実際には、少なくとも2つ先のランビエ絞輪にある Na^+ チャネルを開かせることができると言われています(*)。隣のランビエ絞輪に興奮が伝えられてきたとき、そのイオンチャネルが何かの原因で正常に働かない場合でも、もうひとつ先のランビエ絞輪まで閾値以上の電位を伝えることができれば、興奮を伝えることができるというわけです。すなわち、安全性のために「少なくとも2つ先まで」という余裕が与えられているのです。

(※) <http://ja.wikipedia.org/wiki/活動電位>

なお、「少なくとも2つ先のランビエ絞輪にある Na^+ チャネルを開かせることができる」ということは、単に開かせることが「可能」ということではなく、実際にほぼ同時に複数(少なくとも2つ)のランビエ絞輪で Na^+ チャネルが開いていることを意味します(※1)。つまり、軸索の中を電位の高い状態がパルス波となって伝わり、このパル

ス波が隣の静止部でとどまることなく次々と先の静止部に伝播していき、閾値以上の電位を維持している限り複数の静止部にある Na^+ チャネルをほぼ同時に(パルス波の伝わる時間間隔で)開かせているのです(※2)。

(※1) 「隣のランビエ絞輪のイオンチャネルが何かの原因で正常に働かない場合にだけ、もう一つ先のランビエ絞輪まで閾値以上の電位が伝えられる」ということはあり得ず、興奮が伝えられるときには常に2つ以上のランビエ絞輪に閾値以上の電位が伝えられているという意味です。

(※2) この場合、『活動電流』が興奮部から隣の静止部に向かって流れる」という考え方では、ほぼ同時に複数の Na^+ チャネルが開いていることを説明できないことを理解していただけるでしょうか。

(8) 生物の進化との関連で考えてみました

神経繊維内の興奮の伝導速度が大きくなることは、生物の生存にとって有利であるに違いありません。進化の中で、伝導速度を大きくする方法の一つとして跳躍伝導というしくみを身につけた(たまたまこのようなくみを身につけた生物が、有利に生き延びた)ということなのでしょう。跳躍伝導では、「 Na^+ チャネルが開いて Na^+ が軸索内に流れ込む」という時間のかかる処理の回数をできるだけ少なくすることが、伝導速度を大きくするポイントでした。そのために、髄鞘の幅を広くし(※1)、隣り合うランビエ絞輪間の間隔を大きくする方向に進化してきた(※2)ということなのでしょう。

(※1) 髄鞘は、軸索の回りに巻きついた1つの細胞(シュワン細胞)です。この細胞が「長くなる」ということは、巻き数が多くなり髄鞘が厚くなるということです。またこの細胞の「幅が広がる」ということは、軸索方向に広がる、したがって隣り合うランビエ絞輪間の間隔が大きくなるということです。

(※2) ランビエ絞輪部で興奮が起こり「一連の処理」が行われるたびに、流入した Na^+ を神経繊維の外に汲み出すためにATPのエネルギーを消費するということが繰り返されます。隣り合うランビエ絞輪間の間隔を大きくすることによって興奮を起こす部分を減らし、「一連の処理」の回数を少なくすれば、それだけエネルギー消費が少なくなります。生物が髄鞘の幅を広くするように進化してきたのは、伝導速度を大きくするためだけでなく、エネルギー消費を少なくするためでもあるのです。

ただし、前記のように、ランビエ絞輪間を伝導する間に興奮の強さは減衰していきますから、髄鞘の幅を広くするにも限度があります。**少なくとも2つ先のランビエ絞輪までは Na^+ チャネルが開くための閾値以上の電位を維持して興奮が届くという条件の下で、できるだけ髄鞘の幅を広くするように進化してきた**ということなのでしょう。

(9) 神経繊維が太いほど、なぜ伝導速度が大きいのか

隣り合うランビエ絞輪間の間隔を大きくすることが興奮の伝導速度を大きくする方法の一つであることを、上記で確認しました。興奮の伝導速度を大きくするもう一つの方法、それは神経繊維を太くすることです。ここでは、神経繊維が太いとなぜ興奮の伝導速度が大きくなるのかについて考えてみたいと思います。

すでに述べましたが、神経繊維が太いというのには2つのタイプがあります。無髄神経繊維の場合で神経繊維の軸索が太いタイプ(これを第1のタイプとします)と、有髄神経繊維の場合で髄鞘の厚みが大きくて神経繊維全体が太いタイプ(これを第2のタイプとします)です。実は、どちらのタイプの場合も、伝導速度が大きくなる理由は基本的なところでは共通しています。そのヒントは、**(6)跳躍伝導だと、なぜ伝導速度が大きいのか**と**(7)興奮はどこまで伝えられるか**の中ですでに述べておきました。要するに、**伝導の「小休止」**(つまり「 Na^+ チャネルが開いて軸索内に Na^+ が流れ込む」という時間のかかる処理)**をできるだけしないようにすれば伝導速度が大きくなる**のであり、**そのためには、できるだけ興奮が減衰しないで、 Na^+ チャネルを開かせることのできる閾値以上の電位を維持したまま、できるだけ遠くに興奮が伝えられるようにすればよい**のです。このことを念頭に置いて、以下の**(A)**と**(B)**を読み進めてください。

(A) 第1のタイプ(無髄神経繊維)の場合

(7)興奮はどこまで伝えられるかの中で、次のように説明しました。

陽イオン濃度の高い部分は、軸索内を伝わる時、神経細胞膜の内側表面に衝突し反射することを繰り返しながら、神経細胞膜の内側表面に近づくときにそこにある陰イオンに引き寄せられ、そのたび

に、衝突後に反射する「イオン濃度の高い部分」の濃度が減少していきます。

つまり、興奮が減衰しないためには、陽イオン濃度の高い部分が神経細胞膜の内側表面に衝突し反射する回数ができるだけ少ないのがよいのです。第1のタイプの神経繊維では、軸索を太くすることによりこのことを実現しています。**軸索が太いほど、神経細胞膜の内側の向かい合う壁が互いに「遠く」なり、軸索内を伝わる陽イオン濃度の高い部分がその神経細胞膜の内側表面に衝突し反射する回数が少なくなって、そこに分布している陰イオンの影響を受けにくくなる**からです。

なお、第1のタイプの神経繊維で、陽イオン濃度の高い部分があまり減衰しないで遠くまで伝わるということとは、ある興奮部から始まった陽イオン濃度の高い部分の伝播はその一つ隣の静止部で止まってしまわずに、さらに先の静止部へと伝播していくことを意味します。つまり、**この場合の興奮は、興奮部からその隣の静止部へとひとつずつ順番に伝えられるものではありません**。陽イオン濃度の高い部分が閾値以上の電位を維持している限り、軸索方向に並んだ複数の静止部にある Na^+ チャネルを次々と開いていきながらも(※)、**それらの興奮を起こした部分での「時間のかかる処理」が終わるのを待つことなく、遠くの静止部まですばやく伝播して Na^+ チャネルを開くことができるから、伝導速度が大きくなる**のです。

(※) 軸索方向に並んだ複数の静止部にある Na^+ チャネルを次々と開くことは、実は無駄なことです。流入した Na^+ を神経繊維の外に汲み出すためにはATPのエネルギーを消費するという変化が必要で、開く必要のない Na^+ チャネルを開くことはエネルギーを無駄に使うことになるからです。途中の Na^+ チャネルは開かせないで、できるだけ遠くの Na^+ チャネルだけを開くことができれば最も効率が良いことになります。しかし、一方でまた、同時に複数の Na^+ チャネルが開くということは、興奮が確実に伝えられるようになるという意味で重要なことです。

(B) 第2のタイプ(有髄神経繊維)の場合

第2のタイプの神経繊維の場合には、どのように考えればよいのでしょうか。すでに図(4)-1の説明の中で述べましたが、絶縁体である髄鞘はコンデンサを形成しているのです。コンデンサについては**物理の学習(G)**で学んだように、両極板にかかる電圧が同じであれば、その極板の間隔が大きいほど極板にたくわえられる電荷量が少ないのです。このことを神経繊維に当てはめると、**絶縁体である髄鞘が厚いほどその両面(神経繊維の外側と内側)に分布する電荷、すなわち陽イオン(外側)と陰イオン(内側)が少なくなる**ことを示しています。ここまで説明すれば、あとは第1のタイプの神経繊維の場合と同じだということに気づいていただけるでしょう。神経細胞膜の内側の表面に分布している陰イオンが少ないほど、軸索内を伝わる陽イオン濃度の高い部分は、その神経細胞膜の内側に衝突し反射する際にそこにある陰イオンから影響を受けにくくなり、それだけ減衰しないで伝わることもできるのです(※)。

(※) **(6) 跳躍伝導となぜ伝導速度が大きいか**の最後のところで、「跳躍伝導の伝導速度が大きくなることを説明するのに『髄鞘が絶縁体である』ことをとさらに述べる必要はありません」と指摘しました。この場合の「絶縁体」という用語は、「電気を通さない(通しにくい)物質」という意味で用いられています。跳躍伝導の伝導速度が大きくなるのは、髄鞘のこのような絶縁体としての性質によるのではなく、興奮を起こす部分間の間隔(隣り合うランビエ絞輪間の間隔)が大きいことによるのだということを指摘したのでした。

これに対して、上記**(9)(B)**の、「絶縁体である髄鞘が厚いほど…軸索内を伝わる陽イオン濃度の高い部分は…減衰しないで伝わる」(したがって伝導速度が大きい)という場合の絶縁体は、より正確には「誘電体」と表現すべきものです。ここでの髄鞘は、電気を通さない(通しにくい)物質としての絶縁体ではなく、誘電現象を起こす物質としての絶縁体(誘電体)としてはたっています。髄鞘が厚いほど伝導速度が大きいのは、髄鞘の、絶縁体(誘電体)としての性質によります。このように、**(6)**の最後のところの「絶縁体」と**(9)(B)**の「絶縁体」とは、異なる意味で用いられていることに注意してください。

なお、「誘電現象」および「誘電体」については、**物理の学習(G)**をご覧ください。

すでに述べましたが、髄鞘は、シュワン細胞という一つの細胞が長く、幅広く成長したものです。長くなることが(軸索のまわりに巻きつく回数が増えて)髄鞘を厚くし、幅広くなることが隣り合うランビエ絞輪間の間隔を大きくするのでした。この、シュワン細胞が「長くなる」と「幅広くなる」とことは、生物の進化の中で同

時に起こってきたのだと思います。髄鞘が厚くなることで興奮の強さが減衰しにくくなり、興奮がそれだけ遠くまで伝えられるようになったので隣り合うランビエ絞輪間の間隔を大きくすることができた、というわけです。両方の効果が相まって、伝導速度が大きくなったのです。シュワン細胞が長くなるだけ、あるいは幅広くなるだけ、というようにどちらか一方の変化だけが起きたのでは、伝導速度は大きくはならないでしょう。

(C) 「軸索が太いほどイオンチャンネルがたくさん分布しているから、伝導速度が大きい」という考え

「軸索が太いほどイオンチャンネルがたくさん分布しているから、興奮が速く伝わる」と説明されることがあります。軸索が太くなるほどその円周の長さが大きくなって、神経細胞膜にそれだけ多くのイオンチャンネルが存在できるようになります。イオンチャンネルがたくさん分布していれば、興奮が伝わってきたときそれだけ多くの Na^+ が軸索内に流れ込み、大きな「活動電流」が流れるというのです。

このような考え方は、一見したところ、正しいように思われるかもしれませんが、しかし、ある静止部のイオンチャンネルの数が増えたからといって、その部分に興奮が伝わってきたときにより多くの Na^+ が軸索内に流れ込むことはありません。図(5)-1の、活動電位のグラフとその注釈部分を見てください。活動電位の最大値はどの場合にもおよそ100mVで一定だとあります。これは、電位依存性の Na^+ チャンネルのはたらきによります。興奮が伝わってきて Na^+ チャンネルが開いたあと、この Na^+ チャンネルはすぐに閉じます。ある一定量の Na^+ が軸索内に流れ込んだら、それ以上余計に Na^+ が流れ込まないようにになっているのです(※1)。つまり、活動電位の最大値が100mVに達した段階ですべての Na^+ チャンネルが閉じます。どれだけ多くの Na^+ チャンネルが存在していようと、軸索内に流れ込む Na^+ の量は一定です(※2)。

(※1) Na^+ がたくさん流れ込むと、興奮が通り過ぎたあとに Na^+ -K⁺ポンプが Na^+ を神経細胞の外に汲み出す際に、より多くのエネルギーを必要とします。生物にとってはできるだけエネルギー消費を少なくすることが重要です。一定量の Na^+ が流れ込んだ時点で Na^+ チャンネルが閉じるようになっているのです。

(※2) ただし、 Na^+ チャンネルが増えること自体は、伝えられてきた興奮を感じる部分が増える、つまり感度がよくなる、興奮が確実に伝えられるようになる、という意味で重要なことです。

(D) 「軸索が太いほど電気抵抗が小さくなり、伝導速度が大きくなる」という考え

数研出版の教科書には、「軸索が太いほど電気抵抗が小さくなり、伝導速度は大きくなる」という説明があります(p.208 脚注)が、この説明については2つの疑問が生じます。1つ目は「軸索が太いほど、なぜ電気抵抗が小さくなるのか」ということであり、2つ目は「電気抵抗が小さくなると、なぜ伝導速度が大きくなるのか」ということです。

1つ目の「軸索が太いほど電気抵抗が小さくなる」という説明は、おそらく、導体中を流れる電流との類推から出てきたものと思われます。一般に、導体(金属)の電気抵抗は、その断面積に反比例します。それは、導体中のすべての電子が「ところてん方式」で流れるからです。導体の断面積が大きくなればそこに含まれる電子の数が増え、これらの電子が全体として移動すれば移動する電子の数が増えるので電流が流れやすくなる、つまり電気抵抗が小さくなるということなのです。

このような考え方を神経繊維に当てはめてよいのでしょうか。「軸索が太いほど電気抵抗が小さくなる」ということは、「電気抵抗」が小さくなって軸索内を流れる電流が多くなるということでしょうか。実際のところは、軸索が太くなっても軸索内を流れる電流の量は多くならないことを、このすぐ上の項(9)(C)で説明しました。軸索が太くなっても、興奮時に軸索内に流れ込む Na^+ の量は一定で、したがって、軸索内を流れる電流(陽イオンの量)が多くなることはありません(※)。

(※) 導体の場合には、その内部(断面)全体に分布している電子のすべてが「ところてん方式」で一斉に移動します。そのため、導体が太くなれば移動する電子の数は増えます。これに対して、「活動電流」は軸索内を満たしているイオンのうちごく一部のイオンの流れです。軸索の断面全体を満たすようなイオンの流れではありません。つまり、軸索内を流れる「活動電流」は「ところてん方式」で流れるのではないのです。このような違いがあるために、「導体の電気抵抗はその断面積に反比例する」ことを神経繊維に対して当てはめることができないのです。

そもそも軸索の「電気抵抗」とはどのような現象(何が原因)なのでしょう。 「活動電流」が軸索内を流れるすなわちイオンが移動するとすると、これらのイオンは、軸索内の水分子や他の陽イオン、陰イオンとの衝突や反発、引き合いを繰り返しながらずるずると移動していくことになります。つまり、軸索の「電気抵抗」は、これらの水分子や他の陽イオン、陰イオンが存在することが原因です。軸索が太くなることによってこれらの陽イオンや陰イオンの濃度が小さくなるのであれば、おそらく「電気抵抗」は小さくなるでしょう。しかし、軸索内の細胞液の浸透圧のことを考えれば、細胞液中のイオン濃度が小さくなるなどということにはならないでしょう(※)。軸索内のイオン濃度が変わらなければ、軸索の「電気抵抗」が変化するとは考えられません。

(※) 溶液の浸透圧は溶液のモル濃度と絶対温度に比例するという関係があります(ファントホッフの式)。軸索が太くなっても軸索内の細胞液の浸透圧は変わらないはず(どの生物でも、その細胞液の浸透圧は、それぞれの組織で一定に保たれていないはず)から、そのモル濃度も変化しないという意味です。

軸索が太くなっても、流れる電流の量が変わらず、軸索内をイオンが移動する際の「抵抗」の原因である他の陽イオンや陰イオンの濃度も変わらないのに、なぜ「軸索が太いほど電気抵抗が小さくなる」と言えるのでしょうか。

2つ目の疑問は「電気抵抗が小さくなると、なぜ伝導速度が大きくなるのか」ということです。上記で、「電気抵抗」は小さくならないことを指摘しましたが、仮に「電気抵抗」が小さくなったとしても、軸索内を流れる電流の量は増えないのです。いったい何を根拠に「伝導速度が大きくなる」とおっしゃるのでしょうか(※)。まさか、「電気抵抗」が小さくなると軸索内を移動するイオンの速さが大きくなるともおっしゃるのでしょうか。これについても上記で指摘しましたが、軸索内を移動するイオンにとって「抵抗」となる、軸索内の他の陽イオンや陰イオンの濃度が変化しないのですから、移動するイオンの速さも変わらないことになります。

(※) あとで説明しますが、仮に軸索内を流れる電流の量が多くなったとしても、そのことによって電位依存性の Na^+ チャンネルが開くことはありません。電流が流れることと電位が変化することは別の現象です。軸索内を電流がたくさん流れるようになったとしても、そのことで伝導速度が大きくなるということはありません。

結局のところ、**「軸索が太いほど電気抵抗が小さくなり、伝導速度は大きくなる」という説明は成り立たないことになります。**要するに、「軸索が太いほど伝導速度が大きくなる」という実験結果を説明するために、あたかもその根拠であるかのように「電気抵抗が小さくなり」という部分を付け加えたに過ぎないのです。実際のところ、軸索中を移動するのはイオンそのものではなく「電位の高い状態」です。電位の高い状態がパルス波となって伝わるときに、軸索の電気抵抗という概念は関係ありません(※)。「活動電流」などというものが流れていないのですから、電気抵抗という概念を持ち出して説明すること自体、意味のないことです。

(※) 似たような例を挙げてみましょう。空気中を物体が運動すれば「空気抵抗」を受けます。これは、電流が流れる(つまり電子やイオンが移動する)ときの「電気抵抗」に相当します。しかし、音波が空気中を伝わるときに「空気抵抗」などという概念は関係ありません。これは、軸索の中を電位の高い状態がパルス波となって伝わる場合に「電気抵抗」などという概念が関係ないことに相当します。

(10) 無髄神経繊維の伝導を説明するところから、すでに間違いが始まっている

どの教科書でも、跳躍伝導の説明の前に無髄神経繊維の興奮の伝導のしかたが説明されています。そこには、次のように記載されています。

啓林館(p.226):

「興奮が起こると、興奮部とその隣接部分との間に電位差が生じ、電流(活動電流)が流れる。これが刺激となって隣接部分が興奮し、こうして次々と隣へと興奮が伝わっていく。」

東京書籍(p.224):

「活動電流は、細胞の外側では、静止している場所から活動している場所に向かって流れ、細胞の内側では、反対の方向に流れる。この活動電流が静止状態の場所を刺激し、閾値

を越える刺激となった部分で新しく活動電位が発生する。」

数研出版(p.208) :

「ニューロンが刺激を受けて興奮すると、興奮部と静止部との間で微弱な電流(活動電流)が流れる。この電流が刺激となって隣接部が興奮し、さらに次の隣接部が興奮するというようにして、興奮が軸索を両方向へと伝わっていく。これを興奮の伝導という。」

第一学習社(p.284) :

「軸索の一部に活動電位が生じると、興奮部と隣接する静止部との間に微弱な電流が流れる。この電流を活動電流という。細胞の興奮は、活動電流が次々と隣接する静止部に活動電位を起こすことによって伝えられる。これを興奮の伝導という。」

ここで共通しているのは、「活動電流が隣の静止部を刺激する」という考え方です。この考え方を跳躍伝導にも適用したために、「活動電流」が遠くのランビエ絞輪にまで流れていくという考え方が生まれたのだと思います。しかし、ここにも間違いがあります。**「活動電流」が静止部を刺激するではありません。**そもそも、「活動電流」は静止部をどのように「刺激」するのでしょうか。その「刺激」のしくみについて、どの教科書も何も述べていません(※)。

(※) 第一学習社だけは「静止部を刺激する」とは表現していません。しかし、「静止部に活動電位を起こす」としているだけで、そのしくみを述べていないという点では同じことです。

「隣の静止部を刺激し、興奮を起こす」ということは、すなわち、隣の静止部にある電位依存性 Na^+ チャネルを開かせるということです。この場合、電位依存性 Na^+ チャネルを開かせるのは、その名が示すように「電位の変化」です。具体的には、膜電位が静止電位(−70mV 程度)から閾値の電位(−50mV 程度)以上に上昇することにより、 Na^+ チャネルが開きます。このとき、この**電位の上昇は、電流が流れてくることで起きるのではありません。電流が流れることと電位が変化することとは、まったく別の現象です。**ほとんどの生物教科書で、この違いが理解されていません。

物理の学習(D)で学びましたが、正の電位を生み出すのは正電荷です。つまり、電位を上昇させるためには、その付近に正電荷(軸索内であれば陽イオン)が集まりその濃度が高くなる必要があります。仮に「活動電流」なるものが流れてきて、その電流の正体である陽イオンが隣の静止部でストップして集まることになるのなら、その付近の電位が上昇するでしょう。しかし、このことについては**(5)(B)「活動電流」のイオンの流れを説明できない**のところ指摘しましたが、隣の静止部に陽イオンが集まる(たまる)ことはありません。したがって、隣の静止部の電位が上昇するということはありません。

また、「活動電流」が流れてきて、それが容量性電流となって神経細胞膜(コンデンサ)を外側に流れ出し、細胞膜の内側に分布している陰イオンの量が減少して(または、陽イオンの量が増えて)細胞膜の内側の電位が上昇すると考える方がおられるかもしれません。しかし、このことについても**(5)(B)**および**物理の学習(H)**の最後のところで説明しましたように、神経細胞膜にかかっている電圧に変化がないのに容量性電流が流れ始めるということはありません。

つまり、たとえ「活動電流」が流れてきたとしても、あるいは流れる電流の量が多くなったとしても、そのことによって隣の静止部の電位が上昇したり、神経細胞膜を容量性電流が流れ出して膜電位が上昇したりすることはなく、したがって Na^+ チャネルが開くこともありません。結局のところ、**「活動電流」が静止部を刺激するなどということはいえないのです(※)。**

(※) もちろん、「活動電流」が静止部に活動電位を起こすこともありません。

無髄神経繊維では、 Na^+ チャネルが隣接しているために「電流が流れる」としても不思議に思わないところが、落とし穴になっているのではないかと思います(※)。すでに繰り返し述べてきましたが、興奮部で軸索の中に流れ込んだ Na^+ が細胞液中をずるずると移動することはありません。たとえ「隣の静止部」のようにすぐ近く

であっても Na^+ が移動していくことはありません。また、興奮部とその隣の静止部との間にある陽イオンが隣の静止部に向かって移動することはありません。つまり、無髄神経繊維の場合でも、軸索中を「活動電流」などというものが流れることはありません。**「活動電流」が興奮を伝えるのではないのです。**

(※) 正直に告白すれば、この無髄神経繊維の説明のところでは、私は教科書を読んでいても何の疑問も抱きませんでした。今になってみれば、うかつだったと反省しています。跳躍伝導の説明の中で「活動電流」が流れることに疑問を持ったことで初めて、無髄神経繊維の「活動電流」も間違いだということに気づいたのでした。

無髄神経繊維のように興奮の伝えられる距離が短い場合であっても、伝えられるのは「イオン濃度の高い部分」であり「イオン濃度の高い状態」です。興奮部で流入した Na^+ がその周囲に「陽イオン濃度の高い状態」すなわち「電位の高い状態」を生み出し、この「状態」がパルス波となって周囲に伝播していくのです。**興奮の伝わる距離が短い(無髄神経繊維の場合)か、長い(有髄神経繊維の場合)かにかかわらず、興奮の伝導のしくみは同じです(※)。**

(※) **(7)興奮はどこまで伝えられるか**の最後のところで指摘しましたが、跳躍伝導の際にはほぼ同時に複数のランビエ絞輪で Na^+ チャンネルが開いているのです。上記のように、無髄神経繊維と有髄神経繊維とで興奮の伝導のしくみが同じであるということは、無髄神経繊維でも、興奮は隣り合う Na^+ チャンネルの1つずつに順番に伝えられるのではなく、パルス波が閾値以上の電位を維持している限り、軸索方向に並んだ複数の静止部の Na^+ チャンネルに次々とほぼ同時に(パルス波の伝わる時間間隔で)伝えられていくことを意味しています。このことはまた、無髄神経繊維の興奮の伝導が「逐次伝導」と呼ぶべきものではないことをも意味しています。

(11) なぜ、教科書の記述は、奇妙な(理解しにくい、実は間違っている)説明になってしまったのか

高校生物の教科書がなぜこのような説明をするようになってしまったのか、その原因を考えてみました。

(A) 髄鞘の部分の電荷を無視したことが、最大の原因

どの教科書も間違ってしまった最大の原因は、髄鞘の部分の電荷を無視し、興奮状態の場所(S)の Na^+ と、その隣のランビエ絞輪部(D)の陰イオンとだけで興奮の伝導のしくみを考えようとしたことではないかと思います。図(4)-1のように髄鞘の部分にもイオンが分布していることに気づいていれば、遠くのランビエ絞輪まで「活動電流」が流れていくなどという考えは起きなかったでしょう。

(B) 「まず電流ありき」から出発した

また、興奮が伝わってきたときにはSとDの間に電位差が生じ、**電位差があれば電流が流れると思いついている**ことも原因の一つでしょう。しかし、SとDの間の電位の分布は図(4)-3のようになっていて、Sに Na^+ が流れ込んだ瞬間(図(4)-3の一番上の図)に電位差が生じているのは、Sのごく近くの部分だけです。それ以外の部分は、静止電位(等電位)のままです。このことに気づかずに、SからDに向かって電流が流れると思いつき「まず電流ありき」から出発したことも、原因の一つではないかと思えるのです。

最初に、「活動電流」という考え方が生み出されたのだと思います。そして、すべての間違いはここから始まります。興奮の伝導のしくみを「活動電流」によって説明するために、「活動電流が隣の静止部を刺激する」などと表現されるようになりました。また、跳躍伝導の伝導速度が大きくなることを説明するために、「髄鞘が電気的な絶縁体(電気を通さない、または通しにくい物質)として働く」ことが強調されるようになりました。有髄神経繊維では、電気的な絶縁体としての髄鞘の存在によって「活動電流」が隣のランビエ絞輪までの長い距離を流れていき、そのことによって興奮の伝導が跳躍し、伝導速度が大きくなると説明されるようになったのです。さらには、軸索が太いほど伝導速度が大きいことを説明するために、「(軸索の)電気抵抗が小さくなり」などと述べる教科書まで現れました。

以上の考え方は、すべて、興奮の伝導を「活動電流」にもとづいて説明しようとして生み出されたものです。いかにも「それらしい」考え方のようですが、いずれも間違いであることをこのレポートの中で一つひとつ示してきました。

(C) 「閉じた回路」を作る必要はない

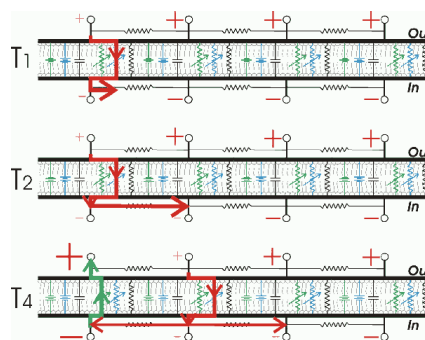
「電流が流れるためには、回路が閉じている必要がある」と考える人が、神経繊維の外側の電流まで「作り出した」と言えるかもしれません。すでに述べましたが、神経繊維内の「電位の高い状態」の伝播と、神経繊維外の「電位の低い状態」の伝播とは同時に始まりますが、互いに独立した波動現象で、神経繊維の内外で「閉じた回路」を作る必要はどこにもありません。

(D) 「電気回路モデルで電流が流れるから」は、本末転倒

神経細胞膜は、図(11)-1(*)のような電気回路でモデル化されることがあります。イオンチャネルは抵抗、絶縁体である髓鞘はコンデンサ、電位依存性イオンチャネルは可変抵抗などに置き換えて考えられます。このモデルをよく見ると、神経繊維の内側および外側を、それぞれの抵抗を通してランビエ絞輪からランビエ絞輪へと電流が流れることになっています。しかし、これはあくまでもモデルであって実体ではありません。モデルで電流が流れるからと言って、本物の神経繊維でも電流が流れるなど考えるのは、本末転倒です。

(※) <http://ja.wikipedia.org/wiki/活動電位> より引用

図(11)-1のような「モデル」は欠陥だらけで、とても神経細胞膜のモデルとして成り立つものではありません。このような「モデル」で考えるから、「まず電流ありき」になってしまうのです。



図(11)-1

(12) 付録 (本文に対する追加および補足の説明)

このレポートの読者の方から頂いたご質問に対する回答を考えたり疑問に思ったことをネットで調べたりしながら、レポートを書き終えた後もいろいろと考えをめぐらしていると、本文を少しくらい追加訂正した程度では済まない状況が生じてきました。本文を大幅に書き換えることも考えてみましたが、それはとても大変なことになりそうですので、ここに「付録」として、本文に対する追加および補足の説明を記載しようと思います。

付録1 (2)(B)の記述内容に対する追加説明

このレポートの以前の改定版(ver.6.0)までは、(2)(B)もう一つの問題点の記述のように、「二つ目の問題点は間違いというよりも理解しにくい説明のしかたがされている」としていました。しかし、その後も考え続けているうちに、二つ目の問題点も間違いだということに気がつきました。現在の私の考えは、次のとおりです。

髓鞘の部分でイオンが通れないのは、髓鞘が絶縁体だからということではなく、その部分にイオンチャネルがほとんど存在しない(*)ことによります。髓鞘が絶縁体であるかどうかに関係なく、この部分にはイオンチャネルがない、この部分をイオンが通れない、したがってこの部分では興奮が起こらないということなのです。つまり、「髓鞘が絶縁体として働くから」跳躍伝導が起きることではなく、髓鞘部分にイオンチャネルがなくこの部分では興奮が起こらないから跳躍伝導になるということなのです。跳躍伝導が起きる理由として「髓鞘が絶縁体として働くから」と述べることは間違いなのです。

(※) http://www.ps.toyaku.ac.jp/kino-keitai/yan_jiu_nei_rong.html

「髓鞘が絶縁体として働く」ことが跳躍伝導の理由とされたのは、おそらく、「活動電流」によって興奮の伝導を説明しようとしたからだだと思います。髓鞘が絶縁体であれば、「活動電流」が途中で神経繊維の外に流れ出ることなく遠くのランビエ絞輪にまで流れていくことができ、興奮が跳び跳びに伝えられる、という説明が成り立つと考えられたのでしょう。しかし、このレポートを最後まで読んで下さった読者であれば、このような説明がまったく成り立たないことを容易に理解されることでしょう。

付録2 (6)についての補足説明

レポートの(6)跳躍伝導だと、なぜ伝導速度が大きいのかの図(6)-1の下(※2)のところで述べておきましたように、ここでは、「有髄神経繊維と無髄神経繊維の違いは、髄鞘があるかどうかということです。しかし、ここで重要なのはそのことではなく、興奮を起こす部分間の間隔が大きいかどうかということなのです。」という立場で説明しています。しかし、そのような立場では、神経繊維の中を電位の高い状態が伝播していくときに神経繊維AでもBでも同じように減衰が起こり、どちらの神経繊維の場合でも、ある興奮部で生じた興奮は閾値以上の電位を維持している限り同じ距離のところまで伝えられることになります。

このレポートを書き始めた頃は、電位の高い状態が複数の Na^+ チャネルを次々とほぼ同時に開いていくという考え方をしていませんでした。教科書にあるように、一つひとつ順番に興奮が伝えられていくと考えていたのです。したがって、図(6)-1の神経繊維Bのように興奮する部分(Na^+ チャネル)が互いに近くに分布していれば、一つひとつ興奮を起こすたびに興奮の伝導が「小休止」するものと考えていました。

しかし、ここでは、神経繊維のAとBで興奮の強さの減衰のしかたに違いがあることを示さないことには、正しい説明にならないことに気付きました。現在では次のように考えています。

隣り合う興奮する部分(Na^+ チャネル)間の間隔が大きい神経繊維Aでは、「何らかのしくみ」があって興奮の強さが減衰しにくくなっている。減衰しにくいからこそ興奮が遠くまで伝えられるようになり、その結果、(進化の中で)隣り合う Na^+ チャネル間の間隔が大きくなることができた。そして、その「何らかのしくみ」が何かというと、それは、その間隔が大きい神経繊維Aでは神経繊維の細胞膜の内側に分布している陰イオンが少ないことだというわけです。それはすなわち、(図(6)-1には描かれていませんが)軸索のまわりを誘電体としての髄鞘が取り囲んでいるという意味です。

このレポートの(6)までの段階では、神経細胞膜の内側表面に分布している陰イオンが(誘電体としての)髄鞘の存在によって少なくなることを説明していないものですから、上記のような立場で説明しています。正しい説明にするためには、図(6)-1の下(※2)の記述の最後に、「なお、後述しますが、図(6)-1の神経繊維Aのように隣り合う興奮部間の間隔が大きい神経繊維ほど、軸索の中を伝えられる興奮の強さが減衰しにくくなっています。」という記述を追加するべきところです。

付録3 有髄神経繊維の断面の顕微鏡写真

まず、次のサイトをご覧ください。

http://www.visualphotos.com/artist/2x10528/steve_gschmeissner

ここに示される写真の中で、「Myelinated nerve fibres」というタイトルのものを見つけてください(このサイトの右上にある Enter keywords here という欄に Myelinated と入力し、検索してみてください)。有髄神経の電子顕微鏡写真です(着色されています。画像をクリックすると拡大されます)。これを見ると、軸索の中は細胞液だけが満たされているのではなく、何かの「構造物」(茶色に着色されている部分)があります。まるでジャングルようです。神経繊維の細胞膜の厚さはせいぜい数 nm ですが、その直径は数 μm 以上もあります。つまり、神経繊維の細胞膜はとても薄く、膜の厚さに比べれば神経繊維の直径はとても大きいのです。水で満たされたゴムホースのように神経繊維の内部が細胞液だけで満たされていたのでは、外部から圧力がかかったときに押しつぶされてしまうでしょう。そうならないためにジャングルのような「構造物」があるのだと思います。

もうひとつ、下記の書籍の p.170 と p.171 をご覧になってみてください(※)。

「クローズアップ 人体のしくみ図鑑」ジョン・克蘭シー(著) 北川 玲(訳) 創元社 2013年

ここにも、上記の「Myelinated nerve fibres」と同様の顕微鏡写真が掲載されています。とくに p.170 の写真では、有髄神経繊維が束になってぎっしりと並んでいる様子がよくわかります。

(※) 著作権の関係で、ここには図の引用をしないことにします。近くの図書館で閲覧してみてください。

これらの顕微鏡写真を見れば、神経繊維の中や外側をどのように電流が流れるのだろうかという疑問がわかります。神経繊維の中のジャングルのような「構造物」や、有髄神経繊維がぎっしりと並んでいる様子からは、そ

の中や外を電流が流れるようには見えないからです。神経繊維の内外を電流が流れることによって興奮が伝えられるのであれば、もっとイオンが移動しやすい構造になっているはずじゃないかと思うのです。

そこで、次のように考えました。興奮の伝導速度が大きいほど生物の生存にとって都合のはずだから、生物の神経繊維は伝導速度が大きくなるように進化してきたはずだ。その進化の結果が上記の顕微鏡写真に見られるような神経繊維の構造になっているのは、興奮が伝えられるしくみに電流が関係ないからだ、と。

私は、むしろ、神経繊維の中のジャングルのような「構造物」こそが興奮を伝えるのに大きな役割を演じているのではないかと考えています。神経繊維の中を電位の高い状態がパルス波となって伝えられるとき、この電位の高い状態のところは陽イオン濃度の高い部分ですから、これが「構造物」にぶつかると、この「構造物」もまた振動するのではないかと思うのです。一般に、波（振動）は液体中よりも固体中の方が速く伝わりますから、パルス波から振動を受け取った「構造物」は、軸索内の細胞液よりも速く振動を伝えることになります。この速く伝えられた「構造物」の振動が、興奮部から離れたところで再び細胞液中の陽イオンに伝えられることにより、陽イオン濃度の高い状態が素早く伝えられるのではないかと考えています。あくまでも、私の仮説（思いつき）です。

付録4 ケーブル理論

現在、研究者の間では、「活動電流」という用語は使われていないようです。では、神経繊維の中を電流が流れていないと考えられているのかというと、まったくそうではありません。世界中の研究者の間では「ケーブル理論」という考え方が花盛りで、そこでは、軸索内を local current すなわち「局所電流」と呼ばれる電流が流れるとされています。「局所電流」とは、要するに「活動電流」のことにほかなりません(※)。

(※) 両者は、厳密には少し違います。「活動電流」というのは、興奮部で軸索内に Na^+ が流れ込んで電位の高い部分が生じ、ここから電位の低い静止部に向かって軸索内を流れていくとされる電流のことです。これに対して、「局所電流」というのは、興奮部で軸索内に Na^+ が流れ込むときの「 Na^+ の流れ」をも含めて、神経繊維の内外をぐるっと流れるとされるひとつながりの電流のことです。

ケーブル理論のケーブルとは、絶縁被膜で覆われた導線つまり送電線や通信ケーブルのことです。まず、次のサイトをご覧ください。

http://en.wikipedia.org/wiki/Cable_theory

このサイトでは、ケーブル理論が神経繊維に適用され発展してきた歴史と、この理論の基本的な考え方が、わかりやすく説明されています。ただし、このあとで詳しく述べますが、私の立場はケーブル理論を神経繊維に適用することができないというものですから、このサイトを紹介することは不本意なのですが、わかりやすさという点で取り上げました。なお、このサイトではケーブル理論を神経繊維に適用しながら説明されていますが、私はこれを「本来」のケーブル（絶縁被膜で覆われた導線）に対する理論として記述しようと思います。

ケーブル理論の最初の結論が、このサイトのページの(12)式です。

$$\frac{1}{r_i} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = c_m \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{r_m} \quad \dots (12)$$

この式が導き出される手順はこのサイトのページに詳しく説明されていますから、ぜひご自分で確認してみてください。この偏微分方程式を解くと(14)式が得られます。

$$V = V_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad \dots (14)$$

これが、ケーブル理論の最も広く知られている結論の一つです。ただし、このサイトのページの(14)式のすぐ上のところに説明がありますが、この(14)式は steady-state conditions での解となっています。つまり、定常状態（時間的に変化しない状態。導線内を一定の電流が流れるようになって、一定の電位分布になっている状態）での解というわけです。そのため、(12)式において $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ としたときの解となっています。この(14)式は、 $x=0$ での電位が V_0 [V] のとき、その点から遠ざかるにつれて導線内の電位分布が指数関数的に減少していく

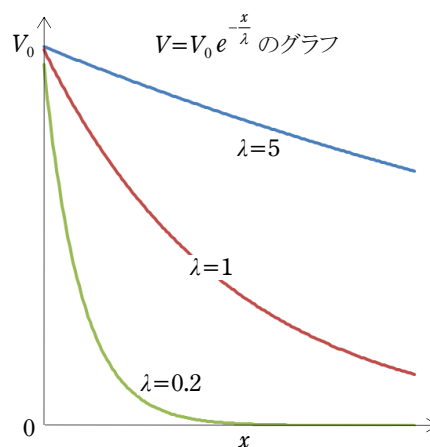
ことを表しています(図(12)-1)。

また、(14)式の中の λ は(13)式で表されていて、「長さ定数」とよばれています。

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_l}} \quad \dots (13)$$

ケーブルの導線中の $x=0$ での電位を V_0 [V]としたとき、そこから $x=\lambda$ [m]だけ離れたところでの電位 V_λ [V]は、(14)式で $x=\lambda$ とすることにより求めることができ、それが(17)式で表されています。

$$V_\lambda = \frac{V_0}{e} = 0.368V_0 \quad \dots (17)$$



図(12)-1

つまり、長さ定数 λ は、導線内で $x=0$ から遠ざかるにつれて電位が減衰していき、ある一定の値(V_0 の36.8%)になるところまでの距離を表しています。図(12)-1からもわかるように、この値が大きいほど遠くまで高い電位が維持され、電位の減衰が少なくなることを表します。なお、(13)式に(1)式と(3)式

$$r_m = \frac{R_m}{2\pi a} \quad \dots (1)$$

$$r_l = \frac{R_l}{\pi a^2} \quad \dots (3)$$

を代入することにより、 $\lambda = \sqrt{\frac{aR_m}{2R_l}}$ が得られます。この式は、長さ定数 λ が \sqrt{a} (a は導線部分の半径)に比例

することを示しており、太い導線ほど導線内での電位の減衰が少ないことを表しています。

(3)式の右辺の R_l [$\Omega \cdot m$] ($= R_l$ [$\Omega \cdot m^2/m$])は、「ケーブルの導線方向の単位長さあたり、かつ、単位断面積あたりの抵抗」を表しています。導線の抵抗は、その長さに比例し断面積に反比例しますから、 R_l を導線の断面積 πa^2 [m^2]で割った値は、導線の「単位長さあたりの抵抗」となります。これが左辺の r_l [Ω/m]です。

なお、(3)式では、抵抗が断面積に比例するなら断面積をかけますが、反比例なので断面積で割ることになります。同様に(1)式では、絶縁被膜の単位面積当たりの抵抗 R_m [$\Omega \cdot m^2$]を導線の円周 $2\pi a$ [m]で割ることにより、絶縁被膜の「導線方向の単位長さあたりの抵抗」 r_m [$\Omega \cdot m$]を求めています。少しややこしいですが、よく考えてみてください。

最後に、(12)式の両辺に r_m をかけて得られる式に、 $\tau = c_m r_m$ と(13)式とを代入して書き直したものが(20)式です。

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \tau \frac{\partial V}{\partial t} + V \quad \dots (20)$$

ここで、 $\tau = c_m r_m$ の中の c_m [F/m]は、ケーブルの絶縁被膜の「導線方向の単位長さあたりの電気容量」です。 c_m [F/m]と r_m [$\Omega \cdot m$]を掛け合わせたときの単位[F $\cdot \Omega$]が[s](つまり、[秒])になる(※)ことから、 τ [s]は「時定数」とよばれています。

(※) **物理の学習(G)**で学んだ $Q[C] = C[F] \cdot V[V]$ の式に、**物理の学習(H)**で学んだ $Q[C] = I[A] \cdot t[s]$ とオームの法則 $V[V] = I[A] \cdot R[\Omega]$ を代入すると、 $t[s] = C[F] \cdot R[\Omega]$ が導かれます。つまり、 $[s] = [F] \cdot [\Omega]$ となります。

上記のように、(14)式は、定常状態(導線内を一定の電流が流れるようになって、一定の電位分布になっている状態)という条件、すなわち(12)式または(20)式において $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ としたときの解になっています。しかし、

実際には、導線内の $x=0$ での電位が V_0 [V] になった直後には、ケーブルの絶縁被膜(これはコンデンサとして働きます)全体を通して容量性電流が流れ出ますから、すぐには(14)式で表されるような電位分布にはならず、いくらかの短い時間の経過ののちに(つまり、コンデンサとしての絶縁被膜への充電が完了して容量性電流が流れなくなったのちに)(14)式の電位分布になります。この「短い時間」(応答時間)の目安となるのが、時定数すなわち τ の値です。 τ の値が小さいほど、応答が速いことを表します。

付録5 ケーブル理論を神経繊維に適用できない理由

ケーブル理論は、付録4で紹介した Cable theory のサイトによれば、もともとはウィリアム・トムソン(のちのケルビン卿。絶対温度の単位 [K] の名称のもとになった人)が海底ケーブルにおける信号の減衰についての数学的モデルを発展させたものとされています。1850 年代のことだそうです。その後、世界中の多くの研究者が、神経繊維に見られる現象に適用し理論を発展させてきました。どの研究者も、神経繊維を抵抗とコンデンサからなる電気回路に置き換えていて、神経繊維の中で生じている現象が「電気回路に生じる現象」と同じ現象だとみなしているようです。

しかし、神経繊維をケーブル(電気回路)とみなすのはアナロジーでしかありません。とくに、軸索の中には多くのイオンを含む細胞液が満たされているのに対して、ケーブルの導線の中には電子と原子が存在します。液体中での現象と固体中での現象、イオンと電子。両者の振舞いが同じであると考えするにはそれ相当の吟味が必要だと思うのですが、「そんなことは、あたりまえ」と一笑に付されそうな雰囲気です。

世界中の研究者が認めている考え方に異を唱えるのはとても心細いのですが、それでも私は、ケーブル理論を神経繊維に適用することは間違っていると言わずにはられません。ここでは、私がなぜケーブル理論を神経繊維に適用できないと考えているのか、その理由を述べたいと思います。

(1) 何と言っても最大の理由は、神経繊維の中を電流など流れていないということです。このことは、このレポートの主張の核心部分です。神経繊維の中を興奮が伝えられるのは、軸索内に生じた陽イオン濃度の高い状態がパルス波となって伝播することによります。つまり、電気回路ではなく、波動論で説明すべき現象です。これに対して、ケーブルの中では実際に直流または交流が流れています。

(2) ケーブルの中では導線の断面全体を電子が流れます。つまり、「ところてん方式」で流れます。導線の断面全体を電子が流れることで成り立っているのが、ケーブル理論の $\eta_l = \frac{R_l}{\pi a^2}$ という式(付録4の(3)式)です。

これは、導線方向の抵抗がその断面積に反比例するという式です。導線の断面積が2倍になれば導線中を流れる電子の数が2倍になり、したがって抵抗が1/2になるという意味です。これに対して、神経繊維に興奮が生じて軸索の中を流れるとされる「活動電流」(局所電流)は、軸索の中の一部のイオンが流れる「細いイオンの流れ」です(このことは、本文の中でも繰り返し指摘してきました)。つまり、軸索の中ではその断面を満たすようなイオンの流れは生じませんから、軸索の断面積が2倍になってもイオンの流れは2倍にならず、したがってまた、軸索内の細胞液の抵抗が1/2になることもありません。このことはすなわち、ケーブル理論

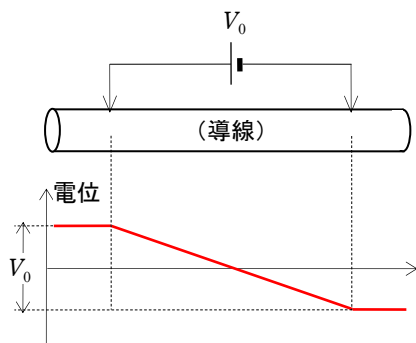
の $\eta_l = \frac{R_l}{\pi a^2}$ という式を神経繊維に対して適用することができないことを示しています。

(3) ケーブル理論による導線内の電位分布は、導線内を電流が流れている状態での分布です。つまり、導線内を電流が流れることにより電圧降下が生じ、絶縁被膜を電流が漏れ出すことを合わせて考えることにより、指数関数的にゆるやかに下がっていく電位分布の曲線が導き出されます。ケーブル理論においては、電流が流れることによって初めて(電流が流れている状態になって初めて)このような電位分布の生じることが示されます。これに対して、神経繊維の場合には、軸索内に流れ込んで狭い範囲に集中した Na^+ が存在するだけで、また軸索の中を伝播していく陽イオン濃度の高い部分が存在するだけで、つまり電流など流れ

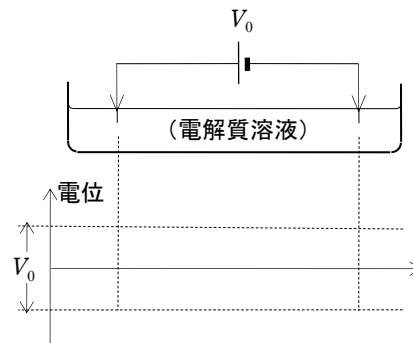
なくても、軸索の中に電位分布が生じます。

- (4) 図(12)–2のように導線(※)の2点に直流電圧を加えたときの導線内の電位分布と、図(12)–3のように電解質溶液の2点に直流電圧を加えたときの溶液内の電位分布とについて考えてみてください。

(※) この導線には一様な抵抗があるとしてください。また、電流は外部に漏れないとしてください。



図(12)–2



図(12)–3

図(12)–2の導線内の電位分布がその下のグラフのようになることは、おそらく、どなたも認めてくださることでしょう。では、図(12)–3の電解質溶液の場合はどうでしょうか。ひとまず、ご自分で考えてみられた上で、上の図にグラフを描き加えてみてください。ヒントとして、次の2つのサイトを紹介します。

http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/ubung/yyosuke/lclec_text/chemliq04_c07.htm

このサイトの「7.2.電解質溶液の電気分解と電気伝導」の項をご覧ください。ここに記載されている、「電極表面付近に電位差のほとんどがかかり、溶液のほとんどの部分は電場を感じない状態になります。」という部分がポイントです。

[http://wiley-vch.e-bookshelf.de/products/reading-epub/product-id/2840405/title/fundamentals+and+applications+of+organic+electrochemistry.html?autr="mahito+atobe"](http://wiley-vch.e-bookshelf.de/products/reading-epub/product-id/2840405/title/fundamentals+and+applications+of+organic+electrochemistry.html?autr=)

このサイトは、本の内容の紹介ページです。この中の「1.1 Formation of Electrical Double Layer」の項をご覧ください。ここには、ほとんど答えが示されています。なお、この項で示されている Figure 1.1 の縦軸は、下向きが高い電位になるように描かれていることに注意してください。

電解質溶液内のイオンは溶液内で自由に移動できるだけでなく、その濃度分布が溶液内で一定になるとは限りません。このことが、電解質溶液内の電位分布を決定づける大きな要因の一つとなっています。とくに、電極表面付近の電位分布はとても印象的で、「電気二重層(※)」という概念を理解する必要があります。「電気化学」という分野で詳しく研究されています。

(※) http://web.nmsu.edu/~snsn/classes/chem435/Lab14/double_layer.html

上記のヒントのサイトに示されているように、電解質溶液の2点に電圧を加えたときには、その電圧のほとんどが電極表面付近の数nmの範囲に集中しています。その範囲以外の、溶液のほとんどの部分(電気化学の分野では、この部分は「バルク」と呼ばれています)は、ほぼ等電位です(※)。そして、神経繊維の軸索内の細胞液はまぎれもなく電解質溶液です。つまり、軸索内の電位分布は、その長さ方向になだらかに変化していくものではありません。陽イオンが狭い範囲に集中してその濃度が高くなった部分(興奮部やパルス波の部分)だけが電位の高い状態になっていて、それ以外の部分はほぼ等電位です。

(※) 図(12)–3の電位分布の解答例です: [「電解質溶液の電位分布」の解答例](#)

以上のように、軸索内の電位分布は導線内の電位分布とまったく違ったものになっています。軸索内の電位分布は、ケーブル理論から導かれるような「指数関数的変化」を示すものではありません。

(5) 次のサイトには、軸索や細胞膜の抵抗の具体的な値が示されています。

<http://itcl.jp/wordpress/wp-content/uploads/2014/09/repo0601-7.pdf>

これによれば、軸索液の抵抗として $3.5 \times 10^6 \sim 3.5 \times 10^7 [\Omega/\text{mm}]$ 、軸索を貫く抵抗(つまり膜抵抗)として $2.9 \times 10^8 [\Omega \cdot \text{mm}]$ という値が示されています。どちらも、軸索の長さ方向に1mm あたりの値です(このサイトでは1m あたりの値が示されていますが、ここでは1mm あたりに直しています)。

また、次のサイトにも、同様の値が示されています。

<http://www.centenary.edu/attachments/biophysics/bphy304/11a.pdf>

これによれば、平均的な神経繊維の軸索の半径を $5\mu\text{m}$ として、軸索原形質の抵抗は $2.5 \times 10^7 [\Omega/\text{mm}]$ 、無髄神経繊維の膜抵抗は $6.4 \times 10^6 [\Omega \cdot \text{mm}]$ 、有髄神経繊維の膜抵抗は $1.3 \times 10^7 [\Omega \cdot \text{mm}]$ となっています。いずれも、神経繊維の長さ1mm あたりの値です。

驚くことに、これらの値はすべて $[\text{M}\Omega]$ のオーダーです。髄鞘の抵抗が大きいのは当然としても、軸索の抵抗もめちゃくちゃ大きいのです。本当にこのような値なのか、心配になるくらいです(※1)(※2)。これに対して、ケーブルでは、絶縁被膜の抵抗は大きいですが導線の抵抗はとても小さいのです。

(※1) 高校の生物教科書では、多くの場合、「有髄神経繊維では、髄鞘が絶縁体として働くから活動電流が隣のランビエ絞輪まで(長い距離を)流れていく」と説明されます。しかし、上記のように、髄鞘も軸索もその抵抗値がともに $[\text{M}\Omega]$ のオーダーであるのなら軸索もまた絶縁体とみなすべきであり、教科書の説明が成り立たないことになります。

(※2) 上記の2つ目のサイトでは、軸索原形質の抵抗が $2.5 \times 10^7 [\Omega/\text{mm}]$ という「とても大きな値」であることについて、This huge value indicates that axons are actually poor electrical conductors. と述べられています。つまり、このサイトの著者は、軸索が「poor」な電気伝導体だと指摘しておられるのです。しかし、そのように指摘しておきながら、それ以上のことを述べておられません。軸索の電気抵抗がこれほどまでに大きな値であれば、軸索内を電流が流れるという考え方を疑ってみるべきでしょう。おそらくどの研究者もこのことに気づいておられるはずなのに、まるで、「何も問題ではない」と言わんばかりです。

ケーブルと神経繊維とではこれほどまでに条件が違うのですから、私には、ケーブル理論を神経繊維に適用できるとはとても思えないのです。

付録6 「遠くまで電流が流れる」という表現に置き換えるところから、誤りの一歩が始まる

上記のように、ケーブル理論を神経繊維に適用することはできないというのが私の主張ですから、今後は、ケーブル理論を神経繊維に適用したときの考え方を「神経繊維=ケーブル理論」と表記し、絶縁被膜に覆われた導線に対する理論としての本来の「ケーブル理論」と区別しようと思います。この付録6では、神経繊維=ケーブル理論について考えてみたいと思います。

この理論の中では、長さ定数 λ という値が重要な意味を持っています。付録4の(14)式および図(12)-1に示されているように、 λ は、その値が大きいほど遠くまで高い電位が維持され電位の減衰が少なくなることを表しています。ところが、このことから、多くの研究者が「 λ の値が大きいほど、遠くまで電流が流れる」と解釈しておられるのです(※)。遠くまで高い電位が維持されれば遠くでも電流が流れることになり、したがって遠くまで電流が流れていくということなのでしょう。

(※) たとえば、付録4で紹介した Cable theory のサイトの著者も、そのように述べておられます。

そして、一旦このような考え方を始めると、今度は、興奮が伝えられるしくみを(電位ではなく)電流によって説明したくなるようなのです。実際のところ、 λ の値が大きいほど遠くまで高い電位が維持されることを示した後、「遠くまで電流が流れるから、遠くまで興奮が伝えられる」と説明しておられる研究者がいます。中には、「電流がたくさん流れているところでは高い電位が維持される(※)」と考えておられる研究者もいます。

(※) この考え方は、オームの法則に矛盾しています。オームの法則によれば、抵抗のある軸索内を電流が流れば電圧降下が生じ、電位が低くなっていきます。多くの電流が流れば電圧降下はより大きくなり、高い電位が維持されることはありません。

付録4の(13)式: $\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$ によれば、 r_m が大きく r_i が小さいほど、長さ定数 λ が大きな値になります。 r_m

は膜抵抗ですから、「有髄神経繊維では髄鞘が絶縁体として働く(r_m が大きい)から、 λ が大きな値になって遠くまで電流が流れる。」と説明され、また、 r_i は軸索内の細胞液の抵抗ですから、「軸索の抵抗が小さいほど(やはり、 λ が大きくなって)遠くまで電流が流れる。」と説明されます。そして、遠くまで電流が流れればそれだけ遠くまで興奮が伝えられる(したがって、伝導速度が大きい)と説明されるのです。まさに、高校生物教科書の記述そのものです。

本来のケーブル理論は

λ の値が大きい \Rightarrow 遠くまで高い電位が維持される \dots (A)

ということを表しています。これを神経繊維に適用すると(すなわち、神経繊維=ケーブル理論では)

λ の値が大きい \Rightarrow 遠くまで高い電位が維持される \Rightarrow 遠くまで興奮が伝えられる \dots (B)

となります。そこに、

遠くまで高い電位が維持される \Rightarrow 遠くまで電流が流れる \dots (C)

という解釈が追加され、いつの間にか

λ の値が大きい \Rightarrow 遠くまで電流が流れる \Rightarrow 遠くまで興奮が伝えられる \dots (D)

と考えられるようになったのかもしれませんが、(D)は興奮が伝えられるしくみの説明になっていません。 Na^+ チャネルが開くためにはその部分の電位が高くならなければならず、遠くまで電流が流れても遠くの電位が上昇することはないからです(このことは、本文の中で繰り返し説明してきました)。

λ の値が大きいことは「遠くまで高い電位が維持される」ことを示していますが、このことを「遠くまで電流が流れる」という表現に置き換えるところから、誤りの一步が始まります。神経繊維の中を興奮が伝えられるしくみを説明するのに電流を持ち出すから、おかしい話になってしまうのです(しかも、電流で説明している人は、自分の話がおかしくなっていることに気づいておられない)。

ただし、最も根本的な誤りは、「遠くまで電流が流れる」という表現に置き換えるところからというよりも、むしろ神経繊維内の現象をケーブル理論で説明しようとするところにあるというべきでしょう。

(13) おわりに

私はこの跳躍伝導について説明するために、ページ数を気にすることなく思う存分書き連ねることができました。しかし、教科書ではせいぜい1/2ページほどの範囲で説明をしなければならず、教科書の執筆者たちは、言葉を選び、表現を駆使して、限られたページの中におさめなければなりません。しかも、**この分野の内容はほとんど物理現象で、電気分野だけでなく波の分野もふまえて説明しなければならぬ**のです(※)。私は**(0)はじめに**で、『生物の教科書が間違っているなどと、物理の教師が何を偉そうに言っているのか』とお叱りを受けそうですが、 \dots と述べていますが、この分野は、実は物理の教師だからこそ見えてくるところがあると思っています。生理学の専門家だけではなく、物理学や電気化学の専門家も共同で研究すべき分野だと思います。

(※) このレポートの前半では、**物理の学習**として多くのページを割いています。本来は、跳躍伝導の現象や興奮の伝導のしくみについて十分に理解するためには、ここで取り上げた程度の物理現象や法則についての予備知識が必要だということになります。

なお、多くの教科書で、用語の表記のしかたがめっちゃくちゃです。たとえば、「ナトリウムイオン」や「 Na^+ 」は正しい表記ですが、「 Na イオン」などという表し方はありません(※)。また、「ナトリウムチャネル」も「 Na チャネル」も間違いで、正しくは「ナトリウムイオンチャネル」か「 Na^+ チャネル」です。さらに、どの教科書も「ナトリウムポンプ」としていますが、「ナトリウムイオンポンプ」または「 Na^+ ポンプ」としなければなりません。

(※) 化学の教科書なら、決してこのような表し方はしないでしょう。

電位と電圧の区別ができていない教科書もあります。例えば、東京書籍のp.25には「細胞膜の外側を基準として細胞膜の内側がマイナスの電圧になっている。この電圧を静止電位という。」とあり、p.220には「静止状態とは、細胞の外側を基準にすると、細胞の内側が約 $-70\sim-60\text{mV}$ となっている状態をいう。この電圧を静止電位という。」とありますが、3か所の「電圧」はすべて「電位」でなければなりません。いずれも、外側を基準にしたときの内側の「電位」を表しています。また、同じくp.220に「細胞の外側を基準電圧 0mV としたときの値を」と書かれていますが、「基準電圧」とはいったい何のことでしょうか。当然、「基準電位」でなければなりません。

生物の教科書を読んでいて気づいたことがあります。いろいろな現象を「それらしく」説明してあるのですが、根拠もなく「〇〇だから」とか、根拠のようなことが書かれている場合でも「本当にそうなのだろうか」と疑問を抱かざるを得ないところがあるなど、教科書としての完成度に疑問を感じます。また、生物を選択した生徒たちは「それらしい」説明で納得したつもりになっていて、本当のところはどうなのかという「健全な疑問」を抱かずに済ませているのではないかと危惧しています。

現在の高校生物は、「昔ながらの生物」とはまったく違ったものになっています。日進月歩の現代生物学の成果がどんどん取り入れられていて、「昔ながらの生物」の範囲では処理できなくなってきました。物理学や化学の知識を必要とする分野が増えてきています。教科書会社は、生物教科書の執筆者の中に物理学や化学の専門家を参加させる必要があるでしょう。様々な分野の専門家を総動員して多くの目でチェックしない限り、満足な教科書は作れないでしょう。

私は生物学に関してはまったくの素人ですから、私の発言などは専門家の方から見れば犬の遠吠えのようなものです。なにしろ、このレポートで述べていることには実験的な裏付けや数学的な論理付けがまったくありません。何よりも、私には実験的・数学的な方法で力強く証明する能力も環境もありません。しかし、どうしても納得できないことについて「納得できない」と声を上げることはとても大切なことだと思い、このレポートを公開しています。**このレポートが心ある研究者の目にとまり、新しい世界が開かれることを夢見ています。**

2013年4月14日 インターネット上に公開 (ver.1.0)

<http://park.geocities.jp/choyaku2013/>

2013年4月17日 引用サイトへのリンクの不具合を解消 (ver.2.0)

2013年5月6日 説明および語句の一部追加訂正 (ver.3.0)

2013年9月2日 表紙と目次を作成し、説明および語句の一部追加削除訂正 (ver.4.0)

2013年9月28日 説明および語句の一部追加削除訂正 (ver.5.0)

2014年2月14日 ページの書式を変更し、説明および語句の一部追加削除訂正 (ver.6.0)

2014年12月22日 「付録1～6」を追加し、説明および語句の一部追加削除訂正 (ver.7.0)

2015年8月22日 説明、語句および図の一部追加削除訂正 (ver.8.0)