

蘭様のお尋ねに対する回答:

はじめに

お尋ねの件の「続き」の方に書かれている内容で、「一部の Na^+ は陰イオンに引き寄せられていて、反射しない。つまり、その反射しない Na^+ の分だけ、進んで行く Na^+ が少なくなり、濃度が減少する。」というところですが、「 Na^+ は進んで行かない(媒質は移動しない)」ということをご確認しておきたいと思います。

移動していくのは、あくまでも「陽イオン濃度の高い状態」です。興奮がやってきたとき、その部分の陽イオンは一時的に(瞬間的に)狭い範囲内で互いに密集するように動いて、陽イオン濃度の高い状態を作りますが、興奮が通り過ぎた後は、その部分は元のイオン分布に戻り(密集した陽イオンは元の場所に戻り)全体としてイオンの移動はない、というのが私の基本的な考え方です。

波の反射について

波には、目に見えるものとそうでないものがありますが、神経繊維内を「陽イオン濃度の高い状態」が伝わるのは、目に見えない波です。これをイメージとしてとらえていただくために、目に見える波の代表としての「水面波」について考えてみたいと思います。

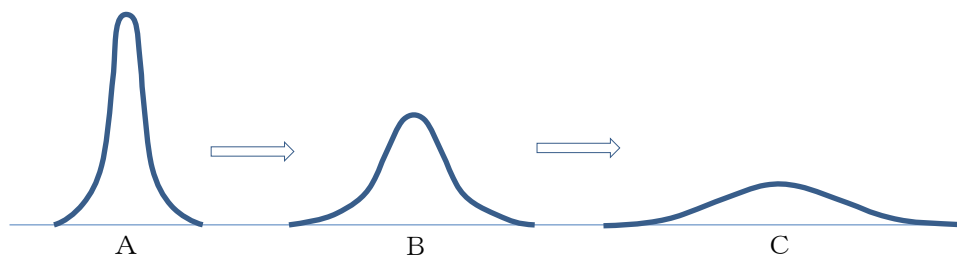
まず、水面波が壁に当たって反射する様子を明瞭に見せてくれる動画サイトを見つけましたので、紹介します。<https://www.youtube.com/watch?v=hVHGOaoV5Uk>の「波の反射・干渉・重ね合わせ」という、YouTubeの動画サイトです。この動画のように、一般に波は壁に当たると反射します。

神経繊維内でのパルス波も、神経繊維の細胞壁に衝突した後、必ず反射をします。このようなイメージを持って以下をお読みください(ただし、上記のように、神経繊維内のパルス波は目に見えない波です)。

一般的に、波の減衰について

次に、波は一般にどのように減衰していくのかということ、そのメカニズムの説明は後回しにして、ひとまず「このように減衰する」というところからお話したいと思います。

水面波については、「跳躍伝導についての本当のお話(ver.8.0)」(以下、「レポート」と表記します。)の図(3)-13(p.16)に写真がありますが、この写真をよく見ると、波が周囲に伝わっていくにつれて、その高さが次第に低くなるとともに一つひとつの波の山の「幅」つまり「すそ野」が広がっていくことがわかります。一般に、波はどこまでも伝わるのではなく減衰していくものですが、その減衰の仕方は、水面波のように波の高さが低くなるとともにすそ野が広がっていき、次第に波としての形が不明瞭になり、最後には消えてなくなる、という変化をたどるものです。そのときの波(の一山、またはパルス波)の断面を模式的に表したものが下図です。



この図は、水面波(の一山)の断面を表したものとして描いていますが、これを、神経繊維内を伝わる「陽イオン濃度の高い部分」の「陽イオンの濃度分布」を表しているとみなしていただきたいのです。Aの部分には、最も多くの陽イオンが集中しており、その濃度が最大になっています。この波(陽イオン濃度の高い状態が移動するときの波、レポート内で説明しているパルス波)が進むにつれて、その中心部分の陽イオンは

次第に「集中度」が弱くなり、「陽イオン濃度」が次第に小さくなり、したがって図の「高さ」が低くなっていき、その分、BやCのように陽イオンの分布する範囲が広がっていきます。

ところで、陽イオンが集中してその濃度が高い部分は電位の高い部分ですから、上の図はまた、神経繊維内を伝わる「陽イオン濃度の高い部分」の「電位の分布」をも表しているとみなすことができます。神経繊維内を興奮が伝わっていくときNa⁺チャンネルが開くかどうかは、この図の最も高い部分（ピーク）の電位で決まるわけですから、上の図のように、ピークの高さが次第に低くなっていくことは、すなわち興奮の強さが次第に減衰していくことを表しています。

※ 上記の説明からすると、レポートの図(4)-3(p.18)は、「すそ野」が広がっていないので、間違っていることとなります。

なぜ「すそ野」が広がっていくのか

上記で、一般に波が減衰するとき、その高さが低くなるとともに「すそ野」が広がると述べましたが、波の高さと「すそ野」の広さとの間には、密接な関係があります。波の高さが変わらないのに、すそ野だけが広がるなどということはあり得ません。仮にそのようなことが起きるとするなら、陽イオン濃度の高い状態のパルス波の場合であれば、パルス波が進んでいくにつれてその周囲にどんどん陽イオンが集まってくることを意味します。そんなことが起きるはずがありません。実際のところは、波の「すそ野」が広がると同時に波の高さが低くなります。「すそ野が広くなり、そのすそ野に陽イオンを供給するために波の高さが低くなる」というイメージです。

そうすると、問題は、なぜ波の「すそ野」が広がっていくのかということです。つまり、神経繊維内をパルス波が伝わる時、その電位分布の高さが低くなるだけでなく、なぜ電位分布の「底辺」が広がるのかということです。その原因は、神経繊維の内側の細胞壁付近に分布している陰イオンの影響だということになります。神経繊維の中を陽イオン濃度の高い状態がパルス波となって伝わり、そのパルス波の一部が神経繊維の内側の壁付近を通過するときには、そこに分布している陰イオンにパルス波の陽イオンの一部が引き寄せられることとなります。このとき、引き寄せられた陽イオンはそのままそれらの陰イオンとくっついて神経繊維の内側の壁付近に残ってしまうのかというと、そういうことにはなりません。「引き寄せられた直後に陰イオンから離れ、壁付近から離れて元の場所に戻る」つまり「反射する」というのが私の考えです。なぜ反射するのでしょうか。このことを理解していただくためには、今一度コンデンサについての復習が必要となります。

コンデンサの大原則

コンデンサの基本事項の一つに、「コンデンサには、一方の極板に+の電荷、他方の極板に-の電荷が蓄えられ、それらの電気量の絶対値は必ず等しい」ということがあります。レポートの図(3)-7(p.10)の右の図で、Aの極板(上の極板)に+ Q_A [C]、Bの極板(下の極板)に- Q_B [C]の電荷が蓄えられているとすると、 Q_A と Q_B (それぞれの絶対値)は必ず等しくなります。そこで、ここでは Q_A と Q_B のどちらをも Q で表すことにします。

いま、AとBの極板にそれぞれ+ Q [C]と- Q [C]の電荷が蓄えられているとします。このとき、このコンデンサに加えられている電圧に何らかの変化が生じ、Aの極板に新たに ΔQ [C]の電荷が流れ込むとします。このとき、極板Bからは必ず ΔQ [C]の電荷が出ていきます。この場合、極板Aの電荷は

$$+Q + \Delta Q = +(Q + \Delta Q) \quad \dots \textcircled{1}$$

となります。ここで、左辺の+ Q の「+」はもともと極板Aに存在していた電荷が「+」の電荷であることを示し、同じく左辺の「+ ΔQ 」の「+」は極板Aに ΔQ の電荷が流れ込む(増える)ことを示しています。一方、極板

Bの電荷は、

$$-Q - \Delta Q = -(Q + \Delta Q) \quad \dots \textcircled{2}$$

となります。ここで、左辺の $-Q$ の「 $-$ 」はもともと極板Bに存在していた電荷が「 $-$ 」の電荷であることを示し、同じく左辺の「 $-\Delta Q$ 」の「 $-$ 」は極板Bから ΔQ の電荷が流れ出す(減る)ことを示しています。

上記①、②のように、両極板に新たな電荷が出入りしたとしても、両極板に蓄えられる電荷の電気量は、その絶対値が必ず等しくなります。これが、コンデンサの大原則です。極板AとBに蓄えられている正負の電荷が、常に絶対値の等しい電気量で互いに引き合いながら両極板上に分布していると言ってもよいと思います。

神経繊維の細胞壁は(髄鞘も含めて)コンデンサ

神経繊維(軸索の細胞や髄鞘も含めて)の細胞壁はコンデンサです。その外側と内側がコンデンサの両極板に相当します。興奮が伝わってきて、神経繊維の内側の細胞壁に近いところを通ったパルス波の陽イオンの一部が、壁の内側に分布している陰イオンに引き寄せられる(細胞壁に近づく)ということは、細胞壁をコンデンサと考えたとき、その極板にいくらかの電荷(陽イオン。その電気量を仮に ΔQ とします)が流れ込むことを意味します。このとき、上記の「大原則」に従えば、コンデンサである細胞壁の外側に分布している陽イオンのうち、やはり ΔQ の電荷が細胞壁から離れていくことになります。

ただし、神経繊維の外側の溶液中には大量の陽イオンが存在しており、全体として等電位の状態に保たれています。したがって、神経繊維の外側の壁から ΔQ の電荷が離れたとしても、それらの「離れた電荷」はその周囲にある大量の陽イオンにすぐに押し戻され、神経繊維の外側はやはり全体として元の等電位の状態が保たれるようになります。

その結果、神経繊維内では、さきほど細胞壁に近づいた陽イオン(ΔQ の電荷。細胞壁の内側に分布していた陰イオンと引き合った陽イオン)もまた、内側の細胞壁から離れることになります。つまり、「反射する」というわけです。

パルス波が神経繊維内を進むとき、その一部に遅れが生じる

神経繊維内で細胞壁から離れたところ(つまり細胞壁付近に分布する陰イオンの影響を受けないところ)を伝わっていく「陽イオン濃度の高い部分」は神経繊維内を「順調に」進んでいくのに対して、細胞壁の近くを伝わる「陽イオン濃度の高い部分」は、上記のように、一旦壁に引き寄せられその直後にまた戻るということを繰り返します。つまり、陽イオン濃度の高い部分は、その濃度分布をずっと同じ状態に保つのではなく、神経繊維内を速く(順調に)進む部分と、一旦壁に引き寄せられその直後にまた戻ると(つまり、反射する)ことにより少しずつ遅れる部分とが生じます。そのため、パルス波の中心部分は速く進み、その中心から離れた部分(壁に近い部分)ほど遅れて伝わることになります。その結果、パルス波の電位分布(陽イオンの濃度分布)の「すそ野」が広がっていくというわけです。すでに述べましたように、「すそ野」が広がればそのピークの高さも次第に低くなり、パルス波は次第に減衰していくことになります。

エネルギーの視点で考えると

水面波や音波、地震波など、一般に波は伝わるにつれて次第に減衰していくものですが、この現象をエネルギーの視点で考えてみるとどうなるのでしょうか。

水面波を伝える媒質は水分子、音波の場合は空気の分子、そして地震波は地殻の岩石が媒質となります。これらの、水分子、空気の分子、岩石を作っている粒子など(以下、単に「粒子」と表記します。)は、波が伝わってくると互いに密集したり、互いの間隔が広がったり、変形したりします。粒子を密集させたり変形

させたりするためには一般にエネルギーが必要です。媒質の一部にエネルギーの高い部分が生じて(エネルギーの高い状態がやってきて)粒子が密集したり変形したりしたとき、そのエネルギーがその部分にとどまることなく次々と周囲に伝えられていく現象の一つが波であるとも言えるでしょう。その際、粒子は全体として移動することなくエネルギーだけが伝えられるということも重要です。

一般に粒子が密集したり変形したりすると、熱が発生します(たとえば、空気を圧縮したり金属板を繰り返して折り曲げたりすると、熱くなります)。そのため、波がエネルギーを伝えることで媒質の粒子を密集させたり変形させたりすると、その波のエネルギーの一部は熱に変わっていきます。一旦熱に変わると、それが再び波のエネルギーに戻ることはありません。結局、一般に波は周囲に伝わることで次第にそのエネルギーを失い、減衰していくこととなります。最終的に波のエネルギーがなくなると、波は消滅します。

神経繊維内でも同様のことが起こります。陽イオン濃度の高い状態(パルス波)が伝わってきたときには、元々その付近にあった陽イオンが一時的に(瞬間的に)狭い範囲に集まり、その直後に互いに離れて元の分布状態に戻るといったことが起こります。このような、イオンどうしの「一時的な密集」や「衝突」などが起これば、そこでは一般に熱が発生し、それだけパルス波のエネルギーが失われていくこととなります。したがって、たとえ神経繊維の内側の細胞壁から離れたところを進むパルス波であっても(つまり、神経繊維の内側の壁付近に分布している陰イオンの影響を受けなくても)、次第に波のエネルギーを失い、必ず減衰していきます。

そのうえ、神経繊維の内側の壁付近に近づく陽イオンの数が増えると(つまり、細胞壁の近くに分布している陰イオンの影響を受ける陽イオンの数が増えると)、その神経繊維の内外の壁付近に分布している他のイオンも一時的に(瞬間的に)細かく動くことになり、それだけ多くの熱が発生し、したがってパルス波はそれだけ多くのエネルギーを失うこととなります。つまり、神経繊維内をパルス波が進むとき、そのパルス波の一部が細胞壁に近づくほど、そこに分布している陰イオンの影響を受ける陽イオンの数が増え、パルス波は早く減衰していくこととなります。

おわりに

ご質問に対する回答は以上です。蘭様の疑問が解消することを念じています。レポートの中のお尋ね下さった部分は、その説明が不十分だったということに改めて気づきました。今までにも多くの方々のご質問やご指摘をくださったおかげで、このレポートは少しずつ「改良」されてきたと思っています(ただし、最近は改定ができていませんが・・・)。今後とも、疑問に思われるところがありましたらいつでもお尋ねください(ご指摘も歓迎です)。