

釣りの科学技術対話 第 5 章 - 海の太陽光吸収スペクトル

野沢：第 4 章『摂餌行動と生理』の視覚項において、海水による太陽光の吸収スペクトルが右図のようになる事を話し合いましたが、理論面から見たその原因について文献調査^{*1}を行い、そのメカニズムがほぼ判明しました。そして次の驚くべき結論に達しました。

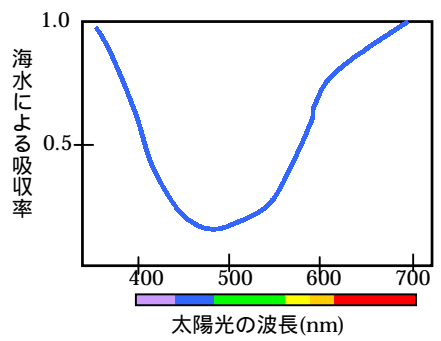


図 1 海水による太陽光の吸収スペクトル

『光は電磁波の一種であり、それは周波数の値により分類される。可視光より少し周波数の低い成分は赤外線と呼ばれ、更に低くなると通常、一般に言われている電波になります。そして、可視光より少し周波数が高いと紫外線と呼ばれ、更に周波数が高い成分には X 線があります。そのように電磁波の種類は種々様々ですが、海は太陽光の可視光のみを選択的に透過します。』

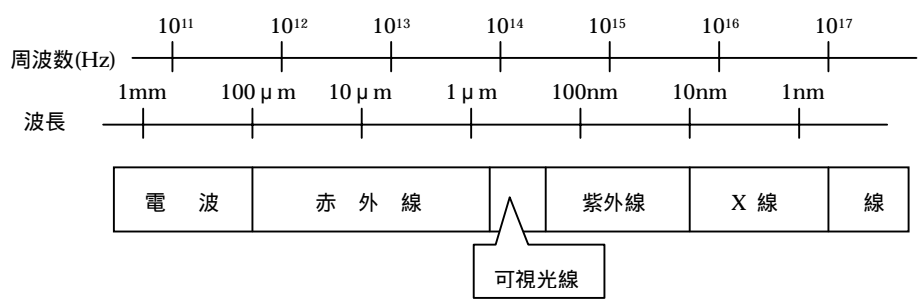


図 2 周波数による電磁波の分類

瀬戸内：海は太陽光を良く吸収し、水深 30m になれば周波数の高い青色のみがわずかに存在するため真暗な世界に近く、太陽光を透過し易いとは思わないね。

野沢：その通りです。しかし、他の周波数帯の電磁波に比べ可視光ははる

かに海中を透過します。それも海面に降り注ぐ太陽光の波長別強度に対応した割合で透過します。つまり、太陽光の青色の強度は大きく、赤色は小さいです。そうして、海は赤色より強度の大きい青色をよく透過します。

瀬戸内：それでは、詳しい内容を教えてくれ。

野沢：では、太陽光のスペクトルからお話します。太陽の表面温度は 5000 ~ 6000 といわれ、その温度に対応した電磁波を放射します。太陽は約 6000K の黒体と見なせます。

瀬戸内：黒体？

野沢：黒体とは全ての波長の電磁波を吸収する物体で、炭はこれに近いですね。光沢のない黒色の物体は黒体に近く良く電磁波を吸収します。夏に黒色の自動車のボディが白色のそれより熱くなるのは電磁波(主に赤外線)を吸収して温度が上昇するからです。そして黒体はその表面温度に対応した電磁波を放射します。温度 TK の黒体から放射される波長 λ の電磁波の強度は、次の Plank の法則で表すことが出来ます。

$$B(\lambda, T) = \frac{c_2}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]}$$

太陽光の放射強度のスペクトルは下図の赤線で示され、

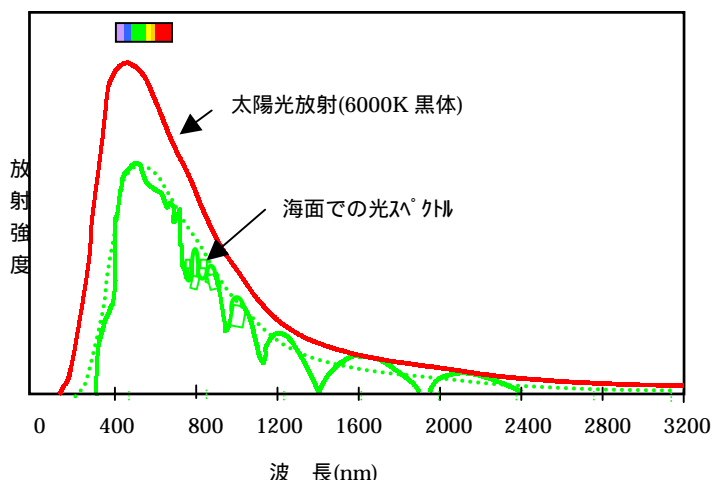


図 3 太陽光の放射強度スペクトル

Wien の変位則

$$\lambda_{\max} T = C (\text{一定})$$

により、 $T=6000\text{K}$ の場合、最も放射強度の強い波長は $\lambda_{\max} = 500\text{nm}$ となり、青色になります。そして、その電磁波が拡散されて地球に到着しますが、図 4 に示すように、大気中の水蒸気、二酸化炭素、オゾン等により特有の波長の電磁波が吸収されます。よって、海面上に降り注ぐ太陽光のスペクトラムは図 3 の緑色の線で示されます。

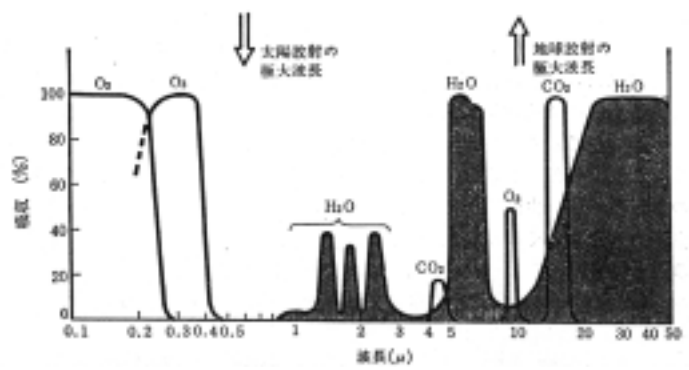


図 4 H₂O, CO₂, O₃ 分子による太陽光の吸収

瀬戸内：なるほど、青色を中心とした光が太陽から降り注ぐ訳か。しかし、空は青いが太陽は青く見えない。夕焼けの太陽は赤っぽい。

野沢：いろいろな周波数の混ざった太陽光は白色に見えますが、青空は大気中の微粒子(大きさが光の波長程度)により青色が強く散乱され空全体が青く見え、反対に夕焼けは青が散乱される度合いが強くなり、太陽の方向から届く光に青色成分が減少するからです。

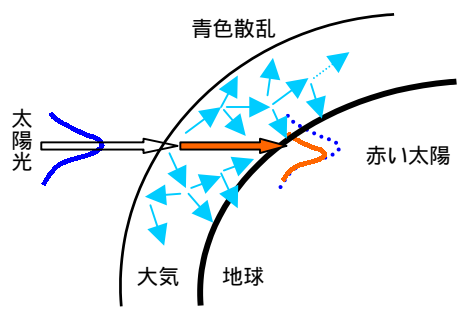


図 5 何故、空は青く、夕焼けは赤か？

瀬戸内：その考えは海の色が変わることについて応用できそうだね。つまり、南方と北方、夏と冬、潮目の境において色の異なる現象に。

野沢：沖縄の海は素晴らしいほどの藍ですね。冬の東北や北海道の海は暗い色、深緑だったり灰色だったりしますね。

瀬戸内：南方の濃青の海はプランクトンなどの浮遊物質が少なく、北方は多い。北方の海は魚にとって栄養の高い海といえる。

野沢：それを理論的に言うと、北方の浮遊物質の大きさは光の波長に比べて遥かに大きく、太陽光の大半の波長成分を散乱させるのに対して、南方の海では浮遊物質は少ないため、青色が強く散乱されます。これは大気中に何も無い晴れ上がっているときに素晴らしい青空が見え、霞みかかってきた時に、空が白っぽくなる現象に似ています。

瀬戸内：潮目において、その両側で海の色が変わる。温度が変わっている場合が多いが、温度により直接、色が変わるわけではなく、浮遊物質等の散乱物質が変わるからだと思う。

野沢：その通りだと思います。青色の散乱は理論的には電磁波の Rayleigh 散乱であり、散乱の度合いは周波数、波長の 4 乗に依存しますが、温度には依存しないはずです。

Rayleigh 散乱の強さを表す式は

$$P = \lambda^{-4}$$

よって、赤色(赤=660nm)に対する青色(青=460nm)の散乱強度の比は

$$R_P = \left(\frac{\lambda_{青}}{\lambda_{赤}} \right)^4 = \left(\frac{460}{660} \right)^4 = 3$$

つまり、赤色に対して青色は 3 倍強く散乱されます。

瀬戸内：海の色議論はこの位にして、海中での光の伝播についての理論を教えてほしいね。

野沢：光は電磁波の一種ですので、光の伝播は電磁波理論により説明でき、電磁波の持つ電場と磁場の伝播の様子により表します。それは次の

波動方程式に従います。

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t}$$

ϵ, μ は電磁波が伝播する媒体固有の定数で、誘電率、透磁率、導電率と言います。誘電率 ϵ 、透磁率 μ は真空の値 ϵ_0, μ_0 が基準となり次式で示されます。

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$$

$$\mu = (1 + \chi) \mu_0 \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

χ は磁化率と言い、その値により常磁性体 ($\chi > 0$: アルミニウム, 空気)、強磁性体 ($\chi \gg 1$: 鉄, ニッケル, コバルト)、反磁性体 ($\chi < 0$: 銅, 亜鉛, 水, 水素) に分けられます。水の値は $\chi = -0.720 \times 10^{-6}$ で、非常に小さい値です。

瀬戸内：水の誘電率 ϵ , 透磁率 μ , 導電率 σ の値は？
野沢：右表のようになります。

表1 水の誘電、透磁、導電率

	誘電率	透磁率 μ	導電率
海水	80	μ_0	1 ~ 4
淡水	80	μ_0	$10^{-3} \sim 10^{-2}$

導電率 $\sigma = 0$ と見なせる場合、真空中や大気中において波動方程式は次式で示されます。

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

z 軸方向のみに光が伝播している場合、波動方程式は

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

と簡略化され、その式の解の一つは

$$E = E_0 \cos(kz - \omega t) \quad H = H_0 \cos(kz - \omega t)$$

ただし、 $(1/k)^2 = 1/\mu$ となります。

瀬戸内：この式は確か高校の数学で習った三角関数だね。確か波を表しているね。とkの意味は？

野沢：角周波数と波数と言います。その意味は次のように考えると分かりやすいです。まず、ある地点zで固定して波が時間により変化の様子を表した模式図を示します。

一つの波間隔は周期 T と言われ、波動方程式の解より、

$$\omega = 2\pi / T$$

であるので、 $\omega = 2\pi / T$

つまり、単位時間に通る波の数(周波数 f)の2π倍です。次ぎは反対に時間を固定しある時間の空間分布を観測した場合を示します。一つの波の間隔を波の長さ、つまり、波長と言います。先ほどと同様に考えると

$$k = 2\pi / \lambda$$

つまり、単位長さに存在する波の数の2π倍で、波の数に対応します。時刻 t で z 地点にいた波が時刻 t + Δt で z + Δz 地点に進んだとしますと、

$$kz - \omega t = k(z + \Delta z) - \omega(t + \Delta t)$$

よって

$$c = (\Delta z / \Delta t) = f\lambda = (\omega / k) = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$$

c は波の速度、つまり、光速であり、 $\mu = \mu_0$, $\epsilon = \epsilon_0$ とすると

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ (m/s) (真空中での光速)}$$

となります。

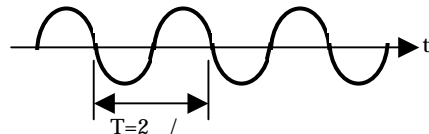


図6 固定地点での波の時間変化

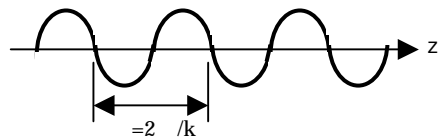


図7 ある時刻での波の空間変化

瀬戸内：この良く分かん長々としたわけの分からない話は、海中での光の伝播について言っているのだね。

野沢：その通りです。真空中や空気中と違って、海中では光が減衰することを理論的に示したかったので、長々と話してしまいました。済みませんでした。では次に、海中における光の伝播の様子をお話します。真空中や空気中と異なる点は、電磁波理論で示すと、導電率 σ が存在することです。すなわち、次の式が適用されます。

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t}$$

この式の解は

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \cos(kz - \omega t)$$

$$H = H_0 e^{-\alpha z} \cos(kz - \omega t)$$

となり、距離 z とともに式 $e^{-\alpha z}$

に従って減衰します。この解を波動方程式に代入すると

$$(\alpha^2 - k^2) \cos(kz - \omega t) + 2\alpha k \sin(kz - \omega t) = -\epsilon\mu\omega^2 \cos(kz - \omega t) + \mu\sigma\omega \sin(kz - \omega t)$$

よって
$$\alpha = \omega \sqrt{\epsilon\mu} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

は減衰の度合いを表すため、減衰定数と言われます。

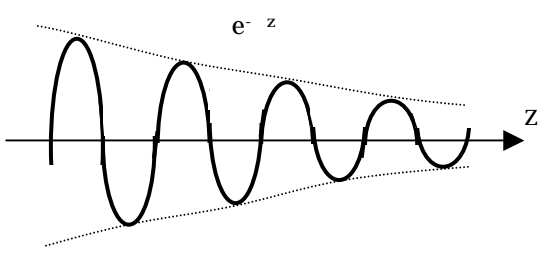


図 8 海中で減衰する波

瀬戸内：なるほど、減衰定数 α は周波数 $f = c/\lambda$ に依存するため、太陽光の波長によって海の吸収率が異なることを示しているということか、素晴らしいじゃない。

野沢：ところがこの式より電磁波の波長に対する減衰定数 α の関係をグラフ化すると、図9に示すように、可視光の波長領域での減衰の様子を表していないのですよ！

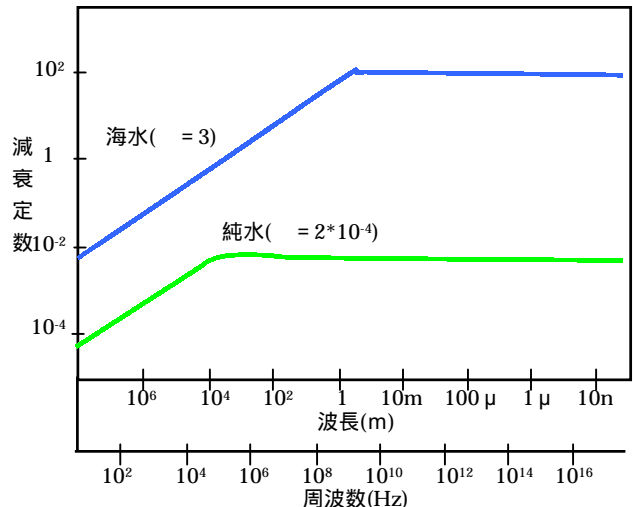


図9 理論による水中での光の減衰定数 - 周波数特性

瀬戸内：やはり理屈は現実には役立たずか。

野沢：実を言いますと、この話にはまだ先があります。

瀬戸内：また、小難しい理屈と数式を並べ立て、結局は現実と違うと言うのだから？

野沢：いいえ、もう数式は使いません。と言うより、明確な理論が確立されていないので、使えませんと言ったほうが適切ですね。

瀬戸内：それでは簡単に説明してみてください。本当に、簡単にだよ。

野沢：実際に測定した電磁波の周波数に対する減衰定数 α の関係を図10に示します。当然のことですが、可視光領域での特異な減衰の様子が示されています。波長1m付近から減衰定数 α が急に増えるのは水の誘電率 ϵ が固定値ではなく、周波数に対応して小さくなるから

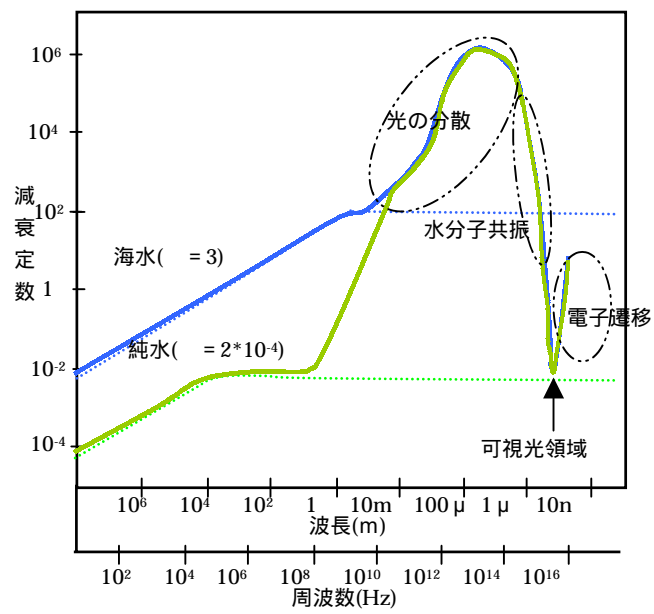


図 10 実測による水中での光の減衰定数 - 周波数特性

です。更に赤外領域は水分子による共鳴吸収現象により減衰します。そして、赤外領域では電子遷移による共鳴吸収により減衰します。

瀬戸内：もう少し簡単に説明してく

れ。

野沢：水分子は水素原子Hと酸素原子Oよりなり、外部から電界を印加すると分極します。この様子を図 11 に示します。

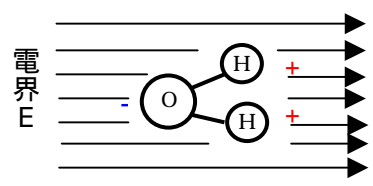


図 11 水分子の分極

誘電率 と分極の大きさ P の関係は右式で示され、分極が大きいと誘電率も大きくなります。

$$= \epsilon_0 + P/E$$

電磁波が水中を通過することは、交流の電界が加わることに相当し、水分子が電界の変化に追従しようとし、ところが電磁波の周波数があまりに早いと追従できなくなり、新たな電磁波の吸収を生みます。これは分極の度合いが小さくなることに相当し誘電率が周波数に付随して減少することになります。これを光の分散といいます。

海水中において非常に高い周波数(10⁸Hz 以上)では減衰定数 α は

$$\alpha \propto \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

となり、光の分散による誘電率 ϵ は

$$\epsilon = \epsilon_0 + G(1/\lambda^2)$$

ある周波数領域において減衰定数 α は

となります。水分子の振動の遅れは摩擦抵抗のようなものが存在により説明され、摩擦抵抗損のようなエネルギー損失が生まれます。これは電磁波のエネルギーを吸収することにより補われます。

更に周波数が高くなると電磁波は周波数に比例したエネルギー値を持つ塊(光子)の集合と考えられ、海水はエネルギーの塊として電磁波(光子)を吸収します。この場合、どの周波数の電磁波でも吸収するのではなく、特定の周波数、つまり、特定のエネルギーの塊を持った光子を吸収します。これを水分子による共鳴吸収現象と言います。

そして、可視光以上に周波数が高くなると水分子の中の電子が特定の周波数を持った光子を吸収します。これを電子遷移による共鳴吸収現象と言います。

瀬戸内：なるほど、一見単純そうに見える水分子 H₂O の複雑なメカニズムにより太陽光の波長分布に比例した成分を有効に透過しているのか！海水が太陽の恵みを有効に取りいれている事は偶然にしては

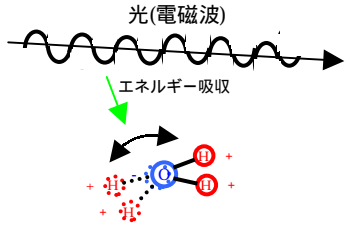


図 12 水分子による電磁波エネルギーの吸収

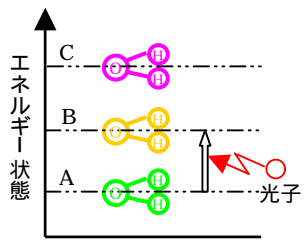


図 13 水分子による共鳴吸収現象

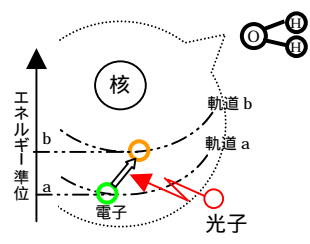


図 14 電子遷移による共鳴吸収現象

あまりにも出来すぎているね。まるで神の力が左右しているようだね。
野沢：そうですね。各水深での太陽光の強さの割合は図 15 で示されます。
つまり、太陽光を効率良く取り入れていることは偶然とは言いがたい
ですね。

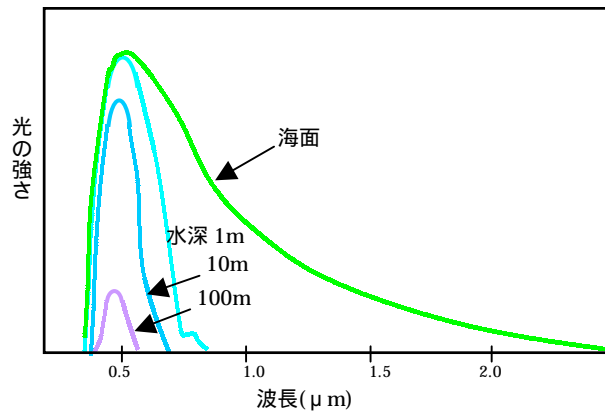


図 15 各水深での光の強度

- 文章、E-Mail による当社の承認なしに本資料の転載複製を禁じます。
- 本資料に記載の情報をを使用して、当社もしくは第三者の知的所有権やその他の権利に対する保証、または実施権の許諾を行うものではありません。
- 本資料に記載の情報を使用に起因する第三者所有の権利に係わる問題が発生した場合、当社はその責任を負うものではありませんので、ご了承下さい。