

音波のよもやま話 (その30) 音波の音速と減衰 (6) 減衰その3

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回までに多くの減衰材と呼ばれるものが、その減衰として観測される原因は共通で、音速の分散である事を述べた。今回はその本質であるミクロの音の伝播と音速の分散の話である。物質には、大まかに気体、液体、固体を3つの状態があり、非破壊超音波の対象は固体であるが、まずは比較的理解しやすい液体や大気中の分子の動きから話す。

◆大気中の分子の運動

乾燥大気は窒素 78%、酸素 21%と2つの元素で98%と大半を占める。オゾン状態を除けば共に2原子で1分子を構成している。続いて1つの原子で1分子となっている1原子分子のアルゴン 0.9%、3原子分子の二酸化炭素 0.03%などである。湿度に比例して水蒸気(水 H_2O)が乾燥大気に最大4%まで含まれる。大気中の音の伝播を考える場合、大まか窒素ガス内の伝播と考えても良からう。これら分子は、ランダムな方向に直線運動し、衝突しあっている。個体液体と違って、分子間に隙間があり、隙間を維持するために衝突しあっていると言っても良い。なお、衝突するとは言っても、ビリヤードの弾が衝突するのは異なり、近づくと段々減速し、跳ね返り、加速するイメージである。

分子は小さく $1 \mu\text{m} \approx 1 \mu\text{m}$ に約 3×10^{22} 個と膨大な量が含まれる。気体分子がランダムな運動をしている状態を確認する事は難しい。気体ではなく、液体でランダム運動をしている事を想像させる現象がある。スコットランドのロバート・ブラウンが1827年に発見したブラウン運

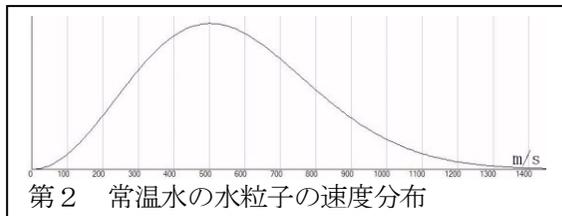
動である。1828年彼は細胞の核の再発見者でもあるが(1802年オーストリアの植物画家によっても発見されている)、当時の顕微鏡は精々250倍までで解像度も悪く観察には苦勞したと思われるが、今では顕微鏡があれば誰でも観測できる現象である。当時、顕微鏡は貴族など金持ちの趣味や贈り物の対象であった。

彼が顕微鏡で花粉を観察していたら、浸透圧で花粉が破裂し、中から出てきた微細粒子がランダムな動きをしていた。

微粒子の軌跡は第1図の実線の様になり、ランダムウォーク或いは酔歩と呼ばれる。宗教者で



第1図 常温水中微粒子中心の軌跡



第2 常温水の粒子の速度分布

もあるブラウンは生命に関連するかと最初は色々な生物体の微粒子を観測し、その後数十年に渡って非生命体の微粒子も含め観察し、全ての微粒子が水中で同じ様なランダム運動をする事を確認した。

常温水分子の速度分布は第2図の様に平均速500m/sを中心に分布している。水の分子同士は毎秒 10^{13} 回程度衝突しており、微粒子には大き

さに因るが、その数千数万倍回衝突している。人の目には残像現象があるので、細かな動きは見えず、第一図の実線の様な運動をしている様に見える。水の分子の運動（振動）速さは第2図の様にピーク確率で 500m/s、平均値でその 1.1 倍程度と計算される。目に見える粒子の運動速度は、水分子が約 500m/s で衝突した場合の計算速度とはかけ離れて鈍い。図に点線で目に見える最初の一区间だけ、実際の動きのイメージを追記した。目に見える一区间移動するのに、ランダム運動の水分子に数えきれない回数衝突され、行き戻りしながら、区間距離の何（億？）倍も移動している。現実の粒子の運動は目に見える運動とはまるっきり異なる。目に見える実一区間の移動は、一個の水分子の衝突で発生したものではない。目の残像時間は約 50ms で例えば蛍光灯の輝度変化は 50Hz 地域では 100Hz であるが、故障でない限りチラツキは感じない。残像時間に見合った時間ほぼ同じ位置に在ると見えるのである。

水に墨インクを垂らすと、広がる。所謂拡散現象であるが、これもブラウン運動により、炭やインクの粒子に水分子がランダムに衝突して、その結果粒子が広がる。硯で作った墨なら、顕微鏡下でブラウン運動が見える。

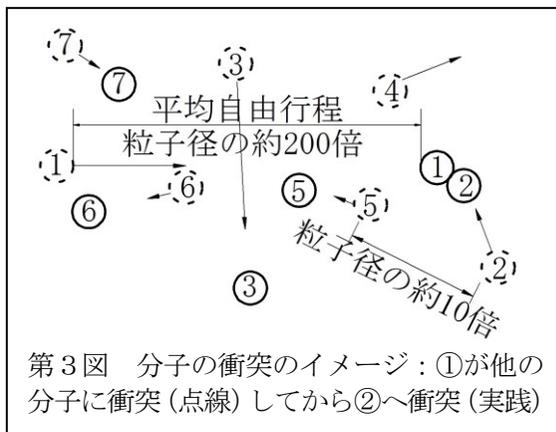
そのころは分子自体の存在が知られていなかったため、ブラウン運動が分子の衝突によると考えられるように成ったのは、ブラウンが発見してから 1 世紀後の事である。1905 にアインシュタインは、この運動を元に、当時確認できていなかった「分子」の存在を立証する論文をだした。が、ブラウン運動が既に発見されている事を知らないで、分子力学、統計力学、熱力学の発展の中、良い環境に恵まれ論文を書いた様である。ブラウン運動の元は水分子の熱運動である。特定の水分子を追いかければ、水分子自身もブラウン運動をしている。あらゆる粒子が熱を持ち、ランダムな熱運動＝ブラウン運動をしている。電氣的に計測される熱雑音と呼ばれる電気ノイズもランダムな熱運動による。熱雑音のエネルギーは温度に比例する。趣味の天体観測する CMOS カメラは、冷却装置が付属しているものがあるが、熱雑音を下げる為である。

極希薄な気体中に小さな鏡を置き、光を当てると、鏡が不規則に動いている事が判る。希薄な気体もブラウン運動している様である。

◆空気中の音の伝播

大気中の気体分子も、熱運動によりランダムな運動をしているだろうが、液体に浮かぶ微粒子の様な観察しやすい状態は無く目視で観測できない。前述の話から推測すると、各分子は確実にランダムな熱運動をしているであろう。大気の主成分の窒素分子の大きさは約 0.4nm ($0.4 \times 10^{-9}\text{m}$) である、

水中では水分子同士が隣り合っていて、1 nm

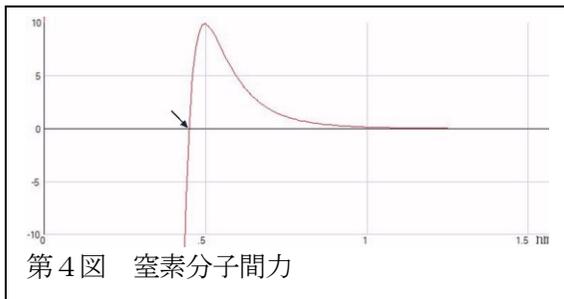


で 3×10^{25} 個の分子を含む。水分子の大きさは窒素分子と似たサイズである（水素が小さいのでほぼ酸素原子の大きさ）。大気中では分子の隙間は大きく、1 分子の占める体積は水に比べ約 1000 倍である。分子は熱運動して動き回っているが、時々衝突する。その平均衝突間隔を平均自由行程と呼び、大体 70nm (0.07μ) で分子大きさの約 200 倍である。分子と分子間の平均隙間は分子のサイズの 10 倍程度である。衝突のイメージを第3図に示す。粒子①が他の分子に衝突した時を点線、その運動方向を矢印で、粒子②に衝突した瞬間を実線で示した。衝突後は慣性力と運動エネルギーが保存されるように完全弾性反射する。実際には衝突で接触するわけではなく、近づくと段々反力が強く成って減速し、衝突速度が遅い場合、分子のサイズより少し大きい距離で反発する。原子や分子の大きさは、

音波の減衰, ブラウン運動, 水粒子の速度分布, 気体分子の速度分布, 分子間力

我々の物のイメージとは異なり、原子や分子自体は雲やスポンジの様なもの、相互作用する概略の大きさと考えてほしい。雲は前述の分子のサイズより大きく広がっている。

この相互作用、分子間力はレナード・ジョーンズ・ポテンシャルなどで比較的良く近似でき、窒素分子の場合のレナード・ジョーンズ・ポテンシャルの距離微分値、即ち力の計算例を第4図に示す。横軸は nm の単位である。粒子間が近いと分極による静電気力の引力（図中正）が発生し、より近づくと電子雲の重なりによる斥



第4図 窒素分子間力

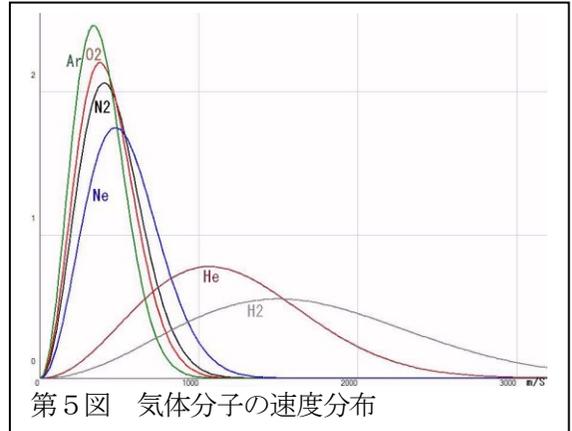
力（負）が急に発生する。固体や液体は分子間力が零の状態（図中矢印）ともいえる。山、即ち引力の最大値が気体より大きい。セラミック超音波振動子は素材に電圧を加えて分極したもののだが、あらゆる絶縁物質が電界を加えれば分極する。殆どの物質にパルス電界を加えると音が出るが弱い（誘電体鳴きと言う）。電界を無くすと分極が無くなる。分極が大きく、一度分極すると分極が戻らない（ヒステリシスの有る）材料を圧電振動子として使っている。

電気の場合、電子の平均自由行程が、抵抗値として現れる。自由行程が長いと抵抗値が低く、自由行程が短いと抵抗値が大きい。テスターでは電子の自由行程をマクロ的に測定している。

金属では大半の熱は電子により伝わる。自由行程が長い程熱も良く伝わる。銅、アルミが熱電気共に伝えやすい理由である。

気体分子は衝突するたびに、不規則に運動量（速さと方向）が変わるが、その熱運動の速さの絶対値の分布を、イギリスのジェームズ・クラーク・マクスウェルが速度分布関数（マクスウェル分布）として導いた（名称はベクトルの「速度」だが、スカラーの「速さ」を意味する。又幾つかの仮定の元に導いた）。同時に分子の種類に

拠らず回転も含む平均運動エネルギーに「エネルギーの等分配則」があることを示した（等分配則に反する現象は今だに観察されていない）。計算した結果を第5図に示す。横軸は速さ、縦



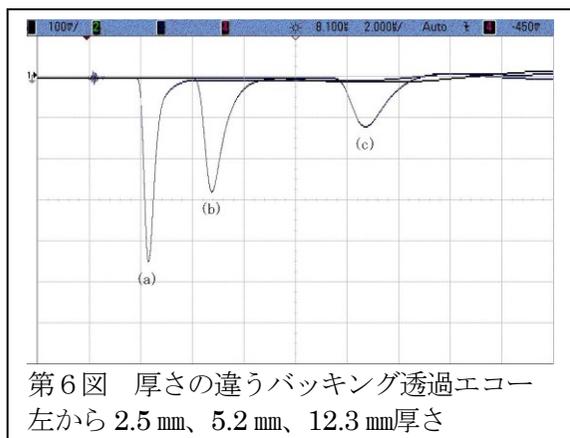
第5図 気体分子の速度分布

軸は確率である。第2図も同じ計算で求めた。エネルギーの等分配則により、どの種類の分子（粒子）も同じ平均運動エネルギー（運動量）を持つので、軽い水素分子（分子量2）は速い。重いアルゴン単原子分子（原子量40）は遅い。大気には殆ど含まれていないヘリウムガスの図中ピーク速さ（最大確率速度と呼ばれる）は約1000m/sで喉に少し入れると喉内大気の音速が少し速くなって高い音声になる。大気的主要構成の窒素や酸素分子の確率ピーク速さが350m/s付近で、常温常圧大気の音速340m/sが分子速度に関係するのではと気が付くであろう。

（二乗）平均速度はこれらより高く500m/s前後で、一方向の二乗平均速度は300m/s前後となり、単純には音速と繋がらない。第5図の速度分布関数は無限大の速度も取りうるが、常温で核融合が生じる事はないので、高さの大きな部分の近似と考えられる。気体中で色々な速度の気体分子が玉突きしてランダム運動しながら、その上に音の運動を加えて、音を伝えると考えられる。

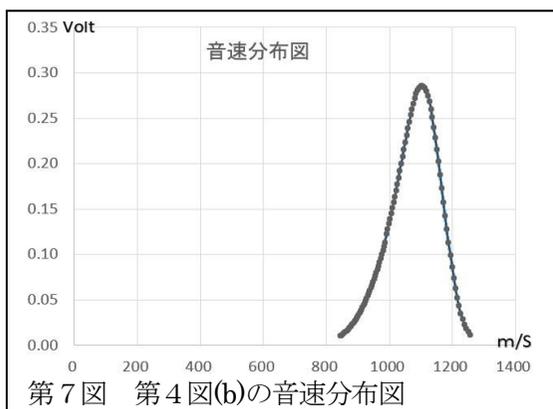
水中の場合は、粒子同士がほぼ接触状態にあり、気体とは異なる現象で音が伝えられると考えられる。

前回、探触子に使うバックングのエコー測定結果を再度、第6図に示す。何となく、第5図



第6図 厚さの違うバックング透過エコー
左から 2.5 mm、5.2 mm、12.3 mm厚さ

の速度分布関数に似た形をしている。横軸が時間なので、5.2 mm厚さのバックングの波形(b)の横軸を速度にすると第7図となる。第5図の左右を逆にした様な分布図である。一般にこのカーブを逆ガウス(正規)分布と言い、拡散過程即ちブラウン運動の到達確率分布に相当する。仲間に BPT (Brownian Passage Time ブラウン時間経過分布) と呼ばれ、日本では地震の発生確率に使われている。第5図は分子の音速分布なので、一定距離を通過する時間=距離÷音速に図を書き換えると当然左右逆になる。従って速度分布関数と、音速分布の逆数はほぼ同じと様なものと言ってよかろう。故障確率を示す、初期故障の少ない二項ワイブル分布に近い形をしている。



第7図 第4図(b)の音速分布図

大気中の音速分布を測定出来れば良いのだが、残念ながらまだ測定出来てない。技術的には可能と思われるが未だ良い機会に恵まれていないので、固体タングステン・バックングのデータとの比較となった。

何れにしても、一般的には音速の分布が観測されないのはどういう事なのであろうか？結論から言うと、実際には各分子は図の様に色々な速度であり、早く伝わったり遅く伝わったりする音があるが、原子分子の平均自由行程が極短い為、我々が測定するセンサーの距離間隔では平均速度しか測定できない、選挙の出口調査が報道機関によらないのと同じと言う事である。

◆あとがき

主に気体中の分子のランダム運動と音速の可能性に関して話した。次回は気体中の音の粒子法でのシミュレーションを中心に話す。

◆今回知った事

- (1) 気体液体中では分子、粒子は熱運動＝ランダム運動している。
- (2) 水中の水分子の平均運動速度は 500m/s 付近で水の音速 1500m/s より遅い。
- (3) 大気中には運動を早く伝搬する粒子もあれば、遅い粒子もある。
- (4) 気体中の平均的粒子の運動速度は大気の音速に近い。
- (5) 気体粒子の速度分布とタングステンダンパーの透過音圧分布は似た形をしている。
- (6) タングステンダンパーの音速分布は日本では地震の発生確率に使われる、逆速度分布関数に近い。
- (7) 音の運動は、気体分子のランダム運動に重畳され伝搬する
- (8) 液体では異なる現象で音が伝わると考えられる。
- (9) 大気の音速が分布していないのは、分子の平均自由工程が計測装置に比べ短く、選挙の出口調査の様なもの。

音波の減衰, ブラウン運動, 水粒子の速度分布, 気体分子の速度分布, 分子間力

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで(2015/04初
版2刷、日刊工業新聞社)

•
IUS2012 Doresden 423 4I-4 Wave
Propagation Simulation in Coarse Grain
(attenuative) Materials