SOUND A&T 特集
電気音響はケーブルで音が変わる？

〝オーディオケーブルを科学する〟

志賀 正幸

1．はじめに

私は、現役時代は某大学の材料工学科で金属物理学を専門としていたが、オーディオは若い頃からの趣味で、たいした装置を持っているわけではないが、主にクラシック音楽を楽しんでいた。オーディオ誌なども時々見ていたが、その内容に専門家として首をかしげる記事が多くありました、退職後、時間に余裕が出来たため、ネット上で「オーディオの科学」(http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/Audio.htm) というページを立ち上げ、科学的に見たオーディオ観を公開しています。これを見られた日本音響家協会の方から、機関誌「サウンド A&T」にオーディオケーブルを中心とした記事の執筆を依頼された。本稿はそのホームページから関連ある部分を抜粋して書き改めました。

2．私のオーディオ感

ここではよく知られた二つのことわざを引用しオーディオマニアが陥りやすい傾向を述べてみます。

●『木を見て森を見ず』

そもそも、オーディオ装置の目的は音楽を出来るだけ演奏会で聴いているのに近い雰囲気でリスニングルームに再現することにあります。このとき、その性能（森）を決める因子（木）は数多くあるが最大のものはリスニングルームそのものとスピーカーシステムの性能だと思っています。他の装置はスピーカーシステムに見合った価格の、定評あるメーカーの製品を買っておけば大差はないはずです。このとき具体的に何を選ぶかの基準は周波数帯域やひずみ率(これらの値は同じ価格帯の製品ならほとんど同じ)などのデータや評論家先生の評価より、使い勝手で決めることをお勧めします。また、スピーカーケーブルに凝り何万円もかけるマニアがいると聞きますが、これなど典型的な『木を見て森を見ず』の一例です。

●『鰯の頭も信心から』

ともかくオーディオは趣味の世界であるため、その性能の差が物理学的、電気工学的にみて、根拠のないものであっても本人が最高と思っていればそれでいいわけです。この場合あまり物理学や電気工学を知らないほうが happy かもしれません。しかし、私にいわせればメーカーの宣伝文句や評論家の記事はかなり眉につばをつけて見る必要がある。特に一見科学的な根拠を挙げてもっともらしい説明をしてある記事には注意する必要がある。科学的説明には定性的説明と定量的説明とがあり、前者は因果律といってもよく、例えばケーブルの例でいうと、他の条件が同じであれば確かに、4Nの線材より6Nの線材を使うほう抵抗値は小さくなるが、導線の電気抵抗の原因はこの程度の純度の銅線だと殆ど熱抵抗で決まっており、4N銅と6N銅の電気抵抗率の違いは温度差にしてせいぜい1度くらいである。そう考えればこんなところにお金をかけるのは意味のないことだといわざるを得ません。つまり、一見もっともらしい説明も定量的に分析するとほとんど意味のないことがこの世界には往々にしてあるということです。そんな記事を信じて、大枚のお金を投じるのはまさに『鰯の頭も信心から』と言わざるを得ません。

3．高忠実度再生とよい音について

「オーディオの科学」の目的はあまりお金をかけずに、どのようなオーディオ装置を構築すればよいかを物理学的、技術的側面から検討することであるが、原音そのものの再生は、

(1) ステレオ録音・再生では音像情報がかなり失われる。

(2) 自宅のリスニングルームとコンサートホールでは広さが異なるので定在波の立ち方、残響時間などが大きく異なる。

(3) 一般住宅ではそれほど大きな音を出すわけにいかないのでオーケストラなどの再生は音量的に無理、といった理由で実際には不可能である。そこで、次善の策として、録音された音楽情報を出来るだけ忠実に再生する、すなわち高忠実度再生（**High Fidelity HiFi**）を目指すことになる。

高忠実度再生とは、

(1) 周波数レンジ（f 特）が広く平坦である。

(2) 歪（高調波歪、混変調歪、過渡歪、位相歪など）が少ない。

(3) ダイナミックレンジ（最大音と最小音の比）が大きい。

(4) 信号対雑音比（**S/N** 比）が大きい。

(5) 音像定位がよい（ステレオ感が鮮明である）といったことで定義出来る。これらは、原理的に測定可能な量であり個人的な好みが入り込む余地はないといってよい。

((5) は少し難しい)。　ここでは、これらの特性を良い物理特性とよびプラスイメージでとらえています。

しかし、高忠実度再生が即良い音かといわれれば必ずしもそうともいえない。特に、ソース（**CD** や **LP**）が良くない場合、高域を落とすなど、むしろ周波数レンジが狭めた方が聴きよい音になることもあります。小さい音で聴かざるを得ない場合、低音と高音を増強したほうが実際の雰囲気に近づく（ラウドネス・コントロール）というのは古くから知られた手法です。また、高忠実度

と言う点では半導体アンプに劣るにもかかわらず、真空管アンプのほうが良い音がするという人もいます。

ところで、「良い音とは何か？」と聞かれると、はたと困ってしまいます。これは、個人の嗜好の問題で、誰にも定義することはできない。もちろん、測定で定量化して表すこともできない。しいていえば、その人にとって聴きよい音だとしか言いようがない。しかも、聴覚は視覚と異なり、客観的な評価がしにくく、心理効果が大きく効く。そのため、オーディオ機器やアクセサリーの宣伝には、手を変え品を変え、いかに物理特性が良いかを説きながらその実、超人的な聴力の持ち主にしかわからないような差であったり、時には物理特性を落とし聴きよい音作りをしているものも見受けられる。特に最近は、難しげな物理理論を展開したり、いかにも科学的であるかのような宣伝文句が多くみられ、しかも、立派？な雑誌まで、その怪しげな理論を紹介し、その製品を推薦したりしています。もしあなたが、その原理を理解しようとせず、自分の耳だけを頼りに良い音を求めだすと、とどまる所なく高い買い物をさせられる羽目に陥ってしまうでしょう。特に、実際にはほとんど物理特性に差が無いものほど、心理効果が支配的になるのです。

本稿では、その典型的な例としてオーディオ用のケーブルを取り上げました。その理由は、(1) 最近、非常識に高額な物を含め、数多くのケーブルが様々な『理論』に基づくと称して売り出されていること、(2) ケーブルの信号伝達特性はスピーカーの音質などに比べ、すでに確立した電磁気学、物性物理学で十分よく理解できること、(3) 特に，材質にこだわることが多いようだが、私の専門は、材料科学、物性物理学で、宣伝文句などの欺瞞性が手に取るようにわかるからです。

後に詳しく説明しますが、ケーブルの信号伝達特性はその構造で決まり、材質には依らない。しかも、スピーカーケーブルの場合2~3 mの長さですむなら、1 m数百円のケーブルで十分で、可聴周波数 (20**Hz** − 20**kHz**) では周波数特性は完全にフラットで、歪みもない。したがって、超高純度の銅を使ったり、凝った構造をした、高価なケーブルに変えて音が激変したという話しはまず心理効果と見て間違いないでしょう。

4．スピーカーケーブルの電磁気学

この章では、スピーカーケーブルの信号伝達特性を電磁気学に従って解析する。参考のため、表1に代表的なメーカーのいろいろなレベルのスピーカーケーブルの価格と特性をあげておく。

	価格 ¥/m	抵抗値 mΩ/m	静電容量 pF/m	材料 (純度 (%))
A	200	22.5	55	OFC(99.995)
B	1200	6.5	86	PCOCC(99.996)
C	11,200	15	30	Hi-OFC(99.995)
D	14,000	6.6	78	7N-PCOCC(99.99999)

表1 A社製スピーカーケーブルの価格と特性

スピーカーケーブルが音質（正確にいうと信号伝達特性）に及ぼすと思われる要因は (1) 直流抵抗値　(2) 表皮効果　(3) 静電容量　(4) 自己インダクタンス (5) 自己振動によるロスなどが考えられる。以下に各々の要因について定量的な説明を加える。なお、量的な見積もりは、最も安価なケーブルAについて、長さを4m（往復8m)、負荷のスピーカーのインピーダンス（直流抵抗値）は8Ω（一定)、パワーアンプの内部抵抗（出力インピーダンス）は0.8Ω（DF=10) として計算している。これは、直径1mm、線間間隔4mm程度の並行2芯線に相当する特性値である。なお、表には書いてないが、この場合の自己インダクタンスは約1 μ H/m となる。さらに詳しい計算は「オーディオの科学」内「ケーブルの電磁気学」(1) に掲載してある。

(1) 直流抵抗

導線の電気抵抗 $\boldsymbol{R}$ は　$R = \rho \times l / S$　で与えられる。ここで、l は線の長さ、S は断面積、ρ は抵抗率（単位長さ，単位断面積当りの抵抗値）で材料により決まる量である。電気抵抗の原因は　(i) 結晶格子の熱振動　(ii) 不純物　(iii) 格子欠陥（結晶粒界、格子歪など）などである。ケーブルの宣伝文句などでは、(ii) のみが論じられることが多いが、実は室温での電気抵抗の原因はほとんど (i) で99.999%程度の純度の銅線だと (ii) と (iii) の寄与は (i) の100分の1以下である。つまり、安価なＯＦＣ材を高価な7Ｎ材に変えても温度が1~2度下がった程度の効果しかない。ところで、表1を見ると1m当りの抵抗値は材料で決まっているわけでないことがわかる。すなわち、上式で l = 1 m とすると、抵抗値を決めているのはほとんどケーブルの断面積である。要するに太い線ほど抵抗が小さくなるわけである。もちろん実際のケーブルは多芯構造なので素線の断面積の総和が S となる。表1の例では比較的安価なBが最小値となっている。なお、抵抗の原因や導線の材質によって音が違うなどという人もいるようだが、本稿第5章で詳しく論じるが、そんなことはありえないことである。

スピーカーケーブルの直流抵抗が音に及ぼす効果は2つ考えられる。すなわち、(i) 単純なジュール熱による損失、(ii) スピーカーの電磁制動力の低下である（アンプのダンピングファクターが実質的に低下する)。

(i) ジュール損失は　$W=V\times I=R\times I^2$ と抵抗値 $\boldsymbol{R}$ に比例する。ケーブルはスピーカーと直列につながっているので電流Ｉはスピーカーに流れる電流と同じである。いま、スピーカーの抵抗値を8オームとして、ケーブルはもっとも安価なAを4m（往復で8m）使ったとすると、約1%のパワーロスとなる。Bの線を使うと0.3%に減少し多少効果はあるが、普通アンプの出力には充分余裕があるのであまり気にすることではない。(ii) のスピーカーの電磁制動力は [アンプの出力インピーダンス＋スピーカーのボイスコイルのインピーダンス＋スピーカーケーブルの抵抗] が小

さいほど強くなる。アンプの出力インピーダンスは普通明示されていないが、ダンピングファクター D がそれにあたり、D の定義はスピーカーのインピーダンスを R、アンプの出力インピーダンスを Z とすると、$D=R/Z$ で与えられるので、$R=8\,\Omega$、$D=100$ とすると $Z=0.08\,\Omega$ となる。従って、アンプの制動力を生かそうとすると、スピーカーケーブルの抵抗値は Z より小さいことが必要である。ただし、全体のインピーダンスが約 8 Ω なので音質の変化として分かるかどうかははなはだ疑問である。

(2) 表皮効果

導線に高周波電流が流れるとき、電流が発生する磁場の影響で電流は表面部分を流れる傾向がある。これを、表皮効果と呼び、周波数が高いほどその影響は大きくなる。すなわち、高周波になるほど実効抵抗値が大きくなり高域の低下を招く可能性がある。では、これを定量的に考えて見よう。実際にどれくらいの抵抗変化が生じるかは簡単な式では表せないが、理論的計算により求められており、下表に直径 1.6mm(実測値と比較するため A より少し太めで計算)、長さ 4 m（往復で 8 m）の銅線について求めた結果を実測値とともに示す。透過率 (%)、減衰率 (dB) はスピーカー負荷を 8 オーム一定とし、1kHz を基準として計算している（直流抵抗による減衰（一定）を除くため）。なお、透過率は、スピーカー端子電圧 / アンプ出力電圧× 100 である。

周波数 (kHz)	10	20	50	100	備考
ρ_{AC}/ρ_{DC}	1.09	1.21	1.64	2.34	計算値
同上	1.04	1.23	1.50	2.0	実測値
R_{AC} (mΩ/8m)	76	82	112	160	計算値に基づく
SP 端子への透過率 (%)	99.9	99.8	99.5	98.9	
減衰率 (dB)	0.01	0.02	0.05	0.10	

表 2　表皮効果 ρ_{AC}、ρ_{DC} はそれぞれ交流、直流抵抗率；R_{AC} は 8m 長の交流抵抗（インピーダンス）

この表からわかるように、1.6 φ単線の表皮効果による抵抗増加は 100kHz で計算値、実測値とも約 2 倍となり、20kHz でも無視できないが、これによる信号減衰は、ケーブルの抵抗値がスピーカのインピーダンスに比べ十分に小さいため極くわずかである。なお、上の減衰率の計算は負荷のスピーカーのインピーダンスを一定としているが実際には周波数とともに増加するので、減衰率はさらに小さくなる。いずれにせよ、表皮効果による高域信号の減衰は以下の自己インダクタンスによる減衰より小さく、少なくとも可聴周波数では問題にする必要はない。

以下で、静電容量と自己インダクタンスの影響を見積もるが、理解を深めるため図 1 に簡単化したケーブルの等価回路を示しておく。

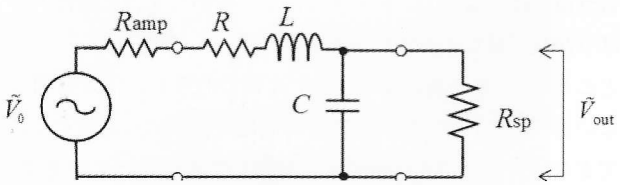

図 1　ケーブルの等価回路（集中等価回路）

ここで、V_0 はアンプの出力電圧、R_{amp} はアンプの内部抵抗(出力インピーダンス)、R はケーブルの直流抵抗、L は後述するケーブルの自己インダクタンス、C は線間容量である。実際には線間容量はケーブル全体にわたって分布するが、ここでは R と L の下流にあるとする。こうすることにより静電容量による高域減衰の上限を見積もることになり実際の減衰率はこれより小さくなる。R_{SP} はスピーカーのインピーダンスでここでは周波数によらず一定（8 Ω）として計算する。そして、V_{out} は出力電圧、すなわちスピーカー端子の電圧でケーブルによる減衰率は $e=V_{out}/V_0$ を計算することになる。

(3) 静電容量

静電容量による高音の減衰率は図 1 で $L=0$ として求まる。具体的に 4 m のケーブル A（C=45pF×4 = 180pF) についてインピーダンス（交流抵抗）$Z_C = 1/(2\pi f C)$ を計算すると 20kHz では約 40kΩ となり、スピーカーのインピーダンス R_{sp} の 5000 倍にもなり、100MHz でやっと 8 Ωくらいになる。つまり、ケーブルの容量成分は可聴周波数領域の減衰にはまったくといっていいほど寄与しない。

(4) ケーブルの自己インダクタンス

平行 2 芯ケーブルは $L=(\mu_0/\pi)\ln(d/a)$（d：線間距離、a：芯線の半径）で与えられる自己インダクタンスを持つ。インダクタンスによるインピーダンスは $Z_L=2\pi f L$ なので高周波数領域で減衰を招く。ケーブル A　4 mについての自己インダクタンスの影響を計算した結果を下表に示す。この線の直流抵抗は約 0.2 Ω、スピーカーのインピーダンスは 8 Ω（一定）とした。

周波数 (kHz)	10	20	50	100
Z_L(Ω)	0.25	0.50	1.26	2.51
透過率 (%)	99.9	99.8	98.9	95.7
減衰 (dB)	0.004	0.016	0.099	0.38

表 3 自己インダクタンスによる交流信号の減衰

この表からわかるようにケーブルの交流抵抗値は直流抵抗に比べ無視できない大きさとなる。しかし、この値は負荷抵抗 (8 Ω) 比べてかなり小さく、出力の減衰は 100kHz あたりまではあまり効いてこない。ということで、自己インダクタンスは超高域で微妙に影響を与える可能性は否定できないが、少なくとも可聴周波数帯ではほとんど影響はないといっていい。ただし、ケーブル長さが長くなると、例えば 100 m とすると 20kHz でも－3dB

程度の減衰が生じるので注意が必要である。

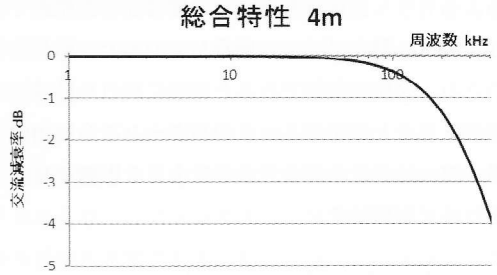

図2　図1の等価回路の総合特性。ここで、R_{sp} =8Ω、R_{amp} = 0.8Ω、R=0.2Ω、C=180pF、L=4μH として計算している

なお、(1) ～ (4) の影響、すなわち図1に示した等価回路の総合特性を図2に示すが、可聴周波数 20 kHz まではほとんどフラットで、50 kHz くらいから減衰が始まる。この図からはみ出しているが、自己インダクタンスのインピーダンスが 8 Ωくらいになるのが 350kHz 付近で、このあたりの減衰量は約 6dB、つまり、V_{out} / V_0 ≒ 1/2 となり、高音減衰の主役はケーブルの自己インダクタンスであることが分かる。

実測値はネット上で見つけた例を図3に示すが、上の計算値とかなりよく合致する。

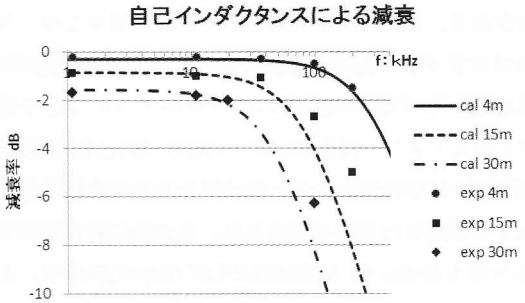

図3　ネット上で見つけたスピーカーケーブルの周波数特性
（残念ながら現在リンク切れで見られない）

(5) その他

(i) 自己振動による損失：平行ケーブルに電流が流れると発生する磁場により、同方向電流の場合は吸引力、逆方向電流の場合は反撥力が働く。従って、交流電流が流れているときは導線が振動し、エネルギー損失を生じる可能性がある。この現象によるエネルギー損失とその周波数依存性を理論的に見積もるのは、上記の (1)、(2)、(3) の場合に比べ難しく現時点では適当な理論式が見つからない。そのため、詳細は省略するが、自己振動の効果をモデルを使って計算してみた (2)。その結果、平行2芯ケーブルの場合、自己振動によるエネルギー損失は多めに見積もっても、直流抵抗によるジュール熱損失のなんと1億分の1程度で、まったく問題にならないことがわかった。

(ii) 外部磁場の影響：磁場中で導線がスピーカーからの音などの影響で、振動することによって発生する誘導起電力によるノイズあるいは混変調歪が考えられる。スピーカーケーブルの場合、行き帰り2本の線が一体となって振動する場合は誘導起電流は打ち消しあって流れず問題にならない。2本の線の間隔が振動する場合は、上の計算のようにその振幅はきわめて小く、磁場も地球磁場くらいしか働かないので全く気にする必要はない。

結論としては、数メートルのスピーカーケーブルでは、聴き分けできるような差は生じないといえるが、にもかかわらず、オーディオマニアの中には自分は聴き分けできると主張する人が多いのは事実で、その原因は心理効果として最後の章で説明する。また、導線の材質により音が変わると主張する人もいるようだが、これについても専門的立場からそんなことはあり得ないことを、項を改め説明する。

5．コネクトケーブル

CD プレーヤとアンプをつなぐコネクトケーブルの交換によっても音が変わるという話もあるようだが、これについても図1の等価回路に基づき解析できる。この場合等価回路そのものはスピーカーケーブルの場合と変わらないが、回路のインピーダンスが大きく異なるので注意が必要である。まず、R_{amp} に相当する CD プレーヤやプリアンプの出力抵抗および R_{sp} に相当するアンプの入力抵抗（R_{in} とする）が大きく、これに比べると自己インダクタンスの交流抵抗は 100kHz あたりでもきわめて小さく、高音減衰の主因が静電容量となる。具体的に、R_{amp} は機器によって異なり 100 ～ 1000 Ω 程度の値で分布しているようだがここでは上限値として 1000 Ωとし、R_{in} は最近のアンプでよく見られる 20k Ωとして計算する。ケーブル自身の特性である直流抵抗、線間静電容量、自己インダクタンスは公表しているデータが見つからないので、手持ちのピンケーブルを分解し構造を調べ計算で求めた結果、直流抵抗は往復で 350 m Ω /m、静電容量は 70pF/m、自己インダクタンスは 0.3 μH/m（同軸型なので小さくなる）くらいとなりこの値で減衰率を計算してみた。その結果を図4に示す

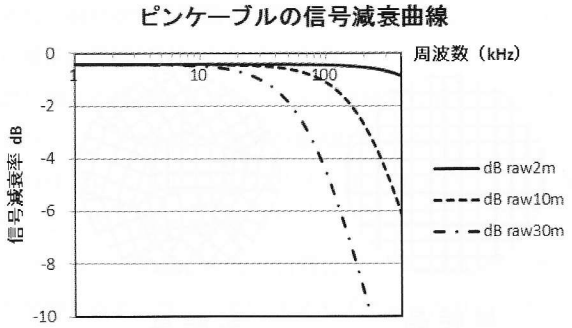

図4 コネクトケーブルの伝達特性

これを見ると通常家庭で使う 2m 程度の長さなら、100kHz あたりまでほとんどフラットで、30m くらい引き回すと 20kHz でもわずかに減衰が見られる。なお、高音減衰の原因が静電容量であることは、等価回路で L=0 としても減衰曲線はほとんど変わらず、さらに、例えば 30m の場合、100kHz での静電容量の交流抵抗値は約 800 Ωと R_{amp} とほぼ等しくなり、信号が半減す

る（－6dB）ことからもわかる。

6．抵抗の原因と線材の影響

6-1 金属の構造

先に触れたようによく導線の材質により音質が異なるといわれることがあるが、ここは私の専門分野でそんなことはあり得ないことを説明する。はじめに、この問題は金属の結晶構造や組織、及び電気抵抗のメカニズムに関連するのですこし材料科学の基礎に立ち戻って説明する。

(1)　　結晶構造

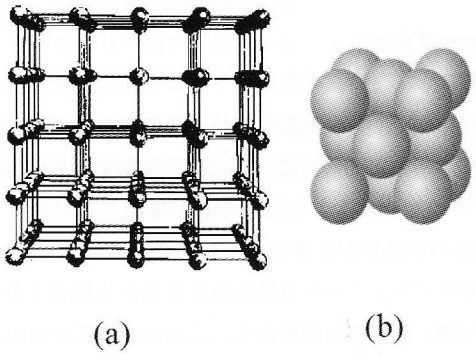

図5　(a) 結晶格子、(b) 面心立方晶

金属だけでなくほとんどの固体（ガラスや非晶質合金以外）は図5(a) に示すように、その構成原子や分子が3次元的に規則正しく並んでいる。これを結晶といい、その構造を結晶構造という。なお、図で原子（○）を結ぶ線は架空のもので見やすくするために書いてあるもので結晶格子といい、その中の1つを単位胞と呼び単位胞の構造を定めれば結晶構造がわかる。実際の結晶は図5(b) のように原子はもっと大きく互いに接しあって並んでいる。この例は導線としてよく使われる銅や銀、アルミニウムなどの単位胞で立方体の隅と各面の中心に1つの原子をおいた構造で面心立方晶と呼ばれる。

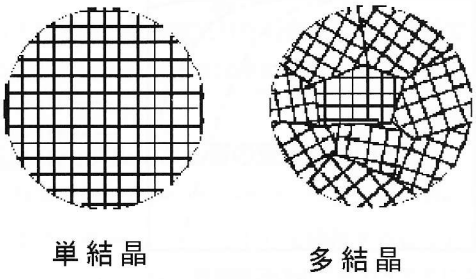

図6　単結晶（左）と多結晶（右）直線は結晶格子を表す

実際に手にする金属は試料全体が一つの結晶（これを単結晶という。図6左）ではなく、色々な方向を向いた結晶が混ざり合っている。これを多結晶と呼ぶ（図6右）。同じ方向を向いた個々の結晶を結晶粒（グレイン）と呼び、その境界を結晶粒界と呼ぶ。結晶粒の大きさはまちまちだが光学顕微鏡で見られる程度の大きさである。もちろん金属は不透明なので普通の顕微鏡では見えないが、面を磨き、酸などで少し腐食してやると、結晶粒界が優先的に腐食され、金属顕微鏡でみると表面に現れた結晶粒界のパターンを観測することが出来る。このパターンを金属組織と呼ぶ。金属組織の違いは強度や腐食性などに大きな影響を及ぼすが抵抗値にはそれほど影響はない。

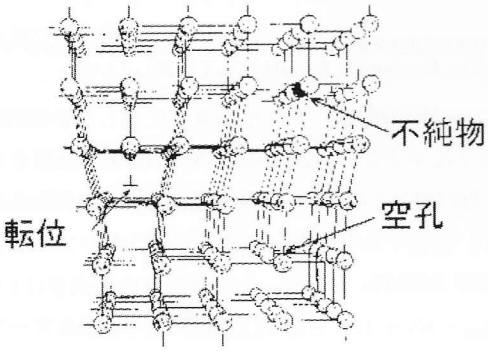

図7　いろいろな格子欠陥

さらに、現実の金属は図7のように完全に規則的な配列から外れた部分がある。これを格子欠陥という。最も簡単な格子欠陥は原子がぬけたサイト（格子位置）である。これを空孔と呼ぶ。ただし空孔濃度はわずかで大雑把には1億格子点につき1個くらいの割合と考えてよい。不純物も格子欠陥の一種と考えてよく、4N純度の銅なら1万原子につき1個の割合で不純物原子が存在する。空孔や不純物は点欠陥と呼ばれる。点欠陥に対して線欠陥と呼ばれる欠陥もある。図7で転位として示した部分で、よく見ると、その位置で原子の列が手前から奥に向かって抜けている。この転位の位置は水平方向に容易に移動し、金属が比較的容易に変形するのは、転位が移動するためである。さらに強く加工すると多くの転位が導入され転位密度が増加する。加工や、線引きした直後の銅線には多くの転位が存在する。ただし、これは高温で焼き鈍（なまし）することにより消えてゆく。その他にも色々な格子欠陥があるが金属の場合基本的な欠陥は上記の3種類である。

6-2　金属の電気伝導

金属がよく電気を通すのは、結晶中を自由に動く電子が存在するからである。ところが、この電子の運動は、電子を単なる粒子と考えたのでは全く理解できない。例えば、電子がある方向へ直線的に飛翔しようとしても、図5の結晶の絵を見ると原子にぶつかりジグザグ運動になりそうである。ところが、図5(a) のように、欠陥もなく完全な規則性を示す結晶中を電子が走るときはどの方向であろうと全く抵抗を受けない。従って、高純度でよく焼き鈍（なまし）がされている銅の電気抵抗は絶対0度（－273℃）付近では限りなく零に近い。このことは、電子の波動性を取り入れた量子力学でないと全く理解できない。電気抵抗が生じるのは、結

晶の規則性（周期性）が破れたところで電子が散乱されることによる。当然、格子欠陥は電子の散乱中心となるので、不純物が多い金属や強く加工した金属（転位密度が高い）は抵抗値が大きくなるが、実は、結晶の周期性を乱す最大の原因は原子の熱振動である。

不純物や格子欠陥を考えない場合、絶対零度付近では、結晶は図 5(a) のような完全な周期性を保っているが温度を上げると各原子は熱振動を起こす。ある瞬間の結晶のスナップ写真を撮ったとすると、原子の位置は本来の格子点からずれている。ずれの方向はほぼランダム（無秩序）で、結晶の規則性はいたるところで破れている。また、ずれの大きさは温度とともに増加する。従って、電気抵抗も温度とともに増加する。一方、不純物や格子欠陥の数は数百度℃以下ではほとんど変化しないので、不純物による電気抵抗値は温度変化しない。高純度金属の場合、室温付近の電気抵抗の大部分は熱振動によるものである。逆に絶対零度（-273℃）付近の電気抵抗はほとんど不純物、格子欠陥によるものであり、残留抵抗とよぶ。室温での抵抗値÷残留抵抗値を残留抵抗比（RRR) といい、RRR 値は超高純度金属の純度の目安として使われる。ちなみに、5N 程度の純銅の RRR は数百である。ただし、RRR 値が数百以上の高純度銅の抵抗値は導入された転位による寄与が大きく、線引きなどで強加工された銅線の抵抗値は 3 ～ 4% 増加する。ケーブル用として市販されている銅線は焼きなまし（アニーリング) により、転位が消失し本来の抵抗値に戻っているはずである。なお、通常のコードに使われているタフピッチ銅というのは酸素を 0.02 ～ 0.05% 含んでいる。ところが、他の不純物の濃度が同じなら、酸素を少し含んでいる方が抵抗値はむしろ小さくなる。それは、酸素が金属不純物と酸化物を形成し、その部分へ集めてしまうので、それ以外の部分の純度がむしろ良くなるからである。このように、電気抵抗値は単に不純物の平均濃度だけでは決まらない。なお、タフピッチ銅は無酸素銅（OFC）に比べて強度が高く（降伏応力が大きい）断線しやすいヘッドホン・イヤーホンのコードにはこれを使うべきである。よくヘッドホンのコードに高純度無酸素銅をつかい高音質を謳（うた）っている物があるがこのような製品は敬遠した方が無難である。

6-3　オーディオケーブルにまつわる迷信

迷信その 1：高純度信仰

焼き鈍（なまし）をした通常の OFC 銅 (99.99% 程度) の場合、不純物・格子欠陥による抵抗は、室温での結晶の熱振動による抵抗の 300 分の 1 というデータがある。つまり、さらに純度を上げても最大 0.3％以上は小さくならない。ところで、室温が 1℃下がると抵抗は 0.4％低下する。冬になると 10℃は下がると思うが、その場合は 4％も下がることになる。このことは、要するに、純度をこれ以上高くしても無意味であることを意味する。一方、電流は抵抗の原因が不純物であるのか、熱振動であるのかには関知しない。伝送特性に関係あるのは周波数に依存する交流インピーダンスで、これは全てケーブルの構造によって決まる。ここらあたりが、物理の世界の常識とオーディオ界の常識？が大きく異なるところである。

迷信その 2：伝導の方向性

線材の伝導性に順方向、逆方向があるという話を聞くが上の説明からもわかるように結晶粒内では或る任意の方向と、その逆の方向は完全に対称であり、その方向および逆の方向に電流が流れる場合も全く等価である。これは、どの結晶粒についても同じであり、単結晶、多結晶いずれの場合も電流の方向を逆転しても抵抗値は不変である。これは物理の大原則の一つである時間反転対称性と等価である。こういう事情を知っている人にとっては、金属の電流方向に順逆があるなど想像すら出来ないことであるが、なぜかオーディオケーブルの世界ではこういう話がまかり通っているのはまことに不可解である。

そもそも、オーディオケーブルの電流方向なるものをどうして決めたのかがよくわからないがここでは想像をたくましくして考えてみる。これはある雑誌で見た説明だが、単結晶銅には方向性があり上流と下流を間違えないようにしなければならないとして何かまことしやかな絵が書いてあったように記憶している。確かに、単結晶銅には方向性はある。これは、多結晶銅から単結晶銅を作るとき一方の端から単結晶を成長させることが多いので、結晶の成長方向という意味の方向性があり製造プロセスの問題である。また、ケーブルの場合、単結晶といっても、1 本のケーブルが 1 つの単結晶ということでなく、結晶粒が線の径程度の大きさになっているものだと思うが、この場合、組織観察をすると、成長方向を示す組織が観測される可能性が考えられる。しかし、上の説明からもわかるように、この方向はあくまで製造プロセスに関わる方向であって電流の流れやすさとは全く無関係である。

迷信その 3：クライオ処理

クライオというのは低温を意味する述語だが、ケーブル線材を一度低温（代表的な温度は液体窒素温度＝－ 196 ℃）に冷やすと音が変わるというもののようである。「クール」な音にでもなるというのであろうか？　結論を先に言うと、銅や銀などの純金属の場合、一度低温に冷やしても、室温に戻れば完全にもと通りになり、結晶構造や組織は何の変化もうけない。　つまり、一度冷やされた記憶は完全に忘れてしまうわけである。

それでは何故このようなことが言われるようになったのであろうか？　正直よくわからないが、Web サイトを検索しているうちにその理由らしきものを見つけた。

それは、ある特殊な材料（切削用超硬合金らしい）を低温処理すると硬度が増すことが知られていることを根拠に、銅や銀についても効果がありそうだ、というものであった。実は、急冷する

ことによって硬度が増す現象は古くから知られている。鋼の焼入れである。なぜ硬くなるかの理由も古くから研究されておりわかっている。 鉄は室温では立方体の中心に１つの格子点がある体心立方晶だが温度を上げると面心立方晶になる。炭素を混ぜると、面心立方晶になる温度（変態点という）が下がる。温度を上げ一旦面心立方晶構造にしてから冷却すると、ふたたび体心立方晶に戻る。この時、結晶構造が変わるだけでなく組織も変化し、特に急冷するとマルテンサイトと呼ばれる組織を作る。このような組織が出来ると、鋼は極めて硬くなり、場合によっては脆（もろ）くなるので、焼き戻しをして少し粘り気を与える。このようなことは経験的に古くから刀鍛冶によって知られていた。

一方、純金属の場合は仮に結晶変態があっても冷却時と昇温時の変態温度はほぼ一致する。さらに、銅や銀の場合は低温から融点まで結晶構造は面心立方のままで結晶変態を起こさない。そのような金属を冷却すると、もちろん熱収縮し、さらに抵抗率の低下などの物性値は変化するが、それはそのときの温度できまる値であって、また室温に戻せば以前のまま室温での値を示す。つまり、冷やす効果は後には何も残らない。

このように、ほぼ同じ長さ、同じ構造で純度だけが違うケーブル、あるいはクライオ処理をしたケーブルを比較して、音が変わった（良くなった）と感じたとしたら、それは心理効果に他ならず、心理効果がいかに強く効くかを自ら証明しているものと理解すべきである。

7．それではなぜ音が変わって聴こえるのか？

― 心理効果 (プラシーボ) とブラインドテスト ―

これまで述べてきたように、数メートルのスピーカーケーブルやコネクトケーブルを変えることによる音質の変化など、あったとしてもごくわずかで普通の人が本当に検知出来るのかどうか疑問である。特に、線材を変えることによる変化はあり得ないと物理学からは断言できる。それでも、やはり１ｍ 数万円、いや数十万円もするケーブルを買う人がいると聞くので、その理由を考えてみた。もちろんこれは物理学でなく心理学・脳科学の問題なので素人考えであることを断っておく。

まず、ケーブルを追い求める人の言い分は、人間の聴覚は極めて敏感で、物理学では想像できないような僅（わずか）かな変化も捉えることが出来ると主張する。そして , 確かに物理学でもケーブルの構造により伝送特性は超高域においては変化する。

さて私も、聴覚が極めて敏感であることを認めるにやぶさかでない。ただ、敏感だけど、あやふやな（あるいは不安定な）ものだと考えている。そもそも、人間がある現象を知覚するということは、感覚器官（目や耳）が受けた物理情報が電気信号として脳に送られ、脳に記憶されている過去の経験、(間違ったものを含め) 色々な知識、他の感覚情報（聴覚の場合は視覚）などと結合し最終的に大脳にイメージを描く（音の場合は音像というべきか）のだそうである。

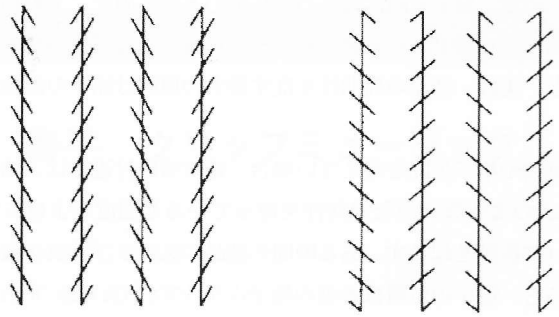

図８　錯視図の例 縦の直線は全て並行

視覚の場合は錯視現象がよく知られており、例えば、図８は縦の直線は全て完全な平行線だが、斜め線で修飾することにより平行線とは見えなくなる。つまり、視覚による認識も対象に固有な物理的な性質をそのまま認識するわけでない。ただ、視覚の場合は、定規などを使うことにより、容易にそれが錯覚だと分かる。なお、さらに多くの例は参考資料（3）に挙げてある。

一方聴覚は、視覚と比較すると物理情報が少なく脳内処理に負う部分が多いといわれており、当然錯聴もあり得る。同じ音源があなたに作る音像と、Ｂさんに作る音像が一致しているといえるだろうか？ ある人がいい音だというケーブルを他の人はぜんぜん駄目だということがしばしばあるようなので答は No だろう。つまり、仮に差が検知されてもそれに対する評価はバラバラだということである。そして、その評価を左右するのは視覚を含めた他の感覚や、「純度の高い線材を使えば純度の高い音がする」といった短絡的な知識など、要するに心理効果が大きいのだろう。いやもっと端的に言えば、本当は同じものでも、差があるはずだと考えている人は必ず差を見出して評価を下すのではないだろうか？

ところが、聴覚の場合、それが錯聴であり客観的事実 (4) ではないということを証明するのは視覚の場合のように簡単にはできない。唯一の方法は、今ＡかＢかどちらの装置（ケーブル）を聴いているかということを全く知らせずに聴き比べＡかＢかを当てるという、いわゆるブラインドテストをやることである。もちろんまぐれ当たりもあるので何回も繰り返しテストをし、統計処理をする必要がある。ただ、これを素人がやるのは面倒であまりデータを見かけない。メーカーもブラインドテストはタブー視しており、やらないだろうし、やっても結果を公表することはないだろう。しかし、ネットを探すと見つかる。私が見つけたのは、オーディオ装置や器具のブラインドテストを行うための装置を開発している会社が公表しているデータで、その中でスピーカーケーブルやコネクトケーブルについての結果もあるが、いずれの組み合わせも正答率は 50％前後で有意差無しという結果が出ている (5)。

ということで、音が変わって聴こえる原因はまず心理効果と考

えてよさそうである。ただ、もう一つこんなことが考えられる。音は聴く位置によって大きく変わり、実際ケーブルを変え（同じ物に変えても）戻って聴くと、音質が変わっていても少しも不思議ではない。この場合は、かわって聴こえても、ケーブルのせいで変わったわけでないので、ブラインドテストをすると有意差無しという結果になり、決してケーブルの音を聴き分けているわけではない。

まとめ

以上、スピーカーケーブルとコネクトケーブルの信号伝達特性を、構造の違いによって生じる変化を電磁気学によって、導線の材料の違いによって生じる変化を材料科学の観点から考察してきたが、高々数メートルのケーブルでは人間の聴覚では聴き分けることが困難であることを示した。それにもかかわらず多くの人がケーブルによって音が違うと感じるのは、ケーブルの違いでなく別の原因で生じた変化をケーブルによる音の違いと思い込むことによって生じる可能性が高いと考えている。このことを証明するにはさらに多くのブラインドテストを行うことが必要であろう。

【しが　まさゆき】

▪参考資料

(1)http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/13904emtheoryofcable.pdf
(以下、・・・My Room までを省略する)
(2)　・・・/cable.htm
(3)　・・・/copernican.htm
(4)　・・・/objective.html
(5)　http://djcarlst.provide.net/abx_wire.htm