

管楽器吹鳴の非線形現象と その解釈をめぐって

九州工業大学情報工学部 高橋 公也
立命館大学理工学部 池田 研介

(1995年4月20日受理)

概要

本記事は昨年(1994年1月12-14日)京都大学基礎物理学研究所でひらかれたモレキュール型研究会「音響系・光学系におけるカオス」において話題にとりあげられたいくつかの問題を、特に非線形力学系の立場から世話人が再編集しなおしたものである。個々の発表に関しては既に本誌に昨年掲載されているが(物性研究 Vol. 62, No. 5 (1994))その内容が音響学、楽器製作、楽器演奏、非線形光学、非線形動力学等の多岐多様な分野におよぶため世話人の立場から問題点を洗い直す方がよいのではないかと考え、このような記事を掲載するものである。

内容は以下の通りである。

1. はじめに
2. エアリード楽器：楽器の音色とは
3. リード木管楽器：カオスと楽器
4. 金管楽器をめぐって：共鳴構造
5. ヒューマンファクター
6. 参加者からのコメント

謝辞

文献

1. はじめに

この記事は昨年（1994年1月12-14日）京都大学基礎物理学研究所でひらかれたモレキュール型研究会「音響系・光学系におけるカオス」の内容にもとづくものである。モレキュール型研究会で行われた発表は通常本誌に掲載されることになっており、実際、本研究会での参加者が個別的におこなった発表も8月号（物性研究 Vol. 62, No. 5 (1994)）にまとめて掲載されている。にもかかわらず酔狂にも同じ研究会をダジにしてこのような記事を発表しようと思いついたのはこの研究会が世話人（T.K）および世話人補佐（I.K.）の当初の思惑を越えて実におもしろく展開したためである。参加者は楽器研究家、音響工学者、楽器制作者、楽器演奏者、カオス-非線形物理研究者などである。最初、これだけ個性のはっきりした、しかもまったく違う分野の、しかもほとんど初対面の連中が集まって果たしてうまく議論がかみあうものか時間がもつかと危ぶまれたが、いざ研究会が始まってみると、まるで古くからの知己であったかのごとく全員の間で話がまわりはじめ、参加者各自の発表もさる事ながら、それを上回る熱中した討論が毎日10時近くまで基研コロキウム室でつづけられた。この研究会をきっかけにして、管楽器に対する共同研究が、楽器の物理、楽器の製造と制御、楽器と人間の相互作用といった総合的な視点から可能になるのではないかという感じさえいただくようになってしまったほどである。その為のたたき台を作るという意味もふくめて、世話人としてはこんな滅多にないおもしろい展開は、なんらかのかたちで記録にのこしておきたいと考えてきた。幸い、全ての議論はテープにおとしてあったので、テープをおこしつつ議論の抜粋をつくろうと安直な構えでいたのだが、いざ本気でテープをおこすということになると、素人の手にあまる大作業であることに気がつき（一回きくのには20時間ちかくかかってしまう。）とりあえず、ノートと記憶をたよりに、この研究会での発表と議論のうち、われわれ世話人の色メガネを通してろ過された部分でも整理してみようということになった。こうして生まれたのがこの記事である。あえていうならば、世話人のフィルターを通してみた会議録ともいえるし世話人による会議のメモともいえる。したがって、自分勝手な思い入れや専門的興味（世話人はいずれもカオス-非線形物理学の研究者である。）にかたよった話題のとりあげかたが散見されると思うし、それにも気づいているつもりである。もっとも、この様な弊害をさけるため、この記事はいったん高橋-池田の文責のもとに書かれてから主だった参加者の間を回覧され、彼等の感想・コメントを得たのち物性研究に投稿された。したがって、本記事の付録としてこれらの感想・コメントを巻末につけておく。

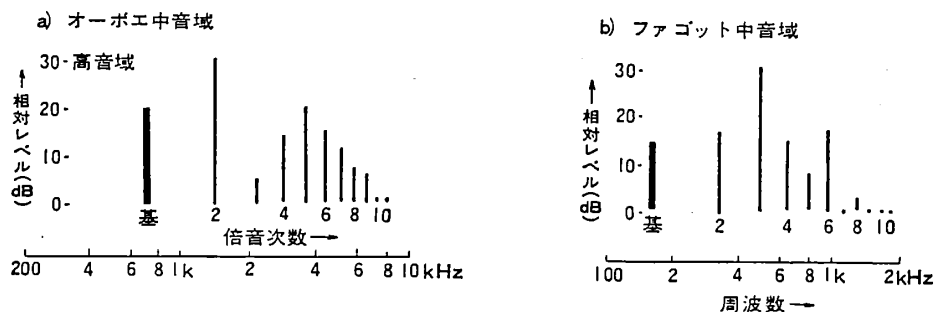
* * * * *

さて、最初に、まず管楽器を議論する上で必要な基本的な知識をいくつか羅列しておこう。これに関して、よりくわしい内容に興味のある読者は、研究会報告（物性研究 V o 1. 6 2, N o. 5 (1994)）における竹内の解説〔1〕や安藤の著書〔2〕を参照されたい。

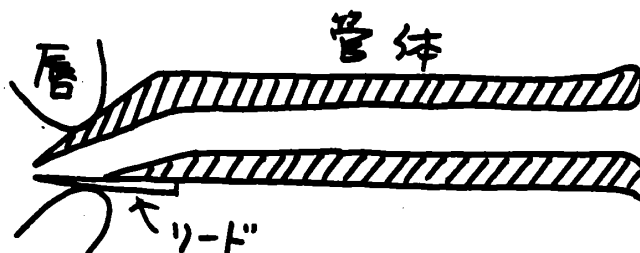
「音」を特徴付ける三つの要素として音の強さ、高さ、音色があることが良く知られている。強さとは文字どおり音波の振幅の自乗である。人間の耳が感じる強さは波の物理的エネルギーの対数に比例すると考えられるので〔物理的エネルギーの対数〕 $\times 10$ で実効感度を表す（単位 デシベル）。オーケストラの演奏で人間の耳が聞き取れる強度領域はきわめて広く120 デシベル（強度比にして 10^{-12} ）に達するといわれる。これにたいして音の高さを支配するのは、音波の周波数である。通常、基本波数（ド）の周波数を基準にして、その2倍の周波数の音を1オクターブ高い音とする。その間の周波数を対数スケールで12等分して7音階ド・レ・ミ・ファ・ソ・ラ・シ・ドを定める。よく知られているようにミーファ、シードの間隔は半音つまり対数スケールで $1/12$ になっている（いわゆる平均律）。

これら比較的単純な物理的基礎に還元できる強さや高さに比べると、音色の物理的基礎はより複雑である。音を特徴づける量のうち周波数と強さ以外をすべて音色とよんでいるといってもよい。一応、人間の聴覚は波形を周波数領域に分解して、つまりフーリエ成分で認識できるらしい。（といっても、フーリエ分解するタイムスケールは高々数百波長が入る程度であろう。）実際、良いと評価される楽器音のフーリエ成分をしらべてみると倍音の成分が豊かなものが多いようであるし、倍音の成分が豊富といっても、奇数倍音成分が優勢か（たとえばクラリネット；その理由は後述するように管体が閉－開構造をもつためである。）とくに優勢な倍音成分をもたないかで音色の印象がまるで違うといわれている。倍音成分強度の包絡線が基本周波数よりはるかに大きな周波数スケールで山－谷－山の構造をもって変化する場合もあり（フォルマント；たとえばオーボエ、バスーンのようなダブルリード楽器の波形はパルス列になりパルス幅の逆数のスケールで包絡線に凹凸ができる。たとえば、安藤の著書〔2〕を見よ。）、そのような構造が音色に特徴を与えていることは確からしい。滑らかな波形である限り（そして物理的な時間変化が滑らかにおこると信じる限り）波形の倍音成分は高調波になるにしたがって指数関数的に小さくなるはずである。しかし、人間の聴覚が 10^{-12} オーダーの音を聞き分けることができることを考えると、指数関数的に小さい倍音成分も音色のちがいとしてきき

わけることができるはずで、その意味では、フォルマントのようなグローバルな倍音構造も音色に影響をあたえることは間違いない。参考のために、オーボエとバスーン（ファゴット）のモデル的なフーリエスペクトルの例をしめしておく（安藤〔2〕より転載）。



さて、下図に代表的な管楽器としてクラリネットの概念的な断面図をしめそう。



管楽器は口腔からふきこまれる直流的な空気流を交流的振動に変換して音波を励起するリード部分と励起された音波のうち特定の周波数をもつものを共鳴の原理にしたがって選択的に蓄える管体の部分からなっている。管体は一端が開口しており他端が開口していると見なせる場合（フルートなど）と閉口していると見なせる場合（クラリネット、バスーンなど）がある。よく知られているように、開口の場合には端で定在波の腹ができ（端での境界条件が 圧力 = {変位の空間微分} = 外圧になる。）、閉口の場合は定在波の節ができることを考慮すると共鳴周波数は下図に示すように

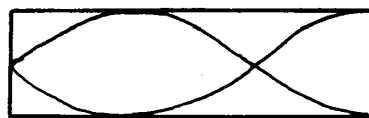
$$\text{周波数 } \Omega = (2n+1)\pi / tR$$

（閉－開管体）

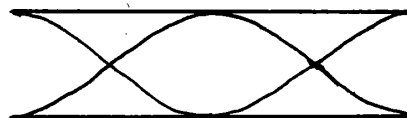
$$\text{周波数 } \Omega = 2n\pi / tR$$

（開－開管体）

（ $n = \text{整数}$ ）



閉－開管体の定在波



開－開管体の定在波

ここに、 t_R は音波が管体内を往復する時間である。よく知られているように、実際の管体では、開口端補正の為に共鳴条件は補正される。また、管体が朝顔型に極端に開いたトランペットのような管体では上の共鳴条件はかなり修正されねばならない。実際トランペットは一見、閉－開管体であるので上の一番目の式で共鳴条件が決められるように見えるが、実際はむしろ $\Omega = \pi n/t_R$ でよくあらわされるらしい。その原因の1つは朝顔のおかげで、低い周波数（長い波長）のモードほど有効管体長が短くなるためである。（量子力学や波動論のファンのために一言すれば朝顔は固有振動を閉じ込めるポテンシャルの役割を果たしているのである。）もう1つはマウスピースのヘルムホルツ共鳴により、高次モードにおいて有効管体長が長くなるためである。

管楽器を単純化すると、線形共振器の共鳴構造をフィルターとして利用した非線形発振器といえる。非線形性はリード及びリードを通過する空気流によってもたらされる。容易に想像できるように（そして、スタンダードな非線形振動の解析手段であるいわゆる規準型解析（normal-form-analysis）がそれを理論的にサポートするのだが）発振しきい値直上の波形はサイン波に近く、倍音成分はあまりふくまれていない。しかし、系に即ち管楽器に注入されるエネルギーが増大して振幅が増大すると、リード部分の非線形性によるモード間結合によって倍音が発生し、これに対応して波形はかどばってくる。ここで重要なことは共鳴周波数が基本周波数とその倍音の位置にはほぼならぶことである。上にも述べたように、トランペットのように著しく広がった管体でも、共鳴周波数を測定してみると大体整数倍の位置にならぶようである。この構造のおかげで、発振した倍音は共鳴的に成長して、その結果、基本振動数以外の倍音を豊富ふくんだ楽器特有の音色を響かせることができるのである。このような倍音成分の豊かさが管楽器という非線形デバイスの特徴である。

いっぽう、共鳴周波数がほぼ等間隔でならぶという性質は、オクターブちがいの発振の共存という、非線形ダイナミクスの観点からみて興味深い現象をみちびきだす。実際、基本音を主成分としてふくむ振動のほかに倍音を主成分として含む振動が双安定的に共存し、それらの間の遷移がヒステリシスをともなう現象としてしばしば見いだされる。このような振動の共存構造を利用する演奏のテクニックとしてタンギングがよく知られている。タンギングとは、演奏者が舌の素早い動きによってパルス状の圧力変動を楽器におくりこみ、基本振動状態のベイスンから脱しさせて、それと共存している一オクターブ高い倍音での振動状態に遷移させるテクニックのことである。

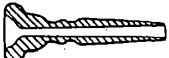
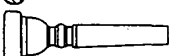
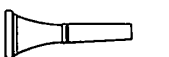
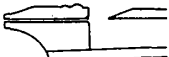
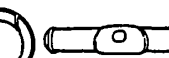
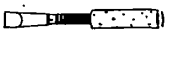
安藤 1
若松 2

ところで、もしふたつの安定な振動（リミットサイクル）が共存するなら、そのあいだには不安定なリミットサイクルが存在するはずである。不安定なリミットサイクルの安定多様体と不安定多様体が交われば観測可能か否かはさておいてカオスが発生するはずである。このように考えると、楽器が要求される倍音のゆたかさを保証する機構はカオスが（顕在化こそしないかもしれないが少なくとも）潜在的に存在する原因になるとおもわれる。それではカオスは現実の楽器の発音にどの様に関係しているのか？ この疑問が、少なくともわたしたち（世話人）がこの研究会ではっきりさせたかった問題点のひとつである。このような問題意識をいだかせるきっかけになったのが、井戸川の実験であった。彼による木管楽器の人工吹鳴の実験は、のちほど詳しく検討するように実に多様な振動状態の共存とカオスの顕在化を証明したのである。振動状態の多様さやカオスの存在は一見して安定に楽器を吹奏することを妨げるようにおもえる。しかし、ちょうど、熟練された飛行士の操縦する戦闘機やF1レースのレーサーのあやつる車が、操縦者の技量を反映できるようにするためにはかえって不安定な運動性能を持たざるをえなかったように、楽器は不安定な発振を内在させることによってかえって潜在的な表現容量を増大させているのではないのだろうか（この考えについては、すでに別のところでのべた。）。このことが証明できれば、楽器のように、＜制御されるもの＞（楽器）と＜制御するもの＞（人間）の境界が不可分にみえるシステムでカオスが演じる役割がはっきりととらえられるにちがいない。

話がすこし先にすすみすぎた。もとにもどそう。管楽器は、人間というより高次の制御装置から切り離せば共鳴器としての管体とそこにエネルギーを供給するリードからなる非線形振動器である。線形素子である管体と非線形素子であるリードとの結合系であるとみることもできる。リードの構造にしたがって管楽器を便宜上、エアリード楽器、シングルリード楽器、ダブルリード楽器、リップリード楽器というふうに分類している（下表）。

エアリード楽器		フルート、リコーダー、尺八、能管
リード木管楽器	シングルリード	クラリネット、サックスホン
	ダブルリード	オーボエ、バスーン（ファゴット）
リップリード楽器（金管楽器）		トランペット、トロンボーン、ホルン

管体の一端にあって唇と接触する部分がマウスピースである（下図；竹内の解説記事〔1〕より再録）。マウスピースにとりつけられた、あるいはマウスピース内に形成されるリードは口から吹き込まれる直流的な空気流の流れをいったん交流的な振動に変換する装置である。リップリード楽器であるトランペットの場合はマウスピースは鍋のような形をしている。ここに唇を押し付け緊張させながら唇を振動させてリードの役割をさせるわけである。ホルンのように漏斗型のリップリード楽器もある。エアリード楽器ではリコーダーのようにマウスピースが口からの空気流を管体と平行に導入するように作られている場合もあれば、フルートや横笛のように管体の横に穿たれた吹き口がマウスピースとして斜めに空気流を管体に導入する場合もある。いずれの場合も管体内の空気流の境界層の振動がリードの役割をするといわれているが正直に言って、しろうとの私たちにはその機構を正確に理解しかねる。これにたいしマウスピースにリードが取り付けられたシングルリードやダブルリード楽器（以下、リード木管楽器とよぶことにする）は物理的なモデル化がより容易であるようにみえる。これらリード木管楽器のリードは葦やプラスチックなどでつくられ、それ自身の固有振動数をもっている。クラリネットを例にとると、この固有周波数は1000 Hzのオーダーで管体の固有周波数（100 Hzのオーダー）よりはるかに大きい。しかし、実際、管体内に振動が励起されている状態では、リードの持つ早い固有振動は減衰し、リードの運動は管体内の圧力変化にひきずられて、ほぼ管体に励起された波の固有振動数と同期する（受動的同期）。

リードタイプ	マウスピース形状	楽器名		マウスピース形状
リップリード	鍋型	トランペット コルネット オフィクレイド サクソルン族 フリューゲルホルン バス スーザフォン	トロンボーン チューバ ビューグル ユーフォニアム バリトン メロフォン アルトホルン	  
	漏斗型	ホルン（フレンチホルン） ワグナーチューバ コルノフォン		
エアリード	噴	リコーダー オカリナ フラジオレット		
	吹き口	フルート ピッコロ バンパイプ		
シングルリード	噴	クラリネット バセットホルン	サクソフォン	
ダブルリード		オーボエ イングリッシュホルン ファゴット（バスン）	オーボエダモアレ ヘッケルフォン サリュソフォン	

一方、リップリード楽器では唇（の振動）をリードとしてつかうので、唇の緊張の度合いを変化させることによって、管体の持つ特定の共鳴周波数に同期するようにその固有周波数を変化させ、管体の特定の共鳴モードを励起させることができる（能動的同期）。

エアリード楽器は横笛、能管やリコーダーなどに代表されるようにもっとも素朴な木管楽器といえるものであろう。（もっともフルートともなると相当複雑な制御機構が近代になってから取り付けられるようになったのだが・・・）すでに述べたようにエアリードの楽器ではふきこまれた定常空気流の境界層の振動がリードの役割をするとかんがえられているが、リードに相当すると考えられる部分を管体から理論的に分離して取り扱えない困難さのために、極めて単純なモデルは提案されているが（[3]，[4]）十分なモデリングはまだなされていないようである。（ご存知のかたがあればご教示いただきたい。）しかしそれゆえに、その励振機構は物理屋からみてきわめて興味深いものがある。

井戸川 1

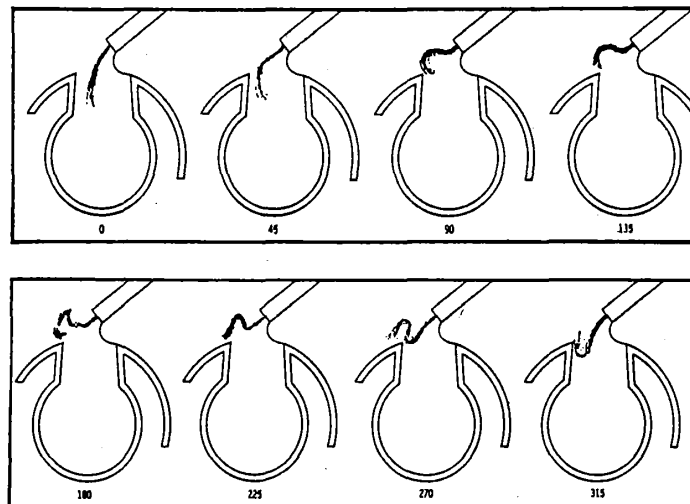
リード木管楽器では発振周波数そのものを大幅に変化させるには管体にうがたれた音孔を開閉して有効管体長を変化させるしかない。しかし管体にたいする条件を一定に保ったままでも、吹鳴圧を変化させることによって発振周波数を多少変化させることは可能である。一方、リップリード楽器ではすでに述べたようにリード（つまり、唇）の固有周波数が可変（くちびるの緊張度を変化させる）であるので管体長を保ったまま発振周波数を変化できるのである。むろん管体を唇から外せば共鳴周波数は管体で一義的にきまってしまうのだが、唇と管体から成る合成系の発振周波数は唇の固有周波数を変化させることで、比較的容易にシフトさせることが可能であるからである。これは引き込み現象と考えることができる。

足立 1

さて、冗長な前置きはこのへんでやめにして本論にはいろう。既に述べたように、本記事では基研研究会で話題にのぼった管楽器をめぐる数多くの問題－奏鳴機構の物理学と楽器製作の工学、さらに実際の演奏にかかわるヒューマンファクター等々の諸問題－をわれわれの観点から再編集することをこころみる。まず、フルートにかんする安藤の著名な研究を軸にしてエアリード楽器の音色に関連する問題を取りあげて我々の立場から論じる。ついで、井戸川のリード木管楽器の実験的研究を取りあげて彼によって発見された複雑な奏鳴現象を非線形動力学の知見をもとに解釈する。さらに、簡単にではあるが金管楽器に関する研究を管体構造と非線形共鳴の観点から論ずる。最後に、楽器とそれを製作し使いこなす人間との境界の問題をヒューマンファクターの問題としてとりあげたい。

2. エアリード楽器：楽器の音色とは

フルートは能管や横笛、尺八、リコーダなどと同様エアリード楽器である。エアリード楽器は他の管楽器とは違いマウスピースの穴または唇から管体内に吹き込まれたジェット流の境界層の振動という、あまり機械的でない振動機構をリードとして使っている。下図にフルート歌口に吹き込まれた空気ビーム軌跡のストロボ写真を掲載する（安藤〔2〕より転載）



リードの役割をする流体としての空気と音波が伝播する媒体としての空気の中に明確な境界を設定しにくいので、それだけに物理的解析が難しいと想像される楽器である。またこのようなリード機構を使うゆえに、他の管楽器に比べて、演奏者が楽器の制御者というよりむしろ吹鳴機構の一部として組み込まれている可能性もたかい、したがってヒューマン・ファクターが関与する割合も高いと想像される。

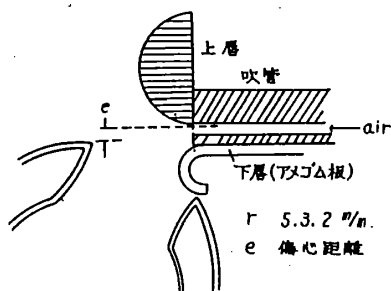
奏鳴音のスペクトル解析を行ったとき、基本音の整数倍の周波数をもつ高次倍音成分が豊かな楽器、特に奇数倍音が優勢な楽器は、音色が良いとされている。つまり良い音色は正弦波からのずれが大きいといってもよい。また、倍音成分が豊かであることは非線形性によるモード結合が大きいこと、したがって楽器の演奏が非線形の自励発振に他ならない事を示唆している。この様に倍音成分の豊かさは楽器の音の一大特徴なのだが、フルートの倍音構造は他の管楽器にくらべてあまり豊かでないとされている。にも拘らず、その音楽的な表現力は極めて大きいといわれ、実際に西洋音楽の演奏には欠くことのできない楽器である。また、フルートは同じ楽器

安藤
2

を違う演奏者が吹いた時の音色差が極めて大きいといわれている（安藤 [5]）。

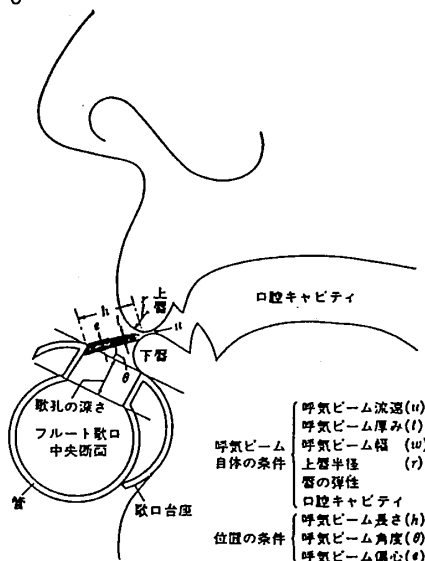
フルートの奏鳴機構は、安藤が行った人工奏鳴実験によってかなりの程度解明された。彼の実験が明らかにした著名な事実、単に空気流をフルートに吹き込むだけでは駄目で、演奏者の唇に相当する「柔らかい」境界を挿入する必要があるという点であった。下図に示すように、定常空気流をフルートに導入する吹管の先端にアメゴム製の上唇と下唇を装着することによってはじめて通常の演奏で使われる全オクターブ域にわたって人工奏鳴を成功させることが出来たのである（下図安藤 [5] より転載）。上にも述べたようにフルートのリードの役割をするのは吹き込まれた空気流の境界層の振動であるといわれており、この振動自体が自励発振である。唇という「柔らかい」境界条件の挿入が境界層の自励周波数の安定発振域を拡大し、それによって管体内の音響振動の振動数の変動幅を大きくしたと考えられるがその詳しい理由は良く分かっていない。これはエアリードという物理的解析が容易でない系の本質をさぐる上で極めて興味深い問題とおもわれる。

安藤
3



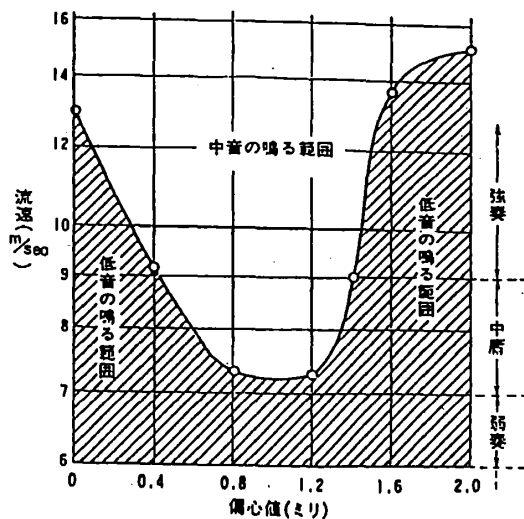
楽器演奏者によって著しく変わるとい
うフルートの特性は、唇という個体差
が激しい生体材料がリードの一部ある
いは振動するジェット流の境界条件の
一部として使われていることに起因す
るであろうが、安藤の実験が明らかに

したもう一つの重要な事実、 e （偏心パラメーター）なるものの物理的な重要性である。 e とは歌口に唇から吹き込まれる空気流のビームが歌口の中心を通る線からどれだけずれているかを特徴づけるパラメーターである（下図参照（安藤 [6] より転載））。

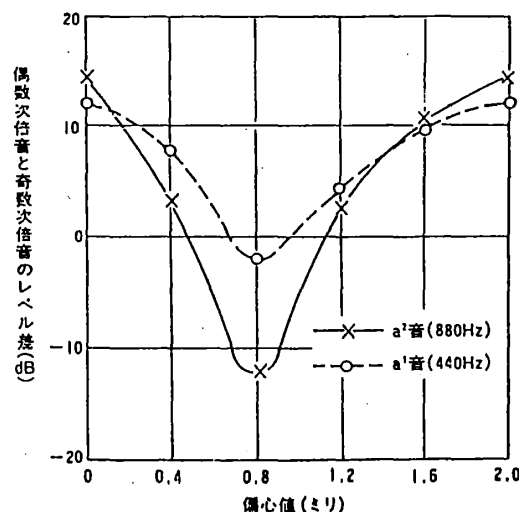


すでに述べたよう管体に共鳴するモードは一般に安定なアトラクターとして共存できる。実際にフルートの奏鳴状態では低音奏鳴状態の発振とそれより1オクターブ高い中音奏鳴状態の発振が双安定になっており、その間でヒステリシスをとまなう一次相転移が起こる。演奏者は舌を使ってパルス的に空気流を送り込むテクニックを用いてこ

の間の遷移を誘起し、演奏に利用しているのだが（タンギング）、このとき e パラメーターは二つの状態間を遷移させる限界流速（下図，安藤 [6] より転載）にかなり敏感な影響をあたえるらしい。



e と限界流速との関係



e と偶数奇数倍音の勢力比

$$(\log_{10}(\text{ODD}/\text{EVEN}) \times 10)$$

つまり、わずかな e の変化で、低音－中音の吹き分けを敏感に制御しているのである。このように e は共存する倍音アトラクターのベイスンに大きい影響を与えており、そのことは e の制御によって共鳴モード間の結合がかなり変えられることを意味する。したがって e パラメーターは演奏音の倍音構造を支配する筈である。実際に安藤の実験によると e パラメーターは音色の重要な要因であると考えられる倍音構造が奇数次倍音優勢であるか偶数次倍音優勢であるかを決定するらしい（奇数優勢な波は波形が概ね点対称であることを意味する。奇数優勢か否かは波形の点対称性の破れの度合いを表している。）。奇数次優勢か偶数次優勢かは演奏家の音色個性の重要な因子であるらしい。このように楽器とそれを制御する人間の物理的界面にあたる歌口には、楽器に必要な制御鋭敏性ともいえるべき特性を導くような物理的機構が生まれているのである。

安藤は実際に使われているフルートの歌口の構造を詳細にわたって調べ、高音－中音の吹き分けが e のできるだけ小さい変化によって可能になるような歌口を望ましい歌口として提案した。以後、実際の歌口の設計は安藤の基準に準拠しているようである。安藤の実験と提案は制御変数空間における音程遷移の位置、あるいは発振状態の位相空間における吸引領域（ベイスン）が吹き込み方によってかなり敏感に

変調できることを実践によって検証したともいえよう。

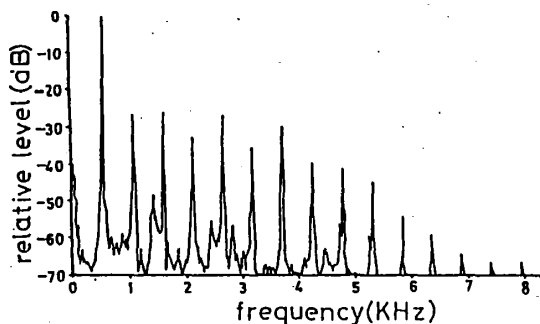
楽器の音色に倍音構造が重要であることはたしからしいとしても、それだけで楽器の音色が決まるとは思えない。ここで素人の質問を一つ。倍音構造をパワースペクトルで観測するかぎり倍音間の位相情報は無視されており、位相情報を回復しようとすれば時系列の波形1周期分そのものを観察することと等価になってしまう。結局のところ、1周期分の波形と関係させて「良い音色」「悪い音色」を論じたほうが早いということになってしまうのではないか。そのへんを音色の研究者がどう考えられているのか知りたいものである。

安藤 4・足立 2

奇数倍音が優勢で高次倍音が豊かという「良い音色」のクライテリオンに基づいて望ましい音色を人工合成できるのだろうか？ 倍音構造を完全に模倣するようなコンピュータ制御の電子楽器など現在の技術をもってすれば、さして困難を伴わずにできるだろうし、実際、エレクトーンなどはその方向に進化発展してきたのだろう。しかし、どうも模擬楽器の出す音は本物の楽器が出す音にくらべもうひとつ物足りなさがつきまとうという。安藤はリコーダーを例にとって、自然楽器には存在するが人工（合成）楽器には欠けているファクターとして音色の濁り感をあげている。

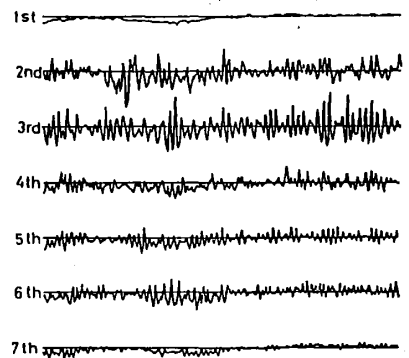
良い音色のリコーダーのスペクトルは奇数次倍音を豊富にふくんでいる。同時に、3倍音成分、5倍音成分のすそが広がり、サイドピークを持つ（下図、安藤[5]より転載）。この成分を除去して音色を再合成すると、音色に濁り感がなくなると言われている。

安藤 5 (以下この章の終りまで)



(a) Average spectrum of a c^2 tone judged as good

リコーダーのスペクトル



Form of frequency fluctuation wave of tone B of c^2 .

サイドバンドをフーリエ逆変換して得られた時系列（瞬間周波数）

かと言って、雑音を重ね合わせて変動成分のスペクトル・エンヴェロープを再現するような時系列を再生しても、得られた音色は汚れた感じにしかない、一方実物の揺らぎは音色に緻密な感じをつくり出すという（安藤〔5〕）。サイドピークをふくむ倍音近傍のスペクトル成分をバンドパスフィルターで切り出し、フーリエ逆変換すると、サイドピークやブロードニングを振幅および瞬間周波数（位相の微分？）の時系列として取り出せる（上図）。この様にしてとりだされた時系列はとくに3倍、5倍音成分において顕著な周期的変動をしめしその周波数はサイドピークと倍音の周波数差であろうと考えられる。振動の不規則な揺らぎはブロードニングに起因するのであろう。安藤は各倍音に付随したこれらの時間変動の独立性を強調しているが、我々にはむしろこれら時間変動が倍音間で相関しているように見える。のみならず、スペクトルにみられるメインピーク（倍音）とサイドピークおよびそれらのブロードニングのありさまが、ちょうど準周期解がロッキングしてカオス遷移する前後に見られるスペクトルの状況と似ているようにもみえる。カオスによって誘起されたサイドピークやブロードニングならば周波数成分の時間変動に強い相関が存在するのが当然である。このようなスペクトルの動力学意味とそれが発生する機構がなにであるのかははっきりさせたいものである。少なくとも、ターケンスの埋め込み法によってこの時間変動が系自体の力学的性質にもとづくカオス的なものか否かは割合簡単に判定できるであろう。また各周波数成分の時間変動の連関、特に因果関係を可視化する方法として、バンドパスフィルターされた時間系列間の相互情報量を基に「情報地図」を作成するやり方がある。たとえばこのような方法によってリコーダーの基本波とブロードニングを起こした高次倍音およびサイドピークとの相関と因果関係を明らかにできないだろうか。データさえ手にはいれば直ぐに解析できるのだが……。但し十分に定常的で長いデータが必要である。

足立3

倍音構造は時系列の定常部分（長時間平均）を取り出したものである。定常部分からのズレすなわち「ゆらぎ」が倍音部分が作り出す定常振動を修飾し、音色に楽器独特の陰影を与えていることは想像にかたくない。しかしメインピークとサイドピークの周波数差やそれらのブロードニングに由来する「揺らぎ」がまったくお互い独立ならばそれはパワースペクトルのウエイトとランダムな位相をもった正弦波の重ね合わせで再現できるはずであるがそうは行かないらしい。陰影をもたらす「揺らぎ」の特徴は演奏ごとに再現可能なシステマチックなものでなければならない。それは「揺らぎ」のなかにあるなんらかの因果性—それを荒っぽく相関というのだが—に帰せられるのではないか。人間の聴覚が物理的なディテクターと違うところは好ましい部分を他から排除して強調してしまうところにある。ある相関が聴覚を通して脳によって「好まし」と解釈されればその様な印象をもたらす相関を感知

するようにますます聴覚はとぎすまされてゆくだろう。（よきにつけあしきにつけ、人間の感覚器官は特殊な嗜好を増幅するように定向進化－退化か？－してゆくように見える。）

上に述べたような変動（揺らぎ）はリコーダーのみならず一般にエアリード楽器（フルート、尺八）でも見られるそうである（安藤〔5〕）。しかしリード楽器、金管楽器には見られない。

3. リード木管楽器：カオスと楽器

クラリネット、サックス、オーボエ、バスーン等は固定リードを持つ木管楽器でそれらの発音機構及び物理的特性には共通点がある。井戸川らはこれらの管楽器の人工吹鳴の研究に着手し、初めて、木管楽器がカオスをふくむ、極めて多彩な自励発振をしめすことを明らかにした（井戸川，小島〔7〕，井戸川〔8〕）。一方彼等の実験で得られた波形を検討してみると、これまで非線形光学の分野で詳しく研究されてきた遅延微分方程式系の発振波形と驚くべき一致が見られる（池田〔9〕）。実際、クラリネットのモデルとして知られているシューマッハモデルは遅延微分方程式系と見なすこともできる。しかし光学系で研究されてきた遅延微分方程式系（以下optical-delay-differential model: ODD）の発振の分岐構造は井戸川らの実験結果とかなり食い違う。以下この食い違いに関係した問題点を論じよう。その前に管楽器を力学的に眺めた場合の特徴とそのモデル化に伴う問題点をクラリネットの基本的モデルであるシューマッハ方程式を中心に議論しておこう。

序章のところでもふれたが、管楽器は音波を蓄える共鳴器である円筒または円錐状の管体とパワーサプライヤーの役割をもつマウスピースの部分からなる。正確に言えばここでマウスピースという言葉で代表した部分はシングルリードの場合はマウスピース+リードであり、ダブルリードの場合はマウスピースと呼ばれる部分はなくリード自身がマウスピースの役割も果たしている。また、エアリードやリップリードの場合はマウスピースにリードがなく、唇から出る息のビームまたは唇自身がリードの役割を果たしている。以下、簡単な為にシングルリードの場合を中心に考える。口からマウスピース内に送り込まれる直流的な空気流はマウスピースに取り付けられたリードの振動によりその流量をコントロールされ、交流的な振動をする圧力波に変化し、管体内に音波を励起させる。空気流振動の変換器であるリードの振動やそこを通過する空気流量は、リード部分の力学的な特性（リードの固有振動数、リードの開口状態と通過する空気流の関係等）だけでなく、吹鳴圧力やマウスピース内圧力の変動（管体に励起された音圧の変動）との複雑な相互作用のもとで変化する。そのため、音波が励起される過程は極めて複雑であり、演奏者が与える境界条件（吹鳴圧、マウスピースのくわえ方等）に対し楽器は複雑な応答を示す。管楽器を力学的な立場からモデル化する場合、一般に、マウスピース+唇を通過する空気流を流体力学的に取扱いこの部分を非線形微分方程式であらわす。一方、管体部分に蓄えられる音波は1次元の線形波動方程式に従うものとする。この様な

モデル化がはたして管楽器を正しく記述しているかは疑問の残るところである。例えば、マウスピース+唇を単純な非線形方程式を用いてモデル化することは流体力学的にみれば不十分であろうし、たとえモデル化出来たとしても、流体的な取扱をする非線形方程式の部分と波動方程式で記述される部分の境界をどこに置くかと言う問題は明確ではない。また境界を仮に設定したとしても境界の部分で起きている現象は流体力学的にみればそれだけで十分に難しい問題となるであろう。事実、管楽器のマウスピースの部分はかなり複雑な構造をしており（竹内 [1]）、マウスピースの善し悪しが実際の演奏での重要なファクターになることからもおそらく見逃せない問題である。また、1次元波動方程式で管体をモデル化する事にも多少の問題点がある。励起された音波に共鳴して起こる管体自身の振動や管体からの音波の損失、励起される音波の波長と管体の太さの関係等を考慮した場合単純な1次元の線形波動方程式で全てモデル化出来るとは思えないからである。これらのモデル化に対する疑問点があるにも関わらず上述の方法でモデル化した方程式を用いたシミュレーションは楽器の基本的な波形をかなり忠実に再現している（足立 [10]、小畠・井戸川 [11]、橘・高橋 [12] を見よ）。したがって、少なくとも楽器の発音機構の骨格部分は、非線形系と線形共鳴器が結合したモデルで捉える事が可能であると考えられる。

具体的なモデルを構成するにあたって、2つの立場があるように思われる。1つはマウスピース+唇を表す非線形系に視点を置き管楽器を眺めた場合で、線形共鳴器である管体の役目は散逸と多重の時間遅れに伴うフィードバックループを構成することである。したがって、楽器は散逸及び多重時間遅れの入った非線形系として捉えることが出来る。もう1つは管体から眺めた場合で、管体を線形の波動方程式で表し、マウスピース+唇を時間的に揺らぐ境界条件として定式化する方法である。これまでの波動方程式の研究では固定境界条件や高々周期的に変動する境界条件での取り扱いが主であった。これに対し、この場合、境界条件は吹鳴圧等の外部パラメータだけでなく管体内に励起された波からも影響を受けこれらの相互作用のもとで非線形変動する極めて複雑な境界条件となる。波動方程式や量子カオスの研究をした者ならばこの様なタイプの境界値問題がいかに困難な問題を引き起こすかはすぐに理解出来よう。したがって、後者の立場によるモデル化は成功すれば極めて多くの知見をもたらす可能性を秘めてはいるがここでは取り扱わない。

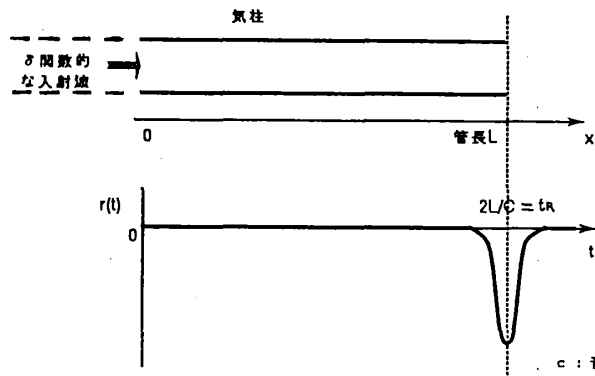
さて、管楽器のモデルである遅延微分方程式を一般的な式で表せば、

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, t, \mathbf{X}_{\text{old}})$$

$$X_{old} = \int_0^{\infty} r(t') X(t-t') dt'$$

となる。ここで、 X はマウスピース+唇の状態を表す変数である。また、 $r(t)$ は反射関数と呼ばれ、管体による散逸及び時間遅れを与える特性関数である[13]。

下図に示すようにマウスピース部分を管体から外し、管体と同じ太さの無限に長い仮想的な管をつなぎ、仮想的な管から管体にインパルスを入力波として加えたとき



管体内の反射を経て仮想的な管の部分に戻って来た波（反射波）の時間遅れの様子を表すのが反射関数である。実際の計算では、管体の持つ音響インピーダンスを求める方が容易なので、反射関数は音響インピーダンスを用いて計算されることが多い。電気回路のアナロジーを用い境界から一定周期の圧力を加えたときの流速と圧力の関係を

与えるのが管体の音響インピーダンスである（ただし、電気回路を用いたアナロジーではマウスピース側の境界は閉端とした場合に対応する）。円筒管の放射インピーダンスはレビン・シュインガーによって理論的に計算されており[14]、彼らの結果から開口端での音響特性（エネルギー損失及び開口端補正）がわかり、円筒管の音響インピーダンスは簡単に計算できる。円錐管等の太さの変化する管体の音響インピーダンスも近似的な手法を用いて計算可能である[15, 16]。

さて、管楽器の基本モデルは以上の様な遅延微分方程式であるが、ここで、具体的な例としてクラリネットのモデルであるシューマッハ方程式について見てみよう[17]。

シューマッハ方程式は以下に示すような連立遅延微分方程式である。

$$\ddot{y} + G_r \dot{y} + \omega_0^2 y = \frac{p - P_0}{\mu} - \frac{1}{2} \frac{\rho}{w} \frac{(U_f - S_r \dot{y})^2}{(y + H) \mu S_r \tan \theta} \quad (1)$$

$$M_e \dot{U}_f = (P_0 - p) - \frac{|U_f|^{3/2} \text{sgn}(U_f)}{A^{3/2} (y + H)^2} \quad (2)$$

$$M_e = \frac{\rho}{2\pi w} \left(\sqrt{\frac{w}{y + H}} + 2 \sqrt{\frac{w}{y + H}} \ln \left(\frac{2w}{y + H} \right) \right) \quad (3)$$

$$p = p_{inc} + Z_0 U_f - Z_0 S_r \dot{y} \quad (4)$$

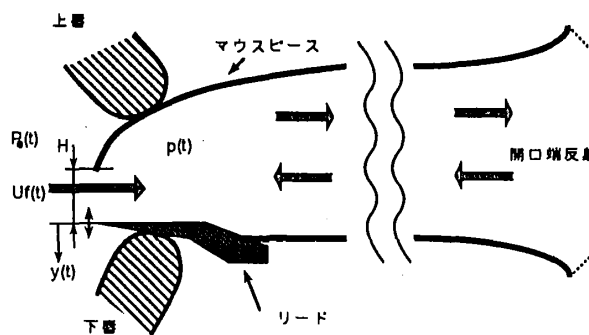
$$p_{inc}(t) = \int_0^{\infty} r(t') (Z_0 (U_f(t-t') - S_r \dot{y}(t-t')) + p(t-t')) dt' \quad (5)$$

表：シューマッハ方程式に現れる変数及びパラメーター

P_0 : 吹鳴圧力	p : マウスピース内圧力
U_f : 体積流量	y : リードの変位
μ : リードの実効質量	S_r : リードの実効面積
ω_0 : リードの共振周波数	H : リードの自然開口
w : リードの幅	G_r : リードの減衰定数
ρ : 空気密度	A : 空気流の振幅のパラメーター
Z_0 : 気柱の特性インピーダンス	M_0 : スリットを通過する空気の実効質量
θ : マウスピース先端の角度	

各変数の詳細な意味については上に挙げた表と下にしめした図を見ていただきたい。

式(1)はリードの運動を表す方程式である。 y はリードの変位を表す変数で、吹



鳴圧を加えていない状態でのリードが静止した位置をゼロとし、リードが開く方を正にとってある。また、リードの自然開口幅を H とする。リードの運動は減衰項の入った調和振動子で近似されている。マウスピース部分のフェイシング（リードが接触する部分のマ

ウスピースにつけられる丸み、詳しくは竹内〔1〕を見よ）の重要性等を考慮すると線形近似では不十分であると考えられるが、ここではこの点についてこれ以上深入りしない。右辺はリードに加わる外力を表す。右辺第一項はマウスピース内圧力 p と吹鳴圧 P_0 の差によってリードが駆動されることを表す。右辺第二項はベルヌイ力即ち、リードとマウスピース間の細いスリット（リードの幅 $w \times$ リードの開き $y + H$ の長方形の開口部分とその近く）を通過するときに生じる空気流による圧力の減少を考慮した補正項である。この項の影響は小さいので無視しても差し支えない。式（2）は圧力、体積流量の関係を表す方程式で、シューマッハ方程式の非線形性はここに集約されている。この式は、マウスピースの前後に圧力差 $p - P_0$ を加えたときのマウスピースとリードの間のスリット部分にある空気の運動方程式に他ならない、左辺に現れる M_0 （式（3）を見よ）はスリットを通過する空気の実効質量としての意味をもち、右辺の第二項は空気流が生じることが実質的に圧力差を緩和させ見かけ上減衰項として働くことを示している。右辺の意味をもう少し考えて見よう。左辺は体積流量の時間微分に比例するので、ここをゼロとおくと右辺は定常流

における圧力と流量を表す式であることがわかり、第二項は、この時の流量に関係した項である。ところが、得られた定常流の関係式はベルヌーイの定理を満たしていない。実はシューマッハは定常流の関係式が定常状態での実験値とフィティングするように方程式を組み立てている。実験でベルヌーイの定理が成り立たない理由としては圧力差によるリードの変形及びリード変位とリード開口面積との非線形性が考えられる[18]。さらに、シューマッハは定常状態の結果をそのまま非定常状態に拡張できると仮定して方程式を組み立てている。渦の発生等を考慮した場合、この様な仮定が実際の非定常状態で成り立つかは疑問が残る。この点については将来の解析を待ちたい。時間遅れの効果は式(4)、(5)を見ても分かるようにマウスピース内圧力 p を通して入る。現在の圧力 p は過去の影響 p_{ino} と体積流量が圧力に変わる部分(式(4)右辺第二項)さらにリードの運動が圧力に及ぼす効果(式(4)右辺第三項)の和で表せる。ただし、ここで、 Z_0 は特性インピーダンスと呼ばれる量で管体と同じ太さを持つ無限に長い円筒管の音響インピーダンスであり、 S_r はリードの実効面積である。 p_{ino} の定義式(式(5))に現れる関数 $r(t)$ は前に述べた反射関数である。さて、この様にして組み上げられたシューマッハ方程式はクラリネットの発音機構に関わる最低限の要素をうまく組み上げたものであるが、上述したように、かなり粗い近似や理論的に不明確な点を含んでいる。したがって、シューマッハ方程式によるシュミレーションは現実の吹鳴実験に現れる複雑な分岐現象の定性的な理解にはよいが、定量的な一致をみるものではないと考えるべきであろう。

足立4

さて、井戸川らが行った吹鳴実験について吟味してみよう。井戸川らはオーボエ、バスーン、クラリネット、サックスを用いて人工唇を用いた吹鳴実験を行っている。オーボエ、バスーンはダブルリードをもちその管体は円錐系である。クラリネットはシングルリードで管体は開口端の広がっている部分(朝顔)を除けばほぼ円筒と考えてよい。サックスはクラリネットと同じくシングルリードではあるが、管体は円錐系をしてる。これらのなかでクラリネットのみが優勢な奇数高調波をもち偶数高調波は極めて弱い。これは、シングルリード楽器ではマウスピース部分での波の反射がほぼ閉端反射に成ることに加え、管体がほぼ円筒であるので、一方が閉端でもう一方が開口端である円筒管の共鳴振動として捉えられるからである。サックスもクラリネットと同じくマウスピース端は閉端と見なせるがであるが管体が円錐系である為に共鳴構造の違いから偶数次の倍音も無視できない。井戸川らはこれらの楽器の他にも円筒管にクラリネットのマウスピースを付けたものや円錐管にダブルリードを付けたものを用いて人工吹鳴の実験を行っており、この場合も多様なヒステリシスを伴う分岐現象を見いだしている。実際の吹鳴実験では、楽器の指穴を

すべて閉じ楽器が最低音を出す条件で実験を行っている。管楽器では一般に中音領域の音を鳴らし安いように設計されているので、最低音うまく鳴らすには修練が必要である。実験を行う場合にも、出来の悪い人工唇を用いた場合やたとえよい唇を用いてもいいかげんなくわえ方をした場合には基本となる最低音が鳴らない場合が多々あるそうである。但し、この様な場合でも以下で議論する様な複雑なヒステリシスを伴う分岐構造は観測される。さて、基本波が鳴る状態で実験した場合には、ダブルリード、シングルリードどちらの場合もヒステリシスを伴う多様な分岐現象が現れるが、ダブルリードを持つオーボエやバスーンの方が、シングルリードを持つクラリネットやサックスに比べはるかに複雑な分岐構造を持つ。ダブルリードとシングルリードになぜこの様な違いが現れるかについては現在のところ不明である。以下では、力学モデルと対応付けが容易なクラリネットの場合を中心に議論を進める。

クラリネットの遷移ダイヤグラムの代表的な例を次頁の図にあげる（文献〔8, 17〕より転載）。ここにあげた2つのダイヤグラムはそれぞれ異なる遷移構造を持つが、唇のくわえ方等の実験条件を変えることによって得られたものである。実線の矢印は吹鳴圧を上げた時の遷移方向を示し、破線は下げた時の遷移方向を表す。矢印の横の数字は遷移するときの吹鳴圧（大気圧からの差）をkPa単位で表したものを示す。D3音は演奏に使われる基本波形ではほぼ146.8Hzの周波数をもち、マウスピース内圧力の変化を見ると矩形波になっているのがわかる。添え字に6を付けたものはほぼ900~1400Hzの波で7倍~9倍の高調波であることがわかる。これらの高調波はあまり愉快的な音とはいえず演奏には使われない音である。高調波は完全に基本波の奇数倍というわけではなく多少ずれが生じている。しかし、系の持つ非線形性や管体が完全に円筒でないことなどを考え合わせればほぼ奇数倍の高調波がたっていると考えて良いであろう。基本波D3の近くに現れるD3HやD3Lは基本波に弱い高調波がかぶさった混合波であると考えられる。これらは準周期的である。C#6Lは明確な周波数を持たない波でそのパワースペクトルを見ると基本波と高調波の作るトーラスから遷移して現れたカオスと考えると良いであろう。

これらの結果をまとめると以下の様になる。

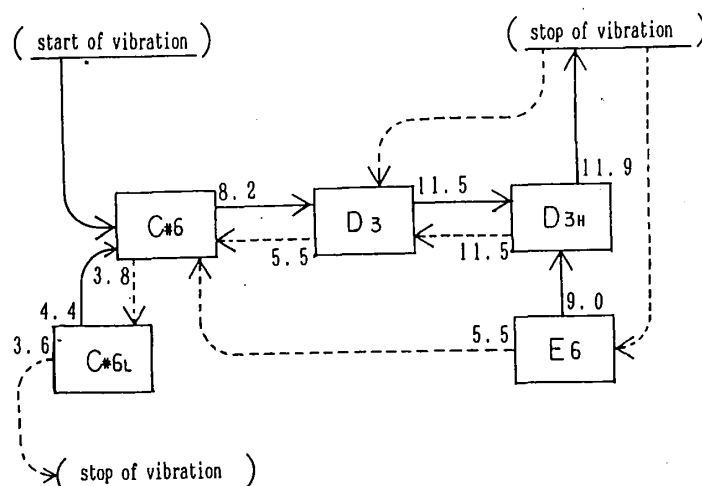
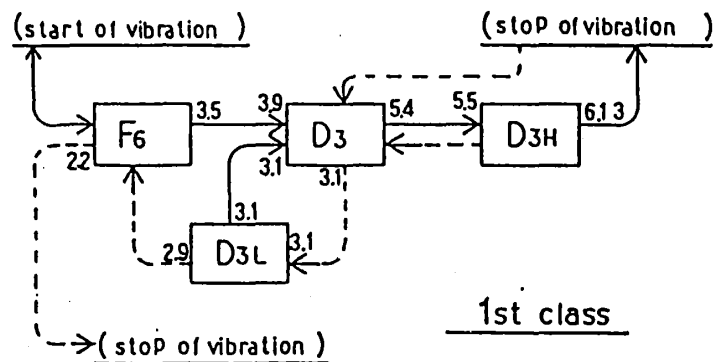
- (I) 基本波(D3)である矩形波が存在すること。
- (II) 奇数高調波が存在すること。
- (III) 矩形波、奇数高調波の混合波が存在すること。矩形波と高調波の周期が完全にロックした場合には混合波になるが、2つの波の周期に違いがある場合に

は準周期振動＝トーラスが観測される。2次元トーラス (T2) だけでなく、3次元トーラス (T3) トーラスも観測されている。

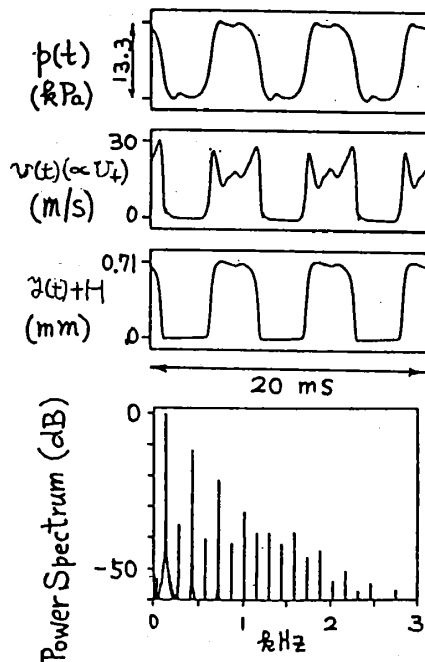
(IV) カオス的な波形 (高次のトーラス解の可能性もある) も観測され、トーラス <—> カオス遷移も見いだされている。ただし、カオス的な波形は余り多く観測されていない。

(V) 吹鳴圧をパラメーターとして変化させると以上の多彩な振動状態間のきわめて複雑な遷移が観測され、これらの遷移は複雑なヒステリシスを示す。

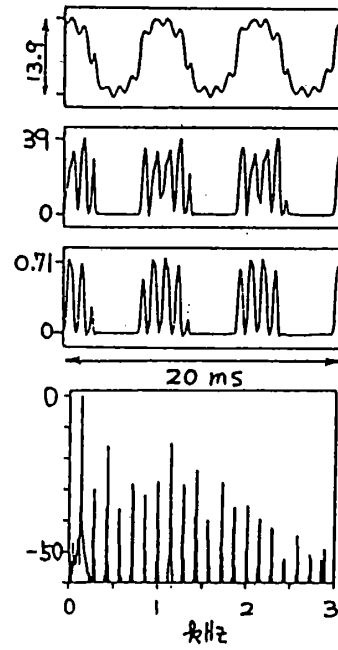
遷移ダイヤグラムは、他のパラメーター (唇の締めつけの強さ等) の変化に対してきわめて敏感でヒステリシスを伴う遷移構造はその様相をがらりと変化させる。



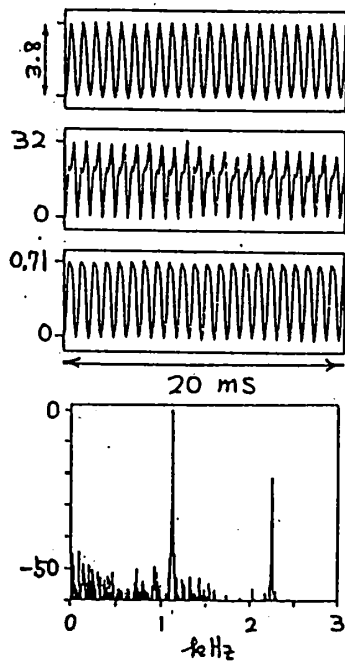
次ページに上図の下遷移ダイヤグラムに対応する波形とそのパワースペクトルを掲げる (文献 [8] より転載)



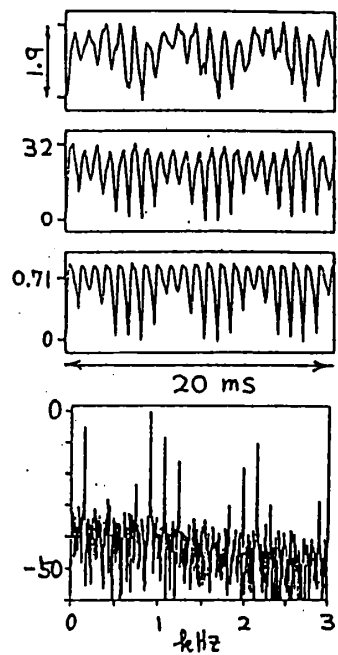
(a) D_3 波形。 $P_0 = 7.1 \text{ kPa}$, $146.8 \text{ Hz} - 30 \text{ cent}$.



(b) D_3H 波形。 $P_0 = 11.2 \text{ kPa}$.



(c) C_6 波形。 $P_0 = 4.8 \text{ kPa}$, $1108.7 \text{ Hz} + 20 \text{ cent}$.



(d) C_6L 波形。 $P_0 = 3.7 \text{ kPa}$.

前ページにまとめた特性 (I) (II) は ODD 系でも見られる普遍的な振動波形である。実際、上図の波形 (a) (c) は ODD の基本波解と高調波解に対応すると考えられる。これらの波形は細部に至るまで ODD 遅延系の波形に類似している (池田, 松本 [20])。よって楽器の発振が基本的に遅延誘起不安定性に由来することは疑いない。シューマッハが提案した管楽器のモデル方程式がまさに遅延微分モデルである事を考慮するとこれは有り得て良いことである。

そこで、最初に、遅延微分方程式系の力学的な特徴と井戸川らの実験とのつながりについて考えてみよう。式(5)をみると、反射関数は($0 \leq t < \infty$)で定義されるが、管体による減衰を考慮すれば有限領域でのみ値を持つと考えても差し支えないであろう。そこで、反射関数を

$$\begin{cases} r(t) \neq 0 & (0 \leq t \leq t_{\max}) \\ r(t) = 0 & (t_{\max} \leq t) \end{cases}$$

とすると、($-t_{\max} \leq t \leq 0$)における $X(t)$ の値を知れば、($0 \leq t \leq t_{\max}$)における $X(t)$ は一意的に決めるられる。したがって、時間軸 t を $t_{\max}$ の単位で分割すれば上に示した時間遅れを伴う方程式系は $\{X(t) \mid (n-1)t_{\max} \leq t \leq nt_{\max}\}$ から $\{X(t) \mid nt_{\max} \leq t \leq (n+1)t_{\max}\}$ への写像と等価である。ここで $t_{\max}$ はだいたい遅延時間 t_R に等しいと考えてよい。各分割($(n-1)t_{\max} \leq t \leq nt_{\max}$)で $X(t)$ は任意の関数を取り得るので、この写像は無限次元の写像である。無限次元の写像になるので解は無秩序になり全く取扱い不可能かというところでもない。元の微分方程式を見ても分かるように $t = t_0$ における $X(t_0)$ に影響を及ぼすのは($t_0 - t_{\max} \leq t \leq t_0$)における $X(t)$ に重み $r(t)$ をかけ平均化したものであり、平均化は鋭い振動成分、即ち高調波モードからの寄与をならして消してしまう作用があるので、実効的な自由度数が減減され系の安定化とアトラクターの低自由度化が期待できるからである。事実、管楽器の演奏に使われる波形はほぼ周期的であり、写像の立場から見れば単純な安定固定点と考えられる。しかし、緩和による自由度の低下があるにせよ本質的に大自由度系であれば、単純な演奏波形の他にも多くの安定な波形(アトラクター)が存在するはずである。上述したように井戸川らの吹鳴実験では演奏に使われる波形以外にも多くの周期的、準周期的な波形が安定化され、さらにカオス的な波形も観測されている。また、数値シミュレーションにおいても多くの安定化された波形が見いだされ(小畠・井戸川[11], 橘・高橋[12]を見よ)、数値シミュレーションと井戸川らの実験にはかなりの類似がみられる。遅延を含む非線形方程式系をモデルとしたときの管楽器の力学的な描像は以下のようになるであろう。まず、同じパラメーターのもとで多数のカオス的でない比較的単純なアトラクターが多数存在し、カオス的なアトラクターはごくわずかである。そして、これらのアトラクターの吸引領域は無限次元空間の中できわめて複雑に絡まりあっており、そのため初期条件として与える波形のわずかな違いが最終的に落ち込むアトラクターの決定に大きな影響を与える。これらのアトラクター及び吸引

領域の構造はパラメータ変化に対して極めて敏感であり、この敏感さがヒステリシスを伴う複雑な遷移を引き起こす。大まかな描像はこの様なものであると考えられるが、詳細な点では数値シミュレーションと実際の実験は一致しない部分が多々あり、ODD系には見られない楽器特有の特性もある。特に、特性(IV)、(V)の性質については注意が必要である。例えば、楽器をモデル化した力学系では非線形性が小さいためにシミュレーションでは、ほとんどカオス解が現れず実験で現れるトーラス $\leftrightarrow$ カオス間の遷移を再現できないこと、さらに、シミュレーションではきわめて単純な遷移ダイアグラムしかえられないのに対し実験でえられたダイアグラムは多様で豊かな構造を持つ点などがあげられる。また、ODD系が強い非線形性を持つのに対し楽器は非線形性が弱いためにカオスへ至るルートや遷移ダイアグラムにODD系にはない特徴がある。以下、これらの事に留意しながら実験結果を詳細に眺めていこう。

遷移ダイアグラムを良く見比べてみるとクラリネットの実験にみられる基本的遷移構造はおおむねつぎのようになる。以下 $\rightarrow$ で表した遷移過程はヒステリシスを伴う一次位相転移あるいは soft-mode-instabilityである。

C# 6, F 6 等 (ほぼ 7 倍音のグループ) $\rightarrow$
 $\rightarrow$ D 3 (基本音) $\rightarrow$ D 3 H (7 倍音 - 基本音混合モード?)

ある種の実験条件のもとでは D 3 音にいく前に D 3 L (7 倍音 - 基本音混合モード?) が現れることがある。さらに、D 3 L が トーラス $\rightarrow$ カオスの遷移でカオス化したものともとれる C# 6 L (7 倍音 - 基本音の準周期 $\rightarrow$ locking $\rightarrow$ chaos 遷移が起きた?) が存在する場合もある。これに対し ODD では吹鳴圧に対応する非線形パラメータを上昇させると

基本波 (とその周期倍加分岐 $\rightarrow$ カオス) $\rightarrow$ 7 倍波
 $\rightarrow$ 9 倍波 $\rightarrow$... 発達したカオス (chaotic itinerancy)

となって倍数波が現れる順序が逆転するのみならず、カオスへのルートが準周期ルートではなく周期倍加ルートである (池田 [9])。ところで、シューマッハ方程式のシミュレーションで次のような注意するに足る結果が提出されている (小畠・井戸川 [11])。実際のクラリネットの特性インピーダンスより大きいインピーダンス (細い管体に対応) をとると、シューマッハ方程式の振動解には逐次周期倍加分岐 $\rightarrow$ カオス $\rightarrow$ 高調波 ($2tR / (\text{奇数})$) という ODD と完全に一致する遷移

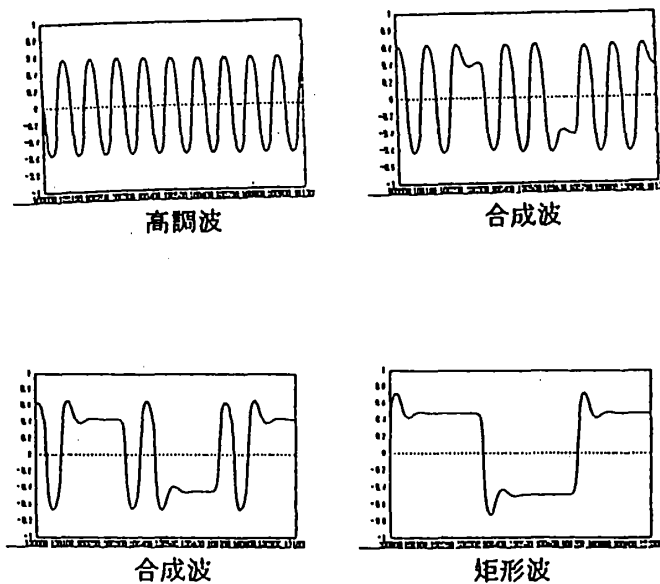
が見られるのである。特性インピーダンスの増大は体積流量を増加させた事と等価であり非線形性を強める。よってシューマッハ方程式がリード振動その他ODDに比べてかなり複雑な効果を含むにもかかわらず、強い非線形領域で基本的にはODDの性質をそなえていることを示唆する。逆にいえば、実際のクラリネットで観測されたカオスは、ODDや小畠・井戸川のシミュレーションで見られるようなフィードバックの強非線形性によるものではないらしい。

ここで1つ注意せねばならないのが、マウスピースの存在である。クラリネットでは管体とマウスピースの間は連続的に繋がっていない(断面形状の不連続的变化や折れ曲がりの存在)ので音波の反射が管体の開口端とマウスピース端の2端でおこる2重遅延フィードバック系と考える必要がある。実際、マウスピース部分のみで作られる共鳴周波数は約1000Hzで実験で現れた高調波の周波数にきわめて近い。2重遅延フィードバック系の発振は2つの遅延フィードバックループ(遅延時間を t_{R1} 、 t_{R2} とかく($t_{R1} > t_{R2}$))の共存のためにフラストレーションに陥り、最初の発振が奇数倍数波でおこり、とくに比 $\chi = (t_{R1} - t_{R2}) / (t_{R1} + t_{R2})$ が1の近くで極めて高い倍数波(調波数上限は $t_{R1} /$ (反射関数の幅)で決まる。)での発振になることが理論的に指摘されている(タワー構造: 池田[9])。クラリネットでは $\chi = .7 \sim .8$ ていどであることを考慮すると、最初に起こる発振が基本音ではなく7倍音でおきてても不思議ではない。実際、2重遅延をとりいれたシューマッハを単純化したモデル[3]のシミュレーションによると、おおむねつぎのような分岐ダイアグラムが得られている(橋・高橋[12])。

7倍音 → 合成波 → 基本波 → 合成波 → 7倍音

このように、分岐構造は概ね井戸川の実験に一致するのである。のみならず、基本音の両端で7倍音-基本音の合成波がみられ、それは実験の基本音の両端で見られたD3LとD3H(7倍音-基本混合モード?)またはC#6L(7倍音-基本のロッキングカオス)に対応する!? しかし問題は、下図(橋・高橋[12]より転載)に示す橋・高橋の合成モードが実験で見られる混合モードの波形とまったく違っていることである。後者はいわば振幅の合成波であり準周期振動であるのに対し前者は周期的で位相での合成波とでも呼ぶべきものである。

(注: 円筒管をクラリネットのマウスピースで人工吹鳴させた井戸川による未公開実験データには橋・高橋の得た合成モードに近い波形を含む類似の遷移ダイアグラムが見いだされる。この事実は注目に値する。)*

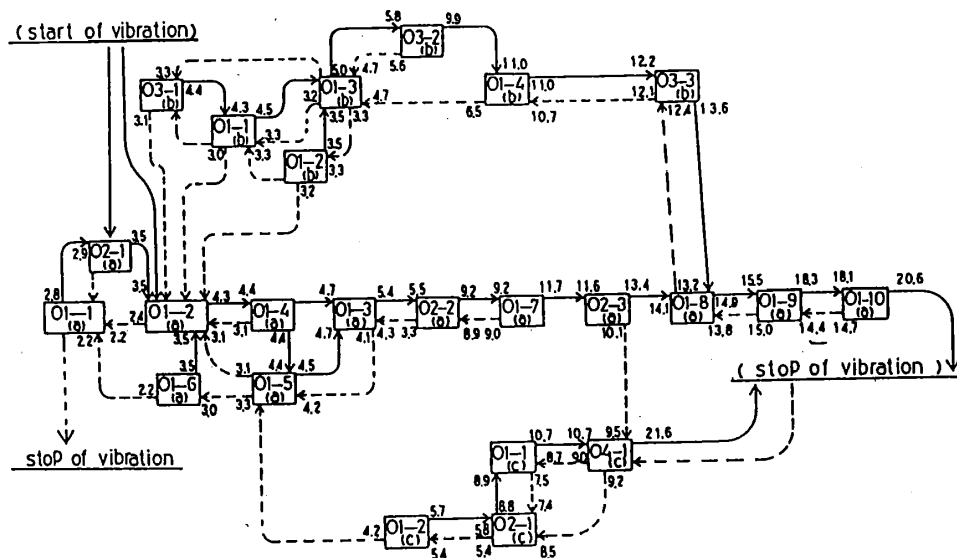


橋・高橋のシミュレーションでは井戸川が見出したタイプの準周期振動が見出だされていない。一方、Zhangらは2重遅延のある光学系の発振を実験した〔21〕。かれらの報告によると、橋・高橋のシミュレーションで見られた倍音間のヒステリシスを伴う分岐のほかに井戸川の実験でみられた準周期波に近いものを観測している。しかしカオスへの準周期ルートが観測されたか否かは不明である。

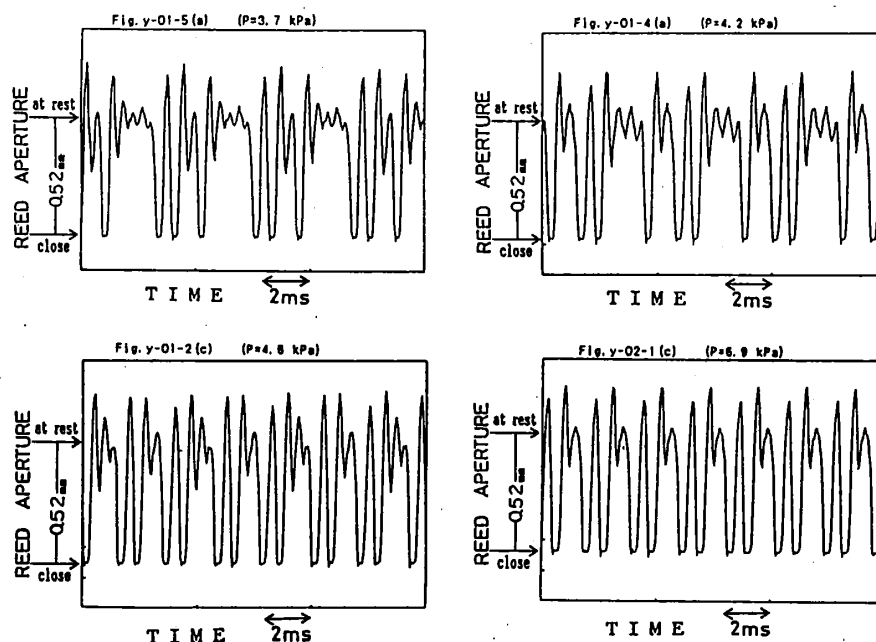
クラリネットの実験において忘れてならないのがリードの存在である。リードの固有周波数はマウスピース部分の共鳴周波数 ($1/2 \pi R^2$) に近い。したがって橋・高橋のシミュレーションや2重遅延ODDモデルでは考慮されていない、リードの固有振動数の存在がさらに管体のインピーダンスをフィルターして $2 \pi R / 7$ 振動を強調している可能性も考慮する必要があるだろう。2重遅延によってできた7倍波と、それに近共鳴したリード周波数の間でロッキングーカオスが発生したものが井戸川の観測したカオスと解釈できないか。いずれにせよ、高調波選択が2重遅延によるものか、あるいはリードの固有振動によるものかを、マウスピースの長さ、あるいはリードのくわえこみの長さを変化させて実験がおこなわれることが強く望まれる。

とにもかくにも、遅延フィードバックのある系の発振に極めて普遍的あらわれる矩形基本波解とその高調波解それに、その組み合わせが作る多様な合成振動が井戸川の実験の複雑なトランジションダイアグラムの本性であることは間違いない。とくにダブルリードの木管楽器であるオーボエやバスーンなどで観測されている遷移ダイアグラムの多彩さ複雑さは驚嘆に値する。下図(井戸川〔8〕より転載)に井戸

川らが観測したオーボエの遷移ダイアグラムを示す。



興味深いことに橋・高橋が見出した合成波と類似の波形がクラリネットでなくオーボエやバスーンでは観測されていることである（下図（文献〔19〕より転載））。このような「合成波」はODDでも準安定な過度現象としてしばしば観測されており（池田〔9〕）、基本波－高調波（倍音）に加えて遅延フィードバック系の基本的な解の族をなすと考えられる。



この様に井戸川らの実験（[7, 8, 19]）、橘－高橋（[12]）および小畠－井戸川（[11]）のシミュレーション、一重・多重光遅延微分系の理論（池田[9]）、多重光共振器の実験（Zhangら[21]）はお互いに良く合う側面と合わない側面が混在している。しかしこれらを詰めて行くとかなり実際の木管楽器のデバイスとしての本質に迫れるような気がする。

以下に、問題点および個人的な疑問を挙げておく。

<問題点>

（１） 管長対マウスピースの比はほぼ8：1である。したがって、7倍高調波から基本波への転移が起こることは上にも述べた様に納得のいく事実である。ところが、シミュレーションにおける基本波が{全管長×2}であるのに対し実験では{(管長－マウスピース長)×2}が基本波としてあらわれる。これは主に管端にある朝顔の影響で最低音の周波数が上がり見かけ上の波長が短く成った為と考えられる。しかし、クラリネットにはマウスピースと管体をつなぐ部分に樽管と呼ばれる管体が細くなる部分や管体上部にレジスター管と呼ばれる突起物があるために管体内の形状は極めて複雑でありそれらの影響も無視できない。詳しい原因は現在の所不明である。

（２） リードの振動数（800－1000Hz）が大体マウスピース共鳴周波数に近いために、リードの振動数とマウスピースの共鳴周波数の間でロッキングが起こりカオスを生み出している可能性は注意深く調べなければならない問題である。なぜ、高調波と共鳴するようなリードが現実の楽器で使われているのだろうか？

（３） 井戸川らの実験結果を注意深く眺めてみると基本波が出力されている場合には基本波の周期の半分の時間でリードが閉じており、一周全体では管内圧力の変動（振幅）が大きい割に供給される空気流は小さい。これに対し、高調波やカオス的な波形が出力されている時にはリードはほとんど開いた状態になっており、さらに、管内圧力の変動幅が小さい割には供給される空気流の総量は基本波が出力されている場合とほぼ同じになっている。この為、マウスピース部分を閉端であると仮定できなくなり、偶数高調波が発生する可能性も否定できない。これが、高調波が基本波の完全な奇数倍からずれる事の一因になっている可能性があり、微妙に周期の違う高調波をたくさん生み出す原因ではないかとも考えられる。この問題は、上に述べたリードの振動数の問題とも密接に関わっていると考えられる。

(4) クラリネットの吹鳴実験ではD 3 HやD 3 L等の非常に珍しい混合波(7倍波+基本波)が見いだされている。これらは、基本波の両端に出ており、この点ではシミュレーションと一致する。しかし、シュミレーションで得られた合成波とはまったく形が違う。実験で見られたような混合波ははたしてクラリネット特有なものなのだろうか？

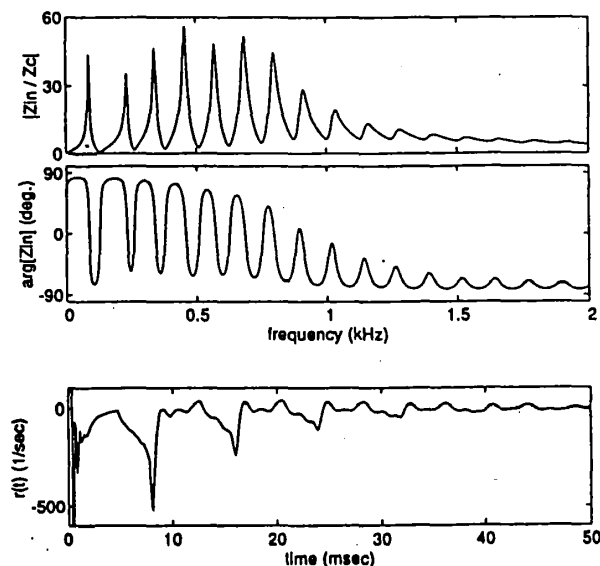
4. 金管楽器をめぐって：共鳴構造

トランペットのような金管楽器の特徴は管体に音孔がないことと、唇の振動がリードの役割をすることである。発振周波数の制御には吹鳴圧の変化も使われるが唇の持つ固有振動数の変化の方が重要である。演奏者は唇の緊張の度合いをコントロールすることによって唇の持つ固有周波数を変化させ、管体が定める共鳴波（管体の固有モード）を励起して吹奏すると考えられる。ここではくちびるという生体素材をどうモデル化するかが重要な問題になる。ちなみにクラリネットなど木管楽器では”リードの振動数＝一定”で制御パラメータは吹鳴圧である。足立は2種類の唇モデルを用いて、変形されたシューマッハ方程式による金管楽器のシミュレーションを行った（足立[10]）。クラリネットのモデルであるシューマッハ方程式との最大の違いはリード（ここでは唇）の開閉特性の差である。もう1つの金管楽器の特性は管体の高次倍音の共鳴構造である。金管楽器の開口は大きく外側に開いている（朝顔）こと及びマウスピースの存在のため、円筒管の場合に比べ励起される固有周波数の差がつまる傾向がある。より正確には、朝顔により低音領域の周波数が上がり（[22]，竹内[23]）、マウスピースのヘルムホルツ共鳴により高音領域の周波数が下がる（[22]，足立[24]）。この特性を用い本来奇数高調波となるべき倍音を朝顔の形をうまく整形することにより

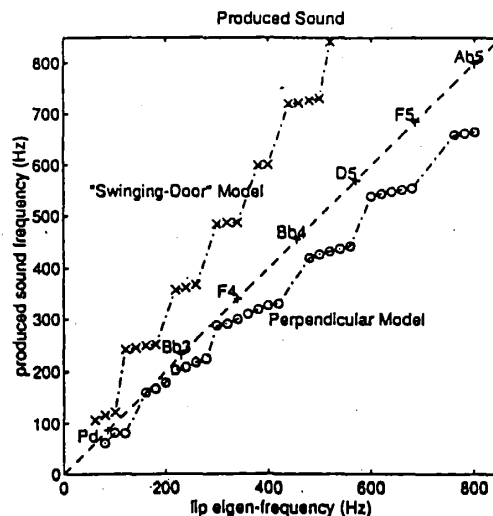
$$(2n+1)\omega_0 \rightarrow (n+1)\omega_0'$$

（ ω_0 及び ω_0' はそれぞれ円筒管と（マウスピースも含めた）金管楽器管体の最低次共鳴モードの周波数を表す）のように周波数比を変化させることが可能であり、見かけ上偶奇両方の倍音が出る様に設計されている。音孔を持たない金管楽器では固有モードの数がそのまま発音可能な音の数に対応するので偶奇両方の倍音を持つことは音のパライティーを増すために有利であるからである。現実の楽器では、すべてのモードの周波数を整数倍にならべることは難しい。ふつう、2次以上の高次倍音はほぼ正確に整数倍の所に設定されるが、最低音の周波数は高次倍音の整数分の1の所からかなり低い周波数の方へずれ込む。足立がシミュレーションに用いたヤマハのトランペットから計算した管体の入力インピーダンスにもこの様子がみとれる。この点が、実際の吹鳴状態でどのような影響を及ぼすかが興味のあるところである。

足立のシュミレーションを見てみよう。下図左に、管体の入力インピーダンス、反射関数、右にリード（唇）の固有振動数をスキャンすることによる管体に励起される自励発振の周波数の変化（足立〔10〕より転載）を示す。



管体の入力インピーダンス
及び反射関数



唇の固有周波数と発音周期の
関係

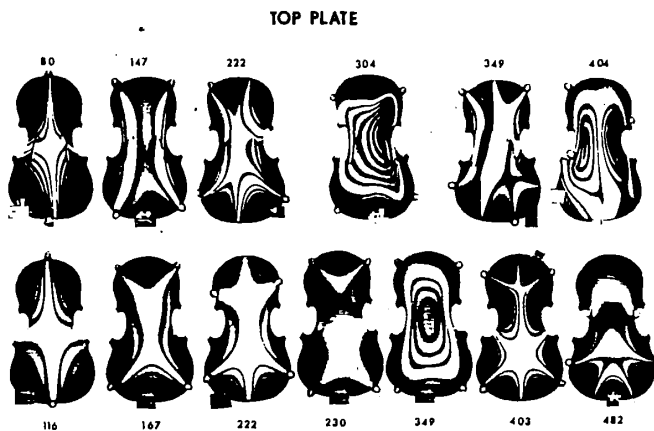
遷移ダイアグラムより、固有周波数の変化によって、管体の自励発振周波数自身がひきずられながら変化すると同時に、管体の共鳴特性を反映して倍数波の間に不連続遷移が見られる。一つの発振のブランチが一つの共鳴に対応していることはいうまでもない。実際の演奏における、唇の緊張度の変化による倍音への跳躍は、ブランチ間の遷移に対応する（当然ヒステリシスを伴うだろう）。足立によると時間発展のシミュレーションの結果えられた波形は実際の吹鳴音を良く再現したという。

上の図を見て、私たちが興味をもったのは、線形共鳴（管体の共鳴のこと）が自励発振モードとしてどの程度忠実に再現されているかという点にあった。確かに吹鳴振幅が小さくて非線形性が弱い時にはnormal-form-analysisは共鳴周波数での発振を保証するだろう。しかし強非線形では倍音成分が強くなるので予め倍音の位置に共鳴が存在するような規則的構造がなければ発振はそう単純ではなくなる筈だ。前にも述べたように、第 n 共鳴（ $n \geq 2$ ）は、調和振動子の等間隔スペクトル $n \times \{\text{単位周波数}\}$ の位置に忠実に実現されるが（まったく同様の規則的遷移ダイアグラムが共鳴構造がODD系でもみられる）、第一共鳴だけはその位置からずれる。この事情を（多分）反映して、第一共鳴付近で発振すべき自励発振は、第二モードの

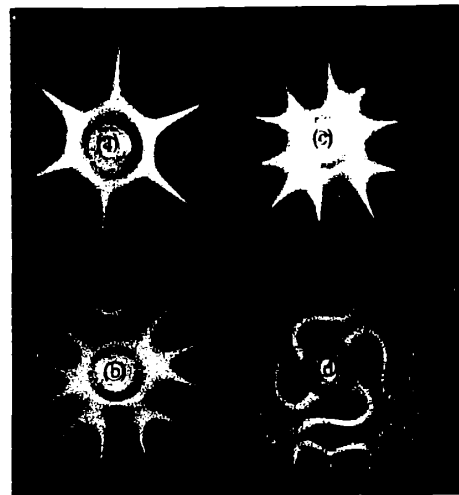
足立
5

サブハーモニックスでの発振と第一共鳴に準拠した発振の間でフラストレーションに陥り少し複雑な分岐構造が付け加わっているのではないか？

楽器で望まれる音色が豊富な倍数振動成分をもつことにあるならば、管体の（線形）共鳴構造は以上に述べたような規則性を持つ必要があるのだろうか？ 管体の線形特性と、実際に実現される（非線形）発振の関係は非線形ダイナミクスの観点からも興味深い（beyond normal form theoryの問題）。例えば量子カオス的不規則共鳴構造を持つ共鳴管体を使って非線形発振をおこさせたらどのような自励発振が起こるだろう？（＝「quantum chaotic musical instruments」は存在するのか？）。管楽器ではないがバイオリンの胴やシンバルなどは下図左右にそれぞれ示すように（文献[13]より転載）、殆ど「量子カオス的」発振モードを示すし、尺八師がハマりこんだら、ついつい淫してしまうという「根っきの尺八」の管体（安藤氏との茶飲み話による）などは、そう規則的な共鳴構造をもつとは思えない（尺八そのものの共鳴構造は割合規則的だ（安藤の研究[2, 6]）。しかし根っこがつくと話は変わるだろう。）。ホーンの共鳴モードはベッセル関数でなければならないといわれているのだが・・・・[25]。



ヴァイオリンの胴の振動
パターン



シンバルの振動パターン

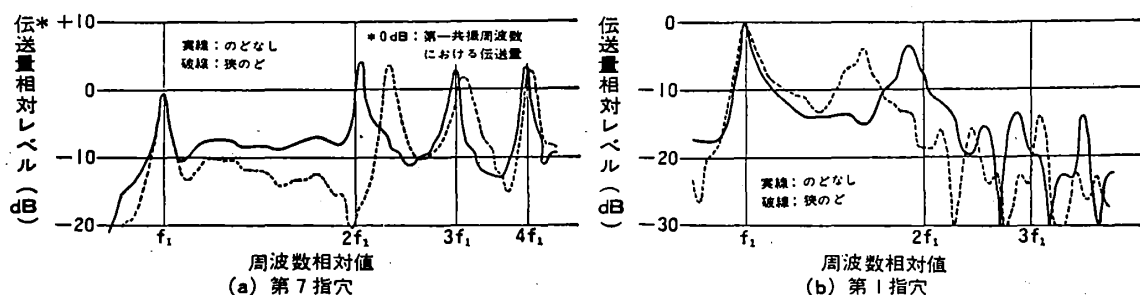
個人的見解によると不規則な共鳴を基礎にした発振は倍音構造を作ろうとする非線形相互作用と、倍音からはずれた共鳴との板挟みにあって、振幅が大きくなると幾つかの解が共存したりその遷移領域でカオスが発生したりすると思われる？ もしそうなら、このカオスをつかって発振モードを渡り歩く遍歴運動（カオス的遍歴）が起きても不思議ではない（デービス[26]）。話は変わるがレーザーのキャビ

若松
1

ティにホログラムを挿入した系（ホログラフィックレーザー）の線形共鳴モードは、ホログラムの存在による屈折率の空間変調がポテンシャルの役割をして、まさに量子カオス・モードである。実際、その様な系の大振幅発振領域での発振は、ホログラムに記憶されたパタン（＝共鳴発振モード）間のカオスの遍歴になることが報告されている〔27〕。

足立によるとレギュラーな発振の他に準周期的な振動やカオス（”マルチフォニック”な振動）が観測されており今後の展開が興味深い。しかし、残念ながらそれが発生する条件や分岐構造は明らかにされていない（足立〔10〕を見よ）。

和楽器の能管はきわめてユニークな共鳴構造をもつ。能管はわざと管体にくびれ（のど）をつけて倍音共鳴が発生しないようにしているらしい。それはあえて尺八を根付きにすることによって、規範をやぶる表現を見出だそうとする志向に通じる。下図にのどのあるなしによる能管のスペクトルの変化を示す（安藤〔2〕より転載）。



能管のスペクトル（のどのあるなしによるスペクトル構造の比較）

図よりのどのある能管では倍音のスペクトルの位置が大きくずれているのが見て取れる。竹内〔1〕によれば管楽器にたいする演奏者の所望値は文化、したがって、時代と地域の影響をうけやすく、その差は同じエアリード楽器であるフルートと能管の構造差に現われているという。西洋楽器はハーモニーを重視しするので音程や音色の安定性を重視して発達してきたと言える。これに対し、和楽器では能管に典型例を見るように音程の安定性を放棄して、音程間の遷移のひとまとまりを”単語”として、”間”を重視しながら”単語”をつなげることにより「喋るように」に演奏するという。また、場合によっては雑音さえ演奏の「力」とみなされる（竹内〔1〕）。この様な極めて特徴的な能管の演奏を可能にしているのは、倍音共鳴構造の否定にあるのではないだろうか？竹内の報告で触れられているように、能管をおなじエアリード楽器であるフルート奏者が演奏した時のフーリエスペクトルがほとんど揺らがないのに対し、能管の演奏家の場合、著しい揺らぎを示すという観測

事実（ニシ〔28〕）は、演奏家が楽器の特性を如何にして引き出すかというヒューマンファクターの観点からも極めて興味深い事実である。地域あるいは時代の音による表現にたいする嗜好の差が楽器の共鳴構造の規則性、そしてそれに基礎を置く自励発振特性の「きれいさ」逆に「乱れやすさ＝制御しにくさ」に反映されているとしたら、「量子カオス楽器」なるものを意図的に設計してみることも面白いかもしれない。つつい個人人的嗜好のモードにはまってしまったがご容赦ご容赦・・・。

いづれにせよ、将来、楽器の研究やシミュレーションが進展することによって、楽器のかなり本質的部分が制御可能になったとき、楽器にたいする古典的制約（たとえば倍音構造の豊かさ）を外すことによって表現の自由度を外から確保するか、楽器の古典的制約あるいは歴史的達成を遵守しつつ内から確保するのが問題になるかもしれない。

5. ヒューマンファクター

5. 1. 芸術としての音楽

楽器の吹鳴におけるヒューマンファクターの問題を考えると、楽器が奏でる対象である音楽そのものを考えないわけにはいかない。音楽の演奏が意図するものは演奏者と聴衆のあいだに、音の連鎖によって表現されたなにか真なるものを交感し、その行為を通してそれを共有する陶醉をつくりだすことにあるにちがいない。とすれば、音を通して何かあるものを表現したいという送り手の側の願望とそれを享受したい受け手の願望がよって来る由縁をひとたびは考えざるを得ないであろう。おおげさにいえば、芸術的表現とはなにか？という問いに答える必要が生じてくる。しかし、これらの問いに対する答えは百人いれば百通り千人いれば千通りの答えが返ってくるであろう。以下に述べる芸術論は、音楽には素人である筆者達による、独断と偏見に満ちた音楽論である。

我々が実際に体験的に観察する自然現象は力学の演習問題で扱うような単純明快なものではなく複雑な挙動を示す。それらは、常に変化し一定の状態に留まる事はなく、一見定常的に見える現象でも長い時間の間には必ず変化し完全に同じ事が繰り返される事はない。自然現象は完全に無秩序でもなく完全に規則的でもなく、秩序と無秩序の間を変転し続けるものである。人間個人も人間社会も基本的にはこの様な自然の一部であり自然法則に圧倒的に支配されている。しかしながら、人間社会は自然界から完全に独立してはいないにせよ、ある種の近似的に閉じた系として機能しており、また、人間個人の人生や人間社会の出来事を、人間社会以外の自然現象と比較した場合、質的に異なる秩序と複雑さが存在する様に思われる。そのため、我々は、自然現象と人間社会を切り離して考えることが多く、人間社会をあたかも自然界から相対的に独立して発展してきたものと見なすことが多い。いずれにせよ、我々を取り巻く総体としての自然はきわめて多様で複雑なものであると言わざるをえない。

若松
3

そこで、我々が我々を取り巻く世界を認識しそれを自分の言葉で表現しようとする場合にはどの様な観点から対象を眺めるかと言うことが重要になる。我々の認識のアプローチを極めて大ざっぱに分類すれば、世界を外側から眺め普遍性を求める自然科学的方法とそれとは逆に個々人の体験を通し内側から眺める芸術な手法がある

若松
4

ように思われる。以下では、まず、自然科学と芸術という一見対局的に見える二つのアプローチを比較しながら議論を始めよう。

自然を認識する方法として、西洋で発達した近代的な自然科学では、観察者である人間が対象である自然から分離されており、自然科学的思考で対象を捉えるとき人間は外からの客観的な観察者である。特に、物理学では、特殊な時間空間スケールと境界条件のもとで上述した様な総体性をもった自然の一部を切り出し、さらにそれらを理想化した状況のもとで認識する手法をとる。この様な手法を用いると切り取られた自然の一部は再現可能なある種の定常状態やそれに準ずる状態を実現する事が可能であり、切り取る事により自然の持つ普遍性を抜き出すことが可能である。ところが、自然科学が提出するこの様な自然観を基にそれらの単純な組み合わせで、絶えず変化し変転する総体としての自然や、さらにそれから飛躍して、一回しか生きられない我々の人生の起伏を理解させてくれるような世界観を提供してくれるかという決してそうではない。

単純な組合せも、それらが結びつくことによって、全体としては単体の発展法則からは予測も制御もできないような多様な時間空間スケールをもつ現象を生みだし、混沌と秩序が入り交じった極めて多彩な振舞いをするであろう。自然科学の見方に従えば、究極的には我々の人生も自然階層の頂点で起きているそのような運動のある部分にすぎないといえるだろう。しかし、科学の装いのもとで我々が外から眺めたときにきわめて多様、多彩で複雑にみえる世界を、ひとたび内側から眺めるとそれは一回性、やりなおし不能のユニークな軌跡なのである。多様性を表現する科学言語として我々はエントロピーを越える概念をもちあわせていない。エントロピーという概念が普遍性を獲得できた理由は、内からみれば各々が一回性のユニークな軌跡の一本一本の個性に注目することを放棄したからであった。しかし、この様な観点が、一人一人の個が描いた軌跡を彼が了解し納得したいと望んだ時に、それを満足させてくれる世界観を提供するとはとてもおもえない。西欧では自然科学で捉えきれないこのような、いわば内からの世界観をあたえてくれるものを、芸術の分野での題材と考え、自然科学と芸術で分業することにより世界全体の認識を行ってきたと考えてよいであろう（東洋ではこの様な自然科学と芸術の分業が行われてこなかったために自然科学の発達が遅れたのかも知れない）。さて、近年、自然科学にも大きな転機が訪れようとしている。それは、カオスを代表とする非線形物理学が提出しつつある自然観である。カオスの研究は、比較的単純な力学系ですら無限の複雑さとある種の秩序を内在していること我々に示した。我々が日常的に体験する自然現象では物理学の教科書で教えられる様な単純明快な現象より、ここで言う

カオス現象に近いものが圧倒的に多い事を考えるとカオスの与える自然観の重要性を認識せざるをえない。もちろんカオスがすぐに日常的な自然現象解明に直接結び付くわけではないが、それらを理解していく上での重要な指針となると考えられる。非線形物理学の研究は自然科学の分野として始まったものであるにも関わらず、これまでの自然科学の提出してきた自然観に変更を迫り概念の拡張を促すものであるのかも知れない。

さて、話を芸術へと進めよう。芸術家が創造し我々に語り掛けてくるものは何であろうか？そして、我々は芸術家からの語り掛けをいかにして理解し得るのであるか？芸術家が創造し我々に伝えようとしているもの、それは、彼または彼女の人生において極めて重要なある一瞬または濃厚な時間の流れ（人生における真実）に出会った時の印象である。芸術家が創造しようとしている瞬間及び創造されたものは芸術家が歩んで来たこれまでの人生やこれから進もうとしている方向さらには創造を引出しそれが成された外的な環境（例えば、どの様な家に住み、ベランダにはどの様な花が咲き、窓からは何がみえたか）にも強く依存する（若松〔29〕も、作曲家が作曲した当時の細かなニュアンスの重要性について触れている点に注意して頂きたい）。芸術家が人生における重要な一瞬を捉え表現可能としているものはなんだろうか？ロシアの映画作家アンドレ・タルコフスキーは芸術家の持つイメージと考えている。少し長くなるが彼の文章を引用してみよう〔30〕。「芸術的イメージの概念が、明確に公式化された、分かりやすい厳密なテーゼとして表わしえるなどということは、私には想像することさえ難しい。そのようなことを期待してもいない。ただ私に言えるのは、イメージは限らないものをめざし、絶対に向かって進んでいくということだけだ。そればかりか、イメージの理念と呼ぶべきものは、多層的かつ多義的なものであり、それをことばで表現することは、原理的に不可能である。こうしたことこそ芸術を芸術たらしめているものなのだ。思想が芸術的イメージにより表現されたとき、それは、作家の世界を具体化する理念や作家の理想への志向を、もっとも正確に表現する明確なフォルムが見いだされたことを意味する。（中略）われわれは宇宙を統一的全体としては知覚することができない。にもかかわらず、イメージはその統一的全体性を表現することができるのである。イメージとは、われわれが盲いた目で覗き込むことを許された真理から受ける、ひとつの印象である。具体化されたイメージが真実味を獲得するのは、そのなかに真実を表現している関係が捉えられているときである。あるいは、そのイメージを人生そのもののよう（その人生は実に単純なものでもいいのだが）ユニークに、反復不可能なものにしている諸関係が、そこに捉えられているときである。」タルコフスキーの言う芸術家のイメージは創造された作品を通してどの様にして我々に伝わるの

若松
5

であろうか？我々は歴史文化の背景の他に個人としての資質を備えており、それが一人一人の個性になっている。そのため、本質的なもの（真実）に出会ったときでさえもそのものから受ける印象は百パーセント同じにはなりえないはずである。それにも関わらず、ある1つのものを本質的なものであると共通認識する能力が我々には存在する。それがタルコフスキーの言うイメージであろう。我々が真実であると直感するものは、我々の言語では語り尽くすことの出来ない存在であるが、我々はそれをイメージを通し真実であると直感し、さらに我々は芸術家の作品を通しそれを共有する事が可能となる。真実は、有理数から見た無理数世界のようなものである。真実は我々に無限の解釈のバラエティーを与えるものであり、一面的な解釈を拒むものでなければならない。したがって、芸術家から我々に作品を通し真実のイメージが伝わった場合にも作品から受ける印象には差異が生じることになる。芸術家が作品を創造する時真実から受けたイメージに故意に自らの差異を強調した一面的な解釈を付け加えるべきではない、この様な事を行えば真実の持つ無限の深みを破壊してしまうからである。イメージを伝える為には芸術家は最適の表現を模索する。表現しすぎても表現が少なすぎてもいけない。若松はこれをポアンカレ断面のアナロジーを用いて説明している（若松〔29〕）。「元来、不安定に聞こえる音楽上の”時間の流れ”を、聞く人にとって解かりやすい状態にまで統べ、解釈を通して複雑さをよりシンプルな断面として切り取って見せる事が演奏である。」ここで若松のいう解釈とは、いわゆる我々に解釈を強要するものではなく、むしろ最適な断面をどの様に設定するかと言う問題を言っているのではないだろうか？最適な断面を我々に提出することに芸術家としての個性のすべてが集約される。

音楽の再生芸術家としての演奏家とはなんであろうか？演奏家の前には常に作曲家がいる。作曲者は、真実から受けたイメージを音符と言う断面を使い形態化する。若松は言う「観察力や洞察力を音譜という記号に直し形態化する。例えて言えば、一幅の絵に景観として閉じ込める。」（若松〔29〕）。演奏家は音譜と言う断面を通しイメージを受取り、自分の内的世界の中で再構成する。再構成の過程において作曲家と演奏家の個性の違いによる差異が生じる。これはモイーズの言う「何度やっても出現する偏り」でありこの部分が演奏家の個性となる（若松〔29〕）。差異は演奏家の内的な状態だけでなくあらゆる部分から生じる。例えば演奏家の日々の生活、演奏当日の体調、演奏会場の物理的な条件、集まってきた観客のかもしれない雰囲気、独奏であるか合奏であるかはたまたオーケストラの一員として演奏するか等の制約も差異を作り出す原因となる。そしてなりよりも、楽器そのものの特性が演奏から生じる差異の大きな原因となるであろう。実際の演奏においては演奏家は過去の表現列から芸術的なイメージにより未来の音を予見する。若松はこれを

フィードフォワードと呼んでいる（若松〔29〕）。予見即ち直感的なきらめきにより捉えられたものこれは常に曲の持つ本性を捉えるものである。しかし楽器を用いた表現行為の中で常に予見との差異が不可避免的に生じる。差異により緊張が生じ、演奏家は第二のフィードバックループにより緊張から緩和へと曲を導く。現実の演奏では演奏家は常に生じる差異による緊張と緩和の間を行き来しつつ曲の持つ全体としてのイメージを体現するように努力を行っているように思える。そして演奏全体を通しそのときの外的な環境を含めた全ての条件のなかでイメージの断面が最適の状態で伝えられたとき、その演奏そのものがきわめてユニークなものとなり、一期一会の世界をつくりだし、演奏は芸術へと昇華する。これが再生芸術としての音楽の本質ではないだろうか？この再構成の過程は西洋音楽だけのものではなく邦楽の世界にも存在する。竹内は能管の習得過程での唱歌の重要性を指摘し、唱歌は頭で理解するものではなく体全体で理解するものであり、唱歌が過去の演奏の繰り返しではなく自分の言葉としてでてくるまでトレーニングをしなければならないと述べている（竹内〔1〕）。邦楽では演奏者そのものの個性が重要視されるように思う。これは演奏者自身がユニークなものとして存在し、自らの存在を芸術的なイメージを体現するフィルターとして使うだけでなく存在そのものが芸術的なイメージを生み出す真実となることが望まれているように思われる。

5. 2. 演奏家に望まれる楽器とは

前節でも述べたように、作曲家によって楽譜と言う形で表現を与えられた音曲は力学系理論でいうポアンカレ横断面になぞらえられるかもしれない（若松〔29〕）。作曲家が表現したいものは恐らく圧縮不能である。にもかかわらず有限列に収められざるを得ないよう表出されてしまったものが曲である。「圧縮できない無限列の有限部分」（若松〔29〕）。すべてが音符列にあるのではない。隠れた次元の存在は作曲家にとっても、聴衆にとっても本質的である。作曲家は演奏家と聴衆が不可避免的に作り出す隠れた次元の創出をあてこんでポアンカレプロットを連ねる。したがって、音符列から演奏家によって再構成された「全て」、そして聴衆のそれぞれがさらに再構成した「全て」の間には、個々人のフィルターを通しての作品の解釈を不可避免的に含むために差異が存在する。差異の存在は本質的であるが、隠れた次元の中に存在するトポロジー（余りにも貧弱なアナロジーかもしれない）は不変であり、それが作品のidentityといえる（ここで言うトポロジーを捉え表現する能力こそタルコフスキーのいうイメージである）。トポロジーは、解釈の差異を許しそれを生み出すものであり、ポアンカレプロットを通してのみ表現可能なものであ

る。この意味でも、作曲された音曲はポアンカレプロットになぞらえられるかもしれない。

実際の演奏で、演奏家は曲全体の構想にもとづいてそれまでに発音された表現列から未来の音を予見する。予見（＝無限の表現されるべき人格に基盤を置く閃き＝直感＝きわめてリズムカルなもの）は恐らく常に正しい。予見された範囲にむけて楽器による表現行為が成される。しかし、表現行為は現実の楽器の制約や表現者の肉体的な制約のもとで行われるために、差異（＝緊張）が不可避免的に生まれる。したがって、差異を呼び起こさない予見は意味を持たない。予見する能力とそれに当たる表現をなせる能力がプロの演奏家とアマの演奏家のちがいであると言う（若松〔29〕）。プロの演奏家は予見と実行の間に必然的に差異が生じる事を深く認識しており、未来の音列に生じる差異を当て込んだ予見をなしうる者である。表現されたメロデーの流れの中の「何度やっても現れる」偏りと、時によるとそれが偏積することによっておこる演奏の質的転換（集積した差異が演奏の創造的な個性に転換すること）。それが、演奏家の創造の中核をなす。

安藤
6

演奏の本質を生み出される差異に集約しよう。それではいかなる条件を供えていれば、演奏家が満足する差異をうみだすことを許す楽器と言えるのだろうか？ 演奏家は自分の慣れ親しんだ楽器の特性を熟知している筈だ。しかし、いかに楽器を熟知しえても、楽器は物理定数（管体の共鳴構造・リードの固有周波数・マウスピースの境界形状など）の制約をうける物理的デバイスであり、自分にとって「外」の存在であり、肉体の制御を拒む境界が存在するだろう。芸術的な創造を欲する自らの内的な世界とそれを表現するための道具である楽器という物理的な存在との境界を消滅させるために、演奏家はトレーニングによって肉体（横隔膜・呼吸器とその周辺にある肉体装置・口腔（もちろんそれは脳という高度な制御装置の支配を受けているのだが））を楽器の表現装置の一部として深く侵入させているだろう。にもかかわらず、境界は移動しても決して消滅しないだろう。即自的イメージに表現を与えたいという演奏家の願望は境界の彼方にある「外」の媒体を使ってしか伝達不可能なのである。なぜなら、表現とは個が自分の肉体の制約をこえて外に飛び出し、他者と交わりたい衝動に支えられるものであり、境界の彼方にある物理的媒体に侵入しチョッカイをだすこと（＝楽器による表現行為）が他者と境界をけしさる模範的な行為になっているのではないか？ とすれば境界の存在こそが脳が生み出す予見と実際に表現されてしまったものの差異をうみだすダイナミクスの起源になっている筈だ。

楽器の研究において、演奏者と楽器の境界の問題は最後の課題であろう。研究をか
さねるほど、このインターフェイスの機構が余りに多層多重であることに驚嘆させ
られるに違いない。その多重多層さはタルコフスキーのいうイメージに凝縮された
真実によってしか捕らえられないものだろう。おそらく、良い楽器とは境界を意識
させない（と錯覚させる）楽器ではなくて、あたかも境界が消滅したように見え、
つまり、肉体を深く侵入させることに成功できたかのように見えながら、しかし、
最後の部分で厳然たる境界を意識させるものではないだろうか。厳然たる境界の存
在は脳の中で作り出された予見と、実際に表現されたものの差異の創出とに微妙に
関連しているものと思われる。したがって、楽器は表現したいという願望の内容を
実現する可能性であると同時に制約としても作用する。

竹内
2

演奏家による再生が芸術的創造となるようなダイナミクスを支える楽器はどの様な
物理的基礎に支えられているのだろう。良い音だす楽器は倍音を豊富にふくむとい
われている（安藤 [2]）。しかし、単に倍音を豊富にふくむ音響振動を自励発振
するような音響デバイスならば技術的に設計すること将来は可能であろうし、コン
ピュータの助けを借りれば望むスペクトル構造をもつ音色を合成することもそれ程
困難はなさそうである。実際に、エレクトーンはそのような考えで生み出された楽
器であろう。この様な楽器は、望みの音を出すように制御されることを見越して設
計されているのだが、それだけでは古典楽器を知っている聴衆や演奏者を満足させ
きれないらしい。その一つの原因として考えられるのは、余りに制御性能がよすぎ
て、演奏者がシステムの一部として自分自身を深く楽器に侵入させることが出来な
いためであろう。言い換えれば、物理的機器としての楽器と、自分の間にある境界
があまりにはっきり確定されていて、容易に移動させることが出来ないためではな
いだろうか。

安藤
7

電子的に合成された人工的な楽器や初心者が扱い安いように作られたつるつるの楽
器は学校音楽教育やマスプロ的音楽教室では歓迎されても、差異を生み出したい演
奏家を満足させる事はないであろう。偏差をうみだす楽器が欲しいという演奏者の
要望を、竹内は（あえて！？）所望値とよんだ（竹内 [1]）。所望値はむろん一
元的なパラメーターではない。竹内は所望値という概念をもとにして制作段階での
楽器の物理的制御がある程度可能になる例を数多く挙げている。

管楽器を中心に議論を進めよう。管楽器は自分の声で歌うように演奏できることが
望まれている。逆にいえば、管楽器は単体では機能しない、つまり演奏者の技術に
よって表現容量を高めざるをえない。むしろそれを逆手にとった楽器である。管楽

器が演奏システムとして機能しているときには演奏者が管楽器に深くはいりこんでいる。その意味では、演奏家の演奏法との関連を抜きにしては所望値を設定することは不可能である。さらに、管楽器の特性は文化圏が要請する所望値を実現するように地域分化が甚だしい。§4でも触れたが、その典型例をおなじエアリード楽器であるフルートと能管の差にみることができる。エアリード楽器は空気振動自身がリードの働きをし、メカニカルな要素が少ない。いいかえれば、演奏者が吹鳴機構の一部として組み込まれおり、ヒューマン・ファクターが関与する割合が高い、という意味で興味深い。西洋楽器はハーモニーを重視するので、和音の安定性、したがって、音程の制御可能性や音色の安定性を実現するような装置に進化してきたといえる。これにたいして和楽器は能管に典型例をみるように（極端に言えば）音程の安定性を放棄して、音程間の遷移のひとまとまりを“単語”として、“間”を重視しながら“単語”をつなげることによって「喋る」ように演奏する（竹内〔1〕）。したがって、楽器としての構造は単純であり管体の構造は自然のままに近い。能管をおなじエアリード楽器であるフルート奏者が演奏した時のフーリエスペクトルがほとんど揺らがないのに対し、能楽家の演奏の場合、著しい揺らぎをしめすという観測事実（ニシ〔28〕）は極めて興味深い。フルートと能管の演奏法を比較してみよう。フルートの場合には、口腔はもちろん、上半身全体をキャビティーとするように吹く（若松〔29〕）。リラックスして、空間を音で満たし、ホール全体を響かせるように演奏する（若松〔29〕、竹内〔1〕）。これに対し、能管では、体で唱歌するように吹く。精神を集中して、体を緊張させ、音を床に叩き付けるように吹く。また、演奏者の息使い等の雑音さえも演奏上の力強さとして取り入れられている（竹内〔1〕）。能管演奏の習得過程では唱歌を学ぶことが重要であり、からだは自然に唱歌するようになるまでトレーニングを繰り返し、唱歌が過去の演奏の繰り返しでなく自分のコトバとして出てことが重要である（竹内〔1〕）。同じ、エアリード楽器であるフルートと能管の比較から分かるように、楽器に対する要求は民族の歴史や文化を背景にした音楽の形態によって大きな違いがあることが分かる。このような違いは楽器製造の立場から見れば極めて重要なファクターである。ただし、演奏者が自分の内部にあるイメージを楽器というデバイスを通して表現しようとする限りにおいては、演奏者が楽器に要求することには本質的な違いはないように思われる。

若松 7

若松 8

安藤 8

さて、実際の楽器製造の立場からみれば管楽器は、音程を正確に整える事ですら難しい楽器のようである。管体では内部形状や音孔を変えることにより、つまり境界条件を変えることによって、その中に封じ込められた空気柱の固有周波数を変化させることができる。しかし、重要なことはある周波数を変えるように境界の一部を

いじると、他の周波数も変動してしまい個別的に共振周波数を制御できない事である（竹内〔1〕）。したがってピアノなどと違って、周波数制御の詳細は演奏者に委ねられざるを得ない。その意味で不完全であると同時に、不完全さを逆手にとってそれを楽器の個性としてきたともいえる。楽器の詳細な制御が演奏者に任せられているために、演奏者の肉体と楽器をつなぐマウスピースとリードの役割は極めて重要である。井戸川の実験で示されたようにリードのくわえかたをわずかに変えただけでも遷移ダイアグラムに大きな変化がおこる（井戸川〔7, 8〕）。ダイアグラムの大きな変化は楽器の制御性を考えるとき大きな意味をもってくるであろう。もしかしたら、演奏者はダイアグラムの変化を体で覚えていてそれを演奏上のテクニックとして自然に利用しているのかも知れない。楽器を制御する演奏者の演奏テクニックや肉体的な特性は各自異なったものであり、各自の個性に合わせたマウスピースやリードの選択が楽器の制御をおこなう際の鍵になる（竹内〔1〕）。これは研究会の茶飲み話にでたことではあるがマウスピースの形状に凝り一生を棒に振ってしまった演奏家もいるそうである。実際の楽器製造の現場では、楽器の設計指針をあたえるような、かなりの半経験的、理論的事実が、管体の形状と共振周波数の関係やマウスピースの内部形状と音色の関係について知られているそうである（竹内〔1〕）。おそらく、井戸川の実験が示したような管体やマウスピースの形状に強く依存する遷移ダイアグラムの変化が動的な制御特性に与える影響をより詳細に議論することが可能になるならば、これまで半経験的に蓄えられてきた楽器製造のノウハウの非線形力学からみた意味付けが可能となり、ヒューマンファクターを含む楽器制御の問題に一石を投じることになるであろう。

若松
9

この節では演奏者が望む楽器について議論してきたが、そこからでてきた楽器と言うものの正体を一言で言うならば、何とも陳腐な結論ではあるが、楽器とはそれ自身では能動的な表現をするものではないが、演奏者がそれに深く入り込む事により無限の表現のバリエーションを実現しうる”何か”であると言えるのではないだろうか。

5. 3. 楽器の音色と演奏法

前にも述べた様に音を特徴付ける要素として音の強さ、高さ、音色があげられる。音の強さと高さは物理量として定義されるものであるが、その他の要素はすべて音色という言葉で表現されていると考えてよい。音色にたいする最も単純な考えは、音色とは定常発振している楽器の波形とみなすことである。これは力学的に見れば

アトラクターの性質を知ることであり、定常的に発振している波形の倍音構造や倍音間の位相ずれを調べればどうにか理解できそうに思える（ただし、エアリード楽器（§2）の所でも触れたが、定常波が弱いロッキングカオスの場合もありえるので倍音構造の解析はそれほどたやすいものではない）。したがって、楽器のもつ音色のパラエティーとはアトラクターの種類の多さや個々のアトラクターの境界条件に対する変形の度合であると考えることができる。特に、微妙な音色の変化は境界条件を変えることによりアトラクターの位置や形を変形させ波形に微妙な変化をもたせることでコントロールされていると考えられる。ところが、このようなカテゴリーでは音色を識別出来ない場合もある。安藤の著書によればピアノ、ギター、太鼓など、打つあるいははじくことによって演奏される楽器では、一般に振動は急激に成長し、頂点に達すると定常状態を経ないで減衰する（安藤〔2〕）。これらの楽器では時間的なエンベロープが音色の特徴になっており、一概に定常状態の波形が楽器の音色を決める要因とは言い切れない。また、定常的に音を持続できる楽器でも、発音の瞬間の立ち上がりの特性が、倍音構造以上に音色の識別上重要な楽器もある。一般に倍音構造が個々の楽器の出来や演奏法、演奏家の個性などによって大幅に変化する楽器や時間的なエンベロープに一定の特徴がある楽器では、時間的なエンベロープが音色の識別上重要になるとされている。その様な楽器にはフルートや金管楽器などがある。したがって、フルートや金管楽器では定常状態のアトラクターの構造だけでなくアトラクターに落ち込んでいく過程すなわちベイスンの構造が重要になると考えられる。一方、固定リードをもつクラリネット、オーボエなどでは倍音構造が識別上重要になる。

若松
10

この様に音色を物理的に特徴付けることは楽器個々の性質とも絡み合いなかなか一筋縄ではいかないものではある。しかし、それでも電子技術が発達した今日では、名器と呼ばれる楽器の個々の音を再現しうる事は可能であろう、そこで、人工楽器を使い再現された音をつないで演奏してみたらどの様になるであろうか？おそらくその様にして演奏された音楽はオルゴールを高級にしたようなものであり芸術的な意味での音楽には成り得ないであろう。若松によれば楽譜にある音符を演奏することとは、1つ1つの音を階段状に演奏するのではなく、音と音を曲線的につないでいく操作だという（若松〔29〕）。音と音をどの様につないで行くかここに技術的な面から見た演奏の本質があるように思われる。したがって、音と音の間の微妙なつながりを無視し単純に階段上に音を並べる様な人工楽器ではたとえ1つ1つの音がどんなによい音であってもぎごちないものに聞こえるであろう。また、音と音のつながり方は単なる音の前後関係から決まるのではなく、曲全体の構想の中から決められるべきものである（たとえば、同じフレーズを繰り返す場合でも演奏家おそら

若松
6

く個々のフレーズの表現に微妙な違いを求めているように思われる)。音と音をつなぐことを力学的にみれば、1つの定常的なアトラクター上で発振している力学系の軌道を境界条件を変えることによりアトラクターからたたき出し別の境界条件で安定なアトラクターのベイスンにのせることである(リード木管楽器(§3)の所で述べた無限次元空間上のアトラクターと軌道(ある時間間隔の間の波形を無限次元空間の中での点で表したもの)を思いだしてほしい)。演奏家は、音(無限次元空間上の軌道)をあるアトラクターから別のアトラクターへ遷移させる全ての過程において、境界条件をうまく調節することにより軌道が演奏が望む最適な状態になるように制御することを望むであろう。しかし、演奏家が境界条件をコントロールする肉体的な速さは、音波の発振周波数が100Hz以上である事を考え合わせれば、音波のタイムスケールでみた場合極めて緩慢であり、境界条件は瞬時に変化するものではなく、かなりゆっくりと変化すると考えられる。さらに、実際の時空スケールで系の挙動を見たとき、系のもつ多重時間遅れの効果のために、境界条件の変化の影響が直接すぐに波形の変化に現れるわけではなく時間積分の形で入るので、境界条件の変化に対して系は瞬時に応答するわけではない。したがって、制御を確実にするためには境界条件の変化にともなう系の次の挙動をある程度予知しなければならないであろう。これは、動的な境界条件を持つ系の予知を伴う制御の問題であり、現在のところほとんど理論的な解析は不可能な領域の話である。ところが、演奏家は肉体の鍛錬によりこの様なとてつもない制御問題を解決しているように思える。演奏家が何をしているのか想像してみよう。演奏家の頭の中には直感で捉えた理想的な曲のイメージがありこれを物理的なデバイスである楽器を使って表現しようとする。演奏家は楽器に演奏家の意志に従い敏感に反応することを望むが、敏感に反応するように設計された楽器はその表現容量を増やすことと引き換えにその敏感さ故に安定な制御性を失うであろう。その様な楽器を制御するためにはあたかも肉体の一部であるかのように楽器の特性を知り尽くし、次にくる楽器の挙動を予知しうることが必要である。また、楽器の境界条件を望みどおりにかえるためには楽器に接触する自らの肉体の挙動も完全なまでに制御する必要がある。その意味では、若松の言うように自らの肉体も音楽を表現す為の楽器である。おそらく、演奏家は、曲の持つ時間スケール、楽器の物理的な特性を制御するために必要な時間スケール、自らの肉体の持つ時間スケール等の幾つもの異なった時間スケールを同時に持ち合わせ、さらにそれぞれの相互作用とその結果による未来を予見しつつ最適の表現を模索しているのではないだろうか。若松が、演奏家には幾つもの時間が同時に存在していると述べた点に注目したい(若松[29])。

最後に、日本の能管の音色について触れておきたい(竹内[1], 安藤[2])。

§ 4 でもふれたように能管は故意に倍音構造を壊し演奏時に正確な音程が取りにくい様に設計されてる。能管の演奏では音程を正しく保つことはさほど重要ではなくむしろ連続的に音程を遷移させる場合が多い。この意味では、能管を特徴付けるものとして音程と音色の間の区別はおそらく無意味で音程も含めて広い意味での音色として捉えられるであろう。これは力学的に見れば明確なアトラクターの消失を意味してる。演奏者は境界条件を常に変動させることにより定常的なアトラクターをわざと消失させ疑似的なアトラクターを渡り歩く状態を作り出している様に思える。この様な事を可能にしてるのが倍音構造を崩した設計にあることは明白である。これは、究極の動的制御の問題であり演奏者の高い能力が要求されるものと思われる。能管の問題はエネルギー Spektrum が複雑な分布を示す量子カオス系の制御の問題とも関係がありこれから解決されなければならない最もおもしろい問題の1つではないだろうか？

6. 参加者からのコメント

1 章でもふれたように、1 章から 5 章が一通り出来上がった後に主だった参加者に回覧しコメントを頂いた。以下に参加者からのコメントを載せる。コメントは、特に必要ない部分（手紙の形態で頂いた方の挨拶等の部分）、こちらで整理番号を付けた部分を除き原則として手を加えないままで載せてある。この様なコメントを企画したのは楽器を捉え意味付ける場合、非線形物理学の視点からだけでは不十分であり、長い間楽器の研究、製作、演奏に携わってきた参加者からの意見の必要性を感じたからである。コメントを頂いた各氏の背景は、音響学、楽器製作、楽器演奏等多岐にわたっており、物理学を背景に持つ読者には、書かれた内容の真意が必ずしも百パーセント伝わらない場合も有り得ると思われる。これは、紙面を借りた著者と参加者の意見交換であり境界領域で議論を進める為の一つの実験であると理解して頂きたい。

注) 1 章から 5 章の欄外に手書きで例えば” 安藤 1 ”と書かれている部分は、安藤の 1 番目のコメントが指摘している部分である。

安藤由典（東京情報大学）

第1章

- 1 4頁下から5行： タンギングは1オクターブ下降跳躍する場合も使います。しかし洋楽ではとくに跳躍でなくともごく当たり前にタンギングします。そのことから考えて、タンギングはそれまでの振動状態を（ある程度まで）ご破算にして次の振動状態を歯切れよく立ち上がらせる技法といえるかと思います。

第2章

- 2 1頁下から7行： 多くの場合、よいと判断される音は倍音が豊富ですが、奇数次倍音が優勢であることがよい音の特徴のひとつであるのは、リコーダというバロック音楽、尺八という本曲（古典曲）の場合です。楽器を調べた限りでは、リコーダ音楽でもルネッサンス期については特に奇数次優勢でないもっとハーモニーしやすい音がよいとされたと推測されます。リコーダはルネッサンス期にはいろいろな音域のものを揃えたいわゆるリコーダコンサートとして合奏の楽器であったようですが、バロック期にはいって、独奏楽器として使われるようになりました。奇数次優勢の音がよいとされる理由はその辺にあるのではないかと思います。尺八でも、いまのポップス音楽に積極的に取り組んでいるような演奏家は奇数次優勢の音をよしとはしません。
- 3 2頁上から4行： 「柔らかい」境界を・・・とありますが、「柔らかい」ことが必要であるかどうかは確かめていません。必要なことは下唇に相当するもの、

つまり空気の吹き出し口と歌孔の手前のエッジの間を塞いで、空気の逃げがないようにすることです。塞いでないと、管内から戻ってきた反射波のショックが脇から洩れ、空気ビームに有効に作用しないのではないかと思います。この「下唇」にゴム板を使ったのは、吹き出し口と歌孔の向こう側エッジとの距離、つまり空気ビームの走行距離のある程度の変化に「下唇」が追従できるようにするためです。しかし、私が研究を始めるとき、教えを乞うた吉田雅夫先生（ご存じと思いますが、フルート演奏家の大御所で、日本における最初の世界的洋楽演奏家といわれた方です。）は「唇は絶対柔らかくなければいけない。だから下唇をめくって、内側の粘膜の部分を歌口台座に当てる。」と柔らかい必要を強調されていました。柔らかいと唇の面で発生するノイズがより小さく、音がきれいになることは考えられますが、それ以上のことは分かりません。ただこの吉田先生の下唇を大きくめくる口の構えは先生の大きく張り出した下顎があってできる極めて独特なもので、弟子たちがまねて困ると他の先生がこぼしていました。もし高橋先生の印象に「柔らかい」が残っているとすれば、この話を雑談的にしたためかと思っています。

4. 4頁上から2行： すくなくともこれまでは、位相情報は音色に関係しないというのが、音響学の常識になっています。ただし衝撃音のような音について、物体の振動からは発生しないような特異な位相関係にすると聞こえで違いが出るという報告を読んだ覚えがあります。

5. 5頁以降： 昨日電話でお話しましたように、スペクトル上の倍音を示すピークの成分とその間の成分との関係は是非調べて頂きたいと思います。ご連絡をお待ちします。

第5章

6. 6頁上から3行： 「予見」について何となく分かるような気がしますが、「＝直感＝リズムカルなもの」とくるとやはり意味がわかりません。またこれに関連して、演奏家のプロとアマの違いについて、色々な見方があると思いますが、私は次のように考えています。プロとは、お座敷がかかったとき、直ちに演奏で

きるレパートリーを常時相当に用意できている人で、たった一曲を如何によく演奏できたとしても、それでプロとはいえないと思います。練習を積み重ね、精魂を込めて行われたアマの演奏に打たれることはよくありますが、それだけでは、プロではありません。

7. 7 頁中程： 言われていることは全く同感ですが、ただ「余りに制御性能がよすぎて」とありますのは、やや違った見方をもっております。本当に演奏家が求めている制御性能の空間（これがおっしゃるようになかなかつかめないのですが）と電子的楽器の持っているそれとがずれているためではないかと思います。

8. 8 頁中程： 能管の音に著しい揺らぎがあるとのことは、私も興味があります。是非調べてみたいと思います。

井戸川徹（埼玉工業大学）

1. エアリード楽器にかんして：余計なことかも知れませんが、第1章の最後の頁に書いてあることに対して。エアリード楽器の物理に関しては、日本語なら、吉川茂さんの「エアリード楽器の物理と音色」日本音響学会誌、49、193-202、（1993）をお読みください。必要な文献も多数citeしてある筈です。

2. 楽器とは離れた話しになるが、聞くとこころでは、楽譜には音楽は半分程しか書かれていないらしい。であればこそ、演奏家には腕の見せ所がある。一つの曲を取り上げたとき、音楽の組み立ては別として、演奏家はどのような音を連ねているのか。また聞き手はどのような音の連なりをもってよしとしているのか。そのところが、測定値として示される程には明確でないと思われる。したがって楽器に対して要求される事柄は、自由自在に操れてその結果変幻自在な音を出し得ること、と言うような抽象的な表現になる。例えばクラリネットは、その音孔をすべて閉じたとき、D₃以外に、高い周波数の周期音のみを発生させ得ればよいのか、準周期音をも発生させ得た方がよいのか明確ではない。この辺がまずはっきりしないと楽器はどうあるべきかの議論ははじまらない。

3. つぎに、話しを楽器にもどすと、たとえばクラリネットの挙動をすべてシミュレートできたとしても、クラリネットを構成する要素の性質が明らかでない限り、シミュレーションに誤りが含まれる可能性は極めて大きい。管楽器の物理学は新しい局面に差しかっているのかも知れない。明らかでない事柄は数多くある、と言うよりは一つ明らかでないと言った方がよいかも知れない。以下のような問題を列挙するのは容易である。曲率を持つマウスピースフェーシング上での唇の圧力下におけるリードの力学、1周期毎に開閉するリードを含む音響系のインピーダンス、気柱を形成する管体をとおしてのエネルギー損失（管体からの音の反射）、気柱内における空気流の挙動、etc。

足立 整治 (ATR人間情報通信研究所)

1. 固定リード楽器では音のピッチ変化を得るためには主として管体にうがたれた音孔を開閉して有効管体長を変化させる方法が用いられる。また、アンブシュア (embouchure: マウスピースのくわえ方) を変えることによって異なる楽器共鳴モードに移り移ること (オーバーブロー) は発音音域を大きく (1 オクターブ以上) 変化させるため使われる。しかし、管体に対する条件およびアンブシュアを一定に保ったままでも、吸鳴圧を変化させることにより発振周波数を多少変化させることは可能である。一方、リップリード楽器ではすでに述べたように唇の緊張度を変化させることによりリード (つまり唇) の固有振動数を自由に調節できる。また、管体が長いので倍音列上に並ぶ楽器共鳴モードは密に分布している。このため、唇の緊張度を変化させ楽器共鳴モードを選び出すことによってある程度の音のピッチを得ることが可能である。バルブ (ピストン) 操作による有効管体長の変化は補助的に用いられる。
2. これについては、教科書的には一応の定説「倍音間の位相関係は音色に影響を与えない」(H.L.F. Helmholtz "On the Sensation of Tone" 2nd ed. 1885 reprint Dover 1954) があります。しかし、この意味するところは「音を質的に変化させない」(例えば、クラリネットの音をトランペットの音に変化させるといった程度のこと) というくらいに理解した方がよさそうです。実際には、倍音の位相関係を変化させた2つの音は似ていることは事実だが弁別可能だそうです。これに対して倍音のパワーの関係は変化させてやると音質は全く変化します。また、パワースペクトルと聴感覚とは対応が良く、例えば高調波成分を増やせば輝かしい音を得られるといった関係があるため、音色を比較する場合よく用いられます。2つの異なる波形自体を定量的に比較したとしても聴感覚と対応がつかないので比較が大変難しいと思います。例えば RMS で少なくとも距離は定義できそうですが、ある「良い音」から等距離にある2つの音は全然別の音色をもつ可能性が多分にあります。
3. ぜひ、この判定をされますことを期待します。我々のグループでも、自然楽器音の自然なゆらぎはどこから来るのかメカニカルな発音機構からか、流体力学か、あるいは演奏パラメータの揺らぎかを明らかにしたいと思っています。
4. 流れを非定常として近似する根拠は一応 Strouhal 数 (流れの加速度と非線型項の比) が小さいことにある。
5. "swinging-door" model における第1モード付近の励起はその共鳴周波数よりかなり高い発振周波数をもつ。これは第2モードのサブハーモニクスでの励起と理解すべき発振である。なぜなら、単純な線型発音理論はこの励起の存在を保証してくれないからである。
また、"perpendicular" model における第2モードの励起のうち周波数の低い一群は高い一群と別にブランチ形成している。これもやはり、第3モードのサブハーモニクスでの励起と理解すべきと思われる。S. Adachi and M. Sato, "Time-Domain Simulation of Sound Production in the Brass Instrument," J. Acoust. Soc. Am. (to be published)

竹内明彦（ヤマハ株式会社、楽器研究製作者）

1. 今回の研究会及び、特にこの原稿を拝見して、先日の研究会から今後更に楽器研究への新しい視点が確立されていく可能性を感じました。それは以下の点に、これまでにない新鮮さを感じるところです。

（1）人間（演奏者）から切り離れた楽器の特性からもう一步踏み出して、演奏者の意思が音楽に反映されるまでの過程が明かになりそうなこと。

（2）そのなかで、楽器のメディアとしての機能とその中味が明かになる可能性があること。

（3）演奏者としての所望値を達成する過程で、可制御性の低い（不安定であったり、カオス状態等に陥るような）、システムが介在することの意味が明らかになりそうなこと。

（4）演奏者が楽器の習熟過程において、何を観測し、何を制御しているかが明らかになりそうなこと。

（5）前項の延長線上に、楽器の新しい表現力を付加する上で、楽器の新しい機能として、何を加えたら良いかの方向が見いだせそうなこと。

（6）第（4）項に関連して、楽器のより効率的な教育方法や、その組立て方に言及できそうなこと。

2. 5.2の3 ページ目に書かれている「演奏者と楽器の境界の問題は最後の課題であろう。」の一文には、異論はないがコメントを差し挟みたいと思います。すなわち、「演奏者と楽器の境界の問題から出発して、音楽、楽器、人間の制御系などの関連を解きあかす立場があってもよいのではないか？」ということです。

（コメントに対するコメント（高橋、池田）：我々がヒューマンファクターの所で論じようとしたことはまさにここで竹内氏の指摘した事です。）

若松邦光（ヤマハ管楽器テクニカルアカデミー、フルート奏者）

送られてきた原稿を読み、同時に研究会のための草稿をひっぱりだして見比べています。演奏という翻訳により、初めて楽譜から音への、まさにこの世に“音楽という生命体”が産声をあげます。この翻訳というプロセスが他の分野でも応用(?)できる、生きざまの一つであること、音の安定性に対する、演奏上の多様性もしくは自由度・柔軟性という性格の異なるもの同志でのコントロール・多重安定性をどうするかという事と毎瞬毎瞬直面し、問題を解決している演奏という行為を知って貰えるチャンスでした。

別な言い方をすると、いかに安定した、不安定状態を保つか。演奏行為のみに目を向けてみると、ケストラー等の唱えた“ホロン”の概念は目新しい事ではなく、当然の作業としています。演奏の訓練を行うことで、人間の“ホロン”としての“何か”が掴み取ることができるのではないかと、思ったりします。

情報を処理せずに、そのまま全体をのみこんだままの状態で、つぎの信号を発することのできるシステム。これが異質な音楽の姿かも知れません。息の温かさが、聴衆にとっての(音楽上の)音の温かさになる事は、意と温度の関係もしくは、音が本来持っている性質(?)を暗示しているのかも知れません。

欧州は、昔は森林地帯が大半を占めており、順々に見えてくる物と物の足し算の関係を重視する思考パターンは、そこから引きずっている。西欧の音楽を考えるうえで近年まで多大な影響力を持ったデカルトの言う“外延”(EXTENSION)も同じ根から来たものと思われまふ。

「音楽と言うのは、静止という或決まった点に向かって収束する一連のインパルスに他成らない」(ストラヴィンスキー)と表現もできるが、これはあくまで、なめらかな連続して経過する古典的(?)時間を放棄する以前の話しであり、時間経過の仕方を異なる相として捉えてみないと新たな楽器の姿は見えてこないのかも知れない。

では、西欧と東洋ではどのように時間経過の捉え方に違いがあるのか? 等等、断片がつきからつきへと出てきてしまいます。

ページは「管楽器吹鳴の非線形現象とその解釈をめぐって」の概要のページを第一ページとしてある

以下コピー用紙の変わる度にページ数が増える。

従って 5.ヒューマンファクターは第36ページからはじまるものとする

【備考】タルコフスキーP161とは「刻印された時間」のP161を意味する

1. 【印象】P33 カオスの遍歴のイメージは音楽の解釈とのアナロジーを形成しそうでとても興味深くうかがった
カオティック遍歴と言うイメージについては、研究会報告資料の中の第709ページに表わしたように、訓練されたフルーティストのアンブシャールのAir Reedの概念図〈音が形成されるのを待っている状態〉が畳み込まれている感じと良く似ていると思っております。
三位一体の安定系の中から一つを除外した中抜きの状態です。横隣の音を選ぶか、すぐ下の音を選ぶかの素早い対応は訓練です。
従って、フルート吹奏時の遷移ダイヤグラムの作成は時間をかければ書き出し可能と考えております。又、文献として「マルチフォニック」の為の指使いが存在しておりますのでデータの置き換えを行えば十分に予想図は描けることと思われまふ。
音が十分にコントロールされて、響きを持った時、研究会でも申し上げましたように、音が口腔内に引き込まれるもしくは、吸い込まれてくる印象があります。このようなコンディションの時は、音が良く通ります。
ある系に引き込まれる、別の系と共鳴しあうのかなと、考えたくになります。

【5章 ヒューマンファクターについて [所感とコメント]】

演奏と音楽、音と人間の“共鳴”関係は楽器という、振動を発するものを媒介として成立する。“共鳴”若しくは“共振”が起こる時、そこに生ずる“場”をも解釈しなければいけないようにも思えてくる。振動という時、近頃思い浮かべる事は、“超ひも”である。

あまりにもスケールが違い過ぎて、音響世界に持ち込むことは不遜の呈を免れないが、琴線を響かせてくるイメージや位相関係が色という一面、畳み込みを行うと辻褄が(?)合うらしい事を共に考えると、(言葉の上での類似?)響き合う感覚ととても類似していて親しみを覚えます。

時間の進行についてフーリエ解析の時は、「繰り返し」と見做して時間の相は考えの外に出されたかのように見え、これをもって“音”とすると言われても納得感がない。音一つで泣いてしまう事もあり、何かしら、生きた音のサンプルを探して見たい気がする。音楽の存在価値はどこにあるのか?

工学的意味の情報伝達の“同時性”を超えて、人の心の中へ韋駄天走りで生命の情報を先取りして伝える(以心伝心する)のが音楽の役割ではないか?

“音”を解釈して意味を理解する“言葉”には乗せることの出来ない“何か”を運ぶものが音楽といえないか(?)

時間のみの事を考えると、音楽に使っている短い音符は運動性が大きく、長い音符は運動性が小さい。(当然のことながら)時間はこの逆で短い音符のものが短い。しかし、短い音符の時、弾むように、ボールのように、球のようになっていないと人は何故「何かおかしい」と感じるのだろうか?

もしかして、時間の短さは空間内での運動の“曲率”が大きいことを意味し、時間が長いとは運動の“曲率”が小さいことでは無いのか?

だから時間の長さや音の丸さとのアナロジーの原型を本能的に持っている(?)者にとって居心地が悪く感ぜられる。

それでは、居心地の良い運動とはどんなものなのだろうか?

現在の時点で考えられる仮定は、おそらく対称性を何らかの形で有する運動と言えるのではない。類似とは、一つの対称性とも考えられる。音を何らかの形で“繰り返す”事ができ、その姿が浮き彫りになった時、音楽のなかに超(?)対称性が存在する事が証明されるのかも知れない。

音と音のつなぎ方を曲線で表現するのは自然であるが、これは音と音の束の中心同志をつなぎ合わせても音楽には成らないという事と同位で有る。逆に、音と音の境界面での運動方向への繋ぎ方に重要性が有るということである。一次元の鎖をどのように連続させるかというのと似ている。時間が分散系に属しているとする、音は一つの群と考えられ、外側と内側の進行速度が次第に異なり始め、惑星間の弾道飛行の様子を呈す。これが、局所的に見た時の、音と音を連続させる小宇宙のイメージが以上です。

又、音をただ単に発音しただけでは音楽に成りにくい、発音の時、予め持っているイメージを送り込むと聞き手には何らかのメッセージが加わったと理解してもらえ、このような場面に多く遭遇する者の一人として、一つの仮説を述べてみたい。

発音に要する“音波”とメッセージを伝播する“音波”とは別者なのではないか。但し、ほぼ同時に、存在するので判別が付きにくい。若しくは、何らかの異なる位相関係を成しており姿が見えにくいのではないか(?)あるいは、信号の空いているところに(非科学的な表現ですが)身を潜めているのかも知れない。

2. タンギングについて

発音の際 P6 にもタンギングについて記述があるが、演奏上のイメージを考え合わせ、とても興味深く読ませてもらった。

元々が、発音を明瞭にするための“子音”によるきっかけ作りであったと思われる。従って、俗に言われている [t] [d] [k] によらなくても [p] (P の発音の際にとっても有効) や、[l] (早いパッセージの時とくに有効) 等の他の子音も多用します。

お聞き及びと思うが、西欧では頻繁に並べた子音を如何に早く正確に発音するかが早口言葉の練習の眼目になっている。管楽器の音の素早い発音に際し、当然言葉の上での共通事項を利用したものと思われる。子音とは、CON-SONNE (仏) KON-SONANT (<Mittlauter)

(独) であり響き (-SONNE; -SONANT) を伴った (CON-; KON) 物、ですから概念の重さは“響き”の方に傾いているわけです。フォルマンに相応した“子音”を発することで音のイメージをメッセージへと導き出していると考えられるような気がします。

フォルマンの領域を予め決定するのが演奏家の音楽すること以前の事です。このフォルマンを考えると真先に思い出すことは「真言」であり「ホーミー」です。

或る音を発することで宇宙と一体ともなれる。持続する低音(もしくは基礎となる音、西欧で言うドローン音—開放弦による持続音)と高調波が響きあう世界。この世界が醸し出すものは、時には人間と動物との魂が触れ合い(モンゴルの草原で歌われるホーミーの響きでラクダが涙を流す光景がみられる)共鳴周波数何らかのメッセージを発していると考えてもおかしくないのではないかと。

言語は、生物の空間・時間を超えて新しいパターン、意味の中にあるパターンを提供するが、常に“分別”により引き裂かれてしまう。

これに対し、音楽の音は、外界からの感覚入力の変化を、自分の知覚の変化であった外界が、全く別のものになったわけでは無いと“解釈”する事ができる仕組みにより、一貫した秩序を生命に与えている。

3. P36 「繰り返し」

時間は空間より独立しており、韻律的でもあると考えた聖アウグスティヌス以来、「繰り返し」は、存在しないことを人は知っている。しかし、類似のものを見いだせないとき人は、不安を感じる。この不安を取り除くために、西欧では、「近似」していれば「繰り返し」ている事と見做そう、とした。秩序と無秩序のどちらの側に力点を置くか、矛盾を内包しつつ調和の取れた統一体が如何に音楽の中に出現するか、が西洋と東洋の文化の差となった。

芸術家の仕事とは、自然界から背景 (sol) と前景を“分ける”こと。(EX-PRESSION の EX- が“外へ”の意味をもっている事と同位)【ベルエボックとモイーズ P10 より引用】

4. P36 「どのような観点から対象を眺めるか…」

光と影の扱い方と同じ。解釈する学問が必要(?)。故に解釈をシミュレートしながら生きた時間を体験する音楽は、再び重要な役割を担いそうである。【クラインの壺 参照要】
【ベルエボックとモイーズ P132 参照の事】

5. P38 「当時の細かいニュアンス」を知るには、当時話されたであろう言葉をはじめとする、文化全般を眺める機会があったら音楽と情報論を改めて見比べてみたい。

タルコフスキーP161&162

「観察は正確で具体的であるほどそれだけユニークなものになる……」

「対象は外部から、外側から、傍らから熟視するときの、芸術家の驚くべき能力で在る。これは例えばバッハやトルストイの様な芸術家に固有な、世界を上から見るまなざしである。…」(下線部若松)

ここで言う、観察、熟視は Marcel Moyse の言う「芸術家にとってもっとも大切な才能は、観察する能力」と言った observation や réfléchir であり、また Bergson の言う「時間とは仕上げの仕事」という élaboration と全く同じこと(「ベルエボックとマルセルモイーズ」私家版P122&123 より引用)を映像について述べている。

タルコフスキーは又P144 で「作業の痕跡を消し去る迄努力し続けなければならない」

(「ベルエボックとマルセルモイーズ」私家版P83&154 より引用)と、ヴァレリーの同じ言葉を引用している。モイーズと共に時代を生きた思想がタルコフスキーのなかに、息づいている事を知りとても感銘している。

6. P45 「音と音を曲線でつなぐ…」

音と音の間に音楽があると我が師マルセル・モイーズが語っていると研究会で述べたが、音と音との相互関係についてモイーズの見解を補足しておきたい。

「リズムには form と value の為のものがある」(1971.12.07 Marcel Moyse)

モイーズの著書である「De la Sonorité」の中にも述べられているが、旋律を形成する個々の音の中には(同じ音価のように記号されていても)時間の窓の具合により長い音符を意味するものと、ただリズムを刻むだけの(若しくは旋律線を満たすだけの)音符がある。一方はリズムの自律性を持続させることを目指しており、他方はリズム相互の調和性に関係してくる。音を局部的に捉えると以上のような状態であるが、

曲全体を見渡すと、自律のリズムは曲という（若しくは旋律という）系の状況に依存しており、様々なリズムを集めリズム間に適切な相互作用を与え、一定の位相関係を保つのが曲を演奏する時の“解釈”の仕方である。

見かけ上の音符を長い音符や短い音符として認識させるために、音の立ち上がりの（Violin の喩えで言うと、どのくらいの長さの弓をその音に使うか）のゆらぎ（？）の形が、その性質を左右する。これはまさにリミットサイクルの性質と同じではないのか？

一方、一定の小節の運動のリズムは、この長さの異なる時間の窓を表わすために小節という塊全体が統一したリズム（又はパルス？）を作りながら伸び縮みを始める。この伸び縮みが無い音楽は、人々に冷たい印象、きこちなさの印象を与える。このきこちなさは「引き込み」が行われない時に起こると考えられる。

此にリズムの集合体としての音楽と生物とのアナロジーがはっきり見えてくる。このことは「音楽する」事で生物として持得たリズムを再学習していると考えてもよいのではないか。若しくは、「音楽とは生物としての自覚である」とでも表現すべき物であり、世界津々浦々迄音楽が見いだせる所以ではないか。

音楽は生物の原初の姿を直感させてくれる「時間という乗り物（ベルクソン）」なのではないか？

個々の音の繋がり方（若しくは繋ぎ方）は、情報ネットワークのシミュレーションとも取れよう。

交流性と互換性が含まれ（例として、フレーズの最後の音が次のフレーズの始まりの音等の例も見られ）点の内側に既に線が萌芽しており、その生きた音は情報の伝達に寄与する。このような「次に続く部分を予見させるような運動」にベルクソンは“優美”という言葉を授けている。

【ベルエボックとモイーズ P35より引用】

音を考えると、前（未来の方向）にしか音はないと考えるが、音楽を聴く者にとって、過去の音が重要な情報ともなっている。此事は、“時間”とは、未来に向かって存在しているだけでなく、過去の方にも拡がっていると考えるもおかしくないのではないか。現在という時の“種子”は、双方向の時間情報を持っているのではないか？

こちら側からしか、考えないから時間は一つの次元に統一したがるのではないか？

例えば、マクロ的に見た仏教の中には、異なる時間の考え方が多く見られる。地上の世界と仏の世界、更に奥の三千諸佛の世界には、様々な階層によって時間の流れが次第に緩やかになってくる。幸福という断面で捉えてみると、仏の世界ではゆったりと流れる世界があり、地上界の時の流れに翻訳すると、形相が突然変わり瞬時の事となる。複数の時の流れがあると考えれば、あっという間に、たのしい時間が経過するイメージはより鮮明になり、複数の次元を量み込んでいるのが、時間という“乗り物”の様な気がする。

西洋音楽の基盤である音階の成り立ちは

ド レ ミ ファ | ソ ラ シ ド
全 全 半 全 全 半

お解かりのように同じ音程（音の隔たり）の要素の組み合わせのグループが、二つ、くっついた物です。此には、“重ね合わせ”の思考法と導音（ミ→ファ；シ→ド）解決のダイナミック（牽引力）と安定性（支配力=Dominant）が存在しています。

タルコフスキーP179

「モンタージュは、異なる密度や同じ密度の時間を内包する大小の断片を繋ぐこと」と語り、モイーズは、音符の一つ一つの密度（intensité と呼んでいる）、内包する時間の密度に応じてフレーズを繋いで行くことを大切にすることを教えた。

「充実した音は、音の物理的大きさではなく Intensité に有る」(1971.12.10 Marcel Moyse)

◎西洋音楽の為に書いておくと、ハーモニーを伴った旋律基盤を持つ西洋音楽がこれほどまでに世界中に広がっている事実は、この体系の中に何かしら“普遍性”が存しているからではないか？（ジャズ等も含め）

・これに反して、日本音楽などの東洋発祥の音楽は、地域性が強く何らかの偏向が有り、これが文化的特徴なのか？（キリスト教という宗教による伝播性を除外しても）

・この“傾き”は、新しい展開の素材となりえたが（20C 初頭のジャポネスクを考えても明らかである）、言語上“傾き”を意味する言葉を忌み嫌う西欧社会が、果たして“利便”“能率”を目指してきた方向性を転換できるか？

時間の直線的流れを、人間の生き方に同化させてきた文化は、（今日その流れに疑問符を付けはじめる前に）“音響”という、“場”の設定の方に逃げはじめています。

“流れる”ものから“留まる”ものへと方向性(?)を変えて来つつある。

①物理的な意味のハーモニーが生物に対して、良い影響を与えており、

活性化を促す役割を担っている

②ハーモニー（音の）積み重ねが、何らかの構造物と同位を占める

③響き合いが、相互交流を促す

これら上記の事柄は、ハーモニーの存在の有無を左右しそうである。

流れと共鳴性が西洋音楽の特徴であり、このことがコヒーレントをもたらす。生物の生命の振動や情報の伝達において等価とも言える。

東洋におけるハーモニーの無さは、物理的な意味合いでの切り口を言うならば、イエスと言える（が、西洋の道具を持ってきて東洋の物を切ってみせるのは、問題有り。

言語学にも言えることで、西洋の分類法（文法等）を使って様々な民族間の言語体系を統一した見地から解明しようとした時期もあった）

“そのものの自体”を大切にすれば、パラダイムの変更を考慮しなければいけなくなるだろう。

生物間の、自然の中に「生きるもの」としての相互作用を考えると、自然との調和した生き方が“好ましい”と考えたい。個体同志が自己主張しても、その調和の“破れ”は無い、そのような切り口から見るかぎり、旋律が響き合うことこそが重要であり、この“響き合い”は必ずしも“重なり合い”で在る必要はない。

しかし、このことを別の角度から考えると、西欧においては、1714年タルティーニが、差音の発生を確認しており、 $1+1 \rightarrow 3$ と言うように重ね合わせにより、更に別の可能性を産み出す、「足し算」の思考法が定着していく。

ご存じのように、バロック時代の数学に微積分が登場している。

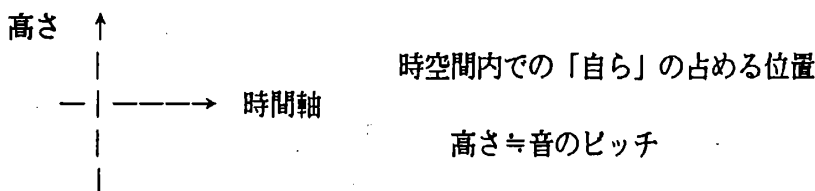
重ね合わせたときの“差” (differentia) (Leibnitz) が音楽の上で次第に現実となっていく。

西欧の生産性の考え方を振り返ってみると、必ず新たな子供を生むもしくは増やす事が必要とされる。なるべく多くのもので「空き」を満たすブシケの考え方が此でも甦ってくる。長い音符を細かい音符で満たしていく。バロックの装飾法が良い例である。

「空き」のままが良いとする日本の場合、“縁”があつてその場に登場しても良し、縁無くて控えていても良しとする“空くし” (美し) の意識がある。

7. P43 和音の安定性

座標系内での安定性



8. 1.12 「音程間の遷移のひとまとまりを“単語”として、“間”を重視しながら“単語”をつなげることによって「喋る」様に演奏」するのが和楽器。だけではないことも留意しよう。

西洋における音楽も、「語り・喋り」から発生しており、ブロンディーという形で今なおフランスの国語の授業等に存続している。音程の安定性と、言葉の上での単語発音のピッチの上下動が相関していることは民族間に共通していることである。

旋律線と言葉が一致していることは、西洋においてあまりにも当たり前の（わざわざ書き記す事は意味がない）ことなので、我々外国人にとって、この情報が元々存在している事を見落としてしまう危険がある。

9. P44 音の遷移ダイアグラムは、演奏家は当然熟知していると考えてよい。

楽器の演奏家とは、声を出さない「声楽家」である。

この声を出すエネルギー若しくは情報としての発音は楽器の演奏上重要なことである。と同時に、生物界における“信号”の授受とアナロジー関係を見いだせる。池田氏への私信のなかにも述べたが、巢から落ちたスズメの飼育観察で得たことは、仲間と生活していないスズメは、人間の言葉（若しくは、雰囲気）を理解する。しかし、仲間と合流した時点で人間との間に存在していた(?) 琴線が切れる(?) のか、閉ざされる(?) か、ゆるむ(?) かして相互交流は成立しない。我々人間が失ってしまったセンサーが未だに他の生物には保存されていると考えざるを得ない。

和音の概念は、デカルトの時代に、ほぼ始まっている。“外延” (EXTENSION)
“きわ” からの拡がりの発想は全体の相を観るには、既に不適切になってきている。
中心和音の喪失により、和音によるダイナミックはその玉座を失いつつある。

10. P45 「アトラクター上の音色のバラエティー」の見解にはとても同感する

同じように演奏しようとしても生ずる差異は、やはりアトラクター上をさまよう (?) 制御されたエネルギーから来るのでしょうか (?) どなたかお教えいただきたい。

.....

【質問1】時間遅れのオーダーは、神経細胞のバース応答のオーダーとどのくらい違うのか?
お互いの単位オーダーに比例関係見たいなものは成立しないのか?

【質問2】人間の本当の交流は、言葉を離れたところに始まるのであろうか (?)
cf. タルコフスキーP17 「感覚とイメージによる交流が存在する。このように接触において、
分離が克服され、境界が破壊されます」
cf. タルコフスキーP38 「真の芸術的イメージは、つねに理念と形式の有機的結合である」

.....

謝辞

本報告を書くにあたり、モレキュール研究会参加者各氏から多くの助言を頂いた。特に、安藤由典教授、井戸川徹教授、小島時彦博士、足立整治博士、竹内明彦氏、若松邦光氏には貴重なコメントを頂いただけでなく、多くの有益な議論をして頂いたこれら各氏に深く感謝したい。

また、楽器を題材とし境界領域に属する多少風変りな研究会の開催を快く承諾して頂いた京大基礎物理学研究所にもこの場をかりて感謝致します。

文献

- [1] 竹内明彦： 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 Vol. 62, No. 5(1994)684
- [2] 安藤由典： 「楽器の音響学」(音楽之友社, 1971)
- [3] M.E.McIntyre, R.T.Schumacher and J.Woodhouse:
J. Acoust. Soc. Am. 74 (1983) 1325
- [4] J.W.Coltman: J. Acoust. Soc. Am. 92 (1992) 69
- [5] 安藤由典： 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 Vol. 62, No. 5(1994)612
- [6] 安藤由典： 「楽器の音色を探る」中公新書 No. 526 (1978)
- [7] 井戸川徹, 小島時彦： 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 Vol. 62, No. 5(1994)620
およびこの文献で挙げられている文献リストを見よ。
- [8] 井戸川徹： 物性研究 Vol. 55, No. 2(1990)154
- [9] 池田研介： 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 Vol. 62, No. 5(1994)601
- [10] 足立整治： 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 Vol. 62, No. 5(1994)664
- [11] 小島時彦, 井戸川徹： 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 Vol. 62, No. 5(1994)652
- [12] 橋崇哲, 高橋公也： 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 Vol. 62, No. 5(1994)642

- [1 3] N.H.Fletcher and T.D.Rossing:
"The Physics of Musical Instruments"
(Springer-Verlag, New York, 1991)
- [1 4] H.Levin and J.Schwinger: Phys.Rev. **73** (1948) 383
- [1 5] G.R.Plitnik and W.J.Strong: J.Acoust.Soc.Am. **65** (1979) 816
- [1 6] R.Causse, J.Kergomard and X.Lurton:
J.Acoust.Soc.Am. **75** (1984) 241
- [1 7] R.T.Schumacher: Acustica **48** (1981) 71
- [1 8] J.Backus: J.Acoust.Soc.Am. **35** (1963) 305
- [1 9] T.Idogawa, M.Iwaki, T.Naoi, M.Shimizu:
The paper had been prepared for private circulation in
The 2nd Joint Meeting of ASA and ASJ, Nov. 1988
(unpublished)
- [2 0] K.Ikeda and K.Matsumoto: Physica **29D** (1987) 223
- [2 1] H.J.Zhang and J.H.Dai: Opt.Lett. **11** (1986) 245
- [2 2] J.Backus: J.Acoust.Soc.Am. **60** (1976) 470
- [2 3] 竹内明彦: 管楽器解説 (1) 歴史・音楽・音響概論
(ヤマハリベアスクール教科書<非売品>,
昭和52年3月1日発行; 日本楽器製造株式会社)
p146
- [2 4] 足立整治: 私信
- [2 5] A.H.Benade and E.V.Jansson: Acustica **31** (1974) 80
E.V.Jansson and A.H.Benade: Acustica **31** (1974) 185
- [2 6] P.Davis: 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 **Vol. 62**, No. 5 (1994) 675
- [2 7] D.Z.Anderson and M.C.Erie: Optical Engineering **26** (1987) 434
- [2 8] マリア・クリスティーナ・M・ニシ: 「フルートと能管」
パイパーズ第8巻9号10号に連載
1989年5月, 6月号 いずれもp74~p79
- [2 9] 若松邦光: 研究会報告「音響系・光学系におけるカオス」
物性研究 **Vol. 62**, No. 5 (1994) 697
および若松との私信
- [3 0] A. タルコフスキー: 「刻印された時間 映像のポエジア」
(鴻英良訳) (キネマ旬報社, 1988)