

その結果の中で、特にカオス研究者にとって関心があると思われる2条件は、唇と、空気ビーム方向の偏向 (Fig. 2の偏心距離) である。

ア) 唇：人間が吹奏する場合は、唇の存在が前提であるが、これがないと、すなわち吹管だけで鳴らすと、低音域 (管に半波長が乗る発振) 1オクターブのうち、最低音 (c^1) から約1/3オクターブが鳴らない。これにアメゴム製の下唇をつけると1~2音鳴る音が増加するが、なお2~3音は、きわめて小さい流量でかすかに発音するのみである。しかし、上唇もあわせて装着すると、はじめて最低音まで mezzo piano 位の音量まで出すことができる。なお、上唇の断面半径 (Fig. 2参照) は、5mmまでは大きい程、低音をより大きい音量で鳴らせるが、中、高音域では2mm以下がよい。

イ) 空気ビーム方向の偏向 (偏心)：この条件は演奏家が吹く“角度”と認識している条件の一部である。“角度”には空気ビーム方向と歌口開口面との角度も含まれるが、これは発生音に影響がない。影響するのは、この偏心と、唇が歌口開口面に触れ被さる度合いが歌口の呈する音響質量に影響することの2点である。

偏心について最も興味深いことは、その値が低音域 (第1モードの発振) と中音域 (第2モードの発振) との間の吹鳴可能な流速限界を左右することである。Fig. 3は偏心 (e) に対する倍音 (d^1 音--最低音は通常 c^1) の吹鳴可能な最大流速 (U_{max})、その時の発生音圧レベル (L_{max} - 歌口上方2cmで測定) の例である。ある e において流速を漸次上げて、図の曲線の値を超えると、中音域に1オクターブ跳躍する。その間、特に低い音ほど不安定な準定常状態が現れる場合が多い。また、ヒステリシスがあり、中音域で吹鳴状態から次第に流速を下げると、図の曲線より少し低い流速で、低音域に跳躍下行する。この場合も、準定常状態が観測されることが多い。図上、 U_{max} の最小値は $e = -0.8\text{mm} \sim -1.2\text{mm}$ にあるが、尺八、縦笛などの縦吹きの笛では、0mm近傍にある。横吹きの笛の場合、歌口エッジで上下に分かれて、

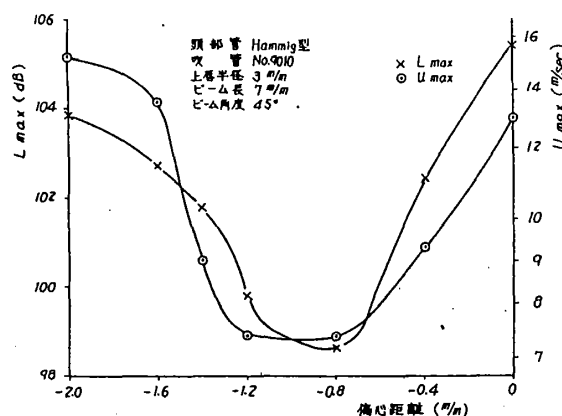


Fig. 3 最低音域における吹鳴可能最大流速 (U_{max}) とその時の音圧レベル (L_{max}) との偏心による変化 (d^1 音による)

管内に流れる気流の直流分が歌口直下で管内壁をひとまわりして、歌口より吹出し、空気ビームを平均的に外方に曲げるため、吹出孔における方向で測ると0mm近傍から内方 (e の負方向) にずれると考えられる。

偏心のもう一つの注目すべき作用は、偶数次倍音と奇数次倍音の勢力比を左右することである。以下、この値を偶数次倍音と奇数次倍音の各レベル算術平均値差 ($Le - Lo$ dB 低音域は2~7次、中、高音域は2、3次) で表し、またその逆の表現になるが、奇数次倍音の優勢を表す言葉として“Odd-Dominant”という語を用いる。

Fig. 4は、偏心に対する $Le - Lo$ の変化の例である。このような倍音構造の変化は、偶数次倍音のレベルが偏心に対して、Fig. 4と同じバタンの変化をするため、発生音の波形を観察すると、 $e = -0.8$ mm近傍では、波形

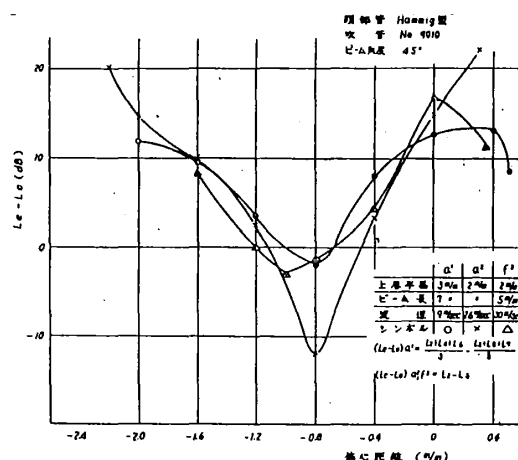


Fig. 4 偶数次倍音と奇数次倍音のレベル差 $Le - Lo$ の偏心による変化 (a^1 , a^2 , f^1 音)

がほぼ上下対称になる。この $Le - Lo$ の音色に与える影響は、たとえばクラリネットとサックスの音色の違いを想い浮かべるとわかる。両者はほぼ同じリードを用いるが、前者は管形が基本的に円筒 (閉管) であるのに対し、後者は円錐形であるため、前者は低偶数次倍音がきわめて弱く、他楽器との合奏で目立つ音色であるのに対し、後者は偶数次倍音はとくに弱くなく、他楽器音とよく融け合う音色である。フルートにおいて、この $Le - Lo$ 値が演奏家による音色個性の重要な因子であることを、この研究のあとで見出した⁽¹⁰⁾が、後述するようにバロック音楽向きのリコーダ音、古典曲 (本曲) 向きの尺八音では Odd-Dominant が望ましい。なお、偏心に対する $Le - Lo$ の変化については、解析を行った研究がある。⁽¹¹⁾

1.2 フルートの望ましい歌口形モデル⁽¹²⁾

前項の研究の次の段階として、駆動条件と発生音の関係が、フルートによってどのように異なるかを明らかにすることを考えた。そこで、演奏家や製作者にフルートの構造において、どのような問題点があるかを問うた。その結果、管体については材質という大きな問題がある

が、形状としては、特に歌口の形が演奏感にきわめて大きな影響があるにも拘らず未だ定形がないとのことであった。このことから、着目点を歌口形に絞り、わが国のフルート製作の創始者であった松村フルート製作所の松村氏の協力を得て、13個の様々な形の歌口について調べた。

Fig. 5 上図は、歌口形を記述する主なパラメータの平均値 (No. 0) と各歌口の偏差 (%) で、図中の M、H、P は著名な外国品である。M は東独 (当時) の H. Hamig、H は米国の Heynes、P は英国の Powel 社のものである。下図に具体的な断面形 4 種と各パラメータの平均値から製作した “平均形 (No. 0)” を図示した。

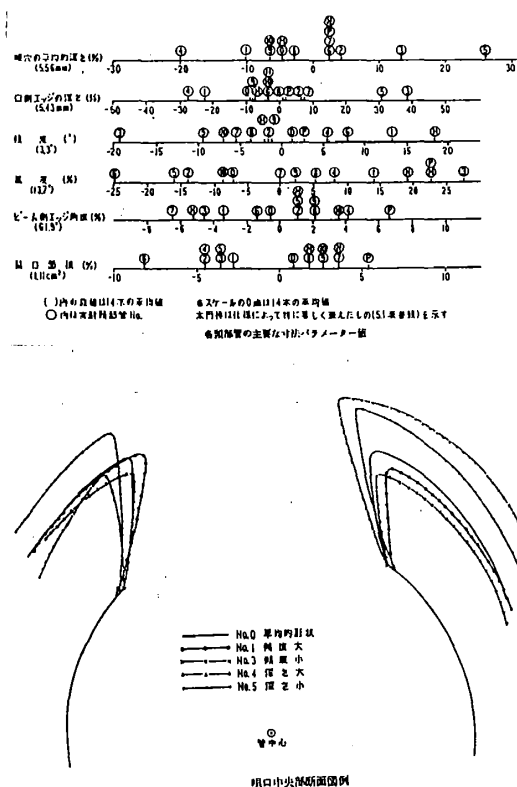


Fig. 5 歌口形状を表すパラメータ値と歌口断面図例

さて、これらの歌口 (実際には同寸の頭部管にそれぞれ装着されている。) をパラメータとして駆動条件と発生音の関係を逐次調べた。その結果、きわめて重要な 1 点を除くと、予想に反して、ほとんど差がなかった。すなわち、全 13 本は、諸駆動条件それぞれについて、吹鳴可能限界値近傍を除いた安定に鳴る範囲の値ではほとんど差異がない。しかし、重要な点とは、Fig. 3 に例示した最低音域における e と U_{max} の関係の差異である。Fig. 6 に代表例を示す。No. 1~5 は Fig. 5 下図に例示した断面形のデータであるが、No. 1 と No. 3 について Fig. 5 上図で拡張値をみると、いずれも拡張度が高いが、平均的深さでは No. 1 がやや小、No. 3 はかなり大である。

まず、No. 4 と No. 5 で平均的深さの相違の影響を考えると、浅い No. 4 では曲線が比較的上に、No. 5 では下にある。「歌口が深いと低音が鳴り易い」という吹き易さの低音域一中・高音域のバランスは歌口の深さによると推測される。次に No. 1 と No. 3 を比べると、曲線のパターンは類似しており、 $e \leq -1.6\text{mm}$ の U_{max} が大きい範囲から $e = -1.0\text{mm}$ 近傍の U_{max} が小さい範囲に至る変曲が急で、傾斜が立っている。しかし、変曲する e の値は No. 1 では -1.4mm 近傍であるのに対し、No. 3 は -1.2mm 近傍であり、低一中・高音域のバランスでいうと、後者は比較的低音にバランスが寄っている。これらのことから、拡張度が高い場合は、 e の比較的小さな変化で、低音と中・高音域を吹き分けられると推測される。また、その吹分けの境界となる e の値は No. 1 では約 -1.4mm 、No. 3 は -1.2mm と異なるのは、歌口の深さの違いで説明できそうである。

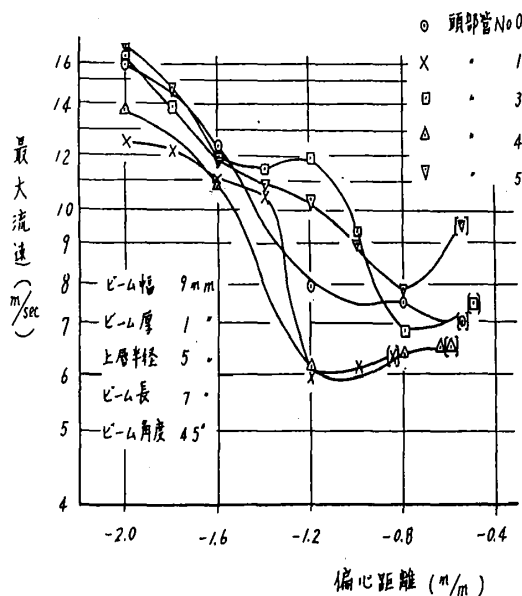


Fig. 6 U_{max} と偏心の関係の歌口形状による比較

もし、拡張度についてのこの推測が当たっているとすれば、演奏における運動性の確保からいって、拡張度は大きいことが望ましいと考えられる。そこで、このような推測から、Fig. 7 の太実線で示すモデルを設定した。細実線はこのモデルに基づいて試作した歌口形で、大体、モデルに合致している。Fig. 8 はこの試作品と No. 0 について、 U_{max} 、 L_{max} 曲線を比較した図で、上述の推測通りの結果が得られている。なお、この結果に到達した後に、改めて Fig. 5 上図の、M、H、P の深さと拡張度をみると、3 者が共通して、このモデルに近い値をもっていることに気付いた。また、蛇足ではあるが、このモデルの発表以前、わが国のフルートの歌口形にみられていた大きな相違は、少なくとも外見上無くなり、このモデルをベースに形どられるようになったようである。

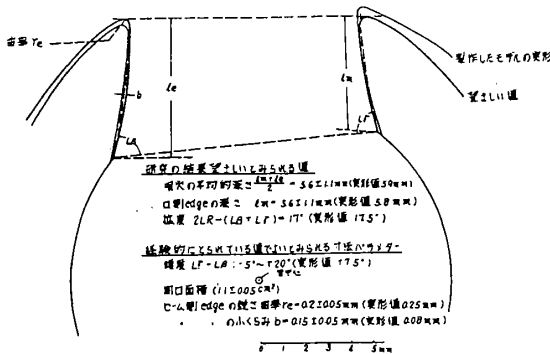


Fig. 7 望ましい歌口形状の仕様とこれに基づいて製作したモデル頭部管歌口の実形

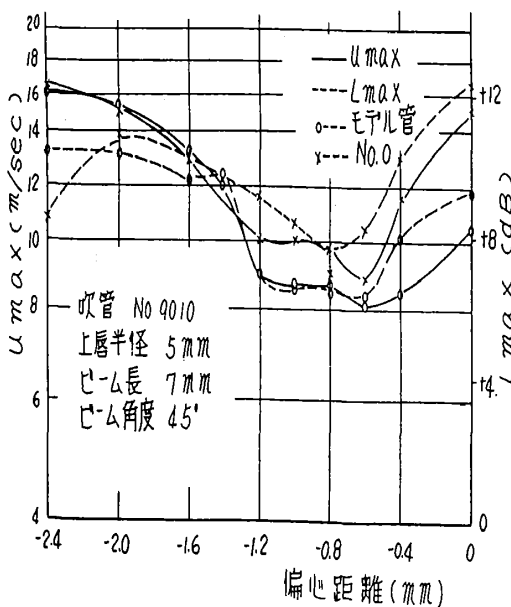


Fig. 8 モデル頭部管における最低音域 (d' 音) の U_{max} と L_{max}

以上のように、製作という実用面では収穫を得たが、何故、歌口が深いとバランスが低音域に行くのか、また拡張の影響はいかなるメカニズムによるかという物理的疑問は今も残されている。

2. リコーダにおいて望ましい倍音構造を得るための構造

2.1 研究の動機

リコーダを研究対象とした動機は、前章に述べたフルートの駆動条件と発生音物理量との関係の研究結果から、興味をそそる一つの疑問が生じたことにある。それは、倍音構造において、偶数次倍音と奇数次倍音のレベル差 ($Le-Lo$) がもたらす音色感に関して、製作者、演奏者に明確なイメージがあるのではないかと。あるとすれば、どのような値であるかということであった。この Odd-Dominance は、フルートでは、演奏家の音色個性を決定する一つの重要な要素であり、2名の対称的音色をもつ演奏家の演奏音において平均10dBの差異がみられた。

(10) この $Le-Lo$ を支配する駆動条件偏性は、フルート、尺八の場合、楽器に対する顔の角度で制御できるが、リコーダでは Windway の歌口エッジに対する位置関係で決まり、変えられない。したがって、リコーダでは、Odd-Dominance に関する音色の変化幅の中で、ある音色を選び、それを得るよう構造を定めている筈である。視点を変えれば、「よい音」に対する明確なイメージが存在する筈であり、これに対応する音の物理量を明らかにすることに強い興味を覚えたのである。

2.2 望ましい倍音構造

まずはじめに代表的なリコーダ演奏家4名について、よい音色の定まったイメージがあるか否かを調査した。その結果、たとえば「バロック音楽に」望ましい音色」のように、演奏する音楽の時代を限定すれば、定まったイメージが明確にあるということであった。そこでバロック期は、リコーダが独奏楽器として用いられるようになった時代であることから、「バロック音楽に望ましい」という限定のもとに、対応する倍音構造を明らかにすることとした。

2.2.1 演奏音の評価と分析⁽¹²⁾

ヤマハ株式会社（当時は日本楽器製造株式会社）の協力で収集した7本のアルトリコーダの持続音を対象に、演奏家4名、アマチュア（本学音響設計学科学学生）をパネラーとし、1対比較法により、バロック音楽を演奏する上での音色の望ましさにあつての心理尺度を求めた。Fig. 9 は演奏家の判断した最も望ましい音と望ましくない音のスペクトル例である。これより、望ましさのパラメータとして、Odd-Dominantでありかつ高次倍音が豊富であることが読み取れる。

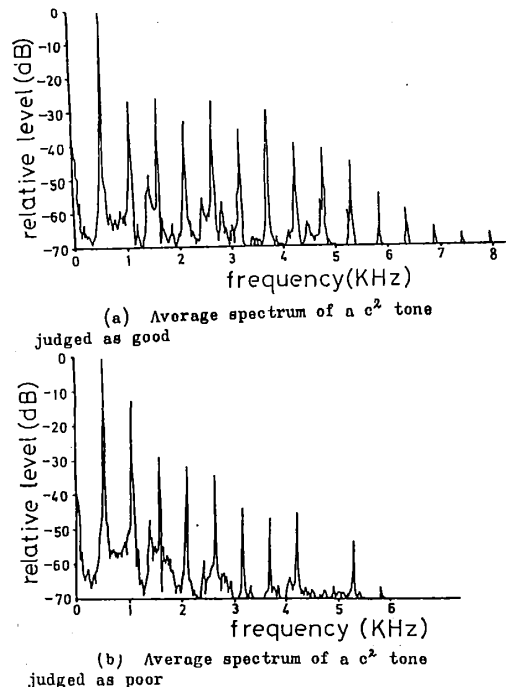


Fig. 9 評価 (演奏家による) のよい音と悪い音のスペクトル例

2.2.2 合成音による望ましいスペクトルパタンの定形化

次に合成音を作成し、望ましいOdd-Dominanceの程度と周波数(直線尺)ーレベル平面で近似したスペクトルエンベロープの傾斜値($DRdB/partial$)を求めたところ、前者は、第2～第7次間の倍音レベル算術平均値で表して(これをLDdBとする)10dB、後者は約4dB/partialであった。なおLD=10dB、DR=4dB/partialの合成音は、Fig.9(a)の実音と同じスペクトルの合成音より評価がよかった。

2.3 望ましいスペクトルを得る構造上の工夫⁽¹³⁾

2.3.1 Odd-Dominance

フルートの駆動条件に関する実験結果によると、偏心はOdd-Dominanceを左右すると同時に低音域における吹鳴可能な最大流速(U_{max})に大きく影響する。Odd-Dominantな音が得られる偏心の範囲は、同時にこの U_{max} が小さい範囲であり、フルートに関する限り低音域でOdd-Dominantな音を充分な音量で鳴らすことはできない。しかし、リコーダでは最低音まで少なくともmezzo forte程度の強さで鳴らすことができる。さらに、バロック期のリコーダのコピー楽器を数本調べたところ偏心値はおおよそ1mmであった。この値は、フルートに置き換えて考えると大きな U_{max} が得られる値であるが、Odd-Dominantな音は発生しない。これより、リコーダではOdd-Dominantと大きな U_{max} を両立させる構造上の工夫があると推定される。

この工夫としてまず考えられたのは、Fig.10上図に示すように大部分のリコーダではWindway断面形が扁平でなく、湾曲していることであった。この断面形である

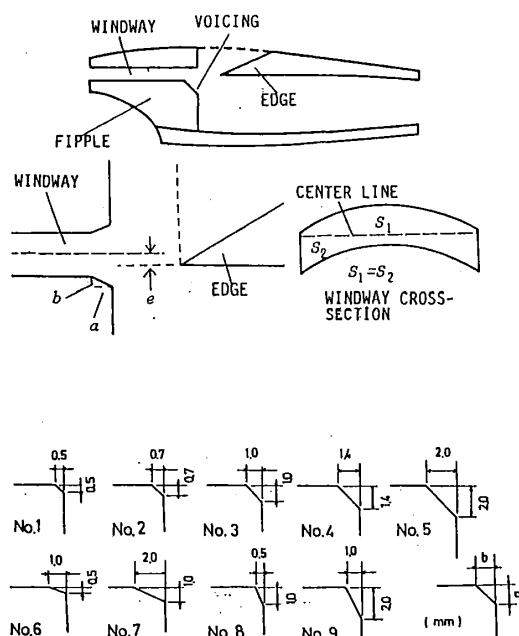


Fig. 10 リコーダ構造概念図と実験用頭部に装着した9種のボイスイング

と呼気流の中央付近と両端では偏心値が異なることになる。そこで、既製のアルトリコーダの頭部を切除し、Windway断面を変えられる頭部を製作して機械吹鳴実験を行った。しかし結果は、Windway断面が扁平でも湾曲形でも偏心のOdd-Dominanceおよび U_{max} に対する影響は差がなかった。のみならず、Odd-Dominantと大きな U_{max} は両立しなかった。

次に着目した構造はvoicingである。Voicingとは、Fig.10上図に示すようにwindwayの出口の上下縁を斜めに削除すること、ないしは、そのようにした出口部分を指す。この効果を明らかにするため、上記の製作した頭部のwindway出口にFig.10下図のように削除断面が(0.5～2.0mm)×(0.5×2.0mm)(全9種)のvoicingを上下縁別個に装着できるようにし、実験を行った。その結果、

Fig.11に例示するようにvoicingがOdd-Dominantに効果があることがわかった。⁽¹³⁾その効果は、主として下辺に施したvoicingによって生じ、断面寸法が0.5×0.5mmで現れるが、1mm×1mmを越えると効果はあまり増大しない。一方、断面寸法が大きいくほど、倍音の基音に対するレベルが低下する。この影響は、豊富な高次倍音という望ましいスペクトルパタンを損なう。また他方上辺のvoicingが U_{max} を大きくすることに著しい効果があることがわかった。これらの実験結果から、Odd-Dominantのスペクトルパタンを得るためのvoicingの望ましい寸法は0.7mm×0.7mmないし0.7mm×1.0mmと考えられる。また、ルネッサンス音楽向きのOdd-Dominantでない音を得るには、上縁のみにvoicingを施せばよいであろう。このようにvoicingは、リコーダにそのvoiceを与え音色性能を左右する最も重要な構造ポイントである。

これらの効果が生じる原因を調べるため、管長約2.8mのパイプの一端にエッジを設け有色煙とストロボ撮影によって呼気流の振動姿態を観測した。その結果、voicingが呼気流を上下方向に拡散させることが認めら

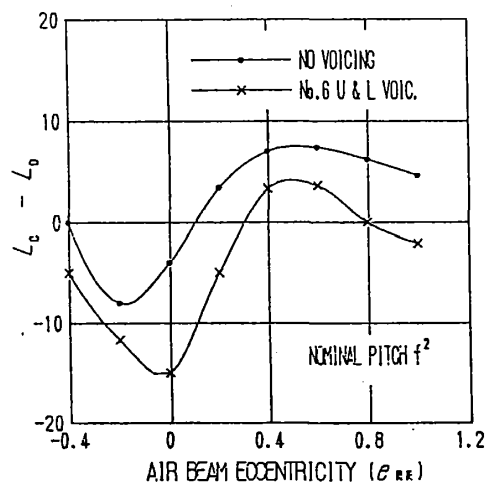


Fig. 11 ボイスイングの有無による偏心と L_e-L_o の関係の比較

れた⁽¹¹⁾が、そのことが何故上記の効果を生じるかは、今後の説明を待たなければならない。

2.3.2 倍音の量かさ

歌口エッジが鋭いと、発生音が雑音を含んだ聞こえになる一方、高次倍音が豊かになることは既にフルートで観測されていた。リコーダの場合、初中等教育用に製造された楽器のエッジは、先端の断面曲率半径が約0.5 mm程度であるが、バロックリコーダのコピー楽器では0.2～0.3mmと鋭い。この点に着目し、初中等教育用楽器の歌口エッジを次第に鋭くし、発生音のスペクトルを観測したところ、断面曲率半径を小さくすると、倍音レベルが上昇することがわかった。 f^2 音を例にみると、曲率半径0.5mmに対し、0.2mm以下では、倍音レベル算術平均値で約8 dBの増大がみられた。

3. エア・リード楽器音に共通する特徴物理量 (倍音の振幅・周波数変動)

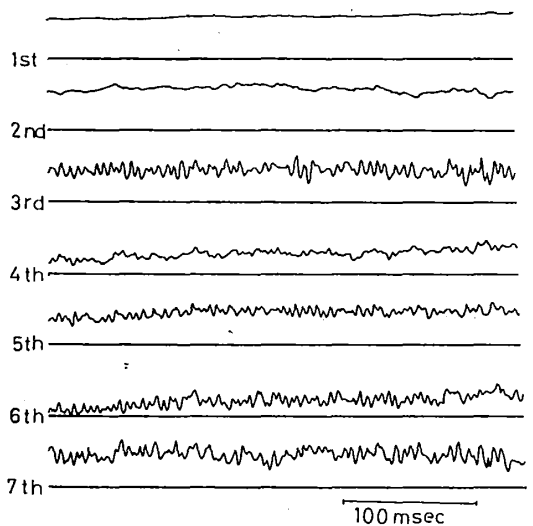
前述のように、リコーダ音の望ましいスペクトルパターンが求められたが、最も評価のよいスペクトルの合成音

と実音を聞き比べると、後者には、ある種の濁り感があるのに対して、前者はそれがなく、もの足りない。この点について、演奏家に意見を求めたところ、前者は“reedy”な響きに欠けているということであった。

この濁り感を与える要素として考えられるのは、倍音の変動、重畳する雑音である。そこで実音の各倍音の振幅と周波数の変動を抽出する一方、実音のスペクトル上、倍音の線スペクトルの周辺に観測される成分のスペクトルエンベロープを模倣した雑音を合成して、変動のない合成音に重畳した。

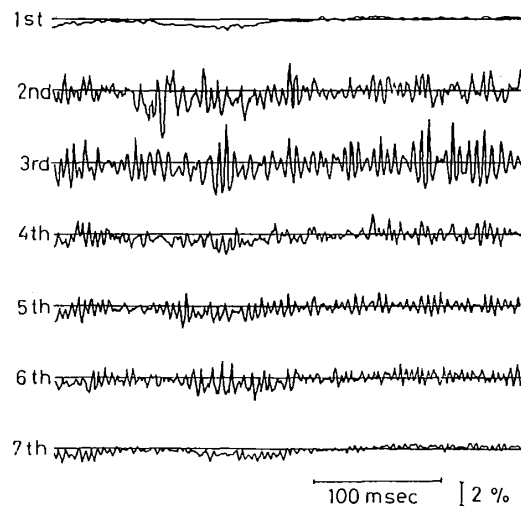
変動の抽出は、各倍音の周波数を中心周波数とし、帯域幅を基本周波数とした帯域フィルタを通じて分離し、この分離された信号について、二つの方法で振幅と周波数の変動を観測した。その第1の方法は信号波形のピーク値と零交叉時間との時系列を測定するものである。⁽¹²⁾第2の方法はヒルベルト変換による抽出である。⁽¹³⁾

Fig. 12は第一の方法によって、Fig. 9 (a)の音の振幅変動を観測した例、Fig. 13は同じく周波数の変動の観測例である。この例のように各倍音には、波形も大きさもそれぞれ独立した振幅および周波数の変動が観測される。



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

Fig. 12 リコーダ音の倍音振幅変動波形例 (Fig. 9 a音の例)



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

Fig. 13 リコーダ音の倍音の周波数変動波形例 (Fig. 9 a音の例)

harmonic order	tone B	tone F	harmonic order	tone B	tone F
1st	0.30	0.39	1st	0.30	0.39
2nd	1.54	0.51	2nd	1.54	0.51
3rd	1.28	2.43	3rd	1.28	2.43
4th	0.74	0.75	4th	0.74	0.75
5th	0.64	0.88	5th	0.64	0.88
6th	0.57	5.89	6th	0.57	5.89
7th	0.37	5.18	7th	0.37	5.18

Table 1 リコーダ音倍音の振幅 (左) と周波数 (右) の変動の実験変動度 (Fig. 9 の a音--tone B と同 b音--tone F の例)

この倍音毎の変動の大きさは、楽器によって異なり、Fig. 9 にスペクトルを示した評価のよい音と悪い音の2音に関する限り、Table 1 に示すように前者では比較的低次のレベルの大きい倍音で大きく、後者では比較的高次の倍音で大きい。

しかし、これらの観測された“変動”が果して真に変動であるのか、雑音の重畳によって、みかけ上変動として抽出されたのかは、このような分析からは特定できない。試みに、スペクトル・エンベロープを模倣した雑音を、変動のない合成音に重畳した音について、同じ方法で“変動”を抽出すると、実音の変動抽出結果と同程度の大きさの“変動”が観測されるのである。そこで、この雑音を重畳した合成音と実音から抽出された変動波によって振幅と周波数を変調した合成音、および実音による類似度の比較聴取実験を行った。その結果をMDS法で、2次元および3次元空間に表したのがFig. 14である。図上、実音との間こえの類似度は、振幅も周波数共に変調した音が最も高く、以下周波数のみ変調した音ー振幅のみ変調した音ー雑音重畳音の順で低下した。この雑音重畳音は実音とは明らかに異なっており、実音では濁り感が、音色にある種の緻密な感じを与えているのに対し、よごれた感じとなる。⁽¹⁵⁾これより、実音に観測された“変動”は、重畳する雑音によるものでなく、真に変動であると見做してよいと思われる。なお、このような変動は、フルート、尺八など他のエア・リード楽器音にも観測されるが、リード楽器音、金管楽器音には認められない。また尺八音の実験結果によると、実音と同じ周波数の変動を与えた合成音は、変動のない合成音より、明らかに評価がよいことも見出されており⁽¹⁶⁾、さらに、リコーダ音において、演奏された音のみならず、機械吹鳴音にもおよそ同じ大きさの変動が観測される。⁽¹⁷⁾こ

れらの事実から、倍音の振幅、周波数変動はエア・リード楽器音の重要な特徴物理量と考えられる。しかし、何故このように各倍音別個の変動が振幅のみならず、周波数にも生じるのか、倍音毎の変動の大きさは、いかなる構造要素で決まるかはまだ残された疑問であり、評価の高い楽器を製作するという実用の点からもきわめて興味深い課題である。

本章に述べた内容について、研究会の席上、線スペクトル成分とその周辺成分とのPhase correlationを調べてはどうかという助言を頂いた。この相関の有無で変動か、雑音かが物理的に判断できれば是非調べてみたいと思っている。

文 献

- (1) L. Cremer, H. Ising, "Die Selbsterregten Schwingungen von Orgelpfeifen", *Acustica*, **19**, 143-153 (1967/68).
- (2) John W. Coltman, "Jet drive mechanism in edge tones and organ pipes", *J. Acoust. Soc. America*, **60**, 725-733 (1976).
- (3) Samuel A. Elder, "On the mechanism of sound production in organ pipes", *J. Acoust. Soc. America*, **54**, 1554-1564 (1973).
- (4) R. T. Schumacher, "Self-Sustained Oscillations of Organ Flue Pipes: An Integral Equation Solution", *Acustica*, **39**, 225-238 (1978).
- (5) John W. Coltman, "Momentum transfer in jet excitation of flue-like instruments", *J. Acoust. Soc. America*, **69**, 1164-1168 (1981).
- (6) S. Yoshikawa, J. Saneyoshi, "Feedback excitation mechanism in organ pipes", *J. Acoust. Soc. Japan(E)*, **1**, 175-181 (1980).

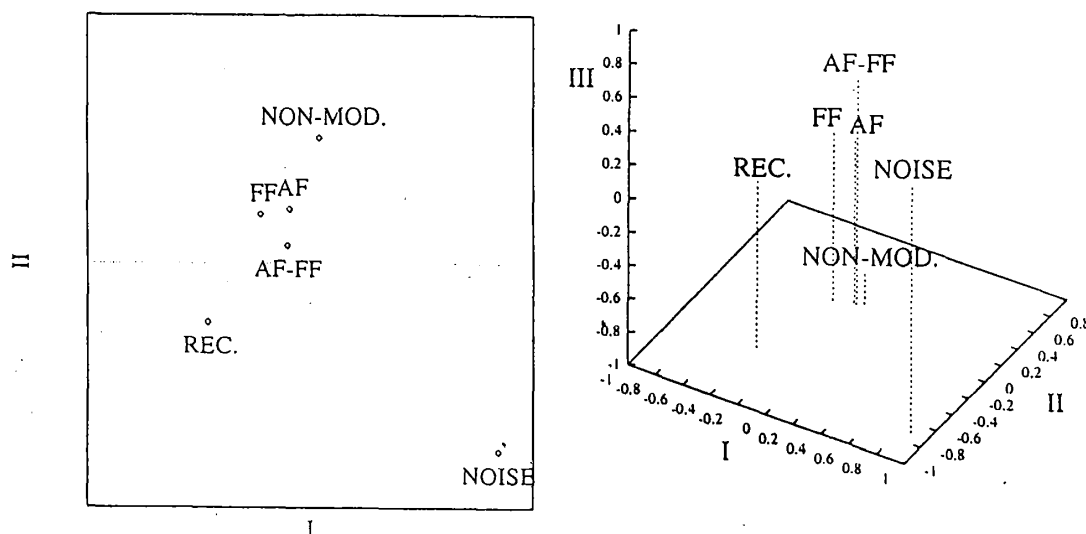


Fig. 14 実音 (REC) と振幅変動のみ (AF), 周波数変動のみ (FF), 変動なし (NON-MOD) および雑音重畳 (NOISE) の各合成音の類似度断結果 (多次元尺度構成法による。左図—2次元、右図—3次元)

- (7) 安藤由典, "フルートの音響学的研究", NHK 技術研究, 18, 36-71 (1966).
- (8) 安藤由典, "フルートの駆動条件と発生音圧レベルおよび基本周波数との関係(フルートの実験的研究 I)", 日本音響学会誌, 26, 253-260 (1970).
- (9) 安藤由典, "フルートの駆動条件と倍音構造との関係(フルートの実験的研究 II)", 日本音響学会誌, 26, 297-305 (1970).
- (10) 安藤由典, "フルートのLong-Tone の分析結果および演奏における吹奏条件の推定", NHK技術研究, 19, 70-78 (1967).
- (11) S. Yoshikawa, "Harmonic generation mechanism in organ pipes", J. Acoust. Soc. Japan(E), 5, 17-29 (1984).
- (12) Yoshinori ANDO & Tatsuro SHIMA, "Physical properties of sustained part of the treble recorder tone and its subjective excellence of quality", 音楽学, 23, 81-101 (1977).
- (13) 安藤由典, 田中祥司, "アルトリコーダの構造要素とバロック音楽に望ましい音色特徴との関係", 日本音響学会誌, 48, 556-563 (1992).
- (14) 田中祥司, 安藤由典, "アルトリコーダにおけるボイシングと倍音構造について", 日本音響学会講演論文集, 昭55年5月, 703-704.
- (15) 坂上敬, "リコーダ音の振幅変動と周波数変動に関する研究", 九州芸工大平成5年度修士論文, (1993).
- (16) 安藤由典, 山谷英男, "尺八の筒音における特徴物理量", 日本音響学会誌講演論文集, 昭57年10月, 335-336.