

静岡大学 博士論文

金管楽器吹奏系の音響特性設計に関する研究



平成 19 年 12 月

大学院 理工学研究科
設計科学専攻

村上和男

序文；楽器創造を志す人たちへ

楽器メーカーに勤め、33年間[1967～2000]、幸いなことに多種多様な楽器創りに携わってきた。しかし楽器創りと言っても音響特性を改良したもの(管楽器, 打楽器), 社会的ニーズに対応したもの(電気ピアノ, 消音ピアノ), IT技術を応用して多機能化したもの(自動ピアノ, 減音バイオリン)等の開発に関わったに過ぎない。最近では楽器メーカーとしてバイオリンの研究開発にも取り組んできた。が、アドルフ・サックスがサクソホンを発明したり, テオドール・スタインウェイがスタインウェイピアノの原型を確立したり, ストラディバリがオリジナルバイオリンを創り出した創造性には及びもつかない。

楽器における創造性の高さとはオリジナリティとその発展性にあると思う。楽器創りが成功したか否かは、「イノベーションに成功したか」、「多機能化など進化させることができたか」、「新しい音楽の創造や新しい音楽の楽しみ方に繋がったか」などが問われることになる。しかし創造性の高い楽器程そのライフが長く、評価の結論が出るまでには長い時間がかかる。一人間の寿命をはるかに超える楽器のライフの長さのために創造者の存命中にはその評価は出ないものである。またライフが長いことが技術の継承・発展を難しくしている。

楽器創りには常にその時代の先端的な技術が適用されてきた。技術の革新とともに一過性の楽器として消え去ったものも多い。新しい楽器を創造する場合には、それが使われる場面と演奏の形態が想定されていて、演奏される楽曲が既に多くあることが前提となる。その革新性が高ければ高いほど、その普及には長い年月と普及のための多くの施策が必要となるので成功は難しいことになる。

既存の楽器もまだ不完全であり、まずはその完成度を高めるための研究を継続していくことであり、その中から革新的な楽器が生まれてくることにもなろう。温故知新のところが創造の源になる。文化として定着している和楽器についても注目してみたい。21世紀に於ける楽器創りの統一テーマは「音・演奏性の向上」、「メディア性の革新」、「環境保護」への対応であろう。

2007年盛夏

村上和男

謝辞

本研究を纏めるにあたり，ご指導とご助言をいただきました，静岡大学情報学部，梅谷征雄教授に感謝いたします。

また，本研究を支えていただいた方々のご協力いただいた方々に深く御礼申し上げます。特に研究を続けることに励ましをいただいた永井洋平氏と，吹奏実験に快くご協力していただいた濱永晋二氏には感謝いたします。

概要

当地，静岡県のは浜松は楽器産業の中心として，楽器，特にピアノや管楽器の量産化により国内はもとより世界中に楽器を輸出して音楽文化の普及と高揚に貢献してきた。前世紀末から 21 世紀になって，楽器のメディア性が高まり，楽器に対するニーズが多様化して，より高機能・高性能な楽器に進化することが期待されており，そのために従来型とは違う革新的な研究開発手法が求められている。本研究では金管楽器，特にトランペット吹奏系を線形シミュレーションにより，設計の段階で管体の音響特性の予測と評価を的確に行うことを目的とする。そこで良いトランペットとは，「音高特性に関してピッチとバランスが良く，音質と音量（ダイナミックレンジ）と発音性（レスポンス）が良くて，豊かな音色で良い吹奏感で吹けるもの」と定義する。この良いトランペットを設計するために次の 4 つの目標課題を設定する。

- (1) 実験モデルを想定して金管楽器音響管の音圧の伝達特性などの音響特性の解析理論を示し，理論の妥当性とモデリングの精度を検証する。
- (2) 理論の展開として，吹奏時に於ける金管楽器の唄口端の実効入力インピーダンスを導出して音高設計に適用してその有用性を示す。
- (3) 理論の展開として，金管楽器の管体形状，特にマウスピースの形状が音質や音量等の音響特性に及ぼす要因について解析する。
- (4) 金管楽器の音色と吹奏感の評価のために(3)の解析に基づいて吹奏系のモデリングを行い，可聴化システムへの適用性を示す。

まず 1 章の緒言では本研究の背景と研究の目的と目標について述べる。本論 2 章で金管楽器音響管の音圧の伝達特性などの音響特性の解析理論を示し，キャビティ・レゾナンス実験モデルとインパルスレスポンス実験モデルを想定して理論の妥当性と管体内径形状モデリングの精度を検証する。次に 3 章では音響管理論の展開として，キャビティ・レゾナンス実験モデルを想定してモデリングを行って解析精度を検証して，吹奏時に於ける金管楽器の唄口端の実効入力インピーダンスの導出と音高設計への適用について述べる。更に 4 章では金管楽器の管体形状，特にマウスピースの形状が音響特性に及ぼす要因について，唄口端からの入力として周期的パルスを仮定して音圧の伝達特性を分析し，マウスピースの形状が音質や音量等の音響特性に及ぼす要因について解析する。5 章では 4 章の解析結果に基づいて，特徴的な 3 種類のマウスピースについて吹奏時の入力波形を推定算出して，管体の伝達特性を反映させるように吹奏入力 of モデリングを行い，この入力モデルにより吹奏時の放射スペクトルを推定算出してマウスピースや管体形状と吹奏感や音色との関係性を評価し，さらに可聴化システムへの適用性を示す。6 章の結言では纏めとして，本研究の成果を挙げ，金管楽器の音響特性設計システムを提案して金管楽器の音響特性設計のエンジニアリングモデル構築の構想を示す。（添付資料 [I] 参照）今後の課題として，本研究の成果を活かすかたちで金管楽器の PSE システム (Problem Solving Environment System) の試案をそのアプリケーションとともに示す。

序文	頁	i
謝辞		ii
概要		iii
目次		iv
1 章 緒言 ; 金管楽器吹奏系の音響特性設計に関する研究		1
Study of the the acoustic characteristics design of brass instruments		
1.1 研究の背景と当研究の位置付け		
1.2 金管楽器の音響研究の現状と本研究のテーマ設定		
1.3 本論文の概要		
2 章 金管楽器音響管の音響解析理論		9
Theory of the acoutical factors of brass instrumennt		
2.1 はじめに		
2.2 金管楽器音響管の音響理論		
2.2.1 管体のモデル化		
2.2.2 音響管内の音圧, 粒子速度, 音響インピーダンス		
2.2.3 音圧と伝達関数		
2.3 キャビティ・レゾナンスの解析によるモデル化精度の確認		
2.3.1 キャビティ・レゾナンス計測実験によるモデル化精度の確認		
2.4 ポッピング音の解析と音圧伝達特性の算出によるモデル化精度の確認		
2.4.1 管体のモデル化		
2.4.2 ポッピング音の解析		
2.5 おわりに		
3 章 吹奏時に於ける金管楽器の実効入力インピーダンスの導出と音高設計への適用		21
Empirical estimation of effective input impedance at blowing stage and its application to the pitch-design of brass instrument		
3.1 はじめに		
3.2 唄口端実効入力インピーダンスの定義		
3.2.1 音高に関する吹奏法の検討		
3.2.2 唄口端実効入力インピーダンスと相対角の定義		

- 3.3 吹奏系の音高に関する線形モデル
 - 3.3.1 吹奏パターンと吹奏推定値
 - 3.3.2 等価付加長さ
- 3.4 金管楽器の音高設計への適用
- 3.5 おわりに

4章 金管楽器のマウスピースの形状が音響特性に及ぼす影響 29
Evaluation of acoustical factors of the brass instrument based on its transfer functions considering those of the mouthpiece portion

- 4.1 はじめに
- 4.2 マウスピースの伝達特性と音色形成
 - 4.2.1 マウスピースと吹奏感の特徴
 - 4.2.2 入力モデル設定と放射音スペクトル推定
 - 4.2.3 管体全体の伝達特性
- 4.3 マウスピースを含む音響管全体の音響特性
 - 4.3.1 各断面の音響インピーダンスと音圧と速度
 - 4.3.2 マウスピースと吹奏感の対応
 - 4.3.3 マウスピースを含む音響管全体の全管長にわたる音圧分布と音色形成過程
- 4.4 おわりに

5章 金管楽器の音色と吹奏感の評価のための吹奏系のモデリング 40
Modeling for the factors of acoustical resonator concerning timbre and blowing impressions of brass instrument

- 5.1 はじめに
- 5.2 管体の伝達特性と音色形成
 - 5.2.1 マウスピースの形状の違いによる管体全体の伝達特性の差異
 - 5.2.2 吹奏系の解析
- 5.3 入力波形のスペクトルのモデル化と出力波形のスペクトルの推定と評価
 - 5.3.1 出力スペクトルから入力スペクトルを推定する
 - 5.3.2 各マウスピースに対する奏法入力のモデル化
 - 5.3.3 入力スペクトルのモデル化の妥当性の検証
- 5.4 吹奏系のシミュレーション
 - 5.4.1 マウスピースの形状と音色と吹奏感の対応
 - 5.4.2 管体の音響特性評価への適用
- 5.5 入力波形のモデル化と出力波形合成
 - 5.5.1 入力波形のモデル化と波形合成
 - 5.5.2 出力波形の合成シミュレーション
 - 5.5.3 波形合成の例とモデル化精度の評価
- 5.6 おわりに

6章 結言	55
6.1 課題の設定	
6.2 研究の成果	
6.3 今後の課題と展望	
参考文献	59
個人論文及び解説記事	63
附録	
[I] 金管楽器の音響特性設計システムの提案	64
[II] プログラム群	67
[III] 研究計画書	75

1. 緒言

金管楽器吹奏系の音響特性設計に関する研究 Study of the the acoustic characteristics design of brass instruments

1. 1 研究の背景と当研究の位置付け

当地，静岡県の浜松は楽器産業の中心として，楽器，特にピアノや管楽器の量産化により国内はもとより世界中に楽器を輸出して音楽文化の普及と高揚に貢献してきた。前世紀末から 21 世紀になって，楽器のメディア性が高まり，楽器に対するニーズが多様化して，より高機能・高性能な楽器に進化することが期待されており，新規な革新的な楽器の現出も望まれている。そのために従来型とは違う革新的な楽器研究開発手法が求められている[1]。

従来行なわれてきている楽器の研究・開発・設計過程の例を Fig. 1-1 に示す。

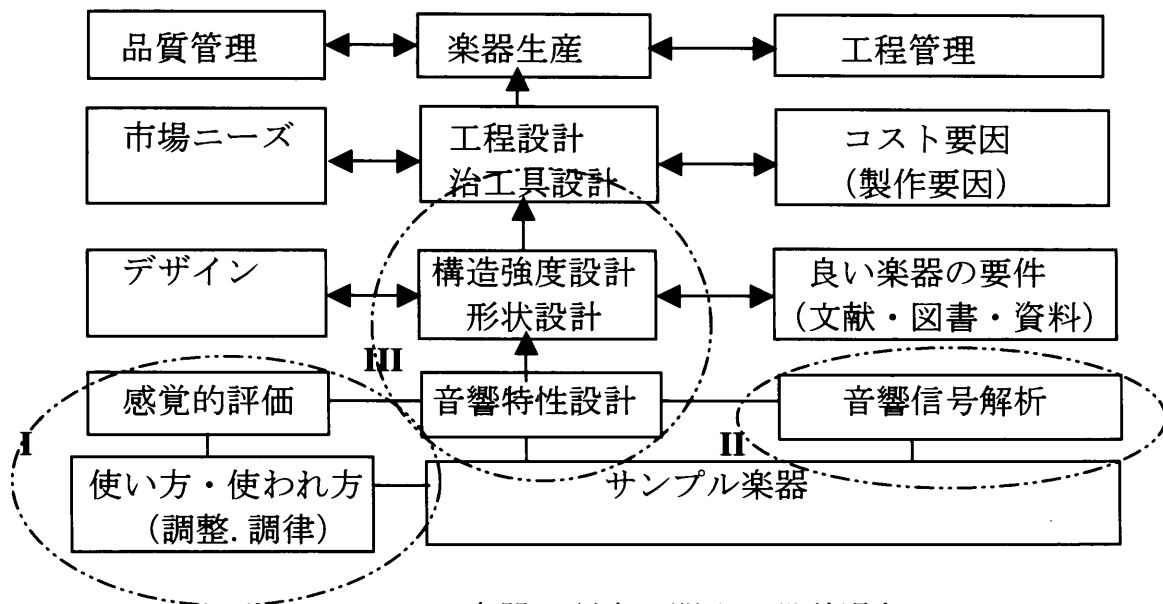


Fig. 1-1 楽器の研究・開発・設計過程

楽器の研究・開発・設計過程は楽器によって異なるし，その手法は開発設計の目標によって，又，その設計者・製作者によっても異なるが，本筋に於いてはこのような過程で進められる。各過程にはその時代において利用可能な先端的な技術が適用される。サンプル楽器の使い方・使われ方の研究段階(I)では計測手法も活用するが主として研究は感覚的・感性的に行われる。サンプル楽器の音響信号解析(II)では，既存の CAE 技術は楽器の音響解析に関しての有効性は必ずしも高くなく，主に聴感に頼っている。構造振動も包含する音響特性設計と構造強度設計と治工具設計の過程(III)では CAD・NC 加工技術の適用が進んでいるが音響特性の設計が行われるのは一部の設計要因に限られている。構造強度設計や形状設計では良い楽器の要件に関する情報も参照する。しかし良い楽器の形状や構造を真似しても音響特性が良いものになるとは限らない。

そこで楽器の研究開発効率アップのためには，3次元(3D)形状設計を前提にして，Fig. 1-1 の I, II, III の過程において有効性の高い解析評価手法を研

究開発して、それを活用することが重要である。特に音色と演奏性に関する解析評価は大切であり、より科学的な解析評価システムが望まれ、それによってより多くの音響特性要因の設計が可能となる。こうしたシステムの運用により情報を蓄積することで、開発の効率化と技術の継承と発展が期待できる。ものづくりの有り様が問われる時代にあつて、楽器づくりにあつても今までの量産楽器とは違う、多様なニーズに対応する付加価値の高い楽器の研究開発体制とそれを支援する計算機システム(PSEシステム: Problem Solving Environment System)が望まれる。

本研究では対象楽器として音響研究は比較的進んでいるが成果の実用化は必ずしも進んでいない金管楽器を取り上げ、特に代表的な金管楽器であるトランペットの音響特性を解析して吹奏系モデルに適用してその有効性を示し、金管楽器の音響特性設計評価システムの構築に資することを目的とする。吹奏系の音響特性要因については、吹奏系は主に非線形唇発振と長さ可変の管体気柱と奏者の声道の3要素から成り、奏者がこれらを直接制御しているとするモデルが示されている[3]。本研究ではまず定常状態の線形現象に着目することにして吹奏系モデルを Fig. 1-2 に示す。図において、PLAYER+MOUTHPIECE は楽器本体(INSTRUMENT)への奏法入力であり、ベル開口部からの音響出力(END PRODUCT)とし Tone, Pitch, Musical Effect が音楽的観点から評価される。

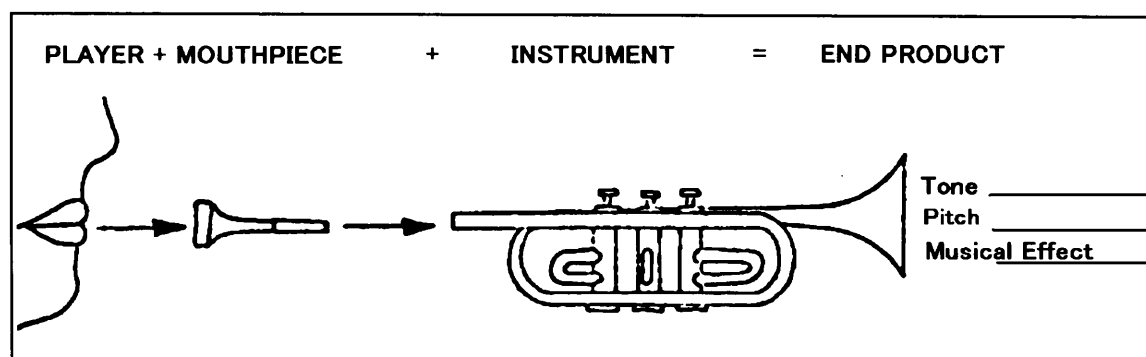


Fig. 1-2 吹奏系モデル

本研究では吹奏系をシミュレーションして、設計の段階で仮想する管体の音響特性の予測と評価を的確に行うことを目的とする。そこで良いトランペットとは、「音高特性に関してピッチとバランスが良く、音質と音量（ダイナミックレンジ）と発音性（レスポンス）が良く、豊かな音色で良い吹奏感で吹けるもの」と定義する。良いトランペットを設計するための音響特性分析の研究課題として次の目標を設定した。

- (1) 解析に使用する音響管理論の精度を実験モデルで検証する。
- (2) 吹奏時の音高特性を解析して音高特性設計手法を研究する。
- (3) 管体形状と音響特性の関連を解析して音質と音量の評価手法を研究する。
- (4) 吹奏時の吹奏感と音色の評価モデルを研究する。

ここで音色(ねいろ)は奏者の奏法上の特徴をできるだけ排除して、管体自体の特性に依る要因の解析を研究の対象とする。本論文に關係する音色と音質などの音響技術用語の定義は参考文献の末尾に付記する。

また研究の目的からして設計上の仮想の楽器を対象とするわけであるが、その

手法は実際の楽器の解析・評価に適用することも目標とする。

1. 2 金管楽器の音響研究の現状と本研究のテーマ設定

まず、主に金管楽器の音響研究の現状を調査してみる。金管楽器の音響学については、多くの研究報告を引用しつつ、以下の図書に纏められている。

- VIBRATION AND SOUND By PHILIP M. MORSE (1948) [54]
- FUNDAMENTALS OF MUSICAL ACOUSTICS By A. H. Benade (1975) [55]
- THE PHYSICS OF MUSICAL INSTRUMENTS By N. H. Fletcher and T. D. Rossing (1997) [56]

また 1988 年以前の金管楽器の音響と構造に関する文献や記事は

- BRASS BIBLIOGRAPHY (PART IV) By Mark J. Fasman (1990) [57]

に系統的にリストアップされている。しかしながら 1980 年代までは科学的な観点からの研究が多く、演奏家や製作者が抱える音楽的な課題についての取り組みは少ない[4]。更にコンピュータを活用した最近(1982~2005)の金管楽器の音響研究についても文献[2, 3]で解説されている。

こうした文献や図書には金管楽器の音響特性分析に関する研究は数多く紹介されているが、さらに文献に引用されている文献や、ネット検索や関連する特許情報の検索も網羅的に行った。ここではその中で特に本研究の 4 つの課題に関わる文献や図書をレビューして研究課題を定式化してみる。前節で挙げた(1)~(4)の課題について順に検討する。

(1) 音響管理論の適用と実験モデルによる検証

従来、金管楽器の音響管の共振特性の解析については多くの報告がある。その基となる音響理論は P. M. Morse により文献[54]に纏められている。金管楽器の管路に立つ定在波動の音響特性は唄口端の境界条件とベル開口端の境界条件と、管路の長さや内径変化とその内面性状によって形成される。境界条件は端部における音圧(dp)と粒子速度(dU)の比(dp/dU)すなわち音響インピーダンスでもって表わされる。

本研究のために有用性が高いと思われる音響管の音響解析手法を Fig. 1-3 に示す。キャビティ・レゾナンス(空洞共鳴)の手法(CR法)では唄口端の境界条件を閉端として開口端から一定音圧レベルの音波を入射し周波数を掃引して唄口閉端部の音圧応答曲線(レゾナンスカーブ)を求めるものである。このCR法を適用してフルートとクラリネット等の木管楽器の共鳴周波数の解析が行われている[5, 12]。木管楽器の発振のメカニズムは金管楽器と異なるが音響管としての要素は金管楽器の要素を包含しており、CR法を金管楽器に適用することは可能である。

- * **Cavity Resonance Method (CR 法)**
 - VIBRATION AND SOUND By PHILIP M. MORSE [54]
 - John W. Coltman Method [5]
 - C.J. Nerderveen [12]

- * **Input Impedance Measurement Method (IM 法)**
 - The Physics of Brasses By A.H.Benade[6]
 - C.G.CONN 社 Original(By E.L.Kent)
 - Josef Merhaut Method [6]
 - J. Backus [7]
 - Univ. of Surry; J.M.Bowsher [8]
 - IRCAM; René Caussé [9]

 - TMTCTwo-Microphone-Three-Calibration) Method;France
 - GPS. Univ. Paris; V. Gibiat, F.Laloe [10]

 - BIAS(Brass Instrument Analyzing System) [11];Austria
 - IWK (Institute fur Wiener Klangstil, Vienna)
 - TRP-Project

- * **Impulse Response Measurement Method (IR 法)**
 - J. Backus and T.C.Hundley [13];USA
 - Stephen Elliott and J.M.Bowsher [14];England
 - J.D.Dudley and W.J.Strong [15, 17];USA

- * **Physical Modeling Method (PM 法)**
 - Scumacher [41]
 - PMB 法(Physical Model of Blowing) [35]
 - IRCAM; X. Rodet
 - AM 法 (The Aitificial Mouth) [38]
 - CNRS; J.Gilbert

Fig. 1-3 管楽器の音響解析手法； []は参考文献

音響入力インピーダンスの計測手法 (IM 法) は A. H. Benade の文献[6]で3件の例が紹介されている。唄口端からほぼ一定流速の波動を入射して定在波が立つ時の唄口端の音圧と入射流速との比を入力音響インピーダンスとするもので、その周波数特性を入力インピーダンスカーブとしてそのピークが共振周波数を示す。金管楽器の IM 法による解析例は Backus によって最初に示された[7]。これをチューバやトロンボーンに応用して計測実験と数値解析を比較して高精度に解析した報告[9]もある。最近では V. Gibiat らによる複数の音孔を有するクラリネットを対象とした TMTCTwo-Microphone-Three-Calibration Method) [10] や IWK (Institute fur Wiener Klangstil, Vienna) が金管楽器を対象として IM 法を金管楽器の音響解析法としてシステム化した BIAS 法(Brass Instrument Analyzing System) [11]などの音響インピーダンス解析手法の報告がある。これらはいずれも IM 法の共鳴実験モデルにより計測と数値解析を行って、音響管の共振周波数特性解析のために音響入力インピーダンス解析が有用であることを示している。CR 法と IM 法は音響管の共振周波数特性解析には便利であるが、音色や音量に関

わる管出口のデータを得ることが出来ない。したがってこれらの文献では入力インピーダンスと管体形状の関係は解析されているが、音圧の伝達特性ないし放射スペクトルの関係には触れられていない。

これに対してインパルスレスポンス法(IR法)の実験モデルでは、唄口閉端部から、例えばピストンホーンでインパルスを加えるときのベル開口端の出力応答を求めるもので、解析事例が報告されて音質評価への有用性が示されている。例えば、文献[14]では計測した入力インピーダンスカーブと音圧伝達特性によりインパルス応答を求めて管体形状との関係を解析している。文献[15]ではコンピュータによりインピーダンスカーブを求め、さらに周期的パルス入力に対する唄口端部における音圧応答特性を求めて管体形状の調和性の解析をおこなっている。さらには Backus が示した人工吹鳴モデル実験解析[13]をコンピュータシミュレーションで検証している[17]。しかし、いずれも設計上の有用性は示していない。

CR法、IM法、IR法のいずれも音響管単体の音響特性を解析するものであり、かつ得られる特性は定常吹鳴時の静的なものに限られる。これらの諸量は音響管の特性を形成する基本量として欠かせないものであるが、現実の吹奏は演奏者の唇と音響管の相互作用により成立しており、また音色や音量、吹奏感に関わるものとして音の立ち上がりなどの動的な(時間領域の)特性を考慮する必要がある。これらの要請に応える方法として、物理モデルに基づく方法(PM法; Physical Modeling Method)がある。PM法は吹鳴時の唇や音響管内の音圧や速度を既定する微分方程式を適当な入力条件と境界条件の下で有限要素法などの方法を用いて数値的に求める方法であり、上記の方法に比べ現実に近い吹鳴環境で計測値との比較が出来る利点がある。その欠点は計算コストが大きいことである。また物理の複雑さと個人差による変動のために唇モデルの設定が困難という問題点もある。既存の研究として PMB(Physical Model of Blowing)法[35]や AM(Artificial Mouth)法[38]などがある。文献[35]は唇発振を物理シミュレーションした吹鳴実験モデルの提案であり、所望の周波数で発振させるために音響管の長さをスライド機構により可変として唇モデルの発振周波数にマッチングさせるものである。文献[38]は人工口の提案であり、奏者に代わって生産された楽器の吹鳴評価への適用が可能であり、音響現象の解析や物理モデル用の発振モデルとして、また設計支援装置としても有用であるとしている。

上記のいずれの方法においても、音響管のパラメータと音響特性値の関係を解析するためには、音響管理論に基づく数学モデルが必須である。本論文では、唇モデルの設定の困難を回避し、また計算コストを低減する方法として、PM法を用いずに、吹奏時の実測値を使って唇の効果 CR法、IM法、IR法に組み込む方法として3つの吹奏系モデルを提案する。そのためにまず、CR法、IM法、IR法による解析の共通の基礎となる Morse の音響理論[54]を金管楽器音響管に適用して理論式を提示し、それにもとづく数値計算モデルの精度を、CR法によるキャビティ・レゾナンスの解析により検証する。さらに典型的な IR法の適用事例であるポッピング音の解析により検証する。

(2) 吹奏時の音高特性を解析して音高特性設計手法を研究する。

金管楽器の音高特性は最も基本的な設計要件であるが、既存の金管楽器の音高特性は必ずしも満足できるものではなく、吹奏可能な範囲で奏者の音感によ

り補正しているのが実情で、楽器本体の音高特性の改善が必要である。特に習熟度の低い初級者には、より良い音高特性の金管楽器が求められている。

最近では V. Gibiat らによる TMTc 法[10]や IWK による BIAS 法[11]などを用いた音響入力インピーダンス解析の報告がある。これらはいずれも実際の吹奏系モデルの解析ではなく、共鳴実験モデルにより計測と数値解析を行って、音響管の共振周波数特性解析のために音響入力インピーダンス解析が有用であることを示している。しかし、ここで示される共振周波数は吹奏時の音高とはずれるのでそのままでは音高特性設計の手法としては使えない。

Fig. 1-3 に示す BIAS 法を使って実際に吹奏時の音高問題の解析まで行ったものとしては、トランペットの音高実測値と IM 法による共振周波数の計算値を比較した例[25, 26]と Orchestra Horn の音高特性の解析に BIAS 法を適用した例[27]などがある。これらの例では実在する楽器の音高問題を解析評価することが目的であり、これから設計しようとする仮想楽器の音高特性の設計評価手法としての適用例は示されていない。

上記の点に対処するために本研究では、まずは Fig. 1-3 に示すキャビティ・レゾナンスの手法 (CR 法) により管体の音圧の共振特性を求め、実奏時の音高との差異を解析してその物理的意味を考察してみる。その考察に基づいて吹奏時の唄口端の音響インピーダンスを推定して管体の音高設計を行うアプローチを検討する。さらにこのアプローチを新しい楽器の音高特性設計に適用してその効果を検証する。

(3) 管体形状と音響特性の関連を解析して音質と音量の評価手法を研究する。

金管楽器、特にトランペットは音高特性が良いこと (つまり吹奏した音の音程が正しいこと) は楽器としてのひとつの基本的な要件ではあるが、この基本的要件がクリアされていればその次には楽器の良さはその音色と吹奏感の良さ (鳴り易さ、程よい吹奏抵抗感など) でもって評価される。それは奏者の奏法と音響管の特性の相乗効果として感性的に評価されるものである[37]。金管楽器の音高以外の音響特性を解析・評価する手法として Fig. 1-3 に挙げた IR 法は、唄口端からインパルス入力を加えたときのベル開口端からの応答出力を解析するもので、計測とコンピュータ解析の比較検討[13~17]やインパルスレスポンスと物理シミュレーションの結合[18~20]等がある。文献[20]では唄口端からのインパルス入力に対するベル開口端放射音の合成シミュレーション音の試聴が仮想管体の音質評価のために有用であることも示されているが具体的内容の開示はない。

管体形状のうち、特にマウスピース (唄口とも言われる) は音色も含めた吹奏感に大きく影響する[28~31]。トランペットのマウスピースのカップの深さと音色の関係を解析した例[30, 31]やホルンのマウスピースの形状と音響特性や吹奏感の解析例[28]などがある。いずれも実在する楽器とマウスピースを使って、音色の特徴を測定分析して聴感テストでその差異を確認し、入力インピーダンスカーブのピークのレベルと Q 値との対応を示して、吹奏系の音響特性の評価手法としての有用性を示している。しかし唄口形状と音圧の伝達特性ないし放射スペクトルの関係には触れられておらず、音色は放射音のスペクトルとして直接聴き取られるので、唄口形状と放射スペクトルの関係を解析してみることが意味のあることと考えられるのでこの点に着目して解析を進めること

にする。

本研究では管体形状のうち、特にマウスピースに着目して、その形状が楽器の音質と音量に及ぼす影響について IR 法の計算モデルを用いて解析する。

(4) 吹奏時の吹奏感と音色の評価モデルを研究する。

吹奏感と音色には音の立ち上がり特性が大きく影響するため時間領域の解析が不可欠である。また唇と管の相互作用を考慮しなければならない。特にマウスピースは音色も含めた吹奏感に大きく影響することが予測されるのでそれを考慮したモデリングが必要であろう。

金管楽器、特にトランペットの音の発音性と音色の分析・合成シミュレーションについては数多くの研究がある。金管楽器の発音原理に関する研究は、唇発振の観察 [32, 33] や人工吹鳴モデルとその解析 [34, 36, 39, 40] 等がある。Fig. 1-3 に挙げた PMB 法や AM 法などの人工唇発振装置の実用化も進んでいる [35, 38]。時間領域モデリングとしてはインパルス応答法による楽音合成 [18, 20] や時間領域シミュレーション [42, 43, 44, 45] があり、これらにより楽器音響の生成に対する理解を深めるとともに、周波数領域技法では得られない非線形現象の解明が期待される。また楽器音響合成の実用化のためには、最近のデジタル信号処理能力の着実な進展により、より高精度の実時間モデリングが期待される。

最初の管楽器の時間領域シミュレーションは Schumacher によるクラリネットモデル [41] であり、インパルス応答との畳込みにより管体気柱の応答が計算された。この手法はその後の進展により、リアルな音響出力が得られるようになって実用化されたが、畳込み法は楽器毎にそれぞれのインパルス応答が必要のためにシステムが大規模となり、必ずしもコストパフォーマンスのよいものではなかった。近年では他の音合成システムの研究 [49] も実用化が進んでおり、トランペットの吹奏波形が成長する過程を精密に模擬する波形生成の時間領域モデリング [50] の有用性が示されている。また分野は違うが、ウエイブガイドモデルでリアルな音質を合成する技術 [46] は電子音の合成法のひとつとしてより精緻なものになって実用化されている。さらに音声研究の分野では声道形状の障害による歪を補正するために声道の伝達特性の高精度な推定法が研究されている [21]。しかしいずれの手法も実時間的に出力波形を生成してその音質を良くしようとするもので入力特性を推定評価するものではない。

本研究では実測した出力波形に逆伝達関数を施して入力波形を推定してこれをモデル化し、そこにマウスピースを含む管体の伝達特性や唇の発振特性を反映することにより、仮想楽器の設計段階で音色と吹奏感と相関があると予測する入力波形を推定算出して評価することを目的とする。

本研究では、唄口は音色も含めた吹奏感に大きく影響するので、形状の異なる代表的な 3 種類の唄口に対して、吹奏時のベル開口端の放射音の実測値から唄口端の入力特性を推定算出する。3 種類の唄口の入力スペクトルをそれぞれモデル化して唄口も含む管体の音圧の伝達特性と奏法入力特性の相関関係を考察して、管体の音圧の伝達特性を反映するように入力モデルを設定する。この入力モデルを使って吹奏系のシミュレーションを行って、吹奏放射音の音質と入力特性を評価する。入力波形と放射音の可聴化も検討する。

以上、金管楽器の音響特性分析に関する研究の中で特に本研究の課題に関わる文献をレビューしてきた。その他にも金管楽器の設計製作と評価に関わるCAE技術の研究も行われている。パルス反射法(PR法)[51]による管体内径の非破壊測定法の研究[52, 53]についてはその有用性も高いと思われるのでその実用化に向けた研究開発が期待される。

本研究の課題を改めて整理すると、本研究では金管楽器、特にトランペット吹奏系を線形シミュレーションにより、設計の段階で管体の音響特性の予測と評価を的確に行うことを目的とする。そこで良いトランペットとは、「音高特性に関してピッチとバランスが良く、音質と音量(ダイナミックレンジ)と発音性(レスポンス)が良く、豊かな音色で良い吹奏感で吹けるもの」と定義する。この良いトランペットを設計するために次の4つの目標課題を設定する。

- (1) 実験モデルを想定して金管楽器音響管の音圧の伝達特性などの音響特性の解析理論を示し、理論の妥当性とモデリングの精度を検証する。
- (2) 理論の展開として、吹奏時に於ける金管楽器の唄口端の実効入力インピーダンスを導出して音高設計に適用してその有用性を示す。
- (3) 理論の展開として、金管楽器の管体形状、特にマウスピースの形状が音質や音量等の音響特性に及ぼす要因について解析する。
- (4) 金管楽器の音色と吹奏感の評価のために(3)の解析に基づいて吹奏系のモデリングを行い、可聴化システムへの適用性を示す。

1. 3 本論文の概要

まず1章の緒言では本研究の背景と研究の目的と目標について述べた。本論の2章で金管楽器音響管の音圧の伝達特性などの音響特性の解析理論を示し、キャビティ・レゾナンス実験モデルとインパルスレスポンス実験モデルを想定して理論の妥当性と管体内径形状モデリングの精度を検証する。次に3章では音響管理論の展開として、キャビティ・レゾナンス実験モデルにより共振特性を解析して吹奏時に於ける金管楽器の唄口端の実効入力インピーダンスの導出と音高設計への適用について述べる。更に4章では金管楽器の管体形状、特にマウスピースの形状が音響特性に及ぼす要因について、唄口端からの入力として周期的パルスを仮定して音圧の伝達特性を分析し、マウスピースの形状が音質や音量等の音響特性に及ぼす要因について解析する。5章では4章の解析結果に基づいて、特徴的な3種類のマウスピースについて吹奏時の入力波形を推定算出して、管体の伝達特性を反映させるように吹奏入力へのモデリングを行い、この入力モデルにより吹奏時の放射スペクトルを推定算出してマウスピースや管体形状と吹奏感や音色との関係性を評価し、さらに可聴化システムへの適用性を示す。6章の結言では纏めとして、本研究の成果を挙げ、金管楽器の音響特性設計システムを提案して金管楽器の音響特性設計のエンジニアリングモデル構築の構想を示す。(添付資料[I]参照) 今後の課題として、本研究の成果を活かす形で金管楽器のPSEシステム(Problem Solving Environment System)の試案をそのアプリケーションとともに示す。

各章の内容は各章の「はじめに」に要約して示す。

2章 金管楽器音響管の音響解析理論

Theory of the acoustical factors of brass instrument

2.1 はじめに

本章ではキャビティ・レゾナンス (CR 法) の実験モデルとインパルスレスポンス (IR 法) の実験モデルを想定して, 金管楽器, 特にトランペットを対象にして解析の共通の基礎となる Morse の音響理論[54]を適用して理論式を提示し, それにもとづく数値計算モデルの精度を, まず CR 法によるキャビティ・レゾナンスの解析により検証する。さらに典型的な IR 法の適用事例であるポッピング音の解析によりモデル化精度を検証する。

2.2 節で管体の音響特性として音圧に関する伝達特性の解析理論を示し, 2.3 節では従来のキャビティ・レゾナンスの手法により, マウスピースを含んだ楽器本体の音響管としての共振特性を解析して理論の妥当性と管体形状のモデリング精度を検証する。2.4 節ではインパルスレスポンス実験モデルを想定してポッピング音(=popping, 後述参照)の解析に理論を適用して, 理論の妥当性と管体形状のモデリング精度を検証する。おわりにでは, 次章以下でこの理論を適用する3つの課題を示す。

2.2 金管楽器音響管の音響理論

2.2.1 管体のモデル化

金管楽器の管体では, 非線形現象を伴わない定常状態の音波は直管部分では管体の軸に沿って平面波として伝搬するとして扱うことができる。また曲管部分もその曲率半径より音波の波長が十分長ければ軸長の等しい直管と等価であり, 平面波として伝搬するとして扱うことができる。金管楽器内部形状は円錐台要素を直列につないだものとして近似できる[9]。円筒管要素も円錐台要素の特殊な場合として取り扱う。

そこでまず, トランペット (Bb 管) の管体を円筒管要素と円錐台要素の組み合わせとしてモデル化する。曲管部は中心線に沿う等価長さの直管とする。円筒管部は長さに関わらず一つの音響管要素として扱う。開口フレア部とマウスピースカップ部等の断面の変化率が大きい部位では要素の分割幅を 1~2 mm 程度に細かくして全体として 120 個位の要素でモデル化する。ピストンバルブ式のトランペット管体のモデル化の例を Fig. 2-1 に示す。図中, () 内の数字は分割要素数を示す。

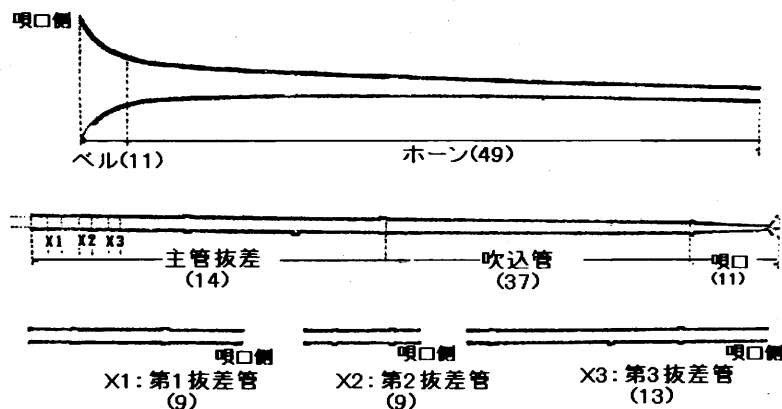


Fig. 2-1 トランペット管体のモデル化

2. 2. 2 音響管内の音圧, 粒子速度, 音響インピーダンス

金管楽器内部形状は円錐台要素を直列につないだものとして近似できるので, まず円錐管内の音響インピーダンスなどを導出する。なお円筒管要素も円錐台要素の特殊な場合として取り扱う。単位は cgs 系とする。

断面積が $S(x)$ で規定される直管内の音波の速度ポテンシャル ϕ は Webster の波動方程式

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial (\log S)}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$$

に従うことが知られている。ここで c は音速である。特に, コニカルホーン(円錐管)すなわち $S = \pi (Ax)^2$, S は中心軸座標 x における面積, A は正の実数の場合, 方程式は

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$$

となり, 音波が角周波数 ω で正弦振動する場合の速度ポテンシャルの解は

$$\phi = \frac{1}{x} \left(\Phi_+ e^{-jkx} + \Phi_- e^{jkx} \right) \cdot e^{j\omega t}$$

で表せる。ここで波数 k は ω/c である。

Φ_+ , Φ_- はそれぞれ x の正及び負の方向に伝播する音波の速度ポテンシャルの複素振幅であ

り境界条件から決定される。これらは x によらない定数である。ここで $-\Phi_+/\Phi_- = e^{-2\varphi}$ とおくと

$$\phi = \frac{\Phi_-}{x} \left(e^{\varphi + jkx} - e^{-(\varphi + jkx)} \right) \cdot e^{-\varphi + j\omega t}$$

と整理できる。 φ は複素数で, その実部は Φ_+/Φ_- の絶対値の平方根を, 虚部は両者の位相差の半分の値をとる。 φ を用いることで Φ_+ , Φ_- の中間の位相を基準にして進行波と反射波の空間位相が逆相になるように表現できる。 φ を

$$\varphi = \pi\alpha_0 - j\pi\beta_0$$

とおくと, $-2\pi\beta_0$ は $x=0$ における進行波と反射波の位相角を示す。

$\sinh(x) = (e^x - e^{-x})/2$, $\cosh(x) = (e^x + e^{-x})/2$, $\tanh(x) = \sinh(x)/\cosh(x)$, $\coth(x) = \cosh(x)/\sinh(x)$ の関数を使えば

$$\phi = \frac{\Phi_-}{x} \sinh(\varphi + jkx) \cdot e^{-\varphi + j\omega t}$$

と書ける。これより音圧 P と粒子速度 ξ は次式となる。

$$P = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = 2j\omega\rho \frac{\Phi_-}{x} \sinh(\varphi + jkx) \cdot e^{-\varphi + j\omega t}$$

$$\xi = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = 2\Phi_- \left(\frac{1}{x^2} \sinh(\varphi + jkx) - \frac{jk}{x} \cosh(\varphi + jkx) \right) \cdot e^{-\varphi + j\omega t} \quad (2.1)$$

ここで ξ は変位, ρ は空気の密度である。 $k = 2\pi f/c$ で, f は周波数である。従って, 音響インピーダンス (specific acoustic impedance) Z は

$$Z = \frac{p}{\dot{\xi}} = -\rho c \frac{1}{j/kx + \coth(\varphi + jkx)} \quad (2.2)$$

となる。ここで

$$Z = \rho c \tanh \theta$$

と置く。 ρc は空気中の音波の特性インピーダンスである。 θ は複素数である。

今、摩擦抵抗等による減衰を無視できないとして、減衰項 $\alpha(x)$ を考慮すると(2.2)式は次式となる。

$$Z = -\rho c \frac{1}{j/kx + (1 + \alpha'/jk) \coth(\varphi + jkx + \alpha(x))} \quad (2.3)$$

$$\alpha' = \partial\alpha(x)/\partial x \quad \alpha(x_1) = 0$$

ここで減衰項 $\alpha(x)$ は次式で表わされる。

$$\alpha(x) = r \times \sqrt{k} \times x / D$$

$$D = (D_1 + D_2) / 2 \quad ; \quad x \text{ は要素の軸長, } D_1, D_2 \text{ は要素の両端の径}$$

これはベラネックが推奨する円筒管に関する実験式[58]を円錐管にも適用するように変換したもので、 r は音響管の材質や内面性状により定まる係数である。単位は cgs 系とする。

2. 2. 3 音圧と伝達関数

次に、Fig. 2-2 において0方向にある音源からの進行波に基づいて発生する反射波も加え、それらが管内往復を繰り返す立ち上がり期間を経て、やがて定常状態になった定在波が立っている状態について考えるとして、音響管要素の一端Iにおける、ある周波数の音圧既知の音波を $P(x_1)$ として、他端IIにおける音圧 $P(x_2)$ を算出する。

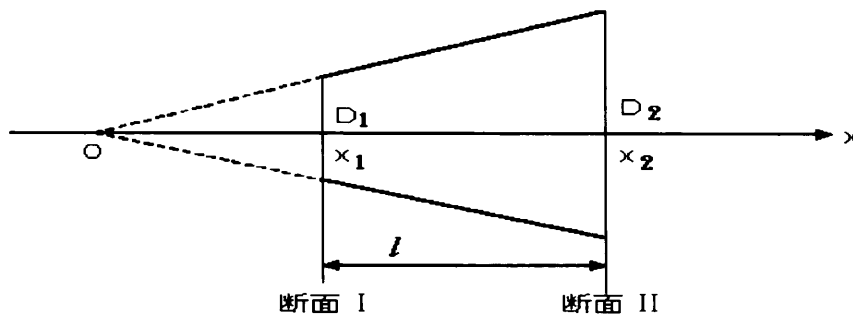


Fig. 2-2 音響管要素

任意の断面における音圧は減衰項 $\alpha(x)$ を考慮すると(2.1)式より

$$p(x) = j\omega\rho \frac{2\Phi}{x} \sinh(\varphi + jkx + \alpha(x - x_1)) \cdot e^{-\varphi + j\omega t}$$

と表わされるから、音圧 $P(x_2)$ は

$$p(x_2) = p(x_1) \frac{x_1 \sinh(\varphi + jkx_2 + \alpha(l))}{x_2 \sinh(\varphi + jkx_1)} \quad (2.4)$$

となる。ここで断面 I の θ_1 は既知として、 $Z_1 = \rho c \tanh \theta_1$ であるから、 φ は(2.3)式より

$$\varphi = -\coth^{-1} \left(\frac{1}{(1 + \alpha' / jk)} (\coth \theta_1 + j / kx_1) \right) - jkx_1 - \alpha(x_1)$$

となる。断面 I では α の項は零で $\alpha' \ll 1$ だから $\varphi_1 = \varphi + jkx_1$ とおくと

$$\varphi_1 = -\coth^{-1} (\coth \theta_1 + j / kx_1) \quad (2.5)$$

の関係になり、 φ_1 は音響管要素の断面 I の位相を表わす。 $x_2 = x_1 + l$ であるから、(2.4)式は

$$p(x_2) = p(x_1) \frac{x_1 \sinh(\varphi_1 + jkl + \alpha(l))}{x_2 \sinh(\varphi_1)} \quad (2.6)$$

と表わされる。断面 II の位相は断面 I の φ_1 より $(\alpha(l) + jkl)$ 進むことになる。

さらに、 $Z_2 = \rho c \tanh \theta_2$ であるから(2.3)式より θ_2 は

$$\theta_2 = \tanh^{-1} \frac{-1}{(1 + \alpha' / jk) \coth(\varphi_1 + jkl + \alpha(l)) + j / kx_2} \quad (2.7)$$

となり、断面 II から次の要素を見る時の θ を表わす。断面 II と次の要素の断面 I が不連続の場合は不連続断面で音圧の連続性と体積速度一定の関係が保たれて音響インピーダンスは断面積変化の逆の比率で変換され、次の要素の断面 I の θ_1 が決まる。

ここで x_1 , x_2 と D_1 , D_2 の関係は以下のとおりである。

$D_1 < D_2$ の場合 ; Fig. 2-2 のように円錐頂点が断面 I の左側にあり

$$x_1 = \frac{(D_1 / D_2) \cdot l}{(1 - D_1 / D_2)} \quad x_2 = \frac{l}{(1 - D_1 / D_2)}$$

となる。 $x_1 / x_2 = D_1 / D_2$ の関係にあり、これは要素のテーパ度を表わす。

$D_1 > D_2$ の場合 ; 頂点は断面 II の右側に来るので $D_1 < D_2$ の場合と式は同じで、 x_1 , x_2 は負の値となる。

$D_1 = D_2$ の場合 ; 要素は円筒管になり、円錐管ではなくなるが、例えば $D_1 < D_2$ のケースで D_1 と D_2 が非常に近接した極限を考えると、 x_1 と x_2 は $x_1 - x_2 = l$ の関係を保ちながら十分に大きいので(2.5)式、(2.7)式で $x_1 \rightarrow \infty$, $x_2 \rightarrow \infty$ の極限をとって、

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\theta_1 \\ Z_2 &\cong -\rho c \tanh(\varphi_1 + jkl + \alpha(l)) \\ \theta_2 &\cong -(\varphi_1 + jkl + \alpha(l)) \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。これは複素数 θ と位相 φ の関係を示すもので今後 θ を複素位相と呼ぶことにする。

ここで音響管の端部から数えて i 番目にある音響管要素の音圧の伝達関数を $GM_i(\omega)$ とすると(2.6)式より

$$GM_i(\omega) = \frac{p_i(x_2)}{p_i(x_1)} = \frac{x_1 \sinh(\varphi_1 + jkl + \alpha(l))}{x_2 \sinh(\varphi_1)} \quad (2.9)$$

$$p_i(x_2) = p_i(x_1) \times GM_i(\omega)$$

と表わされる。音響管が n 個の要素からなるとすると、音響管要素全体の音圧の伝達関数は

$$G(\omega) = \prod_1^n GM_i(\omega) \quad \text{ただし } p_{i-1}(x_2) = p_i(x_1), p_i(x_2) = p_{i+1}(x_1) \quad (2.10)$$

となる。

音響管全体のベル端は開口端とし、唄口端を閉端として、開口端と閉端の境界条件を設定する。閉端部の要素を極く短い円筒管に近似して、閉端はリジッドであるとすれば音響インピーダンスは無限大となり、閉端の複素位相 θ の初期値は $\theta_{in} = (0, -j\pi/2)$ となる。

一方、共振時の開口端の境界条件は放射インピーダンスを Z_{rad} とすると、無限大バツフル面内のピストン運動に仮定して、文献[54]に式(24.18)で次のように表されている。

$$Z_{rad} = \rho c \left[1 - \frac{2J_1(w)}{w} \right] - j\rho c M(w)$$

$w = k \cdot D$; D は開口端径, $J_1(w)$; 1次 Bessel 函数

$$M(w) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin(w \cos \alpha) \cdot \sin^2 \alpha d\alpha$$

ここで唄口端から計算して行って開口端から管内部を見る音響インピーダンスを Z_{out}' とし、開端補正を入れた仮想の開口端における音響インピーダンスを Z_{out} とすると $Z_{out} = Z_{out}' - Z_{rad}$ となる。共振時には $Z_{out} = 0$, すなわち $Z_{out}' = Z_{rad}$ となるので Z_{out} の複素位相 θ は $\theta_{out} = (0, -j0)$ となる。

2. 3 キャビティ・レゾナンスの解析によるモデル化精度の確認

音響管理論と管体のモデル化精度を検証するために、まず従来のキャビティ・レゾナンスの手法により、マウスピースを含んだ楽器本体の音響管としての共振特性を解析する。

2. 3. 1 キャビティ・レゾナンス計測実験によるモデル化精度の確認

管体のキャビティの共振特性を計測するための実験系を Fig. 2-3 に示す。管体の唄口端部にマイクロホン (Mic.) を密閉状態に装着して閉端とし、開口端から一定音圧の正弦波音波を入射する。フィードバック用のマイクロホン (Compressor Mic.) はキャビティに入射する音圧を周波数に関わらず一定に保つ目的で、測定された音圧を駆動源に帰還するためのものである。入射する正弦波の周波数を一定速度で掃引して、閉端部のマイクロホンで観測される音圧が極大値を示す周波数を共振周波数とする。ここでは実験による実測とシミュレーション計算の両面からモデル化精度を検討する。

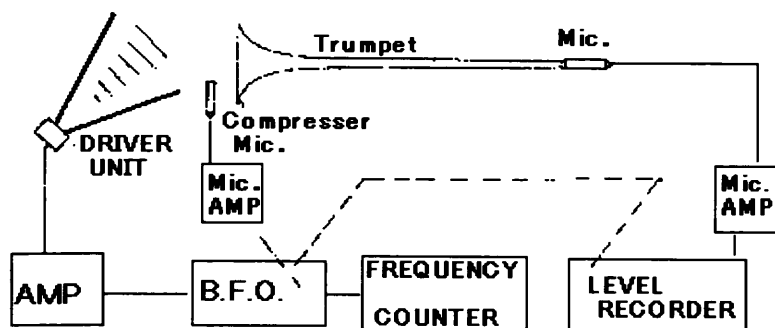


Fig. 2-3 キャビティ・レゾナンス計測実験システム図

図中、B.F.O. はうなり周波数発生

トランペットのモデル管体でいずれのピストンも押されていない場合（オープン運指）の共振特性の音圧の計算値（実線で示した曲線、以降これをレゾナンスカーブと呼ぶ）と Fig. 2-3 に示す実験系により観測される共振点（極大値）と谷（極小値）の音圧実測値（+印）を Fig. 2-4 に示す。

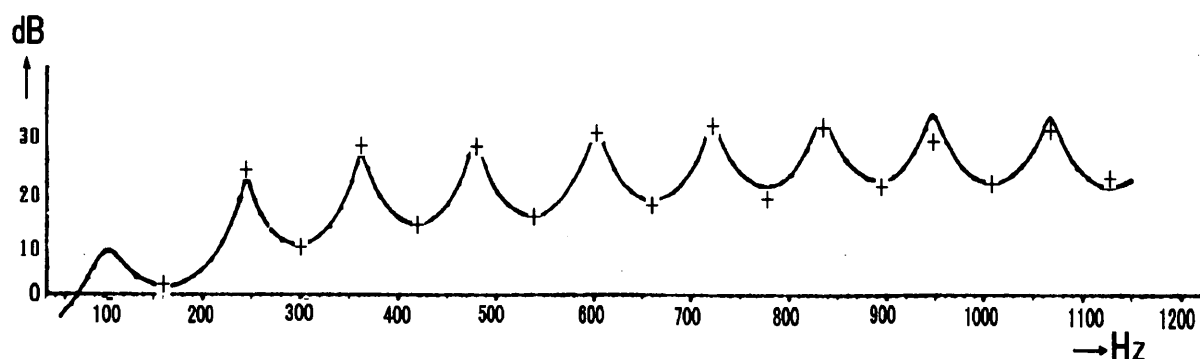


Fig. 2-4 レゾナンスカーブ（音圧計算値）と共振点と谷の音圧実測値（+印）

計算値は (2.3) 式で $r = 3.0 \times 10^{-4}$ としてベル開口部から一定音圧の正弦波を入射し、(2.3), (2.5), (2.9) 式を順次各要素に適用して最終的に (2.10) 式により唄口閉端部の音圧 (dB) の周波数特性を算出したものである。唄口閉端部は弾性薄板で閉じており、 $\theta_{in} = (0, j\pi/2)$ である。ベル開口端の境界条件（放射インピーダンス； Z_{rad} ）は無大バツフル面内のピストン運動に仮定する [54]。共振時には開口端補正した Z_{out} は零で $\theta_{out} = (0, -j0)$ である [23]。本研究の基本となるレゾナンスカーブの算出プログラム例を添付資料 [II] に示す。

音圧の極大値を示す周波数が音響管の定在波（各次共振モード）の共振周波数であり、共振点は周波数軸上にほぼ整数倍に並ぶ。しかし実奏時の音高はこの共振周波数とは必ずしも一致しない。この音高特性の解析課題については 3 章で取り上げる。Fig. 2-4 に示すように唄口閉端部の音圧の周波数特性の計算値と実測値の一致度は高く、モデル化精度と解析方法が妥当であると言えよう。

2. 4 ポッピング音の解析と音圧伝達特性の算出によるモデル化精度の確認

唄口端を手の平でポンと打つと「初期の衝突音」と「後期の管内共鳴音」が発生する。当研究が対象とするのは後者である。ここではこのポッピング音を分析して実測と音圧伝達特性の算出の両面からモデル化精度を検討する。文献 [55] では、マウスピースの実効的

な伸び(Le)が低周波数域ではマウスピースの容量で決まり、ポッピング周波数(マウスピース単体のカップ端にインパルス入力を加えたときの応答の基本周波数)はマウスピース単体のポッピング音で決まるとしている。

2. 4. 1 管体のモデル化

トランペット(C管)の管体を円筒管要素と円錐台要素の組み合わせとしてモデル化する。曲管部は中心線に沿う等価長さの直管とする。円筒管部は長さに関わらず一つの音響管要素として扱う。開口フレア部とマウスピースカップ部等の断面の変化率が大きい部位では、製作に必要な治工具のNC加工精度を保つためにも、要素の分割幅を1~2mm程度に細かく分割する。抜差管部を除いて全体として160個位の要素でモデル化する。ピストンバルブ式トランペット管体のモデル化の例をFig. 2-5に示す。

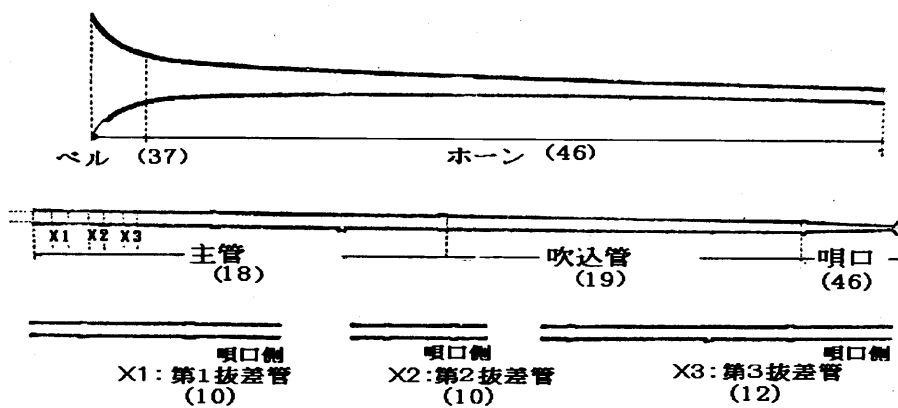


Fig. 2-5 管体形状のモデル化

図中、X1, X2, X3はピストン部で、運指により夫々第1, 第2, 第3の抜差管を迂回する管体モデルとなる。()内の数字は分割要素数を示す。

トランペットC管「C02」に対して、マウスピースは標準的な形状のもの「3 C」とカップを深くしたもの「1 A」と浅くしたもの「9 E」の3種類を使った(Fig. 2-6)。スロート径は「3 C」と「9 E」は3.78mm, 「1 A」は4.00mmである。スロート部の長さはそれぞれ異なり、バックボアの形状も異なるがマウスピースの全長は87.5mmで共通である。カップ部とマウスピース全体の容量を併せて示す。M.P.はマウスピースを示す。

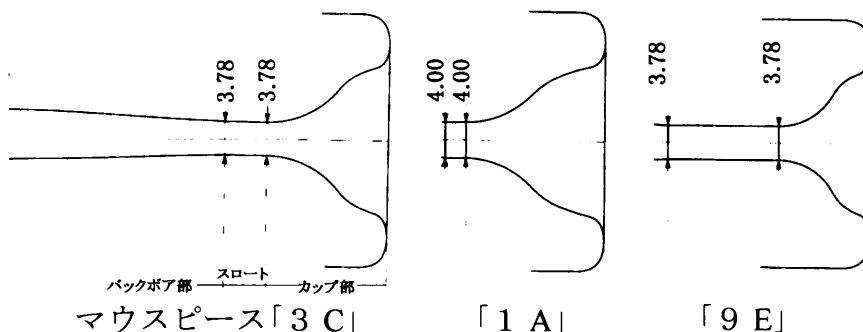


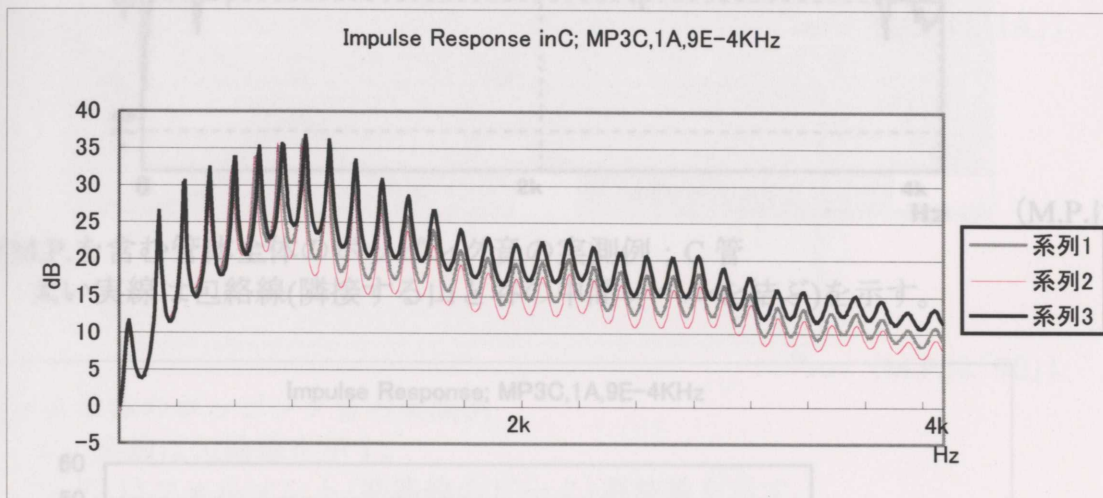
Fig. 2-6 実験に使用したマウスピースの形状

マウスピースのカップと全体の容量(単位は cm^3)を示す。

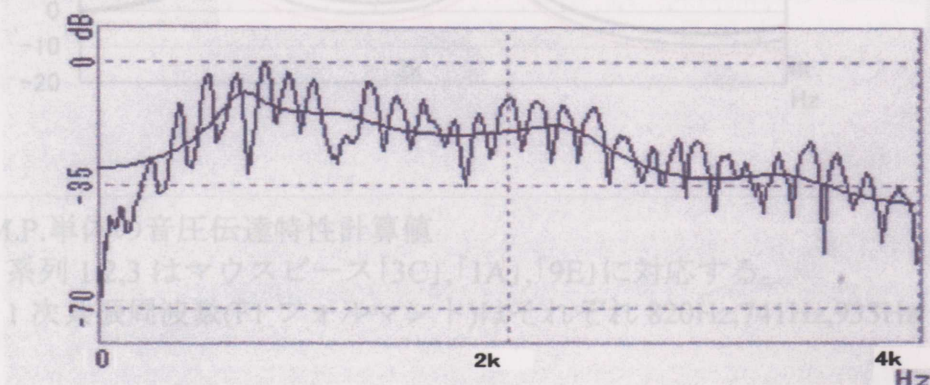
M.P.	「3C」	「1A」	「9E」
カップ	1.36	1.74	0.96
M.P.全体	3.48	4.28	3.06

2.4.2 ポッピング音の解析

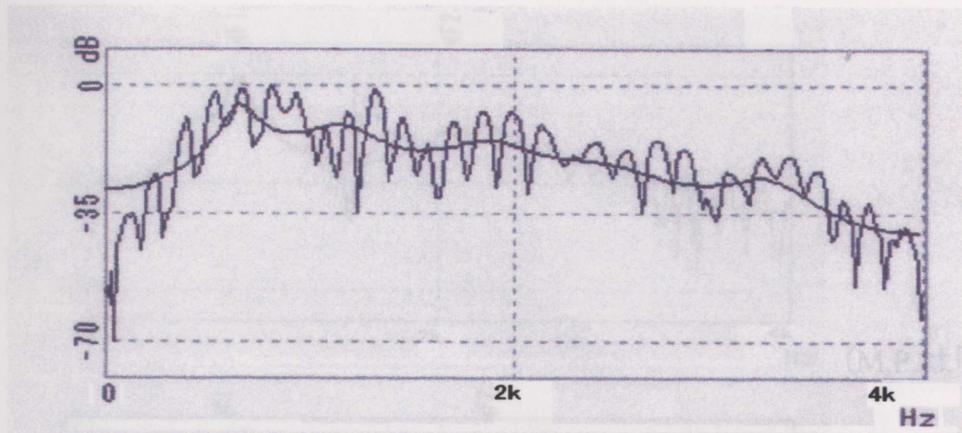
トランペットのC管のモデル管体「C02」で、いずれのピストンも押されていない場合(オープン運指; 0.0.0)の音圧の伝達特性の(2.10)式による計算例とポッピング音の実測例(FFT分析例)をFig. 2-7に示す。計算例は前述の3種類のマウスピースについて行い管体全体を(a)にM.P.単体を(c)に示す。実測例はM.P.を含む管体全体のポッピング音の実測例(b)とM.P.単体のポッピング音の実測例(d)を示す。



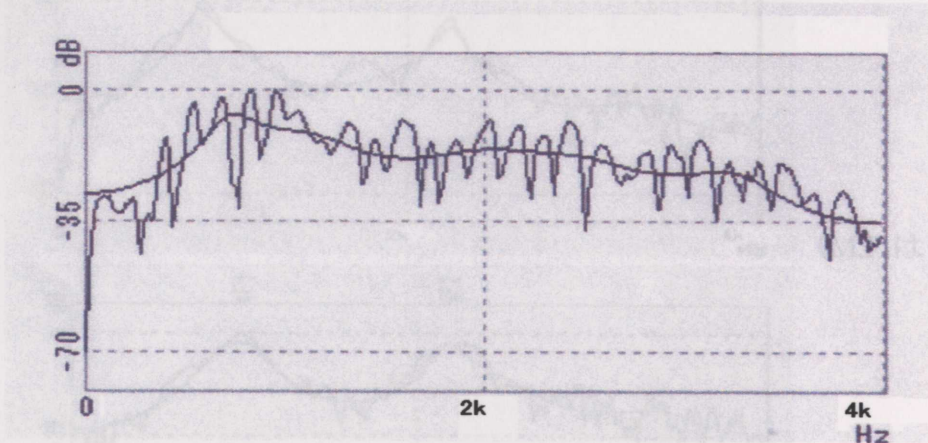
(a) M.P.を含む管体全体の音圧伝達特性計算値; C管(0.0.0)
 系列1,2,3はマウスピース「3C」,「1A」,「9E」に対応する。



(M.P.は「3C」)

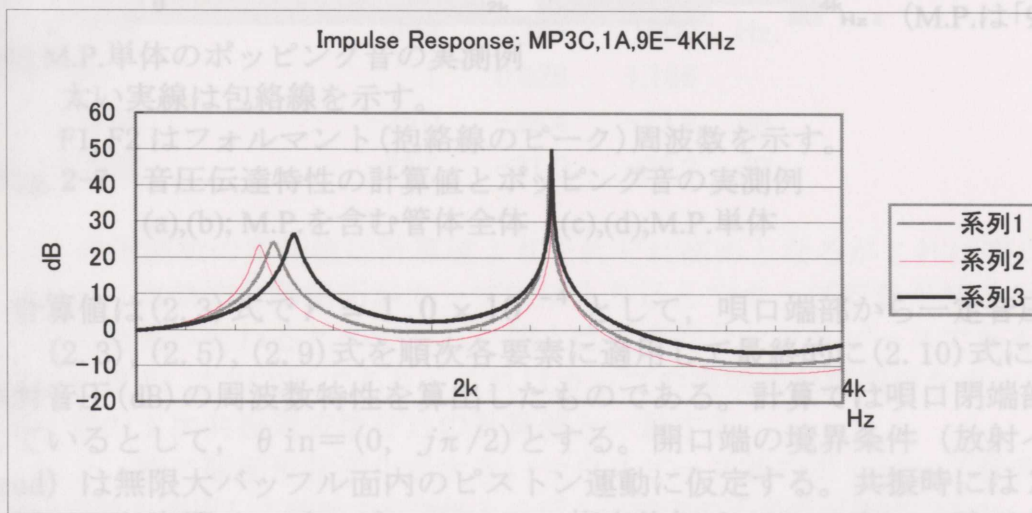


(M.P.は「1A」)



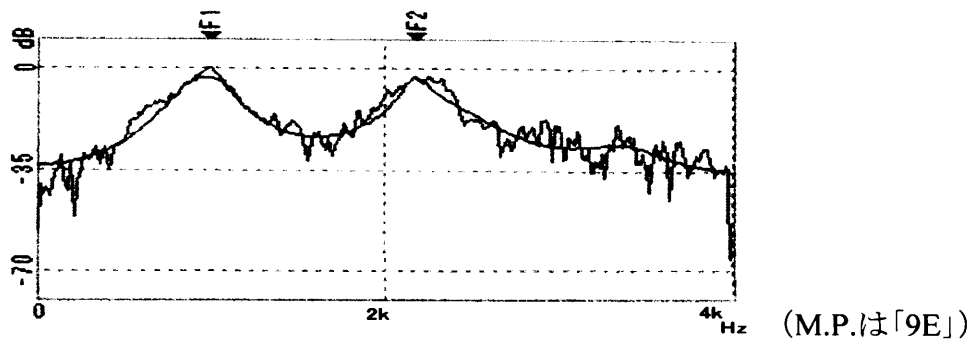
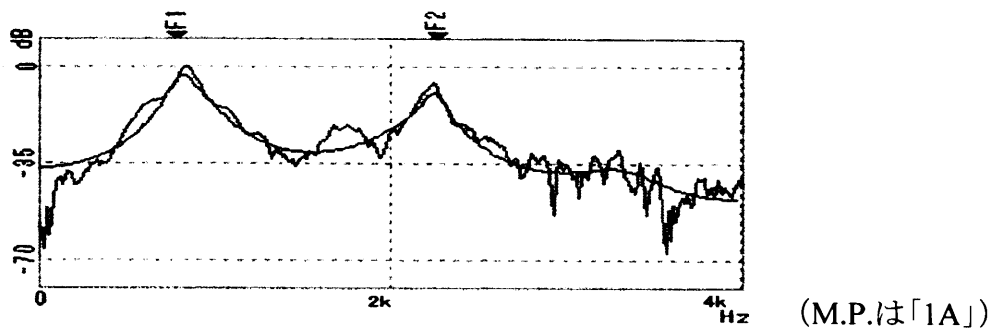
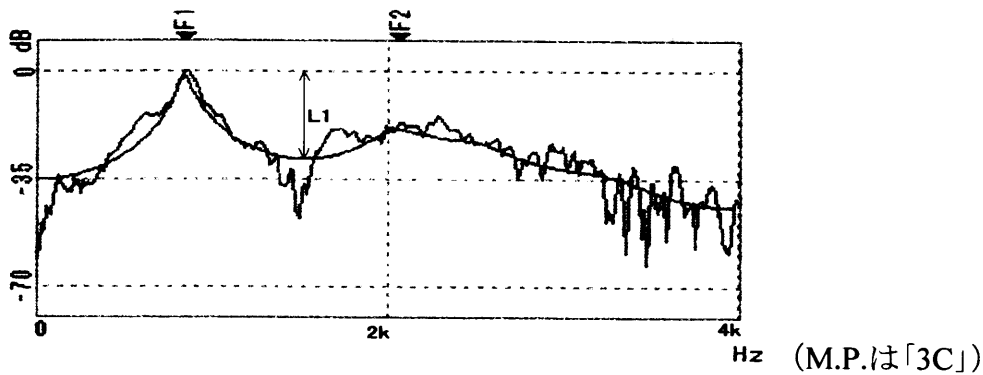
(M.P.は「9E」)

(b) M.P.を含む管体全体のポッピング音の実測例；C管
太い実線は包絡線(隣接する山と谷の中間レベルを結ぶ)を示す。



(c) M.P.単体の音圧伝達特性計算値
系列 1,2,3 はマウスピース「3C」,「1A」,「9E」に対応する。
1次共振周波数(F1 フォルマント)はそれぞれ 820Hz,741Hz,933Hz

(図. 10)式による音圧伝達特性の計算値 Fig. 2-7(a)と Fig. 2-7(b)に示すポッピング音の実測例と比べてみるとピークレベルは実測値の方が不連続的で低域と高域ではレベルが低い。これは手の平で打つインパルス的な入力には周波数成分レベルが均等ではなく、しか



(d) M.P.単体のポッピング音の実測例

太い実線は包絡線を示す。

F1, F2 はフォルマント(抱絡線のピーク)周波数を示す。

Fig. 2-7 音圧伝達特性の計算値とポッピング音の実測例

(a),(b); M.P.を含む管体全体 (c),(d);M.P.単体

計算値は(2.3)式で $r = 1.0 \times 10^{-4}$ として、唄口端部から一定音圧の正弦波を入射し、(2.3), (2.5), (2.9)式を順次各要素に適用して最終的に(2.10)式により開口端部の放射音圧(dB)の周波数特性を算出したものである。計算では唄口閉端部はリジッドに閉じているとして、 $\theta_{in} = (0, j\pi/2)$ とする。開口端の境界条件(放射インピーダンス; Z_{rad})は無有限大バツフル面内のピストン運動に仮定する。共振時には Z_{rad} により開口端補正した音響インピーダンス Z_{out} の複素位相は $\theta_{out} = (0, -j0)$ である。実測値は唄口端からのインパルス入力に対する出口音圧の周波数応答(音圧伝達特性)であり、インパルス入力はすべての音圧周波数成分を均等に含むと仮定すれば上記の計算値と実測値が一致すると予想される。

(2.10)式による音圧伝達特性の計算値 Fig. 2-7(a)と Fig. 2-7(b)に示すポッピング音の実測例と比べてみるとピークレベルは実測値の方が不連続的で低域と高域ではレベルが低い。これは手の平で打つインパルス的な入力は周波数成分レベルが均等ではなく、しか

も打つ度にそのレベルは変動して再現性を持って打つことは難しいためである。それでも 1～3 kHz の範囲では実測例の抱絡線のレベルは計算値のレベルに対応していると言えよう。各ピークの周波数の実測値は計算値より高めとなっている。すなわちピークの位置が高周波側にシフトしており、4kHz までに現れるピークの数も少なくなっている。

マウスピース単体のポッピング音には 4 kHz までに 2 つの共振ピークが見られるが、モデル化精度について更に詳細に評価するために計算値と実測値がほぼ対応している第 1 次フォルマントに注目して F1 の周波数とそのレベル L1 について分析してみた (Table 2-1)。L1 は F1 のピークと次の谷のレベル差とする (Fig. 5-2(d))。F1 の周波数は 1A < 3C < 9E の順に高くなりマウスピースのカップの容量の大きさの順に対応している。すなわち容量が大きいほどマウスピースの実効的な伸び (Le) が大きく周波数は低くなり文献[55]に対応している。3C の F1 周波数を基準にするとマウスピース間の計算値の比率と実測値の比率はほぼ合っているので、ポッピング音によってマウスピース間のピッチ感すなわち何セント高いか低いかを評価することができる。レベル L1 についても計算値と実測値ともに 1A < 3C < 9E の順に高くなり対応していると言えよう。

Table 2-1 M.P. 単体のポッピング音の解析

マウスピース	3C	1A	9E	単位
カップ容量	1.355	1.744	0.957	cm ³
MP 全体容量	3.485	4.278	3.062	cm ³
F1 計算値	820	741	933	Hz
(比率)	1	0.904	1.138	
F1 実測値	843	781	1000	Hz
(比率)	1	0.926	1.186	
L1 計算値	-25.0	-26.4	-23.9	dB
L1 実測値	-28.6	-31.0	-23.3	dB

F1 の周波数の実測値は計算値よりそれぞれ高めとなるがこれは唄口端を手の平で打つために実効的な閉端面がカップ内に入り込んでカップ容量が減るためにマウスピースの実効長が変わるためである。例えば標準的なマウスピースである「3C」の場合には実測値 F1 は 843Hz であり、これはカップの実効的な閉端面をカップ側に 1.3mm 詰めた状態の 1 次共振周波数 (F1) の計算値と一致する。

以上、特に断面形状変化が大きいマウスピース部のポッピング音の解析に音圧伝達特性理論を適用して理論の有効性とモデル化精度の妥当性が確認できた。ベル部については内径を ±1% 変動させたモデルについても計算を行い、特性値に及ぼす影響が聴感的な閾値に比べて十分小さいことを確認してそのモデル化精度を検証している。

プレーヤーや製作者はポッピング音により楽器の響きやマウスピースの特徴をチェックすることがある。入力条件が不明確で再現性の低いポッピング音の観測に代わって、ここで示した音圧の伝達特性の解析により音響特性を厳密に推定し、評価することができる。

2. 5 おわりに

金管楽器音響管の音圧の伝達特性などの音響特性の解析理論を示し、キャビティ・レゾナンス実験モデルとインパルスレスポンス実験モデルを想定して理論の妥当性と管体内径形状モデリングの精度を検証した。またポッピング音の解析に理論を適応してポッピング音の物理的意味を解明して理論の有用性を示した。これは従来のIM法の適用によっては解析ができず定性的な説明に留まっていたもので、本研究により始めて解明したことになる。従来のポッピング音による評価に代わる手法としての有用性を示したものであり、IR法による解析が吹奏系の評価モデルとして有用であることを確認したことになる。

本研究ではこの理論の展開として、以下の課題に理論を適用して、次章以降で順次取り上げていく。

- (1) 吹奏時に於ける金管楽器の唄口端の実効入力インピーダンスを導出して音高設計に適用してその有用性を示す。
- (2) 金管楽器の管体形状、特にマウスピースの形状が音質や音量等の音響特性と吹奏感に及ぼす要因について解析する。
- (3) 金管楽器の音色と吹奏感の評価のために(2)の解析結果に基づいて吹奏系のモデリングを行い、可聴化システムへの適用性を示す。

3章 吹奏時に於ける金管楽器の実効入力インピーダンスの導出と音高設計への適用

Empirical estimation of effective input impedance at blowing stage and its application to the pitch-design of the brass instrument

3.1 はじめに

金管楽器の音高特性は最も基本的な設計要件であるが、既存の金管楽器の音高特性は必ずしも満足できるものではなく、吹奏可能な範囲で奏者の音感により補正しているのが実情で、楽器本体の音高特性の改善が必要である。特にまだ習熟度の低い初級者にとって、よりよい音高特性の金管楽器が求められている[22]。

本章では、実際の吹奏時の音高に係わる奏法を解析して、この奏法を考慮した音高特性の改善方法と音高設計システムを示すことを目的とする。前章の2.3節でトランペットの管体を円錐台要素の組み合わせとしてモデル化し、まず唄口端を閉端として、従来のキャビティ・レゾナンスの手法(CR法)によりモデル管体の共振特性(レゾナンスカーブ)を算出し実験と比較してモデル化精度を検証した。本章の3.2節では実際に吹奏する場合を想定して、唄口端の実効入力インピーダンスを算出し、さらに唄口端の相対角(本文中で定義する)の周波数特性に対して、吹奏時の音高に関する奏法の特徴を定量的に検討考察する。3.3節では金管楽器吹奏系の共鳴周波数に関する線形モデルを示し、本文中で詳述する、吹奏パターンと等価付加長さを定義して定量化する。3.4節ではこの吹奏法を考慮したトランペットの音高設計システムを構築して実トランペットの音高特性設計に適用した例を示し、システムの有用性と吹奏パターン設定の妥当性を検証する。おわりにでは今後の課題を示す。

3.2 唄口端実効入力インピーダンスの定義

本節では第1吹奏系モデルとして吹奏時の音高の実測値から唄口端の入力インピーダンスを推定する。

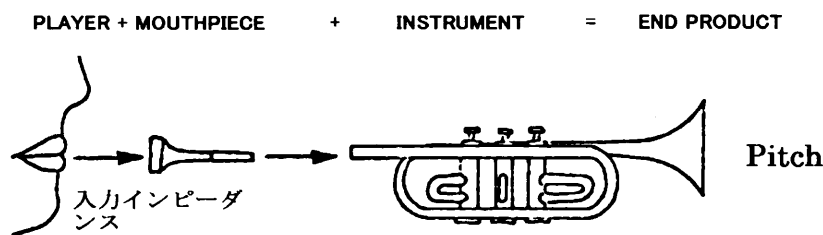


Fig. 1-2-1 第1吹奏系モデル

3. 2. 1 音高に関する吹奏法の検討

前章のキャビティ・レゾナンスの手法により求めた共振周波数の計算値と吹奏値（音高）は数十セントずれる。計算の精度は±2セントを確保しているのに、その差は定在波の共振周波数の計算に用いる唄口端の境界条件として閉端 $[\theta_{in}=(0, j\pi/2)]$ が実際に吹奏する場合と差異があることによると推測される。

Fig. 3-1 に A-Trumpet の場合の管体の共振周波数の計算値(実線)と、奏者 T (○印) と奏者 K (×印) が自然に吹きやすいピッチで吹いた場合の吹奏値の例を示す。横軸は半音階の音名(実音)を示し、1~31 が半音階の音名 E~Bb に対応する。共振モードの次数を併記する。縦軸は標準音高からのずれをセントで示す。半音が 100 セントである。

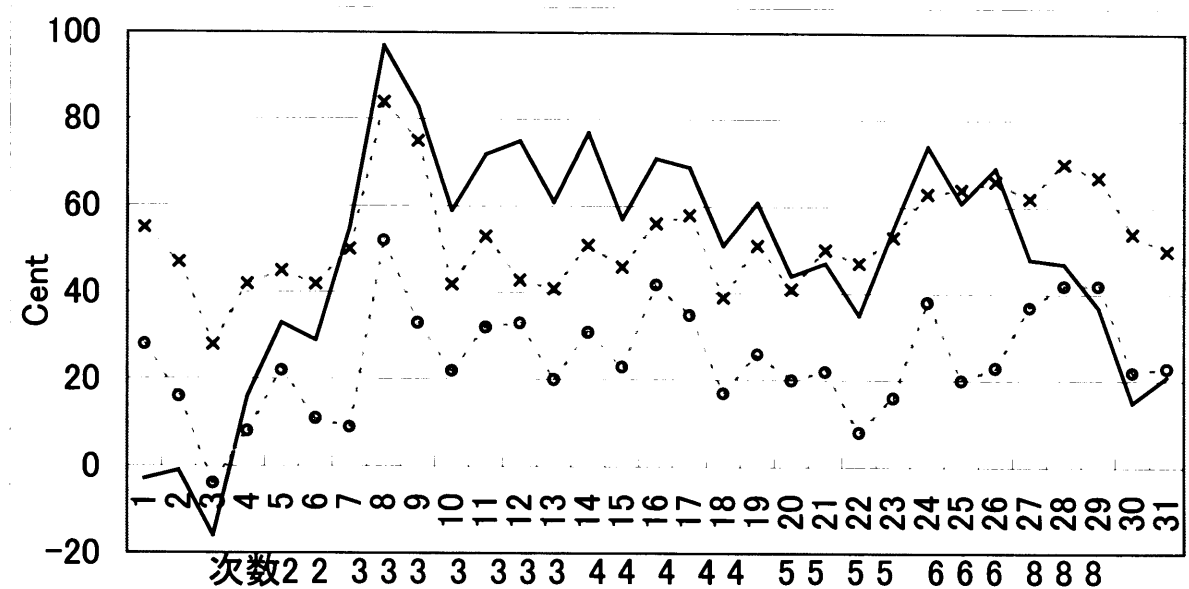


Fig. 3-1 A-Trumpet の場合の管体の共振特性と奏者 T (○印) と奏者 K (×印) の吹奏音高実測値

ずれ量は奏者ごとに違う。2次のモードでは管の共振点は低めであるが実奏上はそれより高めとなる。3次から6次のモードでは吹奏値は低めとなる。図には示さないが実際に吹奏可能な範囲は2次、3次では共振点を挟んで40~50セント、中音域から高音域は100セント（約半音）位の幅がある。但し、奏者Tは7次、8次では50~60セント位と狭い。奏者T(○印)は吹奏可能な範囲で低めに、奏者K(×印)は高めに吹奏する傾向がある。複数回の測定でも奏者Tのほうが再現性が良く安定している。また両者に共通して、8次共振でその範囲が管体の共振点より高く、したがって、高音域では管の共振点は基準周波数より多少低めのほうが望ましいと思われる。尚、第1次共振モードはその共振周波数は公称周波数すなわちFig. 3-1の0セントに対してかなり低い方にずれており一般には実用に供さない。

3. 2. 2 唄口端実効入力インピーダンスと相対角の定義

ここで開口端からの放射音の周波数を吹奏値(実測値)に設定して、開口端に共振条件[$\theta_{out}=(0, j0)$]を適用して、開口端から唄口端に向かって管要素断面ごとの音響インピーダンス値の計算を進めて管要素が唄口端に到達したときの値を吹奏時の唄口端実効入力インピーダンス[$Z_{in}(eff.)$]とする。このときの θ を $\theta_{in}(eff.)$ として $\theta_{in}(eff.)=\pi(\alpha-j\beta)$ とおく。

吹奏時の唄口端の複素位相[$\theta_{in}(eff.)$]を算出するために、Fig. 2-2のモデルで、開口端からの任意周波数の入射音に対する唄口端入力インピーダンスを(2.3)式で $r=0$ として求め、その複素位相 θ の虚数部 $\pi\beta$ を算出する。この $\pi\beta$ を相対角と呼ぶことにする。

以降、 $\theta_{in}(eff.)$ は $\pi\beta$ を指すことにする。この相対角は共振点の前後で周波数が増加するに従ってマイナス零側から $-\pi/2$ となり共振点で $\pi/2$ に反転して次第に零に近づく。すなわち吹奏時の定在波の周波数では相対角 $\pi\beta$ は $\pm\pi/2$ とは限らずこれに近い値をとることになる。

3. 3 吹奏系の音高に関する線形モデル

3. 3. 1 吹奏パターンと吹奏推定値

各共振モードに対してある幅の音高で吹奏することは可能であるが、管体の共振特性に逆らわずに、各奏者にとって最も吹きやすい音高で複数の奏者に吹いてもらうと、Fig. 3-1に示したように奏者により低めの音高をとる場合と高めとなる場合の2つの奏法に分かれる。ここでは低めのピッチで吹き、安定して再現性のある奏者Tを基準奏者として、その実測音高値に対する唄口端の相対角の計算値を全音域に渡って平滑化してこれを吹奏パターン[$\theta_0(\omega)$]とする。これは音高に関する奏法の特徴を表わしている。この吹奏パターンを唄口端の境界条件として共振周波数を算出すれば、実際の吹奏に対応する音高特性値が求まり、これを吹奏時の音高推定値(以下、吹奏推定値という)とすることができる。

前述の低めのピッチで安定した奏法の奏者Tの吹奏パターンを捕らえるために、吹奏時の実効インピーダンスの相対角 $\theta_{in}(eff.)$ を求めた。縦軸に実効インピーダンスの相対角を $\pm\pi/2$ を中心に、横軸に音名(実音)をとってFig. 3-2に示す。Bb管2機種(A-Tr., B-Tr.)を夫々●印、○印で、C管1機種(C-Tr.)のデータを×印で示す。破線はこれらの平均値を表わす。モード次数はBb管について示してあるがC管では右に2つづれることになる。

オープン運指の2次のモードで-1.520位であるが、ピストンを押し込んで管長が長くなるに従って2次のモードの値は $-\pi/2$ に近づきプラス側の値となる。平均値で3次モード、6次モード付近で変曲して低い値を示すのは、Bb管の共振点が高いのを少なからず下げる方向に修正していると考え、この区間はC管の値を採用して、音高だけに依存する吹奏パターンとして図の実線の値を設定する

[$\theta_0(\omega)$]。より連続的な特性のほうが人間にとってより自然で吹き易いと想定して、連続的な滑らかな曲線に設定する。

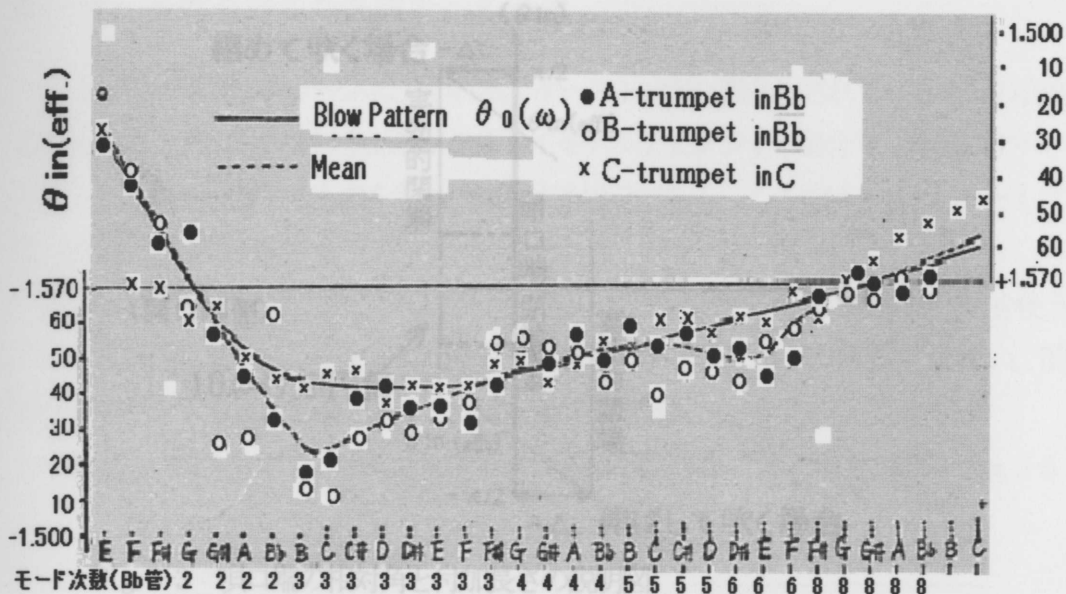


Fig. 3-2 吹奏時の実効入力インピーダンスの相対角 (奏者Tの場合)

この定論に従って、Fig. 3-2に示した相対角による吹奏パターンに対応する付加長さの計算例をかくして得られた吹奏パターンを唄口端の入力条件として計算した共振周波数を吹奏推定値とすることにより楽器の音高特性を表わすことができる。この特性をできるだけ一定のピッチでフラット (平坦) にすることが音高設計の目標になり、大きく外れる所を改善することが音高特性を改良することになる。このとき音速Cは346 m/sec (25度Cにて) を想定する。こうして求める吹奏推定値はその管楽器の音高特性を規定するものであり、今まで曖昧であった金管楽器の音高の考え方について、ひとつの基準を与えるものである。奏者Kのように高めのピッチで吹く奏者は抜差管を適宜伸ばしてピッチを調整することになる。

3. 3. 2 等価付加長さ

ここで実効入力インピーダンスの相対角の説明のために等価付加長さの考えを導入する。等価付加長さとは唄口端閉端 (θ_{in} の虚数部が $\pm \pi/2$ の値をとる) に対して、実際に吹奏する場合には、唄口端の相対角は $\pm \pi/2$ とは限らず、これを実効的閉端位置が前後するものとして、唄口端から実効的閉端位置までの距離を一定径 (10φ) の仮想の円筒管の長さで表わしたものである。“唄口端より前側に縮めて吹く場合”の付加長さ ΔL は負、“唄口端より後ろ側に伸ばして吹く場合”の付加長さ ΔL は正とする。これらの関係を唄口端閉端位置 (θ_{in} 軸) を基準として、模式的にFig. 3-3に示す。横軸 (L) は管の中心線に沿う長さを示す。

なるにしたがって次第に付加長さは短くなって第8次では付加長さはマイナスとなる。付加長さにより奏法の特徴を定量的に説明できる [2]。

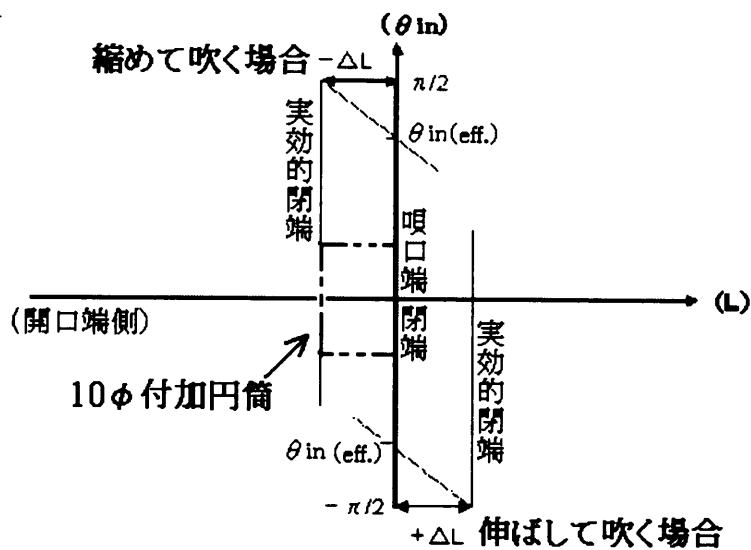


Fig. 3-3 唄口端の相対角と付加長さの説明図

この定義に従って、Fig. 3-2 に示した相対角による吹奏パターンに対応する付加長さの計算例を Fig. 3-4 に示す。縦軸は付加長さ ΔL (mm) を示す。各符号は Fig. 3-3 と同じである。

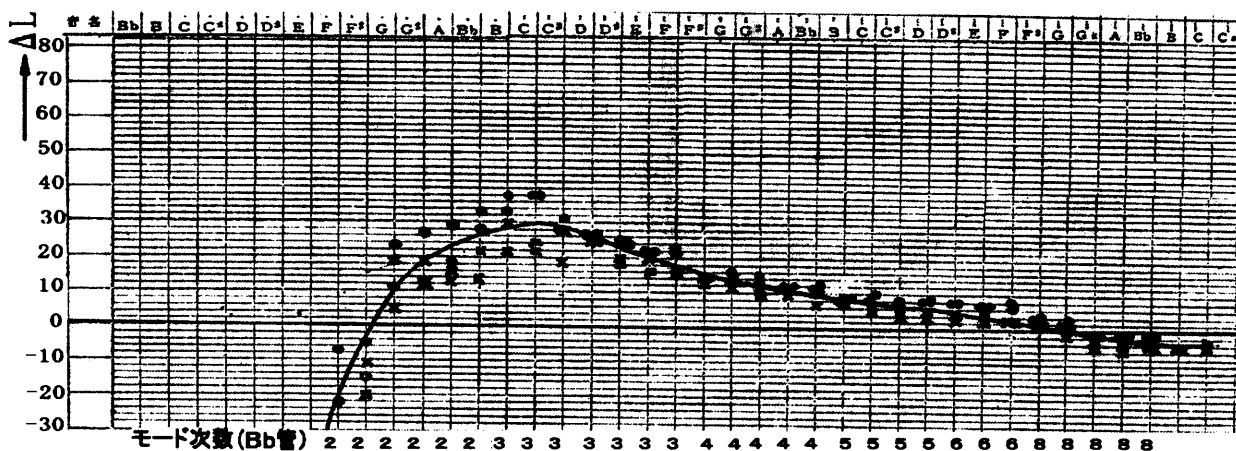


Fig. 3-4 付加長さの計算例

最低音域の第2次の共振モードでは付加長さはマイナスで、全管長が短くなるにしたがってマイナスの付加長さの絶対値が順次短くなり、プラス側に伸ばす方向になる。3次モードで反転して、これより高次モードになるにしたがって次第に付加長さは短くなって第8次では付加長さはマイナスとなる。付加長さにより奏法の特徴を定量的に説明できる [23]。

3. 4 金管楽器の音高設計への適用

以下に述べる2つのケースに分かれる。ケース1は既に製品化されているものの音高特性を一部改良する場合である。ケース2は全面的に見直してモデルチェンジする場合で、参考にすべきモデルが既に手元にあってこれを凌駕するものを新たに開発する場合である。ここでは2のケースとしてTrumpetの音高設計に適用した事例を紹介する。

金管楽器の場合はひとつの音響管をその低次から高次までの複数の共振モードを使うため、そのバランスが音高特性に影響し、特定の音高のみを対象として音高を定めるわけにいかない。問題となる音高を最適化しようとする場合にはそのことに留意する必要がある。

吹奏法を考慮した音高設計の手順をFig.3-5 (a)に、試設計の手順の詳細をFig.3-5 (b)に示す。

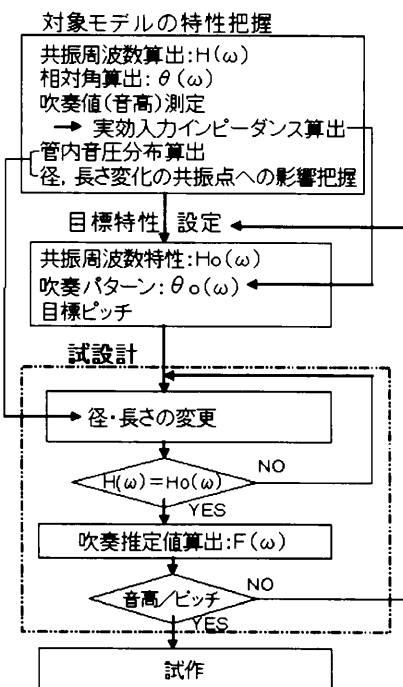


Fig. 3-5 (a) 音高設計の手順

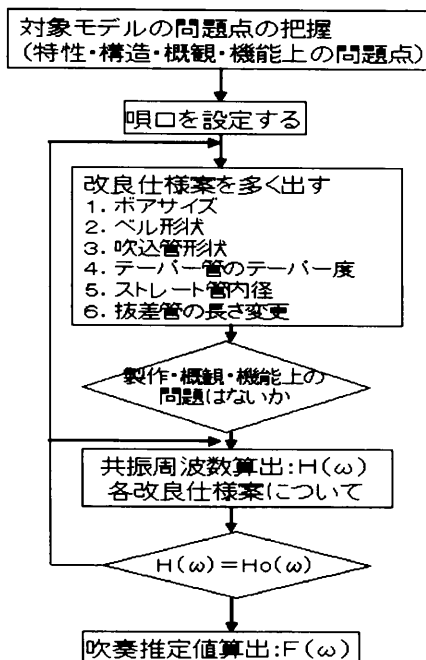


Fig. 3-5 (b) 試設計の詳細手順

まずモデル管体の特性値として、共振周波数、管内音圧分布、唄口端の相対角の周波数特性を算出する。さらに、要素の長さ変化、管内音圧分布の腹部・節部の径変化の共振周波数への影響を検討しておく。Trumpetの場合は夫々の抜差管を単独に1 mm伸ばすと約1セント下がる。これらのことを目安として試設計を進めることになる。

次に前述の音高だけに依存する吹奏パターンとして $[\theta_0(\omega)]$ を仮定し、吹奏時の所望のピッチ +30 セントを想定して、目標とする共振周波数特性を中音域の3次から6次でほぼ平坦 (+50 セント) で、高音域の8次で多少下がる特性 $[H_0(\omega)]$ に仮定する。これをFig. 3-6に破線で示す。試設計の出発点とするA-Trumpetの特性(共振周波数特性を細い実線、吹奏推定値を細い灰色線)をあわせて示す。

次に試設計の段階にはいる。Ho(ω)を参照しつつ改めるべき共振に着目して、その音圧分布の腹部・節部にあたる要素の内径を変更してみる。製作上、吹き込み管部、ホーン部が変更に対する自由度が高い。できるだけ内径の不連続部を減らし、実用的に製作可能な形状にする。音圧分布の腹部と節部にあたる要素の径変化に対して効果が得られ、広範囲に変更すればその効果は大きい。他の共振モードへの影響も無視できなくなる。さらに抜差管の長さを変えてみる。以上のあらゆる組み合わせについて共振周波数特性を計算してみて満足いく特性が得られたら、吹奏パターン [$\theta_0(\omega)$] を唄口端の値として吹奏時の音高を推定算出してみる。Fig. 3-6 に新規な試設計の例として、Trumpet-B2 の共振周波数特性(太い実線)と吹奏推定値(太い灰色線)を示す。

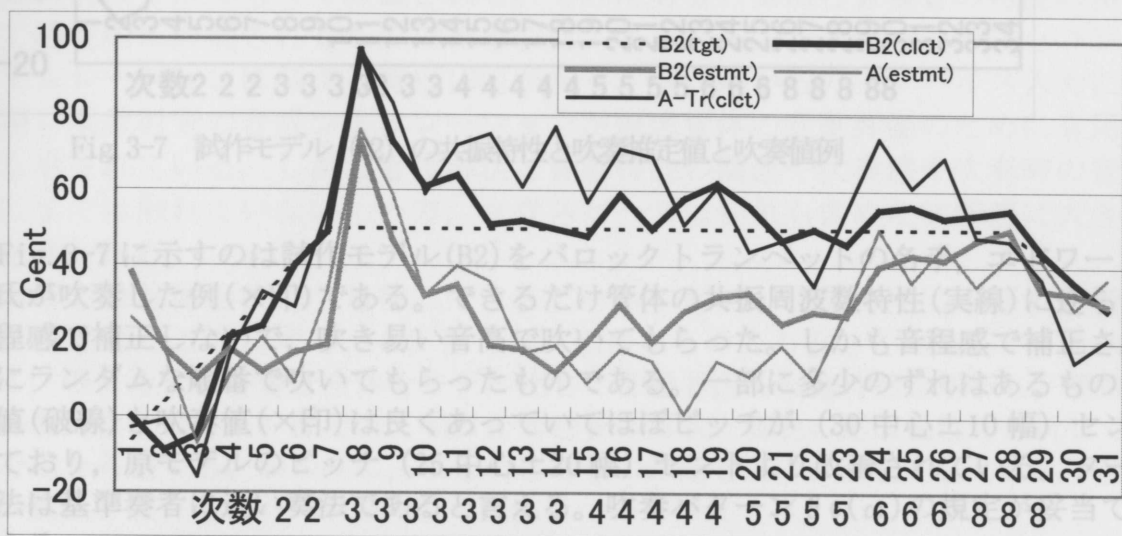


Fig. 3-6 試設計モデル (B2) の特性

共振周波数特性では3次・4次が下がり、5次・6次が平坦化して当初設定したHo(ω)に近い特性となっている。吹奏推定値ではA-Trumpetの平均ピッチが+25セント、変動が±25セントに対してTrumpet-B2では平均ピッチが+30セント、変動が±15セントとなっている。B2はピッチは+30セントでA-Trumpetより5セント高めとなって、変動幅は30セントとA-Trumpetの変動幅50セントより20セント改善されている。こうして求めた吹奏推定値が中音域でほぼ平坦で、目標のピッチに近いものであれば、次に試作の段階に進む。実際に試作して出来上がる管体の音高特性は、設計値(吹奏推定値)に近い平坦な特性となるはずである。

本報告で取り上げたトランペットを代表とする金管楽器の場合は、共通の音響管で複数の共振モードを使うため、共振点の間隔が音高特性に影響し、特定の音高のみを対象として音高を定めるわけにいかない難しさがある。金管楽器の音高設計は、ピッチの設定と改善すべき特定の音高と音域について、実現可能な形状仕様の範囲で音高特性を最適化する問題となる。そのために現在は設計者がコンピュータとインタラクティブに設計作業を進めることになるが、設計条件と評価判断をルーチン化することにより最適化のための自動設計システム構築が可能となる。

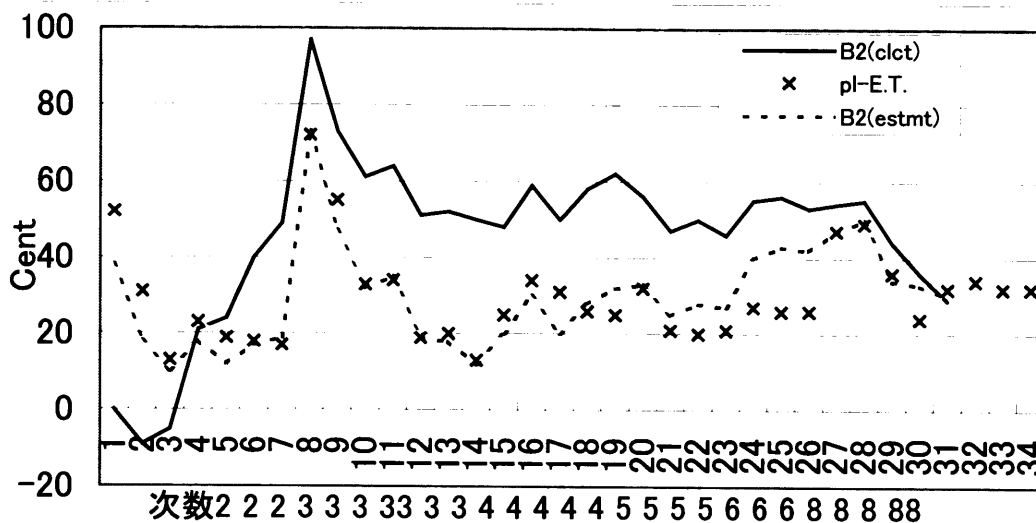


Fig. 3-7 試作モデル (B2) の共振特性と吹奏推定値と吹奏値例

Fig. 3-7 に示すのは試作モデル(B2)をバロックトランペットの名手、エドワード・タール氏が吹奏した例(×印)である。できるだけ管体の共振周波数特性(実線)に逆らわずに、音程感で補正しないで、吹き易い音高で吹いてもらった。しかも音程感で補正されないようにランダムな順番で吹いてもらったものである。一部に多少のずれはあるものの吹奏推定値(破線)と吹奏値(×印)は良くあっていてほぼピッチが (30 中心±10 幅) セントに入っており、原モデルのピッチ (25 中心±20 幅) セントより改善されている。タール氏の奏法は基準奏者に近い奏法であると言える。吹奏パターン $\theta_0(\omega)$ の規定が妥当であると言える。

3. 5 おわりに

金管楽器の音響解析課題の中で、特に定常音の音高の問題について、まずトランペットの吹奏系をモデル化して実奏時の音高に関する奏法を検討した。基準奏者の吹奏パターンを吹奏条件として音高設計システムを構築し、トランペットの新規設計に適用して、システムの有用性を検証した。楽器が使われる現場において、基準奏者とは異なる奏者に対するピッチ設定とチューニングの問題があるが、本手法は音高に関する奏法の解析評価にも適用することができ、よりよい奏法への指導のために有効であろう。又、個々の奏者の奏法に対応する音高特性に楽器を改造したり、ピッチのチューニング法に指針を与えたりすることができよう。

本報告で取り上げたトランペットを代表とする金管楽器の場合は、共通の音響管で複数の共振モードを使うため、共振点の間隔が音高特性に影響し、特定の音高のみを対象として音高を定めるわけにいかない難しさがある。金管楽器の音高設計は、ピッチの設定と改善すべき特定の音高と音域について、実現可能な形状仕様の範囲で音高特性を最適化する問題となる。そのために現在は設計者がコンピュータとインタラクティブに設計作業を進めることになるが、設計条件と評価判断をルーチン化することにより最適化のための自動設計システム構築が可能となる。

4章 金管楽器のマウスピースの形状が音響特性に及ぼす影響

Evaluation of acoustical factors of the brass instrument based on its transfer functions considering those of the mouthpiece portion

4.1 はじめに

金管楽器，特にトランペットは音高特性が良いこと（つまり吹奏した音の音程が正しいこと）は楽器としての一つの基本的な要件ではあるが，この基本的要件がクリアされていればその次には楽器の良さはその音色と吹奏感の良さ（鳴り易さ，程よい吹奏抵抗感など）でもって評価される。それは奏者の奏法と音響管の特性の相乗効果として感性的に評価されるものである[37]。インパルスレスポンス合成とコンピュータシミュレーションに関する報告[20]があり，唄口端からのインパルス入力に対するベル開口端放射音の合成シミュレーションが仮想管体の音質評価のために有用であることも示されている。しかし管体形状と音響特性の関連や吹奏感や吹奏時の音色との対応にまでは触れていない。一方，マウスピースは音色も含めた吹奏感に大きく影響すると言われる。

本章では管体形状のうち特にマウスピースの形状が音響特性に及ぼす影響について解析を進めることにする。4.2節では，唄口からの入力として周期的パルス入力を仮定して，唄口を含む音響管全体をモデル化して音響要因の伝達特性を解析し，唄口の特性の影響を考察する。4.3節では，唄口を含む管体形状と音色の形成過程を分析して吹奏感との対応を考察する。おわりに，まとめと今後の課題をあげ，音色も含めた吹奏感と音響特性の設計評価システムへの適用の可能性について言及する。

4.2 マウスピースの伝達特性と音色形成

本節では第2吹奏系モデルとして入力を周期的パルスに想定して放射音とその生成の過程を推定する。

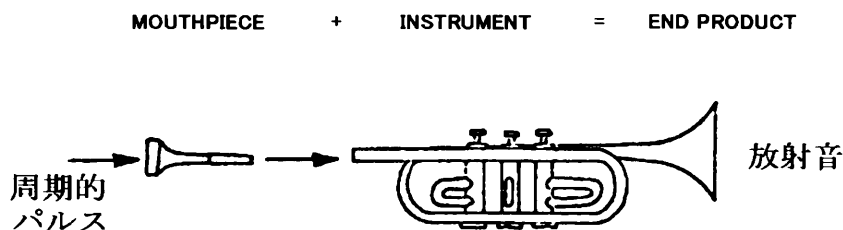


Fig.1-2-2 第2吹奏系モデル

4.2.1 マウスピースと吹奏感の特徴

ここではマウスピースの形状が楽器全体の音響特性に及ぼす要因を検討するにあたって，まずトランペット（Bb管とC管）用の3種類のマウスピースについて，その音色も含めた吹奏感の定性的な評価を検討した。吹奏感の要因としては立ち上がり部に関する要因と定常部に関する要因があると考えられる。ここではそれらを総評する要因として，音色(明

るい／暗い, 柔らかい／硬い), 音量(大きい／小さい, 抜ける／詰まる), レスポンス (立ち上がり速い／遅い, 切れが良い／悪い) について評価した。ここではマウスピースの設計者でもあるプレーヤが, 他のプレーヤの定評意見も加味して, 標準値0を中心に±10点で評価して尺度上に示した(Fig. 4-1)。これを目安として吹奏感と音響特性との対応を検討する。

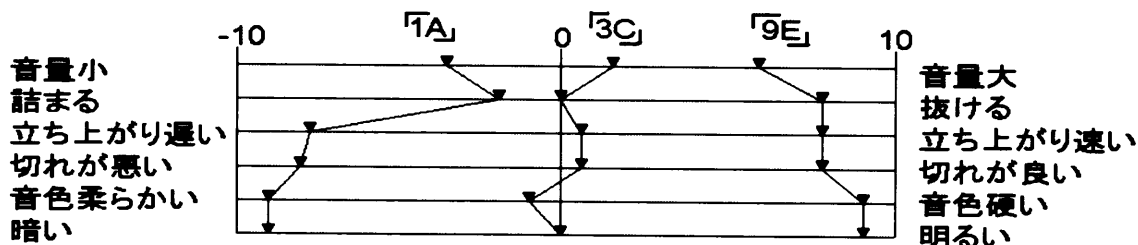


Fig. 4-1 3つのマウスピースの吹奏感評価

特徴を挙げれば, 標準的な「3 C」に対して, カップの深い「1 A」は暗く柔らかい音色で, 詰まり気味で鳴りにくく, レスポンスも立ち上がりが遅く, 切れも悪い。カップの浅い「9 E」は明るく硬い音色で, 音量が大きく良く抜ける。レスポンスは立ち上がり速く, 切れも良い。こうした特徴は管体本体によらず, 主として唄口の形状に関連があると思われる。奏者は種々あるマウスピースの中から自分の奏法と演奏楽曲に合わせて選んで使っている。さらに奏者が既製品ではなく個人用に特殊なマウスピースの製作をメーカーに注文することも稀ではない。

4. 2. 2 入力モデル設定と放射音スペクトル推定

ここで想定するモデルでは唄口端は例えばピストンホーンのような振動し得る弾性薄板で閉じているとして, 開口端の境界条件は無有限大バツフル面内のピストン運動に仮定する。実際の吹奏系では入力の倍音成分は一定レベルではなく重み付けされていると考えられるが, 本旨では一定レベルの入力モデルを仮定する。実際の吹奏系の入力モデルの推定と吹奏系のシミュレーションの課題については5章で取り上げる。

そこで唄口端からの入力 $Pin(\omega)$ に対して定在波が立っている状態の伝達特性は, 開口端からの放射音レベルを $P_0(\omega)$ とすると(2.10)式より

$$G(\omega) = P_0(\omega) / Pin(\omega) \quad (4.1)$$

の関係となる。

唄口端から, 基本周波数に対して8kHzまで一定レベルの倍音成分を含む周期的パルスを入射したときの開口端からの出力成分の相対レベル, すなわち放射スペクトルを推定する。Fig. 1-2-2において, 原点側の唄口端から入射され, x軸方向に進行波が伝播してベル開口部に至り, 一部が反射されて定在波が立つものとする。

周期的パルス入力をデルタ関数により

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$$

とすると, フーリエ変換して

$$F(\omega) = \omega_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_0)$$

$\omega_0 = 2\pi/T$; T は周期的パルスのサンプリング間隔

となる。従って、ここで

$$Pin(\omega) = F(\omega)$$

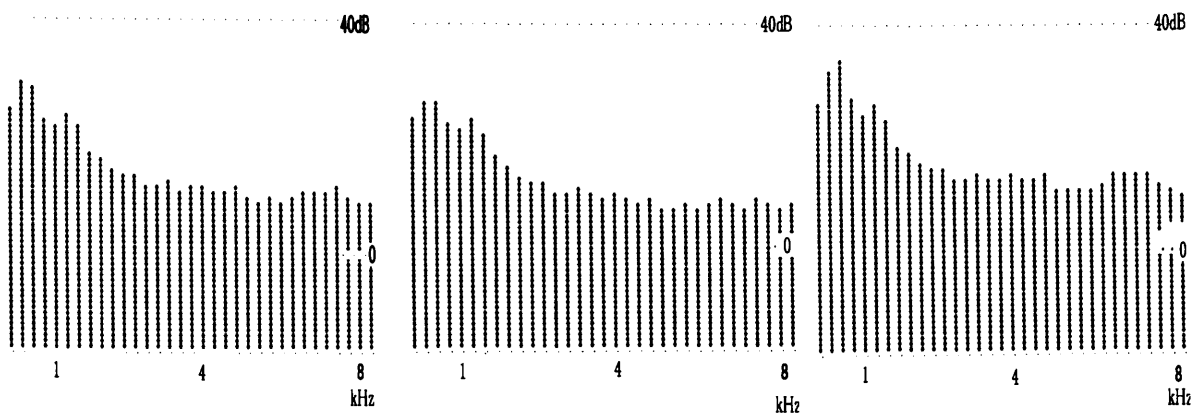
とすると開口端からの放射出力 $P_0(\omega) = H(\omega)$ として(4.1)式より

$$H(\omega) = F(\omega) \cdot G(\omega) = \omega_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_0) \cdot G(n\omega_0) \quad (4.2)$$

となる。

4. 2. 3 管体全体の伝達特性

マウスピースを含む管体全体の音色形成過程について見るために、(2.10)式により管体全体の各断面の伝達特性を算出した。計算では唄口端はリジッドな閉端として行う。管体本体(C管)は共通であるから、マウスピースの伝達特性の特徴が放射音に反映されていることが予測される。そこでまず、マウスピース「3 C」の場合の1番ピストン押さえ時(これを(1. 0. 0)と表記する)の運指の第2次モード (f2; ピッチ 241Hz) に対する放射スペクトル $H(\omega)$ を(4.2)式により 8kHz まで算出した。これは唄口端から周波数 f2 の周期的パルスを一定レベルで入力して、これが管内で減衰して開口端から放射される放射出力スペクトルを示している (Fig. 4-2)。すなわち基本周波数に対して 8kHz までの倍音成分を含む一定レベルの周期的パルス(ここでは放射音圧 1 に対して 100 の入力、すなわち 40dB の入力レベルを想定する)を唄口端から入射したときの管体の伝達特性を相対音圧で示している。マウスピース「1 A」, 「9 E」についても併せて示す。管体本体は同じでもマウスピースを含む管体全体の伝達特性はマウスピースの形状の違いによって異なっている。その差異はマウスピースの形状も含めた管体全体の伝達特性の違いとして、吹奏時の音色や音質の相対的な比較評価のために有効であると推測する。



マウスピース「3 C」 マウスピース「1 A」 マウスピース「9 E」

Fig. 4-2 1番ピストン押さえ時(1. 0. 0)の運指の第2次(f2)のモードの開口端からの放射スペクトル

そこで Fig. 4-2 に関して、 $H(\omega)$ の 2kHz までの 1 次から 8 次の成分の音圧レベルを Table 4-1 に示す。第 2 次 (f2) モードの F1~F8 の成分について示しているが、第 4 次 (f4) モードは (F2, F4, F8) 成分から、第 8 次 (f8) モードは (F4, F8) 成分から特徴を読み取ることができる。

Table 4-1 ベル開口端の放射スペクトルレベル
(単位は dB)

マウスピース	「3 C」	「1 A」	「9 E」
成分(Hz)	$H(\omega)$	$H(\omega)$	$H(\omega)$
F1(241)	24.60	23.81	26.03
F2(482)	30.00	26.47	31.65
F3(724)	28.44	26.35	35.55
F4(964)	21.42	21.77	26.70
F5(1205)	20.96	21.62	24.21
F6(1446)	27.91	27.31	30.48
F7(1687)	49.06	40.98	48.64
F8(1928)	20.96	21.92	22.55

吹奏感の要因のうち、音量は中低域の成分のレベルが影響している。スペクトルの包絡線特性(フォルマント特性)が音色の違いに、また高域の成分の音圧レベルは音質に影響する。今、仮に 1 kHz 以下を低域、1~2 kHz を中域、2 kHz 以上を高域とすると、放射出力 $H(\omega)$ は F1~F8 では総じて「9 E」のレベルが高く、音量が大きく良く鳴ることが推測される。また F1~F8 のピークの包絡線が音色を特徴づける一つの要素になっているであろう。2 kHz 以上の成分は表には示していないが放射出力 $H(\omega)$ では 1 A < 3 C < 9 E の順にレベルが高く、「9 E」の音質が明るく硬いことに対応し、「1 A」の音質が暗くて柔らかいことに対応する。各マウスピースの音色に関する吹奏感の特徴と良く対応していることがわかる。

4. 3 マウスピースを含む音響管全体の音響特性

4. 3. 1 各断面の音響インピーダンスと音圧と速度

各成分に対してマウスピースを含む全管長にわたって、(2.5), (2.6), (2.7) 式を各要素に順次適用して、各断面の音圧と速度と音響インピーダンスを算出した。円筒管要素には(2.8)式を適用する。Fig. 4-3 に「3 C」の場合の F3 成分の例を示す。音響インピーダンスは(2.3)式の Z を ρc で割った音響インピーダンス比の絶対値である。横軸は断面位置を示す。縦軸の目盛りは各特性値に対して共通である。音圧の単位は [dB] である。

音圧は(2.6)式で唄口端からの入射音圧レベルを一定として各要素における音圧の変化分を算出し、これを唄口端から各断面まで累積して相対的な音圧変化として dB 値で示す。以後これを管内の音圧分布とする。速度については簡便のために音圧分布値を音響インピーダンス比で割った値で、グラフ表記上数値を 1/10 に圧縮している。こうすることで各特性値を一つのグラフに併記することができ、管内の音響特性値の相対的な分布を観ることができる。

断面の間隔は均等ではない。特に主管部は円筒管のために長さは短縮してある。断面位置はマウスピースは 1~46, 吹き込み管は 47~64, 主管 (1 番ピストン押さえ時は第 1 抜差管を含む) は 65~89, ホーン部は 90~134, ベル部は 135~169, マウスピースのスロー

ト部は、「3 C」では断面位置で14~18, 「1 A」では17~18, 「9 E」では12~20である。ベル部の内151~169はベル開口部とし、ベル開口端は169である。

音圧分布と速度分布の増減はホーン部まではほぼ逆相で変化し、音圧極大の要素で速度は極小となり、音響インピーダンスは極大値となる。断面135以降のベル部では円錐台要素のテーパが暫時拡大して、速度は減速して音響インピーダンスは暫増する。

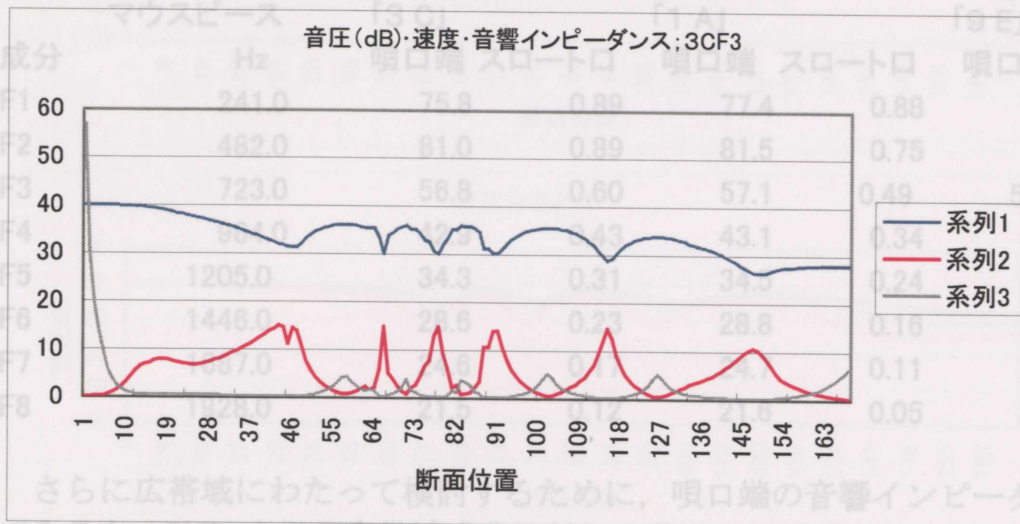
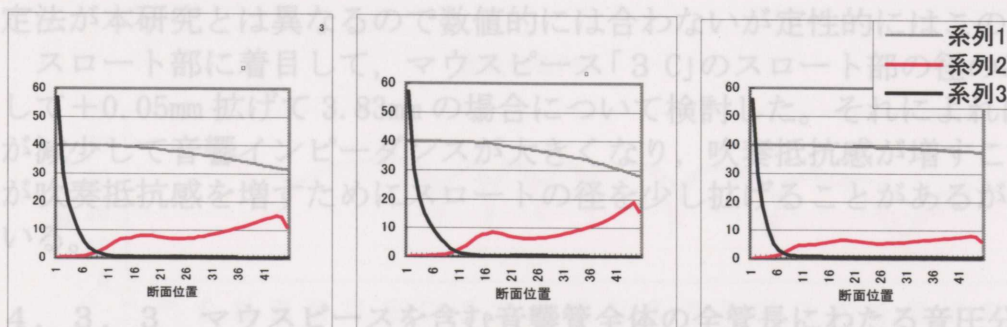


Fig. 4-3 「3 C」のF3成分の音圧と速度と音響インピーダンスの分布
 系列1,2,3は音圧と速度と音響インピーダンスに対応する。

4. 3. 2 マウスピースと吹奏感の対応

吹奏感は奏者に近い部位であるマウスピースの音響特性に主に依存していると推測される。鳴らし易さは唄口端面の振動し易さ、すなわち端面の音響インピーダンスが小さいことと関係があると予測する。一方吹奏抵抗感はスロート部の粒子速度が関係していると予測する。そこでまず、Fig. 4-3に示したマウスピース内の音圧と速度と音響インピーダンスの分布をFig. 4-4に示す。マウスピース「1 A」と「9 E」についても併せて示す。



マウスピース「3 C」 「1 A」 「9 E」

Fig. 4-4 マウスピース内のF3成分の音圧と速度と音響インピーダンスの分布

系列1,2,3は音圧と速度と音響インピーダンスに対応する。

マウスピース「3 C」, 「1 A」, 「9 E」の唄口端(断面2)とスロート入口の音響インピーダンスをTable 4-2に示す。唄口端の音響インピーダンスはF1~F8で9 E < 3 C < 1 Aの順に高い。「9 E」の音響インピーダンスが低いということは唄口端部が振動し易いことになる。音響インピーダンスは唄口カップ端面で最大で、断面積の減少とともに小さくなってスロート部で極小値となる。スロート入口での値は1 A < 3 C < 9 Eの順である。「9 E」は

スロート部で速度が小さく、カップ内で音圧はほぼ一定のために、音響インピーダンスが高く吹奏抵抗が大きいことになる。

Table 4-2 マウスピース「3 C」, 「1 A」, 「9 E」の
 唄口端とスロート入口の音響インピーダンス

成分	マウスピース Hz	「3 C」		「1 A」		「9 E」	
		唄口端	スロート口	唄口端	スロート口	唄口端	スロート口
F1	241.0	75.8	0.89	77.4	0.88	71.1	1.04
F2	482.0	81.0	0.89	81.5	0.75	79.2	1.21
F3	723.0	56.8	0.60	57.1	0.49	55.9	0.84
F4	964.0	42.9	0.43	43.1	0.34	42.2	0.61
F5	1205.0	34.3	0.31	34.5	0.24	33.8	0.47
F6	1446.0	28.6	0.23	28.8	0.16	28.2	0.36
F7	1687.0	24.6	0.17	24.7	0.11	24.2	0.28
F8	1928.0	21.5	0.12	21.6	0.05	21.2	0.22

さらに広帯域にわたって検討するために、唄口端の音響インピーダンスを絶対値で比べてみると、8kHz までの全帯域成分に対して共通して 9 E < 3 C < 1 A の順に大きくなっている。「9 E」より「1 A」の方が唄口閉端部が振動しにくいことになる。スロート部入口からカップを見る音響インピーダンスは 2.8kHz 以下では 1 A < 3 C < 9 E の順に大きくて、3.1kHz 以上の高域成分に対しては 9 E < 3 C < 1 A となっている。速度で見ればこの逆の関係になっている。すなわちスロート部の速度と相関があると言われる吹奏抵抗感との対応において「1 A」は低中域成分に対しては抵抗感が少なく、高域成分に対しては抵抗感が増すことになる。「9 E」はその逆の傾向で、低中域成分に対しては抵抗感が大きく、高域成分に対しては抵抗感が少ないことになる。唄口端部の音響インピーダンスはカップの深さの異なるマウスピースで、カップの深さが浅くなるほど周波数帯域で F4 と F2 の音響インピーダンスの比が高くなり音は明るくなるという報告[31] もあるが、計算モデルと測定法が本研究とは異なるので数値的には合わないが定性的にはこのことと対応している。

スロート部に着目して、マウスピース「3 C」のスロート部の径のみを標準の 3.78mm に対して +0.05mm 拡げて 3.83mm の場合について検討した。それによれば、径を拡げると速度が減少して音響インピーダンスが大きくなり、吹奏抵抗感が増すことになる。プロの奏者が吹奏抵抗感を増すためにスロートの径を少し拡げることがあるが、このことと対応している。

4. 3. 3 マウスピースを含む音響管全体の全管長にわたる音圧分布と音色形成過程

各マウスピースに対してマウスピースを含む音響管全体の全管長にわたる軸方向の音圧分布を算出して音色形成過程の一端を探ることとする。F1, F2, F3, F4 成分の音圧分布を Fig. 4-5 に示す。

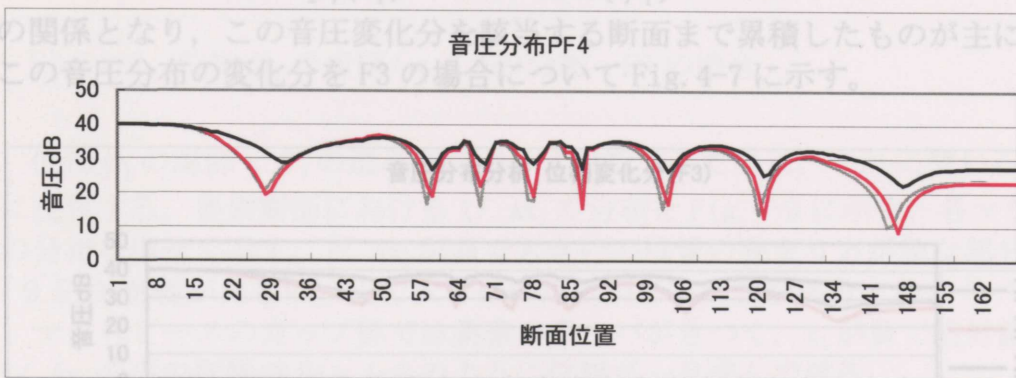
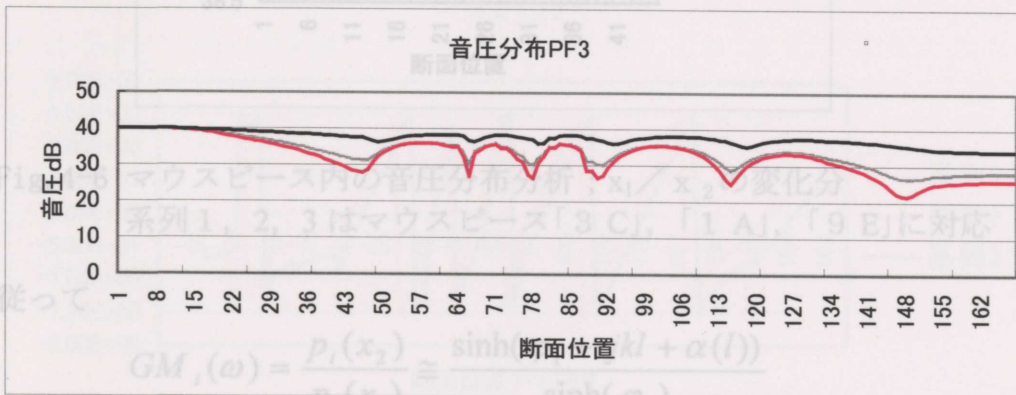
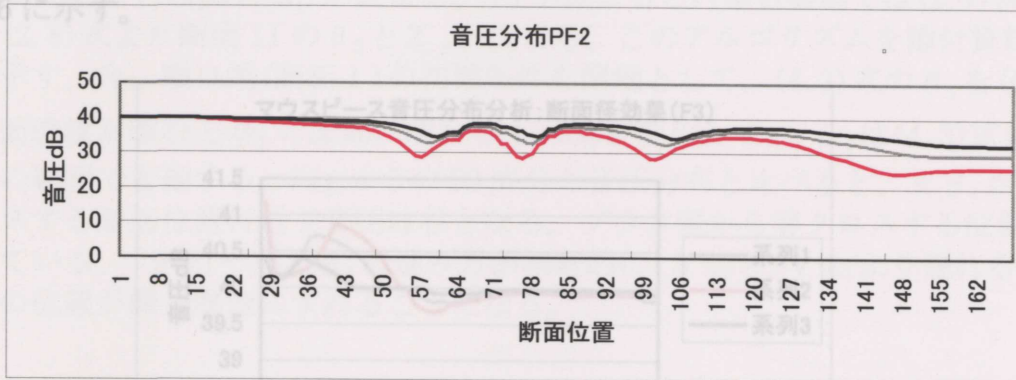
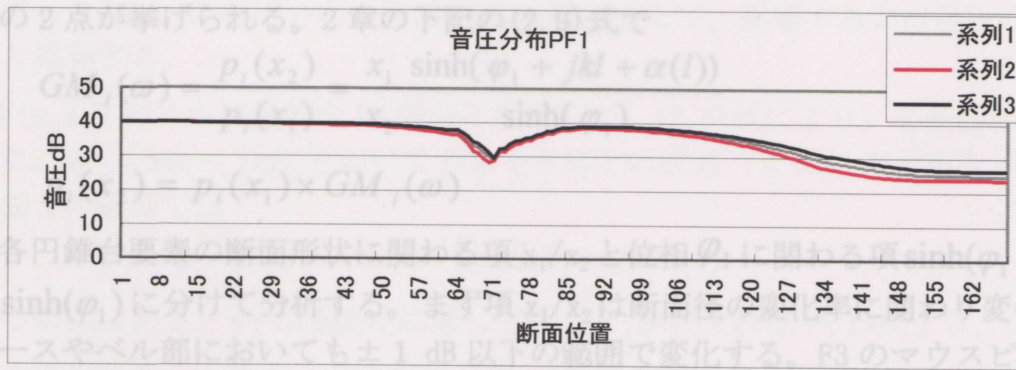


Fig. 4-5 F1, F2, F3, F4 成分の全管長にわたる音圧分布：
 系列 1, 2, 3 はマウスピース「3C」, 「1A」, 「9E」に対応する

- 「9E」の場合には特徴として、
- 1) 各ピーク(山)が開口端側にずれる。
 - 2) F1~F4 に共通して開口端の音圧が高く、各山のレベルも高く、谷は浅いこと。

の2点が挙げられる。2章の下記の(2.9)式で

$$GM_i(\omega) = \frac{p_i(x_2)}{p_i(x_1)} = \frac{x_1}{x_2} \frac{\sinh(\varphi_1 + jkl + \alpha(l))}{\sinh(\varphi_1)}$$

$$p_i(x_2) = p_i(x_1) \times GM_i(\omega) \tag{2.9}$$

各円錐台要素の断面形状に関わる項 x_1/x_2 と位相 φ_1 に関わる項 $\sinh(\varphi_1 + jkl + \alpha(l)) / \sinh(\varphi_1)$ に分けて分析する。まず項 x_1/x_2 は断面径の変化率に関わり変化率の大きいマウスピースやベル部においても ± 1 dB 以下の範囲で変化する。F3 のマウスピース内の変化を Fig. 4-6 に示す。

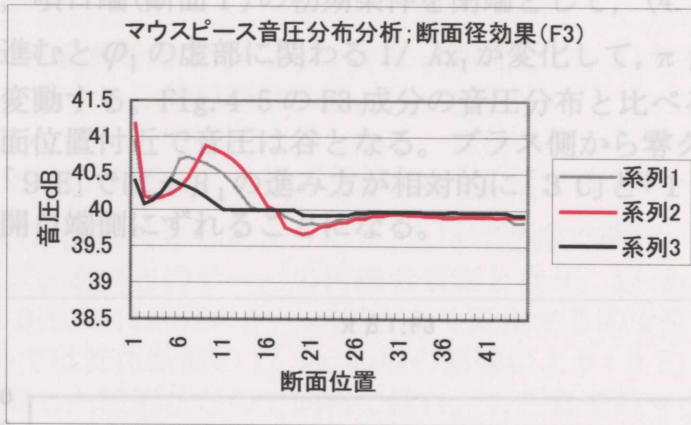


Fig. 4-6 マウスピース内の音圧分布分析； x_1/x_2 の変化分
 系列1, 2, 3はマウスピース「3 C」, 「1 A」, 「9 E」に対応
 従って

$$GM_i(\omega) = \frac{p_i(x_2)}{p_i(x_1)} \cong \frac{\sinh(\varphi_1 + jkl + \alpha(l))}{\sinh(\varphi_1)}$$

の関係となり、この音圧変化分を該当する断面まで累積したものが主に音圧分布に相当する。この音圧分布の変化分を F3 の場合について Fig. 4-7 に示す。

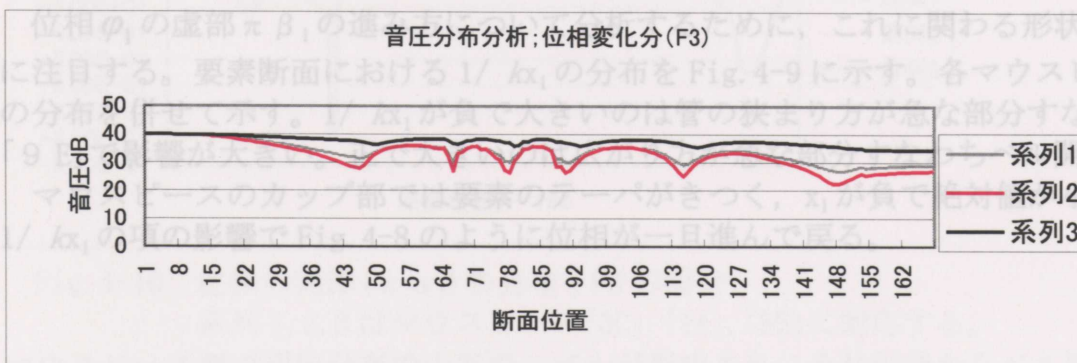


Fig. 4-7 音圧分布分析； $\sinh(\varphi_1 + jkl + \alpha(l)) / \sinh(\varphi_1)$ の変化分
 系列1, 2, 3はマウスピース「3 C」, 「1 A」, 「9 E」に対応する。

従って「9 E」の音圧分布の特徴の 1)の原因として、影響するのは音圧の位相の進み方であろうと推測する。

Fig. 4-5 のうち特徴的な F3 成分に注目して、(2.5)式により、各断面における位相 φ_1 を算出した。 $\varphi_1 = \pi\alpha_1 - j\pi\beta_1$ において Fig. 4-8 にその虚部 ($\pi\beta_1$) の分布を示す。(2.5)式より特定断面 I の近傍では

$$\varphi_1 = \varphi + jkx_1 = -\coth^{-1}((\coth\theta_1 + j/kx_1)) \quad (4.3)$$

の関係にある。 φ_1 の連続性に関しては、 θ_1 が決まれば φ_1 が決まり、 $GM_i(\omega)$ すなわち音圧の変化分 $P_i(x_2)/P_i(x_1)$ が決まる。 φ_1 が決まると円錐台要素では(2.7)式より、円筒管要素では(2.8)式より断面 II の θ_2 と Z_2 が決まる。このアルゴリズムを添付資料[II]のサブルーチンに示す。今、唄口端(断面 I)の初期条件を閉端として、(4.3)式の θ_1 を $(0, -j\pi/2)$ とする。断面位置が進むと φ_1 の虚部に関わる $1/kx_1$ が変化して、 $\pi\beta_1$ は(4.3)式により $-\pi/2 \sim \pi/2$ の範囲で変動する。Fig. 4-5 の F3 成分の音圧分布と比べると、 $\pi\beta_1$ がマイナス側から零クロスする断面位置付近で音圧は谷となる。プラス側から零クロスする位置付近で音圧は山となっている。「9 E」では $\pi\beta_1$ の進み方が相対的に「3 C」と「1 A」より遅れるので音圧のピークと谷の位置が開口端側にずれることになる。

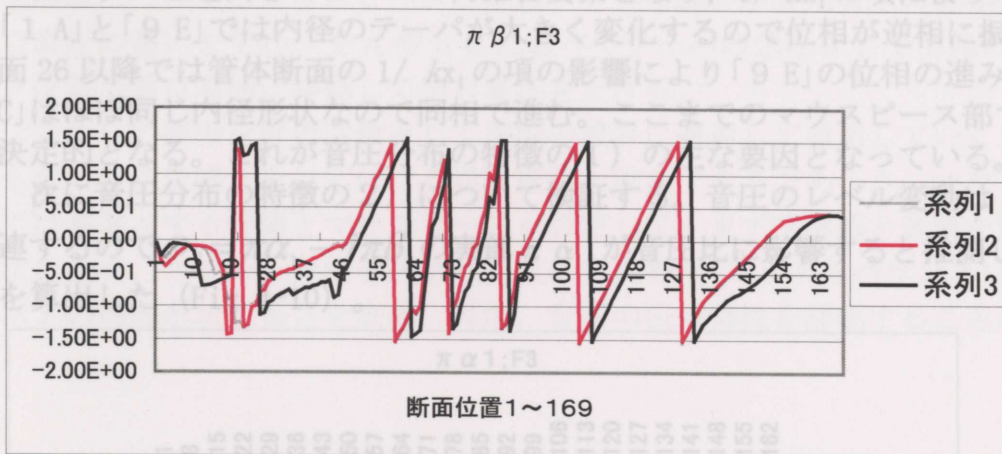


Fig. 4-8 位相 φ_1 の虚部 ($\pi\beta_1$) の分布 ; F3 の場合

位相 φ_1 の虚部 $\pi\beta_1$ の進み方について分析するために、これに関わる形状要因として $1/kx_1$ に注目する。要素断面における $1/kx_1$ の分布を Fig. 4-9 に示す。各マウスピース部の $1/kx_1$ の分布を併せて示す。 $1/kx_1$ が負で大きいのは管の狭まり方が急な部分すなわちカップ部で「9 E」で影響が大きい。正で大きいのは広がり方が急な部分すなわちベル開口部である。

マウスピースのカップ部では要素のテーパがきつく、 x_1 が負で絶対値が小さいので、主に $1/kx_1$ の項の影響で Fig. 4-8 のように位相が一旦進んで戻る。

Fig. 4-10 位相の実部 ($\pi\alpha_1$) の分布 ; F3 の場合

系列 1, 2, 3 はマウスピース「3C」, 「1A」, 「9E」に対応する。マウスピース部で音圧分布の山谷のレベルが形成され、それ以降からベル開口部までは $\pi\alpha_1$ が微増して山谷のレベルは暫減傾向となる。ベル開口部では $\pi\alpha_1$ が変動して一旦下がって後ほぼ山のレベルで開口端に至る。断面形状との関連で、減衰項 $\alpha(\lambda)$ は係数のオーダーが 1.0×10^{-4} のために微小で $\pi\alpha_1$ への影響はなく、図示はしないが θ_1 の実部とは逆符号で相関を

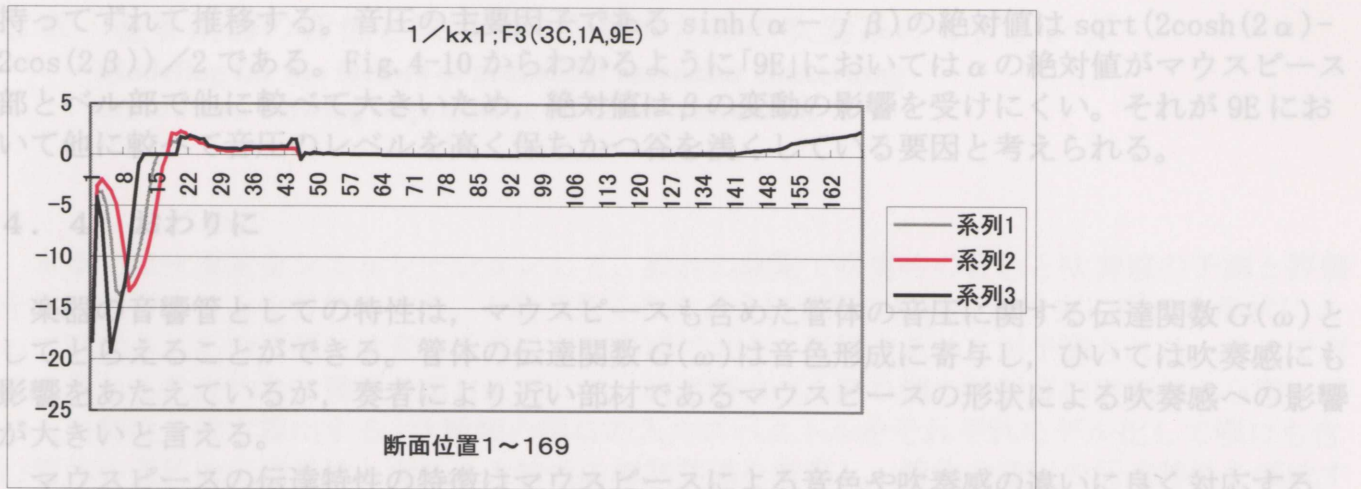


Fig. 4-9 各要素断面の $1/kx_1$ の分布 ; 系列 1, 2, 3 はマウスピース 3C, 1A, 9E に対応。
吹き込み管以降は共通。

スロート部は円筒管で、カップ部が浅い「9 E」ではスロート部が他より長く、この間で音圧の位相 φ_1 は (2.8) 式で示したように θ_1 とほぼ逆相が進む。バックボアから吹き込み管部にかけてはカップと逆向きのテーパの円錐台要素となり、 $1/kx_1$ の項によりバックボアの入口で、「1 A」と「9 E」では内径のテーパが大きく変化するので位相が逆相に振れる。バックボアの断面 26 以降では管体断面の $1/kx_1$ の項の影響により「9 E」の位相の進みが遅れる。「1 A」と「3 C」はほぼ同じ内径形状なので同相が進む。ここまでのマウスピース部で「9 E」の位相の遅れが決定的となる。これが音圧分布の特徴の 1) の主要要因となっている。

次に音圧分布の特徴の 2) について検証する。音圧のレベル変動は $\sinh(\varphi_1)$ の絶対値に関連するので $\varphi_1 = \pi\alpha_1 - j\pi\beta_1$ の実部 $\pi\alpha_1$ が音圧比に影響すると推測して、各断面位置の分布を算出した (Fig. 4-10)。

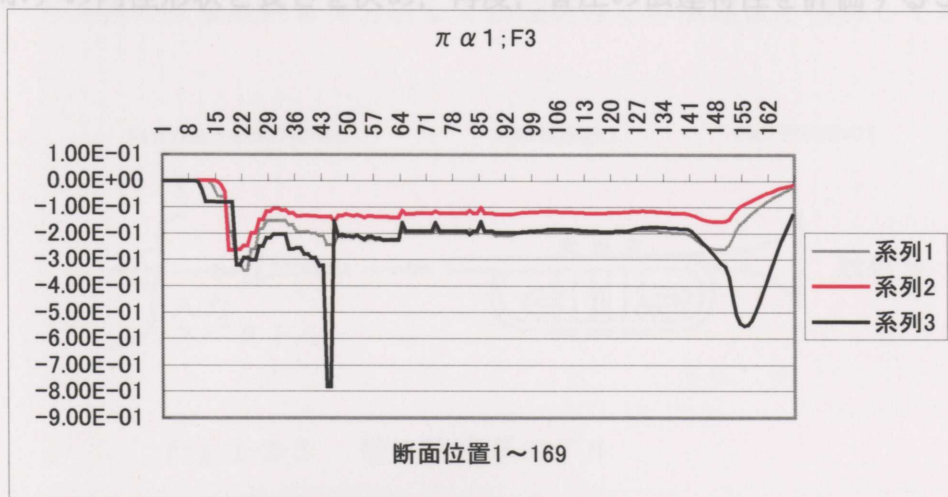


Fig. 4-10 位相の実部 ($\pi\alpha_1$) の分布 ; F3 の場合
系列 1, 2, 3 はマウスピース「3C」、「1A」、「9E」に対応する。

マウスピース部で音圧分布の山谷のレベルが形成され、それ以降からベル開口部までは $\pi\alpha_1$ が微増して山谷のレベルは暫減傾向となる。ベル開口部では $\pi\alpha_1$ が変動して一旦下がって後ほぼ山のレベルで開口端に至る。断面形状との関連で、減衰項 $\alpha(l)$ は係数のオーダーが 1.0×10^{-4} のために微小で $\pi\alpha_1$ への影響はなく、図示はしないが θ_1 の実部とは逆符号で相関を

持ってずれて推移する。音圧の主要因子である $\sinh(\alpha - j\beta)$ の絶対値は $\sqrt{2\cosh(2\alpha) - 2\cos(2\beta)}$ / 2 である。Fig. 4-10 からわかるように「9E」においては α の絶対値がマウスピース部とベル部で他に較べて大きいため、絶対値は β の変動の影響を受けにくい。それが 9E において他に較べて音圧のレベルを高く保ちかつ谷を浅くしている要因と考えられる。

4. 4 おわりに

楽器の音響管としての特性は、マウスピースも含めた管体の音圧に関する伝達関数 $G(\omega)$ としてとらえることができる。管体の伝達関数 $G(\omega)$ は音色形成に寄与し、ひいては吹奏感にも影響をあたえているが、奏者により近い部材であるマウスピースの形状による吹奏感への影響が大きいと言える。

マウスピースの伝達特性の特徴はマウスピースによる音色や吹奏感の違いに良く対応する。唄口端部の音響インピーダンスはカップの深さの異なるマウスピースで、カップの深さが浅くなるほど周波数帯域で F4 と F2 の音響インピーダンスの比が高くなり音は明るくなる。鳴らし易さは唄口端面の振動し易さ、すなわち端面の音響インピーダンスが小さいことと関係がある。一方吹奏抵抗感はスロート部の粒子速度が関係している。スロートの径を広げると速度が減少して音響インピーダンスが大きくなり、吹奏抵抗感が増すことになる。マウスピースによる音色形成についてはマウスピースごとのテーパの違いが管内音圧の位相の進みの違いを生み、出口音圧の違いを生む。1 A や 3 C に較べてテーパの急な 9 E で位相の進みが遅れ、音圧ピーク位置が開口端側に移動して出口音圧を上げる。

これらの要因を評価関数として実際の設計に適用して運用していくことで、形状設計と音色も含めた吹奏感とを対応付ける設計理論を確立できるであろう。マウスピースの設計手法としては基準とする管体とマウスピースを設定して、まず吹奏感と音質を評価関数としてカップ形状を決め、スロート形状を決める。次に音高特性(ピッチとバランス)を調整するためにバックボアの内径形状と長さを決め、再度、音圧の伝達特性を評価することになる。

5章 金管楽器の音色と吹奏感の評価のための吹奏系のモデリング

Modeling for the factors of acoustical resonator concerning timbre and blowing impressions of brass instrument

5.1 はじめに

本章では吹奏系をシミュレーションして、設計の段階で吹奏時の音色と吹奏感の予測と評価を的確に行うことを目的とする。4章で見てきたように音圧の伝達特性は主に唄口の形状によって形成されるので唄口は音色も含めた吹奏感に大きく影響することが予測される。そこで形状の異なる代表的な3種類の唄口に対して、吹奏時のベル開口端の放射音の実測値から唄口端の入力特性を推定算出する。3種類の唄口の入力スペクトルをそれぞれモデル化して唄口も含む管体の音圧の伝達特性と奏法入力特性の相関関係を考察し、管体の音圧の伝達特性を反映するように入力モデルを設定する。この入力モデルを使って吹奏系のシミュレーションを行って、吹奏放射音の音質と入力スペクトルモデル(吹奏感と相関する)を評価する。

5.2節ではまずマウスピースも含めた管体の伝達特性を算出して、一方実際の吹奏音を分析して伝達特性との関連性を検討する。5.3節では吹奏時の定常状態の入力スペクトルを推定し管体の伝達特性の特徴を入力に反映するようにモデル化して、これにより出力波形を再合成して入力スペクトルのモデル化の妥当性を検討する。5.4節では入力スペクトルのモデルによりシミュレーションを行い、それを適用した解析事例を示す。5.5節では立上がり入力モデルの実験式を示して、立上がりから定常態に至るまでのシミュレーションを行って可聴化への可能性を示す。おわりに、まとめと今後の課題をあげ、音色も含めた吹奏感と音質と音量などの音響特性の評価への適用の可能性について言及する。

5.2 管体の伝達特性と音色形成

本節では第3吹奏系モデルとして、まずマウスピースも含めた管体の伝達特性を算出して、一方実際の吹奏放射音を分析して伝達特性との関連性を検討して入力スペクトルを推定する。

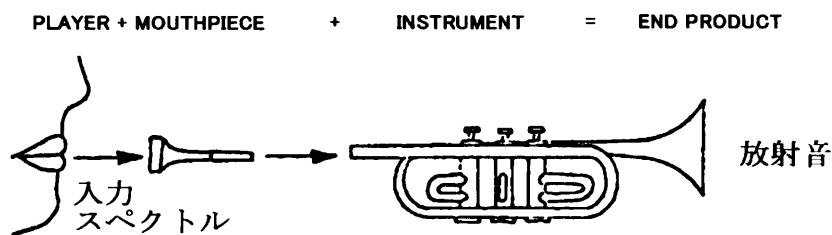


Fig. 1-2-3 第3吹奏系モデル

5.2.1 マウスピースの形状の違いによる管体全体の伝達特性の差異

トランペットC管(C02)により、マウスピースは標準的な形状のもの「3C」に対してカップを浅くしたもの「9E」と深くしたもの「1A」の3種類を使った。

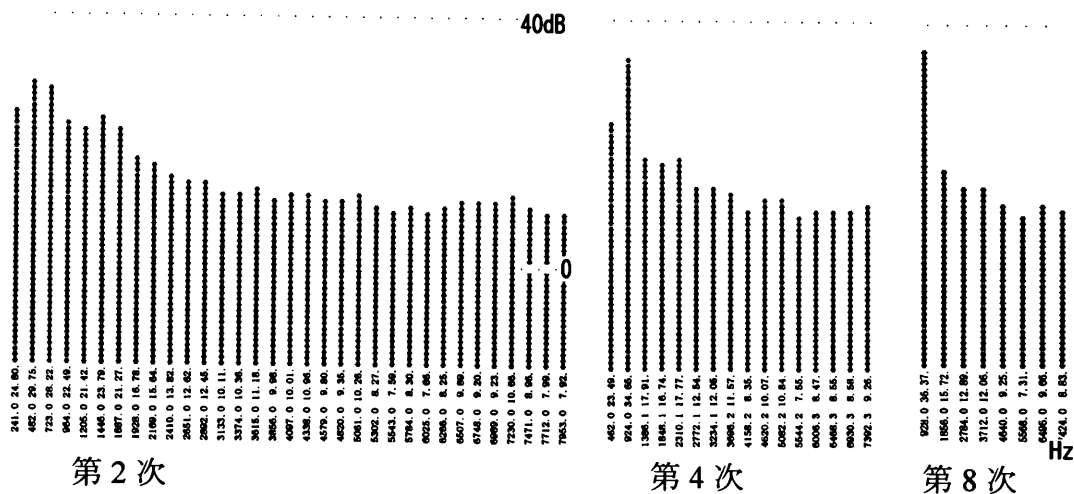


Fig. 5-1(a) 1番ピストン押さえ (1.0.0) の運指の第2次と第4次と第8次のモードの開口端から見た伝達特性 ($1/G(\omega)$) ; 縦軸は音圧(dB)表記

マウスピース 3 C の場合の 1 番ピストン押さえ (1.0.0) の運指の第2次 (f_2) モード (ピッチは 241Hz) に対する管体本体のキャビティの伝達特性を(4.1)式において $P_o(\omega) = 1$ として 8 kHz まで算出した(Fig. 5-1(a))。これは開口部からの周波数 f_2 のパルス入力に対する唄口端の応答を音圧表記したものである。すなわち開口端からの 8kHz までの成分を持つ周期的パルス入力に対する伝達特性を示している。第4次 (f_4) モードと第8次 (f_8) モードの特性は第2次 (f_2) モードの倍音成分に対応している。同様にマウスピース 1 A と 9 E の第2次の開口端から見た伝達特性 ($1/G(\omega)$) を Fig. 5-1(b)に示す。

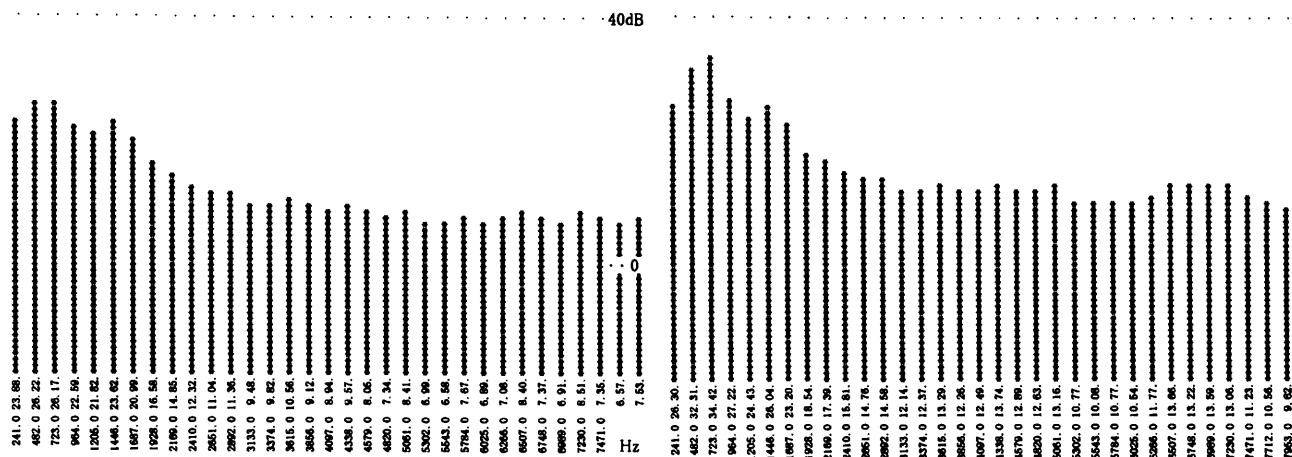
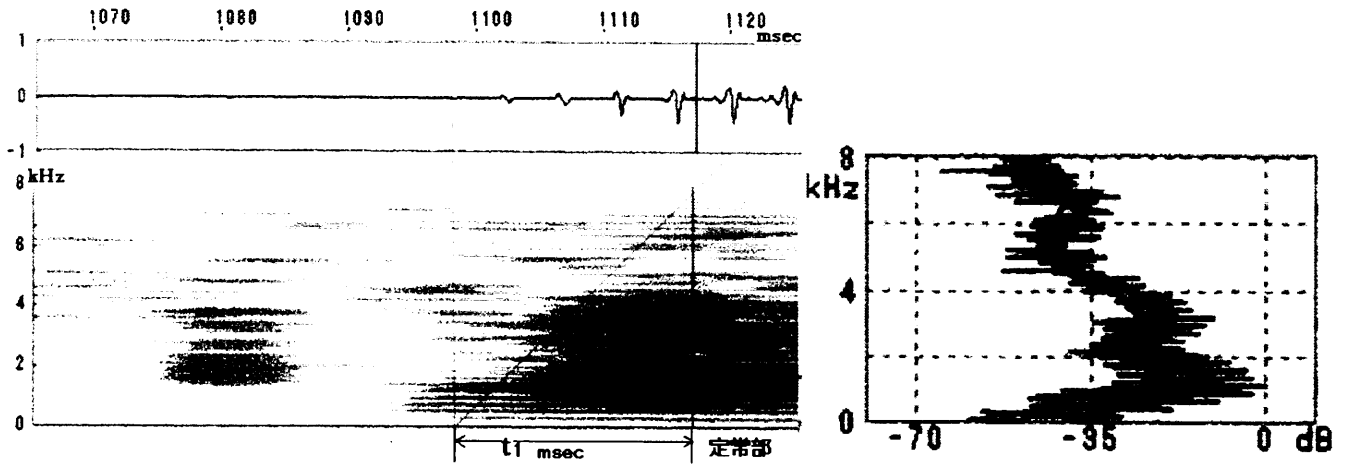


Fig. 5-1(b) 1番ピストン押さえ (1.0.0) の運指の第2次のモードの開口端から見た伝達特性 ($1/G(\omega)$) ; 縦軸は音圧(dB)表記 ; マウスピース「1 A」と「9 E」の場合

5. 2. 2 吹奏系の解析

ここでは奏者は一人に限定して楽器はトランペット C 管 (C02) により, マウスピースは前出の 3 種類を使って, 1 番ピストン押さえ(1.0.0)の運指で標準的な奏法でやや強めに吹いた f_2 , f_3 , f_4 , f_5 , f_6 , f_8 の放射音を収録して FFT 分析した。分析の条件は 16kHz サンプリグでウィンドウはハニングで行った。Fig. 5-2 に分析例を示す。



立上がり波形(上)とスペクトログラム(下)

定常部スペクトル

Fig. 5-2 分析例 ; f2 (M.P.は9 E) ; t_1 msec で立上って定常部に至る

・立上りの特徴

狭帯域スペクトログラムで時間軸を拡大してみると低次成分が速く立上がり、高次の歪成分は遅れて立上がる。高次の倍音成分まで一定レベルにまで立上がるには平均的には5～6周期を要する。f2では0.5周期(2msec)で立上がる場合も観測された(Table 5-1)。f3やf6で10周期で立上がるケースもあった。こうした現象はマウスピースの種類や音域との相関はなく、管体の応答性も含めた奏者の奏法によると思われる。f8では一発で共振点にあたらずに修正して立上がるケースもあった。これらは楽器の特性というよりもマウスピースの特徴も含めた奏法上の現象であり吹奏感にも影響しているであろう。多様な立上りの特徴の中から奏法入力の特徴をモデリングしていく。ここでは1～20周期の立上がりに対応し得るモデルを想定する。平均的には5～6周期で立ち上がるとして5.5節でモデリングする。

Table 5-1 立上がるまでの周期(t_1 msec)

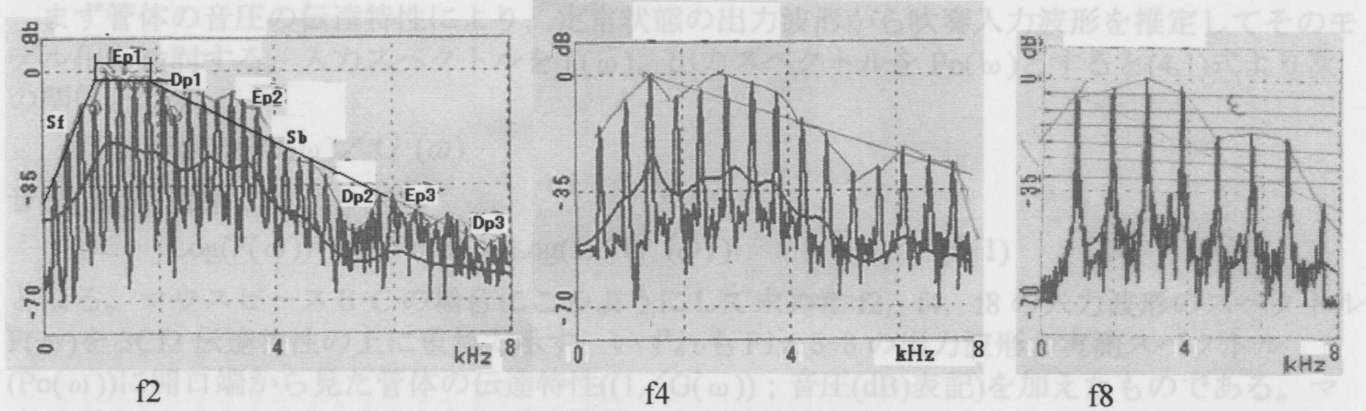
モード次数	M.P.3C		M.P.1A		M.P.9E	
	周期	時間	周期	時間	周期	時間
f2	0.5	2	5	20	4	16
f3	10	25	8	20	7	17
f4	5	9	5	9	6	11
f5	8	14	6	10	6	10
f6	5	6	7	8	10	12
f8	6	6	20	20	5	5

・最大音圧定常状態時のスペクトルの包絡線の特徴

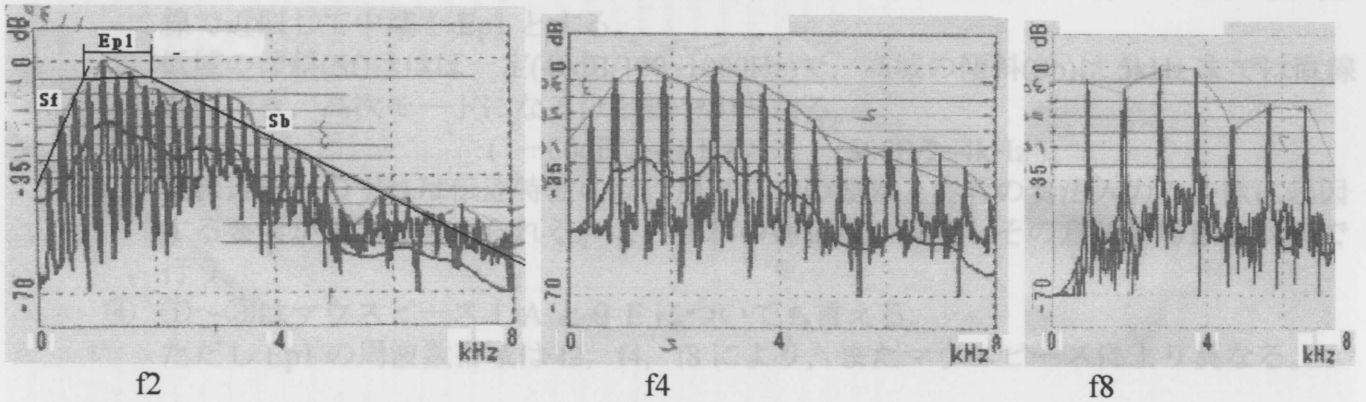
f2の包絡線を模式的に示し、そのピーク Ep1, Ep2, Ep3 とディップ Dp1, Dp2, Dp3 を示す(Fig. 5-3)。Ep1は最高スペクトルレベル(0dB)から-5dBのレベルとする。横軸は周波数(kHz)を示す。Ep1より低次のスペクトルのピークの包絡線を直線で近似してその傾きを Sf とする。Ep1より高次のスペクトルのピークの包絡線を直線で近似してその傾きを Sb とする。これから次のことが言えよう。

- ① 低次から高次までのスペクトル数が多い f2 の場合について、ピーク Ep1 の中心は 1100Hz 付近にある。ピーク Ep1 の幅はマウスピース 9E<3C<1A の順に広がる。

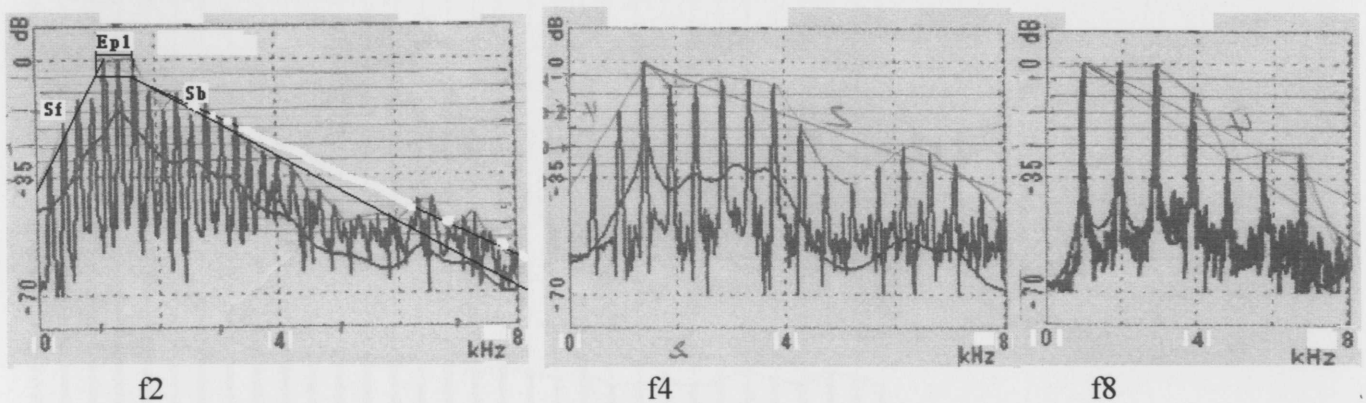
- ② 低次側の包絡線のスロープ S_f と高次側のスロープ S_b について見ると傾斜 S_f はマウスピースに依らずほぼ同じで、 S_b は $9E < 3C < 1A$ の傾向となる。
- ③ Ep_2 , Ep_3 と Dp_1 , Dp_2 については、管体の伝達特性 (Fig. 5-1) に周波数帯域は対応しておりピークの高さとディップの深さは $9E < 3C < 1A$ の傾向である。



(a) マウスピース 3C による吹奏放射音 f_2 , f_4 , f_8 のスペクトル



(b) マウスピース 1A による吹奏放射音 f_2 , f_4 , f_8 のスペクトル



(c) マウスピース 9E による吹奏放射音 f_2 , f_4 , f_8 のスペクトル

Fig. 5-3 吹奏放射音 f_2 , f_4 , f_8 のスペクトル

5. 3 入力波形のスペクトルのモデル化と出力波形のスペクトルの推定と評価

前節では管体の伝達特性を解析する一方、実際の吹奏音を分析してその関連性を検討した。ここでは定常音の放射音のスペクトルから、管体の伝達特性の線形性を前提にして入

力のスペクトルを推定してモデル化して、逆にその入力スペクトルから出力波形のスペクトルを算出してモデル化の精度を評価する。

5. 3. 1 出力スペクトルから入力スペクトルを推定する

まず管体の音圧の伝達特性により、定常状態の出力波形から吹奏入力波形を推定してそのモデル化を検討する。入力スペクトルを $F(\omega)$ 、出力スペクトルを $P_o(\omega)$ とすると(4.1)式より次の関係となる。

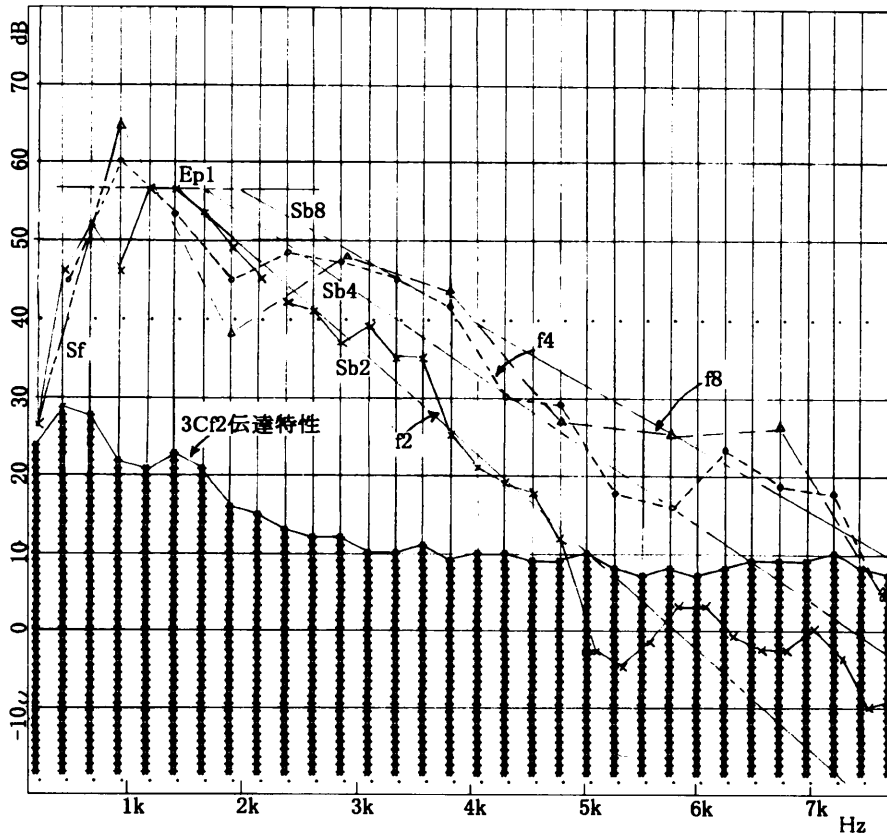
$$F(\omega) = P_o(\omega) / G(\omega)$$

音圧(dB)の関係では

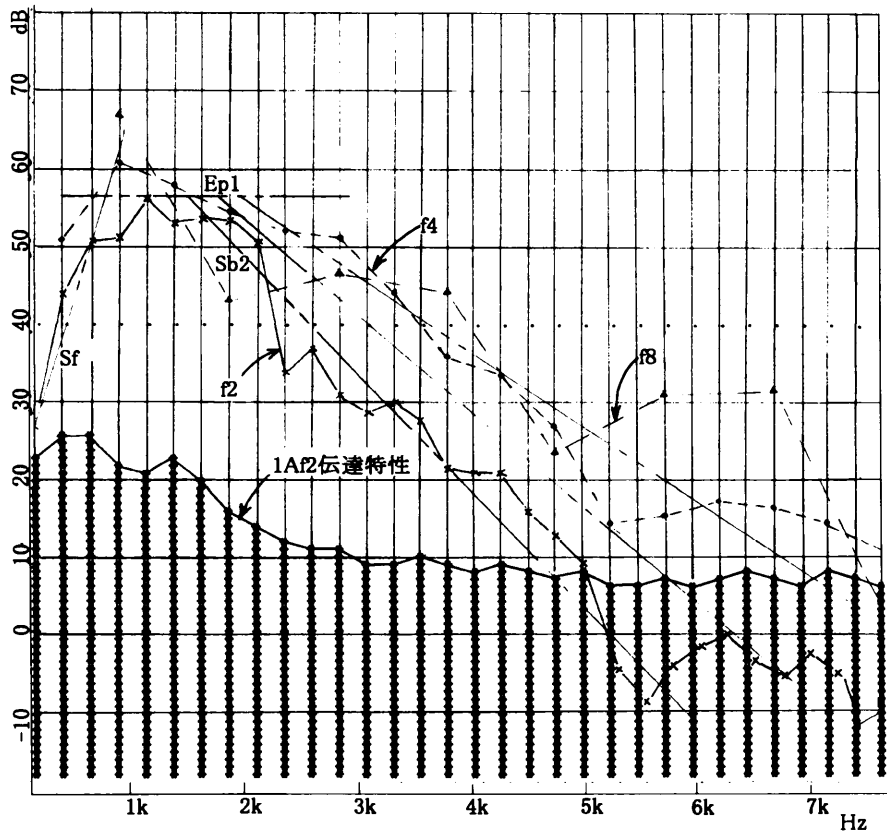
$$\text{Log}(F(\omega)) = \text{Log}(P_o(\omega)) + \text{Log}(1 / G(\omega)) \quad (5.1)$$

となる。マウスピース 3 C の場合にこのようにして求めた f_2 , f_4 , f_8 の入力波形のスペクトル $F(\omega)$ を 3C f_2 伝達特性の上に重ねて示す。いずれも Fig. 5-3 の出力波形の実測スペクトル ($P_o(\omega)$) に開口端から見た管体の伝達特性 ($1 / G(\omega)$) ; 音圧(dB)表記を加えたものである。マウスピース 1A と 9E についても同様に解析して示した(Fig. 5-4)。これらから言えることは、

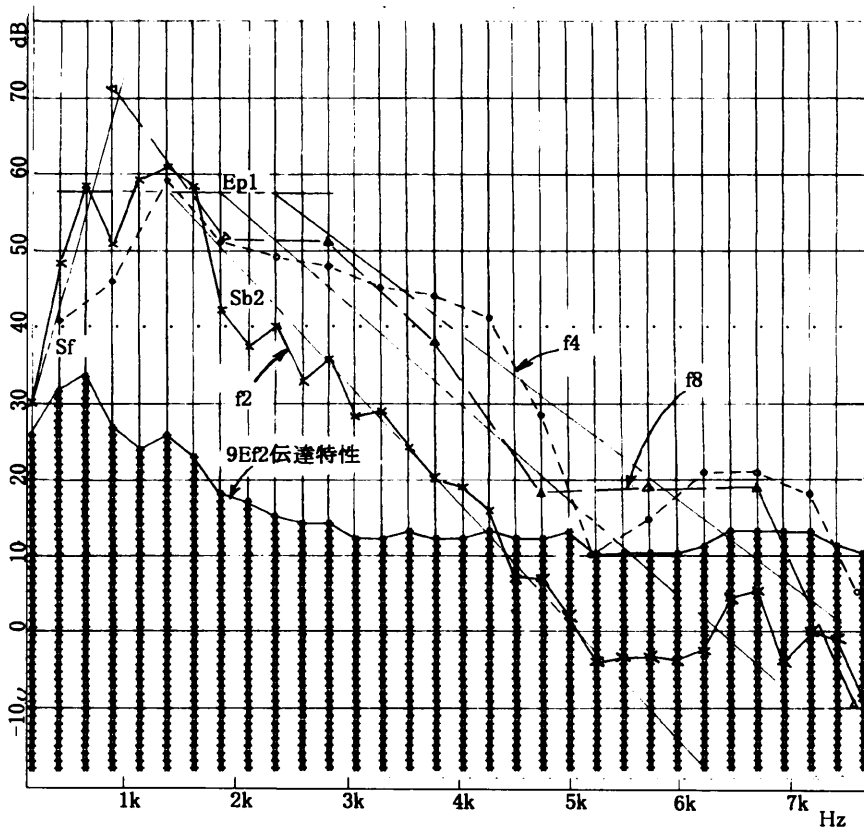
- ① 入力スペクトルの包絡線を低域、中域、高域の3つの周波数帯に分けてそれぞれ直線で近似して中域を E_{p1} とする。
- ② 低域の傾斜(S_f)はほぼ一定(40dB/100~1000Hz)で、高域の傾斜(S_b)は 5kHz までは直線近似でき、高次モードになるほど緩やかとなる。
($-60\text{dB}/2\sim 4\text{kHz} \gg -30\text{dB}/2\sim 4\text{kHz}$)。
- ③ 直線近似とのずれは伝達特性の反作用としての要素と奏者の奏法入力の特徴に起因する要素があると考えられる。このずれの補正項の設定とその意味の考察は次節で行う。
- ④ ①~③はマウスピース 1 A と 9 E についても言える。
ただし E_{p1} の周波数帯域は f_2 , f_4 , f_8 により、またマウスピースにより異なる。



マウスピース 3 C



マウスピース 1 A



マウスピース 9 E

Fig. 5-4 f2, f4, f8 の入力波形のスペクトル

5. 3. 2 各マウスピースに対する奏法入力モデル化

マウスピースの、特にカップの形状やリムの径の違いは伝達特性だけでなく奏法や吹奏感にも影響していると考えられる。ここで改めて Fig. 5-4 を見ると、

- ① 次数 (J) により Sb の傾斜が異なる。高次ほど緩やかである。
- ② 高次ほど Ep1 の幅 (ff~fb) が広い。ff はほぼ共通で fb が高い周波数となっている。
- ③ Sb には伝達特性の山谷 (Ep2, Dp2, Ep3, Dp3) が増幅される形で重畳されている。

まず、前出の 3 種のマウスピースごとに奏法入力の定常状態の周波数特性 A(JJ) をモデル化する (Fig. 5-5)。ここでは横軸は周波数の対数軸とする。

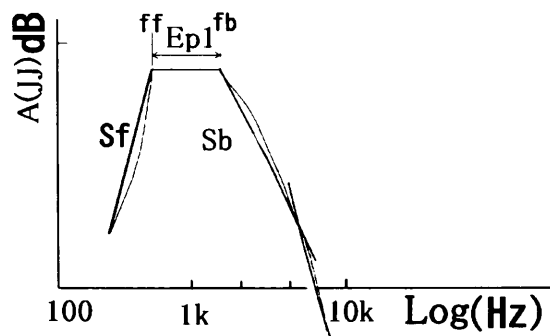


Fig. 5-5 奏法入力の定常部の周波数特性 A(JJ) のピークレベル抱絡線

Fig. 5-4 で示した 3 種のマウスピースの入力波形のスペクトルの包絡線 (スペクトルエンベロ

ープ)を折れ線近似により設定する。A(JJ)を次式に示す要因の関数として表わす。

$$A(JJ)=F (EP1,Sf(ff),Sb(fb),PPP(JJ)*RA) \quad (5.2)$$

ここで、

PPP(JJ) ; 伝達特性 RA は伝達特性 PPP(JJ)の補正係数

J ; モード次数 JJ ; 倍音の次数 FJJ ; 倍音成分の周波数(Hz)

Ep1 の帯域はマウスピースごとに設定する。Ep1 の fb は次数 (J) が大きいほど高い周波数とする。Sf は周波数 ff において直線近似で $RA=(FJJ/ff)^2$ に設定する。すなわち 40dB/Octave の傾斜の直線近似とする。Sb は周波数 fb において $RA=(fb/FJJ)^{RC}$ とする。指数 RC はモード次数(J)とその倍音成分次数(JJ)の関数とする。RA と RC の設定を変えることで目的に合わせてモデリングすることができる。今回のモデリング (Fs3C,Fs1A,Fs9E)の各数値例を以下にまとめて示す。

RA は伝達特性 PPP(JJ)の補正係数として ff と fb の間で 1.0 として ff 以下と fb 以上では 1.0 以下の値をとる。指数 RC はモード次数(J)とその倍音成分次数(JJ)の関数でマウスピース 3C と 1A では指数 RC が 3 から 4 に変化する。9E では 4 から 5 に変化するよう設定する。すなわち周波数の対数軸に対して Sb を折れ線で近似することになる。

*マウスピース 3C の入力モデル ; Fs3C : リム内径 21.893mm, カップ深さは標準 (STD)

EP1 ; 1000~1500Hz : 唇振動の中域特性(マウスピースのリム内径に依存)

Sf ; $(FJJ/1000.)^2$; 唇振動の低域特性 ; 40dB/Oct.

Sb ; $(FJJ/1500.)^3$; 唇振動の高域特性 ; -60dB/Oct.

*マウスピース 1A の入力モデル ; Fs1A : リム内径 22.193mm, カップ深さ深い(Deep)

EP1 ; 900~1600Hz : 唇振動の中域特性(マウスピースのリム内径に依存)

Sf ; $(FJJ/900.)^2$; 唇振動の低域特性 ; 40dB/Oct.

Sb ; $(1600./FJJ)^3$; 唇振動の高域特性 ; -60dB/Oct

*マウスピース 9E の入力モデル ; Fs9E : リム内径 20.993mm, カップ深さ浅い(Shallow)

EP1 ; 1200~1400Hz : 唇振動の中域特性(マウスピースのリム内径に依存)

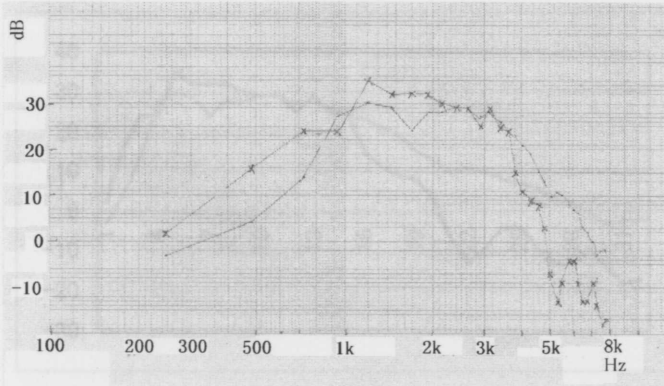
Sf ; $(FJJ/1200.)^2$; 唇振動の低域特性 ; 40dB/Oct.

Sb ; $(1400./FJJ)^4$; 唇振動の高域特性 ; -80dB/Oct.

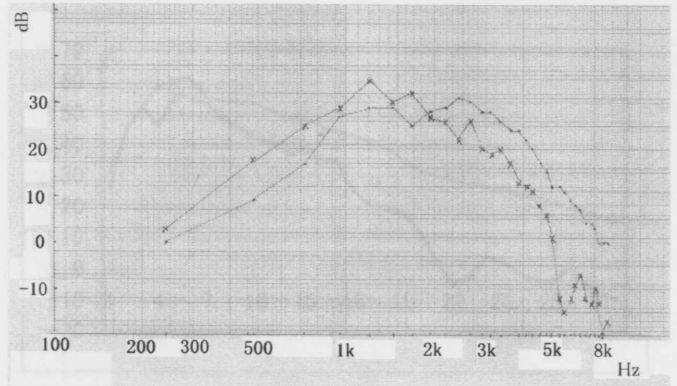
5. 3. 3 入力スペクトルのモデル化の妥当性の検証

それぞれのマウスピースに対して入力モデル Fs3C (STD) , Fs1A (Deep) , Fs9E (Shallow) を設定してその出力波形のスペクトルを推定算出し、実際の吹奏時の実測スペクトルと比較検討する。入力モデル化の主旨は実測値に対する近似度を上げるのではなく、奏法上の特徴の影響をさけて管体自体の音響特性を評価するために有用な入力モデル化を目的とするものである。まず f2 の場合についてその妥当性を検証する。

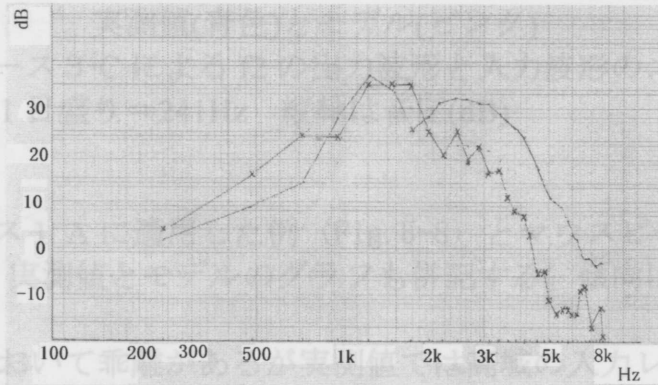
音の音色や音量の聴感的量の視覚化による評価は周波数を対数軸で行うことが通例でありここではまずは Log(Hz)の尺度で表示してみる (Fig. 5-6)。



3 Cf2



1 Af2



9 Ef2

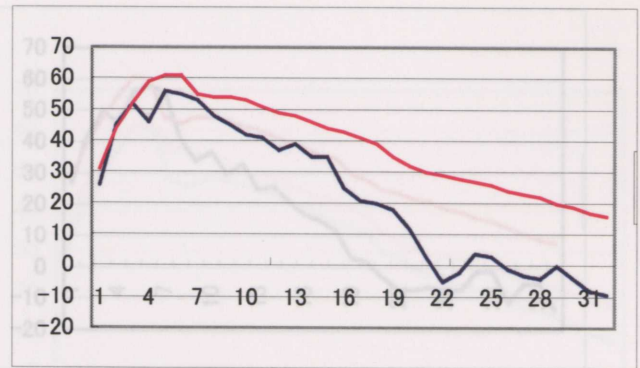
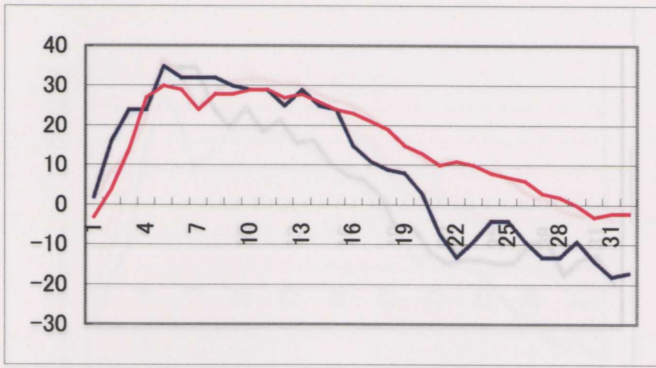
Fig.5-6 出力スペクトルエンベロップ；実測値（x印）と計算値（・印）

実測値と計算値は低域で計算値が低く高域で計算値が高くなっているが、低域を重ねると計算値は中域と高域が高くなり、やや強くmfで吹いた実測値より強く吹いたときのエンベロップに対応していると言えよう[37]。実測値に対してより近似度を上げるためには **Sf** と **Sb** の傾斜を変えることになるが、今回のモデルは高域の差が拡大されて観察できるので今回の管体の音響特性の評価をするための奏法入力モデルとしては妥当と言えよう。そこで以下においては特に高域の周波数特性の差異を詳細に診るために周波数軸はリニアで表記することにする。

マウスピース 3 C による f2 の出力波形と入力波形のスペクトルのエンベロップを Fig. 5-7 に示す。実測値のスペクトルエンベロップを併記する。傾向は類似していると言えよう。高域において乖離があるが特定の奏者による mf の実測値では高域の入力レベルが低くこの帯域の吹鳴が不十分で、むしろ評価のための入力モデルとしてはより強く吹いた場合に相当するのでこのほうが好ましいと考える。

実測値(青色)とモデル(ピンク)

Fig.5-8 マウスピース 1 A による f2 の出力スペクトル(左)と入力スペクトル(右)



f2 の出力スペクトル (青色)とモデル(ピンク) f2 の入力スペクトル

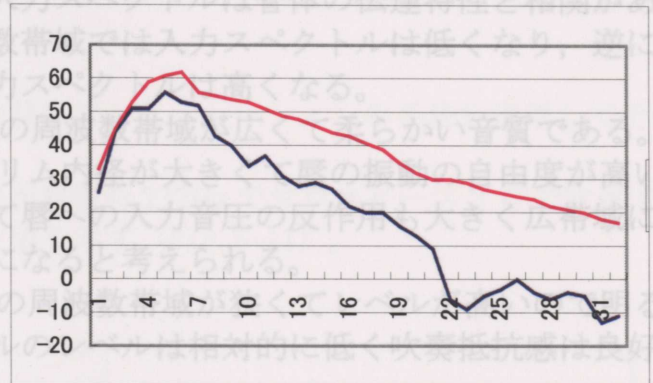
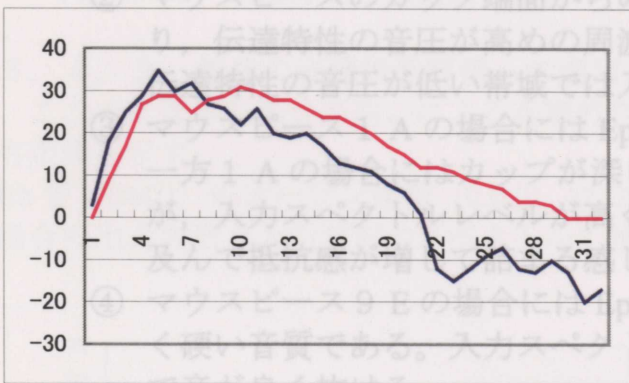
Fig. 5-9 マウスピース 実測値(青色)とモデル(ピンク)

Fig. 5-7 マウスピース 3 C による f2 の出力波形と入力波形のスペクトルエンベロープ
横軸は 1 目盛り = 241Hz 縦軸は音圧(dB)

5. 4. 吹奏系のシミュレーション

以下にマウスピース 1 A に適用した例 (Fig. 5-8) とマウスピース 9 E に適用した例 (Fig. 5-9) を示す。実測値とモデルのグラフも併記する。傾向は類似していると言えよう。

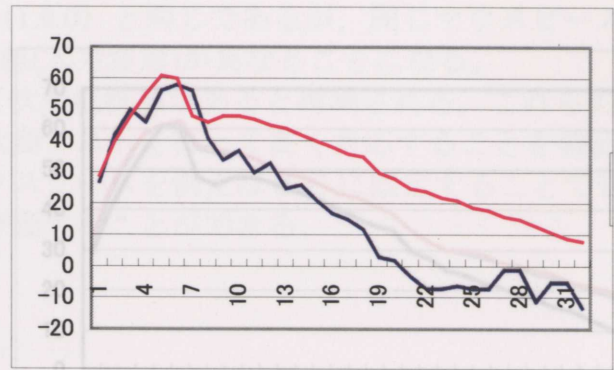
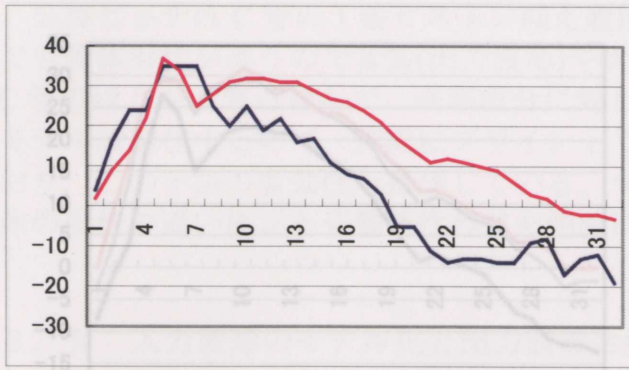
3 C と同様に高域において乖離があるが実測値では高域の入力レベルが低くこの帯域の吹鳴が不十分で、むしろ評価のための入力モデルとしては 1 A と 9 E についても妥当であるとして、本論ではこの入力モデルを使って論を進めることにする。尚 f4 と f8 についても各マウスピースについてその妥当性を確認している。



実測値(青色)とモデル(ピンク)

Fig. 5-8 マウスピース 1 A による f2 の出力スペクトル(左)と入力スペクトル(右)

こうして各マウスピースに対して求めた入力モデルはそれぞれの管体の伝達特性を反映しており、入力スペクトルは吹奏感に対応し、出力スペクトルは音質に対応していると言えよう。



実測値(青色)とモデル(ピンク)

Fig. 5-9 マウスピース9 Eによるf2の出力スペクトル(左)と入力スペクトル(右)

5. 4 吹奏系のシミュレーション

マウスピースを含む管体全体の伝達特性により唄口端からの入力波形のスペクトルをモデル化して、この入力モデルにより出力波形のスペクトルを推定算出する。この吹奏系のシミュレーションの手法を実際の課題に適用してその有用性を示す。

5. 4. 1 マウスピースの形状と音色と吹奏感の対応

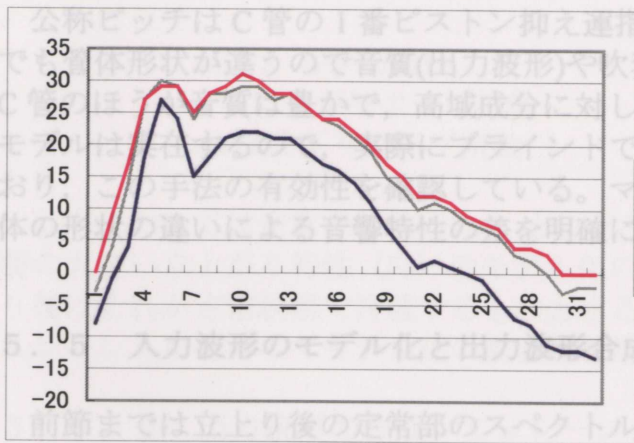
各マウスピースに対応する入力スペクトルモデルと出力スペクトルをf2の場合について示す (Fig. 5-10)。伝達特性も併記する。特徴を挙げると、

- ① 入力スペクトルではEp1の周波数帯域とSbの傾斜により特徴付けられる。
- ② マウスピースのカップ端面からの入力スペクトルは管体の伝達特性と相関があり、伝達特性の音圧が高めの周波数帯域では入力スペクトルは低くなり、逆に伝達特性の音圧が低い帯域では入力スペクトルは高くなる。
- ③ マウスピース1 Aの場合にはEp1の周波数帯域が広くて柔らかい音質である。一方1 Aの場合にはカップが深くリム内径が大きくて唇の振動の自由度が高いが、入力スペクトルレベルが高くて唇への入力音圧の反作用も大きく広帯域に及んで抵抗感が増して詰まる感じになると考えられる。
- ④ マウスピース9 Eの場合にはEp1の周波数帯域が狭くてレベルが高いので明るく硬い音質である。入力スペクトルのレベルは相対的に低く吹奏抵抗感は良好で音が良く抜ける。
- ⑤ マウスピース3 Cは1 Aと9 Eの中間的な特性であるがどちらかと言えば1 Aに近く、9 Eが特徴的な特性と言えよう。

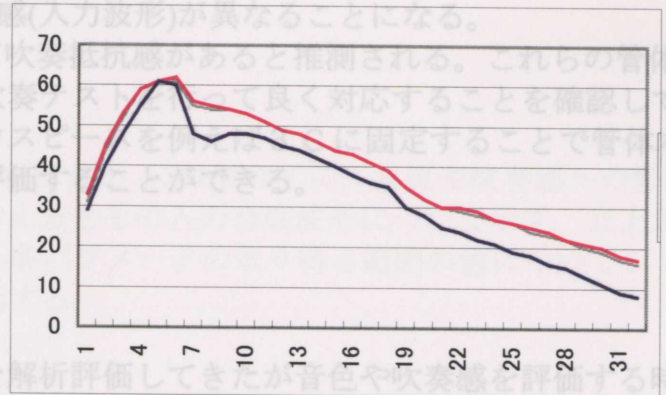
こうして各マウスピースに対して求めた入力モデルはそれぞれの管体の伝達特性を反映しており、入力スペクトルは吹奏感に対応し、出力スペクトルは音質に対応していると言えよう。

ピンクはC管、青色はBb管

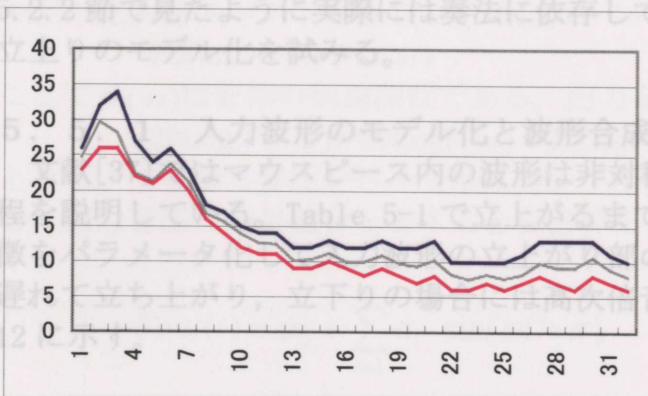
Fig. 5-11 マウスピース3 CによるBb管 (Bb02) のオープン運指 (0.0.0) とC管 (C02) の1番ピストン押さえ(1.0.0)の運指のf2の出力スペクトル(左)と入力スペクトル(右)



出力スペクトル



入力スペクトル



伝達特性

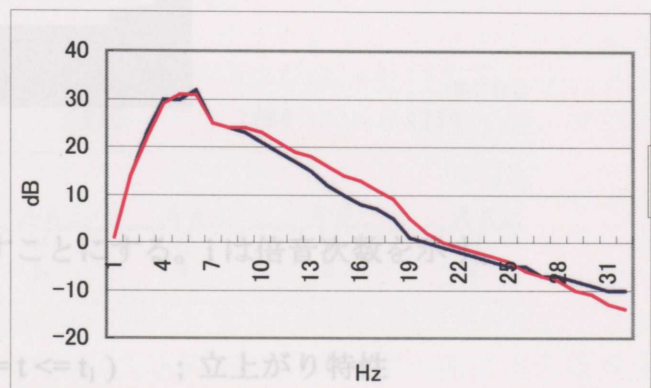
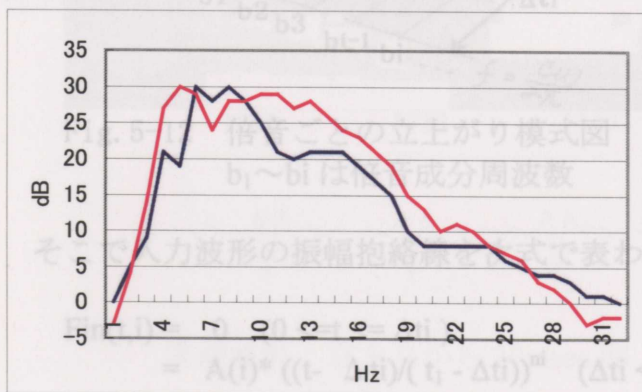
灰色は 3 C, ピンクは 1 A, 青色は 9 E

Fig. 5-10 伝達特性と入力スペクトルモデルと出力スペクトルの推定 ; f2 の場合

5. 4. 2 管体の音響特性評価への適用

ここでは管体の形状の違いによる音響特性の評価にシミュレーションの手法を適用してその有用性を示す。

Bb 管 (Bb02) のオープン運指 (0.0.0) の f2 の周波数を 237Hz でマウスピース 3 C で吹奏する場合の出力波形と入力波形のスペクトルの推定値を示す (Fig. 5-11)。



ピンクは C 管, 青色は Bb 管

Fig. 5-11 マウスピース 3 C による Bb 管 (Bb02) のオープン運指 (0.0.0) と C 管 (C02) の 1 番ピストン押さえ(1.0.0)の運指の f2 の出力スペクトル(左)と入力スペクトル(右)

公称ピッチはC管の1番ピストン抑え運指(1.0.0)と同じであるが、同じマウスピース3Cでも管体形状が違うので音質(出力波形)や吹奏感(入力波形)が異なることになる。C管のほうが音質は豊かで、高域成分に対して吹奏抵抗感があると推測される。これらの管体モデルは実在するので、実際にブラインドで吹奏テストを行って良く対応することを確認しており、この手法の有効性を確認している。マウスピースを例えば3Cに固定することで管体本体の形状の違いによる音響特性の差を明確に評価することができる。

5.5 入力波形のモデル化と出力波形合成

前節までは立上り後の定常部のスペクトルを解析評価してきたが音色や吹奏感を評価する時には最後は音で聴いてみるのが求められる。すなわち可聴化の有用性が問われることになる。5.2.2節で見たように実際には奏法に依存して多様な立上りの特徴を示すがここでは標準的な立上りのモデル化を試みる。

5.5.1 入力波形のモデル化と波形合成

文献[37]ではマウスピース内の波形は非対称振幅を示し、高調波歪を観測して倍音の生成過程を説明している。Table 5-1で立上がるまでの周期(t_1 msec)を分析したがここではこうした特徴をパラメータ化して入力波形の立上がり部のモデル化を行う。文献[48]では高次倍音は順次遅れて立ち上がり、立下りの場合には高次倍音から減衰するとしている。その模式図をFig. 5-12に示す。

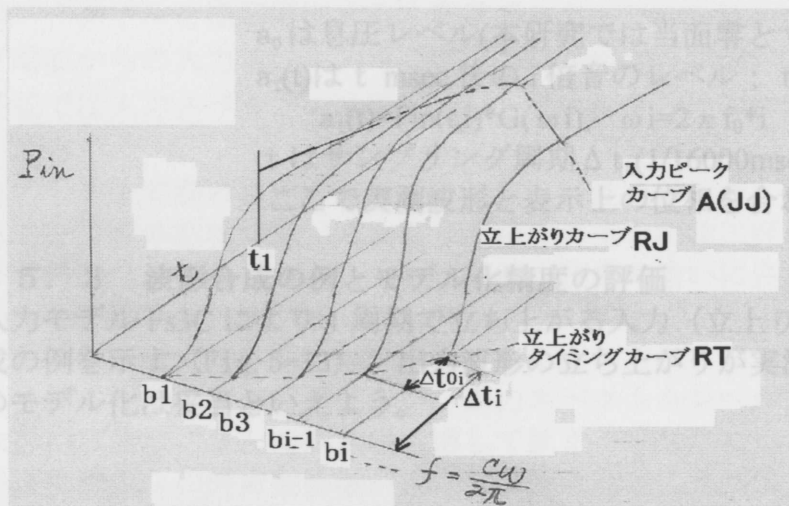


Fig. 5-12 倍音ごとの立上がり模式図
 $b_1 \sim b_i$ は倍音成分周波数

そこで入力波形の振幅包絡線を次式で表わすことにする。iは倍音次数を示す。

$$\begin{aligned}
 F_{in}(t,i) &= 0 \quad (0 \leq t \leq \Delta t_i) \\
 &= A(i) * ((t - \Delta t_i) / (t_1 - \Delta t_i))^{m_i} \quad (\Delta t_i \leq t \leq t_1) \quad ; \text{立上がり特性} \\
 &= A(i) \quad (t_1 \leq t \leq t_2) \quad ; \text{定常音特性} \\
 &= A(i) * (1 - ((t - t_2) / (t_3 - t_2))^{m_i}) \quad (t_2 \leq t \leq t_3) \quad ; \text{立下り特性}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

ここで、

Δt_i は $\Delta t_i = \sum \Delta t_{0i}$

n_i は立上がりカーブ指数

m_i は立下りカーブ指数

以下においては定常音特性 (F_m) と立下り特性 (F_d) には触れずに、音質や吹奏感への影響の大きい立上がり特性 (F_s) のモデル化の考え方とその入力合成波形について示す。立上がり後はそれが定常状態で持続するものとする。各パラメータの取り得る範囲の値についてシミュレーションを行ってモデル化の妥当性を評価する。

5. 5. 2 出力波形の合成シミュレーション

マウスピースからのモデル化入力に対する出力波形とそのスペクトルの推定を行う。モデル化入力スペクトルを $F(\omega)$ 、出力スペクトルを $P_o(\omega)$ とすると次の関係になる。

$$P_o(\omega) = F(\omega) * G(\omega) \quad (5.4)$$

ここで $G(\omega)$ は管体の伝達関数である。出力音圧スペクトル(dB)は(5.1)式より

$$20\text{Log}(P_o(\omega)) = 20\text{Log}F(\omega) - 20\text{Log}(1/G(\omega)) \quad (5.5)$$

となる。すなわち音圧レベルでは入力レベルから開口端から見た伝達特性を差し引いた値となる。出力音圧の絶対値を a_i とすると n 倍音までの出力合成波形 $F_{out}(t)$ は次式で表される。

$$F_{out}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad (5.6)$$

a_0 は息圧レベル(本研究では当面零とする。)

$a_i(t)$ は t msec 後の i 倍音のレベル; $t = \Delta t_i$ までは零

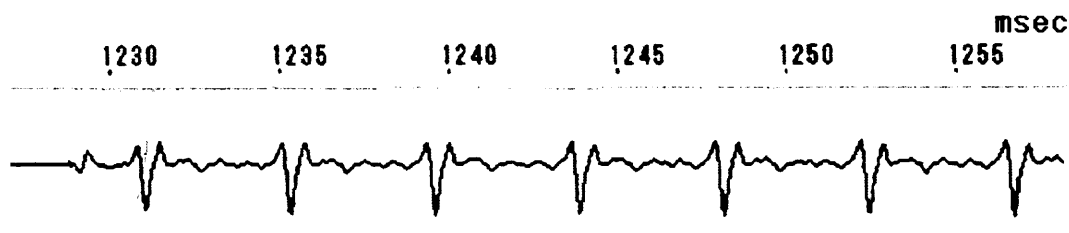
$a_i(t) = F_{in}(t, i) * G(\omega_i)$, $\omega_i = 2\pi f_0 * i$

t はサンプリング周期 Δt_0 (1/16000msec) 間隔で計算する。

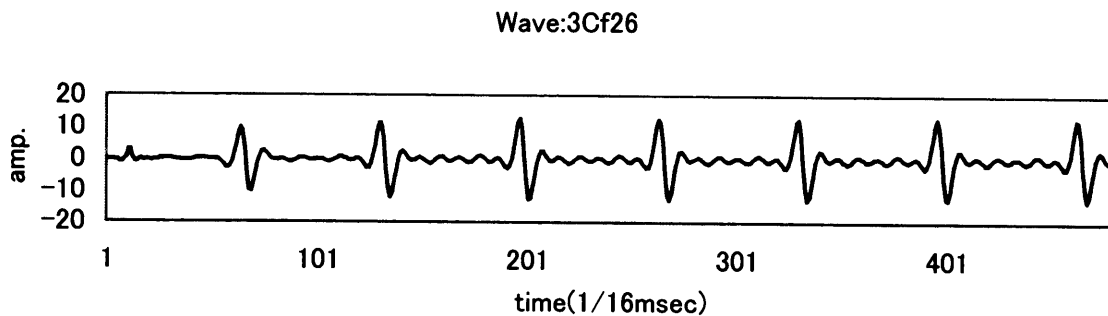
ここで実測波形と表示上の位相を合わせるために π を加算する。

5. 5. 3 波形合成の例とモデル化精度の評価

入力モデル F_s3C により 1 周期で立ち上がる入力 (立上り周期 = $1/f_0$) に対する出力波形の合成の例を示す (Fig. 5-13)。出力波形の立ち上がりが実測の波形に近いことから時間的な特性のモデル化は妥当といえよう。



実測波形; 立上りから 30msec 間



合成波形 ; DNT=1.0 (周期) by Program 6

Fig. 5-13 実測波形 (上) と合成波形 (下) ; f2(マウスピースは3C)
1 周期で立ち上がる場合

5. 6 おわりに

楽器の音響管としての特性は、マウスピースの形状も含めた管体の伝達関数 $G(\omega)$ としてとらえることができる。伝達特性は管体形状の違いによる音響特性の違いを評価するために有用である。とりわけマウスピースの形状の違いによる影響は大きい。本章ではマウスピースを含む管体全体の伝達特性により、唄口端からの入力波形のスペクトルを3種のマウスピースごとに、奏法上の特性にできるだけ依存しないようにモデル化して、この入力モデルにより出力波形のスペクトルを推定算出する吹奏系のシミュレーションの手法を示した。マウスピースのカップ端面からの入力スペクトルは管体の伝達特性と相関があり、伝達特性の音圧が高めの周波数帯域では入力スペクトルは低くなり、逆に伝達特性の音圧が低い帯域では入力スペクトルは高くなる。

この手法を実際の課題に適用してその有用性を示した。マウスピースを例えば3Cに固定することで管体形状の違いによる音響特性の差を明確に評価することができる。また入力モデルの特徴はマウスピースによる吹奏感と音質の違いに良く対応する。入力スペクトルでは $Ep1$ の周波数帯域と Sb の傾斜により特徴付けられる。マウスピース1Aの場合には $Ep1$ の周波数帯域が広くて、柔らかい音質である。一方1Aの場合にはカップが深くリム内径が大きくて唇の振動の自由度が高いが、入力スペクトルレベルが高くて唇への入力音圧の反作用も大きく広帯域に及んで抵抗感が増えて詰まる感じになると考えられる。マウスピース9Eの場合には $Ep1$ の周波数帯域が狭くて低域と高域に比べてレベルが高いので明るく硬い音質となる。入力スペクトルのレベルは相対的に低く吹奏抵抗感は良好で音が良く抜ける。マウスピース3Cは1Aと9Eの中間的な特性であるが3Cに近いと言えよう。各マウスピースに対して求めた入力モデルはそれぞれの管体の伝達特性を反映しており、出力スペクトルは音質に対応し、入力スペクトルモデルが奏者の吹奏感に対応する一つの要因になっていると言えよう。さらにこれを可聴化して聴くことができるようにしたい。

今後の課題として、さらに入力モデルの高精密化のために音量や奏法の違いに対応する有効なパラメータを要因に入れて、持続音部分のモデル化と減衰部分のモデル化により全吹奏音のシミュレーションを行う。音は聴感的に評価するのが本来であり、出力波形を可聴化することによって聴感的に評価するシステムを構築したいものである。また実際に吹奏した音を分析して奏法入力の特徴を解析して奏法診断に適用することも可能であろう。

6章 結言

6.1 課題の設定

本研究では金管楽器、特にトランペット吹奏系を線形シミュレーションにより、設計の段階で管体の音響特性の予測と評価を的確に行うことを目的とした。まず金管楽器の音響特性分析に関する研究の中で特に本研究の課題に関わる文献をレビューして次の4つの目標課題を設定した。

- (1) 実験モデルを想定して金管楽器音響管の音圧の伝達特性などの音響特性の解析理論を示し、理論の妥当性とモデリングの精度を検証する。
- (2) 理論の展開として、吹奏時に於ける金管楽器の唄口端の実効入力インピーダンスを導出して音高設計に適用してその有用性を示す。
- (3) 理論の展開として、金管楽器の管体形状、特にマウスピースの形状が音質や音量等の音響特性に及ぼす要因について解析する。
- (4) 金管楽器の音色と吹奏感の評価のために(3)の解析に基づいて吹奏系のモデリングを行い、可聴化システムへの適用性を示す。

6.2 研究の成果

本研究の成果を以下にまとめる。

(1) 音響特性の解析手法としてPM(Physical Modeling)法を用いずに、吹奏時の実測値を使って唇の効果をCR(Cavity Resonance)法、IM(Impedance Measurement)法、IR(Impulse Response)法に組み込む数値計算モデルを提案してその精度を検証して有用性を示した。

従来、金管楽器の音響管としての共振特性の解析については多くの報告があるが、音響管のパラメータと音響特性値の関係を解析するためには、音響管理論に基づく数学モデルが必須である。第2章では、唇モデルの設定の困難を回避し、また計算コストを低減する方法として、PM法を用いずに、吹奏時の実測値を使って唇の効果をCR法、IM法、IR法に組み込む方法を提案した。まず、CR法、IM法、IR法による解析の共通の基礎となるMorseの音響理論[54]を金管楽器音響管に適用して音圧に関する伝達特性の解析理論を示して理論式を提示し、それにもとづく数値計算モデルの精度をCR法によるキャビティ・レゾナンスの解析により検証した。さらに典型的なIR法の適用事例であるポッピング音の解析に理論を適応してポッピング音の物理的意味を解明して理論の有用性を示した。これは従来のIM法の適用によっては解析ができず定性的な説明に留まっていたもので、本研究により始めて解明したことになる。従来のポッピング音による評価に代わる手法としての有用性を示したものであり、IR法による解析が吹奏系の評価モデルとして有用であることを確認したことになる。

(2) 吹奏時に於ける金管楽器の唄口端の実効入力インピーダンスを導出して音高設計に適用してその有用性を示した。

第3章では、金管楽器の定常音の音高問題について、トランペットの管体を円錐台要素の組み合わせとしてモデル化し、まず唄口端を閉端として、キャビティ・レゾナンスの手法によりモデル管体の特性値として共振周波数を算出した。次に実際に吹奏する場合の音高に対して、唄口端の実効入力インピーダンスとその相対角を算出し、吹奏法に定量的な検討考察を加え、吹奏時の唄口端の境界条件として吹奏パターンを設定した。さらに唄口端仮想付加長さを仮定して金管楽器の奏法の特徴を検討考察した。この吹奏法を考慮したトランペットの音高設計システムの実トランペット音高特性設計への適用例を示し、システムの有用性と吹奏パターン設定の妥当性を示した。このアプローチを新しい楽器の音高特性設計に適用してその効果を検証した。実際に吹奏時の音高問題の解析まで行ったものとしては、トランペットの音高実測値とIM法による共振周波数の計算値を比較した例[25, 26]と Orchestra Horn の音高特性の解析にBIAS法(Brass Instrument Analyzing System)を適用した例[27]などがあるが、これらの例では実在する楽器の音高問題を解析評価することが目的であり、これから設計しようとする仮想楽器の音高特性の設計評価手法としての適用例は示されていない。

(3) 管楽器の管体形状、特にマウスピースの形状が音質や音量等の音響特性と吹奏感に及ぼす要因について解析した。

金管楽器、特にトランペットについて音色と吹奏感を評価するために、まず唄口形状を含む音響管全体の伝達特性を算出してその特性を検討した。楽器の音響管としての特性は、マウスピースも含めた管体の音圧に関する伝達関数 $G(\omega)$ としてとらえることができる。管体の伝達関数 $G(\omega)$ は音色形成に寄与し、ひいては吹奏感にも影響をあたえているが、奏者により近い部材であるマウスピースの形状による吹奏感への影響が大きいと言える。

第4章では、3種類のマウスピースを取り替えて、管体全体の周期インパルス入力に対する定常伝達特性をIR法を用いて解析した。その結果、マウスピースの伝達特性の特徴はマウスピースによる音色や吹奏感の違いに良く対応するを明らかにした。唄口端部の音響インピーダンスはカップの深さの異なるマウスピースで、カップの深さが浅くなるほど周波数帯域でF4とF2の音響インピーダンスの比が高くなり音は明るくなることが明らかになった。鳴らし易さは唄口端面の振動し易さ、すなわち端面の音響インピーダンスが小さいことと関係がある。一方吹奏抵抗感はスロート部の粒子速度が関係している。スロートの径を広げると速度が減少して音響インピーダンスが大きくなり、吹奏抵抗感が増すことも明らかにした。トランペットのマウスピースのカップ深さと音色の関係を解析した例[30, 31]やホルンのマウスピースの形状と音響特性や吹奏感の解析例[28]などがあるが、いずれも実在する楽器とマウスピースを使って、音色の特徴を測定分析して聴感テストでその差異を確認し、入力インピーダンスカーブのピークのレベルとQ値との対応を示して、吹奏系の音響特性の評価手法としての有用性を示している。しかし唄口形状と音圧の伝達特性ないし放射スペクトルの関係には触れられていなかった。

マウスピースによる音色形成についてはマウスピースごとのテーパの違いが管内音圧の位相の進みの違いを生み、出口音圧の違いを生む。1Aや3Cに較べてテーパの急な9Eで位相の進みが遅れ、音圧ピーク位置が開口端側に移動して出口音圧を上げることが明らかにした。マウスピースの形状と出口音圧生成の過程の解析は従来の報告には見

られず本研究で得られた全く新規な知見である。

(4) 金管楽器の音色と吹奏感の評価のために、マウスピースの解析結果に基づいて吹奏系のモデリングを行い、可聴化システムへの適用性を示した。

第5章では、マウスピースを含む管体全体の伝達特性により実際の吹奏放射音の定常的な波形から吹奏時の入力波形のスペクトルを推定して、唄口端からの入力波形のスペクトルを3種類のマウスピースごとに、奏法上の特性にできるだけ依存しないようにモデル化して、この入力モデルにより出力波形のスペクトルを推定算出する吹奏系のシミュレーションの手法を示した。その結果、マウスピースのカップ端面からの入力スペクトルは管体の伝達特性と相関があり、伝達特性の音圧が高めの管体では入力スペクトルは低くなり、逆に伝達特性の音圧が低い管体では入力スペクトルは高くなることを明らかにした。さらにこの手法を実際の課題に適用してその有用性を示した。マウスピースを例えば3Cに固定することで管体形状の違いによる音響特性の差を明確に評価することができた。

また入力モデルの特徴はマウスピースによる吹奏感と音質の違いに良く対応することを第4章について再度確認した。具体的には、入力スペクトルではEp1の周波数帯域とSbの傾斜により特徴付けられる。マウスピース1Aの場合にはEp1の周波数帯域が広くて、柔らかい音質である。一方1Aの場合にはカップが深くリム内径が大きくて唇の振動の自由度が高いが、入力スペクトルレベルが高くて唇への入力音圧の反作用も大きく広帯域に及んで抵抗感が増して詰まる感じになる一因と考えられる。マウスピース9Eの場合にはEp1の周波数帯域が狭くて低域と高域に比べてレベルが高いため明るく硬い音質である。入力スペクトルのレベルは相対的に低く吹奏抵抗感は良好で音が良く抜ける。マウスピース3Cは1Aと9Eの中間的な特性であるが1Aに近いと言えることを明らかにした。

また実測と文献に基づいて、スペクトルは高次成分ほど遅れて立ち上がるとの知見から、立ち上がりの時間特性をパラメトリックにモデル化して管体の伝達特性を考慮して出力時間波形を算出することにより、可聴化システムへの適用の可能性を示した。最初の管楽器の時間領域シミュレーションはSchumacherによるクラリネットモデル[41]であり、インパルス応答との畳込みにより管体気柱の応答が計算された。この手法はその後の進展によりリアルな音響出力が得られるようになって実用化されたが、畳込み法は楽器毎にそれぞれのインパルス応答が必要なためにシステムが大規模となり、必ずしもコストパフォーマンスのよいものではなかった。近年では他の音合成システムの研究も実用化が進んでおり[49]、トランペットの吹奏波形が成長する過程を精密に模擬する波形生成の時間領域モデリングの有用性が示されている[50]。しかしいずれの手法も実時間的に出力波形を生成してその音質を良くしようとするもので入力特性を推定評価するものではない。本研究では実測した出力波形に逆伝達関数を施して入力波形を推定してモデル化し、そこにマウスピースを含む管体全体の伝達特性や唇の発振特性を反映することにより、仮想楽器の設計段階で音色と吹奏感と相関があると予測する入力波形を推定算出して評価することを目的としたことに特徴がある。

6.3 今後の課題と展望

以上の成果は実験試作、またはシミュレーション段階で検証してきたものであり、今後の課題としては、金管楽器の音響設計のエンジニアリングモデルを提案してそれを実際

の設計に適用して検証しつつ、音響特性設計評価システムを構築していくことである。代表的な唄口に対して吹奏系をモデリングすることで、唄口と音響管本体の音響特性の設計と評価が可能となる。音響管形状の音色と吹奏感への影響について伝達特性により評価する手法は、金管楽器の音響特性設計評価システム構築のために有用である。

楽器が使われる現場において、基準奏者とは異なる奏者に対するピッチ設定とチューニングの問題があるが、本手法は音高に関する奏法の解析評価にも適用することができ、よりよい奏法への指導のために有効であろう。又、個々の奏者の奏法に対応する音高特性に楽器を改造したり、ピッチのチューニング法に指針を与えたりすることができよう。

本報告で取り上げたトランペットを代表とする金管楽器の場合は、共通の音響管で複数の共振モードを使うため、共振点の間隔が音高に影響し、特定の音高のみを対象として音高を定めるわけにいかない難しさがある。金管楽器の音高設計は、ピッチの設定と改善すべき特定の音高と音域について、実現可能な形状仕様の範囲で音高特性を最適化する問題となる。そのために現在は設計者がコンピュータとインタラクティブに設計作業を進めることになるが、設計条件と評価判断をルーチン化することにより最適化のための自動設計システムを構築することが今後の課題となる。

マウスピースの設計手法としては基準とする管体とマウスピースを設定して、まず吹奏感と音質を評価関数としてカップ形状を決め、スロート形状を決める。次に音高特性（ピッチとバランス）を調整するためにバックボアの内径形状と長さを決め、再度、音圧の伝達特性を評価することになろう。実際の設計に適用して運用していくことで、形状設計と音色も含めた吹奏感とを対応付ける設計理論を確立できるであろう。

試験的に検討した可聴化システムを発展させることも今後の課題である。そこではさらに入力モデルの高精密化のために音量や奏法の違いに対応する有効なパラメータを要因に入れて、持続音部分のモデル化と減衰部分のモデル化により全吹奏音のシミュレーションを行う。音は聴感的に評価するのが本来であり、可聴化システムの構築によりそれが可能になる。また実際に吹奏した音を分析して奏法入力の特徴を解析して奏法診断に適用することも可能であろう。

ものづくりの有り様が問われる時代にあつて、楽器づくりにあつても今までの量産楽器とは違う、多様なニーズに対応する付加価値の高い楽器の開発が望まれる。楽器、特に金管楽器の音響特性設計と製作においては音高特性と音色と演奏性（特に吹奏感）の設計評価が重要になる。添付資料[I]に金管楽器の音響設計のエンジニアリングモデル構築の構想を提案する。また本研究の成果を活かす形で金管楽器のPSEシステムの試案をそのアプリケーションとともに示す。

本論文の手法が実用化された暁には、楽器設計の仕事の目標設定が的確に行われ、解析評価ツールを活用することで開発効率アップが期待される。またエンジニアリングモデルの運用により設計技術の情報化と活用が進み、技術情報を蓄積することで技術の継承と発展が期待できる。

参考文献

1. 総論

- [1] Kazuo Murakami, "Designing and making musical instruments to form sounds," *Acoust. Sci. & Tech.* 26, 3(2005).
- [2] J. Gilbert, A. O. Messiaen, "Sound Mechanisms of Brass Instruments, Last Tweny Years Results," *Forum Acusticum*, Séville, Spain, 16-20 septembre 2002.
- [3] N. H. Fletcher, "Recent progress in the acoustics of wind instruments," *Acoust. Sci. & Tech.* 22, 3(2001).
- [4] R. O. Schilke, S. A. Laskey, "The Acoustics of Brass Instruments," *IEEE Ultrasonic Symposium*, pp. 1-8(1979).

2. 音響理論と実験モデル

- [5] J. W. Coltman, "Resonance and Sounding Frequencies of the Flute," *J. Acoust. Soc. Amer.* 40(1), 99-107(1966).
- [6] Arthur H. Benade, "The physics of brasses," *Sci. Am.* 24-35(1973).
- [7] John Backus, "Input impedance curves for the brass instruments," *J. Acoust. Soc. Am.* 60(2), Pt. 1(1976).
- [8] R. L. Pratt, S. J. Elliot, J. M. Bowsher, "The Measurement of the Acoustic Impedance of Brass Instruments," *ACUSTICA*, Vol. 38, pp. 236-246(1977).
- [9] René Caussé, "Input impedance of brass musical instruments-Comparison between experiment and numerical models," *J. Acoust. Soc. Am.* 75(1), 241-254(1984).
- [10] V. Gibiat, "Acoustical impedance measurements by the two-microphone-three-calibration(TMTC)method," *J. Acoust. Soc. Am.* 88(6), 2533-2545(1990).
- [11] G. Windholm, "Brass Wind Instrument Quality Measured and Evaluated by a new Computer System," *Proceedings of the 15th ICA*. pp. 517-520(1995).
- [12] C. J. Nederveen, "Corrections for Woodwind Tone-Hole Calculations," *ACUSTICA* Vol. 84, 957-966(1998), "Acoustical aspects of wood wind instruments," *Frits Knuf*, Amsterdam, 1969.

3. 伝達特性解析;共鳴実験とコンピュータ解析

- [13] John Backus, T. C. Hundley, "Harmonic Generation in the Trumpet," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 49, No. 2, Pt. 2, 509-519(1971).
- [14] Stephen Elliott, John Bowsher, "Input and transfer response of brass wind instruments," J. Acoust. Soc. Am., 72(6), 1747-1760(1982).
- [15] J. D. Dudley, W. J. Strong, "A Computer Study of Effects of Harmonicity in a Brass Wind Instrument: Impedance Curve, Impulse Response, and Mouthpiece Pressure with a Hypothetical Periodic Input," Applied Acoustics, 30, 117-132(1990).
- [16] J. D. Dudley, W. J. Strong, "Simulation of a player-trumpet system," Proc. of SMAC93, 520-524(1993).
- [17] J. D. Dudley, W. J. Strong, "Computer simulation of a trumpet with mechanical 'lips'," SMAC, 486-489(1994).

伝達特性解析;インパルスレスポンス合成とコンピュータシミュレーション

- [18] R. Dean Ayers, "Input Responses for feedback to the driver of a musical wind instrument," J. Acoust. Soc. Am. 100(2), Pt.1(1996).
- [19] Seiji Adachi, R. Dean Ayers, "A new algorithm for calculating a brass instruments impulse response and its application to sound simulation," MA1997-1, pp. 1-8(1997).
- [20] Farina A., Tronchin L., "On the "Virtual" Reconstruction of Sound Quality of Trumpets," Acust Acta Acust, Vol. 88, No. 4, Page737-745(2000).
- [21] 西本博則, 赤木正人, 北村達也, 鈴木規子, "有限要素法による声道伝達特性推定の有効性に関する検討," 日音誌 62 巻 4 号(2006), pp. 306-315.

4. 音高特性解析

- [22] R. W. Young, "Optimum Length of Valve Tubes for Brass Wind Instruments," J. Acoust. Soc. Am., 42(1), pp. 224-235(1967).
- [23] Robert W. Pyle Jr., "Effective length of horns," J. Acoust. Soc. Am., 57(6), pp. 1309-1116(1975).
- [24] J. -P. Dalmont, B. Gazengel, J. Gilbert et J. Kergomard, "Some aspects of tuning and clean intonation in woodwinds," Applied Acoustics 46, 19-60 (1995).
- [25] Matthias Bertsch, "Variabilities in Trumpet Sounds," Proceedings of the ISMA '97, pp. 401-406(1997).
- [26] Matthias Bertsch, "Intonation on Trumpets," Proceedings of the ISMA '98, pp. 1-6(1998).
- [27] Murray Campbell, John Chick and Catherrine Lumb, "Passive Acoustic Characteristics and Intonation Problems of Modern Orchestra Horns," Proceedings of the ISMA 2004. pp. 9-12(2004).

5. マウスピース解析

- [28] George R. Plinik, Bruce A. Lawson, "An investigation of correlations between geometry, acoustic variables and psychoacoustic parameters for French horn mouthpieces," J. Acoust. Soc. Am., 106(2), 1111-1125(1999).
- [29] S. Carral, D. M. Campbell, "The Influence of the mouthpiece throat diameter on the perception of timbre of brass instruments," Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics 2002, pp. 1-13(2002).
- [30] Emilie Poirson, Jean-Francois Petiot, J. -L. LE Carrou, "Differentiation of trumpets' sound :Experimental study with an adaptable depth mouthpiece," Proc. SMAC03, SMAC1-4 (2003).
- [31] Emilie Poirson, Jean-Francois Petiot, "Study of the brightness of trumpet tones," J. Acoust. Soc. Am., 118(4), 2656-2666(2005).

6. 金管楽器の発音原理と人工吹鳴モデル

- [32] L. Borchers, M. Gebert, T. Jung, "Measurement of tooth displacements and mouthpiece forces during brass instrument playing," *Med. Eng. Phys.* Vol. 17(8), pp. 567-570(1995).
- [33] 吉川茂, 足立整治, "金管楽器の唇はどのように振動しているか," *日本音響学会誌*, 52(5), 389-395 (1996) .
- [34] R. Di Federico R., Borin G., "Synthesis of trumpet tone based on physical models," *Proceedings of the ICMC '97*. pp. 410-413(1997).
- [35] C. Vergez and X. Rodet , "Comparison of Real Trumpet Playing, Latex Model of Lips and Computer Model. *Proceedings of the ICMC '97*. pp.180-187(1997).
- [36] J. Gilbert, S. Ponthus, Jean-Francois Petiot, "Artificial buzzinglips and brass instruments:Experimental results," *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(3), 1627-1632(1998).
- [37] N. F. Fletcher, A. Tarmopolsky "Blowing pressure, power, and spectrum in trumpet playing," *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(2), 874-881(1999).
- [38] J. F. Petiot, J. Gilbert, "Aided Design of Brass Musical Instruments," Kluwer Academic Publisher, sous la direction de : J-L Batoz, P. Chedmail, G. Cognet and C. Fortin. pp. 497-504(1999).
- [39] C. Vergez and X. Rodet , "New Algorithm for Nonlinear Propagation of a Sound Wave Application to a Physical Model of a Trumpet," *Jornal of Signal Proc.*, Vol. 4, No. 1, Jan. 2000, pp. 79-87(2000).
- [40] 後藤照博, ほか (トヨタ自動車) , "管楽器の演奏用アクチュエータと演奏装置と演奏方法," 特開 2004-258443(2004).

7. 時間領域発振モデルとコンピューターシミュレーション

- [41] R. T. Schumacher, "Ab initio calculation of the oscillation of a clarinet instru," *Acustica* Vol. 48, 71-85(1981).
- [42] S. Adachi and M. Sato, "Time-domain simulation of sound production in the brass instrument," *J. Acoust. Soc. Am.* 97(6).3850-3861(1995).
- [43] S. Adachi and M. Sato, "Trumpet sound simulation using a two-dimensional lip vibration model.," *J. Acoust. Soc. Am.* 99.1200-1209(1996).
- [44] Fumihiro Inoue, Yukio Umetani, "Brass Instrument Simulation Using PDE Solver PSILAB," *計算工学講演論文集*, Vol. 6(2001.5).
- [45] S. Adachi, "Time-domain simulation of wind Instruments," MA2002-18(2002).

8. 音合成システム

- [46] J. O. Smith, "Physical modeling using digital waveguides, " *Comput. Music J.*, 16(4), pp. 74-91(1992).
- [47] 中西雅浩, ほか (松下電器) , "楽音合成装置と楽音合成方法," 特開平 5-19770(1993).
- [48] Alan NG, Andrew Horner, "Computation and Memory Tradeoffs in Wave table-Filter Matching of Musical Instrument Tones," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 48, No. 10(2000).
- [49] 小阪直敏, "音合成システムの最新動向," *日本音響学会誌* 62 巻 6 号, pp. 460-465(2006).
- [50] Van Walstijn Maarten, "Wave-Based Simuration of Wind Instrument Resonators," *IEEE Signal Process Mag.*, Vol. 24, No. 2, Page21-31(2007).

9. CAE 技術 ; 音響分析・計測

- [51] N. Amir, U. Shimony, G. Rosenhouse, "A Discrete Model for Tublar Acoustic Systems with Varying Cross Section-The Direct and Inverse Problems. Part1:Theory, Part2:Experiments," *Acustica*, Vol. 81(1995).

- [52] D. B. Sharp, D. M. Campbell, D. M. Campbell, "Using Pulse Reflectometry to compare the evolution of the cornet and the trumpet in the 19th and 20th centuries," Proc. I. O. A., Vol. 19(5), pp. 541-548(1997).
- [53] D. B. Sharp, Arnold Myers, "Leak detection in pipes using acoustic pulse reflectometry," ACUSTICA acta acustica, Vol. 83, pp. 560-566(1997).
10. 参考図書
- [54] Philip M. Morse, VIBRATION AND SOUND (McGRAW-HILL BOOK COMP. , INC. NEW YORK, 1948) , pp. 217-293.
- [55] A. H. Benade, FUNDAMENTALS OF MUSICAL ACOUSTICS (DOVER PUBLICATIONS, INC., NEW YORK, 1975), pp. 401, 418.
- [56] N. H. Fletcher, T. D. Rossing, THE PHYSICS OF MUSICAL INSTRUMENTS (Springer-Verlag New York, Inc. , 1997).
- [57] Mark J. Fasman, BRASS BIBLIOGRAPHY (PART IV ACOUSTICS AND CONSTRUCTION) (INDIANA UNIVERSITY PRESS, BLOOMINGTON AND INDIANAPOLIS, 1990).
- [58] Leo L. Beranek, ACOUSTICAL MEASUREMENTS (Acoustical Society of America , NEW YORK, 1988), pp. 72-75

音響技術用語の定義

参考；音響用語辞典 日本音響学会編 コロナ社， 1988

基音と倍音

基音は楽器音の複数の周波数成分のうち、音高を定める周波数をいい、この基音以外の成分を倍音と言う。

音高（ピッチ）と音程

音程は二つの高さの幅をいう。（度，セント）
音高は周波数による音の高低の感覚をいう。（Hz）
音高特性は音程と同義とする。（セント）

音質と音色（ねいろ）

音質は音の品質。物理的特性による聴覚的印象の違い。
音色は音の属性の中で、大きさ、高さを除いたもの。
吹奏感は奏者が感ずる抵抗感、鳴り易さに対応。

音圧と音量

音圧は媒質内の音波によって生じる、静圧からの変化分。（dB）
音量は音の大きさのこと。音の太さと対応する。

スペクトル(spectrum)

信号を構成する周波数成分の振幅や位相の周波数軸に沿う分布。

エンベロープ(抱絡線)

スペクトルエンベロープはスペクトルの最大値の周波数軸に沿う抱絡線。
振幅エンベロープは波形の振幅値の時間軸に沿う抱絡線。

音域と周波数帯域

音域は1つの楽器で出せる音高の範囲、帯域は周波数成分の範囲。

個人論文及び解説記事；本論文関連

発表論文名・著者名

論文

- ・村上和男，金管楽器の吹奏時に於ける実行入力インピーダンスの導出と音高設計への適用，日本機械学会論文集（C編），73巻，773号（2007-9），pp.44-51，2007

国際学会研究発表

- ・Kazuo Murakami ， Yukio Umetani ， Problem Solving Environment for Musical Instrument Design ; Designing system for acoustic characteristics of brass instruments, APCOM '07—EPMESC XI ， Dec.3-6, 2007, Kyoto

学会研究発表

- ・村上和男，簡易管楽器の音響設計と音響特性評価，日本音響学会 音楽音響研究会資料，MA2005年8月，pp.41-46 ， 2005

学会誌解説記事

- ・Kazuo Murakami , Technical Report ; Designing and making instruments to form sounds , Acoust. Sci. & Tech. Vol.26, No.3, pp.285-288, 2005.

添付資料

II 金管楽器の音響特性設計システムの提案 金管楽器の音響設計のエンジニアリングモデルの構築

1. はじめに

ここでは本研究のまとめとして金管楽器の音響設計のエンジニアリングモデルを提案する。楽器，特に金管楽器の音響特性設計と製作においては音高特性と音色と演奏性（特に吹奏感）の設計と評価が重要になる。まず楽器本体の音色形成過程についてレビューして金管楽器の音響設計のエンジニアリングモデルを提案する[1]。次に本研究の成果を活かす形で金管楽器のPSEシステムの試案をそのアプリケーションとともに示す。

2. 金管楽器の音響設計エンジニアリングモデルの提案

楽器の設計・製作過程の提案;技術の継承と発展のために

金管楽器の設計製作過程のエンジニアリングモデルを図1に示す。ケースとしてはオリジナル設計とコピー設計に分かれる。後者の過程はいわばリバースエンジニアリングである。開発効率アップのためには，3次元（3D）形状設計を前提にして，目標設定が的確に行われ，解析評価ツールを活用することである。特に音色と演奏性に関する評価は大切であり，より科学的な解析評価システムが望まれる。こうしたモデルの運用により情報を蓄積することで，開発の効率化と技術の継承と発展が期待できる。ものづくりの有り様が問われる時代にあって，楽器づくりにあっても今までの量産楽器とは違う，多様なニーズに対応する付加価値の高い楽器の開発が望まれよう。新しい管楽器を創造する場合には，それが使われる場面と演奏の形態が想定されていて，演奏される楽曲が既に多くあることが前提となる。その革新性が高ければ高いほど，その普及には長い年月と普及のための多くの施策が必要となる。今ある管楽器もまだ不完全であり，まずはその完成度を高めるための研究を継続していくことであり，その中から革新的な楽器が生まれてくることにもなる。

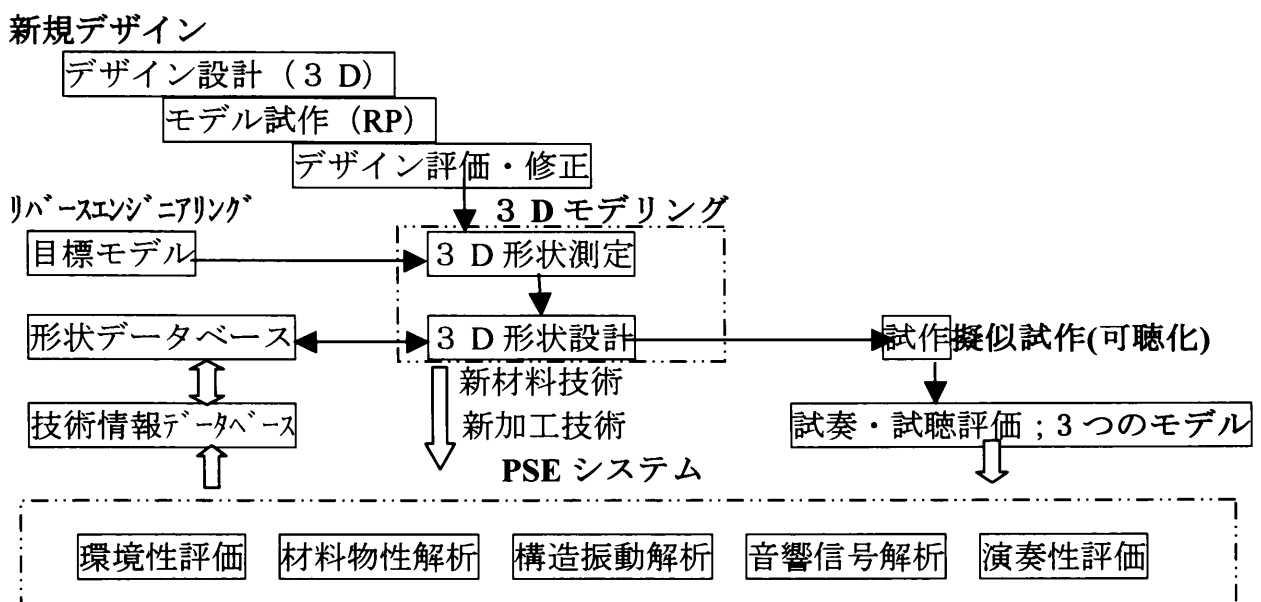


図1 楽器設計製作過程のエンジニアリングモデル

3. 金管楽器の新 PSE システムとその適用

本研究では吹奏系をモデル化して、設計の段階で仮想管体の音響特性の予測と評価を的確に行うことを目的とする。そこで「良いトランペットとは、音質と音量（ダイナミックレンジ）と発音性（レスポンス）が良く、豊かな音色で良い吹奏感で吹けるもの」と仮定する。その要因のうち、音響管の音響特性要因を挙げて、その解析手法と解析事例を示す。吹奏系モデルのマウスピースからの入力として周期的パルスを想定して、マウスピースの形状が放射音の音量と音質と吹奏感に与える影響について述べた。

金管楽器の音響解析課題の中で、特に定常音の音高の問題について、Trumpet の吹奏系をモデル化して実奏時の音高に関する奏法を検討した。基準奏者の吹奏パターンを吹奏条件として音高設計システムを構築し、Trumpet の新規設計に適用して、システムの有用性を検証した。楽器が使われる現場において、基準奏者とは異なる奏者に対するピッチ設定とチューニングの問題があるが、本手法は音高に関する奏法の解析評価にも適用することができ、よりよい奏法への指導のために有効であろう。又、個々の奏者の奏法に対応する音高特性に楽器を改造したり、ピッチのチューニング法に指針を与えたりすることができよう。本研究で取り上げた Trumpet を代表とする金管楽器の場合は、共通の音響管で複数の共振モードを使うため、共振点の間隔が音程に影響し、特定の音高のみを対象として音程を定めるわけにいかない難しさがある。金管楽器の音高設計は、ピッチの設定と改善すべき特定の音高と音域について実現可能な形状仕様の範囲で音高を最適化する問題となる。そのために現在は設計者とコンピュータとインタラクティブに設計作業を進めることになるが、設計条件と評価判断をルーチン化することにより最適化のための自動設計システム構築が可能となる。

吹奏系における唄口端からの入力特性を、形状の異なる 3 種類の唄口に対して推定する。これをモデル化して伝達特性と奏法入力特性の相関関係を考察した。この入力モデルを使って吹奏系のシミュレーションを行って、吹奏放射音の音質と吹奏感の評価のための可聴化システムとしての有用性を示した。また実際に吹奏した音を分析して奏法入力の特徴を解析して奏法診断に適用することも可能であろう。

以上の研究成果を活かすために金管楽器の PSE システムとそのアプリケーションの試案を図 2 に示す。

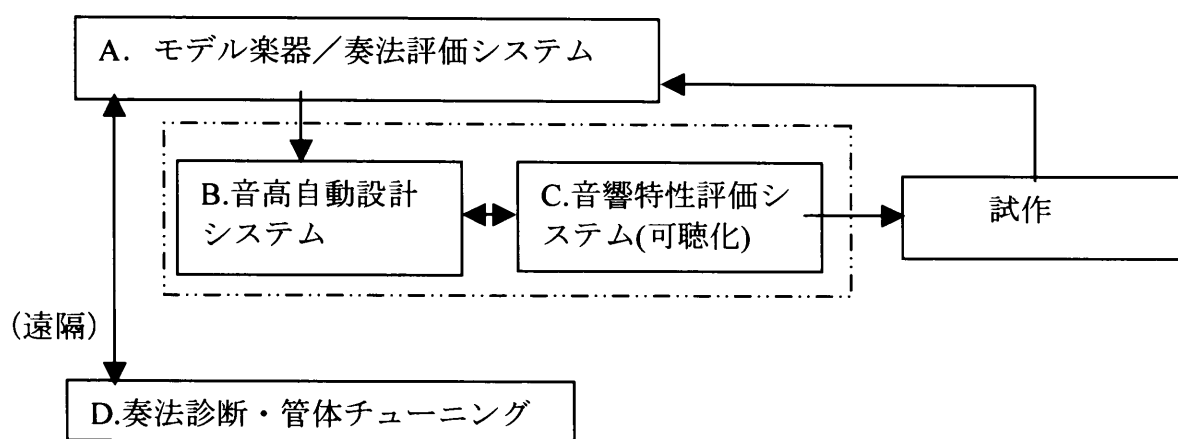


図 2 金管楽器の PSE システムとそのアプリケーションの試案

マウスピースの音響特性設計システム；

マウスピースにより音色や吹奏感が大きく変わるといわれることの意味を解析した。マウスピースの伝達特性の特徴はマウスピースによる音色や吹奏感の違いに良く対応する。現在、多種類のマウスピースが存在していて、奏者が自分の奏法や演奏意図に合わせて使い分けているが、その形状設計と音色も含めた吹奏感とを対応付ける設計理論を確立させることは有意義であろう。方法論としては基準とする管体とマウスピースを設定して、まず吹奏感と音質を評価

関数としてカップ形状を決め、スロート形状を決める。次に音高特性(ピッチとバランス)を調整するためにバックボアの内径形状と長さを決め、再度、伝達特性を評価することになる。

他のサブシステムの構想を挙げる。

仮想モデルの入出力波形の可聴化システム

入力モデルを使って吹奏系のシミュレーションを行って、吹奏放射音の音質と吹奏感の評価のための可聴化システムを構築する。

新規デザインプロトタイプシステム

音響管の音響特性要因を挙げて、それらの解析手法を示し、良い音響管としての要因の重み付けと相関関係の有無と設計手順を提案する。音程と音質に関して相似形状の音響管の間で相似則が成り立つことを設計手法として活用する。

遠隔評価システム

楽器が使われる現場において、基準奏者とは異なる奏者に対するピッチ設定とチューニングの問題があるが、音高特性設計の手法は音高に関する奏法の解析評価にも適用することができ、よりよい奏法への指導のために有効である。又、個々の奏者の奏法に対応する音高特性に楽器を改造したり、ピッチのチューニング法に指針を与えたりすることができる。また吸い総計のシミュレーションの手法を実際に吹奏した音を分析して奏法入力の特徴を解析して奏法診断に適用する。

[II] Trumpet の音響特性分析のためのプログラム群

Resonance Curve

Impedance

SPL distribution

Speed/Phase distribution

Blowing Pattern(Phase angle)

Pitch inC

inBb

Periodic Pulse Response

Wave

Utility: Smoothing

Resonance Curve 算出プログラムの例: by FortranIV

```
C
C   CALCULATION OF RESONANCE CURVE For Trumpet inC-2
C
  DIMENSION DMF(50), DMB(50), DFF(30), DFB(30), DSF(20), DSB(20),
-         D3F(13), D3B(13), D2F(13), D2B(13), D1F(13), D1B(13),
-         DHF(50), DHB(50), DBF(40), DBB(40)
  DIMENSION RM(50), RF(30), RS(20), R3(13), R2(13), R1(13), RH(50), RB(40)
  COMPLEX TMB(50), TFB(30), TSB(20), T3B(13), T2B(13), T1B(13),
-         THB(50), TBB(40), TIN, TOUT, ZOUT
  DIMENSION PO(10000), WO(10000), FO(10000), W0(10), U(3)
  COMPLEX ZF(10000), TO(10000), ZO(10000)
  COMPLEX ZRAD, TTB, ZZF, G, P, PPP, PTH, FUNC1, FUNC2
  CHARACTER PRD, BLK, STR, EDN, LINE(110)
  INTEGER SM(50), SF(30), SS(20), S3(13), S2(13), S1(13), SH(50), SB(40)
  FUNC1(G)=(CEXP(G)-CEXP(-G))/(CEXP(G)+CEXP(-G))
  FUNC2(G)=0.5*(CLOG(1+G)-CLOG(1-G))
C=====DATA   IN=====
  DATA PRD, BLK, STR, EDN/' .', ' ', '* ', '+ ' /
  DATA PAI/3.14159/, C/34600. /
  DATA M, DLWN, WNO/196, 0.010, 1.00/
  DATA IM, IF, IS, I3, I2, I1, IH, IB/46, 24, 18, 12, 10, 10, 46, 37/
  OPEN(9, FILE='ATRCresult01.dat')
  OPEN(1, FILE='ATRESONA01.dat')
  READ(1, *) (SM(I), DMF(I), DMB(I), RM(I), I=1, IM)
```

```

READ(1, *) (SF(I), DFF(I), DFB(I), RF(I), I=1, IF)
READ(1, *) (SS(I), DSF(I), DSB(I), RS(I), I=1, IS)
READ(1, *) (S3(I), D3F(I), D3B(I), R3(I), I=1, I3)
READ(1, *) (S2(I), D2F(I), D2B(I), R2(I), I=1, I2)
READ(1, *) (S1(I), D1F(I), D1B(I), R1(I), I=1, I1)
READ(1, *) (SH(I), DHF(I), DHB(I), RH(I), I=1, IH)
READ(1, *) (SB(I), DBF(I), DBB(I), RB(I), I=1, IB)

```

C

```

DMF(IM)=DFF(1)
DFF(IF)=DSF(1)
DSF(IS)=DHF(1)
DHF(IH)=DBF(1)

```

C

```

DATA WRITE
WRITE(9, 2)
2 FORMAT(1H , 10X, ' INPUT DATA' /5X, ' NUMBER' , 5X, ' DF(I)' , 8X, ' DB(I)' ,
-      8X, ' R(I)' )
WRITE(9, 3) (SM(I), DMF(I), DMB(I), RM(I), I=1, IM)
WRITE(9, 4)
WRITE(9, 3) (SF(I), DFF(I), DFB(I), RF(I), I=1, IF)
WRITE(9, 4)
WRITE(9, 3) (SS(I), DSF(I), DSB(I), RS(I), I=1, IS)
WRITE(9, 4)
WRITE(9, 3) (S3(I), D3F(I), D3B(I), R3(I), I=1, I3)
WRITE(9, 4)
WRITE(9, 3) (S2(I), D2F(I), D2B(I), R2(I), I=1, I2)
WRITE(9, 4)
WRITE(9, 3) (S1(I), D1F(I), D1B(I), R1(I), I=1, I1)
WRITE(9, 4)
WRITE(9, 3) (SH(I), DHF(I), DHB(I), RH(I), I=1, IH)
WRITE(9, 4)
WRITE(9, 3) (SB(I), DBF(I), DBB(I), RB(I), I=1, IB)
WRITE(9, 4)
3 FORMAT(7X, I2, 5X, F8.4, 5X, F8.4, 5X, F8.4)
4 FORMAT(1H )
READ(1, *) (W0(I), I=1, 8)
WRITE(9, 11) (W0(I), I=1, 8)
11 FORMAT(10X, 8F7.4)

```

C

```

K=2
NNN=2
1000 NNN=NNN+1
READ(1, *) (U(I), I=1, 3)
WRITE(9, 12) (U(I), I=1, 3)
12 FORMAT(3(2X, F5.0))

```

C=====CALCULATION=====

```

TIN=(0. , -1.57080)

```

```

C      WNO=WO (NNN)
      WN=0.0100
109  J=0
110  J=J+1
      PTH=(0.,0.)
C      MOUTH PIECE
      TMB(1)=TIN
      DO 111 I=2,IM
      CALL CALCUL(WN,DMF(I),DMF(I-1),DMB(I-1),RM(I-1),TMB(I-1),
-      TTB,ZZF,P)
      PTH=PTH+CLOG(P)
      TMB(I)=TTB
111  CONTINUE
C      FUKIKOMIKAN
      TFB(1)=TMB(IM)
      DO 112 I=2,IF
      CALL CALCUL(WN,DFI(I),DFI(I-1),DFB(I-1),RF(I-1),TFB(I-1),
-      TTB,ZZF,P)
      PTH=PTH+CLOG(P)
      TFB(I)=TTB
112  CONTINUE
C      SHUKAN-NUKISASHI
      TSB(1)=TFB(IF)
      N=2
123  DO 113 L=N,IS
      CALL CALCUL(WN,DSF(L),DSF(L-1),DSB(L-1),RS(L-1),TSB(L-1),
-      TTB,ZZF,P)
      PTH=PTH+CLOG(P)
      TSB(L)=TTB
      IF(U(3).NE.0.AND.L.EQ.12) GO TO 124
      IF(U(2).NE.0.AND.L.EQ.14) GO TO 125
      IF(U(1).NE.0.AND.L.EQ.16) GO TO 126
113  CONTINUE
      GO TO 127
C      NO3-NUKISASHI
124  T3B(1)=TSB(L)
      DO 114 I=2,I3
      CALL CALCUL(WN,D3F(I),D3F(I-1),D3B(I-1),R3(I-1),T3B(I-1),
-      TTB,ZZF,P)
      PTH=PTH+CLOG(P)
      T3B(I)=TTB
114  CONTINUE
      L=L+1
      TSB(L)=T3B(I3)
      N=L+1
      GO TO 123
C      NO2-NUKISASHI

```

```

125 T2B(1)=TSB(L)
    DO 115 I=2, I2
    CALL CALCUL(WN, D2F(I), D2F(I-1), D2B(I-1), R2(I-1), T2B(I-1),
-   TTB, ZZF, P)
    PTH=PTH+CLOG(P)
    T2B(I)=TTB
115 CONTINUE
    L=L+1
    TSB(L)=T2B(I2)
    N=L+1
    GO TO 123
C    N01-NUKISASHI
126 T1B(1)=TSB(L)
    DO 116 I=2, I1
    CALL CALCUL(WN, D1F(I), D1F(I-1), D1B(I-1), R1(I-1), T1B(I-1),
-   TTB, ZZF, P)
    PTH=PTH+CLOG(P)
    T1B(I)=TTB
116 CONTINUE
    L=L+1
    TSB(L)=T1B(I1)
    N=L+1
    GO TO 123
C    HORN
127 THB(1)=TSB(IS)
    DO 117 I=2, IH
    CALL CALCUL(WN, DHF(I), DHF(I-1), DHB(I-1), RH(I-1), THB(I-1),
-   TTB, ZZF, P)
    PTH=PTH+CLOG(P)
    THB(I)=TTB
117 CONTINUE
C    BELL
    TBB(1)=THB(IH)
    DO 118 I=2, IB
    CALL CALCUL(WN, DBF(I), DBF(I-1), DBB(I-1), RB(I-1), TBB(I-1),
-   TTB, ZZF, P)
    PTH=PTH+CLOG(P)
    TBB(I)=TTB
118 CONTINUE
    ZF(M)=ZZF
C
    W=WN*DBF(IB)
    CALL BESJ(W, 1, BJ, 0.00001, IER)
    IF(IER.NE.0) GO TO 666
    REEL=1.-2./W*BJ
    CALL SEKIB(W, 200, 4, 0., 1.5708, B, 50)
    ZRAD=CMPLX(REEL, -B)

```

```

ZOUT=ZF (M) -ZRAD
TOUT=FUNC2 (ZOUT)
PPP=PTH+CLOG (ZF (M)) -CLOG (ZOUT)
PO (J)=20. *ALOG10 (CABS (CEXP (PPP)))
FO (J)=WN*C/2. /PAI
WO (J)=WN
ZO (J)=ZOUT
TO (J)=TOUT
300 WN=WN+DLWN/10**K
IF (J. GE. 10000) GO TO 303
IF (WN-WN0) 110, 110, 303
C=====PRINT OUT=====
303 WRITE (9, 13) (WO (N), ZO (N), TO (N), PO (N), N=1, J)
13 FORMAT (2X, F7. 4, 3X, 2E11. 4, 2X, 2E11. 4, 2X, E11. 4)
DO 190 N=1, J
DO 189 KKK=1, 60
189 LINE (KKK)=BLK
LINE (20)=PRD
KKK=1*PO (N)+20
IF (KKK. LT. 1. OR. KKK. GT. 60) GO TO 191
LINE (KKK)=STR
GO TO 192
191 KKK=60
LINE (KKK)=EDN
192 WRITE (9, 75) FO (N), PO (N), (LINE (KKK), KKK=1, 60)
75 FORMAT (1X, F7. 1, 1X, F6. 2, 1X, ' . ', 60A1, ' . ')
190 CONTINUE
IF (J. LT. 10000. AND. WN. LE. WN0) GO TO 109
200 IF (NNN. LT. 3) GO TO 1000
666 WRITE (9, 66) IER
66 FORMAT (1H , 10X, ' IER=' , I2)
CLOSE (1)
CLOSE (9)
2000 STOP
END
C
C SUBROUTINE CALCULATION FOR CONICAL OR CYLINDRICAL HORN
SUBROUTINE CALCUL (WN, DF2, DF1, DB1, R1, TB1, TB2, ZF2, CP, PHI, WNJ, F1, F2)
COMPLEX FUNC1, FUNC2, FUNC3, FUNC4, FUNC5, FUNC6, CP
COMPLEX PHI, G1, ZF2, TB1, TB2, G
FUNC1 (G) = (CEXP (2. *G) -1. ) / (CEXP (2. *G) +1. )
FUNC2 (G) = 0. 5*CLOG ((1. +G) / (1. -G))
FUNC3 (G) = (CEXP (2. *G) +1. ) / (CEXP (2. *G) -1. )
FUNC4 (G) = 0. 5*CLOG ((G+1. ) / (G-1. ))
FUNC5 (G) = (CEXP (G) -CEXP (-G)) / 2.
FUNC6 (G) = (CEXP (G) +CEXP (-G)) / 2.
ALP=1. 00E-4*SQRT (WN) *R1 / (DB1+DF1) *2.

```

```

      IF(R1.NE.0.) GO TO 81
      ALPD=0.0
      GO TO 80
81    ALPD=ALP/R1
80    IF(DF1.EQ.DB1) GO TO 100
      A=DF1/DB1
        X1=A*R1/(1.-A)
        X2=R1/(1.-A)
        F1=1./WN/X1
        F2=1./WN/X2
90    PHI=-FUNC4(FUNC3(TB1)+(0.,1.)*F1)
      CP=(DF1/DB1)*FUNC5(PHI+ALP+(0.,1.)*WN*R1)/FUNC5(PHI)
      WNJ=WN*R1
      G1=-1./((1.+(0.,1.)*ALPD/WN)*FUNC3(PHI+ALP
*      +(0.,1.)*WN*R1)+(0.,1.)*F2)
      ZF2=(DF2/DB1)**2*G1
      TB2=FUNC2(ZF2)
      IF(DF1.EQ.DB1) GO TO 99

      F1=F1
      F2=1./F1
      GO TO 99
100   F1=0.
      F2=0.
      GO TO 90
99    RETURN
      END

      SUBROUTINE SEKIB(W,MB,J,A1,A2,S,N1)
      DIMENSION X(50)
      FUNC(W,F)=SIN(W*COS(F))*SIN(F)**2*4./3.1415926
100   H=(A2-A1)/MB
      DO 10 I=1,N1
10    X(I)=A1+J/2*(2*I-1)*H
      S=0
      IF(J.EQ.4) GO TO 30
      I=1
20    S=(H/3.)*(FUNC(W,X(I)-H)+4.*FUNC(W,X(I))
*      +FUNC(W,X(I)+H))+S
      I=I+1
      IF(I.EQ.(N1+1)) GO TO 60
      GO TO 20
30    I=1
40    S=(2.*H/45.)*(7.*FUNC(W,X(I)-2.*H)+32.*FUNC(W,X(I)-H)+
*      12.*FUNC(W,X(I))+32.*FUNC(W,X(I)+H)+
*      7.*FUNC(W,X(I)+2.*H))+S
      I=I+1

```

```

        IF (I.EQ. (N1+1)) GO TO 60
        GO TO 40
60      RETURN
        END

        SUBROUTINE BESJ (X, N, BJ, D, IER)
        BJ=0.
        IF (N) 10, 20, 20
10      IER=1
        RETURN
20      IF (X) 30, 30, 31
30      IER=2
        RETURN
31      IF (X-15.) 32, 32, 34
32      NTEST=20. +10. *X-X**2/3.
        GO TO 36
34      NTEST=90. +X/2.
36      IF (N-NTEST) 40, 38, 38
38      IER=4
        RETURN
40      IER=0
        BPREV=0.
!      Starting Value of M
        IF (X-5.) 50, 60, 60
50      MA=X+6.
        GO TO 70
60      MA=1. 4*X+60. /X
70      MB=N+IFIX (X) /4+2
        MZERO=MAX0 (MA, MB)
        MMAX=NTEST
100     DO 191 M=MZERO, MMAX, 3
!       Set F (M) , F (M-1)
        FM1=1. E-28
        FM=0.
        ALPHA=0.
        IF (M- (M/2)*2) 120, 110, 120
110     JT=-1
        GO TO 130
120     JT=1
130     M2=M-2
        DO 161 K=1, M2
            MK=M-K
            BMK=2. *FLOAT (MK) *FM1/X-FM
            FM=FM1
            FM1=BMK
            IF (MK-N-1) 150, 140, 150
140     BJ=BMK

```



```
150     JT=-JT
      S=1+JT
160     ALPHA=ALPHA+BMK*S
161     CONTINUE
      BMK=2. *FM1/X-FM
      IF(N) 180, 170, 180
170     BJ=BMK
180     ALPHA=ALPHA+BMK
      BJ=BJ/ALPHA
      IF (ABS (BJ-BPREV) -ABS (D*BJ)) 200, 200, 190
190     BPREV=BJ
191     CONTINUE
      IER=3
200     RETURN
      END
```

[III] 研究計画書

金管楽器の音響特性設計・評価システムの研究開発

1. 研究の背景と当研究の位置付け

当地、静岡県浜松は楽器産業の中心として、楽器、特にピアノや管楽器の量産化により国内はもとより世界中に楽器を輸出して音楽文化の普及と高揚に貢献してきた。前世紀末から21世紀になって、楽器のメディア性が高まり、楽器に対するニーズが多様化して、より高機能・高性能な楽器に進化することが期待されており、そのために従来型とは違う革新的な研究開発手法が求められている[1]。

そこで本研究ではCAE(Computer Aided Engineering)技術を中心とする楽器、特に管楽器の研究と開発に特化した研究・開発支援システム環境を構築して、楽器のモデルシミュレーションに適応してその有効性を示し、楽器の研究開発手法として研究者および開発者に供することを目的とする。

2. 研究の目的と期間内に明らかにしたいこと

本研究で明らかにしたいことは以下のとおりである。

1) 物理シミュレータ：モデル1

楽器本体構造要因の最適化を図る。本研究では金管楽器、特にトランペットを対象とする。

2) 演奏シミュレータ：モデル2

奏者（奏法）も含めた楽器演奏系の解析評価と適正化を図る。管楽器、サイレント管楽器を対象とする。

3. 本研究の学術的特色・独創性・先駆的な点、および予想される結果と意義

本研究は管楽器の研究に特化して、三次元でリアルタイム的に演算処理を行うPSEを開発して、楽器本体又は楽器演奏系のシミュレーションを行い、その結果を可視化・可聴化して評価する。従来のCAEでは今まで成し得なかった、楽器の実用的研究に供することを目的とする。システムの運用により、楽器の振動音響現象を解明し、新たな遺伝子（要因）に着目してこれを最適化して、21世紀に求められる革新的な楽器を効率的に創出することができることである。

4. 3年間('04. 4～ '07. 3)の研究開発課題を挙げる。

研究の目的・テーマ、課題と計画（進め方・方針）は以下の通りである。

金管楽器吹奏系の音響特性設計システムの研究

課題1. トランペットを対象としてまとめる。

音程・音色・音量・吹き易さ・音のわれについて設計・評価（シミュレーション）する。

課題2. 他の金管楽器への拡張性を示す。

フレンチホルンの音響解析と試設計。

課題3. 木管楽器（有孔楽器）への展開を示す。

ダブルトランペットの試設計。

suona（スオナ）inCの試設計。

研究の進め方、方針として次のことに留意する。

(1) 今までの研究事例を検討して、新規な課題と未解明な事項を明らかにする。

- ・ 楽器に関するコンピュータシミュレーション；線形，非線形
- ・ 楽器音響理論と楽器物理学のレビュー

- ・楽器音響の計測・解析手法
- (2) 楽器の設計過程のエンジニアリングシステムに於ける位置付けを示す。
- (3) 楽器研究の PSE システムに於ける位置付けを示す。
- (4) 管楽器開発システムの 21 世紀版への適用を想定する。
- (5) 新吹奏楽器システムの創出を目指す。

5. テーマ設定；

金管楽器の音響特性設計システムの構築と
音程が良くて、良く鳴るトランペットの開発

*目標；

- (1) Bb 又は C トランペットを対象として、最高級モデルを凌駕するものを開発する。
- (2) 金管楽器の音響特性設計システムを構築して実用に供する。
- (3) 金管楽器の音響特性評価システムを構築して実用に供する。

*音響特性設計・評価システムの構成；①～⑨はサブシステム

A. モデル楽器>>モデリングシステム

- ・ 内径測定⑦>>スミージングチェック⑧>>形状モデル化；

Leak Tester／管体の内径形状診断／音程・音響特性評価

B. 音程自動設計システム；モデルを特定して、 $H_0(\omega)$ を最適化して吹奏推定値を評価する。

製作実現可能な形状の範囲で、 $H_0(\omega)$ に対して所望の範囲内に収まる仕様を見出す。設計のステップを設定して部材製作条件を満たす範囲で $H(\omega)$ を評価する。内面の連続性（不連続断面・キャビティの有無）をチェック。ベル部はスミージング処理をかけて音響特性（レゾナンスカーブ、伝達関数等）を評価する[①, ②]。

C. 音響管特性解析評価システム；

T1：テーパ管体の設計／試作評価、

T2：直管のトランペットモデルを 2～3 設計／試作評価する。

C1：レゾナンスカーブ／音圧分布／相似則②>>音量・吹奏感評価との対応を検討

C2：インパルスレスポンス④ >>音質評価との対応を検討

C3：反射関数⑤ >>吹奏感(レスポンス)との対応を検討

C4：管壁の振動解析⑥／音圧分布 >>吹奏感(レスポンス)との対応を検討

>>板圧分布・接合位置の適正化

C5：奏法解析⑩ >>奏法入力特性解析／奏法評価／シミュレーション

ン

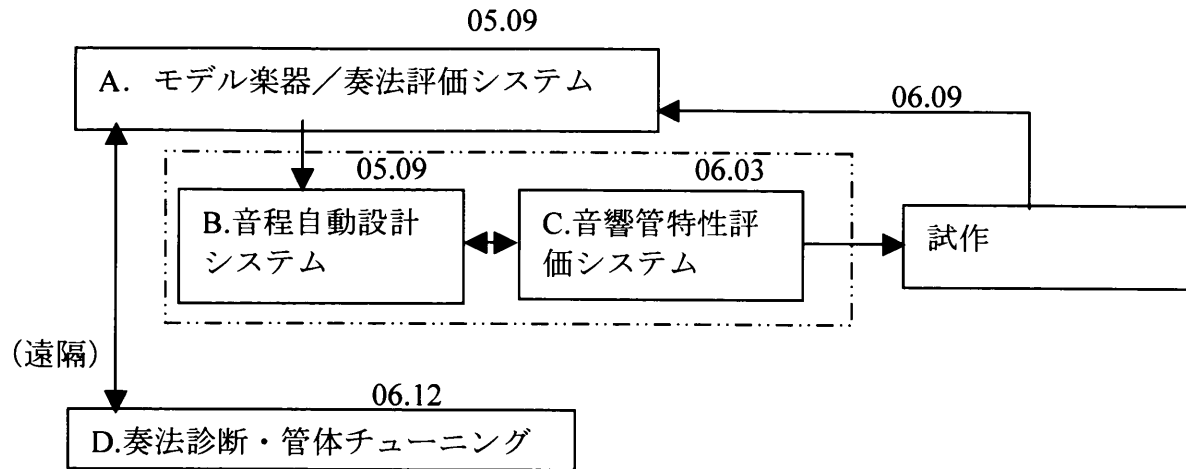
D. 奏法診断・管体チューニング（遠隔）

D1：音程／音質／音量実測>>奏者吹奏パターンモデル化・伝達関数規定；[1,3]

奏法の診断；音程・音質・音量および吹奏感評価

D2：音程／音色／音量データと管体の品番／形状情報をネットワーク PC により送付し、奏法診断情報と、管体のチューニング情報を受ける。

* 全体システム構成と開発と運用⑨



本研究では

B. 音程自動設計システム

C. 音響管特性評価システム；可視化・可聴化

のモジュールの研究開発を課題とする。

まず各モジュールについて、今までに何処まで行われていて、何が課題かを明らかにすることから始める。