

# 解説

## 物理モデルミュージック シンセサイザ

Physical Modeling Musical Synthesizer

増田英之 鈴木秀雄



### Abstract

楽器の物理モデルに基づく物理モデルミュージックシンセサイザについて、電子楽器の音源方式の中での位置付けと特徴を紹介する。次に、持続音楽器の物理モデルの基本である McIntyre らのクラリネットの物理モデルについて基本理論や処理の流れに関して簡単に解説した後、ヤマハのバーチャルアコースティックシンセサイザー VL1 を例に、実際の音源システムでリアルタイム発音システムとするためのモデル化の工夫などについて解説を加える。最後に物理モデル音源の精度アップや楽器ラインナップの充実などの将来の方向性を展望する。

キーワード：音源方式、物理モデル、バーチャルアコースティックシンセサイザ、アーキテクチャ

### 1. はじめに

1983 年、McIntyre らにより楽器の物理モデルの研究に関するチュートリアル(文献(1))が発表されて以降、音響技術研究者のみならず楽音合成の研究者にも楽器の物理的な発音機構に基づく新しい電子楽器の可能性が明らかになった。

ヤマハにおいても 1987 年ごろよりこの分野の研究開発に注力し、1993 年末最初のバーチャルアコースティックシンセサイザとして VL1 という商品を発表した。

その後、ハード音源では、VL1-m, VL7, VL70-m, PLG100-VL, PLG150-VL, ソフト音源では S-PLG100-VL, S-PLG100-PVL と製品ラインナップを重ねてきた。(以下これらの製品を VL と総称する。)

なお「Virtual Acoustic 音源方式」という言葉はヤマハの物理モデル音源方式に独自に与えている名称である。

本文では、主に VL の音源原理(楽器の物理モデル)について概略を解説する。

### 2. 電子楽器の音源原理の流れ

図 1 に従来の電子楽器の音源原理を示す。

増田英之 鈴木秀雄 ヤマハ株式会社アドバンスドシステム開発センター  
Hideyuki MASUDA and Hideo SUZUKI, Nonmembers (Advanced System Development, YAMAHA CORPORATION, Hamamatsu-shi, 430-8650 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.87 No.4 pp.297-302 2004 年 4 月

(1) アナログシンセサイザ音源方式はシンセサイザの基本システムとして広く認識されており、独自の新規音はもとよりアコースティック楽器音のシミュレーションも得意としている。システムの特徴としては、可変オシレータ、可変フィルタ、可変アンプ、エンベロープ発生器等のモジュールを柔軟に組み合わせることにより、多様な音作りが可能な点が挙げられる。

(2) FM 音源方式はデジタルによる初のシンセサイザで、FM 変調を可聴帯域で行う原理に基づき、変調による豊富な倍音発生を制御し楽音を合成する。変調波発生ユニットと搬送波発生ユニットを様々に組み合わせることにより、多くの音源アルゴリズムが開発され、多様で個性的な楽器音を表現力豊かに合成可能である。

(3) AWM (Advanced Wave Memory) 音源方式シンセサイザは波形発生部がデジタルメモリ方式で構成されており、アコースティック楽器音の特徴的要素をサンプリングしたデータが記憶され、デジタル・フィルタによる音色変化も付与される。この方式は現在最もポピュラーな音源方式で、楽器の特徴をある断面でとらえた音楽表現という観点で優位性が高いが、表現力の豊かさという観点では十分ではない。

(4) 物理モデル音源方式 (Virtual Acoustic Synthesis) はアコースティック楽器の発音原理を数式表現し、これを実時間に演算して発音する方式である。

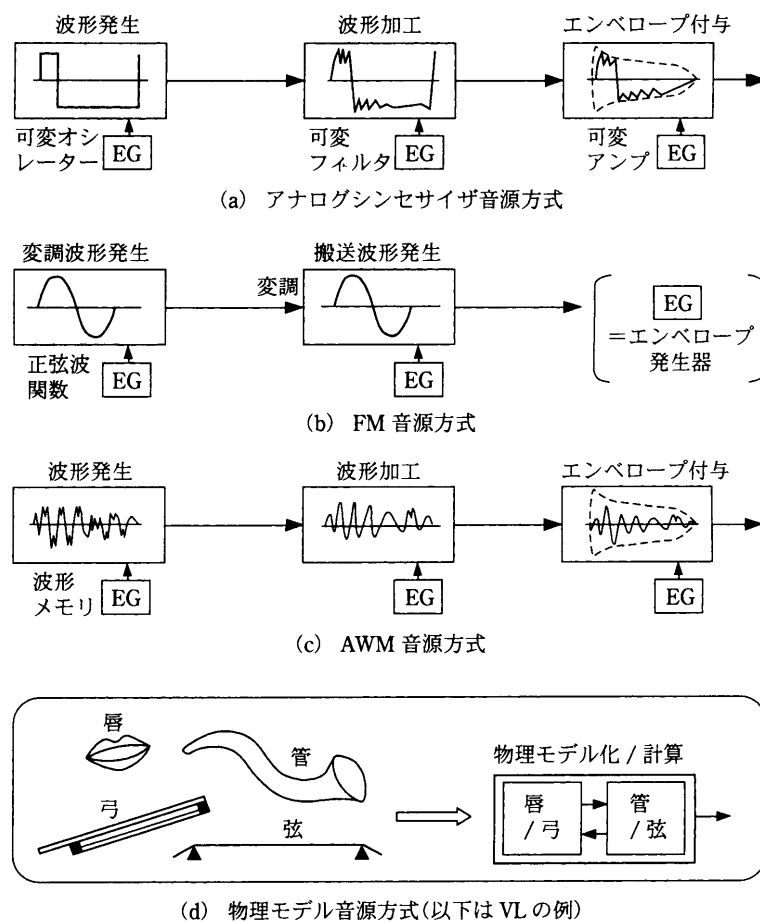


図1 各種の楽音合成方式の比較

### 3. 楽器の物理モデル

自然楽器は、発音原理的には、以下の2種類に大別することができる。一つは打弦楽器、はつ弦楽器や打楽器のように、たたいたり、つま弾いたりして、初期エネルギーを楽器に与えて発音する楽器、もう一つは、管楽器、擦弦楽器のように、息を持続的に入れたり、弦を弓で持続的に擦ったりして発音する楽器である。前者を減衰音楽器、後者を持続音楽器と呼ぶことにする。

McIntyre らの論文<sup>(1)</sup>によると、持続音楽器では、奏者は非線形エレメント、つまり、クラリネットやサクスのなどの管楽器のリード、金管楽器の唇(リップリード)、フルートなどのエアジェット(エアリード)、擦弦楽器の弓などを通して、線形エレメントである管体や弦を励振する。この励振波形は、線形エレメント内を伝搬し、その端部で反射して、再び線形エレメント内を伝搬した後、非線形エレメントに対して影響を及ぼす。つまり、大局的に見ると、図2のような、大きなフィードバック系でモデル化できる。

ここで、クラリネットを例に McIntyre ら<sup>(1)</sup>の研究にならない、図3に示したようなモデルによって発音機構を

説明する。クラリネットではリードを搭載したマウスピースが非線形エレメント、管体が線形エレメントである。マウスピースを拡大したものが図4である。管楽器を演奏するとき、奏者はマウスピースをくわえリードを唇でかみ込み、息を吹き込む。マウスピースとリードとの間げきを通して管内には単位時間内に  $f(\text{m}^3)$  の容積の

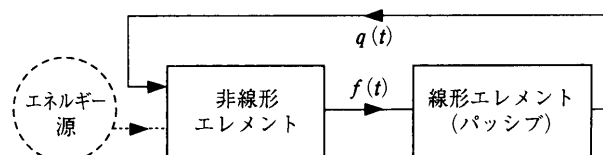


図2 一般的な持続音楽器のモデル 文献(1)より引用。

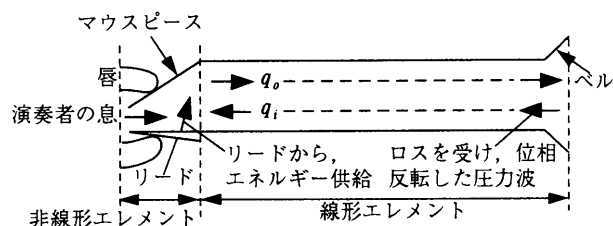


図3 クラリネットの模式図

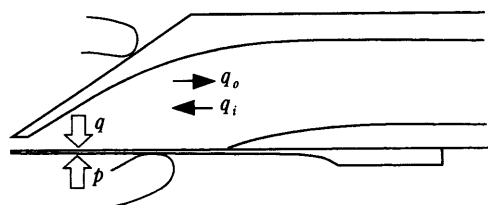
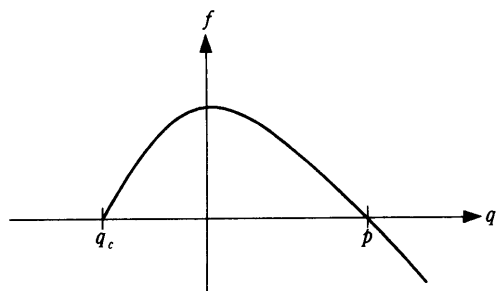


図4 マウスピースの模式図

図5  $F(q)$ の形状 文献(1)より引用.

空気が注入される.

流れ込む空気の体積流速  $f$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) は, マウスピース内部の変動音圧  $q(t)$  の関数となる.

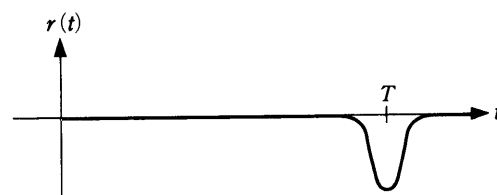
$$f(t) = F(q(t)) \quad (1)$$

$q(t)$  を横軸に, 縦軸にリード間げきを通して流れ込む空気の体積流速  $f$  を取り, グラフを書くと図5のようになる.

この間げき内の実際の圧力は  $p(t) - q(t)$  であり,  $p(t) = q(t)$  の場合には, 圧力差が発生しないので,  $f=0$  となる.

これから圧力差が徐々に増加するに従って,  $f$  は増加するが, ある圧力差を越えると飽和し減少する非線形特性を有する. 圧力差が  $p(t) - q_c$  まで増加した時点で,  $q(t) = q_c$  となるので, リードが完全に閉じた状態となり, これ以上の圧力差をかけても  $f=0$  のままとなる.

クラリネットを断面積が一般的な管と考えると, 基本的に管の中の音圧の伝搬は平面波であり, 一次元波動伝搬

図6 畳込み関数  $r(t)$  の概形 文献(1)より引用.

と考えることができる. マウスピースの側から終端に向かって進む波を  $q_o(t)$  とし進行波と呼ぶことにする. また終端からマウスピースに向かって進む波を  $q_i(t)$  とし後退波と呼ぶ. 管に沿った距離  $x$  での音圧  $q(x, t)$  は音速を  $c$  とすると,

$$q(x, t) = q_o(t - x/c) + q_i(t + x/c) \quad (2)$$

と書くことができる. 進行波  $q_o(t)$  は終端で反射し後退波  $q_i(t)$  となる. すなわち, 進行波の伝搬, 終端で反射, 後退波の伝搬のトータルの畳込み関数  $r(t)$  とすると,

$$q_i(t) = r(t) * q_o(t) \quad (3)$$

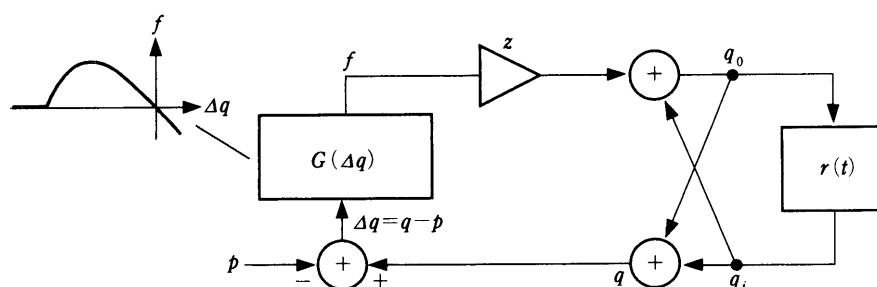
となる. ここでアスタリスク\*は畳込みを示している. 終端は開口端なので音圧は完全反射し, その符号が反転する. また  $r(t)$  はその時間積分が-1となるような関数で, 図6に示す形状のものが選ばれている. 図中の  $T$  は管の長さを  $L$  とすると  $2L/c$  であり, マウスピースで発生した音圧が再び戻ってくるまでの時間を示している.

リード付近での音圧  $q(t)$  は式(2)において  $x=0$  とし,

$$q(t) = q_o(t) + q_i(t) \quad (4)$$

と書くことにする.

リードの間げきを通して流れ込んだ体積流速  $f$  により管内に圧力が発生する. 管の特性インピーダンス (= 単

図7 クラリネットのブロック図  $G(\cdot)$  は  $F(\cdot)$  を左に  $p$  だけ移動した形状の原点を通る関数.

位長さ当りの質量×音速)) を  $z$  とすれば管に  $zf(t)$  なる音圧が発生する。この音圧が後退波  $q_i(t)$  に加算され、進行波  $q_o(t)$  となる。

$$q_o(t) = q_i(t) + zf(t) \quad (5)$$

この進行波が管の終端方向へ伝搬し、式(3)に従い終端で反射し再びマウスピースへと戻ってくる。この際、管内部での摩擦や、管の終端での放射、空気との摩擦などにより、エネルギーは減衰することになる。この減衰によるエネルギーが再び  $zf$  により補われ発振が持続するのである。式(1)、(3)～(5)をまとめてブロック図で表すと図7のようになる。

#### 4. シンセサイザのアーキテクチャ

ヤマハの Virtual Acoustic Synthesis 方式を採用した VL では、様々な自然楽器音を合成するために、以上の McIntyre の基本アルゴリズムを各楽器用に発展、拡張したものとなっている。

アルゴリズム図8は VL の発音モデルの核の部分(インストゥルメント)を示す。これは管楽器、擦弦楽器の物理モデルに基づいたものとなっている。このアルゴリズムは DSP (Digital Signal Processor) LSI 上にソフトウェアとして実現される。楽器の物理現象が数値表現化されたモデルはソフトウェアとしてコーディングされており、これを決まったサンプリング周波数で実行することで楽器音が合成される。

ソフトウェア的に実現されたリードや管体内の気柱、弓との摩擦と弦振動、といった仮想的なイメージが数値計算され、これらの信号の一部を楽音信号として利用する。ただし、演算量が多いと、1 サンプリング周期中に計算が終わらず実時間での合成ができないので、効率良くリアルタイム合成するために、大胆なモデルの簡略化の工夫がなされており、以下にごく一部の代表例を紹介

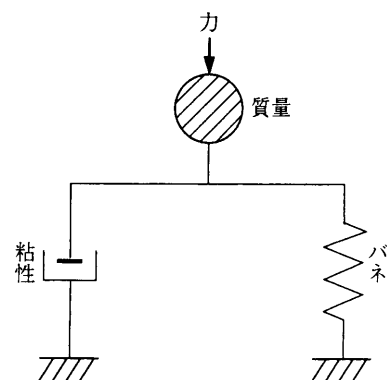


図9 リード部の簡略化されたモデル 文献(8)より引用。

する。

##### 4.1 リードの動特性、摩擦の状態の計算

管楽器のマウスピース(図4)に取り付けられたリード部は、正確には、厚さが一様でない片持ちはりの構造となっており、従来この物理モデルを厳密に実現するには、演算量の多い偏微分方程式<sup>(2)</sup>を解く必要があった。

図9は管楽器でのリード部の簡略化されたモデルを示す。いわゆる機械系の3要素でおおむね記述できる。これは、ソフトウェアとしては状態変数型のデジタルフィルタで実現できる。質量部の変位からリード変位(リード間げき面積)を得るために、ここには何らかの非線形性が関与しなければいけない。リードは力を加えていくと変位していくが徐々に飽和特性を描く。この様子を図10に示す。ここでは詳細は述べないが、弓による弦の摩擦もリードと空気流の振舞いに類似した非線形現象である。

図8の「ドライバ部」の「リードの動特性、摩擦の状態の計算」部では、このような簡略化モデルが採用されている。

##### 4.2 管、弦の内部の音の伝搬の計算

気柱の振動や弦の中の波動の伝搬は波動方程式を解くことによって実現できる。前述したクラリネットの例や弦では、単なる時間遅れ要素で近似できるのだが、実際

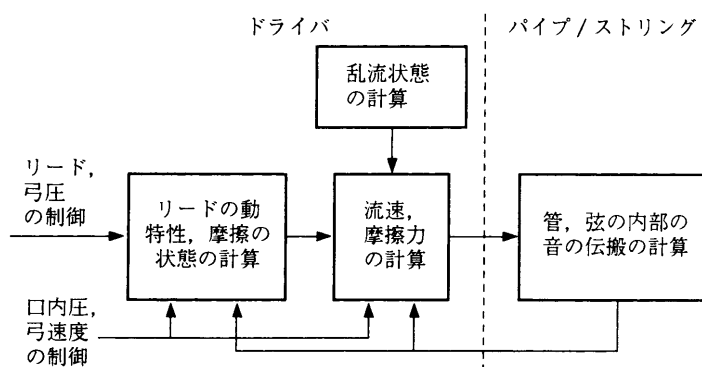


図8 VLの音源原理 文献(8)より引用。

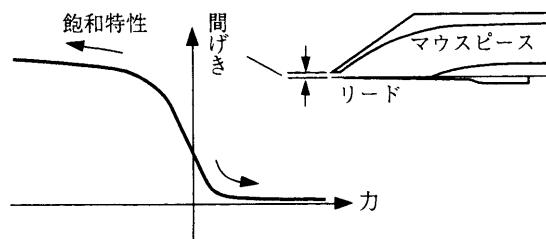


図10 リード間げきの飽和特性 文献(8)より引用.

のバーチャルアコースティック音源では、様々な楽器に対応する必要があるため、工夫がなされている。

サクソやオーボエなどに代表される管体が円すい管のモデルは少々複雑であり、従来、径の少しずつ異なる短い円筒管を多段に直列方向に従属接続するモデルとなっていた。文献(3)のウェーブガイドネットワークを使用すれば、このデジタルシミュレーションが実現可能だが、円すい管に近い特性を得るためには、段数を多くしなければならず、演算量が多く現実的ではない。VLでは独自の簡略化モデルを採用している。

文献(4)によれば、終端を開口端とした円すい管の入力音響インピーダンス  $Z$  は以下ようになる。

$$Z = \frac{j\omega c k r_1 \sin(kl)}{S_1 \{ \sin(kl) + k r_1 \cos(kl) \}} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{S_1 / (j\omega c k r_1) + S_1 / (j\omega c \tan(kl))} \quad (7)$$

ここで、

$$Z_n = S_1 / (j\omega c k r_1) \quad (8)$$

$$Z_l = S_1 / (j\omega c \tan(kl)) \quad (9)$$

とおくと、

$$1/Z = 1/Z_n + 1/Z_l \quad (10)$$

つまり、 $Z$  は  $Z_n$  と  $Z_l$  の並列接続により、実現されることがわかる。 $Z_l$  は断面積  $S_1$ 、終端が開口端で長さ  $l$  の円筒管の音響インピーダンスそのものであるが、 $Z_n$  のほうは当方の考察により  $k r_1$  が小さいとき近似的に、

$$Z_n \cong j\omega c \tan(k r_1) / S_1 \quad (11)$$

となるので、断面積  $S_1$ 、終端が開口端で長さ  $r_1$  の円筒管の音響インピーダンスで近似されることが分かった。これらを音響的なイメージで書くと、図11のようになる。

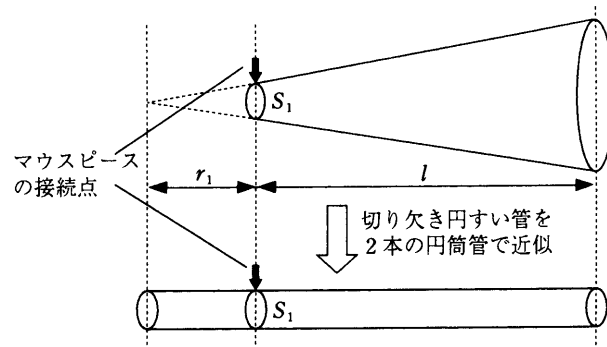


図11 2円筒管の並列接続による円すい管の簡易モデル

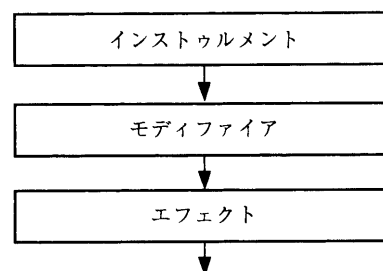


図12 VLの音源部の構成

つまり、円すい管自体は、円筒管2本の並列接続で近似できるので、実際のデジタルシミュレーションでは、ドライバ側と、円筒管2本をウェーブガイドにより並列接続することで、大幅な演算量の削減が可能となった。図8の「パイプ/ストリング部」ではこのような理論に基づく簡略化モデルが採用されている。

上記より演算量は若干増えるが、リアルタイムでの実現性のある、シンセサイザに適した高精度の物理モデル(文献(5)中の図18参照)も考案されている。

以上で述べた簡略化のほか、図8の乱流状態の計算に関しても簡略化モデル<sup>(6)</sup>が採用されており、演算の効率化を図っている。

このように、VLの物理モデルでは図8に示されるような各要素をソフトウェアとして実現し、それらを組み上げ、口内圧力や弓速度などの制御を適当に与えることにより系が自律的に発振を始める。

自律発振系という点をとらえてVLの音源方式を特に Self Oscillation/VA (S/VA) 方式と呼んでいる。

図12にVLの全音源構成を、図13にモディファイア部の構成を示す。前述のインストゥルメント部だけでなく、全体としては更に音色を加工するモディファイア、エフェクトなどの部分がある。モディファイア部には通常のシンセサイザには見られない幾つかの機構がある。ハーモニックエンハンサは物理モデル系の通常は直接耳で聴くことのできない幾つかの信号を聴いたり、互いに交差させ合うことができる。インパルスエクスパンダや

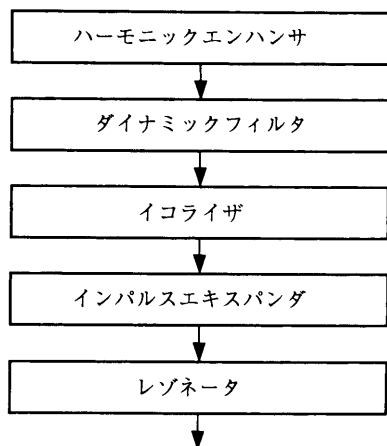


図13 モディファイア部の構成

レゾネータでは共鳴胴などのシミュレーションができる。

VLでは図8中のリード、弓圧、口中圧、弓速度などの制御用パラメータなどが存在する。実際の演奏者が行っているのと同様これらを時変動させることにより、従来音源方式では不得意だった様々な楽器の奏法に対応することができ、リアルな音楽表現が可能となる。

このような特徴のため、VLでは、楽器に対しての演奏パラメータが発音開始の瞬間から時々刻々と変化していく管楽器や擦弦楽器などの持続音楽器の合成が得意である。

## 5. 今後の展望

バーチャルアコースティックシンセサイザVLでは、専用DSP上で管楽器、弦楽器の発音原理をソフトウェアにより効率的にリアルタイム演算し、高い音楽表現を実現した。また、各楽器の要素を新しく組み合わせて現実には存在し得ない仮想的楽器を構築し、アコースティック楽器をベースとした全く新規な楽器音も合成可能である。

今後については二つの方向性が考えられる。第1の方向性としては、モデルの高精度化によるより高度な楽器

音品質の実現である。これについては国内外の研究機関において継続的に研究が行われており、例えば文献(7)などの高精度物理モデルの研究が挙げられる。第2の方向性としては、対応楽器の拡充である。現在の管楽器、弦楽器に加えて、ピアノ系楽器、打楽器、新規楽器などに対応した新しい物理モデルが開発され、プラットフォーム演算能力の飛躍的向上により高品位で表現力豊かな新しい物理モデルシンセサイザが実現されることが期待される。

## 文 献

- (1) M.E. McIntyre, R.T. Schumacher, and J. Woodhouse, "On the oscillations of musical instruments," J. Acoust. Soc. Am., vol.74, no.5, pp.1325-1345, 1983.
- (2) S.D. Sommerfeldt and W.J. Strong, "Simulation of a player-clarinet system," J. Acoust. Soc. Am., vol.83, no.5, May 1988.
- (3) J.O. Smith, US Patent: 4,984,276, "DIGITAL SIGNAL PROCESSING USING WAVEGUIDE NETWORKS," Jan. 8, 1991.
- (4) 実吉純一, "円錐ホーンの反共振周波数の球面波理論による解析—円錐形管楽器の鳴る周波数," 音響学講演論文集, Oct. 1977.
- (5) 増田英之, 国本利文, 特許広報 第2707913号, "楽音合成装置," 1997年10月17日登録.
- (6) 増田英之, 特許広報 第2727841号, "楽音合成装置," 1997年12月12日登録.
- (7) 足立整治, 佐藤雅昭, "唇の2自由度モデルを用いた金管楽器のシミュレーション," 信学技報, EA94-25, pp.1-8, July 1994.
- (8) 国本利文, 柿下正尋, ヴァーチャルアコースティックシンセサイザ VL, AES 東京コンベンション '95 予稿集, June 1995.

ますだ ひでゆき  
増田 英之



昭60佐賀大・理工・電子卒。昭62同大学院修士課程了。同年ヤマハ(株)入社。以来、物理モデル音源方式などの音源研究開発に従事。現在、アドバンストシステム開発センター・技師補。

すずき ひでお  
鈴木 秀雄



昭49名大・工・電子卒。同年ヤマハ(株)入社。以来、音源システム研究開発、音源LSI開発、各種電子楽器・シンセサイザ商品開発に従事。現在、アドバンストシステム開発センター・マネージャ・主席技師。