

解説

2. DSP の応用例



2.8 DSP の音響機器信号処理への応用†

春日 正 男†

1. ま え が き

集積回路技術の進歩にともない、デジタル信号処理が実時間で実行できる DSP が開発され、主に通信の分野で回路装置に組み込まれて実用化されるようになった¹⁾。これにともなって、オーディオの分野でも積極的に PCM デジタル信号を利用して、音楽信号の録音再生、波形合成などを行うデジタルオーディオシステム²⁾が開発され、すでに広範囲な分野で時代の主流商品として育っている。デジタル信号は信号処理および伝送に際して、十分な信号の語長（ビット長）を確保すれば、歪、ダイナミックレンジ、SN 比などの信号品質劣化がほとんどなく、高品質（High-Fidelity）信号が維持でき、音質がきわめて重要なオーディオシステムにはデジタル信号処理は最適な処理技術といえる。

本文では、デジタル信号処理を DSP を利用して実行し、高品質信号の得られる音響機器を実現する、との観点から、まず高品質な信号処理が要求される音響信号に適用する利点、適用分野について述べる。さらにそれらの信号処理をどのようにして実現するか、など主にデジタルフィルタを中心とした回路構成方法について、これらの内容、参考となる文献などを紹介し、また今後の方向性についても述べる。

2. 音響機器に利用するデジタル信号処理

2.1 音響信号処理への適用利点

デジタル信号処理の中心的役割を演ずるのはデジタルフィルタ（DF）である。この観点から考察すると、従来からの研究の多くは主に通信系におけるフィルタリング、いわゆるろ波器を中心としたものであり、信号の周波数帯域を制限して希望する信号をとり

出すことであった³⁾。一方、音響機器では主として、信号のスペクトルの処理を積極的にとりあげ、特定の周波数帯域のスペクトル成分を増減して音質変更などを行う等化処理に用いたり⁴⁾、FIR 型 DF の直線位相特性を利用して群遅延平坦により位相歪をなくしたりするなど^{5),6)}、主に可聴信号の帯域全部を処理することが多い。このため、ろ波器ではほとんど問題とならなかった減衰域での信号品質が、音響機器では特に重視される。この意味で、DF の係数語長、演算語長を十分確保して帯域全部の信号品質を維持することが音響機器には必要となる。しかもこれらの処理は DSP を利用して、プログラミングにより DF の特性変更、向上などの仕様の柔軟性を満たすことができる。この点、聴感という感性が重要な要素である音響信号処理では特性仕様の変更が容易に行えることはユーザにとって大きな利点になる。さらに、従来のアナログ技術では実現できなかった信号処理、たとえば FIR 型 DF を利用してオーバーサンプリングによる A/D、D/A 変換系の分解能の向上を図るなど、デジタル信号処理だから実現できる多くの利点もあげられる。

2.2 音響機器における適用分野

音響機器に利用するデジタル信号処理技術は、まず Hi-Fi オーディオ商品の原点である音楽ソフトのマスターリング（原音制作）工程に導入された⁷⁾。すなわち、従来のテープレコーダにデジタル技術を導入する、との方向で PCM プロセッサが開発され、これにより PCM 録音再生が可能となり、音楽ソース（レコード、テープ、CD）の原音が飛躍的に向上した。またマスターリング工程においてひんぱんに行われるダビングに対しても SN 比の劣化はなく、従来のアナログテープレコーダから得られる信号に比べてきわめて高品質な信号が得られるようになった⁸⁾。このように、PCM プロセッサから始まったデジタル技術は、音楽ソフトのマスターリング工程における音質調整、曲間のクロスフェード、デジタルフェーダ、などの可変

† An Application of DSP for High-Fidelity Audio Signal Processing by Masao KASUGA (Research And Development Center, Ricoh Company, Ltd.).

† (株)リコー中央研究所

減衰等化器（デジタルイコライザ：DEQ）や、リバーブ、サンプルレート変換など、音処理を直接デジタル処理できる分野に順次適用されてきている。

一方、電子楽器の分野では、価格との関係であろうか、まだ十分 DSP が使われているとは言えないようだが、近い将来にはすべてをデジタル信号で処理し、制御できる機器へと移行しつつあるように思われる⁸⁾。

以上のことを整理すると以下の四項目が考えられる。

1) 音場制御への適用

DEQ による振幅周波数特性の制御、リバーブによる響きの制御、フェーダ、ミキシングなどの音量制御。

2) 音場再生（創生）への適用

家庭用、自動車内の再生音場作り、コンサートホールなどの好みの音場を意図したサラウンド音場作り。

3) 音響信号インタフェース技術への適用

サンプルレート変換、A/D、D/A 変換への応用。

4) 電子楽器への適用

シンセサイザ、コーラスエキサイタへの応用。

2.3 音響信号処理に利用するデジタルフィルタ

ここでは音響信号処理に重要な役割を演ずる DF について、利用できる特徴、必要となる条件について述べ、DSP で実現する場合の参考としたい。

DF には FIR と IIR とがあり、それぞれ表-1 に示す性質をもっている。IIR 型 DF の適用代表例として DEQ を、また FIR 型 DF の例としてサンプルレート変換をとりあげて、DF の内容を論ずる。

2.3.1 デジタルイコライザに用いる DF

DEQ の実用性、回路の汎用性、小型化などの工業化の観点から考えると、利用する DF は IIR 型が望ましい。またイコライザとして考えると、従来のアナログ方式と同じ操作感覚でイコライザ特性（振幅周波

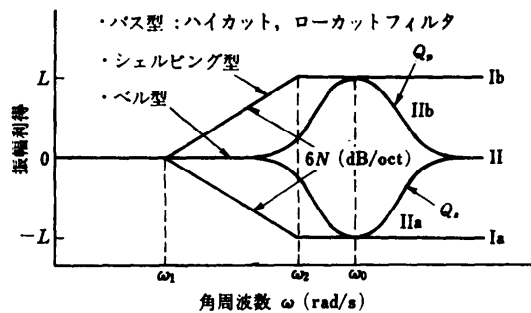


図-1 イコライザ特性と特性可変パラメータ

数特性) が変更できることが必要となる。このため特性可変パラメータはアナログイコライザと同じように DEQ でも使えること、言い換えれば、式(1)に示すようにアナログ系とデジタル系とで同一の形式をもつ伝達関数、 $H_A(s)$ と $H_D(z)$ とが対応することが望ましい。

$$H_A(s) = q_0 \frac{s^2 + q_1 s + q_2}{s^2 + p_1 s + p_2} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow H_D(z) = a_0 \frac{z^2 + a_1 z + a_2}{z^2 + b_1 z + b_2}$$

またパラメータとしては、図-1 に示す Q (尖鋭度)、 f_0 (中心、シャ断周波数)、 L (利得) の三つですべてのイコライザ特性を実現する。得られる DEQ は Bi-Quad 型 DF であり、文献 4) に示す方法で設計できる。また、DF は次式で記述される。

$$y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2} - b_1 y_{n-1} - b_2 y_{n-2} \quad (2)$$

ただし a_i, b_i : フィルタ係数, x_n, y_n : 入, 出力信号

2.3.2 サンプルレート変換に用いる DF

デジタルオーディオシステムが実用化時期を迎え、多くの機器が開発された。これらの機器の必要な信号周波数帯域幅は目的によって異なっており、そのために標準化周波数（サンプルレート）が違っている。しかしシステムの構成上これらの機器を相互接続する必要が生じ、このためのサンプルレート変換器が必要となる。変換理論はすでに多くの文献⁹⁾にあるので省略するが、基本的には図-2 に示したように⁶⁾、どちらか低いほうのサンプルレートで標準化定理が満たされるように低域 DF で処理することにより実現できる。したがって、変換後の信号品質は利用する DF の特性によって決まり、また装置規模も DF の内容に依存する。このため変換器の構成条件としては、非直線歪、遅延歪の発生が少ない、SN 比の劣化（回路

表-1 デジタルフィルタの比較

FIR フィルタ		IIR フィルタ
10~50	フィルタ次数比 (同等な振幅特性)	1
可 能	直線位相特性	困 難
ビデオ信号 オーディオ信号	適用技術分野	オーディオ信号
・音場再生装置 ・A/D、D/A 変換系 ・波形等化器	適用商品分野	・音場制御装置 振幅等化器 エコーマシン ・音声合成器

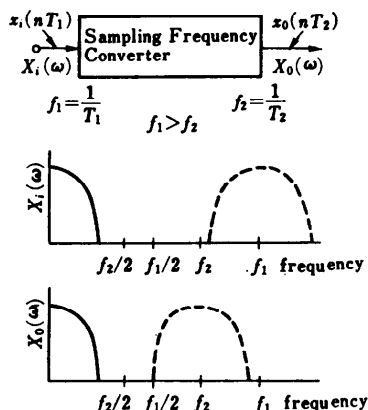


図-2 サンプルレート変換の原理

素子への雑音混入)がない、変換器の回路実現が容易である、などが必要であろう。FIR^{9),10)},あるいはハイブリッド DF^{6),10)},が適当であるが、基本的には前者が使われることが多い。FIR型低域DFの設計方法はすでに明らかにされており¹¹⁾,希望する信号品質の仕様によって通過域リプルなどを決定すればよい。FIR型DFは次式で示される。

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} a_{n-i} x_{n-i} \quad (3)$$

ただし N : フィルタ次数

2.4 DFの回路構成

DFを実現する場合、積和演算などの信号処理は、信号およびフィルタ係数(乗算器係数)を有限語長で表現しなければならない。このために必然的に量子化誤差によるフィルタの周波数特性の変動や量子化雑音などの問題が生ずる。一般に、有限語長制限のために発生する量子化誤差は次の三つに分類されている。

- (1) 入力信号の量子化誤差
- (2) フィルタ係数の量子化誤差
- (3) 有限語長演算による丸め誤差

このうちDFの回路を実現する場合に問題になるのは(2)と(3)とであり、これらの誤差を低減させて信号品質劣化などの要因をとり除くことが重要である。

2.4.1 フィルタ係数の量子化誤差

DFの係数を有限語長に量子化すると、DFの伝達関数の極と零点の移動が生じる。すなわち係数量子化後の伝達関数は目的とする特性から変化してしまい、この変化した誤差が問題になる。

FIR型DFに関しては、係数感度から最小係数語長の推定を示した論文がいくつかあり^{12),13)},これらの文献から係数語長を推定できる。

IIR型DFに関しても、いくつかの論文が提案されており^{14),15)},これらから係数語長が求められる。

以上の方法により、DFの最小係数語長(周波数特性とのトレードオフであるが)が推定できる。

2.4.2 有限語長の積和演算にともなう丸め誤差

DFの積和演算にともなう丸め誤差に関して、FIR型DFの場合には乗算した結果をそのまま加算していき、最後に最終出力として信号を得る場合に丸めれば問題ない。しかしIIR型DFの場合には、巡回項のレジスタの語長、加算器のレジスタの語長の長さにより、データ処理演算にともなう丸めの誤差が発生し、これが信号品質劣化の原因となる。したがって、丸め雑音を評価し、信号品質への影響が無視できる内部演算語長の検討が必要となる。推定方法の一つの例を以下に示す。

丸め雑音を一様分布に従う雑音と仮定し、確率モデルを用いて出力雑音を評価し³⁾,品質維持に必要なデータ(巡回項)語長の推定を行う方法がある^{3),14)}。すなわちデータの量子化ステップを E_0 とし、DF出力の丸め雑音の分散を σ_1^2 とすると、雑音源から出力までの伝達関数を $H(z^{-1})$ として、次式が定義できる。

$$\sigma_1^2 = \frac{E_0^2}{12} \cdot \frac{1}{2\pi j} \oint H(z^{-1}) \cdot H\left(\frac{1}{z^{-1}}\right) z^{-1} dz \quad (4)$$

この雑音分散 σ_1^2 がDFの出力信号に影響を与えない大きさの雑音となるようにデータ語長を求めれば良い。

2.5 音響信号処理に用いるDSP

汎用プロセッサとして開発され、市販されたDSPは文献1)に示されている。1980年をその起源とするが、その後、オーディオ専用のプロセッサが各社から発表された¹⁶⁾。音響信号処理に使用するには最大サンプルレートの48kHzで使用できるインストラクションステップが入る高速なマシンサイクルと高精度(できれば32ビットの1マシンサイクル乗算が可能)の積和演算ができるチップが望ましい。今後はA/D, D/A変換器などの周辺回路が組み込まれ、またマシンサイクル50MHz程度の実効的なスループットが得られ、しかも民生器としてきわめて安価に供給できるコストになること、などがDSPに寄せる期待である。

3. 応用例

ここでは音響信号処理に利用するDSPの応用例として、好みの音質が得られるDEQへの応用を中心に

表-3 デジタルイコライザ特性の仕様

高域	1.4 kHz~16 kHz 以下の3パターンを選択可能 ベル型: $L: \pm 15 \text{ dB}$ $Q: 0.5 \sim 3$ シェリング型: $L: \pm 15 \text{ dB}$ バス型: 12 dB/オクターブ
中高域	600 Hz~7 kHz ベル型: $L: \pm 15 \text{ dB}$ $Q: 0.5 \sim 3$
中低域	200 Hz~2.4 kHz ベル型: $L: \pm 15 \text{ dB}$ $Q: 0.5 \sim 3$
低域	30 Hz~350 Hz 高域と同様に3パターン選択可能

システム制御回路は二つの制御機能から成っている。一つは信号処理に必要な回路を制御する機能であり、フィルタと A_{ii} (フェード処理) 係数、処理モードの変更、処理状態のモニタを行う。もう一つはタイムレコード管理によるシステム全体の制御機能である。これらの機能は、内部 CPU と専用回線で外部接続されているパソコンとによって管理されている。

また、DSP はソフトウェアによってその動作が規定されているが^{(1), (32)}、ここでは詳細については省略する。

3.2 音場再生 (創生) 処理への応用^{(16)~(25)}

生活空間を豊かにするオーディオの歴史は音質と音場創生の追求であった。音質はデジタルオーディオの普及で一段落のようである。このため、最近ではコンサートホールの響きを求めて、音場再生処理にデジタル信号処理を利用する方向へと進んできた。この音場再生とは、図-6、図-7 に示すように、直接音と初期、高次反射音との組み合わせにより残響感と臨場感との効果を出し、家庭や自動車内で実際のホールにいる雰囲気を作り出すことである。これには各種の実際のホールを測定して、各ホールごとの反射音を解析し、これを DSP で制御して音場再生信号を得ることが必要となる^{(24), (25)}。特に個人の音に対する好みによ

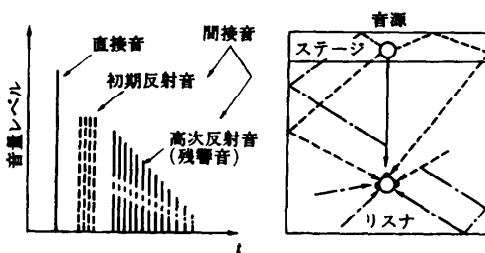


図-6 コンサートホールの音波群

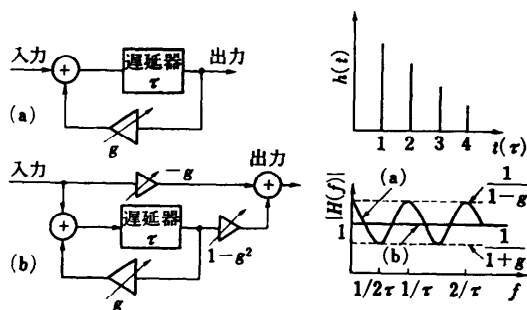


図-7 コムフィルタ(a)、オールパスフィルタ(b)とその特性

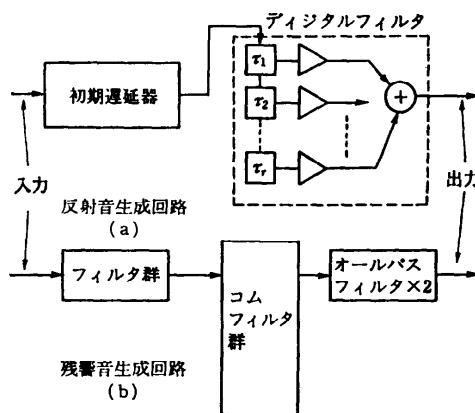


図-8 初期反射音、残響音生成回路のブロック図

って、多くのアプリケーションソフトが要求される。実際の処理方式は図-8 に示すブロックに従って、反射音生成回路により実現される⁽¹⁷⁾。基本的にはコムフィルタによって反射音を作り、この後フラッタエコーを防止して自然な響きとなるようシュレダのオールパスフィルタを接続して反射音の密度を増加させる方式である⁽¹⁷⁾。

3.3 A/D, D/A 変換への応用^{(5), (6), (26)~(29)}

デジタルオーディオの本格的な実用化期を迎え、アナログ入出力信号を今よりもさらに高精度な信号で処理したい、との要求が強まっている。このため、A/D, D/A 変換器をより高分解能で高速に動作させ、しかも安価に供給できる DSP を利用したオーバーサンプリング方式が注目されてきた^{(5), (26)}。この背景には、たとえば逐次比較方式の A/D 変換器では現在以上の分解能を得るのはきわめて難しく、また製造コストが上昇してしまうという製造上の問題点と、アナログフィルタのコスト低減とフィルタ通過後の信号品質、特

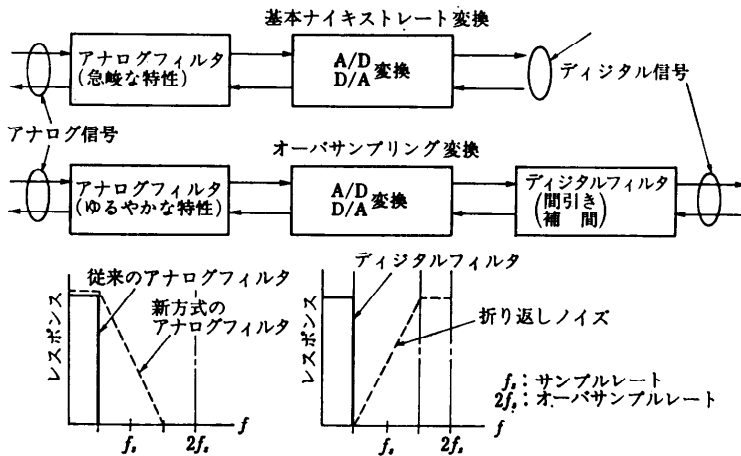


図-9 A/D, D/A 変換システムブロック図とフィルタの振幅周波数特性

に群遅延特性³⁰⁾を、ゆるやかなフィルタのシャ断特性に比例した改善を図り^{6), 6)}、信号品質を向上したいとの要求によるものであろう。この方式の変換原理を図-9に示す。

A/D 変換器では、 Δ , $\Delta\Sigma$ 変換などを利用して、従来困難であった高速な A/D 変換を実現し、実質的な分解能の向上を図っている^{26), 27)}。また D/A 変換器ではまず、与えられたデジタル信号のビット数で実効的な分解能を改善する方向から DSP の利用が始まった⁵⁾。

いずれの方式においても近い将来はこの方式が主流になるように思われ²⁸⁾、またビデオなどの高周波数帯域にも適用できる方式が得られる、との期待もある。

3.4 電子楽器への応用^{33), 34)}

電子楽器は、音を発振し、創造するシンセサイザと、得られた音(電気信号)を自分の好みの音に加工するエフェクタ部とから成る³⁾。シンセサイザは実用的には1965年、R. ムーグの VCO (電圧制御発振器) による合成法に始まる。これはアナログ方式のモノホニック(一つの音しか同時に発生できない)シンセサイザであり、音の三つの要素である、音程(ピッチ)、音色(音の特徴)、音量、だけが考えられていたものである。次に、これらの三要素を時間的に変化させて合成する EG (エンベロープ・ジェネレート) 方式が開発され、また音源もポリホニック(コードを演奏できる)へと改良された。さらに、マイクロプロセッサの登場によってアナログからデジタルシンセサイザへと移行し、ここに初めてデジタル信号処理の技術が導入された^{31), 35)~37)}。最近になってサンプリング方

式として、楽器の音をデジタル信号に変換してメモリに書き込み (PCM 録音)、これを読み出しのクロックレートを変えながら音程を変更して出力する方法が開発された³⁾。この流れから考えると、電子楽器への応用としては、シンセサイザよりはむしろエフェクタの制御方法への利用が大きいように思われる。たとえば、エコーマシン、リバーブレータ、DEQ、ハーモナイザ³⁾、などすでに音場の項で述べた技術応用である。

4. あとがき

DSP が音響機器の多くの分野で利用されていることを文献とともに紹介した。この背景には、価格、種類とも手ごろになったこと、応用の利点として特に情報処理の変更が簡単に、かつ確実に行えること、などの要因が大きいように思われる。これは趣味的な要素が強い音響機器の内容が各個人の好みによって、さまざまに対応でき、しかもそれらの特性が信号の品質を損うことなく容易に変更できることを意味する。この点から、DSP がオーディオ、特に Hi-Fi オーディオにはきわめて重要な役割を果たしていく、と考えている。

参考文献

- 1) 辻井重男他: シグナルプロセッサとその応用, コンピュータロル, Vol. 15, コロナ社, 東京 (1986).
- 2) 若果 尚: デジタルオーディオその課題と将来, 音響学会誌, Vol. 36, No. 2, pp. 111-114 (1980).
- 3) Gold, B. and Rader, C. M.: Digital Processing of Signals, McGraw-Hill, New York (1969).
- 4) 春日正男: 可変減衰等化器として用いるデジタルフィルタの設計法, 音響学会誌, Vol. 37, No. 1, pp. 11-18 (1981).
- 5) Goedhard, D. et al.: Digital-to-Analog Conversion in Playing a Compact Disc, Philips TR 40, Vol. 6 (1982).
- 6) 春日正男: 標準化周波数変換器の一構成法, 音響学会誌, Vol. 39, No. 4, pp. 221-229 (1983).
- 7) 土井利忠他: デジタルオーディオ, ラ技, 東京 (1982).
- 8) Moog, R.: マイクロプロセッサの隆盛とシンセ

- サイザ, Computer Sound, Vol. 3, No. 6, 日本ソフトバンク, 東京 (1989).
- 9) Crochiere, R. E. et al.: Optimum FIR Digital Filter Implementation for Decimation, Interpolation and Narrow-Band Filtering, IEEE Trans. ASSP-23, pp. 444-456 (1975).
- 10) Campbell, H. R. et al.: An Algorithmic Procedure for Designing Hybrid FIR/IIR Digital Filters, BSTJ, Vol. 55, No. 1, pp. 89-108 (1976).
- 11) Parks, T. W. and McClellan: A Program for the Design of Linear Phase Finite Impulse Response Filters, IEEE Trans., Vol. Au-20, pp. 195-199 (1972).
- 12) 三谷政昭他: FIR デジタルフィルタの最小係数語長の推定, 信学論, Vol. J 61-A, No. 7 pp. 665-672 (1978).
- 13) 三谷政昭他: デジタルフィルタの係数感度と最小係数語長の推定法に関する一考察, 信学会全大会 1628, pp. 7-212 (1977).
- 14) 春日正男: デジタル減衰等化器の一構成法, 音響学会誌, Vol. 39, No. 4, pp. 230-337 (1983).
- 15) Liu, B.: Effect of Finite Word Length on the Accuracy of Digital Filters, IEEE Trans., Vol. CT-18 (6), pp. 670-677 (1971).
- 16) 次世代オーディオの萌芽, 音場制御, 日経エレクトロニクス, No. 459, pp. 99-115 (1988).
- 17) 最新デジタル AV 技術, 電子技術, 7, pp. 2-80 (1988).
- 18) 中間保利: デジタルフィルタによる音響特性の補正について, JAS Journal, 7, pp. 3-8 (1985).
- 19) 清水 寧他: 電気音響的手段による残響感の延長手法について, 信学技報 EA 87-60, pp. 31-35 (1987).
- 20) 大和俊孝他: 車室内における非対称音場の改善方法, 音講論集 1-5-14, pp. 357-358 (1988. 3).
- 21) 西 隆司他: 車室内音場の物理特性と心理評価, 信学技報 EA 87-57, pp. 9-15 (1987).
- 22) 藤本昇治他: デジタル信号処理 LSI を用いた音場制御装置の一検討, 信学技報 EA 87-59, pp. 25-30 (1987).
- 23) 橋本敏彦: 新たな音場を作るデジタル信号処理, 日経エレ, No. 443, pp. 177-181 (1988).
- 24) 山崎芳男他: 近接 4 点受点による測定結果, 音響学会誌, Vol. 43, No. 4, pp. 277-285 (1987).
- 25) 竹本雅昭他: 仮想音源の新しい測定法, 音講論, 1-7-4, pp. 521-522 (1988. 3).
- 26) 湯川 彰: オーバーサンプリング方式の A-D/D-A 変換技術, 日経エレ, No. 452-459 (1988).
- 27) 湯川 彰: 実用期を迎えたオーバーサンブル A-D 変換技術, 日経エレ, No. 447, pp. 165-175 (1988).
- 28) 長田 淳他: デジタルオーディオ用オーバーサンプリングフィルタ, 信学技報 EA 85-61, pp. 49-56 (1985).
- 29) Nethisinghe, S.: Advanced Techniques in D/A Conversion, AES Tokyo Conference 85, pp. 112-115 (1985).
- 30) 星野博之他: 群遅延歪を与えた音声信号の音質劣化の知覚, 信学技報 EA 87-12, pp. 31-38 (1987).
- 31) 松重 隆他: DSP を利用したマスタリング用デジタルイコライザの開発, AES Int. Confer, pp. 82-85 (1985).
- 32) 丸田力男: 音響信号処理用 LSI, 音響学会誌, Vol. 39, No. 11, pp. 750-755 (1983).
- 33) MIDI と MPU-401, 音響学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 416-418 (1985).
- 34) コスモシンセサイズシステム, 音響学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 419-420 (1985).
- 35) 中村 勲: 計算機の自動演奏プログラム, 音響学会誌, Vol. 41, No. 1, pp. 407-410 (1985).
- 36) 石井六哉他: 時間領域における楽音分析の一方, 信学技報 PSP 88-3, pp. 13-18 (1988).
- 37) 中村 勲: 楽音のデジタル合成, 音響学会誌, Vol. 37, No. 11, pp. 558-562 (1981).

(平成元年 7 月 5 日受付)