法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

デジタル直接駆動法を用いた指向性スピーカ システムへのツリー構造 NSDEM の応用

曽我美, 泰隆 / Sogami, Yasutaka

(出版者 / Publisher)法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要.理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要.理工学・工 学研究科編

(巻 / Volume)
58
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
7
(発行年 / Year)
2017-03-31
(URL)
https://doi.org/10.15002/00014181

デジタル直接駆動法を用いた指向性スピーカ システムへのツリー構造 NSDEM の応用

AN APPLICATION FOR TREE STRUCTURE NSDEM TO A DIRECTIVITY SPEAKER WITH AMPLITUDE CONTROLUSING A DIGITALLY DIRECT DRIVEN SPEAKER

曽我美泰隆Yasutaka SOGAMI指導教員 安田 彰

法政大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 修士課程

Tree- structure NSDEM method has been proposed as a method to suppress and reduce the increase in circuit size due to the number of processing bits in a digitally direct driven speaker.

In this study, we applied this tree structure NSDEM to a directivity speaker system using digitally direct drive method, and simulation and actual measurement are carried out and the results are presented. *Key Words* : *Digitally Direct Driven Speaker(DDDS)*, *NSDEM, Directivity Speaker ,amplitude control, tree structure NSDEM*

1. 研究背景

デジタル直接駆動スピーカシステム[1]ではフルデジタ ル信号処理により,従来のオーディオシステムに存在する デジタル信号のアナログ信号への変換による信号劣化,ア ナログ部が存在することによるシステム規模,消費電力の 増大といったこれらの問題を解決できる.しかしデジタル 直接駆動型スピーカは処理ビット数が増加すると NSDEM の回路規模が指数関数的に増大する.処理ビット 数による回路規模の増大を抑制し削減する手法としてツ リー構造 NSDEM 法[2][3]が提案されている.この手法は デジタル直接駆動型スピーカにおいてその特性を維持し つつ回路規模を削減する点において有効な手法であるが, 応用・実証例が存在しなかった.

本研究ではこのツリー構造 NSDEM をデジタル直接駆動法を用いた指向性スピーカの一種である,セグメント化パルス幅制御法[4]に組み込み応用し,ハードウェア規模の削減を行った.同時にスピーカ正面からの角度による音圧変化と音響特性を実測して従来手法と比較し,セグメント化パルス幅制御法による指向性能とツリー構造NSDEMの有用性の評価を行った.

2. デジタル直接駆動法

(1) デジタル直接駆動型スピーカ

デジタル直接駆動法を用いてアクチュエータとしてス ピーカを駆動するシステムがデジタル直接駆動型スピー カ(Digitally Direct Driven Speaker, DDDS)である.概要を図 1として示す.



図1 デジタル直接駆動型スピーカシステム

DDDS は出力に複数個のスピーカを並列に接続したマル チユニットスピーカ,または1つのコアに複数のコイルを 巻きつけ.1 つのコーンを共有するマルチコイルスピーカ を用いて音を再現する.入力されたデジタル音声信号をマ ルチビットΔΣ変調器で再量子化を行い,温度計コードに 変換する.そして生成された重みのない温度計コードを Noise Shaping Dynamic Element Matching(NSDEM)に 入力し、出力のマルチユニットスピーカまたはマルチコイ ルスピーカの単位時間当たりの使用回数が均一となる様 に使用スピーカ,或いはコイルを選択し,駆動する.そして 複数の各スピーカユニット自体はON-OFFの2値動作を しているが,それぞれのスピーカから出力された音が空間 内で合成されることによって音が再現されるのである.し かし DDDS で処理ビット数が増加すると NSDEM の回 路規模は爆発的に増加するという問題がある.NSDEM は 2の冪乗ずつのビットを処理するが、処理ビット数が2倍 となると回路規模は2倍以上となることが分かっている.

(a) ツリー構造 NSDEM

増大する NSDEM の回路規模の抑制・削減を目的にツ リー構造 NSDEM(Tree structure NSDEM, TNSDEM) がある. TNSDEM は低レベル NSDEM を並列に接続す ることで回路規模の増加を抑制している.TNSDEM には 2段2並列型,3段4並列型があり,並列数が増加すると回 路規模削減効果は大きくなる.32Level NSDEM をツリー 構造で実現する場合,2 段 2 並列型では 16Level NSDEM を 2 個並列に配置し,3 段 4 並列型では 8Level NSDEM を 4 個並列に配置する.並列に配置された NSDEM は前 段に配置された Switched NSDEM(SW_NSDEM)に接続 される.SW_NSDEM は入力された温度計コードを分割 して後段の NSDEM に割り振り、それぞれの NSDEM に 入力される温度計コードが均一となるように動作してい る.これにより回路規模削減とシェーピング特性を実現し ている.2段2並列型.3段4並列型 TNSDEM のブロック 線図を図 2.SW NSDEM のブロック線図を図 3 として示 す.



図 2 TNSDEM の構造 (左:2段2並列型 右:3段4並列型)



⊠ 3 SW_NSDEM

SW_NSDEM は NSDEM と構成はほぼ同じくセレクタ, ループフィルタ,ソートで構成されているが,違う点は更 に温度計コードを 2 進数に変換するモジュールがループ フィルタの前に接続されている点と,ループフィルタの個 数である.SW_NSDEM では温度計コードのビット幅に関 わらずループフィルタは 2 個である.マルチビット△∑変 調器から出力された温度計コードがセレクタに入力され ると,温度計コードが偶数の場合と奇数の場合の 2 種類の 動作を行う.偶数の場合,後段の NSDEM には等しく分割さ れた温度計コードが割り当てられ,出力される.奇数の場 合,まず入力された奇数-1 の,偶数の信号が後段の NSDEM に割り当てられ,残った余りの 1 は前段部のセレクタとル ープフィルタによって制御されて,後段の NSDEM へ交互 に割り振られる回数が均一になるように動作し,出力にシ ェーピング特性が付加される.しかし TNSDEM は出力素 子の完全なシャッフリングは行えていない.またその影響 で NSDEM と比較して安定性が悪化し,段数が増加すると その影響は顕著に現れてしまう.そのため帯域外利得を 下げて安定化を図っている.NSDEM と TNSDEM 出力のス ペクトル FFT シミュレーション結果を図4として示す.



図4 NSDEM と TNSDEM の FFT 解析結果

TNSDEM を FPGA に実装した際の Lookup Table(LUT) 使用数比較表を表 1 として示す.

表1 LUT 使用数比較

-								
32Level _3rd								
	NODEM	2para	2step	4para3step				
	Usage Count	Usage Count	Usage Rate [%]	Usage Count	Usage Rate [%]			
LUT	24151	19097	79.1	14742	61.0			

図4と表1よりTNSDEMはNSDEMと同等の特性を保 ちつつ回路規模が削減されていることが分かる.並列数が 増加すると回路規模削減効果もより大きくなることも分 かる.

(2) セグメント化パルス幅制御システム

DDDS で振幅制御と同等の音圧制御を行う手法として セグメント化パルス幅制御法が提案された.セグメント化 パルス幅制御法の概略図を図5 として示す.



図5 セグメント化パルス幅制御法

セグメント化パルス幅制御法ではスピーカ駆動パルス 信号を分割してセグメントを生成し,振幅係数を時間軸方 向のセグメント数に置換する.そしてセグメントの合成に よりパルス幅を変化させ,スピーカを駆動するシステムで ある.これにより単位時間あたりのスピーカ使用回数が振 幅係数比と同じくなるように制御することで各スピーカ からの出力音圧比を変化させ,振幅係数と同等の動作を DDDS で実現することが可能となる.



図6 セグメント化パルスの生成とセグメント化パルス の合成によるスピーカ駆動の概念

セグメント化パルス幅制御では DDDS の 1 クロックパ ルス信号を4 分割し,8 ユニットを使用したラインアレイ スピーカを使用して振幅係数を端のスピーカから 1,2,3,4,4,3,2,1 となるようにセグメントを割り当てる.これ により中央のスピーカの音圧が高く端のスピーカの音圧 が低くなるため,スピーカ正面中央方向に音像がローカラ イズされる.そのため,セグメント数を 20 個用意し,各セグ メントを NSDEM で制御する.このセグメント化パルス幅 制 御 用 20Level NSDEM を Segment-Pulse NSDEM(SPNSDEM)と呼ぶ. DDDS のクロック周期を Ts とした場合の,セグメント化パルス幅制御法をフルスケー ル信号で駆動した場合のセグメント配置図を図 7,セグメ ント化パルス幅制御システムのスピーカ駆動タイミング シミュレーションを図8として示す.



図7 フルスケール駆動時のセグメント配置図



図8 セグメント化パルス幅制御スピーカ駆動タイミング



図9 セグメント化パルス幅制御出力の FFT 解析



図 10 1kHz 入力時音圧プロットシミュレーション

図7,図8より,中央寄りのスピーカの使用回数が多く,端寄 りのスピーカの使用回数が少なくなるように制御されて いることが分かる.また図9より SPNSDEM でも次数に応 じたノイズシェーピング特性が付加され,図10よりスピ ーカ正面方向に指向性が付加されていることも分かる.セ グメント化パルス幅制御を行うことで DDDS で特性を悪 化させることなく,振幅制御と同等の指向性が実現出来る.

3. 提案手法

(1) SPNSDEM のツリー構造化

セグメント化パルス幅制御システムに 2 段 2 並列型,3 段 4 並列の 2 種類の TNSDEM を SPNSDEM 化(T-SPNSDEM)し組み込んで応用した.また FPGA に書き込ん で実測を行い,従来手法と比較を行った.TNSDEM を組み 込むに当たってはセグメント化パルス幅制御用に 32Level TNSDEM を 20Level 化に再設計を行った.T-SPNSDEM の SW_NSDEM,TNSDEM の次数は共に 3 次と した.



2段2並列型では前段に接続された SW_NSDEM では入 力された 20bit 温度計コードを 10bit ずつに分割し,それぞ

れ出力する.後段の 10Level NSDEM は 16Level NSDEM の うち10 ラインのみを使用するため,6 ラインは選択されな い様にループフィルタに十分大きな値を常に入力してい る. T-SPNSDEM の安定性を高めるため,SW_NSDEM の 帯域外利得 Hinf=1.24 となるようにループフィルタを設 計した.



図 12 2 段 2 並列化 T-SPNSDEM

3 段 4 並列型では前段部 SW_NSDEM は 2 段 2 並列型と 同様,入力された 20bit 温度計コードを 10bit ずつ 2 つに分 割し,それぞれ出力する.中段部 SW_NSDEM は前段部 SW_NSDEM から出力された 10bit 温度計コードが入力さ れ,これを 5bit ずつ 2 つに分割して出力する.最終段の 5Level NSDEM は 8Level NSDEM のうち 5 ラインのみ使 用するため,3 ラインにはループフィルタに十分大きな値 を常に入力し,選択されない様に制御している. T-SPNSDEM の安定性を高めるため,前段部 SW_NSDEM の帯域外利得 Hinf は Hinf=1.08,中段部 SW_NSDEM の 帯域外利得 Hinf は Hinf=1.05 となるようにループフィ ルタを設計した.



図 13 3 段 4 並列型 T-SPNSDEM

(2) シミュレーション結果

Mathworks 社の MATLAB/Simulink を用いて,従来手 法と2段2並列 T-SPNSDEM,3段4並列 T-SPNSDEM のシミュレーションを実施した.シミュレーション条件は 表2の通りである.

表 2	2 シミュレー	ーション身	\$件
	Clock	24 [MHz]	
	Input Signal	10000 [Hz]	
	Signal Type	Sine Wave	
	Signal Amplitude	-6 [dB]	
	OSR	128	
	DSM order	3rd	
	NSDEM order	3rd	
	Element number	8	

T-SPNSDEM 化のスピーカ駆動タイミング図を図 14,1kHz Sin 波入力時の音圧プロットを図 15,FFT 解析 結果を図 16 として示す.



図 14 スピーカ駆動タイミング (左:2段2並列型 右:3段4並列型)



図 15 1kHz sin 波入力時音圧プロット (左:2段2並列型 右:3段4並列型)



図8と図14より,スピーカ駆動タイミングは従来手法と 同様であり,また図10と図15より,1kHz sin 波入力時の 音圧プロットも同様の概形である.故にスピーカ制御と指 向性は付加されていると考えられる.図16を見ると T-SPNSDEMの段数が増加するとノイズフロアの上昇が顕 著に現れており,3段4並列型は20dB程度ノイズフロア がSPNSDEMと比較して上がっていることが分かる.こ れは T-SPNSDEMの安定性を上げるため,SW_NSDEM の帯域外利得を下げたことにより、シェーピング特性の 傾きが小さくなり,ノイズフロアが上昇したと考えられる. SNRは2段2並列型が103[dB],3段4並列型が100[dB]で あった.

Verilog VHDL コードにて記述し,Xilinx 社 ISE で論理合 成を行い実施した,2 段 2 並列型,3 段 4 並列型の各出力信 号のシミュレーションの結果をそれぞれ図 17,図 18 とし て示す.



図 17 2 段 2 並列型 T-SPNSDEM 出力シミュレーション



図 18 3 段 4 並列型 T-SPNSDEM 出力シミュレーション

4. 実測結果

(1) ChipScope pro での測定

記述した Verilog VHDL コードを FPGA チップ(Xilinx 社 Spartan-6 SC6SLX150)に書き込み,Xilinx 社 ChipScope Pro で出力信号を観測した.信号の条件を表 3 に,2 段 2 並列 型,3 段 4 並列型 T-SPNSDEM 出力結果をそれぞれ図 19, 図 20 として示す.

表 3 入力信号条件

Clock	24 [MHz]	
Input Signal	1000 [Hz]	
Signal Type	Sine Wave	
Signal Bit	24	
Signal Amplitude	-6 [dB]	

Eus/Signal	х	0	0	20	40	60 B	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	350	390	403	420	440	460	490	500
/SPECIAL JUBLE	- 1	3	L		Ш		L1		IU.	11		LU				10	.11			1			111	Ш		U.L	L
-/\$PC03T_1_080F	- 1	э	JUL.	IL IL	UL.	UUL		III.		Ш	UL.		ULU.	Ш		LUI.	Ш	W.	LL	U.U	_11	nuu.	LI 1.		r	111	L.
~/\$PCDIT_2_IBUE	- 1		1111	111			_1101		מנות	I.II	ILI.		LU		LU	III.		N.U.	נותו		ՈԼՆ	LINI	IIIL)			000	UL.
-/SPCOUT_1_DEUF	- 1	3	LU	11.1	UIIL	unun	UUU	IN		111	UN.	LI	Ľ		. Inn	UUT.	ווורו	U	UNIT	U.I	ստ		UTU	UTU	UTIN	נווות.	
-/SPCOUT_4_IBUE	- 1		111.1	111	ЛШ	11.10		יייו	1.010	Ш	ພາເ-	ЛЛ	ມມ	UII	10	נותנו		LTU:	IN.	U.U	เนา	.10		TI ULI		UTN.:	UU.
-/SPCOIT_S_IBUE	- 1	- 1	Ш	1LIU	ШЦ		_10.	111	JUU		Ш.	111	II.II	UIU		UL	100	LUT.	UUI			יוורי		ШО	Г.Ш		I, I
-/SPCOUT_A_IBUE	- 1	- 1	LUI.	U	UU	ШЦ	ĽĽ	III.1	L	11		ш	ШШ	_111			11111		ШЛ.	11	LIL	10	LJ.	IIII	LUN		UU.
-/\$4001_2_000F	- 1	- 1	L	TH.				<u>Ш</u> .		Ш	LLI.	Ш		Ш	11	_10		111			Ш		111			U_i	Ш
义	1	9		2	髟	է 2	<u>ज</u> े	迈		型	T	-S	Pl	NS	SD	ЭE	M	C	'hi	ip	Sc	op	pe	H	け	5	
BusiSignal	x	0	÷	20	40 6	10 91	100	120	540	160	190	200	220	240	260	290	300	320	340	360	380	400	429	440	460	490	500

/390	UT_0_UBUF	- 0	- 1	
- /590	UT_1_UBLE		1	
-/390	101_3_180F	0	- 1	. מאור המערכת המכני היו המערכת היו איז
- /590	UT_3_BUF		1	
- /390	UT_4_DBF	0	1	. המערכת המנה המנה המנות הבעברים ביום המתומה המבע במענה בהתומת היום במתורה במתורה ביום המהרה ביום הניכנ עריים המהרי היו
- /390	UT_5_DBUF	0	1	א איז איז איז איז איז איז איז איז איז אי
- /390	NT_6_IBF		1	. במער היה הנהנוגנים בבית הנסוב בנה . זה הנבות ה. ה. הנבות בב. ההנות הנה בבירות בביר בכור הבירות בחור
-/390	1.17_7_08UF	0	1	
	汊	2	0	3 段 4 並列型 T-SPNSDEM ChipScope 出力

図 19,図 20 より中央の出力ラインのパルス数が多く,端 のラインのパルス数が少なくなっていることから,出力信 号の制御は行えていることが分かる.

(2) UPV での測定

次にUPV(Rohde&Schwarz社)で測定したスペクトルFFT 結果を図 21,図 22 として示す.UPVの設定では人間の耳 に近い音響特性となるように 20kHz ローパスフィルタ,A-Weight フィルタを付けて測定を実施した.



図 21 -6dB sin 波入力時の FFT 結果 (左:2段2並列型 右:3段4並列型)



図 22 -60dB sin 波入力時の FFT 結果 (左:2 段 2 並列型 右:3 段 4 並列型)

図 21,図 22 より可聴帯域内に目立ったノイズが現れて いないことが分かる.また入力レベルを下げた場合にもス ペクトル FFT 特性に大きな変化は無く,ノイズを低減出 来ていることが分かる.これより TNSDEM 化をしても使 用回数制御及びノイズシェーピング特性を持たせること が出来ていると考えられる.

(3) スピーカを用いた音圧プロット測定

8 個ユニットラインアレイスピーカを駆動させ,出力音 圧の変化を測定した.測定環境,測定機器,使用スピーカは 以下の通りである.

扒 王 [4]	之术口					
Clock [MHz]	24					
Input Signal [Hz]	500,700,1000 3000,5000,7000					
Signal Type	Sine Wave					
Input Level [dB]	-6					
DSM order	3rd					
NSDEM order	3rd					
FPGA	Spartan−6 XC6SLX150					
Speaker Type	Flat Panel					
Speaker Unit number	8					
Measuring Instrument	ONOSOKKI LA-3560					
Measuring Distance [m]	1.0					

表 4 測定条件



図 23 測定機器(小野測器 LA-3560)

表5 使用スピーカ仕様

Sperker Type	Line Array
Speaker Unit Type	Flat Panel
Speaker Unit number	8
Speaker Unit Size [mm × mm]	44 × 44
Speaker Unit Interval [mm]	11
Center of Speaker Unit Inteval [mm]	55
Speaker Unit Drive Voltage [V]	5



図 24 使用したスピーカ

スピーカから 1m 離れた点に騒音計を設置し, 90°から 90°まで 15°刻みの 13 点で測定を行った.測定環境は以 下の通りである.





図 26 測定環境

従来手法の SPNSDEM,提案手法の2段2並列型,3段4 並列型 T-SPNSDEM 化の各測定結果を図 27~図 32 と して示す.



従来手法,2 段 2 並列型,3 段 4 並列型 T-SPNSDEM 化を したシステム全てで入力信号の周波数が高くなると正面 方向の指向性が鋭くなっていることが分か る.500Hz,700Hz の低い周波数では高周波と比較して音の 回折が起こりにくいため,指向性が現れていない が,5kHz,7kHz の高周波においては正面方向の音圧は ±15°の狭い範囲で音圧が高くなっている.これより DDDS におけるセグメント化パルス幅制御にツリー構造 NSDEM を応用したシステムでも指向性が実現出来てい ると言える.しかし 5kHz,7kHz 入力時の音圧プロット波形 を見るとサイドローブが目立っていることが分かる. MATLAB/Simulink における, 5kHz,7kHz 入力時の音圧プ ロットシミュレーション波形を図 33 として示す.



(左:5kHz 右:7kHz)

図 33 左より,0°方向の音圧は高く,サイドローブは立って いるがあまり目立っていないことが分かる.しかし±60°方 向では目立ったサイドローブが立っていることが分かる. 図 31 も 0°だけでなく 60°方向の音圧も上がっていること が分かり,シミュレーション結果と一致する.また図 33 右 を見ると 0°方向だけでなく±60~80°方向の音圧も高くな っており,これは図 32 の実測結果とも一致する.これらは グレーティングローブと考えられる.

グレーティングローブとはアレイ素子からビームを出 力した際,目的の方向外に強く音波が放射される現象であ る.グレーティングローブを抑制するためには,放射する 音波の周波数を f[Hz],音速を c[m/s],スピーカ間隔を D[m] とすると次の式を満たす必要がある.

$$\mathsf{D} \le \frac{c}{2f} \tag{1}$$

室温 25°での c は c=346.75[m/s]なので f=5kHz ならば(1) 式は D \leq 0.035[m],f=7kHz ならば D \leq 0.025[m] と な る.5kHz,7kHz 入力時にグレーティングローブを抑制す る為には,それぞれ D \leq 0.035, D \leq 0.025 の条件を満たす必 要があり,今回使用したラインアレイスピーカのスピーカ 中心間隔はD=0.055[m]であるため,5kHz以上の周波数で は条件を満たせず,グレーティングローブが生じてしまう ことになる.以上より,図 31,図 32 で左右方向の音圧が高 くなっているのはグレーティングローブが発生している からであると考えられる.

FPGA に書き込んだ際の,ツリー構造化したシステムと 従来手法との **FPGA**内LUTの使用数と使用率の比較を表 6 として示す.表 6 では本論文では実測を行わなかった 2 次 **SPNSDEM** と 2 次 **T-SPNSDEM** についても比較を行っ た.

表6 LUT 使用数及び使用率

		TNSDEM										
	SPINSDEIM	2para	2step	4para3step								
	Usage	Usage	Usage	Usage	Usage							
	Count	Count	Rate [%]	Count	Rate [%]							
2nd order	12283	10263	83.6	6316	51.4							
3rd order	15481	13048	84.3	8719	56.3							

表6より,2次T-SPNSDEM も3次T-SPNSDEM もLUT 使 用数がSPNSDEM よりも減少していることが分かる.また その使用率を見ると2段2並列型では約16~17%,3段4 並列型では約44~48%の減少となっている.これよりツリ 一構造NSDEM 化により回路規模を削減出来た.

まとめ

本研究では DDDS を用いた指向性スピーカシステムの セグメント化パルス幅制御システムの欠点の一つである システム回路規模削減を目標に、ツリー構造 NSDEM を設 計して組み込み応用する手法を提案し、実装・実測を行っ た.結果、2 段 2 並列型 T-SPNSDEM では従来手法比 18%の 削減、3 段 4 並列型 T-SPNSDEM では従来比 47%の回路規 模削減が出来た.またスペクトル FFT 実測結果では同様の スペクトル結果が得られた.指向性能の評価でも従来手法 と同等の指向性能が得られた.よって従来手法と同等の 指向性を実現しつつ回路規模を削減することが出来た.

謝辞:本研究を行うに当たり,多大なるご指導と助言をし て頂きました安田彰教授に深く感謝申し上げます.また 数々の助言,協力を頂きました安田研究室の学生の皆様に も厚く御礼申し上げます. 参考文献

- 安田彰,谷本洋,「Noise Shaping Dynamic Element Matching Method」,電子情報通信学会ソサイエティ 大会講演論文集 13pp,1996-09-18
- 中嶋文彬、安田彰,吉野理貴「並列化によりミスマ ッチシェーパの回路規模を削減したディジタル直 接駆動型スピーカシステム」,日本音響学会春期研 究発表会, 3-10-2, pp.761-762,2013-03-15
- 築比地健三他「デジタル直接駆動型スピーカシス テムにおけるハードウェア規模の削減に関する研 究」,電子情報通信学会総合大会講演論文 集,17pp,2011
- 4) 横田和幸他「デジタル直接駆動スピーカを用いた 振幅制御による高指向性」,電気学会研究会資 料,pp9-13,2013
- 5) Takemichi Ishikawa,Shuma Yokoyama,Noboru Harashima,Dai Takahashi,Jun Shiozawa,Michitaka Yoshino, Akira Yasuda, "A Highly Directional Speaker with Amplitude-Phase Control Using a Digitally Direct-Driven System" IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp135-136, 2014-01
- 6) 安田 彰, 岡村 喜博:ハイレゾオーディオ技術読本,オーム社,2014
- 安田 彰,和保 孝夫: ΔΣアナログ/デジタル変換
 器入門, 丸善, 2007