

Title	デジタル音響再生装置における jitter の影響の正体とその改善効果の実証に関する研究
Author(s)	三井, 実
Citation	
Issue Date	2008-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/14207
Rights	
Description	Supervisor: 党 建武, 情報科学研究科, 博士

博士論文

デジタル音響再生装置における jitter の影響の正体と その改善効果の実証に関する研究

指導教員 党 建武 教授

北陸先端科学技術大学院大学

情報科学研究科情報処理学専攻

三井 実

2008年8月25日

Copyright ©2008 by Minoru MITSUI

目次

第1章 序論	1
1.1 従来の音響再生	2
1.1.1 音響再生装置の開発と技術の推移	2
1.1.2 無歪伝送理論	5
1.2 深い感性の情報再現に関する研究	6
1.2.1 研究方法	6
1.2.2 深い感性を再現するための新・電気音響再生理論	8
1.3 本論文の目的	13
1.4 本論文の構成	13
第2章 デジタル音響再生装置とデジタル信号の jitter	16
2.1 はしがき	17
2.2 デジタル音響再生装置の構成	17
2.3 CD Transporter の内部構成と発生する jitter	19
2.4 CD Transporter と D/A Converter の接続 (Bit Stream : Digital Audio Interface 規格)	22
2.5 D/A Converter の内部構成と発生する jitter	24
2.6 他の関連研究	26
2.7 本研究の位置付け	27
第3章 デジタル信号の jitter と音質との関係	29
3.1 はしがき : 実験構想	30
3.2 RF 信号に含まれる jitter と音質との関係	31
3.2.1 RF 信号の jitter に関する音質主観評価実験条件	31
3.2.2 RF 信号の jitter に関する音質主観評価実験結果	35
3.2.3 RF 信号および D/A Converter のクロックの測定条件	35
3.2.4 RF 信号および D/A Converter のクロックの測定結果	36
3.2.5 RF 信号の jitter に関する実験のまとめと考察	37

3.3 Bit Stream の jitter と音質との関係.....	39
3.3.1 Bit Stream の jitter に関する音質主観評価実験の条件.....	39
3.3.2 Bit Stream の jitter に関する音質主観評価実験結果	42
3.3.3 Bit Stream の jitter の違いによる D/A Converter のクロックの測定条件.....	42
3.3.4 Bit Stream の jitter の違いによる D/A Converter のクロックの測定結果.....	43
3.3.5 Bit Stream の jitter に関する実験結果のまとめ	44
3.4 jitter に関する実験結果のまとめ	45
3.5 他の jitter の関連研究と本実験結果との関係.....	46
3.6 考察 : jitter による音質劣化発生の原因とその正体.....	48
第 4 章 デジタル音響再生装置の電源方式の改善とその評価	50
4.1 はしがき	51
4.2 理想電源とは : シリーズ・シャント並列電源の提案	51
4.3 改善電源の音質主観評価実験.....	53
4.3.1 音質主観評価実験の条件.....	53
4.3.2 音質主観評価実験の結果.....	55
4.4 改造電源使用時の D/A Converter のアナログ出力信号測定	56
4.5 改善電源の電源変動測定	60
4.5.1 電源変動測定の実験条件.....	60
4.5.2 電源変動測定の実験結果.....	61
4.6 まとめと考察	63
第 5 章 本論文の結論と今後の展望	65
5.1 本研究の結論	66
5.2 今後の展望.....	67
謝辞	69
参考文献	71

付録 A : 音響再生装置の改造点	76
付録 B : D/A Converter の電源変動に関する研究	80
付録 C : 電源回路の基礎理論	83
本研究に関する業績	87
その他の業績	89

本論文の要旨

本来、音響再生装置は、演奏者が演奏に盛り込もうとした熱い心が伝わるような物であるべきであると考え、そのためには、音楽演奏の“躍動感・間・のり”，会場や演奏の“空気感・雰囲気”，“演奏の細かいニュアンス”など、人間の“深い感性”に働きかける情報を忠実に再現することが必要と考えている。

現在の音響再生装置は、居間では一般的な 2ch ステレオに始まり、5.1ch サラウンドシステム、個人使用では携帯型オーディオ等に至り、音響再生装置の機能的側面においてはほぼ充実したと考えられる。また、種々の回路技術や信号処理技術の発展により、SACD などハイビット・ハイサンプリングで、無歪伝送理論（振幅周波数特性の平坦化、群遅延特性の一様化）をほぼ満足し、物理的側面において要求されるスペックを達成している音響再生装置が多くなってきた。しかしながら、これらの機器では音楽の名演奏における、演奏者が伝えたい内容・表現、会場の熱気・凄みなど、音楽を愛する人には最も重要な心理要因の再生に関して観察すると、その再生音はまだ不十分に感じる機器が多い。それは、完全な無歪伝送は実現出来ず、残った歪が音楽性を如何にして壊すかの研究がなされていないためと考える。すなわち、信号の二乗平均誤差的な物理量にのみ注目し、本来の主目的である演奏者が演奏に盛り込もうとした熱い心が伝送できているかという原点がおろそかになっているからではないかと考えた。現有の音響再生装置の研究開発には、その主目的に直接関係するが、見落とされている未知の重要な要因・特性、或いは重要にも関わらず軽く考えられている歪があるはずである。それらを明らかにして、本来、音楽演奏が含む“深い感性”の情報を再現したい。

見落とされている特性・要因について、音楽の再現では最も重要な、人間の“深い感性”に注目して、未知の物理要因を発見しようとした。これまでの先行研究で、“深い感性”に働きかける情報の再現のためには、音楽演奏における漂うような雰囲気：“空気感”などの再現が重要であることが解っており、“空気感”はこれが再現されると、他の要因も殆ど満足に再現される高度の感覚である。

これらのことから、本論文は、主として、“空気感”再現に深く関係する、デジタル音響再生装置の音質劣化の原因解明と対策が急務として、発見された原因の実証実験、究明、示された改善の方法の実証実験、究明を行ったものである。

現存するデジタル音響再生装置において、デジタル符号は全く誤っていない

のにも関わらず、「デジタル信号に含まれる、パルス・クロックの時間揺れである jitter の量が大きいとき、音質劣化が起きている」ことが問題視され、数々の報告がされてきた。そこで本研究では、デジタル信号に含まれる jitter と音質との関係を糸口として研究を始め、“深い感性”に関連する音質との詳細な関係を明らかにする。その詳細は以下のとおりである。

本研究の実験結果から、D/A Converter よりも前段の回路系である、CD Transporter の RF 信号、デジタル信号の伝達経路である Bit Stream で起きた jitter は、再生音質と深く関係することがわかった。しかしながら、D/A Converter を動作させるクロックを測定したところ、そこに jitter は観測されなかった(300ps 以内)。このクロックは信号をデジタルからアナログに変換するために重要な D/A Converter を動作させるクロックであり、通常、PLL (Phase Locked Loop) により安定化され、リクロックされている。しかしながら、問題点は、実験結果から D/A Converter よりも前段で発生した jitter の影響が、このクロックで観測されないにもかかわらず、再生された音質が劣化していることである。このことに着目して、デジタル信号の jitter は、D/A Converter の信号経路とは別の回路上の経路を介して伝播している歪のインデックスであり、直接の音質劣化要因ではないと考えるに至った。すなわち、本当の伝播経路は他にあり、それは電源回路ではないかという仮説を立てた。本論文の最も重要な部分は、深い感性における心理量と音響再生装置の物理量との関連を明らかにした心理物理学的実験により、その仮説を実証したことである。

jitter に関する実験結果より、D/A Converter 電源に混入する、何らかのノイズにより、D/A Converter デジタル部の波形整形回路 のパルス波形のスライスレベルが変動することにより生じていると推測した。これらを測定し定量的に実証するためには、D/A Converter IC 内部の計測が必要であるが、パッケージ化された IC 内部は物理的に計測が不可能である。

そこで、観点を換え、音質劣化に関係する jitter の影響は電源経路を介して伝播している(歪により生じる)と仮説を立てた。本研究では、その仮説の実証実験を行った。D/A Converter の電源に対する対策・改善、すなわち、間接的な実証を試みた。それは、D/A Converter の電源部分を理想的性能になるよう改造すると、音質が大幅に改善されることで示された。この改善電源は、宮原の発明によるもので、

通常の電源供給性能に、余剰の電流を吸収する能力を加えたものである。改善電源を用いたデジタル音響再生装置を用いると、音質主観評価値は7段階評価のうちで約+2ポイント改善された。特に“空気感”などがよく再現され、深い内容・表現、会場の熱気・凄みなどが再現されたとの評価を得た。また、改善した電源は、電源供給能力および、変動吸収能力を測定したところ、従来の電源に比して、それぞれ、3倍、100倍の改善が観測できた。

これらの実験により本論文の結論として、まず、デジタル信号の jitter は、音質劣化のインデックスであることが示唆された。また、デジタル音響再生装置の音質劣化は、jitter ; クロックの時間揺れ (FM) によるのではなく、D/A 変換経路のどこかで、電源ラインの変動 (AM) に変化して引き起こされている可能性がある」と結論付けた。

本研究により提案された改善電源は、現有のデジタル音響再生装置だけでなく、様々な音響再生装置や、画像再生装置にも応用が出来、人間の“深い感性”に訴えかけるような、高忠実再生を目指した音響・画像再生装置の開発に寄与できると考える。

第 1 章

序論

1.1 従来の音響再生

1.1.1 音響再生装置の開発と技術の推移

音響再生装置の技術は、1877年、トーマス・エジソン (T.Edison : アメリカ) が蝋管型蓄音機を発明して以来、科学技術の発展と共に開発が進められてきた[1]。音の再生における目的は、原音忠実再生である。そのため、これを理論的側面から捉え、音響再生装置における原音忠実再生は、従来の音響理論によるシステムの無歪伝送条件（振幅周波数特性、及び群遅延特性の平坦化）を満足すること、また、音響再生装置に要求される電気信号上の諸特性（歪率など）を満足することで実現できるとされてきた。

1948年にはCBA研究所のピーター・C・ゴールドマーク (P.Goldmark : アメリカ) らにより、LPレコードが発明され、それまでの媒体に比べて長時間録音・再生が可能になった[1]。この発明により、人々は時間と場所を超えて、音楽鑑賞を楽しむことが出来るようになった。また、レコード盤に録音するための専用機器が必要という制約から開放された画期的な録音・再生方式として、テープレコーダが発明された。この発明により、音を録音・記録することが一般家庭にも普及した。これらの再生装置は、技術発展により、さらに録音・再生時間の長時間化、再生チャンネルのステレオ化へと進み、様々な特性や機能が充実した。これらの記録再生装置を一般的にアナログ音響再生装置と呼ぶ。

しかしながら、LPレコードやカセットテープなどのアナログ媒体を再生する音響再生装置においては、低周波数帯域および高周波数帯域の周波数特性利得が減衰してしまう性質を持ち、人間の可聴周波数帯域内の無歪伝送理論を十分に満足できなかった。この対策として、高級なカードリッジや電気素子など、多くのオーディオ愛好家が、種々のノウハウをつぎ込むことで、再生音質の改善を図ってきた。また、時間方向の変化として、定速で記録されることに関して、駆動回転体により生じる、低周期のワウ・フラッターなどの時間方向の歪も生じることが問題となっていた[1]。この対策として、当時の技術者は、回転体や筐体の重量を重くすることや、駆動部分を安定化させることなど、種々の方策で問題の改善を図ってきた。

1971年には、NHK技術研究所が日本コロムビアに指導して、デジタル・テー

プレコーダ PCM-1 を発明し、世界で初めてデジタル技術が音響再生装置に導入された[2-3]。これは記録される信号をコード化するため、人間の可聴周波数帯域における無歪伝送条件の電気的特性が大幅に改善され、理論上、原音忠実再生の実現に近付くことが期待された。また、アナログ音響再生装置で問題となっていたワウ・フラッターの問題も解決された。しかしながら、初めて導入された標本化が、新たな問題点（デジタル信号に含まれる時間方向の歪：jitter）を生じさせることになった。

そして、1980年には、現在最も普及している、コンパクトディスク音響再生装置（CD Player）が発明された[2-5]。この開発は、人間の知覚・聴覚に関する多くの実験・研究結果や、当時、クラシック音楽界において、最長演奏時間であった、ベートーベン交響曲第9番の音楽信号をディスク1枚に入れる必要性から、サンプリング周波数：44.1kHz、量子化レベル：16bit と、フォーマットが決定された。記録メディアとして用いられているコンパクトディスク（以降 CD と記す）は、直径が12cm と、LP レコードの約半分にも関わらず、記録媒体1枚あたりにおける記録可能時間は2倍以上、無歪伝送条件の電気的特性としては、ダイナミックレンジ（96dB 以上）、歪率が10倍以上などの性能面・機能面の改善を果たした。その結果、LP レコードやカセットテープなどのアナログ音響再生装置は、低周波数帯域の特性が減衰してしまうのに比して、デジタル記録方式は人間の可聴周波数帯域に関しては特性が保証されているため、クリアな再生音で明瞭度[6]が改善した。また、何度複製しても、デジタル符号が誤らない限りは同一の音が再生できるとされていた。このことから、それまでのアナログ音響再生装置が抱えていた、ノウハウレベルの音質改善策からも開放されたかのように考えられた。この CD のフォーマットを皮切りに、CD-R、固体メモリ、ハードディスクなどの媒体にも記録できるようになり、アナログカセットテープに比べて、一般家庭でも、高品質なデジタル記録方式による録音・再生ができる装置が開発されてきた。これらの技術が発展し、現在では、携帯型オーディオ（iPod、メモリー型ウォークマンなど）が爆発的に普及し、“携帯できる”、“便利”という機能面が劇的に改善されている。

これら多くの利点から、CD をはじめとするデジタル音響再生装置の開発は成功したと考えられていた。しかしながら、発売当初から、“空気感・雰囲気無く

なる”，“冷たい音”，“メッキリ・ハッキリの音”，“デジタル臭い音”がするなど，一部の人々から批判的な評価がなされた．この原因は，デジタル方式特有のデジタル信号に含まれるクロック・パルスの時間ゆれである jitter ではないかと推測され，それに関する研究・開発がなされてきた[7-20]．

その後，原音を忠実に再生するためには，CD のフォーマットを超えて，より細かいサンプリング周波数，量子化が必要とのことから，次世代ディスクのオーディオフォーマットである，SACD (Super Audio Compact Disk)，DVD-audio (Digital Versatile Disc for Audio) が発明された[21]．とりわけ，SACD は，サンプリング周波数：2.8224MHz の 1bit $\Delta\Sigma$ 型 D/A Converter を搭載し，再生可能な最高周波数は 100kHz 以上に達し，ダイナミックレンジ 120dB は達成したと言われている．CD のフォーマットとは D/A 変換の方式が異なるため，サンプリング周波数と，量子化レベルでは単純には比べられないが，SACD は人間の聴覚上は認識できない可聴周波数帯域以上まで特性を伸ばし，S/N やダイナミックレンジを大きくすることなど，従来，達成されていた無歪伝送理論の更なる改善を目標として開発された．また，メディア盤上に記録するデータの書き込み・読み取り方式をより精密にすることにより，CD に比べて収録可能データ容量が約 7 倍 (CD : 780MB, SACD : 4.7GB) 大容量化され，機能面も改善されている．当然，前述の jitter に関する対策は充分なされている機器が多いようである．しかしながら，これらのシステムの再生音を聴いて観察してみると，音楽の表情を決定的に壊す“デジタル臭い音”や“空気感・雰囲気が無くなる”といったデジタル音響再生装置の音質の欠点は，必ずしも改善していないようである．

その後，上記の SACD 再生装置などに，5つのスピーカ（前左，前右，中央，後左，後右）と，1つのウーファを組み合わせた 5.1ch サラウンドシステム，さらには，スピーカとウーファの数を増やした 7.2ch サラウンドシステムが開発された．これらの音場再生方式にチャンネル数や機能を合わせた DSD 方式 (Direct Stream Digital) により録音された SACD 盤なども発売されるようになった．このシステムにより，臨場感や迫力の必要な映画鑑賞などを対象とした機能面は充実したものの，実際に再生音を聴いてみると，音楽再生において，この方式は空間的な広がりや，大迫力を求めた別目的のもので，本論文が目的とする音楽の深い再現が出来な

いという欠点が改善されていないどころか、更に悪くなっているようにも感じられる。5.1ch などをはじめとした、現存のサラウンドシステムは、各スピーカから出力された音の量のみを空間上で総和できることを前提に開発されているが、実際にはそれは簡単には実現できず、漂うような“空気感・雰囲気”など、音楽演奏に含まれる人間の“深い感性”に働きかける情報を再現できていないと考える。

1.1.2 無歪伝送理論

工学分野で一般的な線形システムの信号伝送理論に基づき、線形時不変システムを仮定すると、信号を無歪に伝送させるために必要な条件は、全周波数帯域に対して、伝達関数の絶対値、遅れ時間が一定であることである[22]。上記の線形システムの信号伝送理論に基づけば、音響再生装置における無歪伝送条件は、振幅周波数特性が平坦であること、且つ、群遅延特性が一様（位相周波数特性が線形）であることである。この無歪伝送条件が満足できれば、電気信号となった音響信号は歪無く伝達されるとして音響再生装置の設計・開発が行われてきた。具体的には周波数特性は人間の可聴周波数帯域（約 20Hz～20kHz）において、振幅周波数・群遅延特性共に平坦であることが目標とされ、S/N 比は約 100dB 以上などの条件が揃えば、伝送系で生じる歪は人間の検知限以下となるため、忠実な音楽再生が出来るとされてきた。つまり、現有の音響再生装置は、現在の技術で計測でき得る既知の物理的特性・要因において、可能な限り無歪伝送条件に近似されるように開発されてきた。その結果、綺麗な音の再現（音楽の三大要素であるメロディ・リズム・ハーモニーで表現される音楽情報の再現）においては、ほぼ満足できる音響再生装置が完成したといえる。

しかしながら、“演奏の躍動感・間・のり”，演奏・会場などの“雰囲気・空気感”，“演奏の細かいニュアンス”などの人間の心に訴えかける深い感性情報の再現について、現状の音響再生装置では、多くの不満が残る。これらの問題解決のためには、既知の物理要因・特性の改善だけでは、無歪伝送理論が完璧には満足されておらず、必要な未知の物理要因の発見が必要であると考えられる。歴史的な名演奏や、貴重な音源の再生、すなわち、人間の“深い感性”に働きかける情報の再現のためには、解決すべき問題点である。

1.2 深い感性の情報再現に関する研究

1.2.1 研究方法

工学分野において、演繹的研究方法では、図 1.2 に示すように、まず、既知の物理要因・特性 (P_i) の性能を向上させることにより、それに関連する音質評価語 (心理要因: A_n) の評価が向上し、その評価を重み (W_{kj}) とした線形和的關係から総合音質 (Q) が決定される[23]. この研究方法を音響再生装置の開発研究において考えると、既知の物理特性である、周波数特性, S/N 比, 歪率特性などの既知の物理要因・特性の荷重和として音質評価語があり、これらの荷重和として総合音質が決定される研究方法である. すなわち、物理特性の満足が“主”であり、感性の伝達は“従”であることを示している. これは、既知の物理特性の改善を行い、無歪伝送理論を満足することから、従来の音響装置の研究開発方法だといえる. しかしながら、開発の目安とする項目は、既知の物理特性のみのため、装置開発に重要な未知の物理要因が存在すると、その物理要因の発見が出来ない.

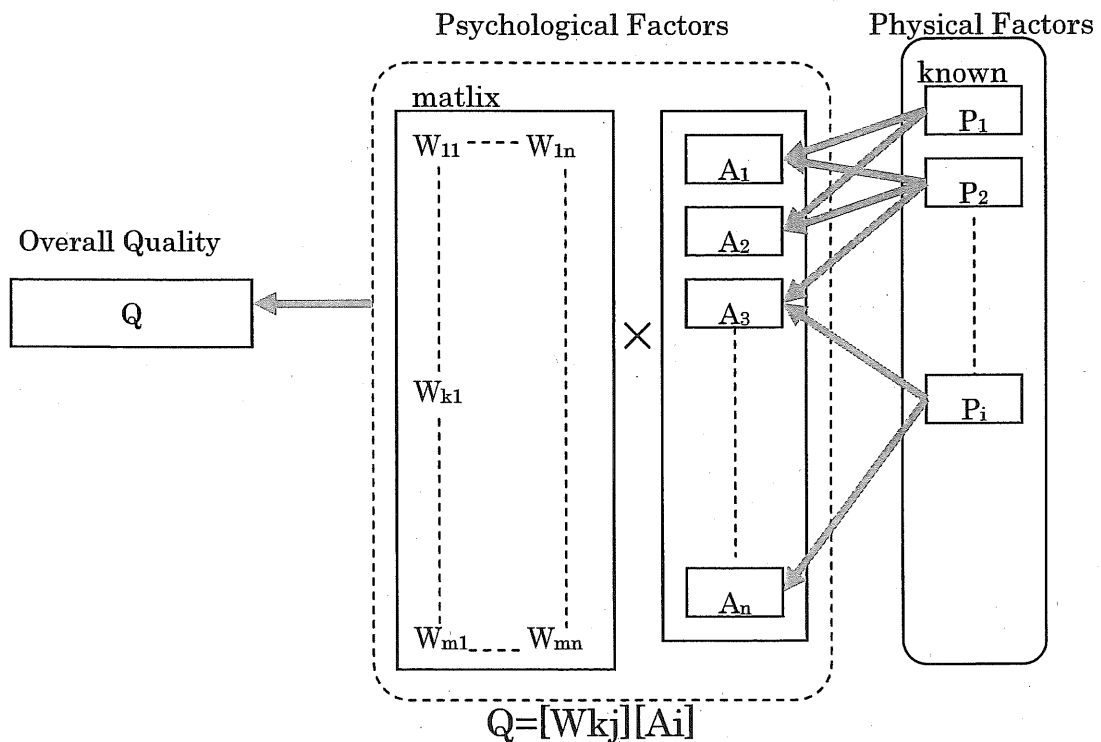


図 1.2 : 演繹的研究方法

一方で、帰納的研究方法は、図 1.3 に示すように、同種と考えられる事象を観察して、個々の特殊な存在や事実から、共通の一般的な結論を導き出す方法である[23]. これを音響再生装置の研究開発において考えると、この方法は、再生音を観察し、その再生音から受ける印象を音質評価語により分析し、音質評価語を足がかりに、物理要因との関連付けを行うことに相当する。

演繹的研究方法では、信号伝達が“主”であり、それによって感性が伝達されるかどうかは“従”であった。これに対し帰納的研究方法は、感性が伝わることを“主”にして、無歪伝送理論は当然満足し、そのために必要な信号伝達手段を考慮するものである。このためこの研究方法は、音響再生装置の開発において、無歪伝送特性の満足に対して見落とされてきた未知の物理要因の発見が可能である。

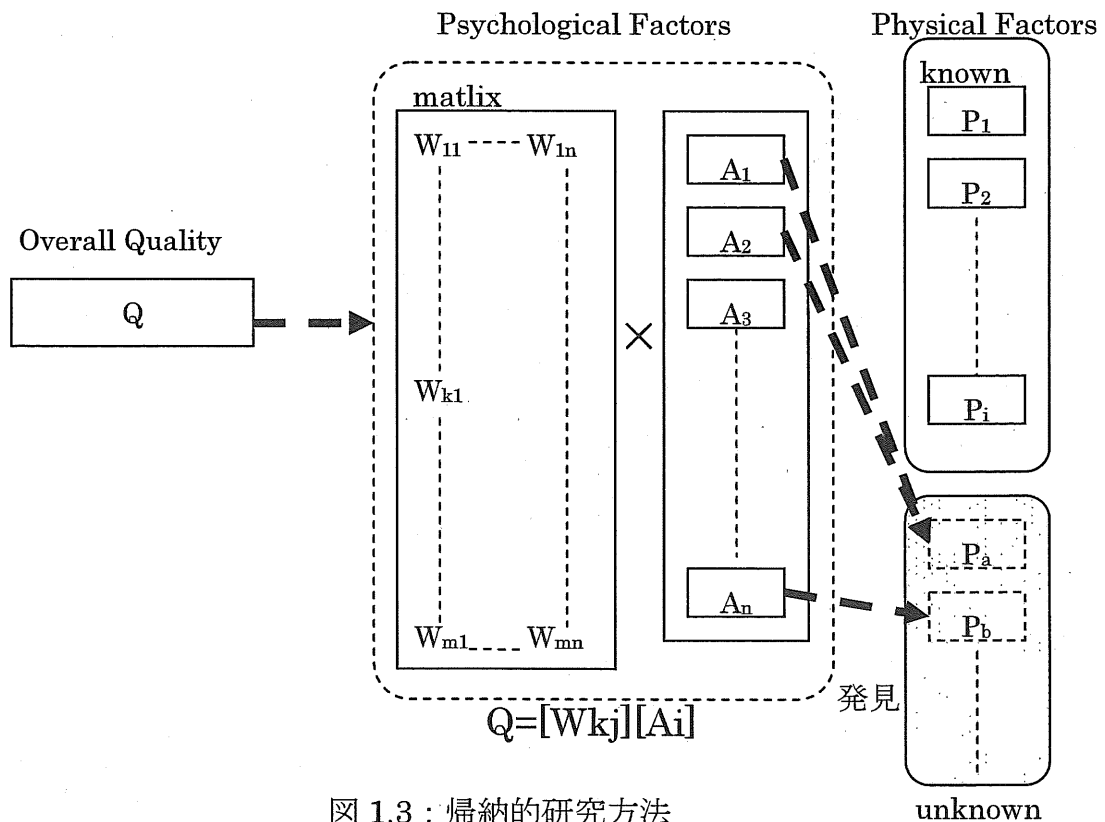


図 1.3 : 帰納的研究方法

1.2.2 深い感性情報伝達の研究

宮原らは、“深い感性”伝達のための心理物理学的研究を系統的・理論的に行った（日本学術振興会：未来開拓事業プロジェクト研究）。この研究の立場，研究方法などについて以下に詳細に述べる[24-26]。

21世紀には，人々に感動を与えるような新たなコンテンツと，それに伴う雇用の抄出が重要となる。その一つとして，人間の深い感性にまでも言及している先端科学工学分野と芸術分野の融合した新分野の創造が重要となる。これは，人間の感動及び情動を喚起させる，演奏に含まれる高度な芸術的印象の忠実な伝達を可能にする電気音響文化の創生，すなわち，“深い感性”情報を音響再生装置で再現を目的とした研究である。この重要な“深い感性”に働きかける情報を高度感性情報と定義し，これを再現するための新しい研究方法を，従来の音響再生装置開発とは逆の方法である帰納的方法も充分考慮して行ってきた。その研究方法について，以下に詳細に説明する。

“深い感性”の再現を目指す研究方法は，信号伝達は当然実現しながら，感性伝達にも注目して行う。すなわち，帰納的方法にも重きをおく。従来の研究方法（演繹的研究方法）では，信号伝達が“主”であり，それによって感性が伝達されるかどうかは“従”であった。これに対し帰納的研究方法は，従来とは逆に，感性が伝わることを“主”にして，そのために必要な信号伝達手段を考慮するものである。すなわち，信号伝達を満足しながらも，高度感性情報が伝達されない音響再生装置は伝達できるようになるまで徹底的に改善する。具体的には，“主”とする高度感性情報再現を目的として，まず，関連する重要な物理要因を発見する（帰納的方法を取る）。次に，発見された物理要因・特性を含めたすべての物理要因を満足するように，音響再生装置を開発し，その結果を心理評価する（新しい物理要因を加えた演繹的方法）。この研究方法の概念図を図 1.4 に示す。ここでは，心理要因をあらゆる評価語群[27]の中から，高度感性情報と相関が強く，評価しやすいキー評価語[28]を足がかりとして，物理要因を発見していく（図中破線矢印）。このキー評価語には，身体が音に包み込まれ漂う雰囲気を感じる，肌に音が当たるような感覚を表す“空気感”や，ただ単に周波数が低いだけで無く，“ズシン”とした重さを伴った音の響きを表す“音の重心の低さ”，音の芯の強さなどを表す“音の締めり”，平

面的な音場だけでなく、奥行きまでも含んだ形で音場が再現されている感覚である，“Holographic 音場感”などが含まれる。その後、一度、物理要因が発見されると、演繹的研究方法に戻って、発見されてきた物理要因・特性と音質の関係を、実験・評価（図中実線矢印）を繰り返すことにより、実証していく。すなわち、これは、装置側の諸特性だけでなく、人間側；人間に働きかける“深い感性”にも注目して装置の開発を行う方法である。この方法により行った数多くの実験的・経験的事実や、研究成果から、宮原は、新・電気音響再生理論を提唱した[29]。

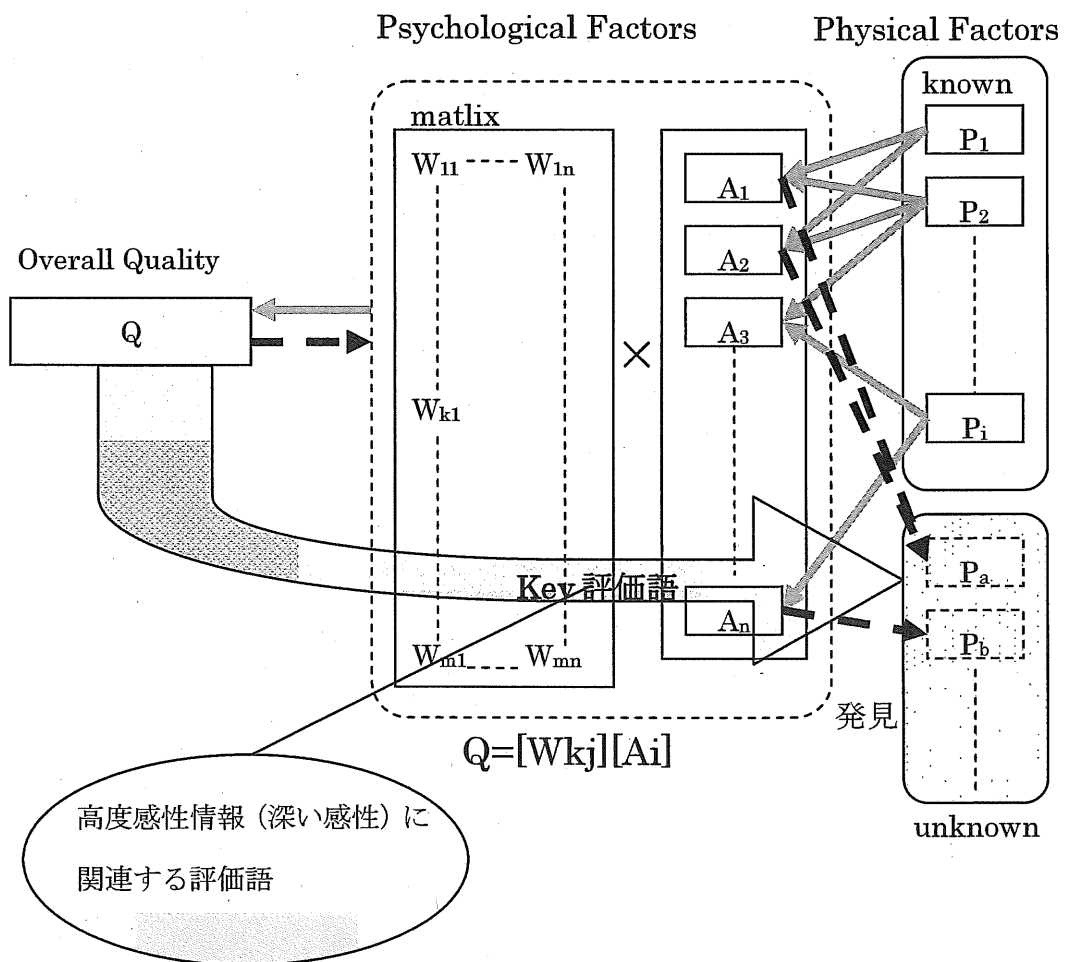


図 1.4 : 高度感性情報再現に必要な研究方法

この新電気音響再生理論について、それらの研究結果や実験的・経験的事実をまとめたものを図 1.5 に示す。これらの発見された物理要因を考察して、宮原は次の 3 つの仮説を立てた[29]。

仮説 1：音の波面の忠実な再生

人間は、ある時刻の音とそれよりも過去に発せられた音との時間的係わり合いを知覚している。すなわち、信号の振幅方向と時間方向の結合でもたらされる音情報を知覚している。時間方向の歪に対する人間の知覚の鋭さは、振幅方向の歪知覚の鋭さに匹敵する。ホログラフィックな音場、音像を精度高く知覚認識でき、この再現が空気感再現に不可欠である。

仮説 2：エネルギーの放出

“深刻さ”，“凄み”，“胸にしみ込む”などの高度な感性に訴える音の再生のためには、デジタルでもアナログでも同様であるが、仮説 1 の時間精度を達成し、且つ、その音像にパワーを集中させ、その音像から音響パワーをよどみなく吐き出させる音の再現が必要である。この実現には、スピーカ振動体の動きを自由空間（スピーカ前の空気）へ動的に整合して、粗密波を平面波として放出する条件（無反射伝達）が必要である。これには、音響再生装置やそこに用いられている素子の時間方向の揺れを超高精度に抑え込むことや、電源、回路、信号経路の再検討、が必要である。

仮説 3：音楽演奏、音のニュアンスの再現

仮説 1、仮説 2 を実現した上で、電気素子・ケーブルなど、用いられる素材の材質、電気素子・ケーブルの支持の仕方や、筐体や回路基板に起こる定在波・振動までも考慮すると、ニュアンスの再現が可能になる。

これらのことより、本研究は、人間の“深い感性”に働きかける情報を忠実に再現するための研究、新・電気音響再生理論を踏まえて行った。これまでの先行研究において、人間の“深い感性”に働きかける情報の忠実な再現のためには、音楽演

奏における漂うような雰囲気や、体が音に包み込まれるような状態を表す：“空気感”などの再現が重要であることが解っている[27-28]。特に，“空気感”は、これが再現されると、他の要因も殆ど満足に再現される高度の感覚である。このことから、本研究では、音楽演奏の再生における“空気感”の再現を目指す。

1.3 本論文の目的

本研究の究極の目的は演奏者が演奏に盛り込もうとした熱い心が伝わるようにすることである。そのためには、音楽演奏の“躍動感・間・のり”，会場や演奏の“空気感・雰囲気”，“演奏の細かいニュアンス”などの人間の“深い感性”に働きかける情報を忠実に再現することが必要条件である。

しかしながら従来の音響理論では，“深い感性”に働きかける情報の伝達に関連した物理要因に関して言及されておらず，このため，“深い感性”に働きかける情報に注目した新理論と，新たな電気的特性及び物理要因の発見が必要となる。この問題を解決するために，観察：主観・音質評価から，客観：再生装置の物理要因を観察する方法として，帰納的研究方法により，“深い感性”に働きかける情報の再現に関連する未知の物理要因の発見を行う。また，発見された電気的特性・物理要因を満足するように，従来の演繹的研究方法で，新しい音響再生装置の開発・評価を行う。そこで，人間の“深い感性”に関連する評価語・感覚の中から，重要な音質評価語である“空気感”に着目した。

本研究の具体的目的は，第一に，“深い感性”に働きかける情報伝達に深く関係する音質評価語，“空気感”などを劣化させてしまう，デジタル信号に含まれる jitter と音質との関係を確認し，その仕組みを明らかにする。そして，実験結果より，その音質を劣化させている原因は jitter が直接的に影響しているのではなく，電源ラインなどの別の経路を介して影響している可能性が明らかになった。この結果から，第二に，どのような電源負荷変動にも対応できるような電源方式を提案し，その電源を用いたときの音質評価を行い，更に，その物理要因を測定により明らかにする。

1.4 本論文の構成

本論文は5章より構成される。まず，1.1節では，音響再生装置の開発の歴史を，発明された方式の問題に関して，機能的側面，音質的側面から述べた。また，その開発における基礎理論となった，無歪伝送理論について説明した。1.2節では，深い感性情報に関する研究について述べた。ここでは，まず，演繹的研究方法，帰納的研究方法について説明し，宮原がこれまで行って来た“深い感性”に働きかける

情報再現に関する研究について述べた。さらに，“深い感性”に働きかける情報再現のために必要な，新・電気音響再生理論を説明した。1.3 節では本論文の目的，1.4 節では本論文の構成について述べる。

第 2 章では，本研究が注目する，デジタル音響再生装置の基礎を説明し，それらに起こるデジタル信号上の jitter についても述べる。具体的には，2.1 節では，本章で述べる内容の位置付けをする。2.2 節では，一般的なデジタル音響再生装置の構成を述べ，CD Transporter, D/A Converter, これらを接続するために必要な Bit Stream の説明を行う。2.3 節では，CD Transporter の内部構成を述べ，ここで発生する jitter に関して説明をする。次に，2.4 節において，Bit Stream の詳細を述べ，ここで発生する jitter に関して説明する。2.5 節においては D/A Converter の内部構成と，ここで発生する jitter について言及する。2.6 節では，他の関連研究を紹介する。最後に，2.7 節では，1 章で述べた“深い感性”に働きかける情報再現のための研究方法，2 章で述べた既存のデジタル音響再生装置の技術的側面，他の関連研究などから本論文の位置づけを行う。

第 3 章では，“深い感性”に働きかける情報の伝達に重要な“空気感”を劣化させる，デジタル音響再生装置が含む jitter に関する実験について述べる。ここでは，デジタル音響再生装置の回路上の jitter を測定し，同時に主観評価実験を行うことで，jitter と音質との関係を明らかにする。3.1 節では，実験構想について説明を行う。3.2 節では，RF 信号の jitter と音質との関係を，音質主観評価，RF 信号の測定，D/A Converter のクロックの測定により明らかにする。3.3 節では，Bit Stream の jitter と音質との関係を，音質主観評価，Bit Stream への jitter 付加，D/A Converter のクロックの測定により明らかにする。3.4 節では，3.2 節，3.3 節で述べた実験結果をまとめる。次に，3.5 節では，他の jitter に関する研究の内容について再度説明し，本研究で得られた実験結果との関係を述べる。さらに，3.6 節では，jitter に関する実験結果の考察を行い，音質劣化の仕組みを考察する。このことから，jitter による音質劣化への影響は，直接的ではなく，電源回路などを介して，伝播している仮説を示す。

このことから，第 4 章において，この問題を解決するべく，どのような変動が発生しても安定的に電源供給できるような理想的な電源方式を設計・開発し，ディジ

タル音響再生装置に適用し、音質評価実験、提案電源の物理特性の測定を行う。具体的には、4.2 節において、理想電源の条件を述べ、これに対応する改善電源方式について説明する。4.3 節において、この改善電源を用いたときの音質主観評価実験に関して、条件、結果を述べる。4.4 節では、4.3 節で得た主観評価結果を踏まえて、改善電源を用いたときの D/A Converter のアナログ出力信号の測定を行う。更に 4.5 節では、改善電源のより明確な物理特性を明らかにするため、電源に瞬発的な変動を与えたときの特性を解析する。この測定に関して、条件、結果を述べる。4.6 節において、改善電源に関する実験結果のまとめ、および、考察を行う。

第 5 章では、本論文により得られた結論、今後の展望について述べる。

第 2 章

デジタル音響再生装置と

デジタル信号の jitter

2.1 はしがき

これまで、デジタル音響再生装置における音質劣化を引き起こす大問題としてデジタル信号に含まれる jitter が一般的に注目されてきた。そこで本章では、まず、その基礎理論・技術として、デジタル音響再生装置の構成の概略と、それらの部分で発生する種々の jitter について説明する。次に、jitter について行われてきた他の関連研究を説明する。最後に、本研究の位置付けを、基礎技術、他の関連研究と比較して行う。

2.2 デジタル音響再生装置の構成

一般的なデジタル音響再生装置を用いた構成を図 2.1 に示す。デジタル音響再生装置において、音楽のデータは様々なメディアにデジタルデータとして記録されている。主なメディアとしては、CD、固体メモリ、ハードディスク、DAT (Digital Audio Tape) などがある。一般的なデジタル音響再生装置における信号の流れを以下に説明する。まず、記録メディアからデジタルデータを抽出してデジタル信号 (パルス) を作り出し、D/A Converter (Digital / Analogue Converter) を介してアナログ信号を出力するのが各種メディアに対応した Player の役割である。次に、この Player においてデジタルデータからアナログ信号に変換された音楽信号は、Amplifier により、Speaker を駆動できるだけの大きい振幅に増幅される。そして、増幅された信号は Speaker に伝送され、電気-機械変換により、空気の疎密波：音波となり、空気中を伝播し人間が音として認識する。

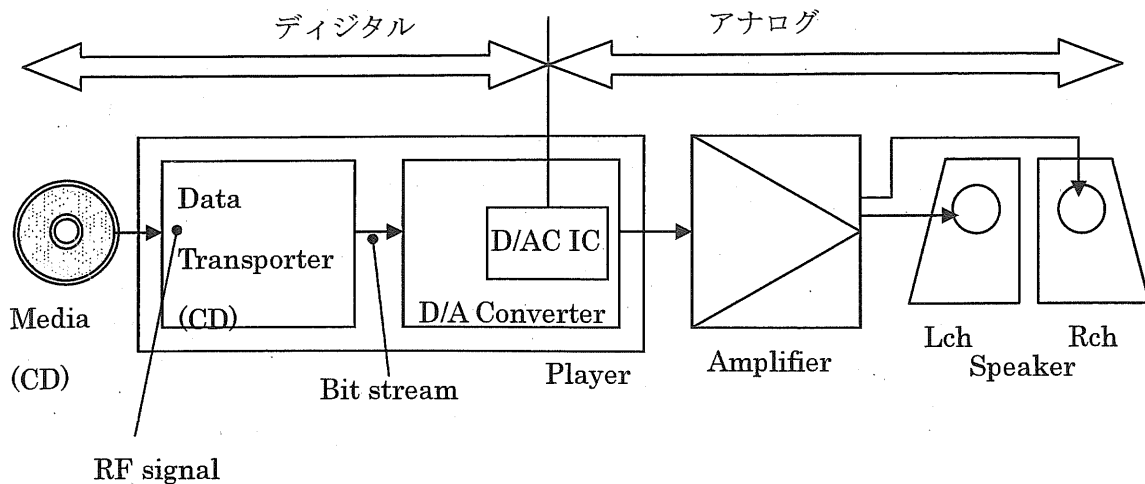


図 2.1 : 一般的なデジタル音響再生装置の構成

現在, 最も普及しているデジタル音響再生装置の構成は CD Player を用いるものである. 本研究が対象とするデジタル信号の jitter は, CD Player 内にあるデジタル回路系の様々な部分で起きている問題であり, このデジタル信号のパルス・クロックに発生する微小な時間揺れである. これら種々の jitter への対策として, 機能的に重要なデジタル回路系の前段には必ず各種同期回路が設置され, パルスに時間揺れが発生しても, 後段の系には影響が伝播しないようなシステム設計がなされてきた. しかしながら, このような対策がなされたデジタル音響再生装置において, 実際に jitter の量が多いと, 音質を劣化してしまうことは, 音響再生装置開発現場の技術者の間で経験的に知られていた. これらのことから, 本研究では, 現存のデジタル音響再生装置の代表として, CD Player に注目し, この内部で発生する jitter に注目する.

CD Player の内部構造[2-5]は, 大別すると二つの部分に別けられる. 一つは CD からデータを抽出しデジタル信号を生成する CD Transporter 部であり, もう一方は, デジタル信号をアナログ信号に変換する D/A Converter 部である. 次節以降, CD Transporter 部, D/A Converter 部の内部構成及び, それらの接続に用いられる Digital Audio Interface 規格についての詳細, 併せて, それらで発生する jitter について説明する.

2.3 CD Transporter の内部構成と発生する jitter

CD Transporter 部では、回転する CD にレーザを照射し、その反射光を読み取り、デジタル信号が整形される。CD Transporter 部の内部構成図を図 2.2 に示し、詳細を以下に述べる[2-5]。

CD の盤上には、ピット (図 2.2 中のピット部分) と呼ばれる様々な長さの穴が刻まれている。このピットに対してレーザが照射され、その反射光をピックアップにより検出し、ピットの長短にそれぞれ合わせた長さ (3T~11T) のパルスが整形される。この信号をヘッドアンプにより増幅したものが RF (Radio Frequency) 信号と呼ばれる信号である。RF 信号は、音楽信号である Digital Audio Data, LR Clock, Digital Audio Data の時間情報である Bit Clock にそれぞれ変換され、同時にデコーダにより誤り訂正され、D/A Converter 部に伝送される。すなわち、デジタル信号のクロック・パルスは、RF 信号が元となり作られているため、この RF 信号にパルスの揺れが乗ると、これより後段の全てのデジタル信号に悪影響を及ぼすこととなる。また、RF 信号は、ピットからの反射光を読み出したものであるため、ピックアップの信号読み出し精度が大変重要となる。回転する CD に偏芯が起こったり、CD 表面に傷が付いたり、ピットの形が不明瞭となりレーザの反射光がぼやけたりすると、それに伴い、スピンドル部、フォーカス部、トラッキング部がピット追従のために激しく動く。これが原因となり RF 信号に時間揺れ (ns オーダ) が起こる。これが RF 信号上に乗ってくるパルスの時間揺れ : jitter である。

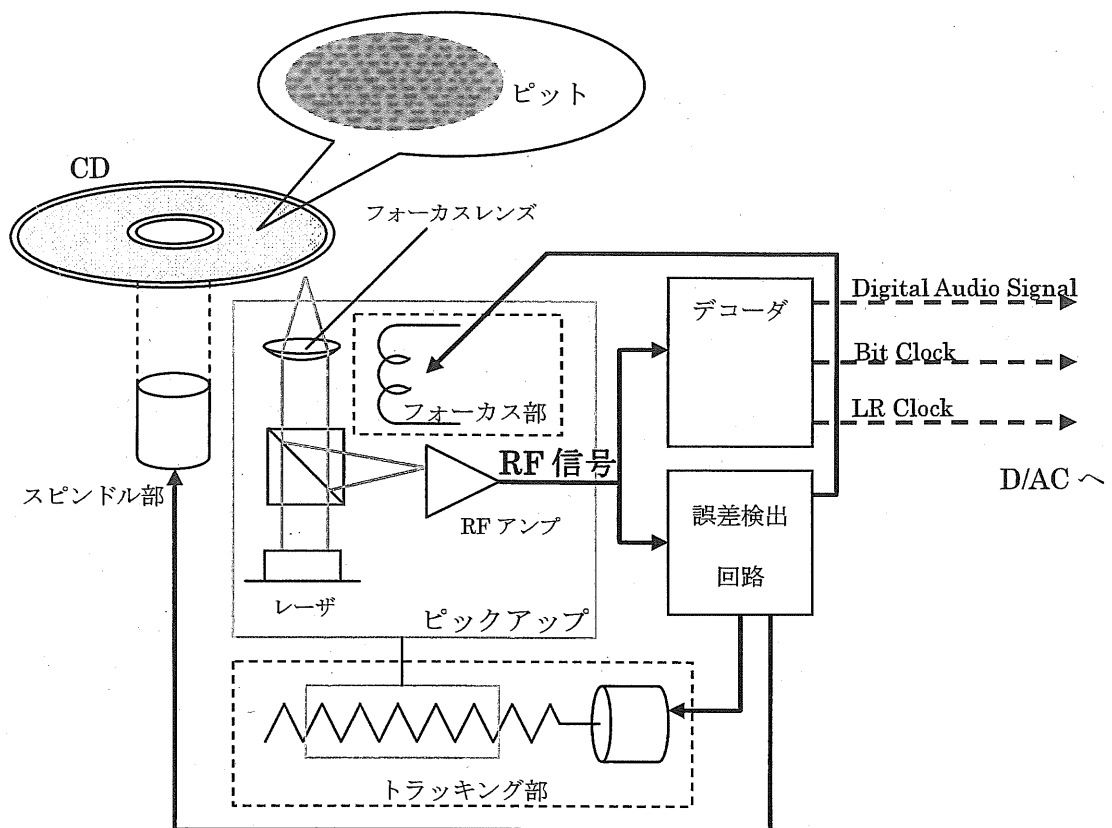


図 2.2 : CD Transporter の内部構成

この RF 信号をオシロスコープで観察すると、様々な波長のパルスが重なり「目」ように見えることから、この観測波形はアイパターンと呼ばれる。jitter 量が少ない (図 2.3) と観測波形のアイパターンがくっきりと見え、jitter の量が多い (図 2.4) と周期波形の繰り返しであるアイパターンの輪郭がぼやけることがわかる。デジタル音響再生装置の開発技術者の間では、このアイパターンが RF 信号の jitter の目安になってきた。経験的に RF 信号における jitter は 30ns という人間から判断すると微小な jitter でさえも、音楽にならないほど音質を劣化させることが知られてきた。RF 信号から、D/A Converter を動作させるクロック・パルスが作り出されるため、ここで起きた jitter は、そのまま D/A Converter に影響を及ぼす。

そのため、RF 信号の jitter を抑えるには、たとえば、CD の偏芯を抑えること、

スピンドルモータおよび回転軸が安定に動作すること、CD 盤面に傷をつけないなど、トラッキング、フォーカス、スピンドル、送り機構の各種サーボがなるべく動作しないような方策が必要とされてきた。

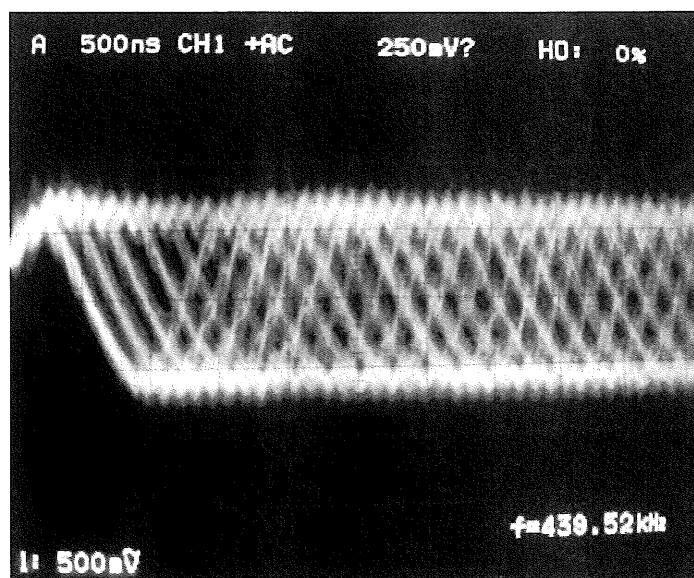


図 2.4 : RF 信号のアイパターン (jitter が多い場合)

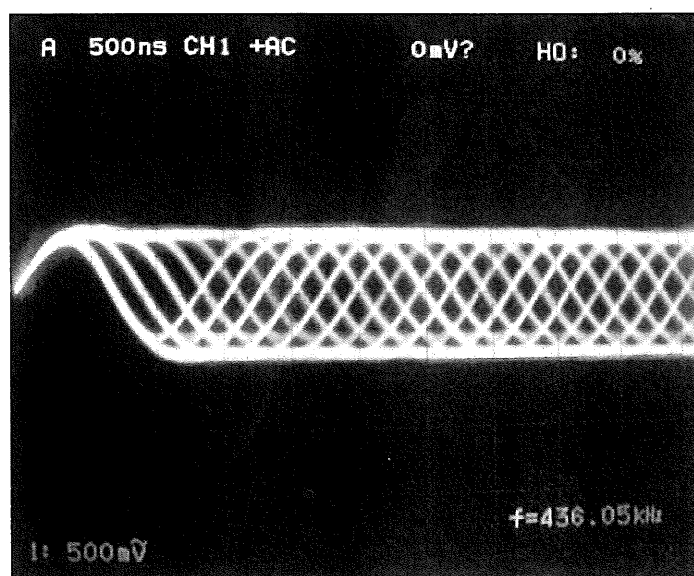


図 2.3 : RF 信号のアイパターン (jitter が少ない場合)

2.4 CD Transporter と D/A Converter の接続 (Bit Stream : Digital Audio Interface 規格)

CD Transporter 部と、D/A Converter 部の接続方法として、それぞれを同じ筐体に設置してある一体型 CD Player と、それぞれが別の筐体に入れられているセパレート型 CD Player がある。一体型 CD Player とセパレート型 CD Player の構成を図 2.5 に示す。

一体型 CD Player では、CD Transporter 部で RF 信号を元に整形された、Digital Audio Data, LR Clock, 水晶発振器から作られる Digital Audio Data の時間情報である Bit Clock を、そのまま D/A Converter に伝送する。このことから、一般的に、一体型 CD Player では、CD Transporter 部で発生した、各種サーボ系の変動がノイズとなって伝播すると言われてきた。

一方で、セパレート型 CD Player では、CD Transporter 部と、D/A Converter 部を別筐体にする事で、CD Transporter 部で起こる、回転体の振動や、電源変動、デジタル回路系に起因するノイズ等を D/A Converter 部よりも後段のアナログ回路から物理的に隔離することで、アナログ回路系に外乱を与えないように対策が取られている。このセパレート型 CD Player では、Digital Audio 信号を、CD Transporter 部から、D/A Converter へと伝送するために、AES/EBU (業務用) または、S/PDIF と呼ばれる、シリアルで Digital Audio 信号を伝送する規格で接続される。この経路は、シリアルのデジタル信号の流れであることから、一般的には Bit Stream と呼び、これら規格の総称は Digital Audio Interface[30] と呼ばれる。この Digital Audio Interface は、CD Transporter 部と、D/A Converter 部を一本の同軸ケーブルでシリアル伝送することを目的に作られており、Digital Audio Data, LR Clock, 水晶発振器から作られる Digital Audio Data の時間情報である Bit Clock を一つのフォーマットにまとめて、AES/EBU もしくは、S/PDIF 規格の信号を作成する。CD Transporter 部の Digital Audio Transmitter において、Digital Audio Data, LR Clock, Bit Clock の 3 つの信号は、Digital Audio Interface 規格に合わせて Bit Stream 信号に整形され、D/A Converter 部に伝送される。D/A Converter 部では、CD Transporter 部から Digital Audio Interface 規格で伝送される Bit Stream 信号を、Digital Audio Receiver により、Digital Audio Data,

LR Clock, Bit Clock の 3 つに復調し, 最終的に D/A Converter IC に各信号を入力することで, アナログ出力信号を得る.

以上のことから, Bit Stream で発生した jitter も, RF 信号の jitter と同様に, D/A Converter のクロックに影響すると考えられる.

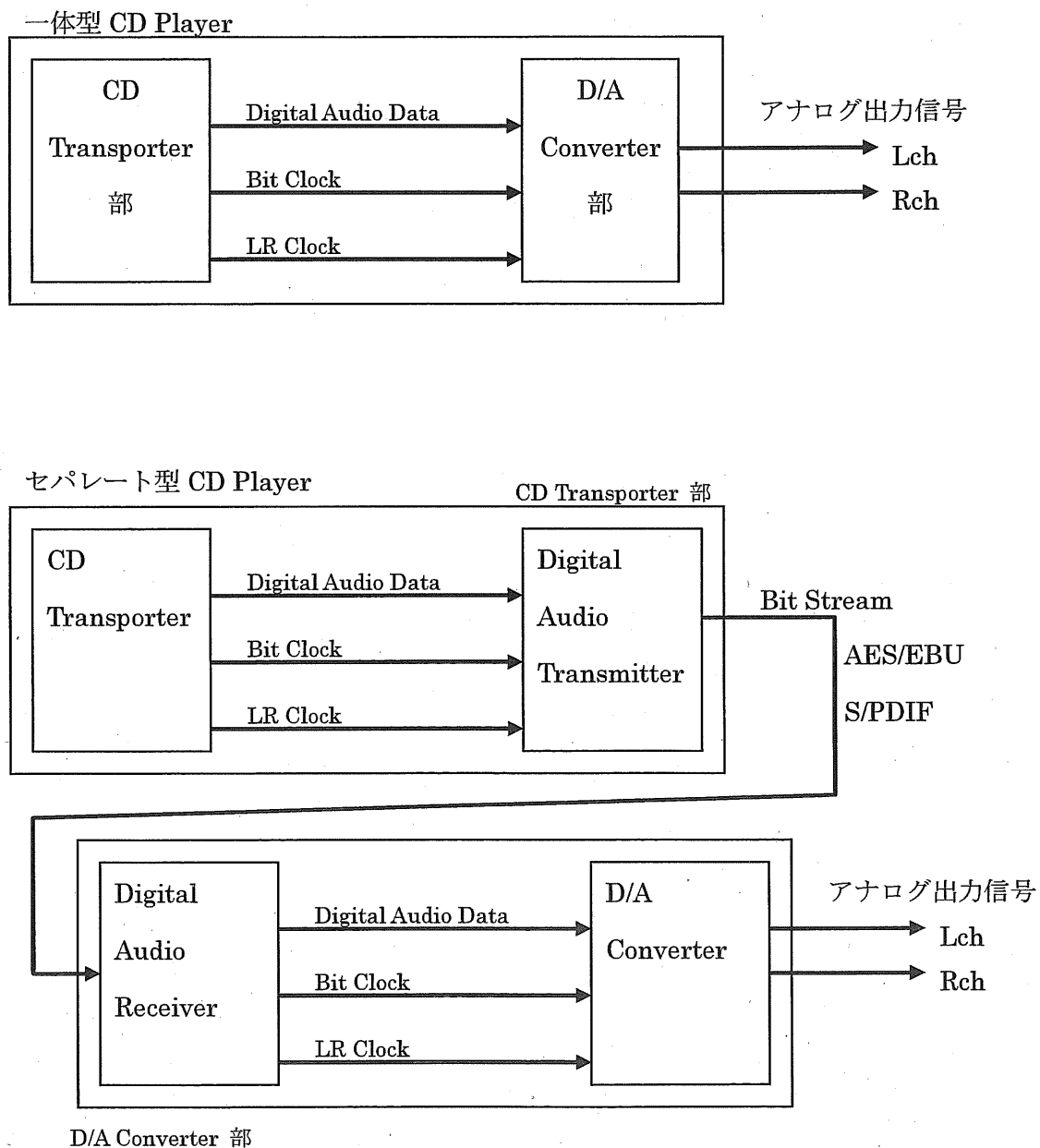


図 2.5 : 一体型およびセパレート型 CD Player の構成

2.5 D/A Converter の内部構成と発生する jitter

D/A Converter は、デジタルーアナログ変換の信号経路において、デジタル信号を扱う最終段の回路である。この D/A Converter を動作させるクロックに、jitter が生じると、後段のアナログ回路にもその影響が伝播し、周波数変調 (FM : Frequency Modulation)、位相変調 (PM : Phase Modulation) を起こす可能性がある。このため、このクロックはデジタル音響再生装置において、最重要であるといえる。

一般的な D/A Converter の内部構成図[2-5]を図 2.6 に示す。一体型の CD Player においては、CD Transporter 部により整形された Digital Audio Data, LR Clock 信号, Bit Clock 信号が D/A Converter 部に入力される。一方、セパレート型の CD Player において、D/A Converter 部では、CD Transporter 部から Digital Audio Interface 規格で伝送される Bit Stream の信号を Digital Audio Data, LR Clock, Bit Clock の 3 つの信号を D/A Converter IC に入力する。D/A Converter IC の内部では、Digital Audio Data を、LR クロックを元に、Lch, Rch の信号に分離する。さらに、各チャンネルで、CD の量子化ビット数 16bit にあわせて、データのシリアルーパラレル変換が行われ、保持回路に入力される。一方で、Bit Stream から、サンプリング周波数の 128 倍のクロックが抽出され、分周回路により、D/A Converter IC が必要なクロック周波数 (CD であれば 44.1kHz) に分周される。分周されたクロックにより、保持回路を叩き、各チャンネル 16bit 分の符号が重み付けされアナログ出力信号を得る。このとき、D/A Converter 部に入力される Bit Stream に jitter が混入していると、Bit Clock にも jitter が生じてしまい、後段の回路にも jitter が伝播してしまう可能性がある。

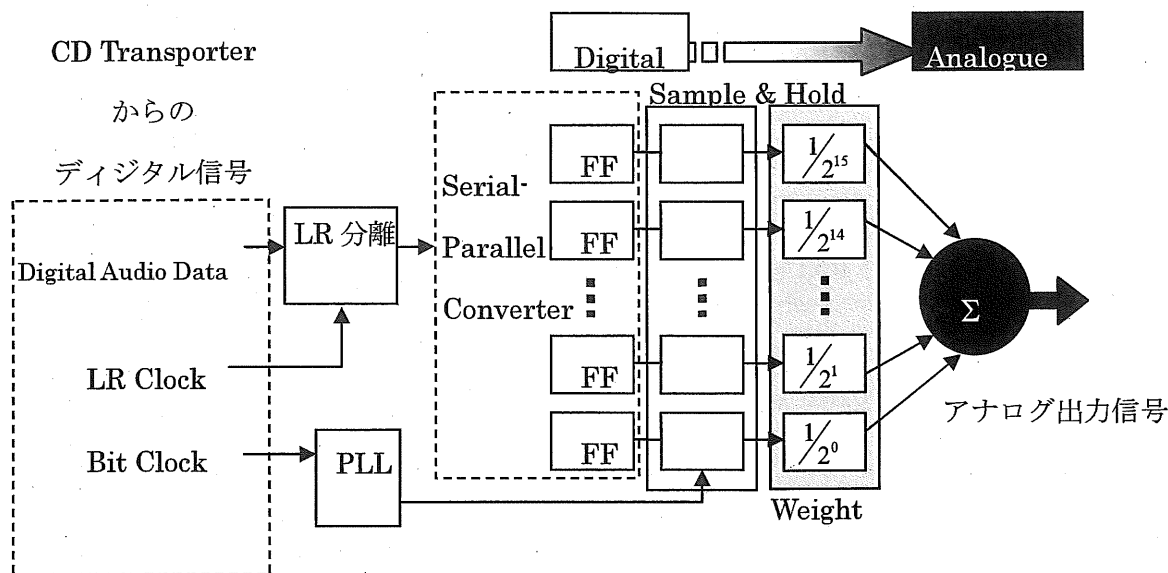


図 2.6 : D/A converter の内部構造

しかしながら、Bit Clock など、D/A Converter の IC を動作させるにあたり、重要なクロック信号は、その前段部分で PLL (Phase Locked Loop) を介して接続され[2-5]、あらかじめ jitter の伝播をなるべく防ぐ方策が取られている。図 2.7 に PLL の内部構造[31]を示す。PLL は前段 (RF 信号やその他デジタル回路) で起きたパルスの揺れを補正して、デジタル信号を同期 (ロックとも呼ぶ) させるために存在する。PLL に入力されたパルスは、発振子である VCO (Voltage Controlled Oscillator : 電圧制御発振器) のパルスと、位相比較器により時間のずれ・揺れ検出される。このとき、ループフィルタの時定数により、許容する揺れを調整する機能が持たせてある。時定数が大きくなると、ロックレンジが広くなり、現存するさまざまなデジタル機器に対応可能で、汎用性が高いが、レンジが広くなる分、パルスの時間揺れを許容してしまう。一方で、高級なデジタル音響再生装置になると、時定数を敢えて小さくし、ロックレンジを狭めて jitter の影響を抑えたり、VCO に高精度の水晶発振器 VCXO (Voltage Controlled Xtal Oscillator) などを用いたりして、作り出すクロックの精度を上げている。

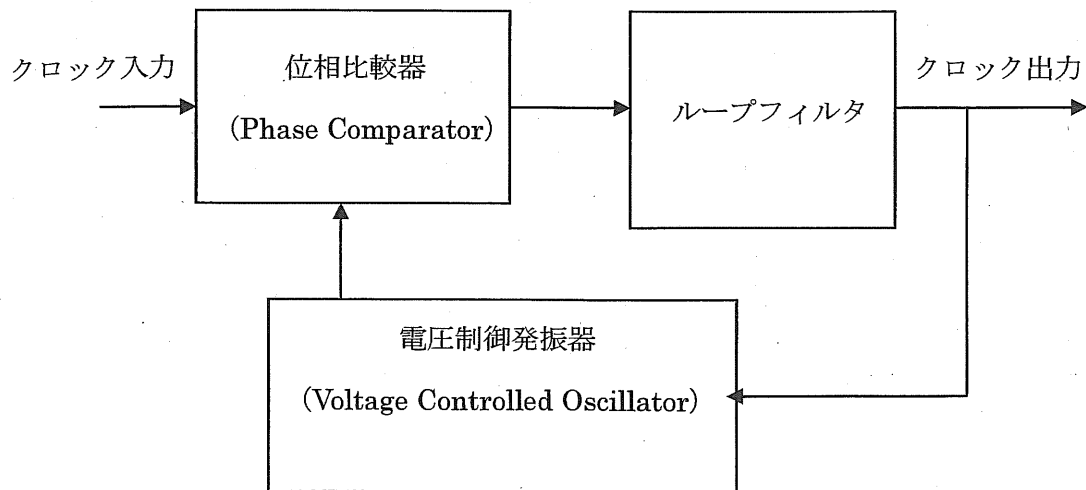


図 2.7 : PLL の内部構造

2.6 他の関連研究

これまで、デジタル音響再生装置に含まれる jitter に関して、数々の報告がなされてきた。ここでは他の関連研究[7-8][14-20]を説明する。

まず、国外の関連研究から説明すると、J.Dunn[7-8]らは、アナログ出力信号上での jitter を、周波数変調成分を検波することで、計測する方法を構築した。また、デジタル信号上の jitter の計測方法も構築した。これらの計測方法は、本研究でも用いた測定器、Audio Precision 社製の Audio Analyzer の各種測定機能に応用されている。

次に国内の関連研究については、蘆原ら[14-16]は、音楽データを符号状態であらかじめ周波数・位相変調して再生し、数多くの主観評価実験を行った。これにより、人間は jitter の影響がわかる検知限は最大でも数百 ns ほどであることを明らかにしている。

西村ら[17-19]は、前述の J.Dunn らの報告[7-8]を踏まえて、D/A 変換におけるアナログ出力信号上で観測される瞬時位相と、元の音楽データの瞬時位相との差分を、サンプリング・ジッターと定義し、簡便な機器で更に高精度に測る手法を構築した。これにより、様々な条件下でアナログ信号上に伝播されたと推測できる jitter を測

定し、D/A Converter のアナログ出力信号上で最大 ns オーダの jitter 量が観測された。

小泉[20]は、これらの報告をまとめ、報告(2)で測定された jitter は最大でも数 ns 以下であり、報告(1)で得た人間が周波数変調を知覚する検知限 (数百 ns) に比べ、聴感上到底検知できないオーダであり、再生音の変化は何等かの特定の条件下で起きている可能性を示唆している。

これらの国内の関連研究は、D/A Converter のクロックにおいて、jitter が起き、アナログ信号上でその影響によるサンプリング・ジッターが起きていることが前提で行われている。すなわち、すべての系をブラックボックスとして扱っていることに相当すると考える。しかしながら、実際のデジタル音響再生装置は、前節で述べたとおり、jitter の影響を排除するべく、PLL などの方策が取られている。このことから、これらの研究では、jitter の伝播経路、jitter が音質劣化に及ぼす影響の仕組みまでは明らかにされていない。また、どのような音質が jitter と関係あるのかまでは言及されていない。

2.7 本研究の位置付け

本研究は、“深い感性”に働きかける情報を再現するための研究方法、新・電気音響再生理論を踏まえて行われてきた様々な実験的・経験的知見の中から、音響再生装置での音楽再生において、“深い感性”情報再現のために重要な“空気感”の再現に注目した。そして、この“空気感”の再現を劣化させ大問題となっていたのが、デジタル音響再生装置のデジタル信号に含まれる、クロック・パルスの時間揺れである、jitter であった。この大問題を解決すべく研究を行った。

前節まで述べてきた、現存のデジタル音響再生装置における、基礎理論、基礎技術を考慮すると、少なくともデジタル信号上に発生した jitter の対策がなされているようである。具体的には以下のとおりである。

- ・PLL により、クロックを再同期させ、リクロックを行っている。
- ・セパレート型 CD Player により、jitter やノイズが起きやすい CD Transporter 部と、D/A Converter 部を切り離している。

しかしながら、これらの対策がなされている多くの機器において、デジタル信号上の jitter が音質を劣化させる経験的知見は、開発現場の技術者の間では常識であり、経験的事実であった。

そこで、本研究では、まず、デジタル音響再生装置のデジタル信号回路において発生する種々の jitter と音質との関係を明らかにし、その仕組みまでを解明する。具体的には、D/A Converter IC よりも前段のデジタル信号系の jitter と、そのときの D/A Converter IC を動作させるクロックの jitter と、再生された音質に関して実験する。

次に、jitter が音質に影響する経路は、信号経路で直接伝わるのではなく、電源経路などの他の経路を伝播している可能性があるため、それを改善するための実証実験を行う。具体的には、理想的な電源方式を提案し、その再生音質と物理特性を明らかにする。

第3章

デジタル信号の jitter と音質との関係

3.1 はしがき：実験構想

本章では、デジタル信号上の jitter と人間の“深い感性”に働きかける情報に関係する音質評価語との関係を心理物理学の実験により明らかにする。

このためには、デジタル音響再生装置の中で、D/A Converter のクロックにおける jitter の量を意図的かつ簡便に変動させる方法を考案する必要があった。また、2章で述べたとおり、実際のデジタル信号の回路上には、パルスの時間揺れへの対処が、ある程度施されているため、実際に jitter が発生して音質を変化させている原因に注目する必要があった。そこで、本研究では D/A Converter のクロックよりも前段のデジタル回路上の jitter を意図的に変動させることにより、D/A Converter のクロックを間接的に変動させる方法を考えた。そこで注目したのが、RF 信号と Bit Stream である。まず RF 信号について、2.3 節で述べたとおり、デジタル音響再生装置におけるクロック・パルスは元をたどれば RF 信号から整形されている。このことから、RF 信号の状態が違う機種を用意すれば、RF 信号に変動を与えたことに相当し、これが D/A Converter のクロックを揺らすのではないかと考えた。また、RF 信号の jitter 測定は RF アンプからの出力信号を測定すればよい。一方、2.4 節で述べたとおり、Bit Stream は D/A Converter IC に Bit Clock を供給しているため、Bit Stream が揺れれば、Bit Clock も揺れるであろうと推測した。そして Bit Stream 上の jitter の振幅周波数特性を測定する機能や、Bit Stream 上に強制的に jitter を付加できる機能を持った測定器が入手できたため、これを用いれば、Bit Stream 上の jitter の振る舞いを測定でき、また、Bit Stream への jitter 付加機能を用いて間接的に D/A Converter のクロックの jitter と音質との心理物理学的关系が明らかになると考えた。

そこで、まず、RF 信号上に起こる jitter を測定し、音質との関係を得る。次に Bit Stream に何種類かの jitter を強制的に付加し、Bit Stream 上での jitter と音質との関係をも得ることが期待できる。これらの実験結果をまとめ、デジタル信号上の jitter と音質との関係と、音質の変化が発生する仕組みを考察する。

3.2 RF 信号に含まれる jitter と音質との関係

3.2 節では, CD Transporter の RF 信号に起こる jitter と音質との関係を明らかにするために, RF 信号の jitter 量が違う 4 種類の CD Transporter (CD Transporter A~D) に対して, 音質主観評価実験, および, RF 信号と D/A Converter のクロックの jitter の測定を行った.

3.2.1 RF 信号の jitter に関する音質主観評価実験の条件

まず, 音質主観評価実験の条件を表 3.1 示す. また, 表 3.2 に示した音響再生機器を図 3.1 に示す実験システム構成のように接続して実験を行った. 図 3.1 中, ①~④の印は, 実験結果を説明するときに用いる記号であり, 本章で後ほど述べる他の実験における, 信号の測定箇所, 及び, 再生音の観察箇所とそれぞれ対応している.

表 3.1 : RF 信号の jitter に関する音質主観評価実験条件

実験場所	JAIST AV 評価実験室
被験者人数	6 名
評価尺度	7 段階評価尺度 ITU-R[32]に準拠
評価項目	総合評価
評価音源	1.PIANO CONCERTO No.5 'Emperor'(Beethoven) Conductor: Zubin Mehta, Pf: Vladimir Ashkenazy, LONDON F35L-50001 411 903-2, Track No.2, 内容 : オーケストラ, ピアノ 2.Enya, Water Mark, WEAMUSIC,25P2-2465, Track No.12, 内容 : 声, シンセサイザー 3.Going Home, THE LA4, EASTWIND EJD-3045, Track No.1, 内容 : ギター, ドラムス, トランペット, フルート
評価方法	CD Transporter B の再生音を基準に他の CD Transporter の再生音を評価

表 3.2 : RF 信号の jitter に関する実験で使用した実験機器

音響再生機器	CD Transporter	A	Marantz CD-34 改造品	
		B	CEC TL-5100Z 改造品	
		C	Philips LHH1000 改造品	
		D	TEAC P0	
	D/A Converter		CEC DX-51 改造品	
	Amplifier		Musical Fidelity A1 改造品	
	Speaker		宮原研製 10cm フルレンジ Speaker (特別仕様品), ユニット: 10cm フルレンジ, (高能率, 高感度, 高 Q), アルニコ磁石, エンクロージャ: 4l, バスレフ型	
	Audio Cable		FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S	
	Speaker Cable		MOGAMI NEGLEX 2804	
Pin Plug		MOGAKI 7551 (スリーブ除去)		
測定器			横河電機 Time Interval Analyzer TA520	

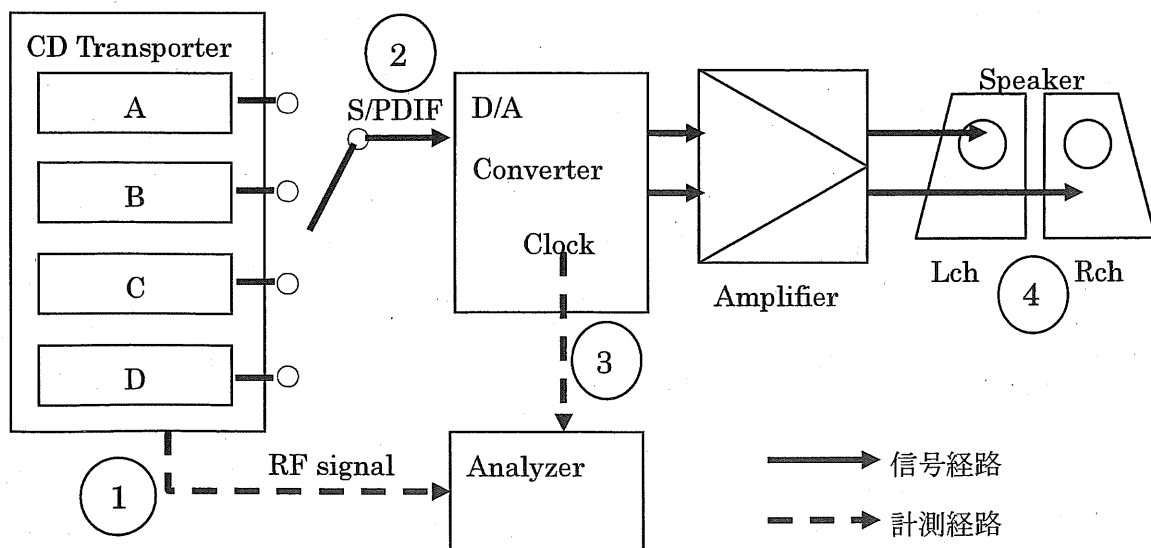


図 3.1 : RF 信号の jitter の測定及び
主観評価実験に用いたシステムの構成図

評価を行った場所は JAIST の AV 評価室 (H : 3.4m, W : 5.3m, D : 8m, 残響時間 0.3s~0.5s) である。この AV 実験室について以下に説明する。天井の素材は石綿吸音板、内壁の素材は穴あきシナ化粧ラワン合板である。また、床の構造は音楽専用のフローリングの根太支持である。スピーカの背面壁は無穴の全面反射面となっており、それに対面する壁は全面吸音面である。側面壁の構造は波型になっており、壁素材において、吸音面に対面する壁は反射面である。

次に、被験者について以下に説明する。被験者には、評価の信頼性[33]を考慮し、“深い感性”の情報に関連する評価語群[27][28]の意味や、その評価語群がなす階層構造などをあらかじめ説明し、トレーニングを行った。すなわち、本実験の被験者は、用いた評価語群の意味を理解でき、安定な評価をする成人 6 名 (男性 5 名, 女性 1 名) とした。

評価実験に用いた音源は、人間の“深い感性”に働きかける情報を含む音源として、大多数の CD の中から探し出したもの[34]である。その中から本実験条件において、評価のしやすかった 3 種類の音源を選んだ。以下に評価音源の選定理由について説明する。評価音源 1 は、オーケストラによるピアノ協奏曲の演奏で、各楽器の音像や、ホールの雰囲気を表す“Holographic 音場感”, 演奏音が体を包み込むような“空気感”, コントラバスの演奏音が重さを伴って低い音で再生される“音の重心の低さ”, ピアノの音の響きや演奏の細かい表情など、非常に多くの評価しやすい項目を含むことから選定した。評価音源 2 は、女性ボーカル、シンセサイザーの演奏であり、“空気感”や、“音の重心の低さ”, 声の質感などが評価しやすい音源であることから選定した。評価音源 3 は、ギター、ドラムス、トランペット、フルート、ベースによるジャズ演奏であり、演奏全体の“空気感”, “演奏のノリ”, ドラムスのバスドラムやベースの再生音の“音の重心の低さ”, ギター、トランペット、フルート、ドラムスのシンバルなどの響き、ドラムスの皮の質感などが評価しやすいことから選定した。

実験に使用した音響再生機器について以下に述べる。音響再生機器は、一部、新・電気音響再生理論に基づき、人間の“深い感性”に働きかける情報が再現されるように改造 (詳細は付録 A に示す) したものの[29][34]を用いている。

被験者に対する評価音源再生音の提示の仕方について以下に述べる。被験者には、

基準音 A に対する評価音 B を提示し、このときの音質評価を 7 段階評価で行った。用いた評価尺度は ITU-R の 7 段階評価[32] (+3 : 非常に良い, +2 : 良い, +1 : やや良い, 0 : 同じ, -1 : やや悪い, -2 : 悪い, -3 : 非常に悪い) である。提示時間に関しては、評価音源 1, 評価音源 2 は約 2 分の再生, 評価音源 3 については、約 3 分半の再生とした。これらの提示時間が違う理由は、それぞれの評価音源において、ピアノや、ドラムスのソロなど、各楽器が印象的な演奏を始める時点が違うためである。図 3.2 に評価音源の提示スケジュールを示す。評価音源の提示順序はランダムに行った。提示回数および提示時間は被験者が評価を完了させるまで何度も繰り返した。また、評価音源を変えたときに、休憩を入れるなど、被験者の疲労や慣れも考慮した。

以上の条件において、CD Transporter B の場合の再生音を評価の基準値とし、他の CD Transporter の再生音に対して音質主観評価を行った。これは CD Transporter A が一体型 CD Player, Transporter B~D はセパレート型 CD Player であり、その構造上、CD Transporter A と他の CD Transporter は同一 D/A Converter で比較できなかったためである。CD Transporter A は、これまでの多くの経験的・実験から、人間の“深い感性”に働きかける情報の再現が一番良い機器であるため、評価対象として選定した。

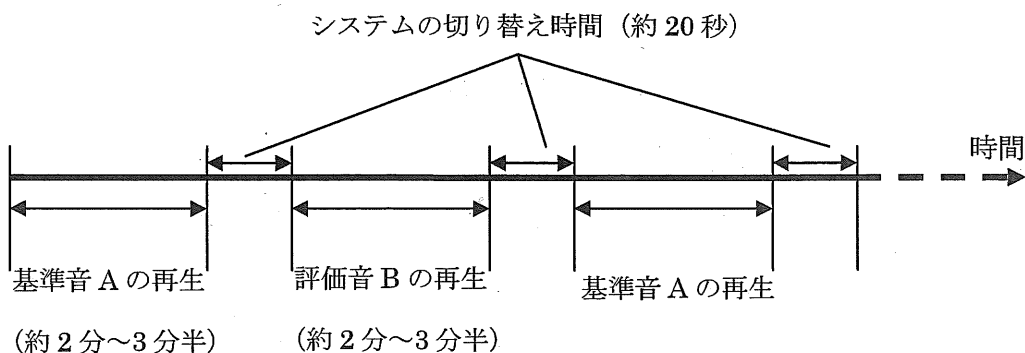


図 3.2 : 評価音源の提示方法

3.2.2 RF 信号の jitter に関する音質主観評価実験結果

音質主観評価実験の結果を表 3.3 に示す。表 3.3 より、RF 信号の jitter 量が違う 4 種類の CD Transporter (CD Transporter A~D) の音質の順位は次のようになった。

CD Transporter A (MOS :1.7) > B (評価基準) > C (-1.2) > D (-2.2)

CD Transporter A について、やはり、他の機器に比べて良い結果を得た。また、特筆すべきは、CD Transporter D について、CD の回転時の偏芯に対応した機器であるにもかかわらず、他の機器よりも、評価値が悪い結果となった。

表 3.3 : 4 種類の CD Transporter の音質主観評価結果

CD Transporter	MOS の平均	標準偏差
A	1.7	0.47
B	評価基準(0)	—
C	-1.2	0.37
D	-2.2	0.58

この音質主観評価結果を得て、次節では、4 種類の CD Transporter の RF 信号、それらを接続したときの D/A Converter を動作させるクロックの jitter をそれぞれ測定する。

3.2.3 RF 信号および D/A Converter のクロックの測定条件

RF 信号および D/A Converter を動作させるクロックの測定に用いた機器は表 3.2 に示した。これらを図 3.1 に示した実験システム構成のように接続して実験を行った。測定器は、横河電機社製 Time Interval Analyzer TA520 であり、パルスの時間間隔を測定できる機器である。この機器の持つ測定機能のうち、jitter 測定機能を用いた。この機能は、パルスの時間揺れ幅の標準偏差 σ を jitter として測定するもので、時間分解能は 25ps である。

RF 信号の測定は、各 CD Transporter の RF アンプの出力（パルス幅 3T～11T）を測定した。D/A Converter のクロックの測定は、PLL から D/A Converter IC に入力されるクロックを測定した。なお、CD Transporter A に関しては、一体型 CD Player であり、同一の D/A Converter でないため、クロックの測定からは除外した。

3.2.4 RF 信号および D/A Converter のクロックの測定結果

RF 信号および D/A Converter のクロックの測定結果を表 3.4 にまとめる。測定結果の RF 信号は 3T～11T のパルス幅のうち、一番速い変化である 3T パルスのものを示す。

表 3.4 : 4 種類の CD Transporter の RF 信号の jitter と、
D/A Converter クロックの jitter の関係

CD Transporter	RF 信号の jitter [ns]	D/A Converter クロックの jitter [ps]
A	16.0	—
B	20.9	309
C	21.2	312
D	27.6	307

表 3.4 より、4 種類の CD Transporter における RF 信号の jitter 量において、3.2.4 節で述べた音異質主観評価の結果と同様の順位を得た。

CD Transporter A (16.0) > B (20.9) > C (21.2) > D (27.6)

しかしながら、D/A Converter クロックの jitter 量は、いずれの場合も約 300ps と一定かつ、微少であることが解った。

また、RF 信号の jitter 量は、音質評価の良い CD Transporter A でも約 16ns ほどあることが解った。また、CD Transporter D について、CD の回転時の偏芯に対応した機器であるにも関わらず、他の機器よりも、RF 信号の jitter 量が多い結果となった。これは、偏芯を抑制するために、新たに複雑な機構が設置され、その

サーボ系などが、何かしらの変動ノイズを与えてしまっている可能性が考えられる。

さらに、CD Transporter B と、D の間に、ns オーダの jitter の差があっても、D/A Converter のクロックは、約 300ps と一定であり、これは、同期回路である PLL が働いている証拠であると考えられる。

次節 (3.2.5 節) では、これらの測定結果を、音質主観評価結果と関連付けて考察し、RF 信号の jitter に関する実験をまとめる。

3.2.5 RF 信号の jitter に関する実験のまとめと考察

ここでは、3.2.2 節で述べた 4 種類の CD Transporter による音質主観評価の結果と、3.2.4 節で述べた 4 種類の CD Transporter RF 信号とそれらが接続された D/A Converter のクロック jitter の測定実験結果についてまとめる。これらの結果を図 3.3 にまとめる。グラフの横軸は RF 信号の 3T パルスの jitter の量 (単位 ns) を表している。左縦軸は、7 段階の音質評価尺度、右縦軸は、実測した D/A Converter のクロックの jitter (単位 ps) を表す。なお、CD Transporter A は、他の Transporter と同一の D/A Converter でないため、D/A Converter のクロック測定からは除外してある。また、音質評価結果は音源ソースの中でも、一番違いのわかりやすかった音源 1 (表 3.1 参照) の総合評価の平均値について示している。

図 3.2 より、RF 信号の jitter 量 (図 3.1・①部) は最少でも約 16ns ほどあり、再生音の音質と (図 3.1・④部) の総合評価との間に何かしらの線形的な関係があることがうかがえる。しかしながら、音質に直接関係あると考えられる D/A Converter クロックの jitter (図 3.1・③部) はいずれの場合も約 300ps と僅か、かつ一定である。つまり、D/A Converter のクロック jitter は、RF 信号の jitter 量の単調増加に対して、ほぼ平坦となっているため、両者の関連性は観測できないといえる。したがって、RF 信号の jitter (図 3.1・②部) で揺れていたデジタル信号は、D/A 変換最終段の D/A Converter クロック (図 3.1・④部) を整形する PLL により、その影響がほぼ取り除かれていることが考えられる。すなわち、RF jitter はデジタル音楽信号の流れとは異なる経路で音質に影響を与えていると推測できる。

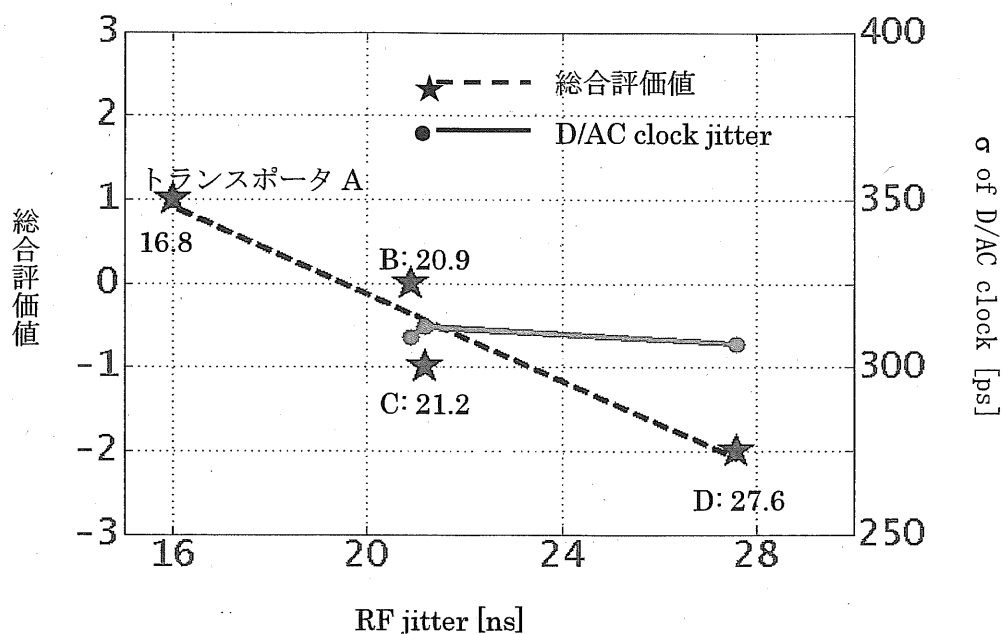


図 3.3 : RF 信号の jitter と音質評価および
D/A Converter クロックの jitter との関係

以上の結果より、RF jitter は音質劣化との関係性を示したが、音質には直接的に影響していないことが判明した。このことから、デジタル音響再生装置の音質を改善するためには、その仕組みまで突っ込んだ議論が必要であるといえよう。

次節 (3.3 節) では、デジタル信号系におけるもう一つの jitter 発生源である、Bit Stream の jitter と音質の関係について実験し、その結果の考察をまとめる。

3.3 Bit Stream の jitter と音質との関係

本節では、Bit Stream の jitter と音質との関係を明らかにするための実験を行った。ここでは、CD Transporter から D/A Converter にデータを伝送する Bit Stream に、4 種類の条件で強制的に jitter を付加し、音質主観評価実験を行い、同じ条件で D/A Converter のクロックの jitter を測定する。

3.3.1 Bit Stream の jitter に関する音質主観評価実験の条件

音質主観評価実験の条件を表 3.5 に示す。また、表 3.6 に示した音響再生機器および、測定器を図 3.4 に示す実験システム構成のように接続して実験を行った。図 3.4 中、①～④の印は、実験結果を説明するときに用いる記号であり、本章で後ほど述べる他の実験における、信号の測定箇所、及び、再生音の観察箇所やとそれぞれ対応している。

表 3.5 : Bit Stream への jitter 付加実験の主観評価実験条件

実験場所	JAIST AV 評価実験室
被験者人数	7 名
評価尺度	7 段階評価尺度 ITU-R[32]に準拠
評価項目	総合評価, “空気感”
評価音源	1.PIANO CONCERTO No.5 ‘Emperor’(Beethoven) Conductor: Zubin Mehta, Pf: Vladimir Ashkenazy, LONDON F35L-50001 411 903-2, Track No.2, 内容 : オーケストラ, ピアノ 2.Enya, Water Mark, WEAMUSIC,25P2-2465, Track No.12, 内容 : 声, シンセサイザー 3.Going Home, THE LA4, EASTWIND EJD-3045, Track No.1, 内容 : ギター, ドラムス, トランペット, フルート
評価方法	Bit Stream への jitter 付加なしの状態の時の再生音を基準にし, jitter 振幅 88.6ps, 886ps, 8.86ps の合計 3 種類の再生音を評価。

表 3.6 : Bit Stream への jitter 付加実験に用いた機器

音響再生機器	CD Transporter	CEC TL-5100Z 改造品
	D/A Converter	CEC DX-51 改造品
	Amplifier	Musical Fidelity A1 改造品
	Speaker	宮原研製 10cm フルレンジ Speaker (特別仕様品), ユニット : 10cm フルレンジ, (高能率, 高感度, 高 Q), アルニコ磁石, エンクロージャ : 4ℓ, バスレフ型
	Audio Cable	FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S
	Speaker Cable	MOGAMI NEGLEX 2804
	Pin Plug	MOGAKI 7551 (スリーブ除去)
測定器	jitter 付加器	Audio Precision SYSTEM TWO CASCADE
	パルス幅測定	横河電機 Time Interval Analyzer TA520

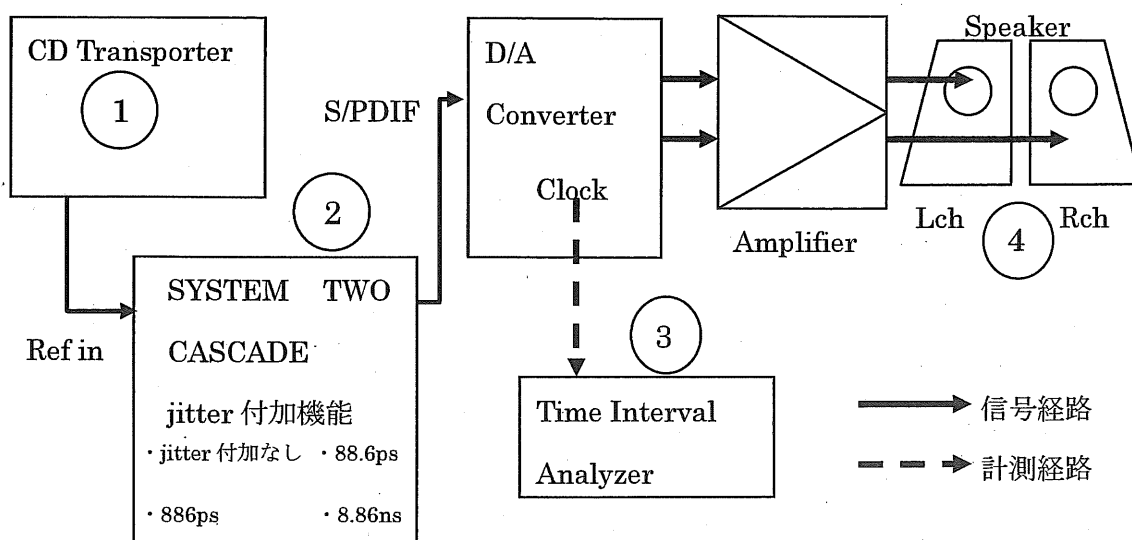


図 3.4 : RF 信号の jitter の測定及び主観評価実験に用いたシステムの構成図

音質主観評価の条件について、評価場所、評価実験の手順などの詳細な条件は 3.2 節で述べたものとほぼ同一であるため、ここでは割愛する。音質主観評価実験は、JAIST AV 評価実験室で行い、被験者は、“深い感性” 情報に関連する評価語群の意味を理解でき、安定な評価をする成人 7 名（男性 6 名、女性 1 名）とした。用いた評価語は、総合音質と、“空気感” であり、これらに対して、jitter 付加なしの場合を基準に、3 種類の jitter を付加した場合を 7 段階評価尺度にて評価した。

Bit Stream への jitter の強制的付加は、Audio Precision 社製の SYSTEM TWO CASCADE の jitter 付加機能を用いた。この機能は、本来、音響再生装置の開発現場において、Bit Stream の接続の障害（例えば、受信側の PLL がロックしない、外れるといった問題）を試験・解決するために使用されるものであった。本研究では、この jitter 付加機能を利用して、Bit Stream に強制的に jitter を付加し、この jitter が“深い感性” に働きかける情報の再現にどのような影響を及ぼすのか調べた。

Bit Stream に付加した jitter の状態は、jitter 付加なし、jitter 振幅 88.6ps, 886ps, 8.86ns の 4 種類とし、付加した jitter の振幅を jitter 量とした。jitter は時間揺れのため、jitter 振幅の単位は時間となる。jitter 振幅の選定理由は、この SYSTEM TWO CASCADE では、jitter 振幅を単位[UI] (Unit Interval) で表しており[35]、その単位[UI]を秒[s]に換算しているためである。単位[UI]と秒[s]の関係は次式（式 3.1）で表される。

$$1 \text{ [UI]} = \frac{1}{128F_s} \quad \dots \quad (\text{式 3.1})$$

ここで、 F_s は CD のサンプリング周波数 44.1kHz であるので、式 3.1 に代入すると、本実験では、 $1 \text{ [UI]} = 177.15 \text{ [ns]}$ である[35]。本実験では、付加可能な jitter 振幅の最小値である $500 \mu \text{ UI}$ （秒換算で 88.6ps）、その 10 倍の 5mUI （886ps）、100 倍である 50mUI （8.86ns）を選択した。

また、付加した jitter の周波数はいずれも 1kHz である。これは、対数軸上で見たとき、人間の可聴周波数帯域のほぼ中央であることから選択した。さらに、予備実験や先行研究[12-13]において、2Hz~10kHz まで様々な周波数の、SYSTEM TWO CASCADE の jitter 付加機能において選択可能な全ての jitter を付加したが、

いずれの場合も、1kHzの jitter と同様の結果を得ている。

以上の条件で、jitter 付加なしの場合を評価基準にして、3種類の振幅（88.6ps, 886ps, 8.86ns）を持つ jitter を付加した場合の音質主観評価実験を行った。

3.3.2 Bit Stream の jitter に関する音質主観評価実験結果

Bit Stream の jitter に関する音質主観評価実験結果を表 3.7 に示す。結果より、Bit Stream に 88.6ps という微少な jitter が付加されただけで、“-1.5”以上、音質が劣化した。また、本実験中において付加した jitter の中で最大の 8.86ns となると、約“-2.5”も音質が劣化することがわかった。また、同時に行った“空気感”の評価でも、総合評価と同様な音質劣化が生じた。このことから、Bit Stream 上に付加された jitter は、人間の“深い感性”に働きかける情報の中でも、特に“空気感”と関係があることが解った。

表 3.7 : Bit Stream の jitter に関する音質主観評価実験結果

jitter の状態	MOS の平均 (標準偏差)	空気感の評価値 (標準偏差)
付加なし	評価基準	評価基準
88.6ps	-1.7 (0.70)	-1.6 (0.49)
886ps	-2.1 (0.83)	-2.1 (0.83)
8.86ns	-2.6 (0.49)	-2.4 (0.73)

次節（3.3.3 節）では、これらの音質主観評価結果を受け、Bit Stream の jitter の違いによる D/A Converter のクロックの測定を行い、両者の関係を明らかにする。

3.3.3 Bit Stream の jitter の違いによる

D/A Converter のクロックの測定条件

Bit Stream の jitter の違いによる D/A Converter のクロックの測定は、表 3.6 に示した機器を、図 3.4 の構成で接続して行った。

D/A Converter を動作させるクロックの測定に用いた測定器は、前節 (3.2 節) と同様に、横河電機社製 Time Interval Analyzer TA520 で、パルスの時間揺れの標準偏差 σ を jitter として測定した。D/A Converter のクロックの測定は、PLL から D/A Converter IC に入力されるクロックを測定した。

3.3.4 Bit Stream の jitter の違いによる

D/A Converter のクロックの測定結果

Bit Stream の jitter の違いによる D/A Converter のクロックの測定結果を表 3.8 に示す。測定結果より、D/A Converter のクロックの jitter は、条件により、若干の変動が見られたが、測定器の時間分解能限界である 25ps を考慮すると、ほぼ一定であることが伺える。したがって、いずれの条件の場合も約 300ps と一定、かつ、微少な量であったと考えられ、これは 3.2 節で述べた、RF 信号の jitter に関連する測定実験と同様の結果であった。

表 3.8 : Bit Stream の jitter に関する測定実験結果

jitter の状態	D/A Converter クロックの jitter [ps]
付加なし	306
88.6ps	314
886ps	317
8.86ns	303

また、Bit Stream 上に、8.86ns と、ns オーダの jitter を付加しても、D/A Converter のクロックは、約 300ps であり、これは、同期回路である PLL が働いている証拠であると考えられる。

これらの結果を受け、次節 (3.3.5 節) では、主観評価実験の結果と、測定実験の結果を踏まえて、Bit Stream の jitter に関する実験結果のまとめを行う。

3.3.5 Bit Stream の jitter に関する実験結果のまとめ

本節では、Bit Stream に付加した jitter と、3.2 節で述べた音質主観評価の結果と、3.3.4 節で述べた D/A Converter のクロック jitter の測定実験の結果を比較し図 3.5 にまとめる。グラフの横軸は付加した jitter の振幅（単位 ps）を表し、左縦軸は 7 段階の音質評価尺度、右縦軸は実測した D/A Converter IC のクロック jitter 量（単位 ps）を表す。また、音質評価結果は音源ソースの中でも、一番違いのわかりやすかった音源 1（表 3.1 参照）の総合音質、同時に“空気感”の評価値の平均を示している。

図 3.5 より、Bit Stream（図 3.4・②部）に故意に発生させた約 88ps という僅かな jitter 量でさえも、音質を大きく劣化させている（おおむねスコア“-2”以上）ことがわかる。また、特に評価語として“空気感”再現も同様に大きく劣化（スコア“-2”以上）していたこと。しかしながら、D/A Converter IC のクロック jitter（図 3.4・③部）の揺れを Time interval analyzer TA520（時間分解能：25ps）を用いて測定したところ、どんなに音質が悪い（8.86ns の jitter を付加した）場合でも、その揺らぎは約 300ps であった。このことから、RF 信号の jitter の場合と同様に、D/A 変換の最終段である D/A Converter クロック（図 3.4・④部）を整形する PLL により、その影響がほぼ取り除かれていることが考えられる。すなわち、Bit Stream に発生する jitter も、音楽信号の流れとは別の経路で音質に影響を与えていると推測できる。

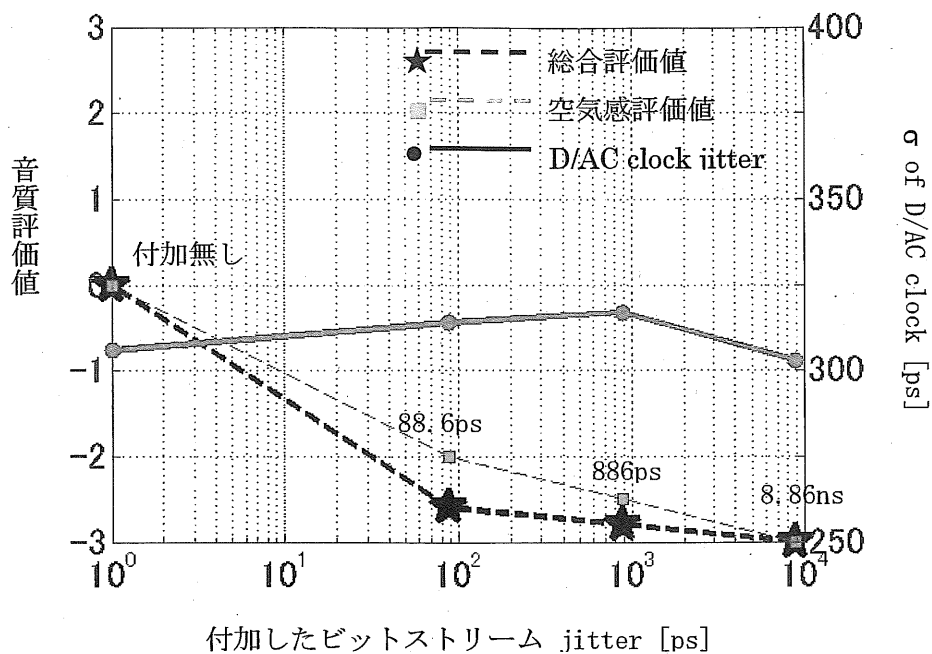


図 3.5 : Bit Stream への jitter 付加実験の結果

3.4 jitter に関する実験結果のまとめ

本節においては、3.3 節の RF 信号における jitter に関する実験、および、3.4 節の Bit Stream における jitter に関する実験で得た結果をまとめる。ここでは、図 3.6 を用いて説明を行う。図中①～④の印は図 3.1, 図 3.4 で測定および観察を行った箇所と対応している。

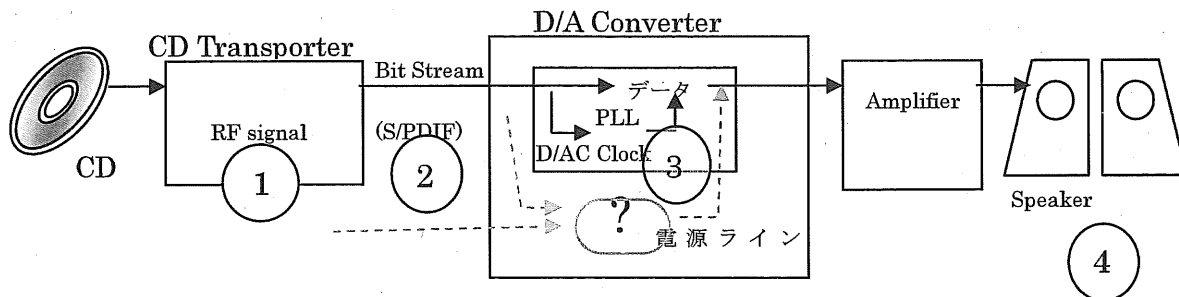


図 3.6 : jitter に関する実験のまとめ

本章の jitter に関する実験において、以下 3 つのことが明らかになった。

- ・RF 信号で発生した jitter (図 3.6・①部) は、音質を劣化させるが、D/A Converter のクロックの jitter (図 3.6・③部) とは直接的な関係が観測できなかった。

- ・Bit Stream (図 3.6・③部) に故意に付加した jitter も、音質を劣化させたが、やはり、D/A Converter のクロック jitter (図 3.6・④部) と直接的な関係が観測されなかった。

- ・すなわち、RF 信号の jitter や、Bit Stream へ付加した jitter が音質劣化を引き起こしたとしても、D/A Converter のクロックにおける jitter は PLL により安定化されている。そのため、jitter による音質劣化への影響は、D/A 変換以外の経路を介して引き起こされていると考えられる。

以上、RF 信号の jitter、Bit Stream の jitter など、D/A Converter よりも前段に起こる jitter は音質劣化と間接的な関係にあることが示された。そこで、次節では、他の関連研究ではどのような議論がなされているか、および本実験結果との関連性を述べる。

3.5 他の jitter の関連研究と本研究との位置づけ

本研究以外の jitter に関連した研究[14-20]では、「D/A 変換の最終段である、D/A Converter のクロックに時間ゆれとして観察される jitter が、アナログ出力信号上に伝播しており、音質の変化はデジタル信号に含まれる jitter が直接影響したものであること」を前提として実験を行っている。具体的には、jitter はパルスの時間揺れであることから、もし、この jitter の影響がアナログ信号上に伝播すると、FM (周波数変調 : Frequency Modulation) や PM (位相変調 : Phase Modulation) を引き起こす可能性があるため、アナログ信号上での FM 成分に注目して研究されてきた。すなわち、デジタル音響再生装置全体をブラックボックスとして扱い、jitter の伝播経路には触れずにいるため、音質劣化の詳細な仕組みまでは議論されていない。一方で本研究では、デジタル音響再生装置の各部の jitter を測定することで、音質劣化と jitter との関係性だけでなく、その仕組みまでの解明を目指すものである。

以下、これらの関連研究を本研究の実験結果と比較してまとめる。

(1) 蘆原ら[14-16]は、音楽データを符号状態であらかじめ周波数・位相変調して再生し、数多くの主観評価実験を行った。これにより、人間は jitter の影響がわかる検知限は最大でも数百 ns ほどであることを明らかにしている。

一方で、本研究は、人間の“深い感性”に働きかける情報に関連の深い音質評価語を用いて音質評価し、それと同条件において、実際にデジタル信号系で発生している jitter がどのような音質と関係するか、より突っ込んで議論している。

(2) 西村ら[17-19]は、D/A 変換におけるアナログ出力信号上で観測される周波数・位相変調成分を、jitter と定義し、デジタル信号上で起きた jitter が直接伝播していることを前提として、簡便な機器で高精度に測る手法を構築した。これにより、様々な条件下でアナログ信号上に伝播されたと推測できる jitter を測定し、D/A Converter のアナログ出力信号上で最大 ns オーダの jitter 量が観測された。

一方で、本研究では、デジタル信号上で発生した jitter が、そのままアナログ信号上に伝播されているかが不明と考えるため、実際にデジタル回路上のいたる所で発生する jitter を測定している。また、同条件での音質主観評価を行っているため、どのような音質と関係するのかまで議論している。

(3) 小泉[20]は、これらの報告をまとめ、報告(2)で測定された jitter は最大でも数 ns 以下であり、報告(1)で得た人間が周波数変調を知覚する検知限（数百 ns）に比べ、聴感上到底検知できないオーダであり、再生音の変化は何等かの特定の条件下で起きている可能性を示唆している。

ここで、人間は微小な周波数・位相変調をも知覚（報告(1)）し、アナログ出力信号に微少な量の周波数・位相変調が観測（報告(2)）されたことから、jitter が音質劣化のひとつの原因であるとの結論は、本研究で得た結果と合致する。また、報告(3)の結果は、jitter と音質劣化との関係は間接的であるという、我々の主張と矛盾しない。それ以上に、本実験では、D/A Converter のクロックの jitter までも実測することにより、報告(1)、報告(2)で得られた実測された jitter（最大 ns オーダ）と、人間の jitter に対する検知限（数百 ns）との差を実験的に明らかにしたといえる。

3.6 考察 : jitter による音質劣化発生の原因とその正体

3.2 節, 3.3 節において, D/A Converter IC よりも前段の, RF 信号の jitter や, Bit Stream へ付加する jitter の量が大きければ, 深刻な音質劣化が起きているため, 当然, D/A Converter を動作させるクロックの jitter が増加していると考えて, 実際に測定を行った. しかしながら, 僅かなゆれ (300ps) しか観測されなかった. それは, 同期回路である PLL により, 前段部分で発生した jitter の影響がほぼ除去されたからだと考えられる. 以上のことから, 音質劣化は D/A Converter IC よりも前段に発生する jitter が直接的に引き起こしているのではなく, D/A 変換経路以外の伝わることによって, 引き起こされていると考えた.

また, 一方で, 先行研究[36]において, 前述の Marantz 社製 CD Player である CD-34 の電源変動を観測したところ, D/A Converter の電源変動は, RF 信号に関係のあるトラッキングサーボの電圧変動, フォーカスサーボの電圧変動と関係が深いことが明らかになっている (付録 B に付す).

これらの結果を踏まえて, その音質劣化の原因を以下で考察する. D/A Converter よりも前段で起きた jitter が, デジタル音楽信号以外の信号経路を介して伝播したと仮定すると, 残る経路のうちで, 一番可能性が高いのは, アース周りなど, 電源に関する経路であると考えられる. このことから, jitter の影響の伝播経路を考察すると, D/A Converter IC 内の各ビット (MSB~LSB) がアナログ的に重みをかけられて総和変換され, 元のアナログ信号に変換される時, jitter に起因した変動が電源・アース周りから伝播する可能性が考えられる. 図 3.7 にそのイメージを示す. すなわち, jitter は周波数・位相変調 (FM : Frequency Modulation, PM : Phase Modulation) であり, この時間方向の変調が, D/A Converter IC など, デジタル音響再生装置内のいずれかの系で, 振幅方向の変調 (AM : Amplitude Modulation) に変換されることで, 音質劣化が起こっていると推測される.

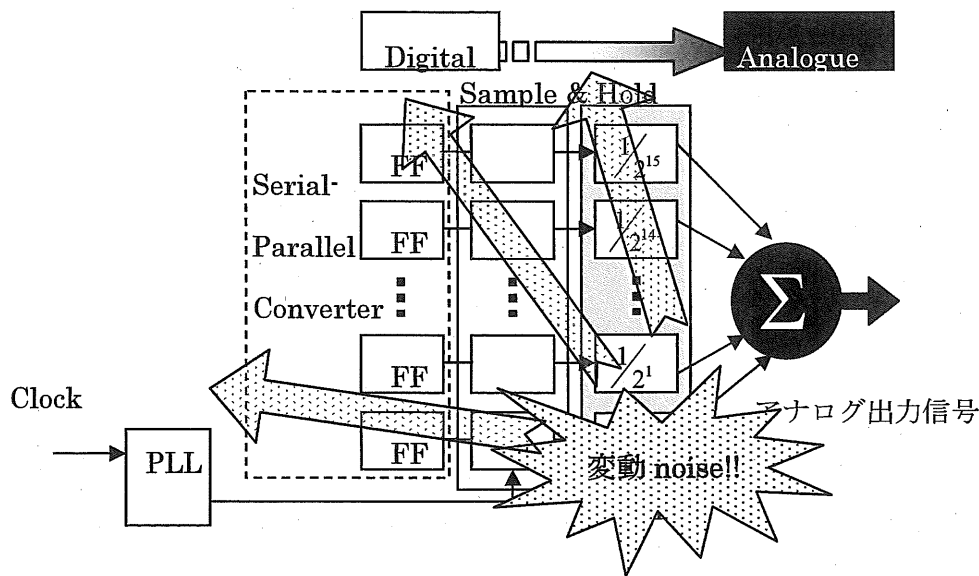


図 3.7: D/A Converter における変動のイメージ

このように、jitter の影響は D/AC の前段かまたは D/AC のブロック内でなんらかの形で電源へ影響した可能性が高い。したがって、この別の伝播経路こそ jitter が音質に影響する仕組みであり、正体ではないかと考えた。この推測を実証するためには、また、この音質劣化原因を改善するためには、D/A Converter 内部回路の計測および改善が必須となる。しかしながら、D/A Converter は IC のパッケージ化がなされており、内部構造を簡単には改善できないため、現状において音質劣化の改善を試みるためには、デジタル音響再生装置において外乱が起きても安定した動作をする理想的な電源に改善するのが良いと考えた。したがって、次章では、デジタル音響再生装置に最適かつ、理想的な電源方式を提案する。また、提案された電源方式を、デジタル音響再生装置に採用し、心理物理学的実験により、その評価を行う。

第4章

デジタル音響再生装置の

電源方式の改善とその評価

4.1 はしがき

前章のデジタル信号の jitter に関する実験により, jitter の音質への影響は, 電源回路などを介して, 間接的に伝播している可能性が示唆された. このため, 本章では, デジタル音響再生装置にとって, 理想的な電源方式を提案し, この問題の解決をはかる. そして, 提案電源方式の心理物理学的評価を行う. 具体的には, 4.2 節において, 提案された電源方式の説明を行う. 4.3 節にて, 電源方式の違いによる, 音楽再生音の音質主観評価実験について説明する. 4.4 節ではその結果を受けて, 電源方式を変えたときの, D/A Converter のアナログ出力信号の測定・解析について示す. 4.5 節では, 提案電源の変動抑制性能の測定・解析について示す. そして, 4.6 節において, これらの実験から得られた結果をまとめ, 考察を行う.

4.2 理想電源とは：シリーズ・シャント並列電源の提案

これまで我々は, 新・電気音響再生論の一部として, デジタル音響再生装置の電源に関して, 数々の経験的・実験的事実を得てきた. それらを以下に述べる.

- ・電源の平滑コンデンサを, 素子の種類をよく吟味して大容量化すると“深い感性”に働きかける情報に関係する評価語（特に“空気感”, “重心の低さ”, “音が向かってくる”）が改善する[34].

- ・電源コンセントの差し込み向きにより音質が, 誰でも解るほどに激変[9][34]する. また, CD 盤ごとに音質が良い向きが存在する. この電源コンセントに関する音質変化は, CD Player に限ったことでなく, D/A Converter, CD Transporter はもとより, Amplifier, LP レコードプレイヤなど, すべての音響再生装置について該当する.

- ・2 種類ある大学の変圧器が, 月毎に動作交代する度に音質が変わり, それに乗じて前述のコンセント差し込み向きも変わることが多い[34].

これら数々の経験と考察から, 宮原は, 理想電源の条件を提案した（出願番号：特願 2006-081709 号, 特許公開 2007-259153 [37]）. 以下にそれらの条件を示す.

条件 1：負荷が瞬時に重くなり電流が必要となる時, 無遅延で必要量の“供給”が

できること

条件 2：負荷が一瞬軽くなり容量性負荷に電荷が溜まった時，その余剰電荷を“吸収”できること

条件 3：瞬時気絶状態のシリーズレギュレータ対策

そして，これらの 3 条件をすべて満足する電源方式として，シリーズ・シャント並列 + α 電源方式を提案した．以降，この電源方式を改善電源と呼ぶ．この回路図を図 4.1 に示す．理想電源条件 1 に対しては，シリーズレギュレータが対応し，条件 2 については，シャントレギュレータがその役割を果たし，条件 3 に関しては α 回路で対策を行う．詳細を以下に述べる．

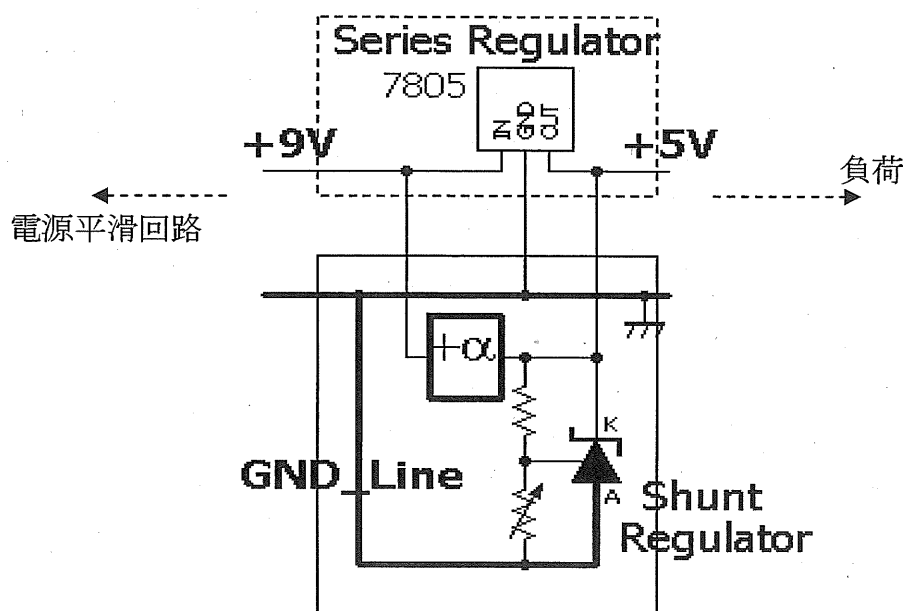


図 4.1：シリーズ・シャント並列 + α 電源

シリーズレギュレータ（図 4.1・破線部）は、幅広い用途に向いている、最も一般的な電源供給方法である[38-39]。以降、従来電源と呼ぶ。これは、電流を押し、即ち“供給”の働きをする。通称 78 シリーズの名で、IC パッケージ化されており、コストや回路設計の容易さから、ほとんどの音響再生装置の電源がこの方式を採用している。詳細は付録 C.1 節に示す。

一方、シャントレギュレータ（図 4.1・実線部）は、負荷に多くの電流が必要な時に、制御素子側の電流を少なくし、負荷が少ない電流で済む時、制御素子側の電流を多くすることが可能な電源方式である[38-39]。また、「シャント」は分流の意味であり、負荷に対して並列に接続される。これらのことから、電流を引く“吸収”働きをする。詳細は付録 C.2 節に示す。

このシリーズレギュレータとシャントレギュレータを併用することで、理想電源の 2 条件を満足することが出来るが、電源の瞬時変化で気絶したシリーズレギュレータに代わって電流を供給する α 回路を追加した。この α 回路の内部構成は、抵抗もしくは、定電流ダイオードで構成され、この回路を追加することで平滑回路から直接シャントレギュレータ部に電流を供給することが出来る。すなわち、シリーズレギュレータに瞬発的な変動が起き、シリーズレギュレータの気絶状態が発生しても、シャントレギュレータの安定動作が期待でき、理想電源条件 3 を満たすような電源方式となった。これは、様々な外乱による電源変動に対応できるオーディオ装置の電源回路に理想的な電源方式であると考えている。

そこで、本研究ではこの実証実験を行うため、提案された改善電源を、デジタル音響再生装置の電源に対して採用し、音質主観評価実験を行った。

4.3 改善電源の音質主観評価実験

4.3.1 音質主観評価実験の条件

ここでは、改善電源を D/A Converter（Philips 社製 LHH-1002）の電源に用いて、その再生音に対して音質主観評価を行った。LHH-1002 は、内部の電源部が、アナログ回路用とデジタル回路用に分けられ、デジタル回路用の電源部のみに、改善電源を適用可能であることから選択した。評価実験の条件を表 4.1 に示す。また、使用した機器名を表 4.2 に記し、これらの機器を図 4.2 の構成により実験した。

表 4.1：改善電源の音質主観評価実験の条件

実験場所	JAIST AV 評価実験室
被験者人数	7名
評価尺度	7段階評価尺度 ITU-R[32]に準拠
評価項目	総合評価, “空気感”, “Holographic 音場感”, “音の締まり”, “力強さ”, “音の重心の低さ”
評価音源	1. Enya, Water Mark, WEAMUSIC,25P2-2465, Track No.12, 内容：声, シンセサイザー 2. Hooked on DIXIE, 内容：DIXIE JAZZ
評価方法	従来電源の再生音を基準, 改善電源の再生音を評価

評価場所, 実験手順などの詳細な条件は 3.2 節で述べたものとほぼ同一であるため, ここでは詳細は割愛する. 音質主観評価実験は, JAIST AV 評価実験室で行い, 評価者には, あらかじめ, “深い感性” の情報再現に関連する評価語群の意味を説明した. 被験者数は安定な評価をする成人 7 名 (男性 5 名, 女性 2 名) とした. 用いた評価語[27-28]は, 総合音質と, “空気感”, “Holographic 音場感”, “音の締まり”, “力強さ”, “音の重心の低さ” であり, これらの評価語を 7 段階の主観評価尺度により評価した. “空気感” は, 身体が音に包み込まれ漂う雰囲気を感じる, 肌に音が当たるような感覚を表す. “音の重心の低さ” は, ただ単に周波数が低くだけで無く, “ズシン” とした重さを伴った音の響きを表す. “音の締まり” は, 音の芯がしっかりとしている感覚などを表す. “Holographic 音場感” は, 平面的な音場だけでなく, 奥行きまでも含んだ形で音場が再現されている感覚である. “力強さ” は, 音がこちらに向ってくる感覚, 文字通り, 音の強さを表す感覚である.

これらの条件下で, 従来電源の時の再生音を基準として, 改善電源の再生音を評価した. なお, 改善電源と従来電源の切り替えは, シャントレギュレータ部分を, D/A Converter を駆動するシリーズレギュレータに簡便に接続できるよう工夫した.

表 4.2 : 改善電源の音質主観評価実験に使用した機器

音響再生機器	CD Transporter	Philips LHH-1001 改造品
	D/A Converter	Philips LHH-1002 改造品
	Amplifier	Musical Fidelity A1 改造品
	Speaker	宮原研製 10cm フルレンジ Speaker (特別仕様品), ユニット : 10cm フルレンジ, (高能率, 高感度, 高 Q), アルニコ磁石, エンクロージャ : 4l, バスレフ型
	Audio Cable	FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S
	Speaker Cable	MOGAMI NEGLEX 2804
	Pin Plug	MOGAKI 7551 (スリーブ除去)
付加改善電源	シリーズ・シャント並列 + α 電源	シャント部に NEC μ PC1093, α 部に石塚電子定電流ダイオード E-153 を用いて自作

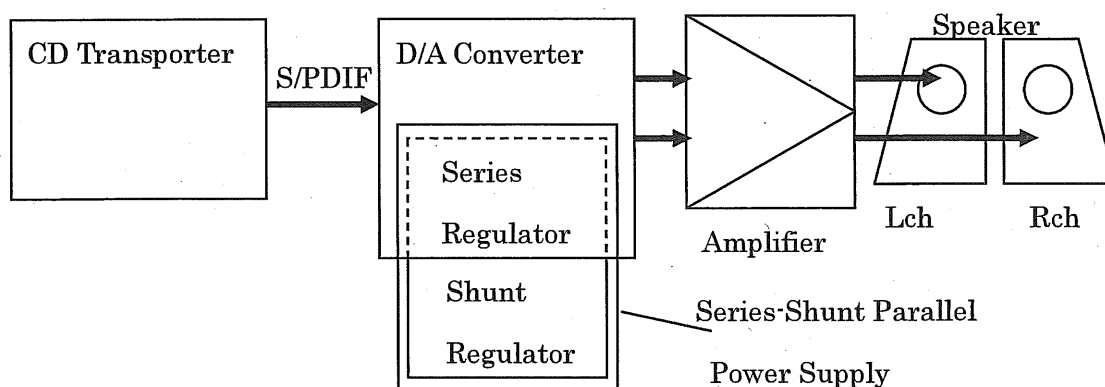


図 4.2 : 改善電源の評価に用いたシステムの構成

4.3.2 音質主観評価実験の結果

主観評価実験の結果を表 4.3 に示す。各評価語の評価値は、被験者 7 名の評価の平均値を表している。

この結果より、改善電源は、従来電源に比べて、どの音質評価語に対しても概ね +2 の改善を得ていることが解る。特に“空気感”，“Holographic 音場感”，“音の締まり”に関しては+2 以上の改善を得た。この実験においては、被験者に対して、あらかじめ、充分、人間の“深い感性”に働きかける情報に関する音質評価語の説明を行ったが、この評価の初体験者が 4 名含まれている。しかしながら、概ね+2 の改善効果を得たため、改善電源の提案は成功したといえるだろう。

表 4.3：改善電源の音質主観評価の結果

評価語	音源 1 の評価 MOS (SD)	音源 2 の評価 MOS (SD)
総合音質	1.9 (0.83)	1.9 (1.12)
空気感	1.9 (0.64)	2.1 (0.83)
Holographic 音場感	2.0 (0.76)	2.0 (0.53)
音の締まり	2.1 (0.64)	2.4 (0.73)
力強さ	1.9 (0.99)	1.7 (0.88)
音の重心の低さ	1.9 (0.99)	1.3 (1.03)

これらの音質上での改善（心理的評価）を受け、次節では、改善電源を用いた場合の D/A Converter のアナログ出力信号を測定することで、物理的特性を明らかにしようと考えた。

4.4 改造電源使用時の D/A Converter の アナログ出力信号測定

前節の主観評価実験の結果より、2 種類の電源方式の間に明らかな音質差 (+2) が確認されたことを受け、各機器のアナログ出力信号にも当然差が観測できると考えた。そこで、改善電源・従来電源、合計 2 種類の電源方式を D/A Converter に用

いたときの各種アナログ出力信号の測定・解析を行った。この測定実験に用いた機器を表 4.4 に、その構成を図 4.3 に示す。

図 4.3 中の①～④は測定ポイントをあらわしている。それぞれの測定内容は以下のとおりである。

①D/A Converter IC の電源(+5V)

D/A Converter IC の電源電圧+5V を測定し、電源の電圧変動を観測した。

②D/A Converter のアナログ出力信号

主観評価で明確な音質差があることから、当然、D/A Converter のアナログ出力信号にも差がでていいると考え、測定したが、明確な差として判断できるものはなかった。

③Amplifier のアナログ出力信号

D/A Converter のアナログ出力信号で差がでなかったため、Amplifier の信号であれば、物理的差も増幅されて、判断できるのではないかと考え測定した。

④Speaker からの再生音

音質主観評価実験では Speaker からの再生音を聴いているので、Speaker 出力をマイクで測定することで、何らかの差異が観測できると考えた。

表 4.4 : D/A Converter のアナログ信号測定に用いた機器

音響再生機器	CD Transporter	Philips LHH-1001 改造品
	D/A Converter	Philips LHH-1002 改造品
	Amplifier	Musical Fidelity A1 改造品
	Speaker	宮原研製 10cm フルレンジ Speaker
	Audio Cable	FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S
	Speaker Cable	MOGAMI NEGLEX 2804
	Pin Plug	MOGAKI 7551 (スリーブ除去)
測定器	時間波形記録器	横河電機 Scopocoder DL-750
	Microphone	小野測器 MI-3310
	Mic Amp	小野測器 SR1100

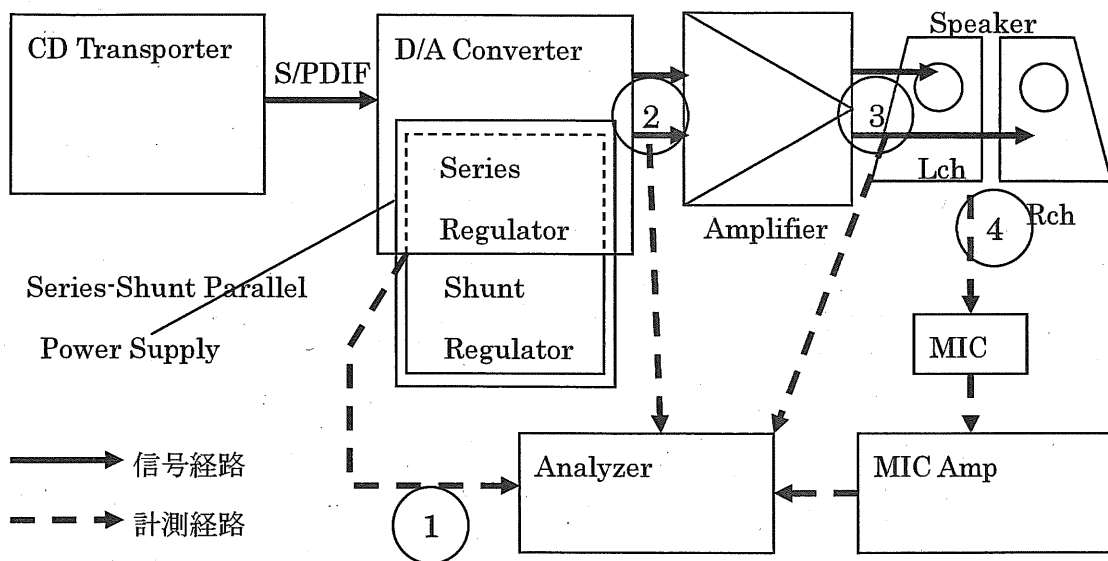


図 4.3 : 改善電源の測定に用いたシステムの構成

これらの測定結果の中から、特に 2 種類の電源使用時の差が観測された、D/A Converter のアナログ出力信号の周波数スペクトラムを図 4.4 に示す。入力信号は評価音源 2 における、アナログ出力信号で、0s~10s までの 10 秒間である。即提示の条件として、サンプリング数は 5000/s, 試行回数は 3 回, 窓幅は 4096 (約 1 秒) とした。

図 4.4 より、5Hz 付近以下で、両者に 3dB の差が観測できた。おそらくこの差が、音質評価の差と関係があると考えられるが、約 “+2” の明確な差と直接的に関係があるとはいえない。

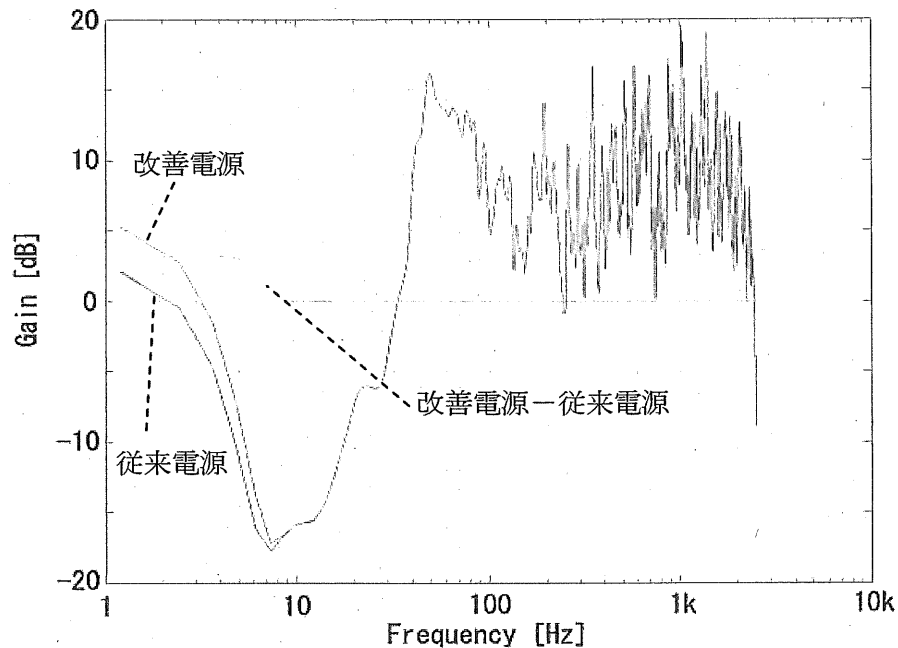


図 4.4 : D/A Converter のアナログ出力信号の周波数スペクトラム
(改善電源・従来電源使用時)

主観評価実験においては、明確な音質差（約+2）が観測できたにもかかわらず、これらの測定・解析では、その音質差に直接的に関係するような物理量の明確な差が観測できたとはいいい難い。原因として以下が考えられる。

1. 測定器の精度が足りなかった。

（サンプリング周波数 1MHz, 量子化ビット数 16bit が限界精度）

2. 音響再生装置が含む多数の複雑な系が互いに影響していたことより、その差がノイズフロアに埋もれてしまった可能性が考えられる。

これら結果と考察を受け、D/A Converter における余計な系を取り除き、電源回路部だけに注目した実験を行う必要があった。そこで、実験に用いた D/A Converter である LHH1001 の電源回路部を模擬した回路を作成し、作成回路に対して、模擬的にトランジェントな変動を与えることにより、改善電源の物理的特性を評価しようと考えた。

4.5 改善電源の電源変動測定

4.5.1 電源変動測定の実験条件

4.3 節で述べた音質主観評価実験により、2つの電源方式の間に明らかな音質差(+2)を確認できたことから、4.4 節では、D/A Converter のアナログ出力信号にも当然差がでると考え、その測定を行った。しかしながら、測定結果は、この大きな音質差と直接的に関係があるとはいえない結果であった。

そこで、本節においては、より明確な物理特性の差を明らかにするため、D/A Converter IC の電源部分(従来電源, 改善電源)を模擬した試験電源回路を作成し、この電源回路に対して測定を行うことを考えた。具体的には、D/A Converter IC の電源部分に起こる変動は、デジタル信号上の jitter および、デジタル信号そのものに起因するとの推測から、模擬電源回路に対して、矩形波を入力し、その変動を観測することで、改善電源の物理的特性を評価しようと考えた。電源変動測定実験に用いた機器の構成を図 4.4 に示す。

改善電源は、電流の“供給”と“吸収”を達成しているものである。一方で、デジタル信号上の jitter の影響を抑制するために考案したものでもある。これらの理由から、模擬電源回路に与える電源変動には、高い周波数成分までを含んだトランジェントな時間波形の立ち上り、立ち下りを充分観測できることが要求される。そこで、HP 社製 Function Generator 3312A により、200Hz, pp2V の矩形波系を発生させ、+5V の電源電圧に意図的に与えた。このときの従来電源、改善電源の電源変動を、時間波形により測定した。

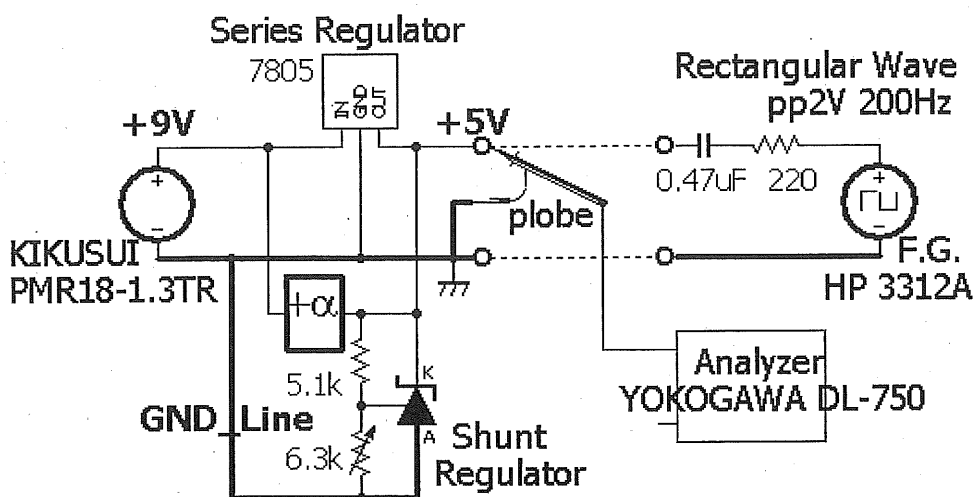


図 4.4 : 電源変動測定実験の構成図

4.5.2 電源変動測定の実験結果

従来電源における電源変動の時間波形を図 4.5 に、改善電源のものを図 4.6 に示す。グラフの横軸は時間で単位は ms である。左縦軸は電源変動に対する電源の応答 (単位: V) で、その時間波形は図中の実線部分である。一方で、右縦軸は与えた矩形波の電圧で、時間波形は図中破線で表している。

図 4.5, 図 4.6 を見比べると、一見で解るほど変動の立ち上り・立ち下り両方の応答に差異が観測された。詳細を以下に説明する。

従来電源の応答 (図 4.5) に関して、立ち上り部分 (図中 A) の電圧値は約 1.28V であり、立ち下り部分 (図中 B) は約 -0.26V であった。一方で、改善電源の変動に対する応答 (図 4.6) は、立ち上り部分 (図中 C) の電圧値は約 0.01V であり、立ち下り部分 (図中 D) は約 -0.08V であった。

与えた矩形波入力は、電源に対して負荷側から与えているため、矩形波の立ち上り部分は、電源の“吸収”能力を表している。一方、立ち下り部分は、“供給”能力を表している。このことから、単純に見積もると、両電源の立ち上り・立ち下り部分を比較すると、改善電源の“吸収”能力は、従来電源に比べて約 100 倍、“供給”能力は約 3 倍の改善であった。このことから、改善電源は、吸収能力が改善しているばかりか、供給能力も改善していることになり、理想電源条件 3 で述べた、瞬時気絶状態のシリーズレギュレータ対策の α 回路の効果が表れたと考えられる。

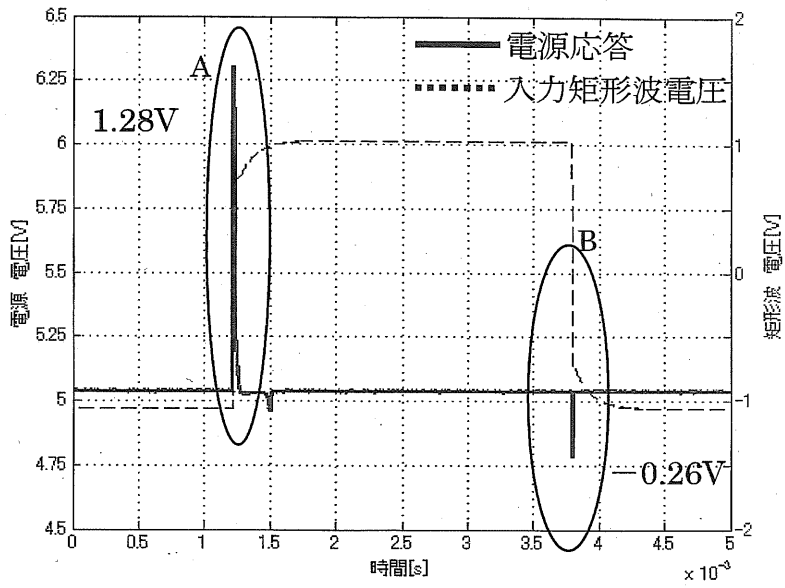


図 4.5 : 従来電源の電源電圧時間波形

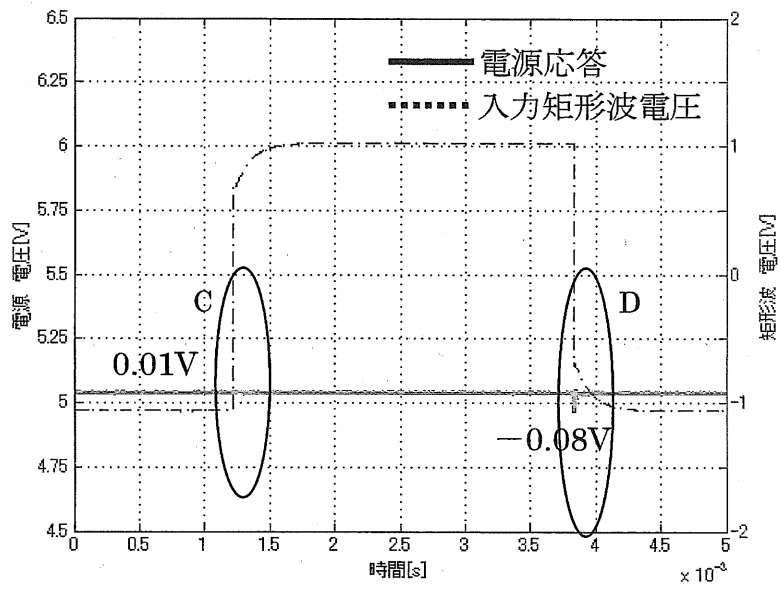


図 4.6 : 改善電源の電源電圧時間波形

4.6 改善電源に関する実験のまとめと考察

前章の jitter に関する実験結果から、デジタル音響再生装置には、理想的な電源が必要であることが推測された。このことから、本章では、理想電源条件を満足する「シリーズ・シャント並列+ α 電源」を提案し、この実証実験を行った。4.2節の音質主観評価において、改善電源は、従来電源に比べて、すべての音質評価語に対して約“+2”の改善を得た。特に、“空気感”、“Holographic 音場感”、“音の締まり”が改善していた。音質の主観評価において、これだけの音質の改善を得たため、当然、D/A Converter のアナログ出力信号に何らかの差異が観測できるはずと考え、測定・解析を行った。この結果より、D/A Converter のアナログ出力信号のパワースペクトルにおいて、5Hz 付近に約 3dB の差が観測された。この測定結果は、“+2”の音質差に関係があると考えられるが、明確な差とはいえない。このことから、より明確な物理量を発見するため、4.3節では、D/A Converter IC の電源回路部分を模擬し、負荷側から強制的に矩形波の電圧変動を加え、改善電源のトランジェントな電源供給能力と、吸収能力を測定した。この結果、改善電源は従来電源に比べて、約 100 倍の電源吸収能力、約 3 倍の電源供給能力があることが解った。

次に、これらの結果を、前章で述べた jitter に関する実験を踏まえて考察する。

改善電源にトランジェントな変動を与えたところ、従来のシリーズレギュレータに比して、電源吸収・電源供給のどちらの能力とも改善していた。一方で、一般的に、デジタル信号を司る IC の電源には、スパイク状のノイズが載ることが明らかにされている[40]。このことから、改善電源は、D/A Converter IC 内で起きるトランジェントな変動を抑制していると推測できる。また、音質主観評価に注目すると、デジタル信号上の jitter は、特に“空気感”の再現を劣化させることが解っており、改善電源の音質主観評価においても、“空気感”再現が改善していた。このことから、改善電源は jitter の影響を抑制している可能性が伺える。

これらのことから、本章で述べた実験により、jitter の影響は、D/A Converter 内部かそれよりも前段において、電源経路を介して伝播していく可能性が示唆された。すなわち、推測の域を出ないが、jitter は音質劣化間接的要因であること、さらには、D/A Converter の経路のどこかで、時間方向の歪が、振幅方向に変換され

て、伝播している可能性が示唆された。

また、本研究で提案された改善電源の効果を確認するため、価格帯の異なる 3 種類のデジタル音響再生装置に適用したところ、いずれの場合も良好な音質改善（概ね+2以上）を得た。詳細を以下に示す。改善電源の適用を行ったのは、YAMAHA 社製 CDR-HD1300、47 研社製 D/A Converter 4715、AVOX 社製 ADS-300V である。CDR-HD1300 は、通常の CD Player の機能に、HD、CD-R へのダビング及び再生機能が備わっている高級機である。47 研 4715 は、搭載する部品点数を可能な限り少なく（IC や周辺回路のコンデンサ、抵抗など、約 20 点）し、D/A Converter の機能のみを持たせている機器である。ADS-300V は、数千円で購入可能な DVD Player である。これらの価格帯や回路方式など種々の条件が異なるデジタル音響再生装置に改善電源を適用し、音質の改善効果を得た。したがって、改善電源は、デジタル音響再生装置にとって、最適な電源方式であると考えられる。

第5章

本論文の結論と今後の展望

5.1 本研究の結論

本論文では、人間に感動を喚起させるための、音楽演奏に含まれる深い感性（高度感性情報）の忠実な再現が可能な音響再生装置の開発を大目的とし、その中でも、とりわけデジタル音響再生装置における音質を改善することを目的として研究を進めてきた。

まず、3章の デジタル信号上の jitter に関する実験において、以下2つの事実が明らかになった。

- ・ RF 信号で発生した jitter は、音質を劣化させるが、D/A Converter のクロックの jitter はいかなる場合でも約 300ps と一定であった。このため、RF 信号の jitter は、D/A Converter のクロックとは直接的な関係が観測されなかった。

- ・ Bit Stream に故意に付加した jitter も、音質を劣化させたが、やはりいかなる場合でも約 300ps と一定であった。このことから、Bit Stream の jitter も D/A Converter のクロック jitter と直接的な関係が無かった。

すなわち、RF 信号の jitter や、Bit Stream へ付加した jitter が音質劣化を引き起こしたとしても、D/A Converter のクロックにおける jitter は PLL により安定化されている。そのため、jitter による音質劣化は、D/A 変換以外の経路を介して引き起こされていると考えられる。以上、RF 信号の jitter、Bit Stream の jitter など、D/A Converter よりも前段に起こる jitter は音質劣化と間接的な関係にあることが示された。また、これらを考察して、jitter の影響は電源回路から伝播している可能性を推測した。

この推測を元に、理想的な電源回路により、jitter の影響を抑制しようと考え、4章において、理想電源条件を満足する「シリーズ・シャント並列+ α 電源」を提案し、この実証実験を行った。ここでは以下2つの事実が明らかになった。

- ・ 音質主観評価において、改善電源は、従来電源に比べて、すべての音質評価語に対して約“+2”の改善を得た。特に、“空気感”、“Holographic 音場感”、“音の締めまり”が改善していた。

- ・ D/A Converter IC の電源回路部分を模擬し、負荷側から強制的に矩形波の電圧変動を加え、改善電源のトランジェントな電源供給能力と、吸収能力を測定した。この結果、改善電源は従来電源に比べて、約 100 倍の電源吸収能力、約 3 倍の電源供

給能力があることが解った。

これら電源に関連した実験結果と、jitter に関連した実験結果を考察し、改善電源は jitter の影響を抑制している可能性、更には、jitter は音質劣化の間接的要因であることから、D/A Converter の経路のどこかで、時間方向の歪 (FM・PM) が、振幅方向 (AM) に変換されて、伝播している可能性が示唆された。

すなわち、「デジタル信号の jitter の影響は、D/A Converter IC のいずれかの部分で、FM が AM に変換され伝播していること」が、jitter が音質に影響する仕組みであり、正体であると考えられる。

5.2 今後の展望

本論文の成果を受けて、今後行う研究について説明する。

改善電源の他の音響再生装置への応用

本研究において提案された改善電源は、トランジェントな変動があっても、その影響を抑制している効果があることが解った。また、既存の音響再生装置の電源部に後付することも可能である。D/A Converter IC は、既に IC のパッケージ化がなされており、この内部構成を改善するのは困難であるが、改善電源方式であれば、回路設計時にこの電源を適用すればよい。したがって、すべてのデジタル音響再生装置に対して、この改善電源方式が有効であると考ええる。このことは、4.6 節で述べた他のデジタル音響再生装置への応用でも改善効果を得ていることからも期待できる。現在、Apple 社の iPod をはじめとした携帯型オーディオや、5.1ch サラウンドシステムなど、機能を十分に満たしたデジタル音響再生装置が隆盛である。さらに、今後、ネットワークインフラの発展により、インターネットを用いたより高品質なリアルタイムライブ配信の実現は必至であると考ええる。改善電源は、これらの次世代のデジタル音響再生装置に対しても、音質向上・改善の寄与が出来ると思われる。

トランジェントな電源変動が問題となるのは、CD Player をはじめとするデジタル音響再生装置だけでなく、Amplifier や LP Record Player など、他のアナログ機器においても同等であると考ええる。実際、High, Low の 2ch スピーカ用のチャ

ンネルディバイダへの適用をしたところ、7段階評価のうちで“+2”以上の改善が得られている。また、再生装置の問題は、当然ながら、録音装置の問題にも置き換えることが出来る。このことから、他の様々な装置に対しても、適用が可能であると考えられる。したがって、改善電源を用いることは、録音から再生にわたり、高忠実再生を目的とした音響再生装置にとって、効果が見込め、高度な芸術性を持った作品制作に対して寄与できるものと考えられる。

高忠実画像再生装置への適用

信号がデジタルからアナログに変換されて、再生されるのは、音響再生装置に限ったことではなく、画像再生装置においても同じである。例えば、高品位画像再生装置においては、それぞれの画素に含まれる、R（赤）・G（緑）・B（青）チャンネルのチャンネルセパレーションやステップレスポンスが問題になっている[41]。また、画像再生装置の D/A Converter は、音響再生装置用のものに比べて、伝送すべき情報量が多く、より高速動作をしている。このことから、音響再生装置以上に、ノイズ・変動の除去が必要である。したがって、改善電源は画像再生装置に適用しても、その効果が十分に期待できると考える。

人間に対する癒し機器の開発

ストレス社会である現代社会において、人に癒しを与えるようなシステム開発・研究は重要な課題といえる。この中で、音楽療法や、回想法など、音楽や画像刺激を行うことで、人に癒しを与えるシステム・方法等が考案され、効果を挙げてきている。また、人に癒しを与える装置の音楽再生において、ただ音楽が再生されれば良いだけでなく、音響再生装置の品質も重要な要因であることが明らかになってきている[42-43]。このため、本研究の成果を踏まえて、音響・画像再生装置を開発し、癒しを与えるシステムに応用することが大変重要であると考えられる。

謝辞

本研究の機会を与えていただき、私が本研究を遂行するにあたり、長年において、研究に対する哲学、アイデア、方法など、暖かく、厳しく、懇切なご指導いただき、また、貴重な研究費の中から多大なる援助を賜りました北陸先端科学技術大学院大学名誉教授、中央大学研究開発機構 教授、宮原 誠 博士に深甚なる感謝の意を表します。「jitter は音質劣化のインデックスであり、電源を介して伝播するのではないか」、「理想的な電源の条件」など、本研究のオリジナルアイデアは、宮原教授によるものです。本論文はこれらのアイデアの実証実験を行いました。重ねて感謝申し上げます。

本論文を執筆するにあたり、きめ細やかなご指導ならびにご鞭撻、また、貴重な研究費の中から多大なる援助を賜りました、北陸先端科学技術大学院大学 教授、党 建武 博士に深甚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるに当り、草稿段階から、貴重なご助言ならびにご指導を賜り、また、貴重な研究費の中から多大なる援助を賜りました、北陸先端科学技術大学院大学 教授 赤木 正人 博士に深謝の意を表します。

本論文をまとめるに当り、草稿段階から、貴重なご助言ならびにご指導を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 准教授 徳田 功 博士、准教授 吉高 淳夫 博士、東京情報大学 教授 小泉 宣夫 博士に深謝の意を表します。

本研究の推進および本論文の執筆において、長年にわたる多大なご助言、ご指導・ご鞭撻を賜り、また、先輩・後輩の関係を越えて、多大なる激励・援助を賜りました、北陸先端科学技術大学院大学 助教 石川 智治 博士とそのご家族に深謝の意を表します。

本研究を推進するに当り、多大なるご助言、ご指導・ご鞭撻を賜りました、小山工業高等専門学校 教授 小林 幸夫 博士、岩手県立大学 准教授 亀田 昌志 博士、仏国立科学研究センター 剣持 雪子 博士、北陸先端科学技術大学院大学 助教 末光 厚夫 博士に深謝の意を表します。

また研究生活面での多大なるご助言・ご指導を賜りました、北陸先端科学技術大

参考文献

- [1] 日本オーディオ協会編, “オーディオ 50 年史”, 日本オーディオ協会, 1986.
- [2] 日本オーディオ協会編, “デジタルオーディオ事典”, オーム社, 1989.
- [3] 土井 利忠, 伊賀 章, “デジタル・オーディオ –基礎理論と最新技術–”, ラジオ技術社, 1982.
- [4] 中島 平太郎, “コンパクトディスクオーディオ談義”, 東洋経済新報社, 1986.
- [5] 中島 平太郎, 小川 博司, “図解コンパクトディスク読本”, オーム社, 1996.
- [6] 早坂 寿雄, “技術者のための音響工学”, 丸善株式会社, pp. 20-35, 1986.07.
- [7] Julian Dunn, Ian Dennis, “The Diagnosis and Solution of Jitter-Related Problems in Digital Audio Systems”, the 96th AES Convention Amsterdam, 1994.02.
- [8] Julian Dunn, “Measurement Techniques for Digital Audio”, Audio Precision Application Note #5”, 2001.
- [9] 冬木 真吾, 小林 幸夫, 石川 智治, 宮原 誠, “デジタル音楽信号の jitter に起因する高度感性情報の欠落 – “雰囲気”, “空気感” (深々さ) の激減衰化-”, 信学技報, EA97-104, pp. 9-16, 1998.03.
- [10] 宮原 誠, “新世代オーディオ: 音響・音楽の高度感性情報知覚モデル –信号の時間伸び縮み歪と digital 音–”, 信学技報, EA98-20, pp. 23-30, 1998.06.

- [11] 小林 幸夫, 赤堀 肇, 宮原 誠, “高度感性情報を損なうデジタル信号ジッタの影響”, 信学技報, CQ99-48, pp. 7-13, 1999.12.
- [12] 赤堀 肇, 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “デジタル・オーディオ・インターフェース (AES/EBU) の jitter と音質の関係”, 信学技報, EA90-40, pp. 1-8, 1999.08.
- [13] 三井 実, 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “空気感再現とデジタルビットストリーム上の jitter との関係”, 信学技報, EA2001-60, pp. 73-80, 2001.10.
- [14] 蘆原 郁, 桐生 昭吾, “時間ゆらぎによる歪のシミュレーション”, 信学会境界ソサイエティ大会, pp. 315-316, 2000.09.
- [15] 蘆原 郁, 桐生 昭吾, “デジタルオーディオの時間ゆらぎによる音質変化シミュレーション”, 日本音響学会誌, 58, pp. 232-238, 2002.04.
- [16] 蘆原 郁, 桐生 昭吾, 佐藤 宗純, “デジタルオーディオにおける時間ゆらぎ許容値および検知閾”, 日本音響学会誌, 59, pp. 241-249, 2003.05.
- [17] 西村 明, 小泉 宣夫, “解析信号を用いたサンプリング・ジッター測定における測定精度の検討”, 信学技報, EA2002-65, pp. 41-45, 2002.10.
- [18] 西村 明, 小泉 宣夫, “デジタル・オーディオ機器におけるサンプリング・ジッターの諸様相とその要因”, 信学技報, EA2003-49, pp. 9-15, 2003.07
- [19] 西村 明, 小泉 宣夫, “デジタル・オーディオ機器におけるサンプリング・ジッターの諸様相とその要因”, 東京情報大学研究論集, Vol. 7, No. 2, pp. 79-92, 2004.

[20] 小泉 宣夫, “次世代オーディオの研究課題と展望 –ハイディフィニション・オーディオ調査研究に関連して–”, 音響学会資料, Vol. 36, No. A, pp. A1-A6, 2006.08.

[21] 日本オーディオ協会 AA 懇話会, “次世代オーディオへの課題と提言 ~次世代オーディオに関する調査研究報告書~”, 日本オーディオ協会, 1999.01.

[22] B.P.Lathi, “COMMUNICATION SYSTEM”, John Wiley & Sons, Inc., pp. 111-147, 1968.

[23] 北島 宗雄, 宇津木 明男, “人間の感覚・感性を測定する”, 電子情報通信学会誌, Vol. 76, No. 3, pp. 242-245, 1993.03.

[24] “未来映像・音響の創作と双方向臨場感通信を目的とした高品位 Audio-Visual System の研究 Project”, 日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業, マルチメディア高度情報通信システム研究推進委員会中間報告, JPSP-RFTF97P00601, 1997-2001.

[25] 宮原 誠, “高度感性情報 (深い感動) を伝達する画像・音システム”, 学術月報, Vol. 54, No. 4, pp. 28-34, 2001.04.

[26] 石川智治, 宮原誠, “「深い感動を再現」の評価を得た芸大でのデモシステム Extra HI System M ”, 映情学技報, 深い感性のテクノロジー時限研究会資料, pp. 1-8, 2004.01.

[27] 石川 智治, 冬木 真吾, 宮原 誠, “音質評価語の多次元空間におけるグルーピングと総合音質に重要な評価語”, 信学論, 80, 11, pp. 1805-1811, 1997.11.

[28] Tomoharu Ishikawa, Makoto Miyahara, “Hierarchical Structure of Assessment Words for the Evaluation of Information of High Order Sensations of Musical Sound”, KANSEI2001, 2001.10.

[29] 宮原 誠, “新・電気音響再生論・新世代オーディオ 高忠実に演奏音（演奏者のこころ）を再現する-”, ラジオ技術, 2007.01.

[30] “デジタルオーディオインタフェース”, EIAJ, CP1201, 1992.03.

[31] 柳沢 健, “PLL（位相同期ループ）応用回路”, 総合電子出版, 1977.09.

[32] Recommendation ITU-R BS.562-3, “Subjective assessment of sound quality”, 1990.

[33] 宮原 誠, 守田 幸徳, “音質を表現する評価語の調査分析”, 日本音響学会会誌, 52, No. 7, pp. 516-522, 1996.07.

[34] 會田 裕矢, “CD プレーヤーの電源と音質の関係”, 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, 2005.03.

[35] 宮原 誠, “高品位 Audio-Visual System -先端インフラの研究-”, オーディオビジュアル複合情報処理, 13-6, pp. 39-46, 1996.06.

[36] “AUDIO.TST SYSTEM ONE & TWO NEWSLETTER”, Audio Precision, Vol11, No.1, 1996.

[37] 宮原 誠, 特許 “発明の名称：電源回路及びデジタル・アナログ変換器, 並びに電子機器”, 出願番号：特許出願 2006-081709 号, 公開番号：特許公開 2007-259153

[38] 清水和夫：“安定化電源回路の設計”，CQ 出版株式会社，1971.

[39] 戸川 治朗，“実用電源回路ハンドブック 整流回路からスイッチングレギュレータまで”，CQ 出版社，1988.05.

[40] 坂本 幸夫，“よくわかる電源ラインの EMC・ノイズ対策設計”，日刊工業新聞社，2006.08.

[41] 白井 英樹，亀田 昌志，宮原 誠，“高品位画像システムの実現に向けて ー”
奥行き感”の設定とディスプレイに関連する物理要因の基礎技術ー”，画像符号化シ
ンポジウム (PCSJ98)，pp. 5-14，1998.10.

[42] 石川 智治，野澤 昭雄，三井 実，水野 統太，今井 啓介，井出 英人，宮原 誠，
“心理・生理計測による音再生システムの客観評価指標の検討”，映像情報メ
ディア学会誌，Vo. 61，No. 6，pp. 825-827，2007.06.

[43] 石川 智治，野澤 昭雄，水野 統太，三井 実，今井 啓介，井出 英人，宮原 誠，
“深い感性の客観評価指標の検討ー音再生における評価語と生理特性との関係
ー”，日本感性工学会研究論文集，第 7 卷 4 号，pp. 727-731，2008.06.

付録

付録 A : 実験に用いた音響再生機器の改造点

A.1 CD Player および, CD Transporter に関する改造点

A.1.1 CD Player Marants 社製 CD-34 の改造点

- ・電源部の平滑コンデンサを吟味して, Panasonic 社製 X-pro twin (容量: 12,000uF 耐圧 63V) に交換. 更に, 再生音質を加味して電源部マイナス側に Panasonic 社製 フィルムコンデンサを並列接続. また, コンデンサの支持方法を考慮.
- ・整流ダイオードを低ノイズタイプのものに交換.
- ・回路内の一部のコンデンサを吟味した高品質品 ELNA 社製 電解コンデンサ Cerafine のバイポーラ接続および, ASC 社製ポリプロピレンコンデンサに交換.
- ・筐体の点支持, および, 錘による補強を行い, 機器のいたる部分に起こる定在波振動を考慮.
- ・電源ケーブルをオヤイデ社製 L/i-50, 電源プラグを明工社製丸型ゴムプラグに交換.
- ・アナログ出力ケーブルを FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S, RCA ピンプラグをスリーブ除去した MOGAKI 7551 に変更. なお, これは回路から直接接続している.

A.1.2 CD Transporter CEC 社製 TL-5100 の改造点

- ・筐体一部の切除
- ・筐体の点支持, および, 錘・大理石による補強を行い, 機器に起こる定在波振動を考慮.
- ・電源ケーブルを Neglex2514 に変更し, 二つの線をよじりブチルゴムでまとめる. また, 電源プラグを明工社製丸型ゴムプラグに交換.
- ・RF 信号の整形回路のコンデンサを銅ースチロールコンデンサに変更.
- ・デジタル出力ケーブルを FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S, RCA ピン

プラグをスリーブ除去した MOGAKI 7551 に変更.

- ・ 不要な回路および回路基板を取り除く.

A.1.3 CD Transporter Philips 社製 LHH-1001 の改造点

- ・ 筐体一部の切除.
- ・ 筐体の点支持, および, 錘による補強を行い, 機器に起こる定在波振動を考慮.
- ・ 電源ケーブルをオヤイデ社製 L/i-50, 電源プラグを明工社製丸型ゴムプラグに交換.
- ・ デジタル出力ケーブルを FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S, RCA ピンプラグをスリーブ除去した MOGAKI 7551 に変更.
- ・ 回路内の一部のコンデンサを吟味した高品質品 ELNA 社製 電解コンデンサ Cerafine のバイポーラ接続および, Panasonic 社製コンデンサ X-Pro に交換.
- ・ 不要な回路および回路基板を取り除く.

A.1.4 CD Transporter Teac 社製 P0 の改造点

- ・ 本体および, 電源部筐体の天板を真鍮製 (暑さ 5mm) に変更.
- ・ 電源ケーブルをオヤイデ社製 L/i-50, 電源プラグを明工社製丸型ゴムプラグに交換.

A.2 D/A Converter の改善点

A.2.1 CEC 社製 DX-51 の改造点

- ・ 筐体一部の切除.
- ・ 筐体の点支持, および, 錘・大理石による補強を行い, 機器に起こる定在波振動を考慮.
- ・ 電源ケーブルを Neglex2514 に変更し, 二つの線をよじりブチルゴムでまとめる. また, 電源プラグを明工社製丸型ゴムプラグに交換.

- ・電源部の平滑コンデンサを吟味して、Panasonic 社製 X-pro twin (容量: 12,000uF 耐圧 63V) に交換. 更に, 再生音質を加味して電源部マイナス側に Panasonic 社製 フィルムコンデンサを並列接続. また, コンデンサの支持方法を考慮.
- ・デジタル出力ケーブルを FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S, RCA ピン プラグをスリーブ除去した MOGAKI 7551 に変更.

A.2.2 Philips 社製 LHH1002 の改造点

- ・筐体一部の切除.
- ・筐体の点支持, および, 錘・大理石による補強を行い, 機器に起こる定在波振動を考慮.
- ・デジタル出力ケーブルを FUJIKURA RF Coaxial Cable 3C-2W/S, RCA ピン プラグをスリーブ除去した MOGAKI 7551 に変更. なお, これは回路から直接接続している.
- ・電源ケーブルをオヤイデ社製 L/i-50, 電源プラグを明工社製丸型ゴムプラグに交換
- ・不要な回路および回路基板を取り除き, 不要な定在波を防ぐため, 基板を丸くカット.
- ・接続する配線ケーブル, 製作の仕方の吟味.

A.3 Amplifier (Musical Fidelity 社製 A1) の改造点

- ・電源部の平滑コンデンサを吟味して、Panasonic 社製 X-pro twin (容量: 12,000uF 耐圧 63V) に交換. 更に, 再生音質を加味して電源部マイナス側に Panasonic 社製 フィルムコンデンサを並列接続. また, コンデンサの支持方法を考慮.
- ・回路内の一部のコンデンサを吟味した高品質品 ELNA 社製 電解コンデンサ Cerafine のバイポーラ接続, ASC 社製ポリプロピレンコンデンサ, 銅-スチロールコンデンサに交換.
- ・アイドリングカレントの厳密な調整.

- ・ボリューム部分を東京光音社製”P-2511S”に変更.
- ・サーボアンプの時定数を増大.
- ・不要な回路および回路基板を取り除き, 不要な定在波を防ぐため, 基板を丸くカット.
- ・筐体の点支持, および, 錘による補強を行い, 機器のいたる部分に起こる定在波振動を考慮.
- ・回路基板の吊り天井型支持への変更.
- ・筐体の点支持および, 補強を行い, 機器に起きる定在波振動を考慮.
- ・電源ケーブルをオヤイデ社製 L/i-50, 電源プラグを明工社製丸型ゴムプラグに交換
- ・接続する配線ケーブル, 製作の仕方の吟味.

付録 B : D/A Converter の電源変動に関する研究

ここでは、Marants 社製 CD Player CD-34 の D/A Converter における電源変動に関する測定結果[34]について説明する。2.4 節で述べたとおり、RF 信号の jitter と、トラックサーボ、フォーカスサーボは非常に関係が深い。このことから、RF 信号の jitter と D/A Converter の関係を明らかにするためには、これらの電源変動の測定が必要であった。

まず、D/A Converter の電源変動と、RF 信号に影響を及ぼす信号であるトラックサーボの電源変動との関係を図 B.1 に示す。この図は、両者の電圧変動を周波数スペクトルで表したものである。横軸は周波数、上側の特性は D/A Converter の電源変動を示すもので、左側縦軸が対応する。下側の特性はトラックサーボの電圧変動を示し、右側縦軸が対応する。

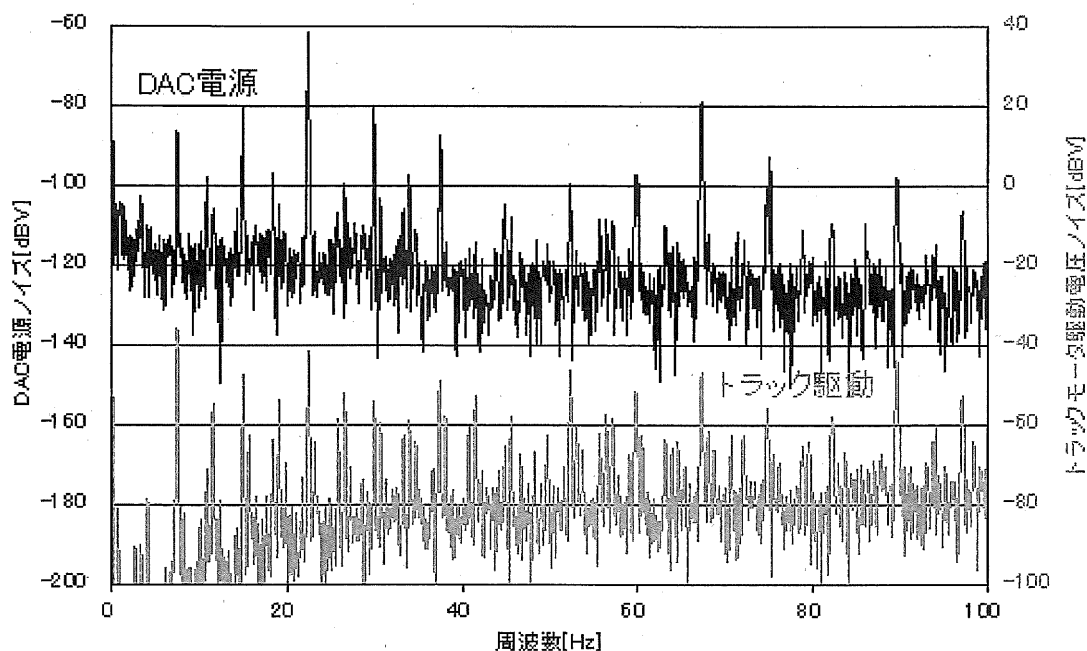


図 B.1 : D/A Converter の電源変動とトラックサーボの駆動電圧変動

図 B.1 より、D/A Converter の電圧変動、トラックサーボの電圧変動の両者に、およそ 7.5Hz および、その高調波成分でスペクトルが立っているのが解る。両者のスペクトルは、類似点が多いことから、両者の関係が深いことが明らかとなった。また、7.5Hz および、その高調波成分は、CD の記録位置と共に移動することから、

CD の回転速度(約 200~500rpm)に同期した変動であることが考えられる。更に、2.4節で示したとおり、トラックサーボの変動と、RF 信号の jitter との関係が深い。これらのことから、RF 信号に乗るノイズである jitter と、D/A Converter の電源変動の間には、何かしらの関係があることが明らかになった。

次に、D/A Converter の電源変動と、もう一方の RF 信号に影響を及ぼす信号であるフォーカスサーボの電源変動との関係を図 B.2 に示す。

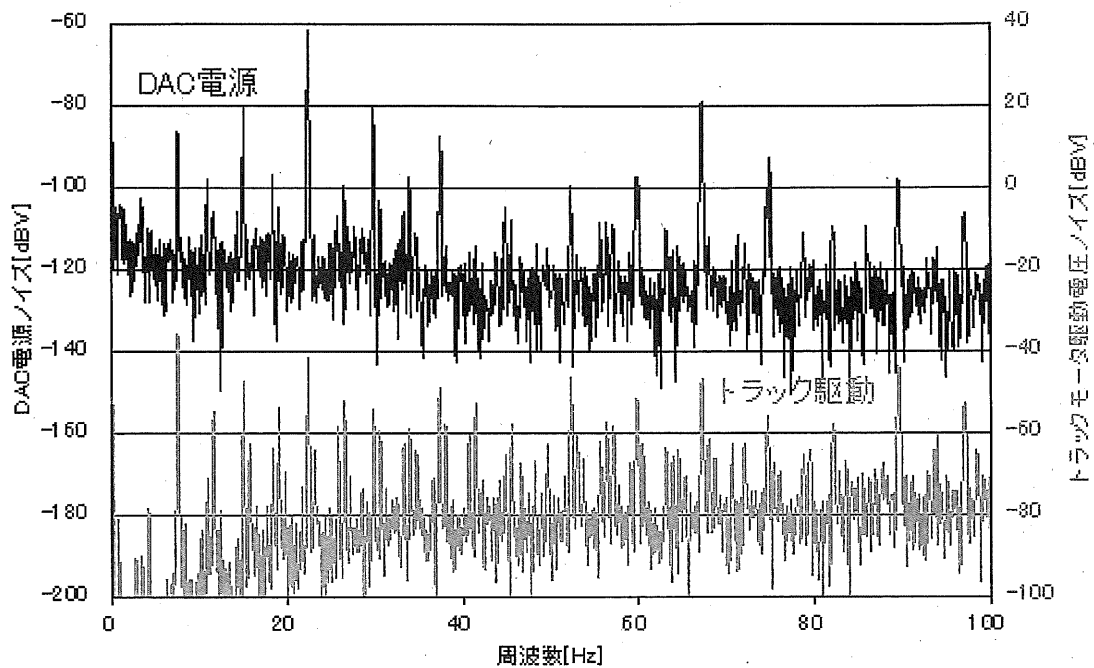


図 B.2 : D/A Converter の電源変動とフォーカスサーボの駆動電圧変動

図 B.2 より、図 B.1 と同様に、D/A Converter の電圧変動、フォーカスサーボの電圧変動の両者に、およそ 7.5Hz および、その高調波成分でスペクトルが立っているのが解る。両者は、類似点が多いことため、両者の関係が深いことが明らかとなった。また、7.5Hz および、その高調波成分は、CD の記録位置と共に移動することから、CD の回転速度(約 200~500rpm)に同期した変動であることが考えられる。更に、2.4節で示したとおり、フォーカスサーボの変動と、RF 信号の jitter との関係が深い。これらのことから、RF 信号に乗るノイズである jitter と、D/A Converter の電源変動の間には、何かしらの関係があることが明らかになった。

これらの実験結果から、D/A Converter の電源は、RF 信号に影響を及ぼすトラックサーボ、および、フォーカスサーボとの関係が深いことが明らかとなった。このため、RF 信号に発生する jitter と D/A Converter における電源変動との間には何かしらの関係があることが解る。

付録 C：電源回路の基礎理論

ここでは、シ리즈レギュレータ、シャントレギュレータなど、従来の一般的な電源回路の基礎技術について説明を行う。

C.1 シ리즈レギュレータ

シ리즈（直列制御）レギュレータは最も一般的な電源方式である（図 B.1）。回路の特徴として、安定度が良い、応答速度が速い、リップル電圧が低いなどと優れた性能が挙げられる。一方で、制御トランジスタで生じる電力損失が大きく、効率が低いなどの欠点もある。

検出回路で出力電圧（分圧したもの）を検出し、これと基準電圧と比較してその誤差を増幅し、制御回路を動作させて誤差が 0 になるように動作する。

図 B.2 にトランジスタを用いた代表的なシ리즈レギュレータを示す。入力電圧 V は制御トランジスタを通して負荷 R_L に送られる。抵抗 R 、 V_R によって出力電圧を分圧し、この電圧はツェナー・ダイオード D によって得られる基準電圧と比較される、そして、出力電圧の変動分はトランジスタ T_1 とその負荷抵抗 R からなる誤差増幅器により増幅され、制御トランジスタ $Tr1$ のベースに送られる。

例えば、電源側または負荷変動によって出力電圧が低下したとすると、この電圧の変化は分圧回路を介して誤差増幅器であるトランジスタ $Tr2$ のベースに送られる。このように、基準電圧一定であることから、 $Tr2$ のベース・エミッタ間電圧 V_{BE} が低下して、コレクタ電流が減少しコレクタ電圧が上昇する。そのため制御トランジスタ $Tr1$ のベース電位が上昇して、出力電圧の低下を打ち消すことになる。以上のことから、定電圧回路の出力電圧は常に一定の値に保たれることになる。

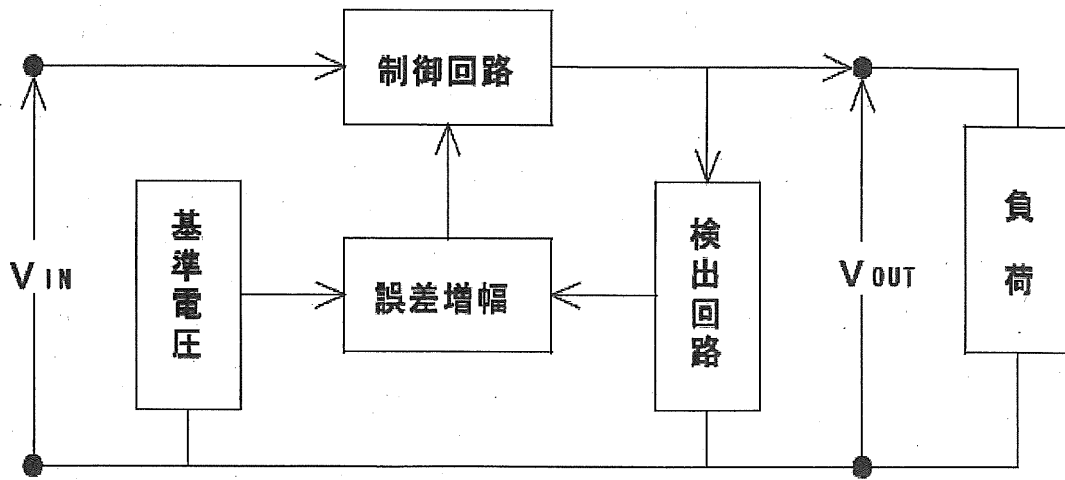


図 B.1 : シリーズレギュレータの構成

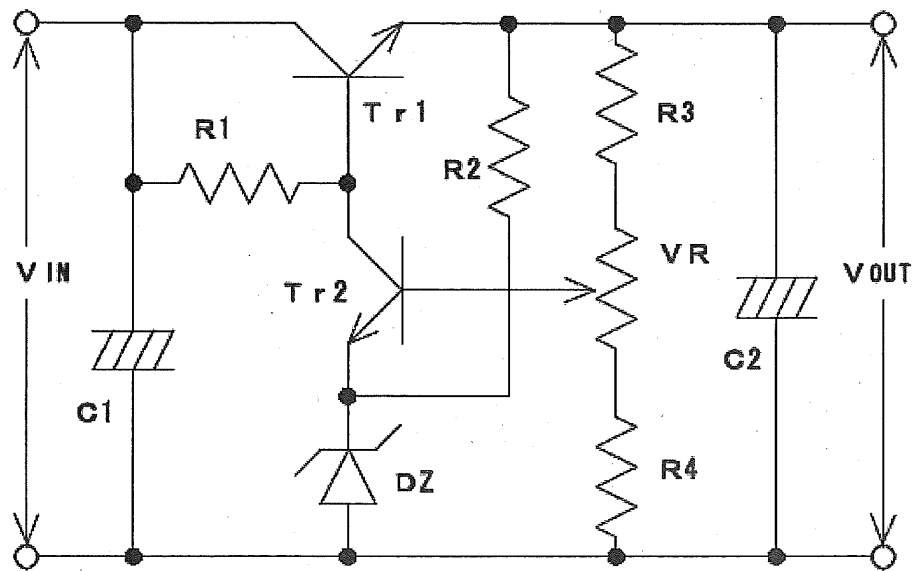


図 B.2 : シリーズレギュレータ回路

C.2 シャントレギュレータ

シャントレギュレータはシリーズレギュレータとほぼ同じ性能であり、より安定度が高く、応答速度が速い、また、リップル電圧が低いとされている。しかし、常に電流を多く消費するため、非常に効率が低い欠点がある。

シャントレギュレータの基本原理を図 B.3、シャントレギュレータ内部の基本回路構成を図 B.4 に、それぞれ示す。

まず、図 B.3 においてシャントレギュレータは、制御素子が負荷に対して並列に入っており、出力電圧を安定化させるために負荷が多く電流を必要とする時には制御素子側の電流を少なくし、少ない電流で良い時には制御素子側の電流を多くする。即ち、負荷状態によって制御素子を流れる電流と出力電流とを入れ替えるように働くことに由来して、シャント（分流）レギュレータと呼ばれている。

この制御素子は、図 B.4 に示すようにパス・トランジスタ部、誤差増幅器部、基準電圧部、検出部等で構成されている。この図において、非安定な入力電圧 V_i は制限抵抗を通して制御素子に供給されるが、出力電圧 V_o は、検出部で抵抗分割された後に誤差増幅器部において基準電圧部の基準電圧と比較され、負荷が多く出力電流 I_o を必要とする場合は、出力電圧 V_o が低くなることで、基準電圧部の電圧の方が大きくなり、パス・トランジスタ部の電流 I_d を少なくする方向に制御する。また、逆に負荷が少ない出力電流 I_o で良い場合には、出力電圧 V_o が高くなり基準電圧側の電圧の方が小さくなってパス・トランジスタ部の電流 I_d を多くする方向に制御し、常に出力電圧を一定に保持しようとする。

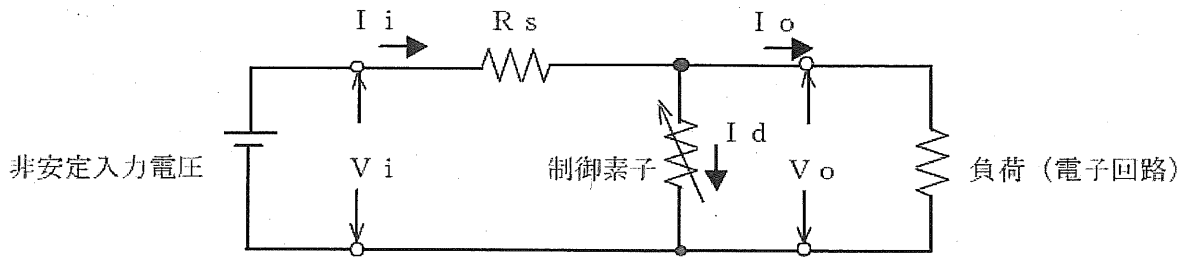


図 B.3: シヤントレギュレータの原理

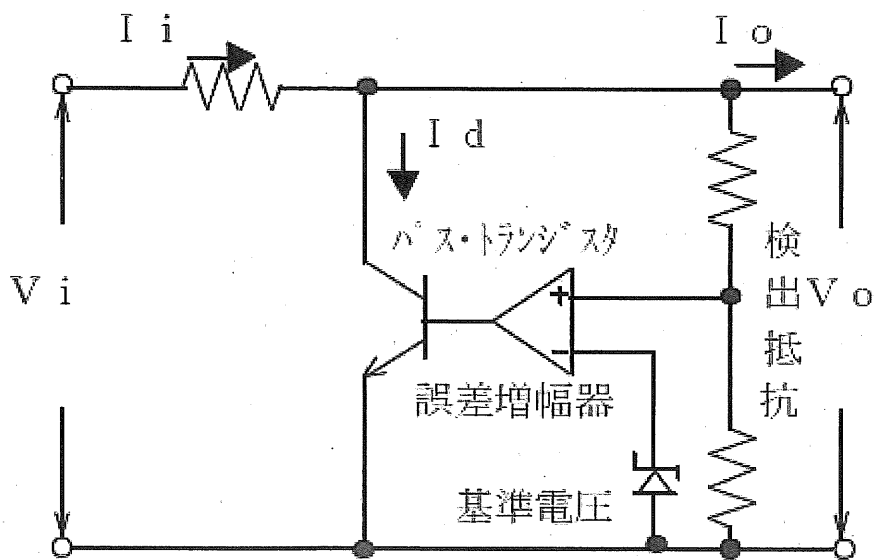


図 B.4: シヤントレギュレータの基本回路構成

本研究に関する研究業績

論文

[1] 三井実, 石川智治, 党建武, 宮原誠, “デジタルオーディオにおける深い感性に関連した音質劣化の原因究明 -jitter に起因する音質劣化の仕組みの解明と新改善方法の検討-”, 日本感性工学会研究論文集, 第7巻4号, pp. 759-764, 2008.06.

国際会議

[1] Makoto Miyahara, Yukio Kobayashi, Tomoharu Ishikawa, Minoru Mitsui, Teppei Koga, “Degradation of sound quality caused by jitter of digital sound system”, Forum Acusticum Sevilla 2002, MUS-05-001-IP, 2002.09.

[2] Minoru MITSUI, Tomoharu ISHIKAWA, Yukio KOBAYASHI, Makoto MIYAHARA, “THE RELATIONSHIP BETWEEN DEGRADATION OF THE SOUND QUALITY AND DIGITAL SIGNAL JITTER”, The Eighth West Pacific Acoustics Conference (WESPAC8), 2003.04.

[3] Minoru MITSUI, Tomoharu ISHIKAWA, Yukio KOBAYASHI, Makoto MIYAHARA, “The Relationship Between Digital Signal Jitter and Loss of Information of High Order Sensations”, Audio Engineering Society Japan (AES), 2003.07.

[4] Minoru Mitsui, Tomoharu Ishikawa, Jianwu Dang, Makoto Miyahara, “Discussion of Ideal Power Supply for Digital Audio System and Its Psychophysical Assessment”, Audio Engineering Society Japan (AES), 2007.07.

[5] Minoru Mitsui, Tomoharu Ishikawa, Makoto Miyahara, “Faithful Reproduction of Deep Sensation in Digital Audio System Focused on SECI

Model - Discovery of Important Physical Factors Concerned with Sound Deteriorations -“, The 2nd International Conference on Knowledge, Information and Creativity Support Systems (KICSS), 2007.11.

研究会・口頭発表

[1] 三井 実, 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “音のゆらぎ情報と時間伸び縮み歪について”, 信学技法, EA99-41, Vol.99, No. 260, pp. 9-16, 1999.08.

[2] 藤本 桂一, 石川 智治, 三井 実, 亀田 昌志, 宮原 誠, “高度感性情報の再生に必要な音響再生装置の物理要因・特性の発見:CDによる音質の違い”, 信学技法, EA2001-22, Vol. 101, No.235, pp. 1-8, 2001.07.

[3] 三井 実, 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “空気感再現とデジタルビットストリーム上の jitter との関係”, 信学技報, EA2001-60, pp. 73-80, 2001.10.

[4] 三井 実, 米山 耕太, 石川 智治, 宮原 誠, “デジタルオーディオ機器における音質劣化と物理要因との関係の考察”, 映像情報メディア学会技術報告, ME2006-270, Vol. 30, No. 68, pp.67-70, 2006.11.

[5] 米山 耕太, 三井 実, 石川 智治, 党 建武, 宮原 誠, “高忠実音再生を目的としたデジタルオーディオ装置の電源回路の検討とその心理物理学的評価”, 映像情報メディア学会技術報告, ME2007-59, Vol. 31, No. 14 , pp. 33-36, 2007.02.

その他の業績

論文

[1] 石川 智治, 野澤 昭雄, 三井 実, 水野 統太, 今井 啓介, 井出 英人, 宮原 誠,
“心理・生理計測による音再生システムの客観評価指標の検討”, 映像情報メディア学会誌 Vo. 61, No. 6, pp. 825-827, 2007.06.

[2] 石川 智治, 野澤 昭雄, 水野 統太, 三井 実, 今井 啓介, 井出 英人, 宮原 誠,
“深い感性の客観評価指標の検討ー音再生における評価語と生理特性との関係ー”,
日本感性工学会研究論文集, 第7巻4号, pp. 727-731, 2008.06.

国内発表・口頭発表

[1] 三井 実, 石川 智治, 亀田 昌志, 宮原 誠, “呼吸分析の芸術評価への応用～感動の測定と呼吸分析～”, 第1回 井深 大 BME シンポジウム (口頭発表のみ),
2001.04.

[2] 三井 実, 石川 智治, 宮原 誠, “暗闇・静寂環境での生理反応”, 第2回 井深 大
BME シンポジウム (口頭発表のみ), 2002.04.