

2010年度 修士論文

室内音響条件に応じたピアノ演奏表現の調整に
関する実験的検討

Experimental study on musicians' adjustment of piano
performance to room acoustics

村田 義明
Murata, Yoshiaki

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

第1章 序論

1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 検討項目	3
1.4 本論文の構成	5

第2章 予備的検討

2.1 はじめに	7
2.2 実験1 インパルス応答測定	7
2.2.1 室内音響指標について	7
2.2.2 測定方法	11
2.2.3 結果	14
2.3 実験2 MIDI信号のペダル効果の測定	16
2.3.1 測定方法	16
2.3.2 結果	16
2.4 実験3 ピアノ試奏実験	17
2.4.1 実験概要	17
2.4.2 実験条件	18
2.4.3 演奏の分析対象	21
2.4.4 結果	22
2.4.5 考察	31
2.5 まとめ	32

第3章 ピアノ演奏の調整項目とその調整度合

3.1 実験1 インパルス応答測定	33
3.2 実験2 ピアノ試奏実験	37
3.2.1 実験概要	37
3.2.2 実験条件	37
3.3 演奏の分析対象	40
3.4 結果	41
3.5 考察	51
3.6 まとめ	53

第 4 章	ピアノ演奏の調整と室内音響条件の関係	
4.1	はじめに	55
4.2	分析方針	55
4.3	演奏の調整傾向の把握	56
4.3.1	分析方法	56
4.3.2	結果と考察	56
4.4	演奏の調整項目と室内音響指標の関係	58
4.4.1	分析方法	58
4.4.2	結果と考察	58
4.5	まとめ	
第 5 章	演奏調整の意識	
5.1	アンケートの概要	75
5.2	結果と考察	75
第 6 章	結論	
6.1	全体のまとめ	84
6.2	今後の課題	85
	参考文献	86
	謝辞	90
	付録 A 演奏特徴量と室内音響指標の散布図	
	付録 B アンケートシート	
	発表論文一覧	

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

コンサートホール等の演奏会場は、その一つ一つが固有の響きを持っている。演奏会場で音楽を聴いた時の印象には、楽曲、指揮者、演奏家など多くの要因が関係するが、ホールの響きもその印象を決める大きな一因となっている。

コンサートホールの音響設計に、はじめて科学的な手法を導入したのは、W. C. Sabine である。彼は自身が導き出した残響式を携えてボストン・シフォニーホール設計に参画した。ここで、Sabine (1922) がこだわったのは残響時間であり、現在でもコンサートホールの音響品質の指標として、最も重要視されているものの一つである。



Fig. 1-1 Symphony hall interior.

Sabine からの科学的なコンサートホールの音響設計・音響研究の対象は主に、聴衆の立場、つまり客席における音の良し悪しであった。現在も、波動音響シミュレーションや幾何音響シミュレーションによる音場予測や拡散体・吸音体等の仕上げ材料の研究など、客席の聴取条件に関する研究は多岐に渡っている。

そして近年、コンサートホール音響研究で、もう一つの研究領域が発展してきている。それは、ステージ音響 (Stage Acoustics, Orchestra Platform Acoustics, Musicians' Room Acoustics などの言葉が用いられている) と呼ばれている。これは、音を発する立場である演奏者を対象として、演奏者が演奏しやすいステージを検討するものである。最近のステージ音響研究は、アンケート調査による研究、実音場による実験的研究、音場シミュレーションによる実験、音響模型実験、数値計算による検討などが行われている。

研究例として、アンケート調査による研究では、ベラネク (2005) が世界的規模でホールや劇場の音響特性を調べている。実音場による実験的研究では、Barron (1978) がステージ可変性を持つ多目的ホールにおいて、演奏者の天井反射板位置の違いによる印象を調べている。音場シミュレーションによる実験では、上野ら (1997) は、バイオリン演奏を対象として、シミュレーション音場における演奏しやすさについて実験的検討を行っている。菅ら (1990) は、コンサートホールの 1/10 縮尺模型を用いて、ステージの条件を変えながら、ST の変化などを調べている。

このステージ音響の研究の中で、プロの演奏家から興味深い意見が言われている。それは、聴衆に自らの音楽的イメージを伝えるため、ホールの響きに応じて演奏を変化させているというコメントである (Senju, 1996, Tsutsumi, 2006)。

演奏家は楽器を使って音を発しながら響きを伴った演奏音を聴き、何らかのフィードバックを受けつつ演奏を続ける。すなわち演奏音とホール音響との間には相互作用的關係があると考えられ、結果として演奏音は音場によって異なる可能性がある。よって、実際のコンサートホールにおいてホール音響が演奏家の演奏にどのように影響するかについての科学的な理解を深めるための研究が必要である。

ホールの響きに応じた音楽演奏の調整について、Ueno et al. (2010) は、3次元音場シミュレーションシステムを用いてプロの演奏家 (管楽器, 弦楽器, 声楽) による試奏実験を行い、演奏家は意識的に演奏表現を調整し、その演奏音には聴覚的に検出可能な差異があることを確認している。Bolginger and Risset (1992) はホールの残響時間とピアノ演奏との関係性について、MIDI データを解析するこ

とで検討を行っている。Meyer (2009)は、異なる音場条件下で演奏家が演奏を調整する例を示している。

以上のように、演奏者は聴衆が聴く音楽をイメージしながら演奏を調整していると考えられ、ステージの音響条件に応じた演奏の調整のしやすさは、ステージ音響に対する演奏家の評価に影響を及ぼす可能性がある。従って、ホール音響に応じた演奏の調整に関する研究は、ステージ音響設計や音楽演奏の練習室の設計、音楽教育に新たな知見を提供するものと期待される。

ホール音響に応じた演奏の調整を研究するには、まずどの楽器演奏を対象とするかを考えなければならない。そこで本研究では、ピアノ演奏を対象とすることにする。ピアノを選んだ理由は以下の点が挙げられる。

- ・ペダルでピアノ自体の響きを調整できること
- ・音域が非常に広く、音場の影響が他の楽器よりも大きいことが予想されること
- ・音楽教育、作品研究、作曲などにも広く用いられていること
- ・演奏動作を表す MIDI が開発されており、演奏の差を分析しやすいこと

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、どのように室内の音響条件がピアノ演奏に影響するのかを検証することである。室内音場の特性とピアノ演奏表現の関係を定量的に評価し、さらに、「響きによる演奏音の聞こえの変化」、「演奏運動の制御結果」、「本人の意思」という三者の関係を、「室内音響指標」、「MIDI 信号分析」、「演奏者の音場に対する主観印象」の結果を用いて考察する。

1.3 検討項目

本研究ではピアノ演奏表現と室内音響条件との関係を定量的に示す把握するために、まずピアノ演奏と室内音場との関係のモデルを仮定し、検討を行うこととした(図 1-2)。一般に聴衆は楽器が発する音源信号に伝達関数が畳み込まれた演奏音を聴く。一方で、演奏者は音を聴くと同時に音を発しており、演奏者とホールの間にはある種のフィードバックシステムがあることが考えられる。演奏者は、音の知覚によって自身が発している音楽を認知し、聴衆に届く音を想

像しながら演奏するべき音楽イメージをつくり、実態と想像の差を埋めるべく演奏調整に関わる意識がはたらき、演奏動作を変えていることが考えられる。

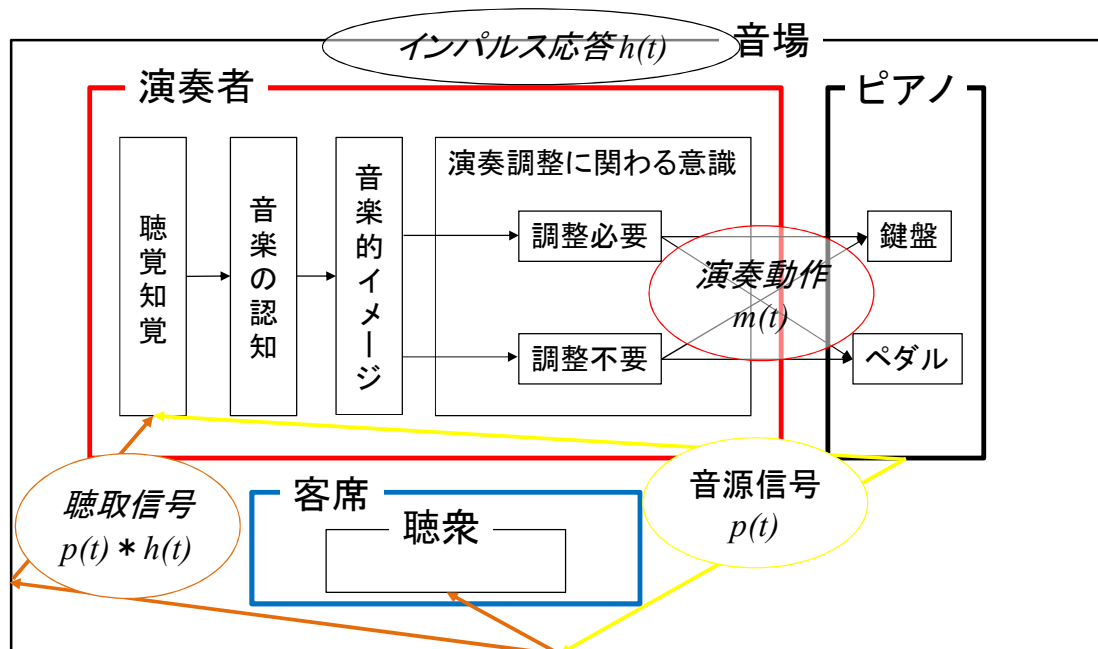


Fig. 1-2 Relation between piano performance and room acoustics.

本研究では図 1-2 のモデルをもとに、以下の検討を行うことで室内音響条件がピアノ演奏に与える影響を評価できると考えた。

- ・ 演奏のどの項目で調整が顕著か？その調整割合は？
- ・ 音場のどの室内音響指標が演奏調整に影響するのか？
- ・ 演奏調整は演奏者間で同傾向か？
- ・ 演奏調整は意識的か？無意識的か？
- ・ 物理的に演奏音は異なるか？(別チームが検討)
- ・ 第三者は演奏音を聴き分けられるか？(別チームが検討)

1.4 本論文の構成

以下に、本論文の構成を示す。

第1章では、本研究の背景および既往研究を概観し、本研究の目的、ピアノ演奏モデル図、検討項目について述べた。

第2章では、実際にピアノ演奏で音場に応じた演奏の調整が行われているのかを確認するために行った予備実験の結果を検討する。

第3章では、予備実験を踏まえて行なった本実験の結果を考察する。特に、どの演奏項目が調整されているのかを、MIDI 信号分析から得られる被験者平均や演奏者個人の結果を検討しながら明らかにする。

第4章では、本実験の結果を用いて、室内音響条件と調整された演奏項目の関係を定量的に把握する。第4章では、特に個人差に着目して検討を行い、演奏者の個別性と共通性を明らかにする。

第5章では、演奏者の主観印象を通じて、演奏者の意識と演奏実態の整合性について検討を行う。

第6章では、本研究を総括する。

第2章 予備的検討

2.1 はじめに

本章では、室内音響条件の異なる音場で演奏者は実際に演奏の調整を行っているかどうかを確認するために行った予備実験の結果について考察を行う。この結果から実験方法や分析方法等の研究アプローチの妥当性を検証する。

2.2 実験1 インパルス応答測定

2.2.1 室内音響指標について

室内音響設計を経験だけに頼るのではなく、科学的裏付けによって進めるために室内音響指標が用いられる。室内音響指標値は、音場の特性を数値で表した物理量である。ここでは本研究に関連する音響物理指標について述べる。

残響時間 (T_{30} , T_{20})

室内の平均エネルギー密度が定常の値から 60 dB 減衰するのに要する時間である。測定された残響減衰波形の初期レベル(定常状態のレベル)に対して、-5 ~ -35 dB を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求める場合を T_{30} 、-5 ~ -25 dB を回帰区間とした場合を T_{20} と呼ぶ。図 2-1 に各種用途の最適残響時間(500 Hz)の範囲、図 2-2 に残響特性の推奨曲線を示す(前川ら, 2000)。前川ら(2000)によると、音楽の場合は図 2-2 内の(4)の曲線にするのが最も一般的とされている。また、残響時間の周波数特性は全域にわたって平坦であること、音楽の場合は低音域でやや上昇し、図 2-2 の斜線の範囲にあることが好ましいとされる。周波数によって凹凸が激しいことは、特定の音色を付ける恐れがあるので好ましくない。

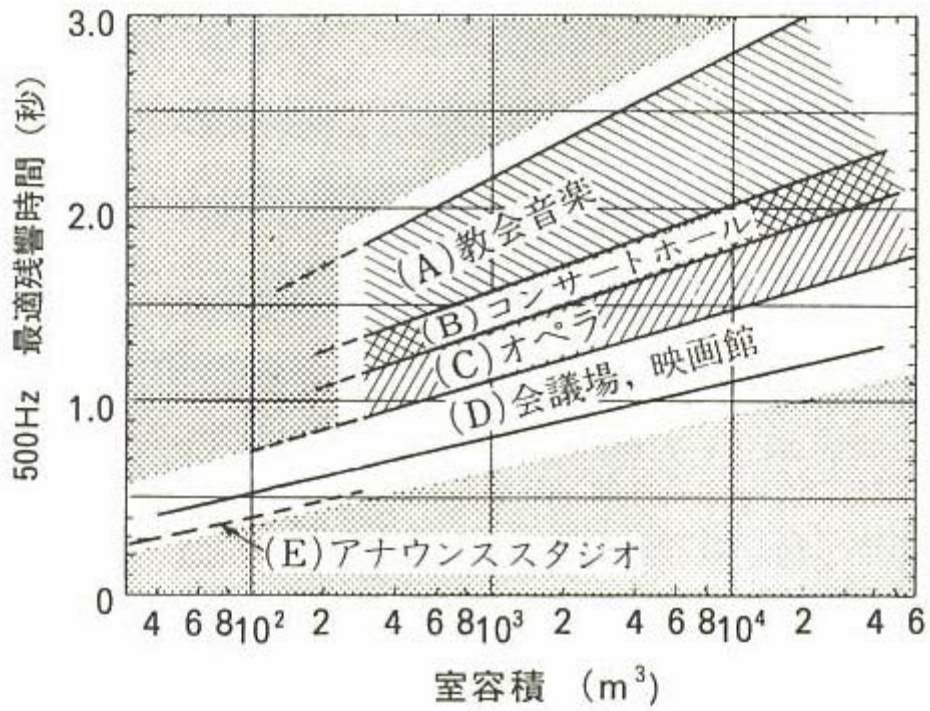


Fig. 2-1 Range of the best reverberation time of various usages.

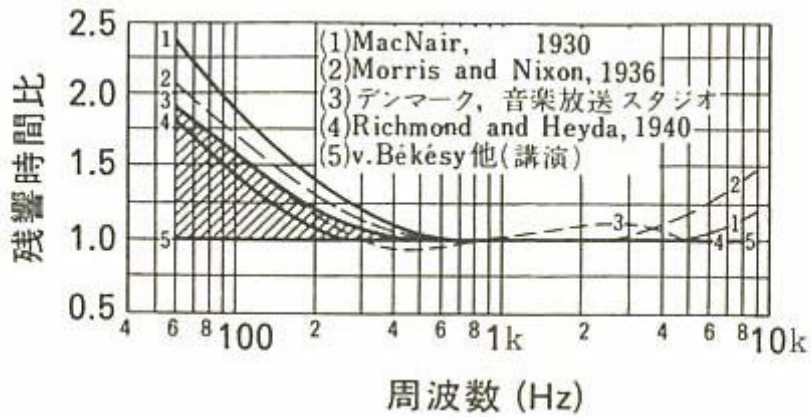


Fig. 2-2 Recommended curve of reverberation characteristic.

初期残響時間(EDT)

残響減衰波形の初期レベル(定常状態のレベル)に対して、0 ~ -10 dB を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求める残響時間を初期残響時間(Early Decay Time: EDT)と呼ぶ。EDT は、残響時間より主観的な残響感に対応するとされている。残響時間よりも優れた空間の響きの品質評価指標であると言われる場合がある。

Clarity (C_{80})

音楽を対象とした明瞭度に関するパラメーターとして提案されたのが Clarity である。インパルス応答を $h(t)$ とすると、次の式で定義される。ここでの時刻 0 は、最初の音波到来時刻を指す。

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} [dB]$$

時間重心(T_S)

Cremer, L. and Müller, H. A. (1982) が提案したエネルギーに時間の重みを付けた指標で、音節明瞭度がよく対応するという報告もある。次式で定義される。

$$T_S = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} [dB]$$

Support (ST)

Gade(1989)が提案したステージのための音響指標である。演奏者が一人の場合、ステージ音響で問題となるのは、二つある。一つは、「自分の音の聞き取り易さ」、もう一つは、「ホールの応答」である。このうち「自分の音の聞き取り易さ」が ST_{Early} 、「ホールの応答」が ST_{Late} で評価される。算出方法は、ステージ上の演奏家の位置に設置した音源と、そこから 1 m だけ離れた位置に設置したマイクロホンで測定したインパルス応答 $h(t)$ を使用し、次式で定義される。

$$ST_{Early} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20ms}^{100ms} h^2(t) dt}{\int_0^{10ms} h^2(t) dt} [dB]$$

$$ST_{Late} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100ms}^{1000ms} h^2(t) dt}{\int_0^{10ms} h^2(t) dt} [dB]$$

表 2-1 に室内音響指標とその JND 等を示す。Typical range は、空席時における 25, 000 m³ までのコンサートホール・多目的ホールにおける単一受音点での周波数平均値である。表中の Single number frequency averaging は、表示された周波数範囲で算術平均された単一指標値を示す。

Table 2-1 Room acoustical parameters.

Acoustic quantity	Single number frequency averaging	Just noticeable difference (JND)	Typical range
T_{30} [s]	500 to 1k	-	-2 dB; +10 dB
EDT [s]	500 to 1k	Rel. 5%	1.0 s; 3.0 s
C_{80} [dB]	500 to 1k	1 dB	-5 dB; +5 dB
T_s [ms]	500 to 1k	10 ms	60 ms; 260 ms
ST_{Early} [dB]	250 to 2k	Not Known	-24 dB; -8 dB
ST_{Late} [dB]	250 to 2k	Not Known	-24 dB; -10 dB

2.2.2 測定方法

実験で使用する音場の室内音響指標を算出するため、音場毎にインパルス応答測定を行った。実施は2009年10月21日(水)。場所は財団法人ヤマハ音楽振興会目黒センター地下スタジオにて行った。スタジオの寸法は、7.6 m × 6.2 m × 3.0 m Hである。音源はピアノの位置、測定点は音源から1 m離れたところに設置し、音源と測定点の高さは演奏者の頭の位置である1.25 mに設定した(図2-3)。スタジオには、調音パネル(図2-4)、吸音パネル(図2-5)、くさび型吸音体(図2-6)を設置した。



Fig. 2-3 Position of a source and receiving point.

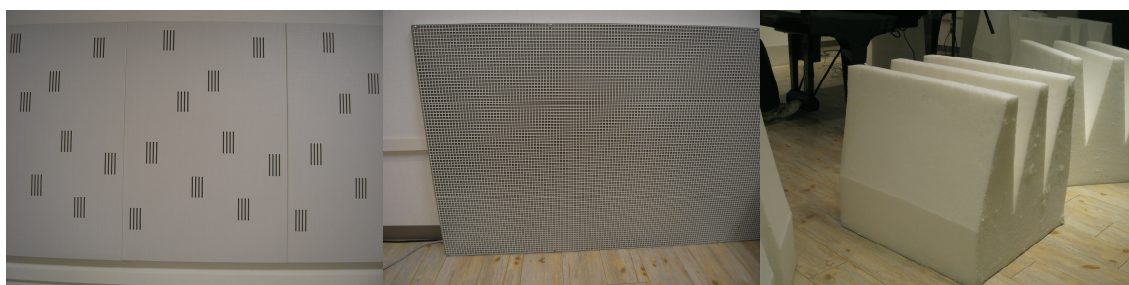


Fig. 2-4 Tunable panel.

Fig. 2-5 Absorption panel.

Fig. 2-6 Absorber.

測定は音源として、12面体スピーカーから TSP 信号を放射した。音源系統、受音系統、ソフトウェア、測定パラメーターは次の通りである。図 2-7 に測定系統を示す。

◆音源系

12面体スピーカー(Brüel & Kjær, 4296), 三脚(Brüel & Kjær, KE-0364), パワーアンプ(Brüel & Kjær, 2716), 測定用 PC(Dell, Latitude C400), ドッキングステーション(Dell, C-DockII), AC電源延長コード(ドラム, 30 m), ケーブル・コネクタ類

◆受音系

騒音計 (ONOSOKKI, LA-1350), 三脚, マイクスタンド, BNC マイク延長コード(ドラム, 50 m), ケーブル・コネクタ類

◆ソフトウェア

インパルス応答測定 AEIRM (日東紡音エンジニアリング(株))

◆測定パラメーター

音源 : TSP 信号, サンプリング周波数 : 48 kHz, 出力信号の次数 : 17, 測定されるインパルス応答長 : 2.731 秒, 同期加算回数 : 10 回

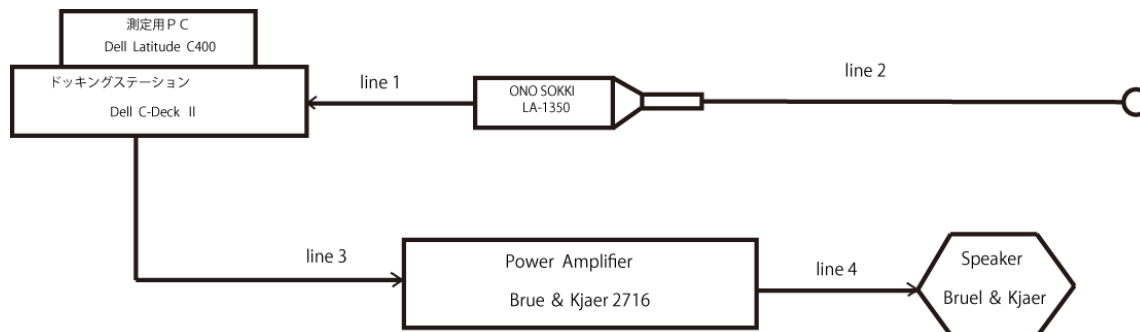


Fig. 2-7 Measurement system I .

図2-4 のシステムに不具合があった場合には、図2-8に示すシステムを用いた。
受音系、ソフトウェア、測定パラメーターは同条件である。

◆音源系

12面体スピーカー(Brüel & Kjær, 4296), 三脚(Brüel & Kjær, KE-0364), パワーアンプ(Brüel & Kjær, 2716), 測定用 PC(IBM Lenovo ThinkPad X61), EDIROL FA-101, AC電源延長コード(ドラム, 30 m), ケーブル・コネクタ類

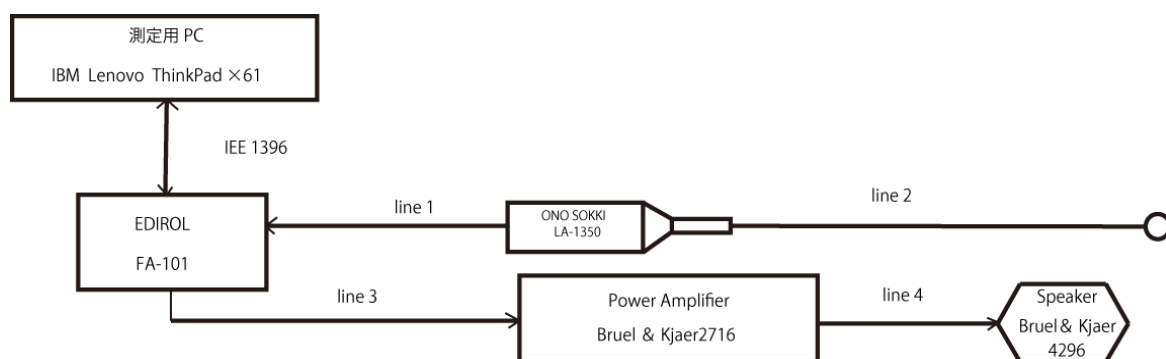


Fig. 2-8 Measurement system II.

2.2.3 結果

測定した音場は、計4条件である(以下、音場 O, A, B, C と呼ぶ)。得られた測定データ(.imp ファイル)から室内音響指標分析 AERAP(日東紡音エンジニアリング(株))を用いて、各種室内音響指標を算出した。図 2-9 に算出した室内音響指標値の周波数特性を示す。

一般的な T_{30} の回帰区間は -5 ~ -35 dB であるが、今回設定した音場 B, C では回帰区間を変更して T_{30} を求めた。これは音場 B, C では残響を付加しており、折れ曲がった減衰曲線となったからである(音場 A も残響を付加したが折れ曲がり曲線とはならなかった)。このときの T_{30} , T_{20} は、折れ曲がった時点から 30 dB あるいは 20 dB 減衰したときの時間を算出したものである。

音場の特徴としては、まず音場 O, A, B, C になるにしたがって T_{30} が長くなること、音場 A, B, C の ST_{Late} がほぼ同じ値であることである。

各音場で特徴的なのは、音場 O では T_{30} , EDT, ST_{Early} , ST_{Late} , T_S で他の条件よりも値が小さく、響きがほとんどないが、 C_{80} が他条件に比べて大きな値を示しているので明瞭度は高いことである。音場 A に特徴的なのは EDT, ST_{Early} が大きな値を示しており、初期反射音エネルギーが大きいことである。従って、音場 A は自分の演奏音を聴きやすい条件であることが言える。音場 B は T_{30} 以外の指標が他条件と同様の傾向を示すものが多く、響きの長さは長い、響きの量は変わらない条件である。音場 C は音場 B よりもその傾向が顕著で、響きの長さは非常に長い、響きの量は変わらない条件である。

以上のことから、予備実験で設定した音場は、響きの長さを段階的に長くしながらも、響きの量をほぼ同等にした条件であるということである。

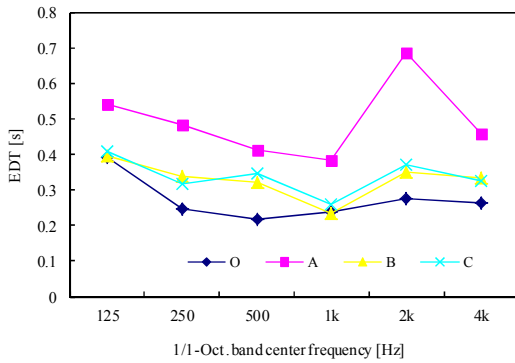


Fig. 1: EDT under each acoustic condition

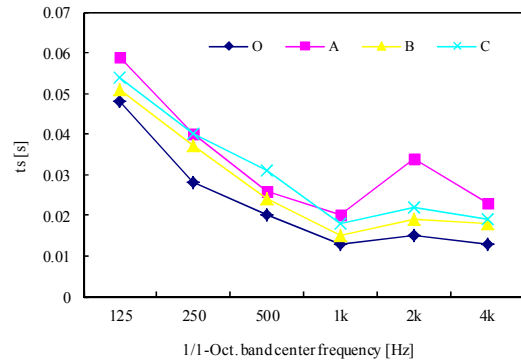


Fig. 2: ts under each acoustic condition

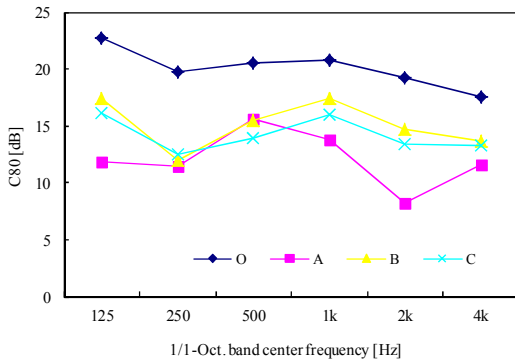


Fig. 3: C80 under each acoustic condition

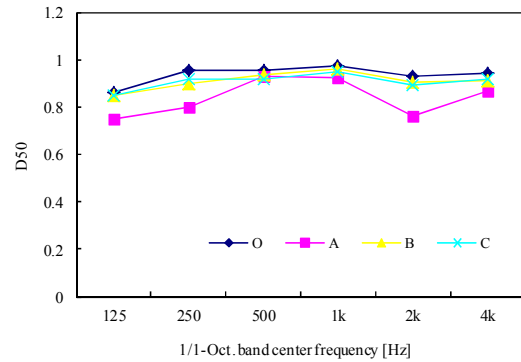


Fig. 4: D50 under each acoustic condition

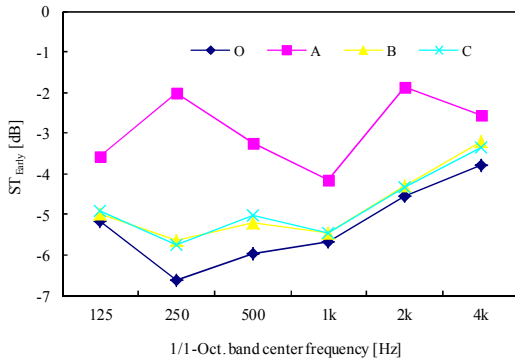


Fig. 5: ST_Early under each acoustic condition

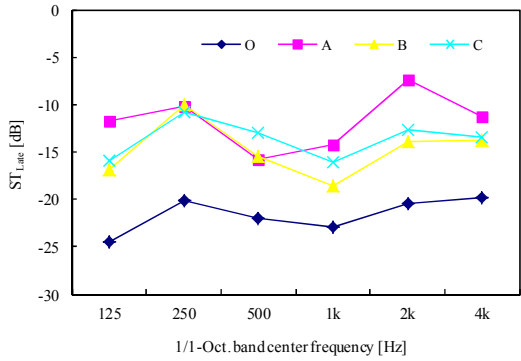


Fig. 6: ST_Late under each acoustic condition

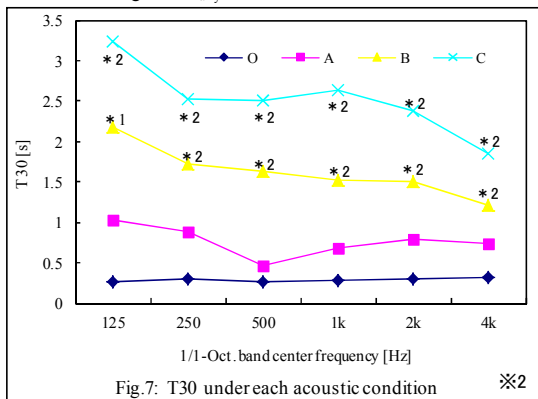


Fig. 7: T30 under each acoustic condition ※2

※1 音場条件

- ◆ O: 実験スタジオ、吸音あり
- ◆ A: 実験スタジオ、吸音あり
残響付加(スタジオ)
- ◆ B: 実験スタジオ、吸音あり
残響付加(小規模コンサートホール)
- ◆ C: 実験スタジオ、吸音あり
残響付加(大規模コンサートホール)

※2 B、Cの条件ではRangeを変更してT30およびT20を求めた。(Aも残響付加であるが、減衰曲線が折れ曲がりではないのでRangeは変更していない。)

* 1: T20 (Range -20 ~ -40)

* 2: T30 (Range -20 ~ -50)

Fig. 2-9 Room acoustical parameters at each conditions.

2.3 実験2 MIDI信号のペダル効果の測定

2.3.1 測定方法

以下の手順になるようにMIDI信号を作成し、試奏実験と同じピアノ(Yamaha Disklavier)で再生し、リニア PCM レコーダ(PCM-D50 SONY)を用いて演奏者の位置で打鍵音を録音した。実施日、場所はインパルス応答測定と同様。

ペダルの踏み込み値を 41 にする

その 1 秒後、打鍵(Note on velocity = 80, Duration = 7)。

その 3 秒後、ペダルの踏み込み値を 0 にする(完全にペダルを上げる)。

その 1 秒後、ペダルの踏み込み値を 42 にする。

その 1 秒後、打鍵(Note on velocity = 80, Duration = 7)。

その 3 秒後、ペダルの踏み込み値を 0 にする(完全にペダルを上げる)。

これを繰り返し、ペダルの踏み込み値が 80 になるまで測定した。

2.3.2 結果

リニア PCM レコーダから出力された WAVE ファイルを TEXT ファイルに変換し、音圧レベルからエネルギー量を求め、その減衰時間を算出した。図 2-10 に横軸を MIDI 信号のペダル踏み込みの数値に、縦軸をペダル効果による響きの長さとした散布図を示す。この結果から、ノンペダルに相当する MIDI の数値が 0 ~ 51, ハーフペダルに相当する数値が 52~ 69, フルペダルに相当する数値が 70 ~ 127 とわかる。

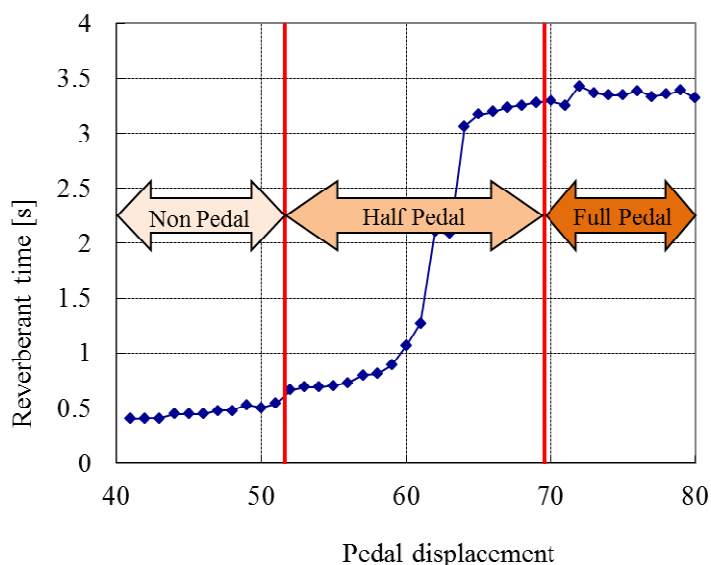


Fig. 2-10 Effect of pedal displacement value.

2.4 実験3 ピアノ試奏演奏

2.4.1 実験概要

試奏実験は2009年10月21日(水)に財団法人ヤマハ音楽振興会目黒センター地下スタジオにて行った。試奏実験は、吸音性の比較的高い実験スタジオにピアノと演奏者を取り囲むように残響付加用のスピーカー4本を配置し、残響時間の異なる模擬音場4条件を順次設定した。演奏者には各音場条件で4種類の楽曲を数分間の練習後3回ずつ演奏してもらい、演奏情報記録装置(Yamaha Disklavier)を用いてMIDI信号を記録した。



Fig. 2-11 Simulation system.

2.4.2 実験条件

設定した音場条件は、実験スタジオ(7.6 m × 6.2 m × 3.0 m H)に各種吸音材を設置しデッドにした音場 O と、音場 O に人工的に残響を付加させた音場 A, B, C の計 4 条件である。音場 A はスタジオ程度、音場 B は小規模コンサートホール程度、音場 C は大規模コンサートホール程度の残響を付加した。呈示順序は、O → A → B → C である。

表 2-2 に各音場条件の室内音響指標値を示す。

Table 2-2 Conditions of sound fields for experiment.

Case	T ₃₀ [s]	EDT [s]	C ₈₀ [dB]	T _s [ms]	ST _{Early} [dB]	ST _{Late} [dB]	Features
O	0.3	0.23	20.6	16.5	-5.7	-21.4	Anechoic room, system off
A	0.6	0.40	14.8	23.0	-2.8	-11.9	Studio
B	1.2	0.28	16.4	19.5	-5.1	-14.5	Small concert hall
C	2.3	0.30	14.9	24.5	-5.1	-13.1	Large concert hall

被験者は、プロの演奏家 1 名とアマチュアの演奏家 1 名の計 2 名である(以下それぞれ PRO, AMA と呼ぶことにする)。

演奏曲は、作曲された時代や特徴が異なる表 2-3 に示す 4 曲とした。各楽曲を各音場で数分間の練習後、3 回ずつ分析範囲よりも 2 小節程度先まで演奏してもらった。図 2-9~2-12 に各楽曲の譜面および分析範囲・演奏範囲を示す。

Table 2-3 Musical pieces for test performance.

Musical pieces	Analytical range
Bach: 平均律クラヴィーア曲集第1巻第1番ハ長調BWV846より前奏曲	冒頭8小節
Mozart: ピアノソナタ 第16番 ハ長調 K.545 より 第1楽章	冒頭12小節
Chopin: ポロネーズ 第3番 イ長調 Op.40「軍隊」	冒頭8小節
Debussy: 前奏曲集 第1巻 第8番 変ト長調「亜麻色の髪の乙女」	冒頭7小節

The image shows three systems of musical notation for a piece by Bach. Each system consists of a treble clef staff and a bass clef staff. The first system has a measure number '5' below the bass staff. The second system has a measure number '10' below the bass staff. A red vertical line with a left-pointing arrow is positioned between the first and second systems, labeled '分析範圍' (Analysis Range). A blue vertical line with a left-pointing arrow is positioned between the second and third systems, labeled '演奏範圍' (Performance Range).

Fig. 2-12 A part of score performed in the experiment (Bach).

The image shows four systems of musical notation for a piece by Mozart. Each system consists of a treble clef staff and a bass clef staff. The first system includes dynamic markings 'mp' and 'p', and articulation markings 'acc.' and 'tr.'. The second system includes the marking 'cresc.'. The third system includes the marking 'tr.'. A red vertical line with a left-pointing arrow is positioned between the third and fourth systems, labeled '分析範圍' (Analysis Range). A blue vertical line with a left-pointing arrow is positioned at the end of the fourth system, labeled '演奏範圍' (Performance Range).

Fig. 2-13 A part of score performed in the experiment (Mozart).

演奏範囲(繰り返し後)

F. Chopin, Op. 40.

Allegro con brio.

分析範囲

Fig. 2-14 A part of score performed in the experiment (Chopin).

Très calme et doucement expressif (♩ = 66)

p sans rigueur

分析範囲 演奏範囲

Fig. 2-15 A part of score performed in the experiment (Debussy).

2.4.3 演奏の分析対象

ピアノ演奏の分析では、鍵盤やペダルの動きを表す MIDI 信号を用いた。MIDI ファイル(.mid)を MIDI シーケンサソフト「世界樹 1.8」を使用して、テキスト形式に変換して、MIDI 信号に含まれる打鍵速度(128 段階)、打鍵時間長(鍵盤を押している時間)、ペダル変位(踏み込みの深さ、128 段階)を用いて、各楽曲の分析範囲における以下の 7 種類の演奏特徴量を算出した。

- ・演奏時間：最初の打鍵された時間から分析範囲直後の打鍵までの時間
- ・平均打鍵速度：分析範囲内のすべての打鍵速度の平均値
- ・打鍵速度の標準偏差：分析範囲内のすべての打鍵速度の標準偏差
- ・打鍵時間比：打鍵時間長の総和／演奏時間
- ・平均ペダル変位：ペダル変位×継続時間／演奏時間
- ・ノンペダル時間比：ノンペダル時間長の総和／演奏時間
- ・フルペダル時間比：フルペダル時間長の総和／演奏時間

ここで、演奏時間はテンポ、平均打鍵速度は音量、打鍵速度の標準偏差はダイナミクスレンジに対応し、打鍵時間比はテンポの影響を除いたタッチの特徴量として取り上げる(図 2-16)。ペダルに関しては変位によってノン(0 ~ 51) / ハーフ(52 ~ 69) / フル(69 ~ 127) の 3 つの状態に分けられることを「2.3 MIDI 信号のペダル効果測定」で確認し、完全開放弦となるフルペダルの時間長を算出する。平均ペダル変位は演奏者の予備動作も含めた運動に対応するのに対し、フルペダル時間比はピアノのペダル効果に対応するものと考えられる。

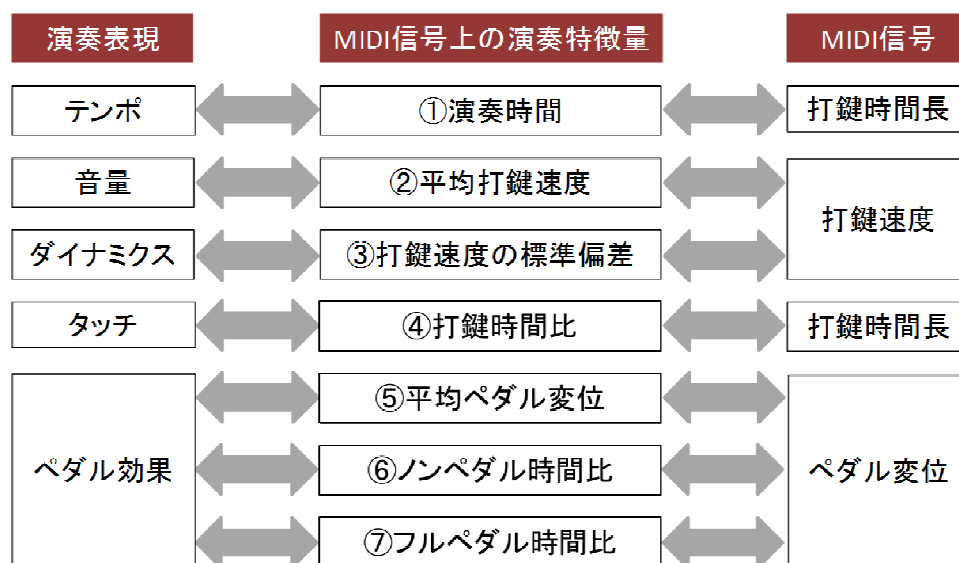


Fig. 2-16 Relationship between expression Parameters and features calculated from MIDI.

2.4.4 結果

前述の演奏特徴量について、演奏者毎に各条件における 3 回の演奏の平均値を算出した。さらに、平均値を用いて音場 O を基準とした変化率を算出した。図 2-17, 2-18 に演奏時間, 図 2-19, 2-20 に平均打鍵速度, 図 2-21, 2-22 に打鍵速度の標準偏差, 図 2-23, 2-24 に打鍵時間比, 図 2-25, 2-26 に平均ペダル変位, 図 2-27, 2-28 にノンペダル時間比, 図 2-29, 2-30 にフルペダル時間比の結果を示す。

次に各種演奏特徴量について、音場の違いによる演奏の調整の差が有意であるかを検証するために、演奏者毎・楽曲毎に音場条件を要因とした一元配置分散分析を行った。表 2-4 に音場条件の主効果の検定結果を示す。図中の実線は、有意水準 5%で認められた楽曲, 点線はその他を示す。

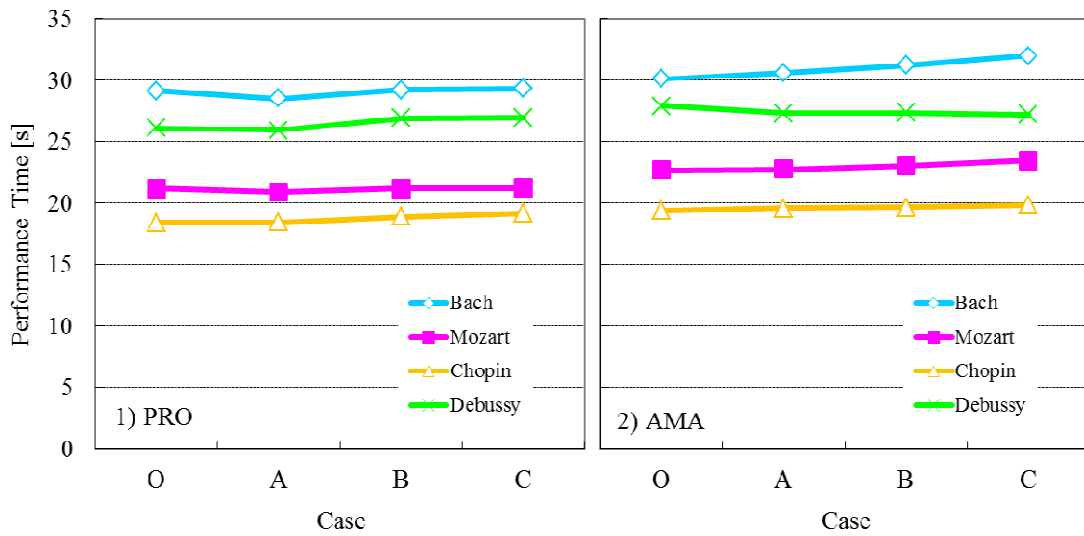


Fig. 2-17 Mean value of performance time
1) PRO, 2) AMA

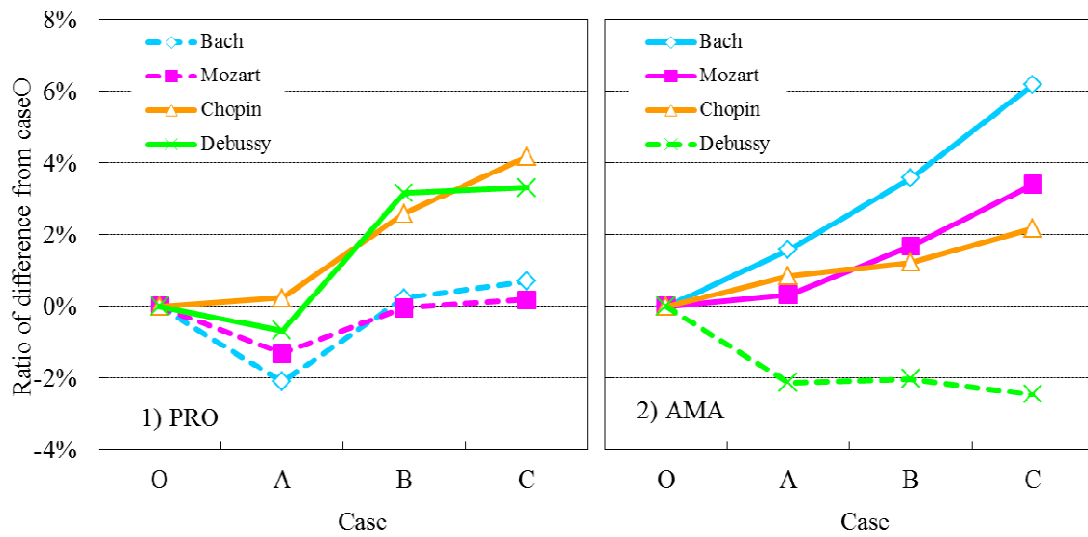


Fig. 2-18 Difference of performance time normalized by case O
1) PRO, 2) AMA
(solid line : $p < 0.05$, dotted line : not significant)

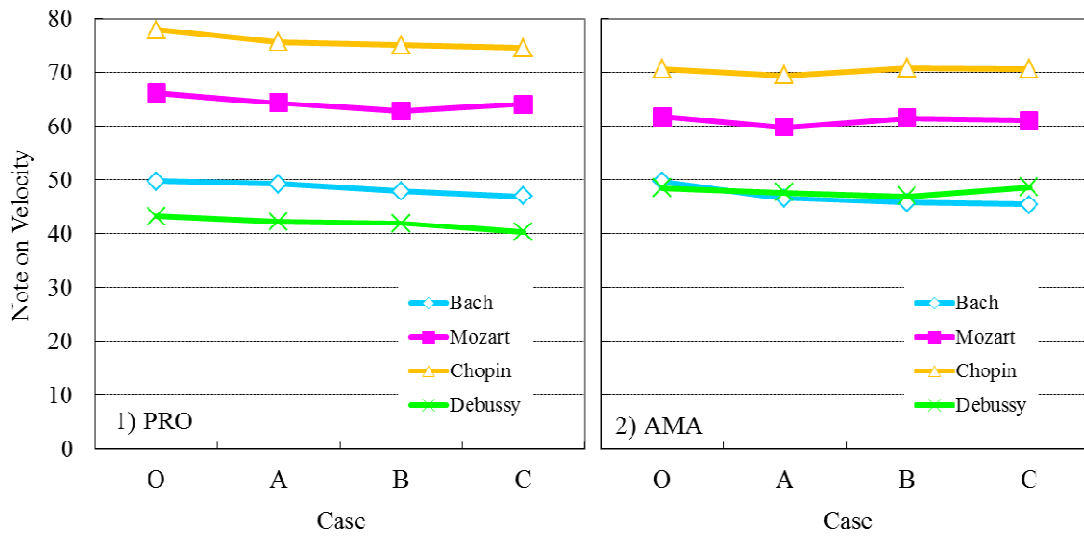


Fig. 2-19 Mean value of note on velocity
1) PRO, 2) AMA

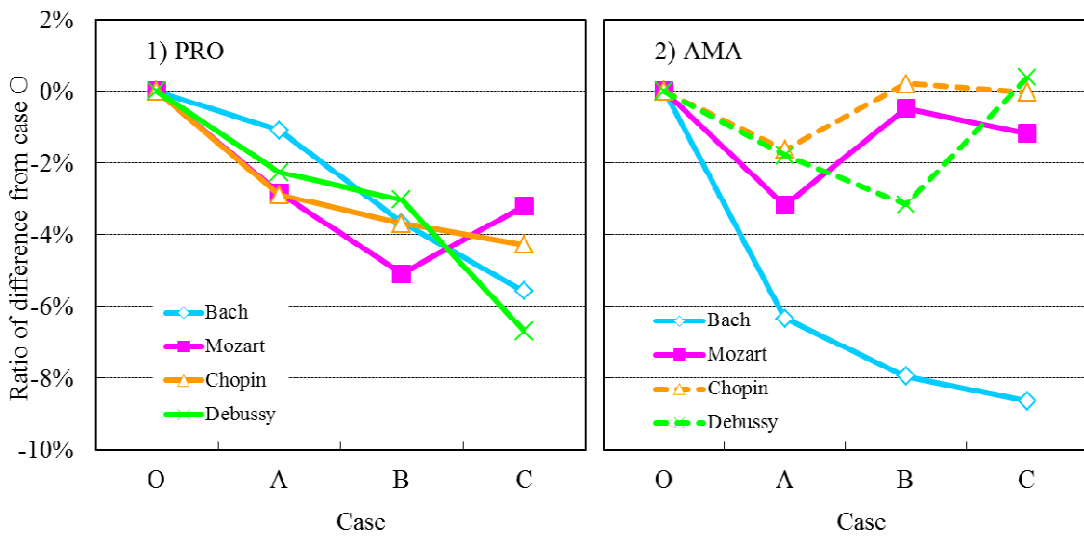


Fig. 2-20 Difference of note on velocity normalized by case O
1) PRO, 2) AMA
(solid line : $p < 0.05$, dotted line : not significant)

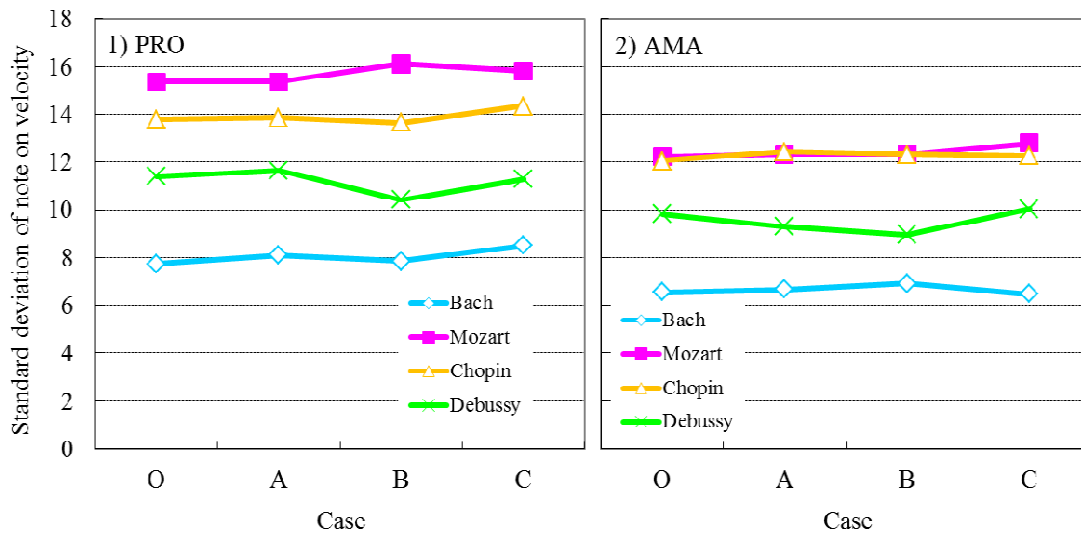


Fig. 2-21 Mean value of standard deviation of note on velocity.

1) PRO, 2) AMA

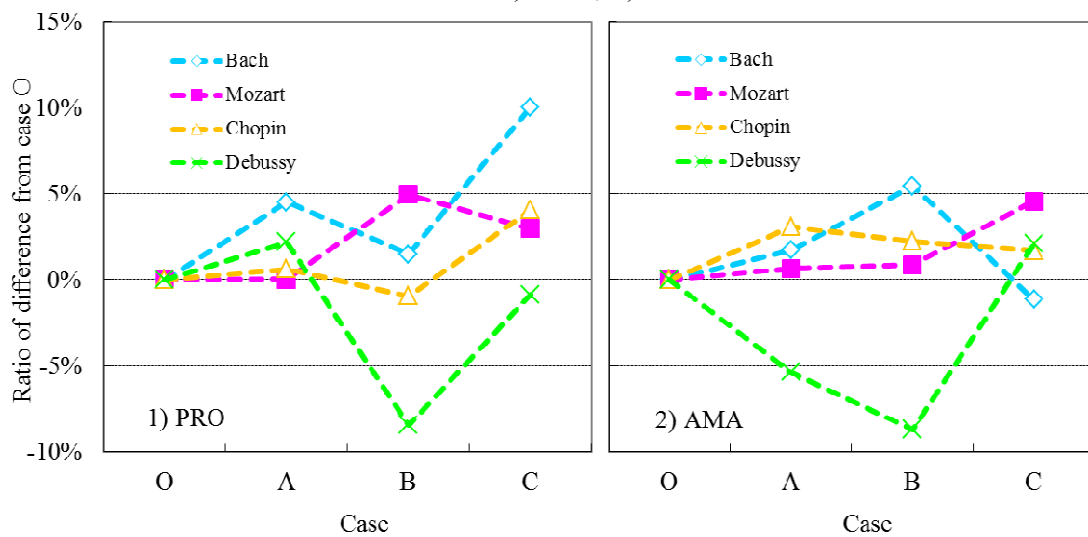


Fig. 2-22 Difference of standard deviation of note on velocity normalized by case O.

1) PRO, 2) AMA

(solid line : $p < 0.05$, dotted line : not significant)

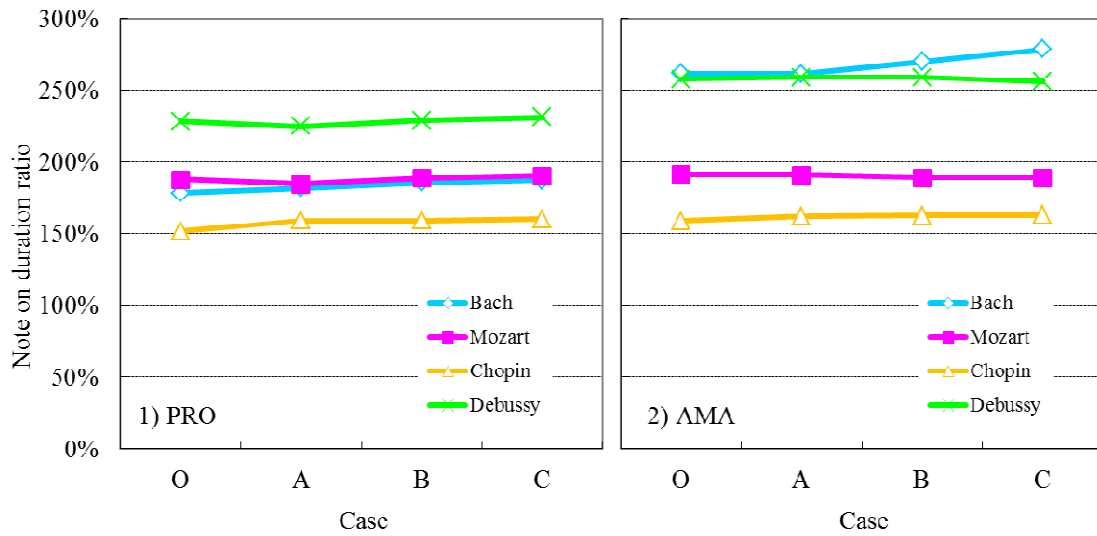


Fig. 2-23 Mean value of note on duration ratio.

1) PRO, 2) AMA

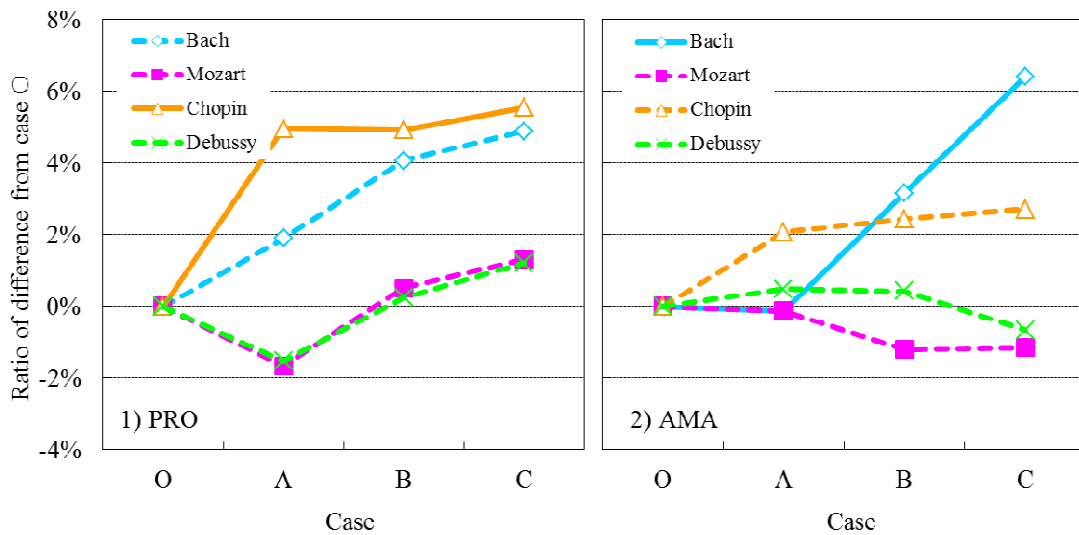


Fig. 2-24 Difference of note on duration ratio normalized by case O.

1) PRO, 2) AMA

(solid line : $p < 0.05$, dotted line : not significant)

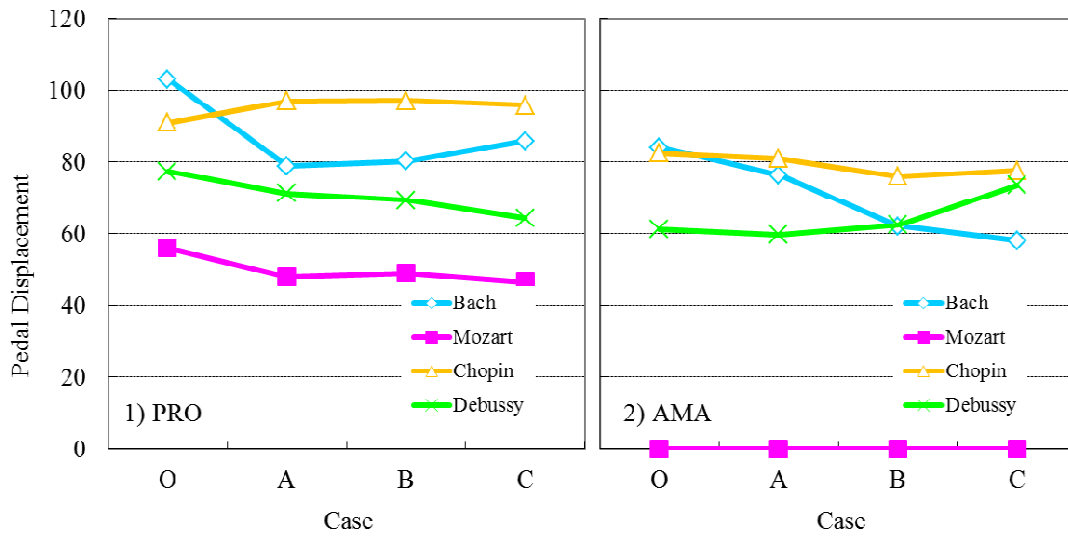


Fig. 2-25 Mean value of pedal displacement.
1) PRO, 2) AMA

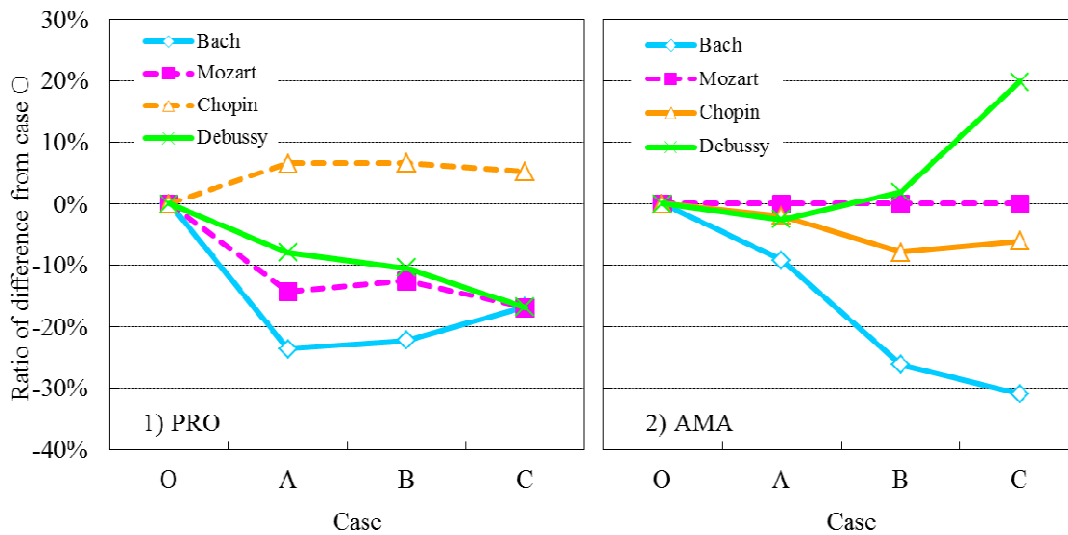


Fig. 2-26 Difference of pedal displacement normalized by case O.
1) PRO, 2) AMA
(solid line : $p < 0.05$, dotted line : not significant)

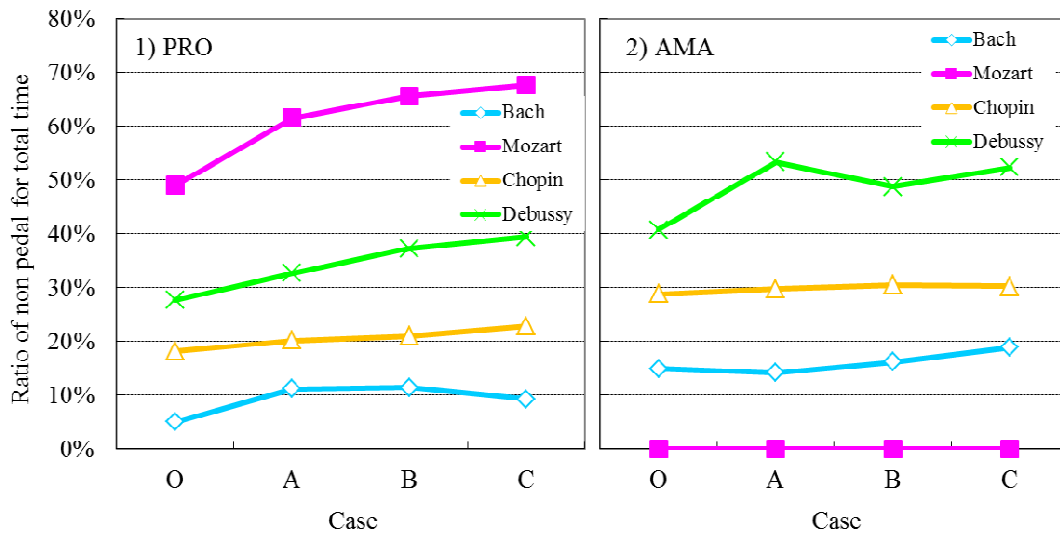


Fig. 2-27 Mean value of non pedal duration ratio.

1) PRO, 2) AMA

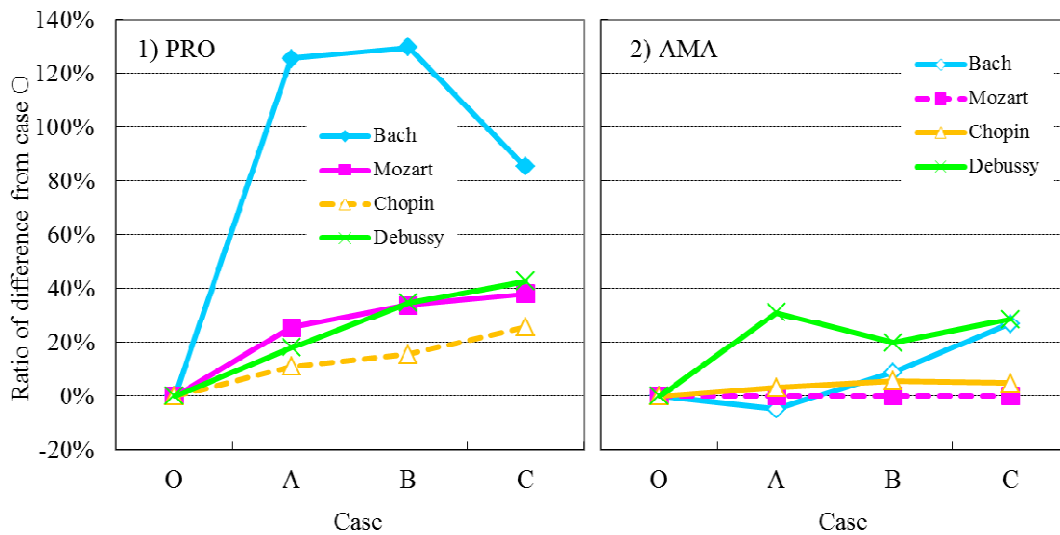


Fig. 2-28 Difference of non pedal duration ratio normalized by case O.

1) PRO, 2) AMA

(solid line : $p < 0.05$, dotted line : not significant)

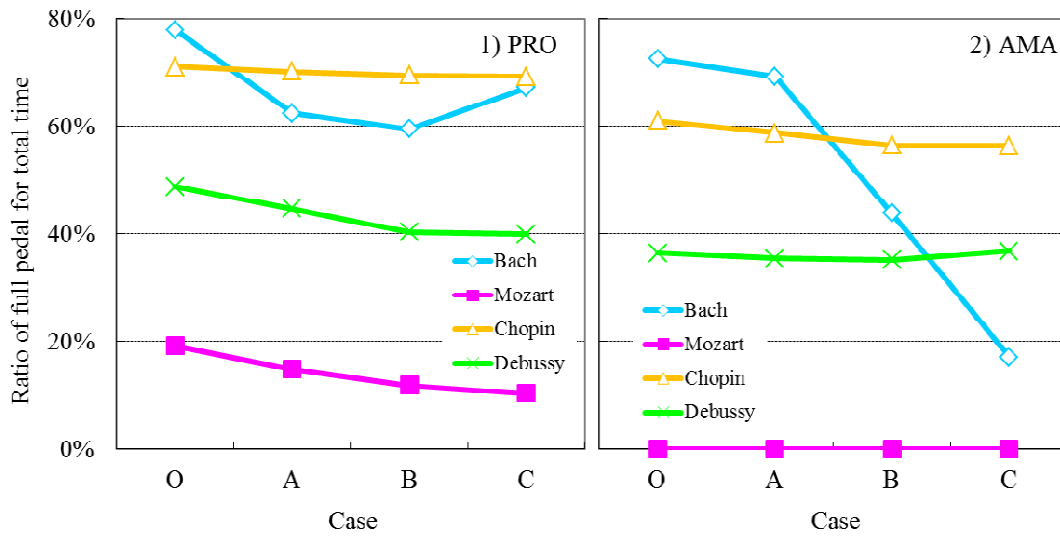


Fig. 2-29 Mean value of full pedal duration ratio.
1) PRO, 2) AMA

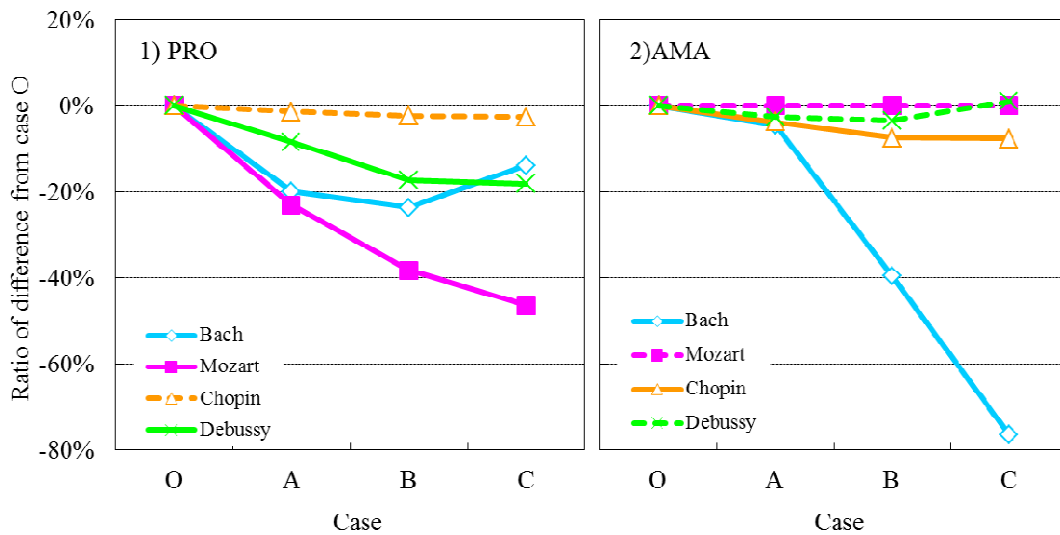


Fig. 2-30 Difference of full pedal duration ratio normalized by case O.
1) PRO, 2) AMA
(solid line : $p < 0.05$, dotted line : not significant)

Table 2-4 Significance of the main effect of sound field condition by ANOVA.

演奏特徴量	演奏者	楽曲			
		Bach	Mozart	Chopin	Debussy
演奏時間	PRO			**	*
	AMA	**	**	*	
平均打鍵速度	PRO	**	**	**	*
	AMA	**	**		
打鍵速度の標準偏差	PRO				
	AMA				
打鍵時間比	PRO			*	
	AMA	*			
平均ペダル変位	PRO	**			**
	AMA	**		**	**
ノンペダル時間比	PRO	*	**		**
	AMA				
フルペダル時間比	PRO	**	**		*
	AMA	**		**	

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$

2.4.5 考察

分散分析の結果から演奏時間、打鍵速度、平均ペダル変位、フルペダル時間比については、演奏者間・楽曲間の違いはあるが大まかに残響時間と相関があることがわかった。

◆演奏時間

有意差が認められた楽曲では残響時間が長い条件において演奏時間が長くなる、つまりテンポが遅くなる傾向がみられた。特に、AMAはDebussyのみ逆の傾向を示しているが、他の3曲は調整傾向が顕著である。また、PROとAMAとでは、有意差の出た楽曲が異なった。

◆平均打鍵速度

残響時間が長くなるにつれて打鍵速度が小さくなり、音量が小さくなる傾向がみられた。特に、PROは全ての楽曲で共通の調整傾向がみられ、打鍵速度と残響時間には相関性が高いことがわかる。一方、AMAはBach演奏時ではPROと同傾向である。他の楽曲では調整がバラついており、残響時間との関係は不明である。

◆打鍵速度の標準偏差

PRO, AMAともにどの楽曲でも優位な差はみられなかった。従って、ダイナミクスレンジへの残響時間の影響は小さいと言える。しかし、実際にはダイナミクスレンジは、最も大きな音と最も小さな音の間の幅のことであるので、打鍵速度の標準偏差には反映されていない可能性もある。

◆打鍵時間長

ほとんどの場合において有意な差は見られなかった。ただ、PRO-Chopinと、AMA-Bachにおいては有意な差が見られ、いずれも残響時間が長くなるに連れ、打鍵時間長も長くなった。一方、既往研究である川井ら(2007)の聴感実験に於いては、残響時間が長くなると音符長が短くなる傾向が示唆されている。

◆平均ペダル変位

残響時間が長くなると平均ペダル変位は小さくなり、ペダルの踏込みが浅くなる傾向がみられた。一方でAMA-Debussyのような逆の傾向もみられた。

◆ノンペダル時間比

有意差が認められた楽曲では残響時間が長くなるにつれ、ノンペダル時間比が増加する、つまりペダルの踏み込みを浅くし、楽器自体の響きを小さくする傾向がみられた。

◆フルペダル時間比

有意差が認められた楽曲では残響時間が長くなるにつれ、フルペダル時間比が減少する、つまりペダルの効果を抑える傾向が顕著にみられた。

演奏時間、打鍵速度に関しては Bolzinger and Risset(1992)の結果と概ね傾向が一致している。一方、打鍵時間比は残響時間との関係は一概にみられないが、有意差が認められた楽曲に関しては、残響時間が長くなると打鍵時間比は大きくなり、川井ら(2007)のピアノ以外での結果とは逆の傾向がみられた。既往研究と本研究とで分析結果が異なった要因としては、楽器の特質の違い(ピアノの場合ペダルで残響時間を調整できる)や、奏法上の違い等(例えばピアノではタッチを強くする際には予備動作の時間が長くなっている可能性がある)が考えられるが、検証には更なる分析が必要である。

ペダルに関しては、平均ペダル変位とフルペダル時間比では若干異なる結果となったが、ペダル効果に直接対応するフルペダル時間比では、残響時間に応じた大幅な調整がみられた。

2.5 まとめ

予備的検討では模擬残響音場における試奏実験を通じて、ホール音響がピアノ演奏に与える影響について調べた。その結果、演奏者は音場条件に応じて演奏を調整しており、その差は客観的に検出可能であることが示された。特に、演奏時間、タッチ、ペダリングで影響がみられた。この音場の違いによる演奏の調整の差異を検出できたことは、予備的検討が本研究の目的である室内音響条件がピアノ演奏に与える影響を定量的に把握することに対して妥当な手法と考えられる。

次章以降では、予備的検討の実験方法や分析方法を踏まえて行った本実験の結果を考察する。

第3章 ピアノ演奏の調整項目とその調整度合

本章からは、予備実験から音場条件と被験者を増やして行なった本実験の結果を用いて、予備的検討では行わなかった T_{30} 以外の室内音響指標の影響や演奏者の個人差を詳細に検討する。本実験はインパルス応答測定とピアノ試奏実験からなり、試奏実験ではMIDI信号の記録と演奏者への演奏調整に関するインタビューを行った。実験は、2010年6月21日～24日（木）と2010年10月26日～29日（金）に分けて、両期間ともヤマハ音楽振興会目黒センター地下実験スタジオとスペース M, ピアノ倉庫にて行った。

3.1 実験1 インパルス応答測定

測定は、ヤマハ音楽振興会目黒センター地下実験スタジオとスペース M, ピアノ倉庫にて行った。スタジオの寸法は、 $7.6\text{ m} \times 6.2\text{ m} \times 3.0\text{ m H}$, スペース M は $15.2\text{ m} \times 10.4\text{ m} \times 3.0\text{ m H}$, $5\text{ m} \times 7\text{ m} \times 2.8\text{ m H}$ (ステージ), ピアノ倉庫は $8\text{ m}^2 \times 2.7\text{ m H}$ である。測定条件は予備実験のインパルス応答測定と同様で、音源はピアノの位置、測定点は音源から1 m 離れたところに設置し、音源と測定点の高さは演奏者の頭の位置である 1.25 m に設定した(図 3-1 ~ 3-3)。測定系統、ソフトウェア、測定パラメーターも同様である。スタジオには調音パネル、吸音パネル、くさび型吸音体を。音場 R にはパネル状の吸音材(床置き)とくさび型吸音体(床置き)を配置した。



Fig. 3-1 Position of a source and receiving point in studio.



Fig. 3-2 Position of a source and receiving point in Space M.



Fig. 3-3 Position of a source and receiving point in the warehouse.

測定した音場は、計 5 条件である(以下、音場 S0, S1, S2, H, R と呼ぶ)。得られた測定データ(.imp ファイル)から室内音響指標分析 AERAP(日東紡音エンジニアリング(株))を用いて、各種室内音響指標を算出した。図 3-1 に算出した室内音響指標値の周波数特性を示す。

予備実験の室内音響指標を求めたときと同様に、音場 S1, S2 では回帰区間を変更して T_{30} を求めた。これは音場 S1, S2 は残響を付加しており、折れ曲がった減衰曲線となったからである。このときの T_{30} は、折れ曲がった時点から 30 dB 減衰したときの時間を算出したものである。

音場の特徴は、まず音場 S0, S1, S2 は予備実験と同様に模擬残響音場、音場 H, R は実音場ということである。音場 H は、ステージと客席部分がある小さいホール、音場 R はピアノがぎりぎり入るくらいの非常に小さい空間である。

各音場で特徴的なのは、音場 S0 では T_{30} , EDT, ST_{Late} , T_S で他の条件よりも値が小さく、響きがほとんどないが、 C_{80} が他条件に比べて大きな値を示しているのが明瞭度は高いことである。音場 S1 と S2 は T_{30} と EDT が異なるが、その他の指標はほぼ同じ値を示している。つまり、この二つは響きの量は変わらないが、響きの長さが異なる条件である。音場 H は、まず空間として他の条件よりも広いことが挙げられる。他に音場 H に特徴的なところは、音場 S1 と T_{30} がほぼ同じ値で響きの長さが近いことである。そして、 ST_{Early} もスタジオの 3 条件と近い値を示している。最後に音場 R の特徴的なところは、空間が非常に小さく、初期の反射音エネルギーが大きく、 ST_{Early} が特に大きな値を示しているが、 T_{30} は S0 と近い値になっている。

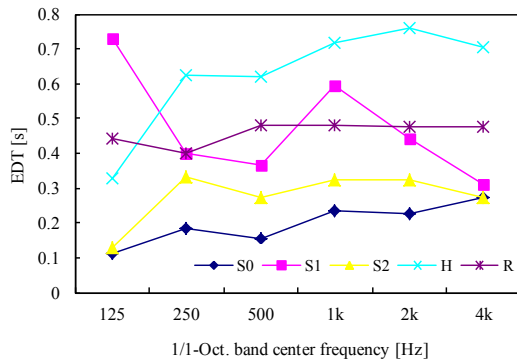


Fig.1: EDT under each acoustic condition

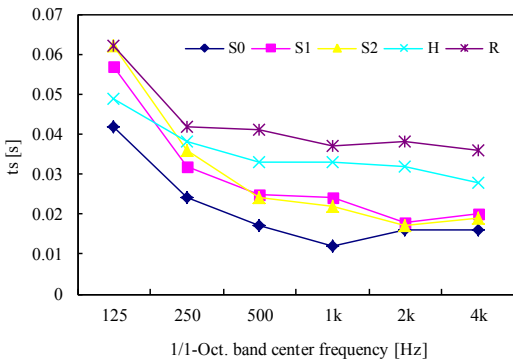


Fig.2: ts under each acoustic condition

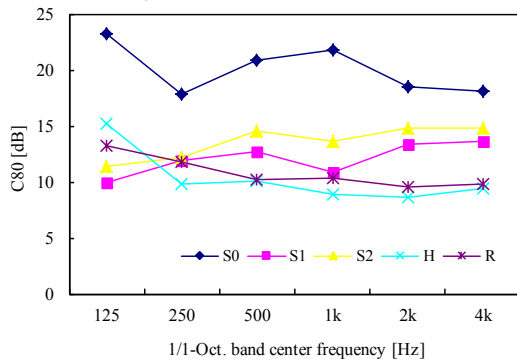


Fig.3: C80 under each acoustic condition

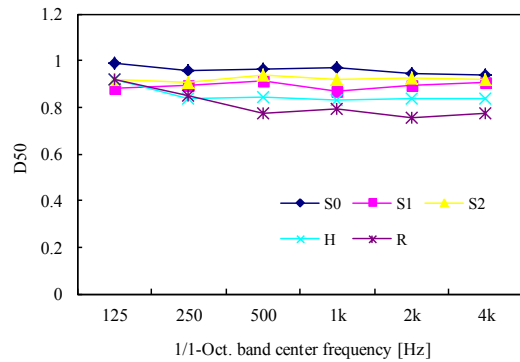


Fig.4: D50 under each acoustic condition

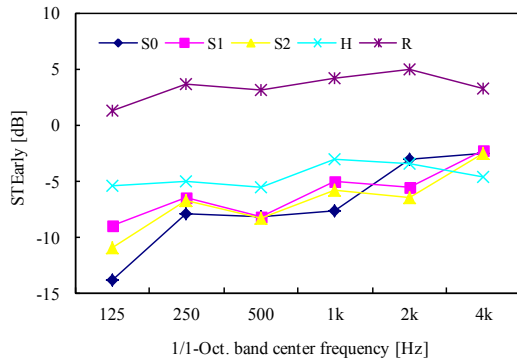


Fig.5: ST_{Early} under each acoustic condition

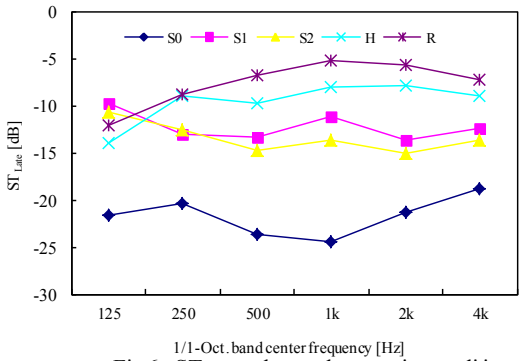


Fig.6: ST_{Late} under each acoustic condition

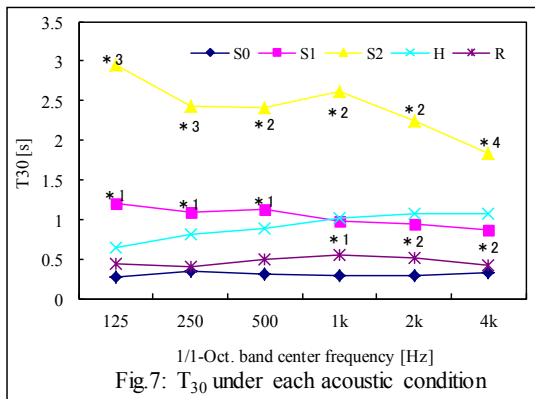


Fig.7: T₃₀ under each acoustic condition

- <音場条件>
- ◆ S0: 実験スタジオ、吸音あり
 - S1: 実験スタジオ、吸音あり
残響付加(残響時間 1.0秒)
 - ▲ S2: 実験スタジオ、吸音あり
残響付加(残響時間 2.7秒)
 - × H : スペースM
 - × R : ピアノ倉庫

- ※ S1, S2ではRangeを変更してT30を求めた。
- * 1: Range -10~-40
 - * 2: Range -20~-50
 - * 3: Range -15~-45
 - * 4: Range -25~-55

Fig. 3-4 Room acoustical parameters at each conditions.

3.2 実験2 ピアノ試奏実験

3.2.1 実験概要

試奏実験は2010年6月21日～24日(木)と2010年10月26日～29日(金)に分けて行い、二つの期間とも同じ実験条件で行った。試奏音場は模擬残響音場として、スタジオ内3条件、実音場として小ホール、小部屋の2条件、計5条件とした。吸音性の比較的高いスタジオではピアノと演奏者を取り囲むように残響付加用のスピーカー4本を配置した。演奏者には各音場で3種類の楽曲を数分間の練習後3回ずつ演奏してもらい、演奏情報記録装置(Yamaha Disklavier)を用いてMIDI信号を記録し、演奏後に演奏調整に関するインタビューを行った。演奏者はピアノ講師12名である。

3.2.2 実験条件

設定した音場条件は、スタジオ内3条件(S0, S1, S2)、小ホール(スペース M: H)、小部屋(ピアノ倉庫: R)の計5条件とした。の比較的高いスタジオではピアノと演奏者を取り囲むように残響付加用のスピーカー4本を配置した。

表3-1に各音場条件の室内音響指標値を示す。

Table 3-1 Conditions of sound fields for experiment.

Case	T_{30} [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]	T_s [ms]	ST_{Early} [dB]	ST_{Late} [dB]	ST_{Total} [dB]	Features
S0	0.3	0.19	21.3	14.5	-6.7	-22.5	-6.6	Anechoic room, system off
S1	1.1	0.48	11.8	24.5	-6.4	-12.8	-5.5	Small concert hall, system on
S2	2.5	0.30	14.1	23.0	-6.9	-14.0	-6.1	Large concert hall, system on
H	1.0	0.67	9.4	33.0	-4.3	-8.7	-3.0	Small hall
R	0.5	0.48	10.2	39.0	3.9	-6.6	4.3	Small room



Fig. 3-5 Experiment in space M.



Fig. 3-6 Experiment in the warehouse.

被験者は、ピアノの専門的な教育を受け、ホールで演奏経験のあるピアノ講師 12 名とした。

演奏曲は、表 3-2 に示す 3 曲とした。Bach は予備実験で特に音場に応じた演奏の調整が行われていたので、今回の実験も採用することにした。Beethoven は、強弱記号が特徴的な楽曲なので、音量部分に調整が行われるのではないかと考えた。Chopin はアゴーギク、つまりテンポのゆらぎに室内音響条件の影響が出ると考えた。図 3-7~3-9 に各楽曲の譜面を示す。

実験は、各楽曲を各音場で数分間の練習後、3 回ずつ分析範囲よりも 2 小節程度先まで演奏してもらった。音場の呈示は、演奏する音場の順序が同じにならないように考慮した。

Table 3-2 Musical pieces for test performance.

Musical pieces	Analytical range
Bach: 平均律クラヴィーア曲集第1巻第1番ハ長調BWV846前奏曲	冒頭8小節
Beethoven: ピアノソナタ第8番ハ短調「悲愴」作品13第1楽章	冒頭4小節
Chopin: ワルツ第9番変イ長調「告別」作品69の1	冒頭16小節



Fig. 3-7 A part of score performed in the experiment (Bach).



Fig. 3-8 A part of score performed in the experiment (Beethoven).



Fig. 3-9 A part of score performed in the experiment (Chopin).

3.3 演奏の分析対象

分析はまず予備的検討と同様に演奏の特徴量を算出した。特徴量は、以下の9種類である。

- ・演奏時間：最初の打鍵された時間から分析範囲直後の打鍵までの時間
- ・平均打鍵速度：分析範囲内のすべての打鍵速度の平均値
- ・打鍵速度の標準偏差：分析範囲内のすべての打鍵速度の標準偏差
- ・平均離鍵速度：分析範囲内のすべての離鍵速度の平均値
- ・打鍵時間比：打鍵時間長の総和／演奏時間
- ・消音時間比：打鍵されていない時間の総和／演奏時間
- ・平均ペダル変位：ペダル変位×継続時間／演奏時間
- ・ノンペダル時間比：ノンペダル時間長の総和／演奏時間
- ・フルペダル時間比：フルペダル時間長の総和／演奏時間

ここで、演奏時間と消音時間比はテンポ、平均打鍵速度は音量、打鍵速度の標準偏差はダイナミクス、平均離鍵速度はタッチ、打鍵時間比はテンポの影響を除いたタッチ、平均ペダル変位は演奏者の予備動作も含めた運動、フルペダル時間比はピアノのペダル効果に対応するものと考えられる(図 3-10)。

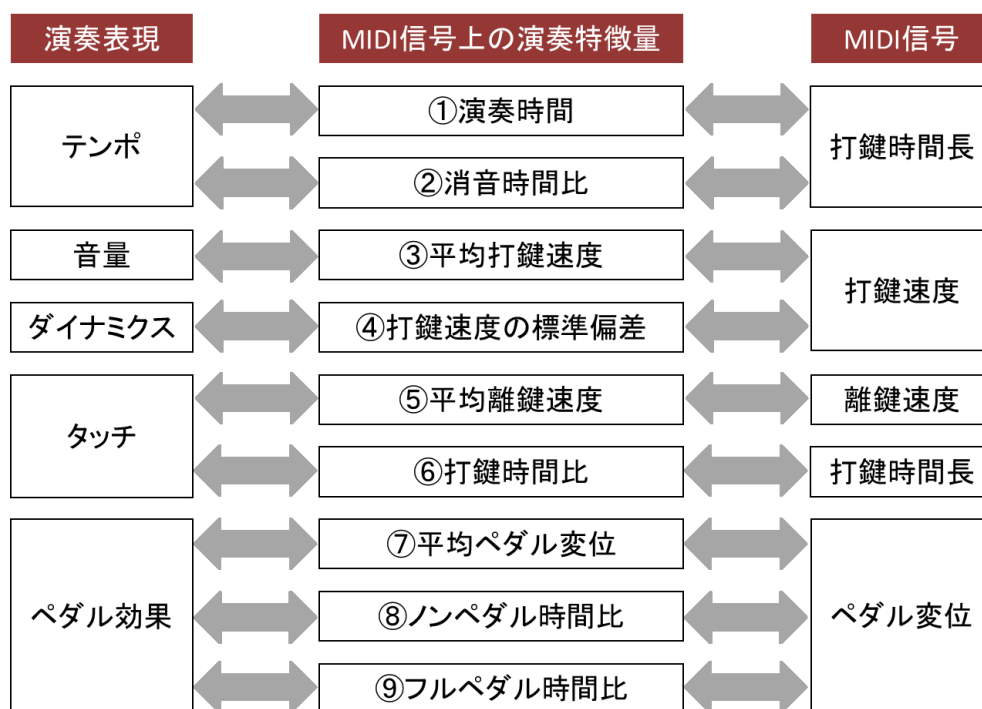


Fig. 3-10 Relationship between expression parameters and features calculated from MIDI.

3.4 結果

前述の演奏特徴量について、演奏者毎に各条件における3回の演奏の平均値を算出し、5条件×3回分の全体平均値を基準とした変化率を算出した。さらに、各種演奏特徴量（被験者12人の平均値）について、楽曲毎に音場と演奏者を要因とした二元配置分散分析（繰り返しあり）および多重比較（Tukey's HSD 検定）を行った。表3-3に音場の主効果の検定結果および演奏者毎の音場を要因とした一元配置分散分析の結果を示す。主効果が現れた特徴量と楽曲の組合せについては、図3-11～3-28に各音場の被験者平均値と多重比較の結果、さらに各演奏者の各音場における平均値を示す。

Table 3-3 Significance of the main effect of sound field condition by ANOVA.

特徴量	二元配置分散分析		演奏者毎の一元配置分散分析												
	音場	演奏者	音場												
			1人目	2人目	3人目	4人目	5人目	6人目	7人目	8人目	9人目	10人目	11人目	12人目	
B a c h	演奏時間	**	**	*	**	**	**	**	**	**	*		**	**	
	平均打鍵速度	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	打鍵速度(標準偏差)		**			*					*			**	*
	平均離鍵速度	**	**		*	**	**		**	**		*	**	**	*
	打鍵時間比	**	**	*	**		**	**	*	*	*	*	*	**	*
	消音時間比		**	**	*		*	**		*				**	*
	平均ペダル変位	**	**	**	**	**	**	**	**		**	**		**	**
	ノンペダル時間比	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	**	*	*
	フルペダル時間比	**	**	**	*	**	*	**	**	**	**	**	**	**	*
B e c k e t h o d e n	演奏時間	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*
	平均打鍵速度	**	**	**		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	打鍵速度(標準偏差)	**	**	**			**	**	**				**	**	
	平均離鍵速度	**	**	**	**	*		*	*					*	**
	打鍵時間比	*	**	**		*	**	*		*		*		*	
	消音時間比		**		**	*	**	*						*	
	平均ペダル変位	**	**	*		**	**	**		**	**	**	**	**	**
	ノンペダル時間比	**	**	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	フルペダル時間比	**	**	*	**	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**
C h o p i n	演奏時間		**			*	*			**	*		**	**	**
	平均打鍵速度	**	**			**	**	*	**	**	**	**	**	**	**
	打鍵速度(標準偏差)	**	**	*					**	**	**		**	**	
	平均離鍵速度	**	**		*	**		**	*	**		*	*	**	*
	打鍵時間比	**	**			**	**			**		*	**	*	**
	消音時間比	**	**	**	**		*		**	*	*	*	*	*	*
	平均ペダル変位	**	**	**	*	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**
	ノンペダル時間比	**	**	**	*	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**
	フルペダル時間比	**	**	**	*	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**

** : p < 0.01, * : p < 0.05

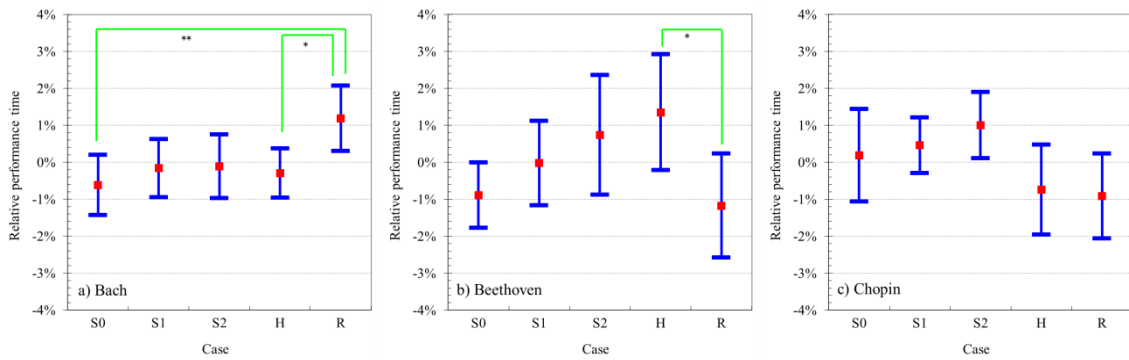


Fig. 3-11 Mean value of relative performance time.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

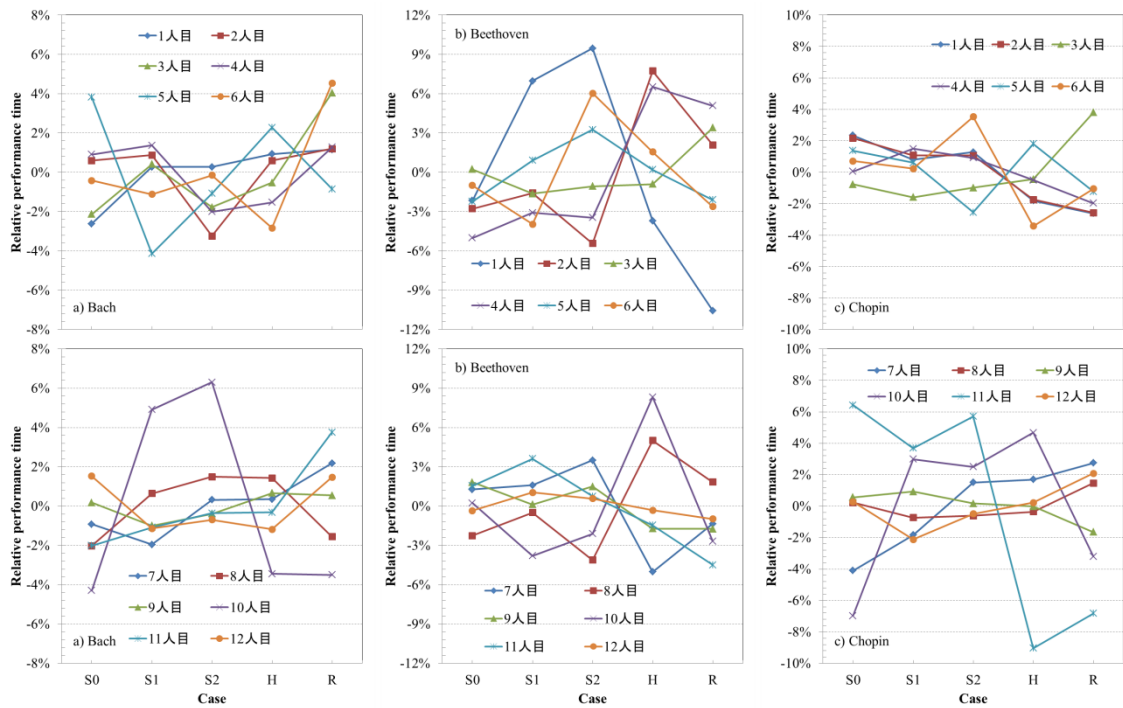


Fig. 3-12 Relative performance time of each performer.

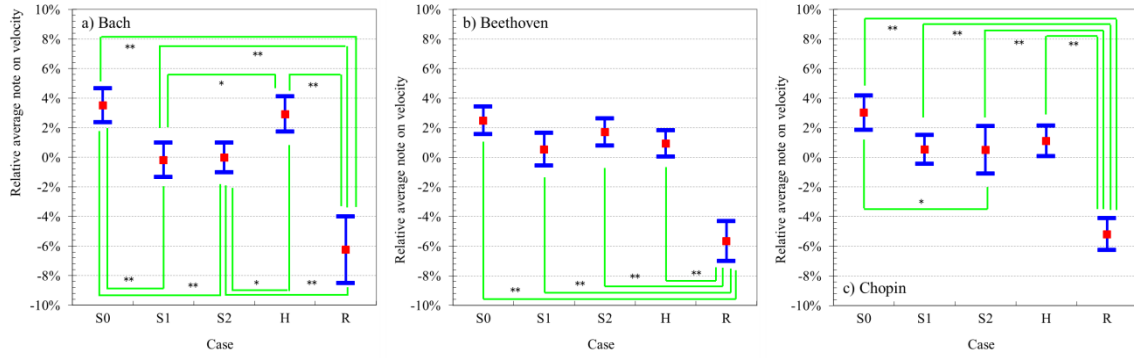


Fig. 3-13 Mean value of relative note on velocity.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

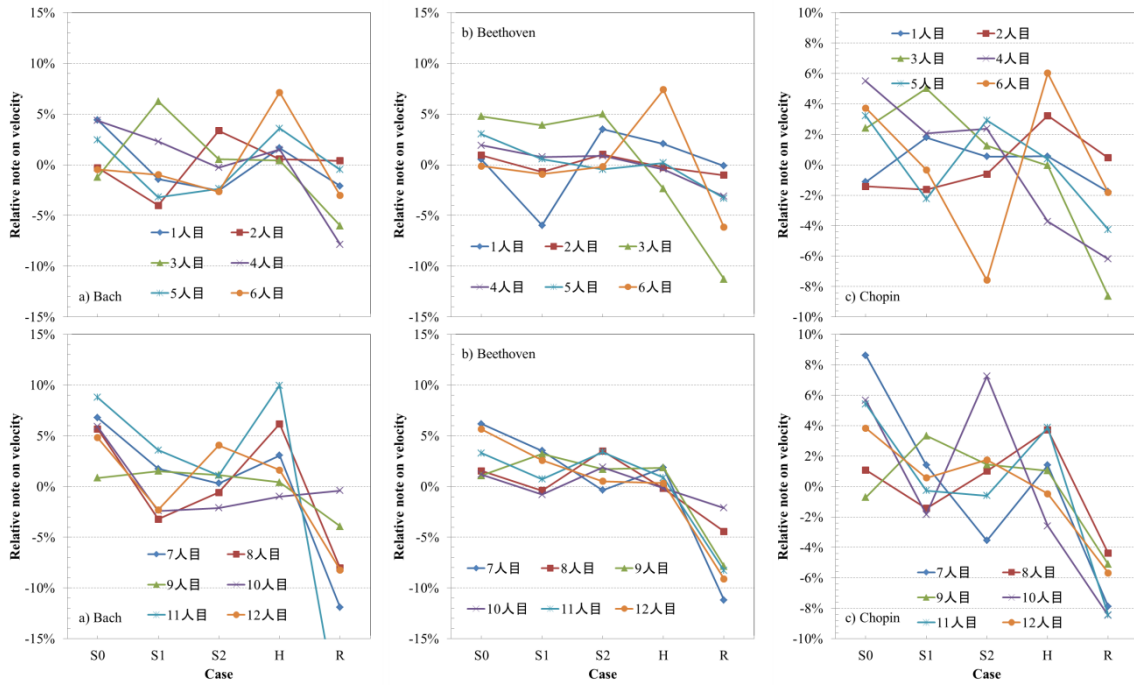


Fig. 3-14 Relative note on velocity of each performer.

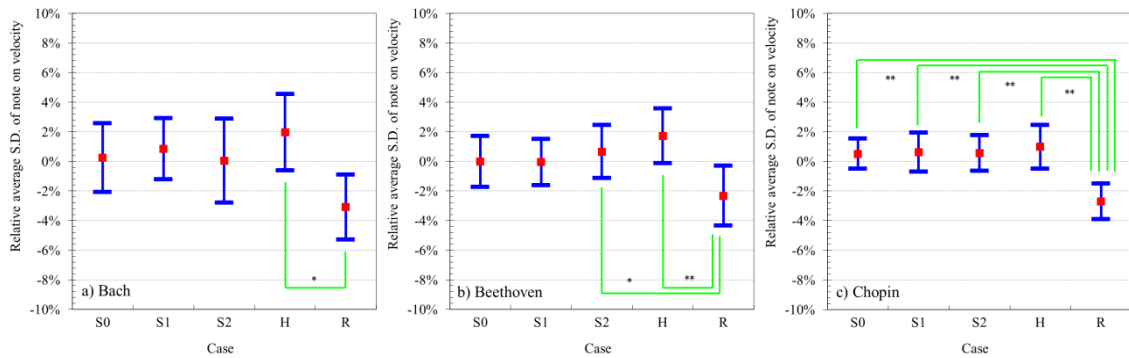


Fig. 3-15 Mean value of relative standard deviation note on velocity.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

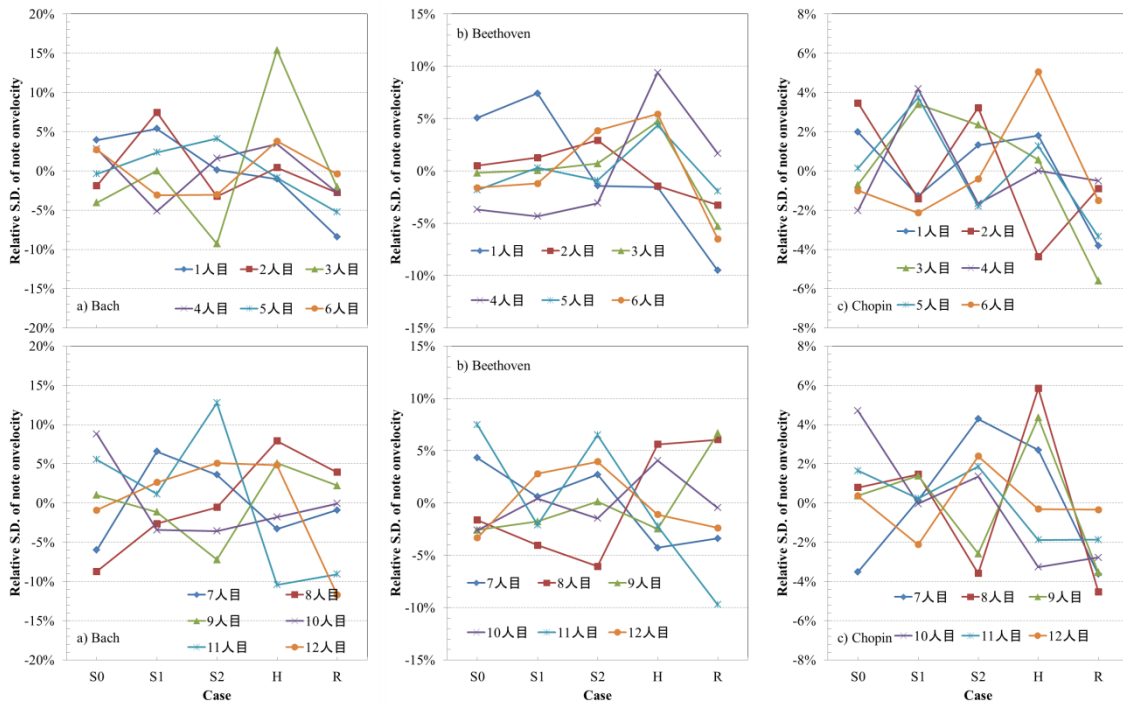


Fig. 3-16 Relative standard deviation note on velocity of each performer.

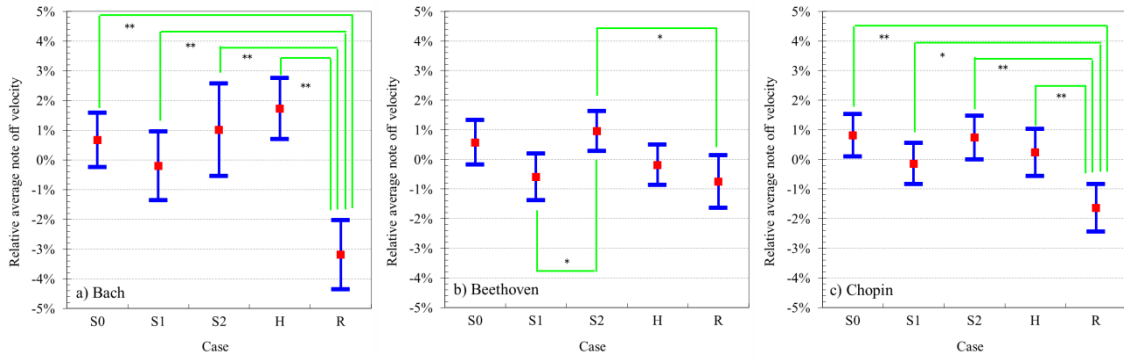


Fig. 3-17 Mean value of relative note off velocity.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

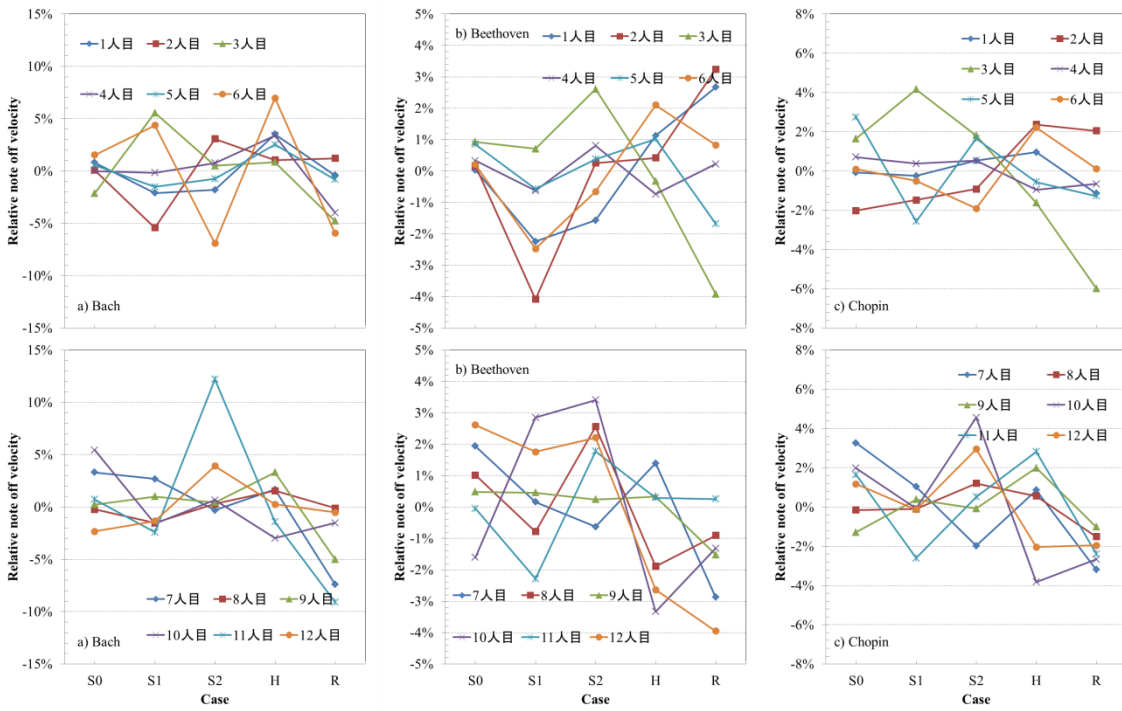


Fig. 3-18 Relative note off velocity of each performer.

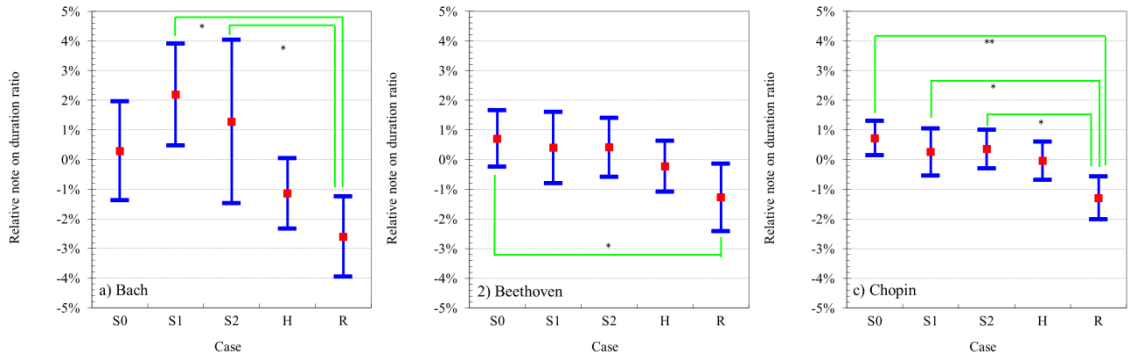


Fig. 3-19 Mean value of relative note on duration ratio.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

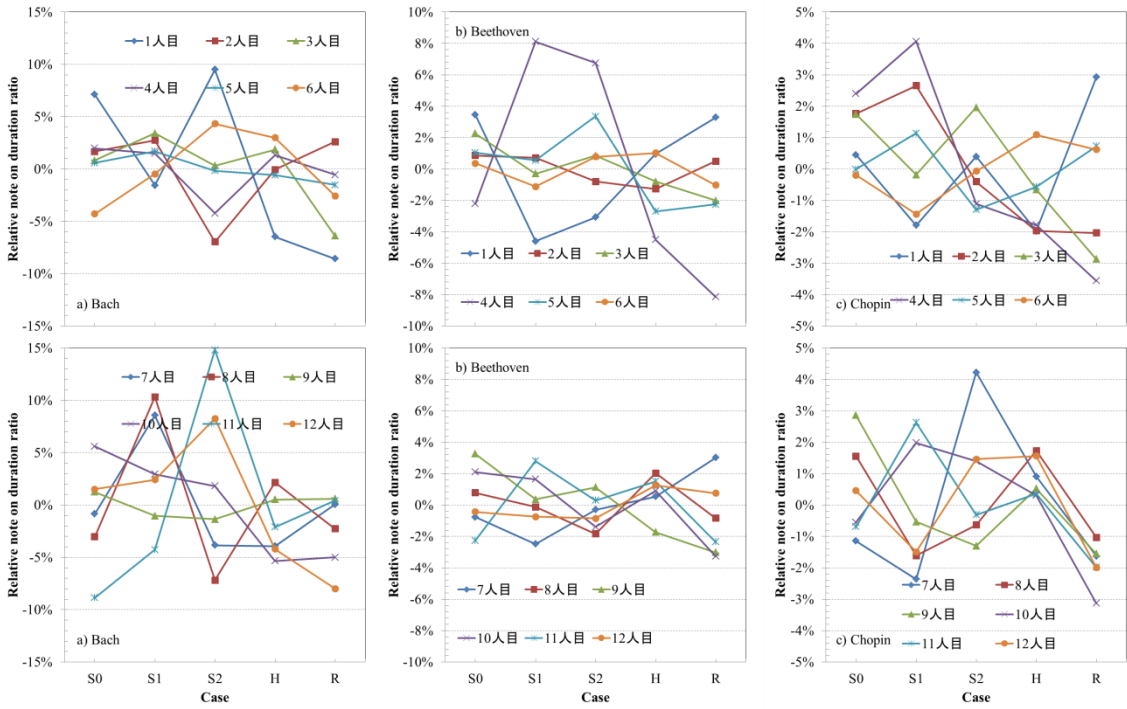


Fig. 3-20 Relative note on duration ratio of each performer.

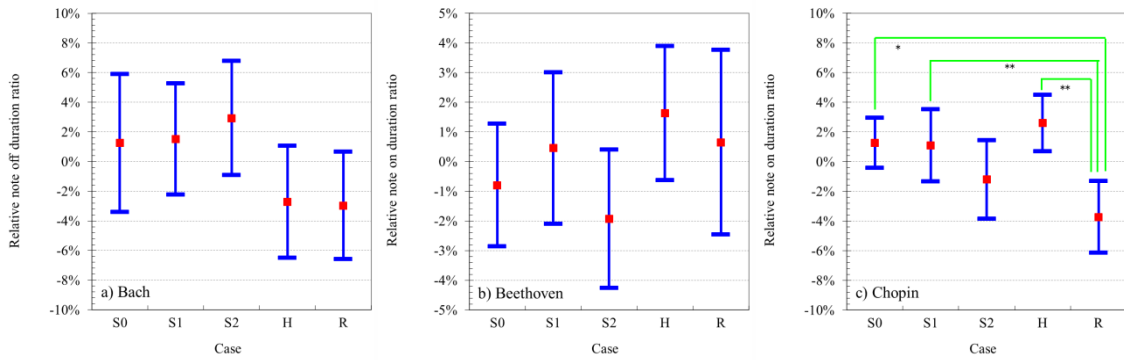


Fig. 3-21 Mean value of relative note off duration ratio.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

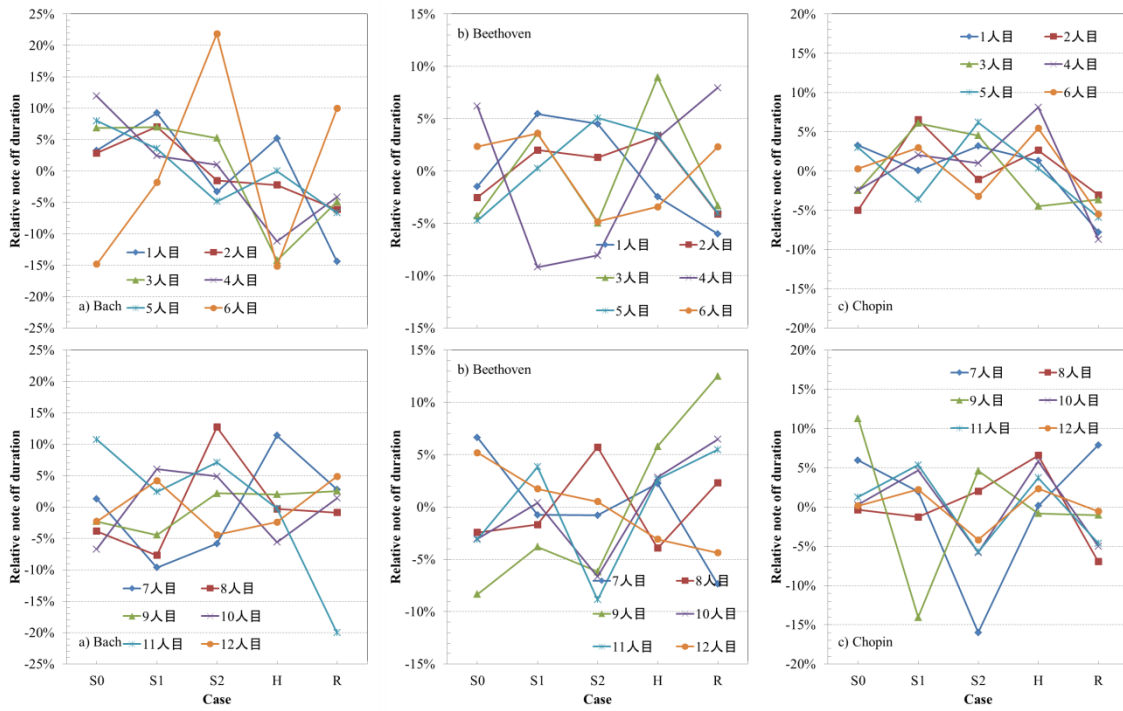


Fig. 3-22 Relative note off duration ratio of each performer.

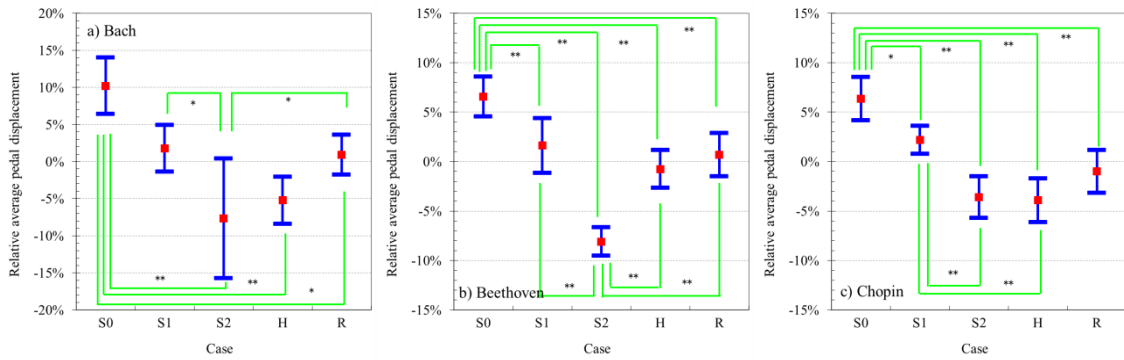


Fig. 3-23 Mean value of pedal displacement.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

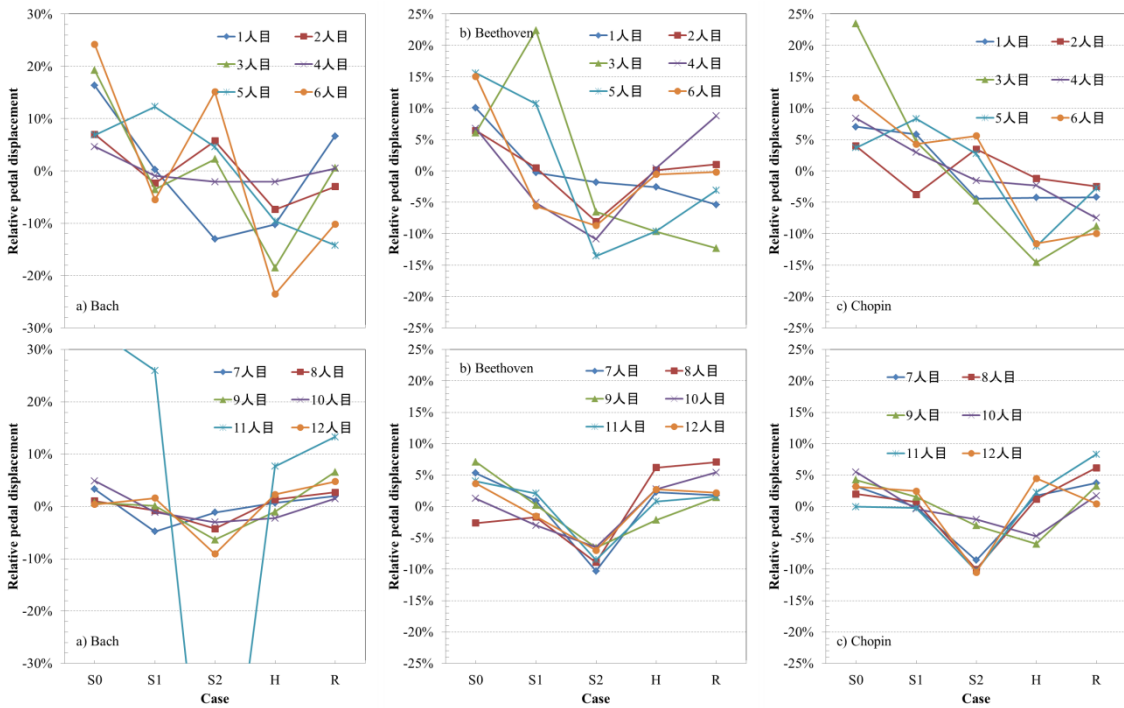


Fig. 3-24 Relative pedal displacement of each performer.

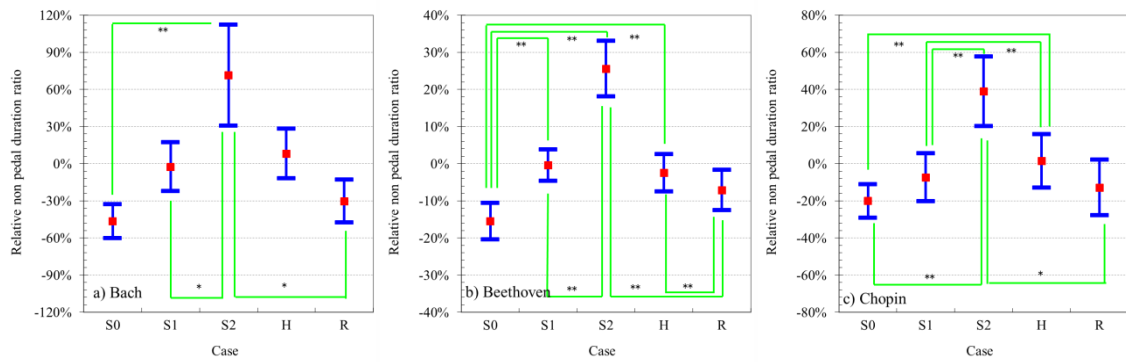


Fig. 3-25 Mean value of non pedal duration ratio.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

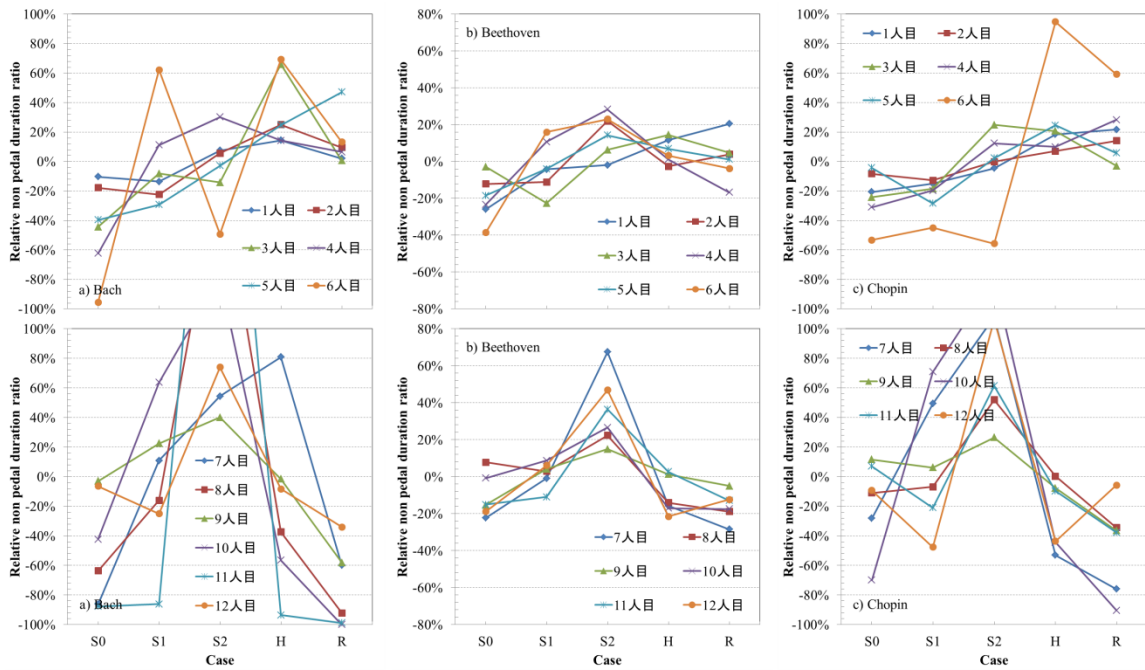


Fig. 3-26 Relative non pedal duration ratio of each performer.

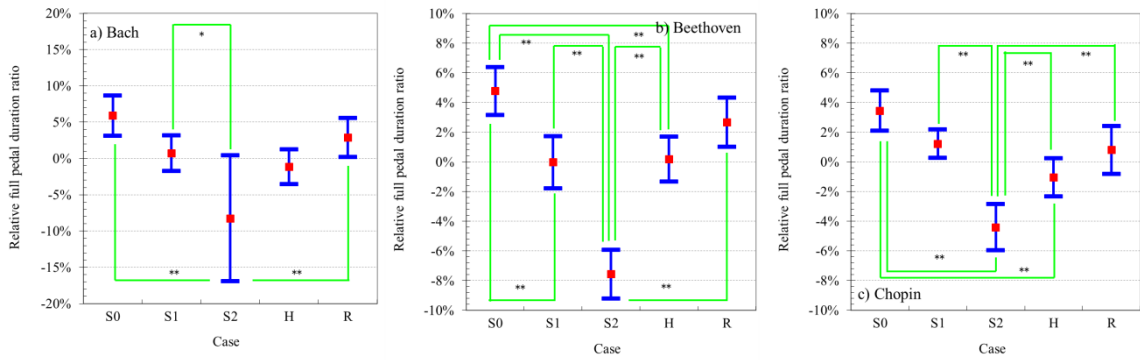


Fig. 3-27 Mean value of full pedal duration ratio.
 (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

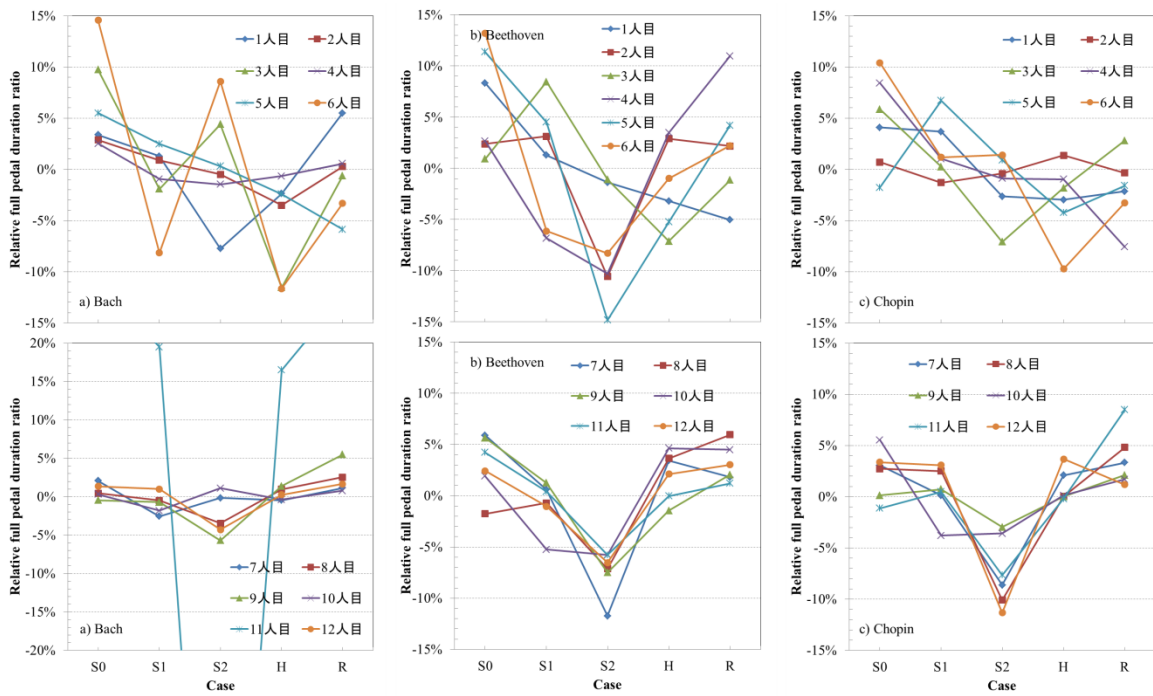


Fig. 3-28 Relative full pedal duration ratio of each performer.

3.5 考察

二元配置分散分析の演奏者の主効果が全楽曲で1% 有意という結果から、演奏者間で演奏の調整傾向は大きく異なることが示された。

◆演奏時間

被験者12人の平均値では、Bach演奏時で音場Rのみテンポが遅くなっているが、Beethoven演奏時では音場Rでテンポが速くなっており、残響時間との相関は認められない。これは、予備的検討の残響時間が長い条件において演奏時間が長くなるという結果とは違う結果となった。

各演奏者の演奏時間の結果からも、個人でかなり変化傾向が異なるので、室内音響条件との関係は不明である。

◆平均打鍵速度

3曲に共通して音場Rでは打鍵速度が明確に小さくなった。音場Rでは残響エネルギーが著しく大きいため、演奏者が音量を抑制したものと考えられる。予備的検討では、残響時間が長くなるにつれて打鍵速度が小さくなる結果となったが、今回の結果では残響時間よりも ST_{Early} や ST_{Late} で表される残響エネルギーのほうが、影響度合いが大きいことが確認できた。これは各演奏者の結果でも顕著である。

◆打鍵速度の標準偏差

被験者12人の平均値の結果では、音場Rで標準偏差が非常に小さな値をとっており、ダイナミクスの幅は小さくなっている。これは、平均打鍵速度が音場Rの残響エネルギーの影響で極端に小さくなったことが原因であると考えられる。

一方、演奏者別では、似た傾向を示す演奏者もいるが、ばらつきがある。

◆平均離鍵速度

Bach, Chopin演奏時に音場Rで離鍵速度が小さくなった。これも残響エネルギーが影響していると考えられるが、Beethovenではこの傾向が明確ではないので、曲によって影響が異なることが予想される。

◆打鍵時間比

音場Rで打鍵時間比が減少する傾向がみられるが変化は非常に小さい。演奏者ごとでも、Bachでは変化率が大きな演奏者もいるが、大半の演奏者は、 $\pm 5\%$ の変化であり、音響条件の影響があることは明確ではない。これは、予備的検討と一致する結果となった。

◆消音時間比

被験者平均値では、Chopin のときに音場 R で消音時間比が小さな値を示している。この結果は、演奏者ごとの結果も同様の傾向である。Bach と Beethoven 演奏時では、その傾向はみられず、楽曲によって音場条件の影響が異なることが予想できる。

◆平均ペダル変位

全楽曲を通して、音場 S0, S1, S2 では残響時間が長くなるにつれ平均ペダル変位は減少しており、ペダル踏み込みを浅くする傾向がみられる。一方、音場 H では残響時間が同程度の音場 S1 に比べてペダルが抑制されており、やや大きい残響エネルギーが影響したものと考えられる。残響時間が音場 S1 と近い音場 R でも残響エネルギーの影響としてペダル抑制の傾向が現れている。

演奏者別では、Beethoven と Chopin で 7~12 人目の演奏者が非常に近いペダル調整を行っており、演奏者共通の演奏調整傾向があることがわかる。

◆ノンペダル時間比

3 曲全てで、音場 S0, S1, S2 で残響時間が長くなるにつれ平ノンペダル時間比は増加しており、ペダル踏み込みを浅くし、ノンペダルの状態にする傾向がみられる。

演奏者別にみると、ノンペダル時間比の変化率は非常に幅があることがわかる。これは、ノンペダルの状態が曲中に少ないため、少しでもペダルの踏み込みが深くなると大きく変動してしまうからである。

◆フルペダル時間比

平均ペダル変位と同様に、全楽曲を通して、音場 S0, S1, S2 では残響時間が長くなるにつれフルペダル時間比は減少しており、ペダルの効果を抑制する傾向がみられる。音場 H でも残響時間が同程度の音場 S1 に比べてペダルが抑制されており、平均ペダル変位同様に、やや大きい残響エネルギーが影響したものと考えられる。そして、音場 R でも残響エネルギーの影響としてペダル抑制の傾向が現れている。

演奏者別でも、平均ペダル変位と同様に Beethoven と Chopin で 7~12 人目の演奏者が非常に近いペダル調整を行っている。

3.6 まとめ

模擬残響音場および実音場におけるピアノ試奏実験を通じて、室内音響条件がピアノ演奏に与える影響について調べた。その結果、演奏者は音場条件に応じて演奏を調整しており、その差は客観的に検出可能であることが示された。特に、音量に関連する平均打鍵速度、タッチに関連する平均離鍵速度、ペダリングに関連する平均ペダル変位、ノンペダル時間比、フルペダル時間比に強い影響がみられた。さらに、演奏者間で演奏の調整傾向は、大きく異なることも確認できた。

この結果だけでは、実際に差はあることはわかるが、演奏の調整に対する音場の影響がどの程度あるのかが不明である。なので、次章では顕著だった個人差に着目しながら、演奏の調整と室内音響条件の関係を定量的に考察する。

第4章 ピアノ演奏の調整と室内音響条件の関係

4.1 はじめに

第3章では、実音場および模擬残響音場におけるピアノ試奏実験から得られた MIDI 信号を用いて、演奏特徴量を算出し、実際に演奏が調整されているかどうかを確認した。本章では、算出した演奏特徴量を用いて、さらに分析を進め、演奏特徴量と室内音響指標の関係を定量化する。

4.2 分析方針

最初に9種類の演奏特徴量と6種類の室内音響指標すべてを用いて、演奏者と室内音響指標を布置する主成分分析を行い、演奏者は複数のグループに分けられることが出来るのか、それとも、どれもバラバラなのかを確認する。グループ化できれば、演奏者は共通する演奏の調整傾向を持つので、それを定量的に把握できる可能性がある。

次に、演奏特徴量と室内音響指標の関係を調べる。9種類の演奏特徴量と6種類の室内音響指標すべてを用いて、演奏特徴量と室内音響指標を布置する主成分分析を行い、どの演奏特徴量と室内音響指標の組み合わせが相関の高い組なのかを検証する。

そして、得られた演奏特徴量のみを使用して、演奏者と室内音響指標を布置する主成分分析を行い、演奏者がどれくらいばらついているのかを調べ、演奏特徴量と室内音響指標の散布図でも確認して、線形関係を仮定できるかを検討する。

最後に線形関係を仮定できる演奏特徴量と室内音響指標の組み合わせを用いて、単回帰分析および重回帰分析を行い、演奏特徴量と室内音響指標の関係の定量化を試みる。

4.3 演奏の調整傾向

4.3.1 分析方法

第3章の分散分析の結果から、演奏の調整は演奏者間でかなり異なることが分かった。そこでまず、各演奏者の異なる音場における演奏調整傾向を把握するために、演奏特徴量と室内音響指標を変数として、演奏者と室内音響指標を布置する主成分分析を行った。各変数は標準化を行い、単位の影響を除いてある。

分析に用いた統計ソフトは「JMP 8」である。

4.3.2 結果と考察

図4-1に各楽曲の第1, 第2主成分得点の散布図と第1, 第3主成分得点の散布図, 第3主成分までの累積寄与率を示す。図中の1~12までの番号は演奏者を表しており, マーカが同じならば似た演奏傾向を示している(累積寄与率が50%以上になる第3主成分を考慮して分類した)。

3曲共に第3主成分までの累積寄与率がかろうじて50%を上回るぐらいなので説明力は高いとは言えないが、演奏者の調整傾向をつかむことは可能である。

Bachでは、1~6人目, 7, 10, 12人目, 8, 9人目, 11人目という4つの演奏調整傾向を示すグループに分けられた。Beethovenでは、1, 3, 5人目, 2, 6, 7, 9, 11, 12人目, 4, 8, 10人目という3つのグループ, Chopinでは1, 3, 5, 6, 8, 9人目, 2, 10人目, 4人目, 7, 11, 12人目という4つのグループになった。

結果として、演奏の調整傾向は楽曲によって演奏者間・演奏者内で異なるが、演奏者は3つから4つのグループに分けられ、残響条件として主に残響時間と残響エネルギーの影響度合いも異なることがわかった。

この結果から、演奏者は一人一人バラバラな演奏調整を行っているわけではなく、複数個のグループになるが演奏の調整に共通性があることが示唆される。

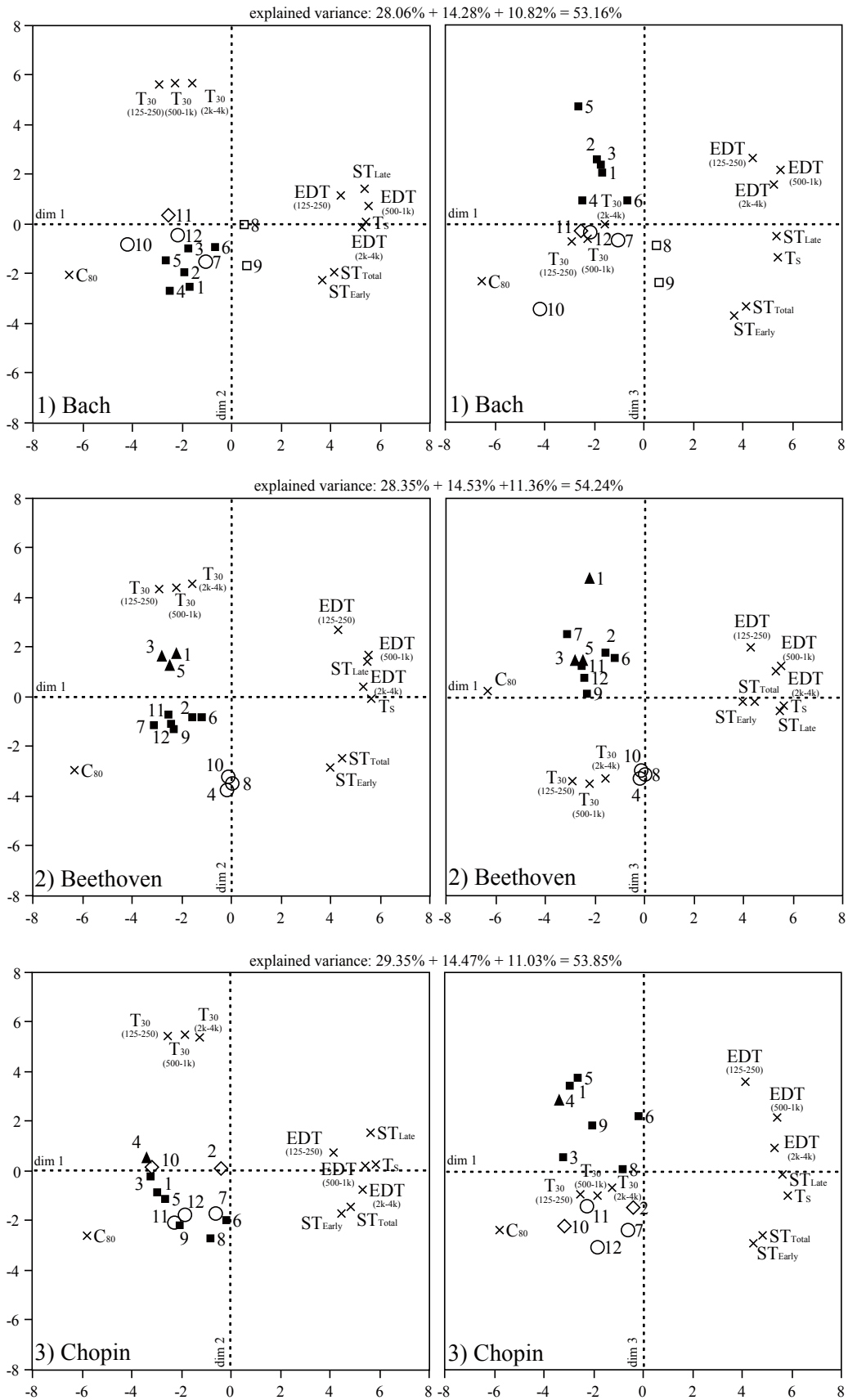


Fig. 4-1 Principal component analysis.

1) Bach, 2) Beethoven, 3) Chopin

4.4 演奏の調整項目と室内音響指標の関係

4.4.1 分析方法

算出した9種類の演奏特徴量がどの室内音響指標と関連しているのかを把握するため、両者を変数として、演奏特徴量と室内音響指標を布置する主成分分析を行った。各変数は標準化を行い、単位の影響を除いてある。

分析に用いた統計ソフトは同様に「JMP 8」である。

4.4.2 結果と考察

図4-2に第1, 第2主成分得点の散布図と第1, 第3主成分得点の散布図, 第3主成分までの累積寄与率を示す。

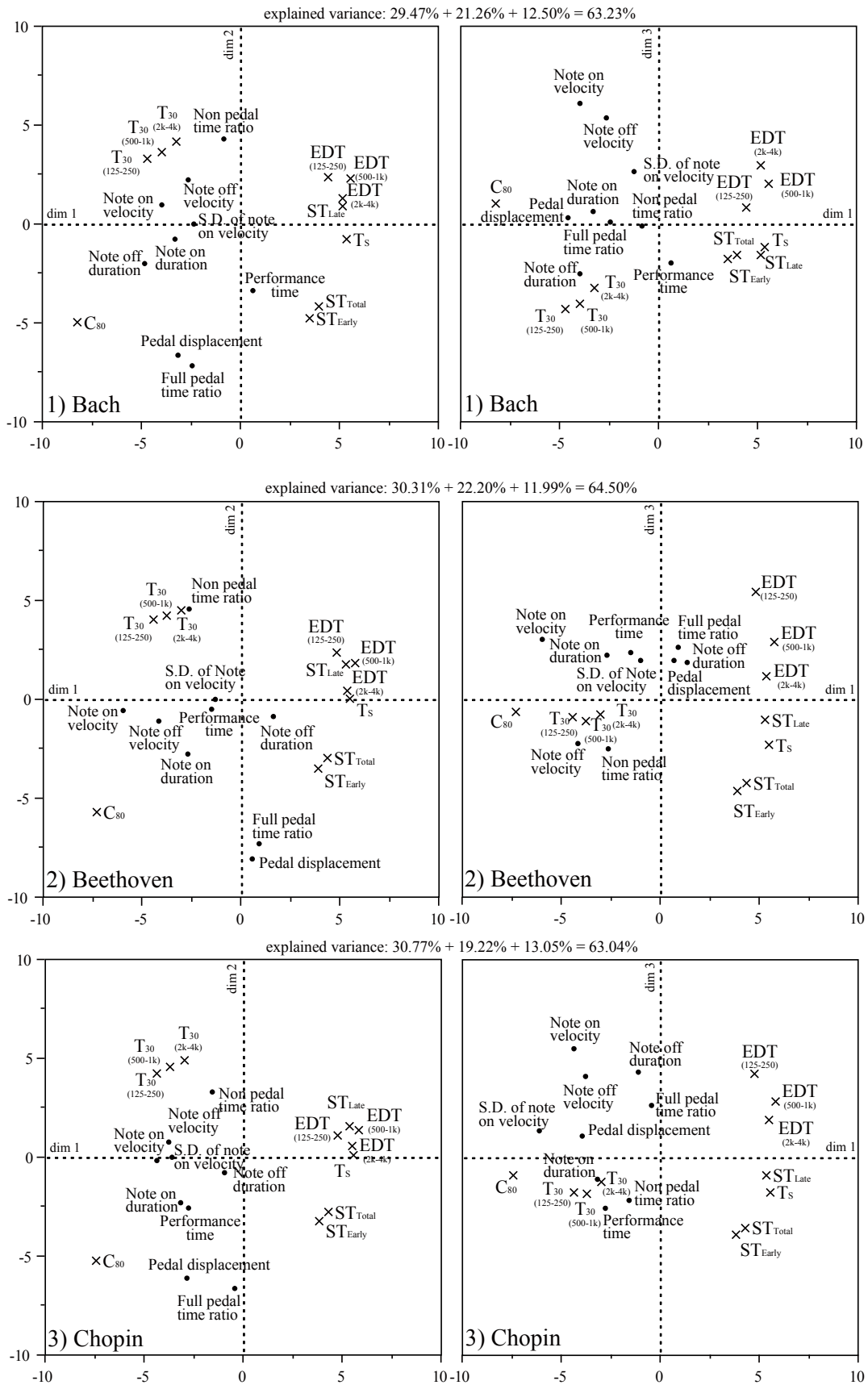


Fig. 4-2 Principal component analysis.

1) Bach, 2) Beethoven, 3) Chopin

演奏特徴量と室内音響指標を布置した主成分分析の結果から、3曲に共通する傾向として、平均打鍵速度と $ST_{Early} \cdot ST_{Late} \cdot T_S$ 、平均ペダル変位・ノンペダル時間比・フルペダル時間比と T_{30} が負の相関があることがわかる。

楽曲別にみると、**Bach** では平均離鍵速度と ST_{Early} 、消音時間比と EDT が負の相関であることが確認できる。演奏時間や打鍵速度の標準偏差は、室内音響指標の相関が低く、各音響指標の影響が少ないことがわかる。

Beethoven は、平均離鍵速度と EDT が負の相関があるが、その他の演奏特徴量と室内音響指標の組み合わせでは相関はみえない。

Chopin では、演奏時間と EDT、平均離鍵速度と $ST_{Early} \cdot ST_{Late} \cdot T_S$ の各種組み合わせに負の相関が確認できる。一方で、打鍵時間比や消音時間比室内音響指標の影響が比較的小さい結果となった。

上記の相関が高いことが予想される演奏特徴量と室内音響指標 (T_{30} , EDT, ST_{Early} , ST_{Late} , T_S) を変量として主成分分析を行った。まず、3曲に共通する平均打鍵速度、平均ペダル変位、ノンペダル時間比、フルペダル時間比の結果を図 4-3 ~ 4-6 に示す。

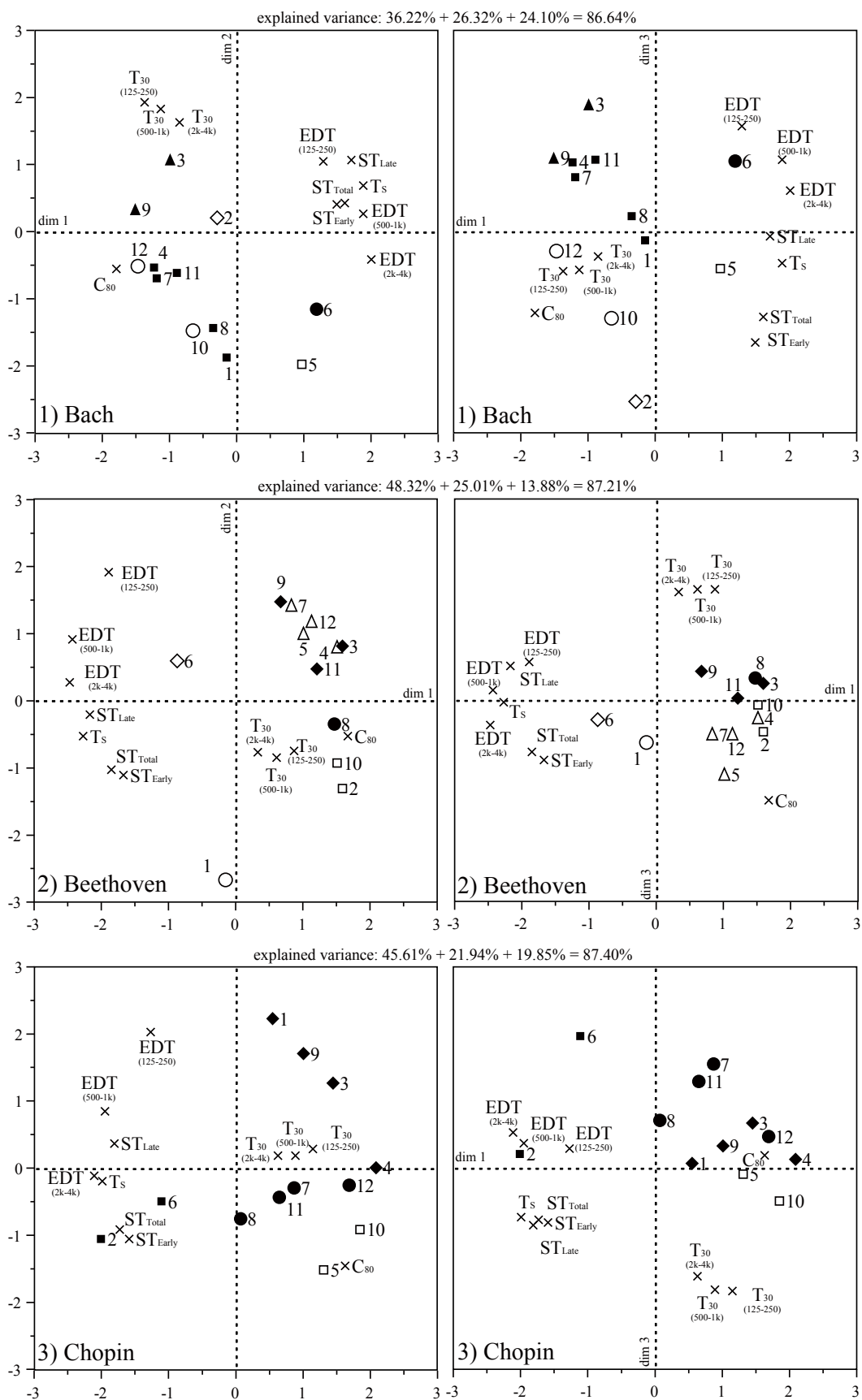


Fig. 4-3 Principal component analysis (Note on velocity).

1) Bach, 2) Beethoven, 3) Chopin

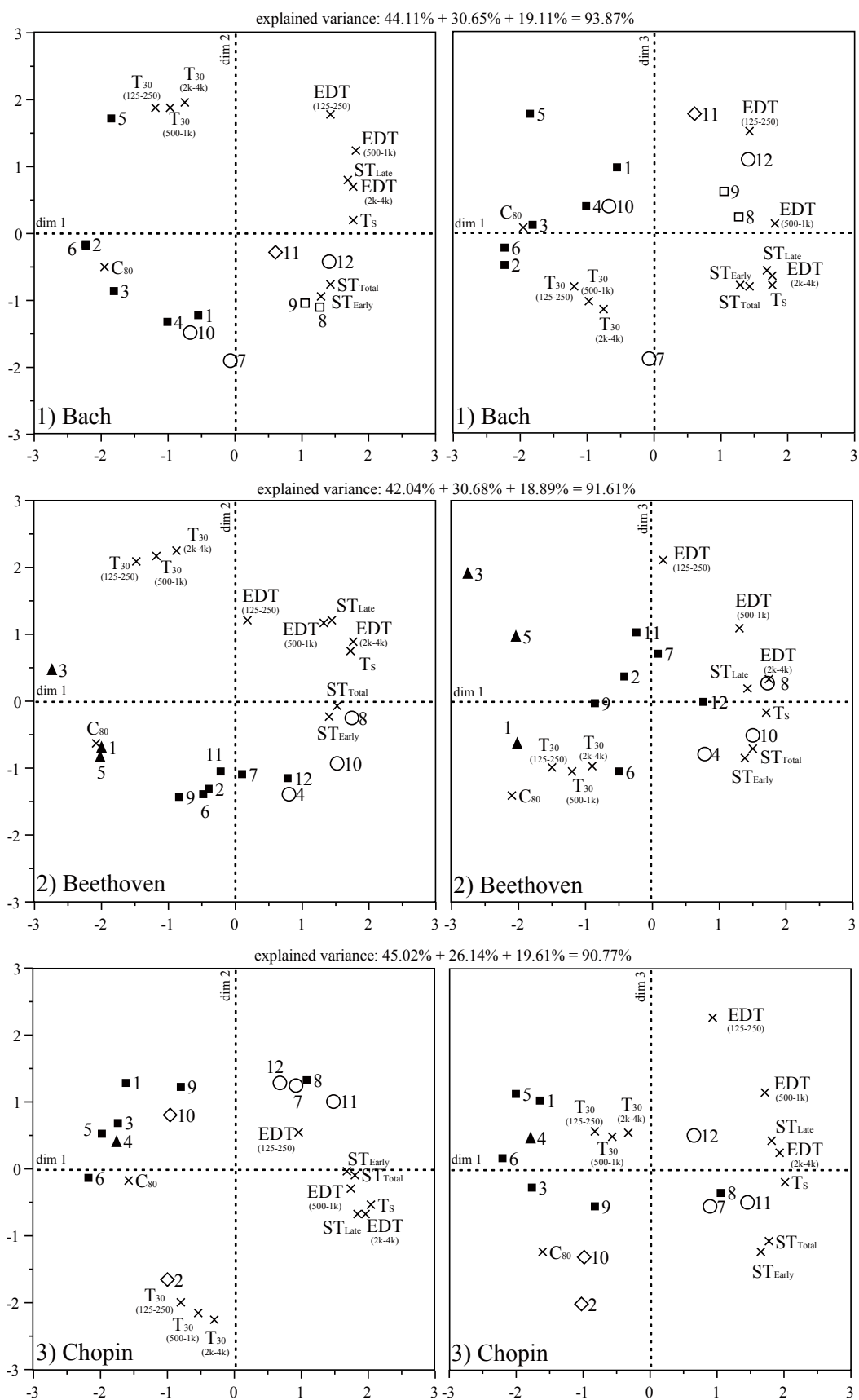


Fig. 4-4 Principal component analysis (Pedal displacement).

1) Bach, 2) Beethoven, 3) Chopin

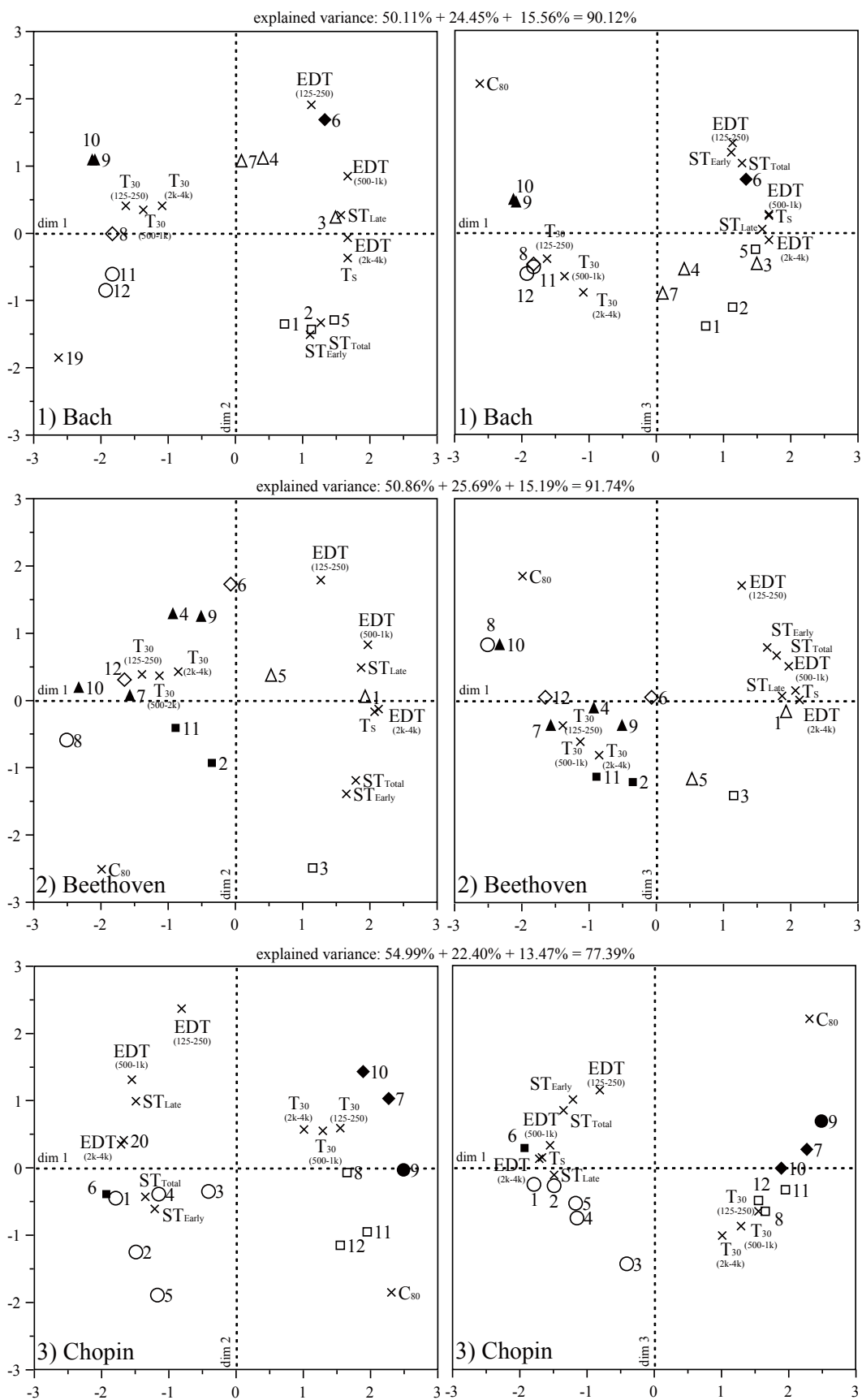


Fig. 4-5 Principal component analysis (Non pedal duration ratio).

1) Bach, 2) Beethoven, 3) Chopin

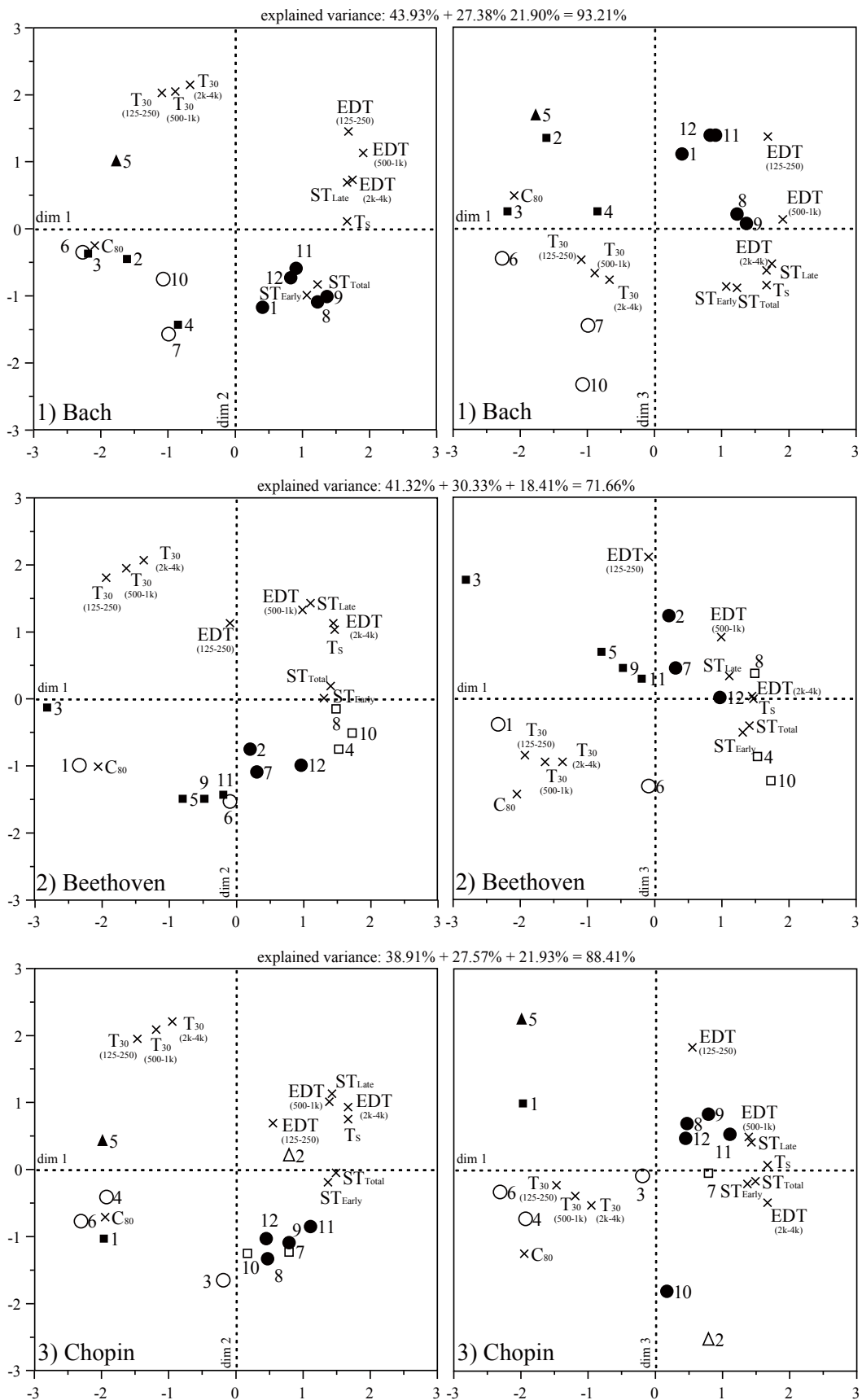


Fig. 4-6 Principal component analysis (Full pedal duration ratio).

1) Bach, 2) Beethoven, 3) Chopin

平均打鍵速度の主成分分析の結果(図 4-3)から、大半の演奏者の打鍵速度が ST_{Early} と負の相関があることがわかる。一方で、Bach の 2, 5, 6 人目、Beethoven の 1 人目、Chopin の 2, 6 人目の打鍵速度は ST_{Early} と相関が低いことがわかる。

平均ペダル変位の結果(図 4-4)から、Bach で 1, 4, 7, 10 人目の演奏者が T_{30} と負の相関があり、2, 3, 6 人目の演奏者が C_{80} と 8, 9, 12 人目の演奏者が ST_{Early} と正の相関があることを確認できる。Beethoven では多くの演奏者が T_{30} と負の相関を示している。Chopin では 7, 8, 11, 12 人目の演奏者が T_{30} と負の相関関係である。

ノンペダル時間比の結果では、Bach で T_{30} に影響される群とそれ以外の指標にバラバラに影響されている演奏者が確認できる。Beethoven では T_{30} に影響されている演奏者が多い結果となった。Chopin では T_{30} に影響される群と ST_{Early} に影響される群に大きく分けられた。

フルペダル時間比でもノンペダル時間比と同様に Bach で T_{30} に影響される群とそれ以外の指標にバラバラに影響されている演奏者が確認できる。Beethoven でも T_{30} に影響されている演奏者が多い結果となった。Chopin でも同様の傾向である。

次に楽曲毎に相関が高いことが予想される演奏特徴量と室内音響指標を変量として主成分分析を行った結果を示す。

図 4-7, 4-8 に Bach の平均離鍵速度、消音時間比の結果を示す。

結果として、Bach の平均打鍵速度では、 C_{80} が 10 人目に、 T_{30} が 12 人目に強く影響を及ぼしている等が確認できるが、演奏者はバラついており、特徴量と室内音響指標の関係は明確ではない。

消音時間比は C_{80} が 11 人目と正の相関があるが、他の演奏者では明確な関係はない。

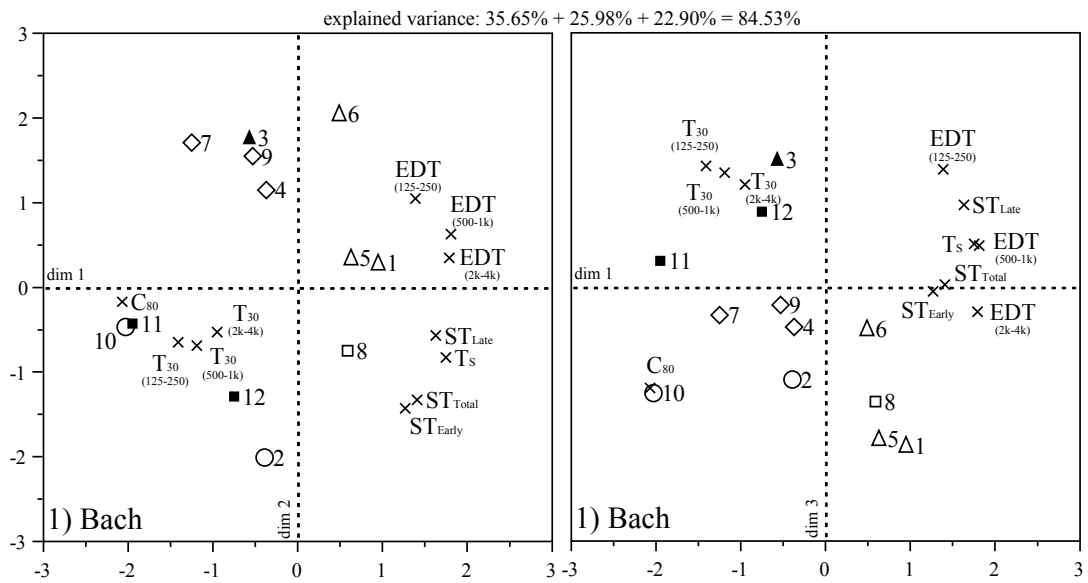


Fig. 4-7 Principal component analysis (Bach, Note off velocity).

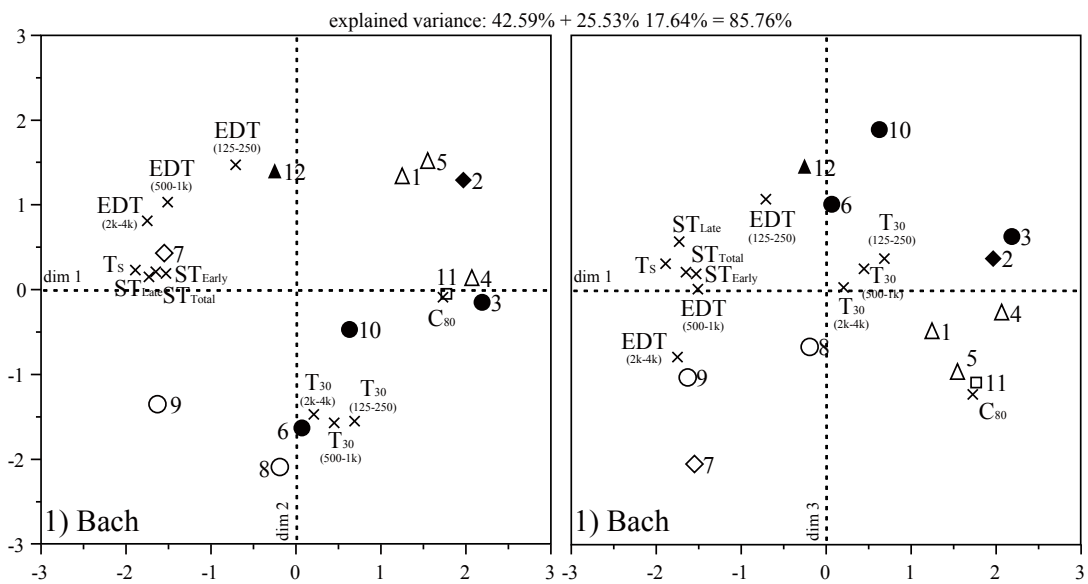


Fig. 4-8 Principal component analysis (Bach, Note off duration).

図 4-9 に Beethoven の平均離鍵速度の結果を示す。
 3, 7, 9, 12 人目の演奏者が ST_{Early} と負の相関があることがわかる。

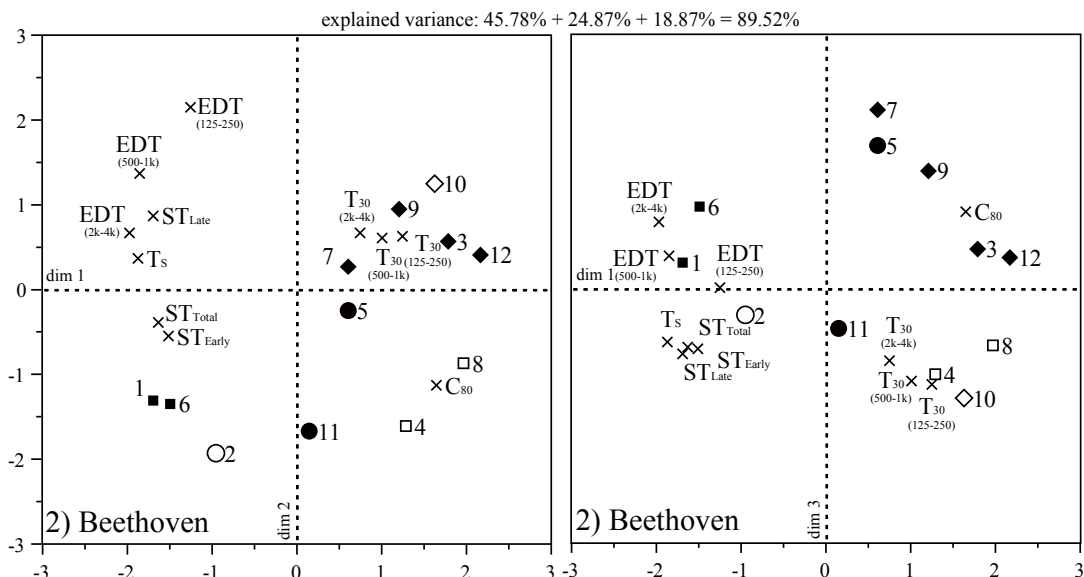


Fig. 4-9 Principal component analysis (Beethoven, Note off duration).

図 4-10 に Chopin の演奏時間, 図 4-11 に平均離鍵速度の結果を示す。
 結果から, 3, 8, 12 人目の演奏者の演奏時間が ST_{Early} と正の相関があることを確認できる。一方, 消音時間比の結果からは, 相関が強い指標と演奏者の組み合わせはあまり見つからない。

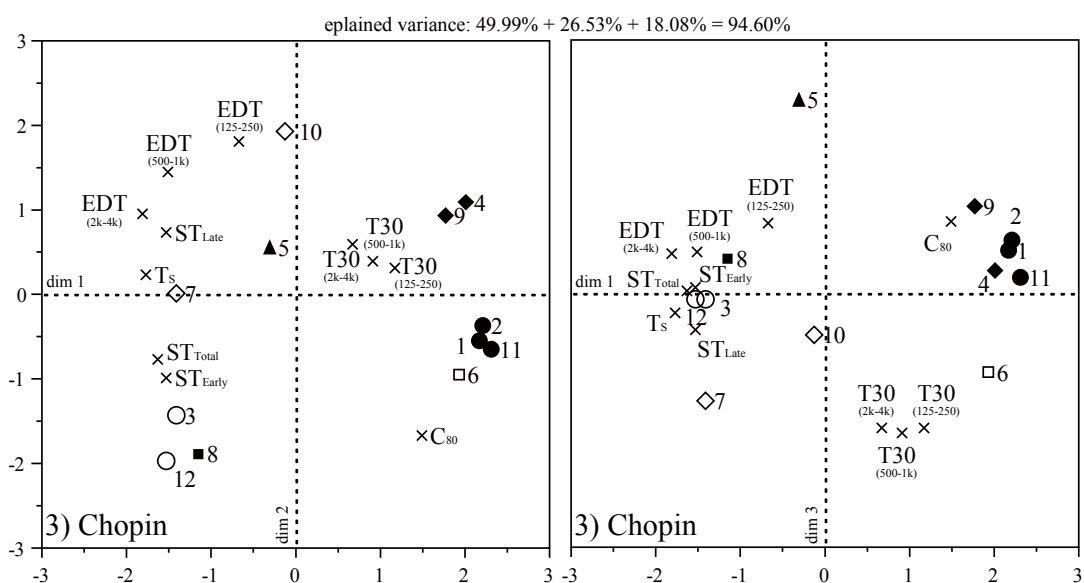


Fig. 4-10 Principal component analysis (Chopin, Performance time).

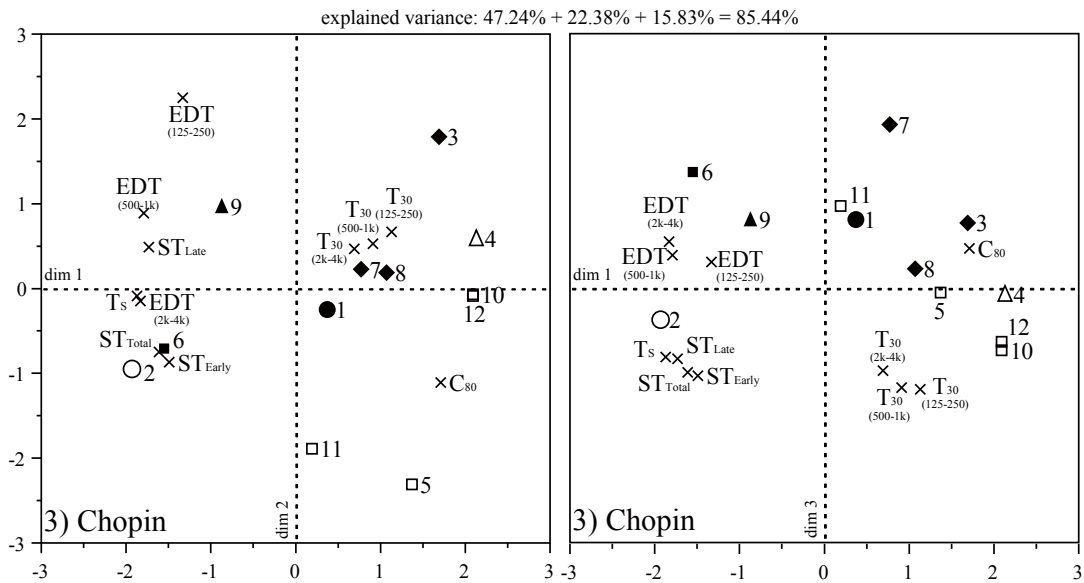


Fig. 4-11 Principal component analysis (Chopin, Note off duration).

最後に、相関が高いことが予想される演奏特徴量と室内音響指標（ T_{30} , EDT, ST_{Early} , ST_{Late} , C_{80} , T_S ）との組み合わせの間に線形関係を仮定し、演奏特徴量を目的変数、室内音響指標を説明変数として演奏者毎に単回帰分析および重回帰分析を行った。

表 4-1 に室内音響指標の相関係数を示す。今回の実験では、人工的に残響を付加したため、一般的に T_{30} と相関の高い EDT や C_{80} でも相関係数は小さな値となっている。

Table 4-1 Correlation coefficients between acoustic quantities.

	$T_{30(125-250)}$ [s]	$T_{30(500-1k)}$ [s]	$T_{30(2k-4k)}$ [s]	$EDT_{(125-250)}$ [s]	$EDT_{(500-1k)}$ [s]	$EDT_{(2k-4k)}$ [s]	C_{80} [dB]	T_s [ms]	ST_{Early} [dB]	ST_{Late} [dB]	ST_{Total} [dB]
$T_{30(125-250)}$ [s]		0.99	0.96	-0.16	-0.21	-0.29	-0.08	-0.19	-0.44	0.00	-0.42
$T_{30(500-1k)}$ [s]			0.99	-0.12	-0.10	-0.17	-0.17	-0.10	-0.40	0.09	-0.36
$T_{30(2k-4k)}$ [s]				-0.06	0.02	-0.02	-0.25	-0.04	-0.41	0.15	-0.36
$EDT_{(125-250)}$ [s]					0.85	0.62	-0.83	0.62	0.28	0.72	0.36
$EDT_{(500-1k)}$ [s]						0.94	-0.90	0.78	0.37	0.83	0.46
$EDT_{(2k-4k)}$ [s]							-0.76	0.73	0.36	0.73	0.44
C_{80} [dB]								-0.88	-0.50	-0.97	-0.58
T_s [ms]									0.83	0.97	0.89
ST_{Early} [dB]										0.69	0.99
ST_{Late} [dB]											0.76
ST_{Total} [dB]											

※相関係数 $r = 0.0 \sim 0.5$

・平均打鍵速度

主成分分析の結果から大半の演奏者の打鍵速度は ST_{Early} と負の相関が確認された。ここで、平均打鍵速度を目的変数、 ST_{Early} を説明変数として演奏者毎に単回帰分析を行った。表 4-2 に回帰分析の寄与率と標準回帰係数の結果を示す。赤く塗りつぶしてあるところが、寄与率が 0.5 以上、青く塗りつぶしてあるところは寄与率が 0.25 以上の値を示したことを示す。

Table 4-2 Simple linear regression analysis
between note on velocity and ST_{Early} .

目的変数	説明変数	演奏者	Bach		Beethoven		Chopin	
			寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数
打鍵速度	ST_{Early}	全体平均	0.288	-0.029	0.450	-0.028	0.333	-0.026
打鍵速度	ST_{Early}	1人目	0.096	-0.009	0.000	0.001	0.148	-0.008
打鍵速度	ST_{Early}	2人目	0.005	0.002	0.163	-0.006	0.060	0.006
打鍵速度	ST_{Early}	3人目	0.446	-0.030	0.784	-0.061	0.844	-0.044
打鍵速度	ST_{Early}	4人目	0.727	-0.039	0.702	-0.017	0.665	-0.036
打鍵速度	ST_{Early}	5人目	0.002	0.001	0.589	-0.017	0.384	-0.022
打鍵速度	ST_{Early}	6人目	0.031	-0.007	0.251	-0.024	0.001	-0.002
打鍵速度	ST_{Early}	7人目	0.781	-0.058	0.761	-0.056	0.470	-0.039
打鍵速度	ST_{Early}	8人目	0.373	-0.035	0.712	-0.024	0.399	-0.019
打鍵速度	ST_{Early}	9人目	0.906	-0.020	0.886	-0.038	0.714	-0.025
打鍵速度	ST_{Early}	10人目	0.010	-0.004	0.190	-0.011	0.605	-0.048
打鍵速度	ST_{Early}	11人目	0.794	-0.110	0.815	-0.042	0.573	-0.039
打鍵速度	ST_{Early}	12人目	0.659	-0.042	0.813	-0.047	0.711	-0.030

単回帰分析の結果から、各楽曲で回帰精度が高い演奏者が多かった。Bach の 11 人目のように回帰係数が大きな値を示す演奏者もいるが概ね演奏者は -0.03 ~ -0.05 の値を示していた。従って、大半の演奏者は ST_{Early} の 1 dB 増加に対して打鍵速度を 3~5%程度低下させ、音量を抑える調整を行っていることがわかる。

ここで、表 4-1 から ST_{Early} と相関の低い T_{30} あるいは EDT を用いて、重回帰分析を行ったが、回帰精度はあまり向上しなかった。

・平均ペダル変位

主成分分析の結果から、平均ペダル変位は T_{30} と負の相関、 C_{80} と正の相関が確認された。ここで、平均ペダル変位を目的変数、 T_{30} あるいは C_{80} を説明変数として演奏者毎に単回帰分析を行った。表 4-2, 4-3 に各楽曲の回帰分析の寄与率と標準回帰係数の結果を示す。

結果として、 T_{30} に対して回帰精度が高い演奏者が多かった。一方、 C_{80} に対しては、 T_{30} のときに寄与率が低かった演奏者が逆に高い結果となった(Bach, Chopin)。

Table 4-3 Simple linear regression analysis
between pedal displacement and T_{30} .

目的変数	説明変数	演奏者	Bach		Beethoven		Chopin	
			寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数
ペダル変位	T_{30}	全体平均	0.108	-0.049	0.323	-0.044	0.111	-0.024
ペダル変位	T_{30}	1人目	0.543	-0.088	0.083	-0.018	0.163	-0.024
ペダル変位	T_{30}	2人目	0.054	0.014	0.508	-0.044	0.045	0.009
ペダル変位	T_{30}	3人目	0.034	-0.025	0.015	-0.017	0.115	-0.048
ペダル変位	T_{30}	4人目	0.363	-0.017	0.645	-0.066	0.031	-0.011
ペダル変位	T_{30}	5人目	0.054	0.026	0.376	-0.075	0.019	0.010
ペダル変位	T_{30}	6人目	0.028	0.030	0.542	-0.062	0.024	0.015
ペダル変位	T_{30}	7人目	0.130	-0.014	0.867	-0.052	0.932	-0.044
ペダル変位	T_{30}	8人目	0.808	-0.022	0.362	-0.040	0.869	-0.051
ペダル変位	T_{30}	9人目	0.591	-0.034	0.619	-0.040	0.182	-0.023
ペダル変位	T_{30}	10人目	0.347	-0.022	0.489	-0.035	0.265	-0.020
ペダル変位	T_{30}	11人目	0.873	-0.392	0.734	-0.042	0.609	-0.051
ペダル変位	T_{30}	12人目	0.673	-0.042	0.788	-0.037	0.750	-0.048

Table 4-4 Simple linear regression analysis
between pedal displacement and C_{80} .

目的変数	説明変数	演奏者	Bach		Beethoven		Chopin	
			寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数
ペダル変位	C_{80}	全体平均	0.081	0.042	0.071	0.021	0.172	0.030
ペダル変位	C_{80}	1人目	0.300	0.065	0.597	0.050	0.349	0.034
ペダル変位	C_{80}	2人目	0.623	0.048	0.092	0.019	0.337	0.025
ペダル変位	C_{80}	3人目	0.640	0.108	0.085	0.040	0.741	0.122
ペダル変位	C_{80}	4人目	0.519	0.020	0.019	0.011	0.467	0.044
ペダル変位	C_{80}	5人目	0.258	0.057	0.308	0.068	0.221	0.035
ペダル変位	C_{80}	6人目	0.775	0.158	0.478	0.058	0.662	0.078
ペダル変位	C_{80}	7人目	0.087	0.011	0.023	0.009	0.000	0.000
ペダル変位	C_{80}	8人目	0.021	-0.004	0.257	-0.034	0.021	-0.008
ペダル変位	C_{80}	9人目	0.028	-0.007	0.257	0.026	0.137	0.020
ペダル変位	C_{80}	10人目	0.273	0.020	0.028	-0.008	0.473	0.026
ペダル変位	C_{80}	11人目	0.011	0.045	0.019	0.007	0.095	-0.020
ペダル変位	C_{80}	12人目	0.075	-0.014	0.009	0.004	0.002	-0.003

・ノンペダル時間比

主成分分析の結果から、ノンペダル時間比は3曲通じて T_{30} と相関があり、Chopin で ST_{Early} と相関があることが分かっている。回帰分析を行った結果を表4-5, 4-6 に示す。

平均ペダル同様に T_{30} に対して、Beethoven で回帰精度が高い演奏者が多く、Bach と Chopin でも半数の演奏者が寄与率 0.25 以上であった。一方で、 ST_{Early} に対しては、やはり Chopin で回帰精度が高い演奏者が多い結果となった。

Table 4-5 Simple linear regression analysis
between non pedal duration ratio and T_{30} .

目的変数	説明変数	演奏者	Bach		Beethoven		Chopin	
			寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数
ノンペダル時間比	T_{30}	全体平均	0.241	0.401	0.418	0.137	0.190	0.204
ノンペダル時間比	T_{30}	1人目	0.083	0.042	0.004	0.012	0.004	-0.012
ノンペダル時間比	T_{30}	2人目	0.037	0.037	0.437	0.102	0.003	-0.006
ノンペダル時間比	T_{30}	3人目	0.001	0.015	0.019	0.019	0.415	0.140
ノンペダル時間比	T_{30}	4人目	0.401	0.224	0.734	0.176	0.059	0.066
ノンペダル時間比	T_{30}	5人目	0.000	-0.005	0.531	0.087	0.000	0.003
ノンペダル時間比	T_{30}	6人目	0.003	-0.035	0.565	0.167	0.103	-0.213
ノンペダル時間比	T_{30}	7人目	0.338	0.436	0.838	0.342	0.684	0.582
ノンペダル時間比	T_{30}	8人目	0.871	1.053	0.353	0.099	0.824	0.265
ノンペダル時間比	T_{30}	9人目	0.458	0.238	0.657	0.093	0.300	0.130
ノンペダル時間比	T_{30}	10人目	0.439	0.747	0.491	0.131	0.781	0.781
ノンペダル時間比	T_{30}	11人目	0.847	1.717	0.610	0.184	0.459	0.273
ノンペダル時間比	T_{30}	12人目	0.342	0.341	0.639	0.237	0.492	0.439

Table 4-6 Simple linear regression analysis
between non pedal duration ratio and ST_{Early} .

目的変数	説明変数	演奏者	Bach		Beethoven		Chopin	
			寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数
ノンペダル時間比	ST_{Early}	全体平均	0.035	-0.153	0.038	-0.042	0.022	-0.069
ノンペダル時間比	ST_{Early}	1人目	0.029	0.025	0.417	0.120	0.545	0.133
ノンペダル時間比	ST_{Early}	2人目	0.154	0.075	0.008	0.014	0.483	0.080
ノンペダル時間比	ST_{Early}	3人目	0.040	0.080	0.071	0.037	0.000	0.004
ノンペダル時間比	ST_{Early}	4人目	0.021	0.051	0.174	-0.086	0.327	0.155
ノンペダル時間比	ST_{Early}	5人目	0.447	0.270	0.011	0.013	0.057	0.054
ノンペダル時間比	ST_{Early}	6人目	0.062	0.165	0.004	-0.014	0.389	0.416
ノンペダル時間比	ST_{Early}	7人目	0.085	-0.218	0.210	-0.171	0.420	-0.456
ノンペダル時間比	ST_{Early}	8人目	0.229	-0.540	0.485	-0.116	0.394	-0.184
ノンペダル時間比	ST_{Early}	9人目	0.740	-0.303	0.048	-0.025	0.713	-0.200
ノンペダル時間比	ST_{Early}	10人目	0.268	-0.584	0.357	-0.112	0.345	-0.519
ノンペダル時間比	ST_{Early}	11人目	0.126	-0.663	0.084	-0.068	0.287	-0.216
ノンペダル時間比	ST_{Early}	12人目	0.113	-0.197	0.096	-0.092	0.024	-0.096

・フルペダル時間比

主成分分析の結果から、フルペダル時間比は3曲通じて T_{30} と相関があることが確認されている。回帰分析を行った結果を表 4-7 に示す。傾向は平均ペダル変位とノンペダル時間比と同様である。

Table 4-7 Simple linear regression analysis
between full pedal duration ratio and T_{30} .

目的変数	説明変数	演奏者	Bach		Beethoven		Chopin	
			寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数	寄与率	偏回帰係数
フルペダル時間比	T_{30}	全体平均	0.110	-0.046	0.430	-0.042	0.254	-0.024
フルペダル時間比	T_{30}	1人目	0.646	-0.043	0.050	-0.014	0.184	-0.014
フルペダル時間比	T_{30}	2人目	0.076	-0.007	0.605	-0.048	0.014	-0.003
フルペダル時間比	T_{30}	3人目	0.000	0.001	0.002	-0.002	0.803	-0.042
フルペダル時間比	T_{30}	4人目	0.391	-0.011	0.479	-0.060	0.021	-0.009
フルペダル時間比	T_{30}	5人目	0.000	-0.001	0.730	-0.083	0.067	0.010
フルペダル時間比	T_{30}	6人目	0.011	0.012	0.583	-0.060	0.013	-0.008
フルペダル時間比	T_{30}	7人目	0.076	-0.006	0.900	-0.059	0.937	-0.044
フルペダル時間比	T_{30}	8人目	0.719	-0.018	0.424	-0.033	0.877	-0.050
フルペダル時間比	T_{30}	9人目	0.523	-0.029	0.742	-0.042	0.415	-0.014
フルペダル時間比	T_{30}	10人目	0.025	0.003	0.364	-0.033	0.534	-0.027
フルペダル時間比	T_{30}	11人目	0.922	-0.437	0.679	-0.032	0.469	-0.038
フルペダル時間比	T_{30}	12人目	0.586	-0.021	0.839	-0.034	0.785	-0.052

ペダリングに関連する平均ペダル変位、ノンペダル時間比、フルペダル時間比の傾向は、関連しあっているので重回帰分析はフルペダル時間比のみの結果を考察することにする。

T_{30} と相関の低い室内音響指標を用いて重回帰分析を行うと、 T_{30} と ST_{Late} の組でより回帰精度が向上した。表 4-8 に自由度調整済寄与率と各説明変数に対する標準偏回帰係数の値を示す。

Table 4-8 Multiple regression analyses between full pedal time ratio and two acoustic quantities.

目的変数	演奏者	Bach			Beethoven			Chopin		
		寄与率	T ₃₀	ST _{Late}	寄与率	T ₃₀	ST _{Late}	寄与率	T ₃₀	ST _{Late}
フルペダル時間比	全体平均	0.103	-0.048	-0.005	0.427	-0.043	-0.002	0.273	-0.027	-0.007
フルペダル時間比	1人目	0.594	-0.043	0.004	0.498	-0.010	-0.044	0.534	-0.012	-0.021
フルペダル時間比	2人目	0.290	-0.006	-0.014	0.568	-0.049	0.010	-0.149	-0.003	-0.001
フルペダル時間比	3人目	0.309	0.006	-0.056	-0.070	-0.001	-0.016	0.828	-0.041	-0.010
フルペダル時間比	4人目	0.475	-0.010	-0.007	0.535	-0.063	0.331	0.511	-0.005	-0.048
フルペダル時間比	5人目	0.585	0.002	-0.037	0.762	-0.081	-0.025	-0.070	0.011	-0.005
フルペダル時間比	6人目	0.516	0.019	-0.082	0.738	-0.057	-0.035	0.651	-0.003	-0.059
フルペダル時間比	7人目	-0.023	-0.006	-0.005	0.884	-0.059	-0.001	0.959	-0.044	0.008
フルペダル時間比	8人目	0.876	-0.019	0.009	0.782	-0.035	0.031	0.898	-0.051	0.010
フルペダル時間比	9人目	0.782	-0.030	0.021	0.754	-0.041	-0.011	0.430	-0.015	0.007
フルペダル時間比	10人目	-0.135	0.003	-0.001	0.356	-0.034	0.016	0.574	-0.026	-0.012
フルペダル時間比	11人目	0.931	-0.442	0.063	0.664	-0.031	-0.007	0.712	-0.041	0.030
フルペダル時間比	12人目	0.531	-0.021	0.003	0.856	-0.035	0.007	0.761	-0.053	0.006

T₃₀の標準偏回帰係数が -0.442 と極端な値を示した演奏者もみられるが、負の相関は共通する。一方、ST_{Late}の標準偏回帰係数では演奏者によって正負が異なる傾向を示した。従って、大半の演奏者は T₃₀の増加に対してペダル時間を短くして残響を抑えるが、ST_{Late}に対しては演奏者によってペダルの調整が異なるものと考えられる。

上記以外の演奏特徴量と室内音響指標で回帰分析を行ったが、回帰精度は低く、各々の間には単純な相関は認められなかった。

4.5 まとめ

9種類の演奏特徴量と7種類の室内音響指標を用いて、主成分分析や回帰分析を行って両者の関係を検討した。演奏者は演奏の調整傾向に関して、数個のグループに分けられることがわかった。しかし、それは楽曲によって異なっていた。演奏の調整傾向で、大半の演奏者に共通していたことは、打鍵速度はST_{Early}の増加に対して低下し、ペダル時間は T₃₀の増加に対して減少することであった。