

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500246

研究課題名（和文）音楽における長調と短調から受ける明暗の感覚の神経生理学的基礎の研究

研究課題名（英文）Investigations of neurophysiological correlates for emotions caused by music in major and minor keys.

研究代表者

根本 幾 (NEMOTO IKU)

東京電機大学・情報環境学部・教授

研究者番号：40105672

研究成果の概要（和文）：長調の音楽は一般に明るい印象を与え、短調の音楽は暗い印象を与える。その神経生理学的な基盤を明らかにする目的で、長・短音階や長・短三和音を聞いたときの脳の反応を MRI や MEG(脳磁界)を用いて調べた。短調関連の刺激に対して、MRI の測定で痛みや不快感と関連する部位の活動が観察された。また和音を 20Hz で振幅変調して持続的な脳活動を MEG で測定すると、長・短三和音に対する反応が異なった。これらの結果は、長・短調の神経生理学的基盤の一部と考えられる。さらに発展的な研究についても成果を得た。

研究成果の概要（英文）：Music in major keys generally give light and minor keys dark impressions. To find neurophysiological correlates for these emotions, we measured brain activities to major and minor chords and scales by functional-MRI and MEG (magnetoencephalogram). Stimuli related to minor keys activated areas in brain related to negative emotions. Major and minor chords which were amplitude modulated produced different stationary state responses. Results such as these comprise part of neurophysiological correlates we were looking for.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2011 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2012 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：感覚・知覚・注意、音楽

1. 研究開始当初の背景

(1)長調と短調 西洋音楽の歴史において、調性という概念が確立したのは16-17世紀である。当時、和声進行による音楽の進行、特にドミナント和音からトニック和音への解決による終結、というパターンが音楽の進行の強力な原動力となり始め、いわゆるドレミファソラシドという長音階が、確固たる地位を

築き始めた。それと同時に調性という概念が生まれて確立した。そうして西洋音楽は、和声の進歩とともに、近代西洋音楽の響きを獲得していった。長音階の確立とともに、主音を短三度下げてラシドレミファソラとした短音階も確立し、こうして長音階、短音階は調性音楽の二本柱となった。

(2) 感覚と神経生理学的基盤 我々は、単にドレミファソラシドという長音階と、ラシドレミファソラという短音階を聞いただけでも、前者は明るく楽しく、後者は暗く悲しく感じる。さらに3つの音からなる和音として、長音階における主和音(トニック)であるドミソを聞いたときと、短音階におけるトニックであるラドミを聞くと、やはり前者が明るく後者が暗く聞こえる。音階と和音とではその認識方法はかなり異なると考えられるが、それでも長短と明暗とは明確に対応している。この原因が何なのか、神経生理学的な基礎が何か、いまだに解明されていない。

最近、特にこの10年、音楽認知の神経生理学的研究が盛んになってきた。音楽の諸要素に対する反応が、脳波や脳磁図、fMRIなどを用いた神経生理学的手法で研究され、行動学的な実験結果との対応が付き始めている。音楽理論は感覚の追認であるから、音楽理論が生理学的な基礎を持つことが示されつつあると言ってよい。

2. 研究の目的

長短の調性の差を神経生理学的に表出するような実験方法を確立し、その結果を解釈するのが本研究の究極の目的である。悲喜の感情、明暗の感覚は、音楽を始めとする諸芸術が与える感情、感動の最も基礎的なものである。その神経生理学的基盤が少しでも解明されれば、芸術の神経生理学的理解への道が拓けるのではないかと期待できる。

3. 研究の方法

(1) 1音欠落音階に対する反応のMEG計測 これにより、音階中の各音の音階に対する役割を推定できる。さらにそれを長・短音階で調べることで、長・短音階に対する生理学的反応の差を研究できる。実際には各音0.2sの完全な上行音階を標準刺激とし、逸脱刺激としてどれか1音を省略し、その直前の音を繰り返したり長さを倍にしたものを逸脱刺激とした。それぞれに対するMEG誘発反応を測定し、差をミスマッチ反応とした。

(2) 長・短・減三和音に対する脳活動の計測 これらの和音を純音やMIDIの楽器音で作成し、それらを聴取したときの脳活動をfMRIで測定した。スパースサンプリング方法により、MRI装置のスキャン時の騒音の影響をできるだけ受けない結果を得ることに努めた。さらに長・短音階に対する反応や、和声付けした音階を用いた実験も行った。

(3) 長・短三和音の振幅変調提示に対するMEG応答の測定 和音に対する持続的な反応をMEGのASSR(聴性定常応答)で観察するため、和音を20Hzで振幅変調しMEG誘

発反応のピリオドグラムを求め、変調周波数成分の大きさを測定した。この音はトレモロ奏法による音に類似した。

(4) 多義的旋律 これは我々が本研究で新たに提案するものである。図1の(a)が演奏されると、C#音が休符で消える瞬間、E音が強調され、(b)のような旋律が聴こえる。ところが(c)のような演奏に対しては、(b)のように聴こえるか(d)のように聴こえるかは決定できないので、(c)を多義的旋律と呼ぶことにする。これに対する脳神経生理学的な解釈を試みるため、図2の各段の1小節目に示す刺激を作成して提示した。それぞれ2小節目に認知さると予想される旋律を示す。UUは、最初の音形が上行で最後の音形も上行を表す。以下Dは下行である。UD、DUなど誘導する音形と最後の音形が異なる場合に、最後の音に対する反応が大きくなるのではないかと予想した。この方法は本研究で全く新しく提案したもので、直接、長・短調とは関連がないが、長調的な音進行と短調的なそれとでどのような神経生理学的な差があるかを研究する場合の手段となり得ると考えている。

(5) 多声音楽認識とASSR (3)で使用した振幅変調の方法が音楽認識についても使えることを示すものとして、次のような実験を考えた。2つの音からなる和音に対して、人間は高い声部の音をより強く認識することは、誰でも経験的に知っている。2声部を異なる周波数で変調してMEG反応を調べることで、2声部それぞれに対する反応を同時に調べることができる。この場合、高声部に対するASSRが大きいことが知られている。そこで2声部の片方に旋律的な動きを与えたときの反応を調べることにした。これは最近になって始めた実験で明確な結論は出ていないが、本研究から派生した新しいテーマとして紹介する。用いた刺激は図3に示すものである。

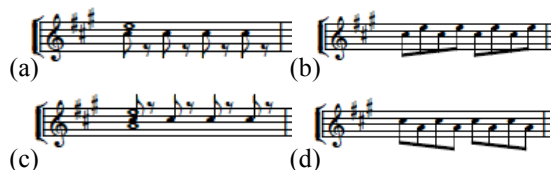


図1. 旋律の多義性の発生の説明。



図2. 多義的旋律の実験用に作成した刺激



図 3. 「多声音楽認識と ASSR の実験」で用いられた音刺激. 上段はコントロール刺激. 下段が試験刺激. すべての刺激において 2 声は異なる周波数 (39, 41Hz) で振幅変調される.

4. 研究成果

(1) 1音欠落音階 図 4(a) (b)は長音階における 1 音欠落音階に対するミスマッチ反応で, 欠落個所まで直前の音を伸ばしたとき (PBS) (a)と直前音を繰り返した (RBS) (b) 場合である. 各チャンネルの全体平均を標準刺激, 逸脱刺激それぞれについて取り, その差を, 右聴覚野付近 12 チャンネルに渡って rms 値を求めたものである. PBS では欠落音の種類により大きな差があり, E, G, B の欠落によって大きなミスマッチ反応が出た. また PBS の方が潜時が有意に短く反応も大きい. 図 5 は長音階を使った音欠落実験 4 種類の結果をまとめたもので, 縦軸には標準刺激 (完全音階) と逸脱刺激 (欠落音階) に対する反応の差の有意確率を示す. 欠落音は棒の濃淡で示す. RAS は欠落音直後の音を繰り返すもの, ROB は欠落音階を標準刺激とし完全音階を逸脱刺激としたものである. RAS 以外は B 欠落に対する差の有意確率が低いことを示す. B は導音であり, 導音の重要性が神経生理学的に示されたものと言える. その他にもいくつか重要な結果が得られているがここでは省略する.

図 6 はハ短調音階における 1 音欠落実験の結果で, (a) は自然的短音階, (b) は和声的短音階に対するものである. ハ短調自然的短音階と和声的短音階とでは音階の最後の音が異なる. 自然的短音階では B \flat 音であり, 和声的短音階では B である. ハ長調に対する実験結果から, 和声的短音階における B 欠落に対する反応が大きいのではないかと予想したが, 実際には自然的短音階における B \flat 欠落に対する反応が特別に大きい. これは導音では説明できず, 自然的短音階が和声的短音階と比較して脳にとっても自然だから, という説明も試みたが, それだけではすべて説明できないので, 検討中である.

(2) 和音に対する脳活動の fMRI 測定

図 7 は三和音に対する脳活動を fMRI で調べた結果である. 長三和音に対する活動部位を赤, 短三和音は青, 減三和音は緑で示す. いずれも, 白色雑音に対して有意に活動が大きかった部位である. 短三和音や減三和音は, 島皮質や帯状回, 扁桃体など, 負の情動や痛

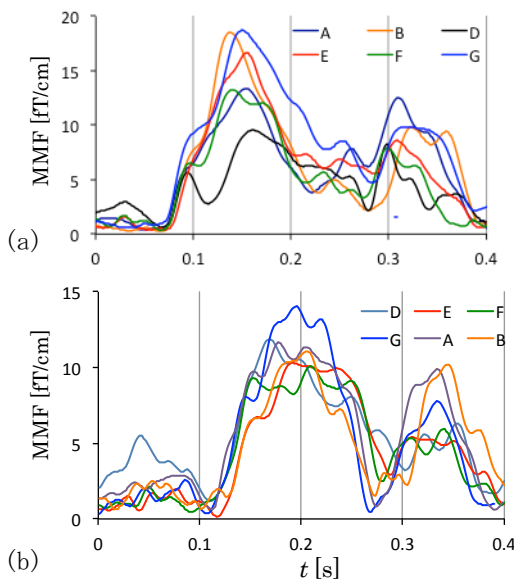


図 4. 1 音欠落に対するミスマッチ反応. (a): PBS (直前の音を伸ばす), (b): RBS (繰り返す). 欠落音は色で示す. 横軸は欠落音区間開始時点からの時間.

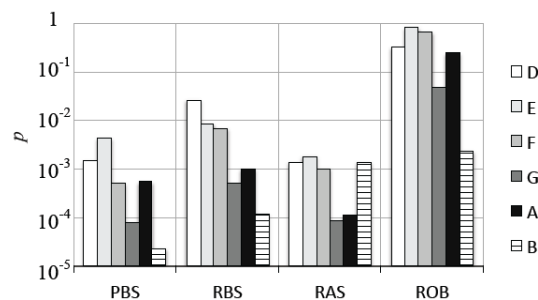


図 5. 各実験方法による 1 音欠落実験結果を平均 p 値 (ミスマッチ反応の有意確率) で表したものの.

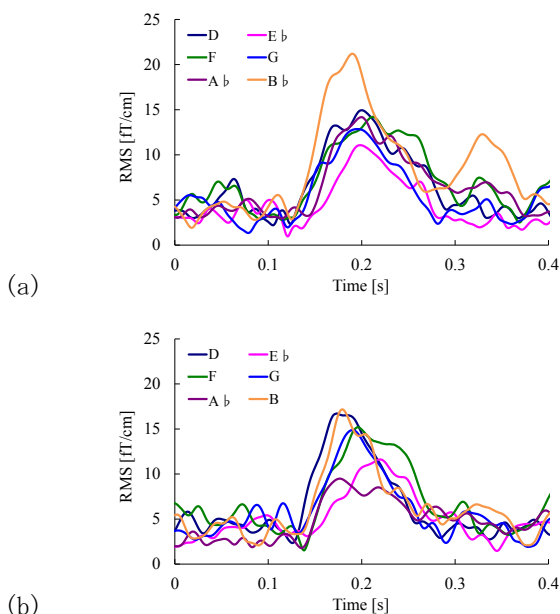


図 6. 自然的短音階 (ハ短調, a) と和声的短音階 (b) による RBS 実験の結果. 図 5 参照.

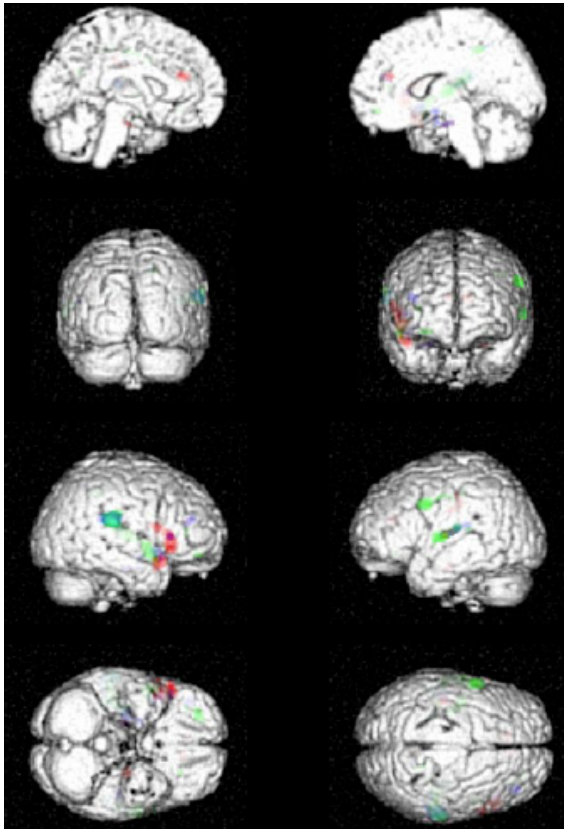


図 7. 長三和音(赤), 短三和音(青), 減三和音(緑)に対する活動が白色雑音と比較して有意に大きかった部位. 16名の集団解析の結果.

みと関連づけられている部位に大きな反応を起こした.

(3) 和音の振幅変調

図 8 は長三和音(太線)と短三和音(細線)を 20 Hz で振幅変調した音を聞いたときの MEG の 20 Hz 成分の信号源波形のピリオドグラムを示す. 5 s 間の刺激提示時間を 1-2 s, 2-3 s, 3-4 s, 4-5 s の 4 個の時間帯に分けて, 解析したものである. この 4 つの時間帯において短三和音に対する反応の方が大きいことが分かる. ただし反応の中心周波数が ± 1 Hz だけ 20 Hz から離れている所があり, その理由を検討中である. 現在まで, 和音の種類によって異なる MEG 反応が得られた稀な例である. これは長い時間に渡る連続的な反応を見ることによって可能になったと考えられる. ASSR の方法は音楽の情動面の研究に有用な手法になるのではないかと期待できる.

(4) 多義的旋律

図 9(上)は, コントロール実験として C# の断続と最後の上(または下)行からなる単音旋律を提示したときの, 最終音に対する誘発応答である(右側頭 12 チャンネルの RMS). 最後の音が高くなる場合の反応の方が大きかった.

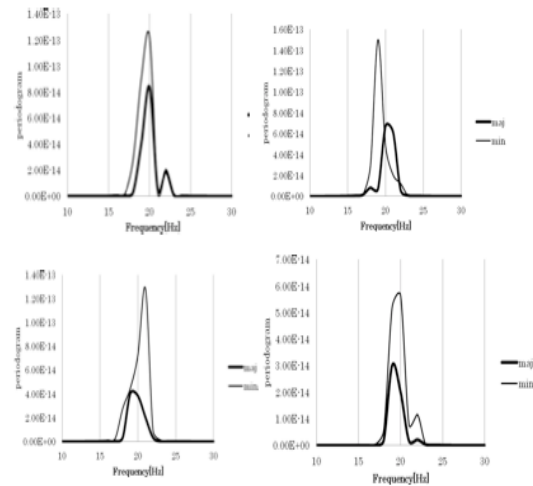


図 8. 20 Hz で振幅変調した長三和音(太線)と短三和音(細線)に対する ASSR のピリオドグラム. 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 s の 4 つの区間に分けて FFT したものである.

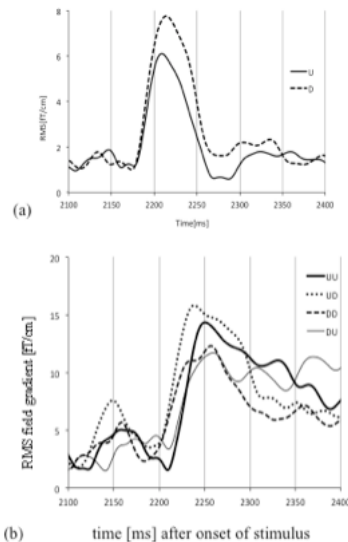


図 9. 上はコントロール実験で, 上下の持続音を持たない単音の場合の最後の音に対する反応. 実線は最後の音が高くなる場合, 細線は下がる場合. 下は図 2 の 4 つの刺激の最後の音に対する反応.

図 9(下)が図 2 の 4 刺激の最後の音に対する誘発反応である. UU と UD で比較すると UD に対する反応のピークが大きい. これは, 最初の U の音形 (C#5-E5) によって C# の断続が C#-E の音形として聞こえるように誘導された結果, 最後の実際の音形が C#5-A と下がった場合に不整合を感じた結果だと考えられる. 一方最初の音形が D (C#5-A4) の 2 つで比較すると, ピーク値では差がないが, 後半の反応 (2300-2500 ms) では, やはり不整合の場

合に反応が大きくなっている。この場合どうしてピーク付近でなく反応の後半で差が出るのか疑問である。いずれにしても最初の音形が最後の音形に対する反応に影響を与えていて、最初の音形が旋律の多義性に方向を与えていることに対応していると思われる。さらなる実験が必要である。

(5) 多声音楽認識と ASSR

図 10 は代表的な二人の結果である。各被験者の左パネルは高声部を 41 Hz、低声部を 39 Hz で変調した結果(簡単のため 41/39 と呼ぶ)で、右側のパネルは逆の周波数対応(39/41)となっている。2 つの周波数の音(キャリヤ)を振幅変調して ASSR を計測すると、高いキャリヤ周波数に対する反応の方が大きいということは知られていることであるが、S2 では、ほぼ高いキャリヤ周波数に対する反応のみしか見られない。各パネル中で 3 本のグラフは図 3 に示した 3 種類の刺激に対応し、Mv0 は両声部とも動きが無い、MvH は高声部に、MvL は低声部に動きのある刺激に対応している。多くの被験者で顕著だったのは、ここでも見られるように両声部とも動きの無い場合の反応が一番大きいことであった。さらに、動きがある場合には、変調周波数に対応している声部に動きがある場合の方が、他の声部に動きがある場合よりも大きいことが多かった。たとえば、S2 の 39_41(左図)では高声部に対する反応(39 Hz)は、高声部が運動しているときの方が、低声部が運動しているときよりも大きい。ただしもともと低声部に対する反応は小さいので、低声部に対する反応の差を見るのは困難であった。S1 では 39_41 では同様の傾向だが 41_39 では逆の傾向にある。これは実験の不安定性によるものなのか個人の特性なのか不明である。しかしこの方法は、メロディーラインの認識に関する神経生理学的基礎の研究に使える可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① K. Tanaka, M. Kawakatsu, I. Nemoto, Y. Uchikawa, Stochastic resonance in evoked magnetoencephalogram investigated by analysis of coherences, IEEE Trans Magnet., 査読有, Vol. 48, 2012, pp. 2861-2864.
- ② I. Nemoto, Evoked magnetoencephalographic responses to omission of a tone in a musical scale, J. Acoust. Soc. Am., 査読有, Vol.131, 2012, pp.4770-4784.

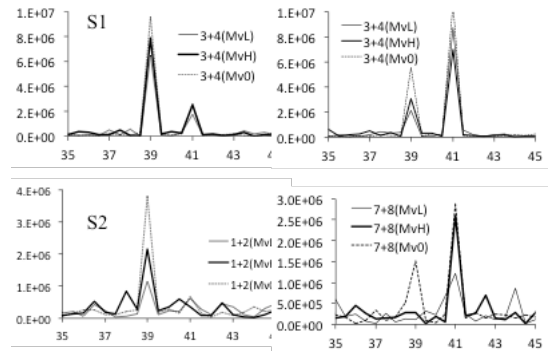


図 10. 図 3 の刺激に対する 2 人の反応のペリオドグラム。最も大きな反応を示したチャンネルペアの計で示した。MvH:高声部運動, MvL:低声部運動, Mv0:運動なし。

- ③ 中田博, 根本幾, 田中慶太, 内川義則, 振幅変調した長・短三和音に対する聴性定常応答, 査読有, 日本生体磁気学会論文誌, Vol.23, 2012, pp.13-21.
- ④ H. Ando, I. Nemoto, Natural minor scale is more natural to the brain than harmonic minor scale as revealed by magnetoencephalography, 査読有, Physics Procedia, Vol.22, 2011, pp. 386-391.
- ⑤ T. Fujimaki, I. Nemoto, Estimation of brain activities in responses to major and minor triads and scales by fMRI, 査読有, IFMBE Proc., Vol.37, 2011, pp.632-635.
- ⑥ K. Tanaka, I. Nemoto, M.Kawakatsu, Y. Uchikawa, Magnetoencephalogram narrowing down the possible sites of the generation of stochastic resonance in the human auditory neural system, IFMBE Proc., 査読有, Vol. 37, 2011, pp.1186-1189.
- ⑦ 根本幾, 誘発MEGの差分波形の二乗平均平方根(RMS)表示に関する一考察, 日本生体医工学会誌, 査読有, Vol. 49, No.3, 2011, pp.516-521.
- ⑧ 根本幾, 音楽受容の脳活動の可視化の研究, 電気学会論文誌C, Vol.131, No.1, 2011, pp.15-22.
- ⑨ I. Nemoto, T. Fujimaki, L. Wang, fMRI measurement of brain activities to major and minor chords and cadence sequences, IEEE EMBS Conf Proc, 査読有, 2010, pp.5640-5643.
- ⑩ K. Tanaka, I. Nemoto, M. Kawakatsu, Y. Uchikawa, Stochastic resonance in connectivity between both auditory areas obtained by auditory stimuli, IEEE EMBS Conf Proc, 査読有, 2010, pp.166-169.

[学会発表] (計 18 件)

- ① I. Nemoto, H. Nakata, K. Tanaka, Y. Uchikawa, MEG responses (ASSR) to tremolo-like presentation of major and minor chords, biomag2012, Aug. 28, 2012, Paris, France.
- ② I. Nemoto, Novel method of presenting mismatch responses in MEG and EEG, Biomag2012, Aug. 27, 2012, Paris, France.
- ③ Li-qun Wang, Shinya Kuriki, Functional Cortical Mapping of Auditory Illusion: An fMRI Investigation of "Scale Illusion", 5th Intern Conf Biomed Engin and Informat, Oct 16-18, 2012, Chongqing, China.
- ④ 藤巻拓哉, 根本幾, fMRIによる長・短・減三和音および長・短音階に体する脳活動の推定, 日本生体磁気学会大会, 2012年5月31日, 東京.
- ⑤ 久保拓真, 根本幾, 音楽聴取時の注意が及ぼす脳活動への影響のfMRI計測, 日本生体磁気学会, 2012年5月31日, 東京.
- ⑥ 添田直樹, 根本幾, 音高とリズムへの注意による脳活動の差のfMRI計測, 日本生体磁気学会, 2012年5月31日, 東京.
- ⑦ I. Nemoto, Discussion and proposal on RMS presentation of mismatch responses in MEG and EEG, 5th Europ. Conf. IFMBE, Sept. 17, 2011, Budapest, Hungary.
- ⑧ T. Fujimaki, I. Nemoto, Estimation of brain activities in response to major and minor triads and scales by fMRI, 5th Europ Conf. IFMBE, Sept 16, 2011, Budapest, Hungary.
- ⑨ 中田博, 根本幾, 田中慶太, 内川義則, トレモロ和音に体する聴覚脳磁界の検討, 日本生体磁気学会, 2011年6月3日, 福岡.
- ⑩ 久保拓真, 添田直樹, 根本幾, 音楽認知の脳機能研究 -音色と旋律の認識のfMRIによる研究, 日本生体磁気学会, 2011年6月3日, 福岡.
- ⑪ 藤巻拓哉, 根本幾, 長・短三和音に体する脳活動のfMRIに依る推定, 日本生体磁気学会, 2011年6月3日, 福岡.
- ⑫ 安藤浩瑞, 根本幾, 和声的短音階と自然的短音階のミスマッチ脳磁界の比較, 日本生体磁気学会, 2011年6月3日, 福岡.
- ⑬ 小田翔一朗, 根本幾, 下行音階中の1音の省略に体する反応の計測, 日本生体磁気学会, 2011年6月3日, 福岡.
- ⑭ 根本幾, 長三和音と短三和音を用いた聴覚誘発脳磁界の検討, 日本生体医工学会, 2011年5月1日, 東京.
- ⑮ 根本幾, 多チャンネル脳波や脳磁図におけるミスマッチ反応の表示法に関する一考察, 日本生体医工学会, 2011年5月1日, 東京.
- ⑯ 藤巻拓哉, 根本幾, 長・短音階に対する脳活動のfMRIによる推定, 日本生体医工学会, 2011年5月1日, 東京.
- ⑰ 安藤浩瑞, 根本幾, 短音階における1音省略時のミスマッチ脳磁界の測定, 日本生体磁気学会, 2010年7月29日, 柏.
- ⑱ 大貫和仁, 根本幾, 田中慶太, 内川義則, 聴覚誘発脳磁界を用いた長短三和音の検討, 日本生体磁気学会, 2010年7月29日, 柏.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

根本 幾 (NEMOTO IKU)
東京電機大学・情報環境学部・教授
研究者番号：40105672

(2) 研究分担者

王 力群 (LI-QUN WANG)
東京電機大学・先端工学研究所・講師
研究者番号：40312037
(2010-2011年度)