

楽器演奏経験による音の時間情報処理精度向上と 聴性脳幹反応への影響

饗庭 絵里子^{1,2,4,a)} 津崎 実³ 長田 典子⁴ 中川 誠司¹

概要: 演奏家にとって、音のオンセットが同時であるか非同時であるかは、音楽的な表現に違いをもたらしてしまう非常に重要な要素である。したがって、演奏家は常に注意深くオンセットの同時性を判断している。そこで、本研究においては、このような演奏家としての同時性判断の経験が、知覚および生理反応に影響を及ぼしているのかどうかを観察した。まず、プロ演奏家、アマチュア演奏家および非演奏家を実験参加者として、同時生判断の精度を測定する行動実験を行った。次に、音のオンセットに起因して生じる聴性脳幹反応を測定した。その結果、演奏経験が長いほど同時性判断の精度が有意に高くなり、継続的に注意深く聞き続けることによって知覚精度が高まることが示唆された。また、聴性脳幹反応においても、プロ演奏家の方が、脳幹レベルにおける時間分解能が高まっている可能性があり、継続的で注意深い同時性判断は、生理反応にも影響を及ぼしている可能性が示された。

1. はじめに

同時性判断は、演奏家にとって非常に重要な能力のひとつである。なぜなら、和音の中の1音が、たとえ数ミリ秒遅れただけであっても、音楽的な表現に違いをもたらしてしまう可能性があるからである。このため、演奏家は常に注意深くオンセットの同時性を判断している。本研究においては、このような演奏家としての同時性判断の経験が、知覚および生理反応に影響を及ぼしているのかどうかを観察した。

まず、行動実験によって、プロ演奏家とアマチュア演奏家、非演奏家に関し、知覚的な同時性判断の精度に違いがあるのかどうかを検証した。次に、音のオンセットに起因して生じる聴性脳幹反応を測定し、それらを行動実験と同様に演奏経験を基準として比較することによって、脳幹部で観察される生理学的反応が異なるのかどうかを検証した。また、近年、演奏家と非演奏家の間で聴性脳幹反応の波形

が異なるといった結果が示され [1]、訓練などによる聴覚の知覚上の変化と、その生理学的なレベルでの変化の關係に着目した研究が多く行われているが、具体的にどのような処理過程に変化が生じているのかについては、明らかになっていない点が多い。そこで本研究においては、蝸牛遅延と呼ばれる音の同時性判断に深く関係していると考えられる現象に注目することで、聴覚系のどのような処理過程が、継続的な注意深い観察によって変化している可能性があるのかについても考察を行った。

1.1 蝸牛遅延

人間の聴覚末梢系には蝸牛遅延と呼ばれる現象があり、周波数によって聴神経発火に至るまでの時間が異なる。この現象のため、聴覚末梢系の蝸牛内では、あらゆる周波数成分が全く同時に蝸牛に到達したとしても、高周波成分に対する聴神経発火に比べて、低周波数成分に対する聴神経発火には、最大で約 10 ms もの遅れが生じてしまう [2]。これは、蝸牛基底膜の物理的な固さが、前庭窓側から蝸牛頂側に向かって次第に柔らかくなるため、その固さに応じてよりよく共振する周波数が異なることに起因している [3]。7 蝸牛基底膜に到来した音波によって引き起こされる振動は、より高い周波数成分に対応する場所がより前庭窓側に、より低い周波数成分に対応する場所がより蝸牛頂側にある (図 1)。従って、各周波数成分がそれぞれの共振点に到達する時間に差が生じ、より高い周波数成分に対してより低い周波数成分が遅延する。実際、蝸牛遅延を補正するよう

¹ 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

² 日本学術振興会 特別研究員
Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science

³ 京都市立芸術大学
Kyoto City University of Arts

⁴ 関西学院大学 感性価値創造研究センター
Research Center for *Kansei* Value Creation, Kwansai Gakuin University

a) aiba.eriko@aist.go.jp

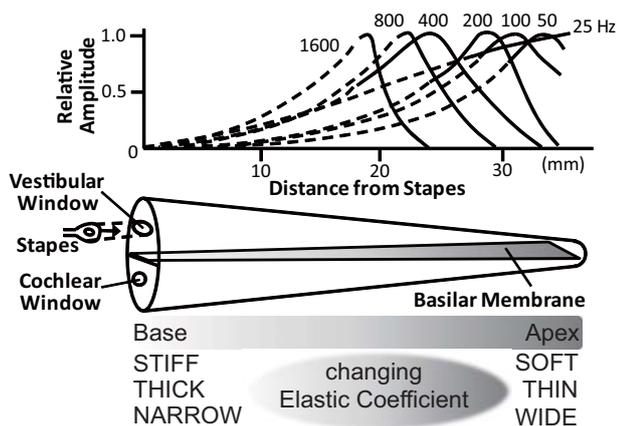


図 1 The lower part shows cochlea that was straightened and its characteristic features. The Upper part indicates a place of cochlear basilar membrane (BM) where the amplitude of different frequencies reaches the peak respectively.

加工したパルスを聴かせた場合、通常のパルスによって引き起こされる聴性脳幹反応より、急峻なピークを持つことが示されている [4]。このことは、蝸牛遅延を補正することによって各周波数チャンネルからの神経信号の到来が同期し、時間的な局在性が高くなる可能性を示唆していることから、蝸牛遅延を補正するよう加工したパルスの方が、通常のパルスより時間的にコンパクトな知覚を生じることを期待させる。しかしながら、行動実験においては通常のパルスの方が時間的にコンパクトに知覚されるという結果が得られている [2]。また、2つのパルス間のギャップ検出精度も高いという結果も得られていることから [5]、蝸牛遅延によって崩された周波数成分間の時間関係が、聴覚系のいずれかの段階で何らかの処理を受け、知覚に至っていることが推察される。

そこで、本研究においては、プロ演奏家やアマチュア演奏家、非演奏家を対象に蝸牛遅延量を操作するような刺激を用いて行動実験および生理計測を行い、応答の違いを観察することによって、蝸牛遅延に関連する処理過程、すなわち聴神経発火のタイミングなどが音楽経験によって変化しているのかどうかを検証した。

2. 実験 I： 行動実験

2つのパルス間に存在するオンセットのずれを検出可能な閾値を推定し、音楽経験による同時性判断の精度の違いを観察した。

2.1 刺激

実験に用いた音は、瞬間的な周波数増加により蝸牛遅延を補正してなくすような遅延補正タイプのパルス (Compensated: C×1)、瞬間的な周波数減少により蝸牛遅延を増長させる遅延増長タイプのパルス (Enhanced: E×1) を基準として生成した。これら2つの遅延タイプについて各

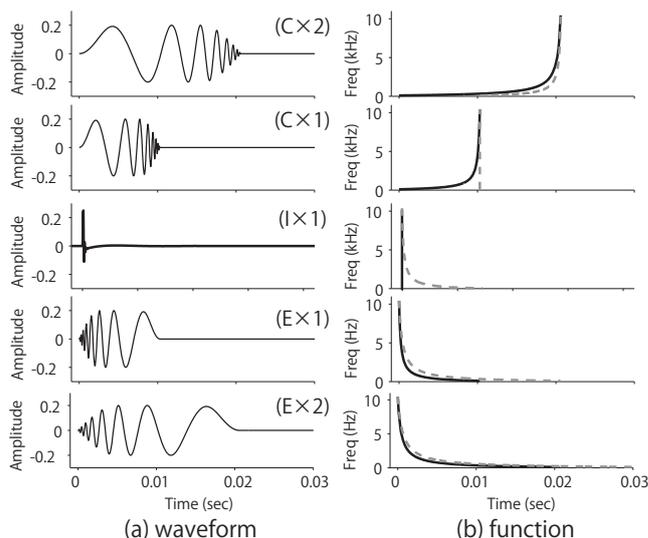


図 2 The panels on the left (a) show the waveforms of each chirp, and the panels on the right (b) show the corresponding function of cochlear delay. The solid lines on the right show the frequency pattern as a function of time for each delay condition. The broken line shows the time required for all frequencies to reach maximum amplitude at the basilar membrane.

周波数成分の遅延量を 2, 4, 8 倍し、通常生じる蝸牛遅延とは逆に低い周波数成分が高い周波数成分に大幅に先行するパルス (C×2, C×4, C×8) および、通常生じる蝸牛遅延をさらに増長するパルス (E×2, E×4, E×8) を生成した。これらパルスに、全ての周波数成分が物理的に同時に始まり、普段起こっている蝸牛遅延を生じさせる通常タイプのパルス (Intrinsic: I×1) 加えた計 9 種類を用いた。図 2 に、(C×1) (E×1) および両刺激の遅延量を 2 倍にした (C×2) (E×2) また (I×1) の波形 (a) および周波数関数 (b, 実線) と蝸牛基底膜上において各周波数がピークに達すると考えられる時間 (b, 破線) を示す。各タイプとも 100 から 10400 Hz までの周波数が用いられている。蝸牛遅延を補正するために使用された瞬時増加周波数関数は、Dau *et al.*[4] によるものである。

2.2 実験手順

同じタイプの2つのパルスが同時に鳴る「同時刺激」と、その同時性を崩した「非同時刺激」とをランダムに提示し、同時刺激であると思う方を二肢強制選択により回答してもらった。非同時刺激における各パルス間のギャップは、0.2, 0.4, 1.0, 2.3, 5.1, 11.4, 25.6 ms の 7 水準であった。同じ刺激対の比較は 1 人当たり 20 回繰り返された。閾値は、正答率が 75% に達する遅延時間を推定することによって求めた。

2.3 実験参加者

実験参加者は、プロ演奏家 3 名 (演奏期間 26.0 ± 1.0 年) ,

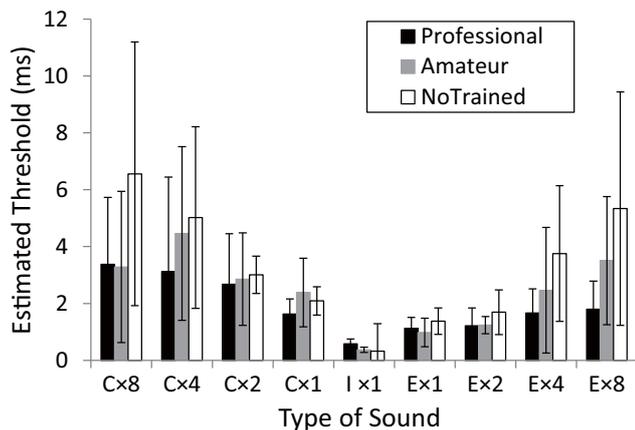


図 3 The average estimated thresholds and SDs in ms for each level of music experience and sound type.

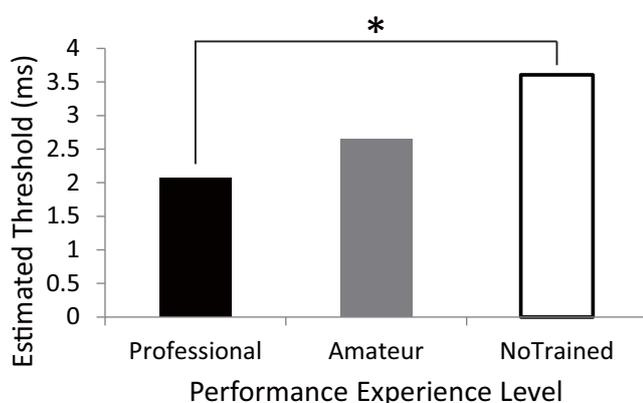


図 4 The average estimated thresholds in ms for each level of music experience. (* $p < .05$)

アマチュア演奏家 4 名 (15.0 ± 8.3), 非演奏家 3 名 (0.7 ± 1.2) である。プロ演奏家は国内外のコンクールで受賞歴がある者とし、非演奏家は学校教育以外で楽器演奏等をほとんど学んだことがない者とした。

3. 結果

推定されたギャップ検出閾値を図 3 に示す。同時生判断の推定閾値について、3 要因の分散分析を行ったところ、演奏経験の主効果 ($F(2, 79) = 3.24, p < .05$), 遅延量の主効果 ($F(3, 79) = 5.43, p < .01$) および遅延タイプの主効果 ($F(1, 79) = 6.31, p < .05$) が有意であった (通常パルスは遅延量 1 倍でのみ使用された水準であることから分析対象から除外した)。そこで、各主効果について Tukey-Kramer の HSD 検定を行い、条件間のさらに詳細な差を検証した。演奏経験に関しては、プロ演奏家の閾値が非演奏家に比べて有意に低かった (図 4)。遅延量に関しては、長くなるにつれ閾値が高くなり、同時生判断の精度が低くなっていた。遅延タイプに関しては、先行研究と同様に [5], [6]、遅延補正タイプの閾値が有意に高く、遅延増長タイプよりも同時生判断の精度が低かった。

3.1 考察

プロ演奏家、アマチュア演奏家、非演奏家の順に同時生判断の精度が低くなっており、プロ演奏家と非演奏家の間には特に有意な差が見られた。従って、演奏訓練のために、常に注意深く音を聞くことは、同時生判断の精度向上に貢献していると考えられる。プロ演奏家とアマチュア演奏家、および非演奏家とアマチュア演奏家の間に有意な差は見られなかったが、先行研究においてプロ演奏家をピアニストに限定し、(C×1) (E×1) (I×1) について測定した場合には、有意差が示されていたことから [7]、オンセットの同時生を重視する楽器やオンセットに強いインパクトを生じる音色を扱っているかどうかとも関係している可能性が考えられる。

遅延量が長くなるにつれ同時生判断の精度が低くなったことに関しては、パルスの持続時間が短ければ短いほど、パルス間の物理的な無音区間が長くなり、明確に 2 音を区別できるためであると考えられる。

遅延タイプに関しては、遅延補正タイプの方が、遅延増長タイプよりも有意に同時生判断の精度が低かった。従って、蝸牛遅延と同様の低い周波数帯域の遅延に対しては、同時であると見なされ易く、通常パルスと同程度の閾値が示された可能性が考えられる。また、遅延を 2 倍まで増長した場合においても、遅延量が 1 倍である場合とほぼ同じ閾値であったことから、通常パルスによって引き起こされる低い周波数帯域の遅延よりも、4 倍長く遅延したとしても、聴覚システムにとっては通常パルスとの区別が付きにくい可能性が示唆された。

加えて、演奏経験と遅延量あるいは遅延タイプとの間に交互作用が示されなかったことから、演奏経験による同時生判断の精度の向上は、蝸牛遅延による時間的な情報の崩れの処理に関わるようなシステムとは別の段階で生じている可能性が示唆された。

4. 実験 II : 生理計測

音のオンセットに起因して生じる聴性脳幹反応について、行動実験に用いた刺激の一部を使用して測定した。

4.1 刺激

行動実験に用いた刺激のうち、(C×1) (E×1) (I×1) の 3 種類の遅延タイプについて、0.4, 1.0, 2.3, 5.1 ms および、ギャップなしについて測定した。

4.2 測定手順

パルスは平均毎秒 20 回の頻度で、イヤホン (IE8, Sennheiser) を介して、約 4 分間、被験者の両耳に呈示された。約 4 分間の刺激呈示を 1 試行とし、各条件につき 1 試行をランダムな順序で実施した。耳朵を基準電極として、国際 10-20 法の Cz から生体信号を記録した。Fpz を接地

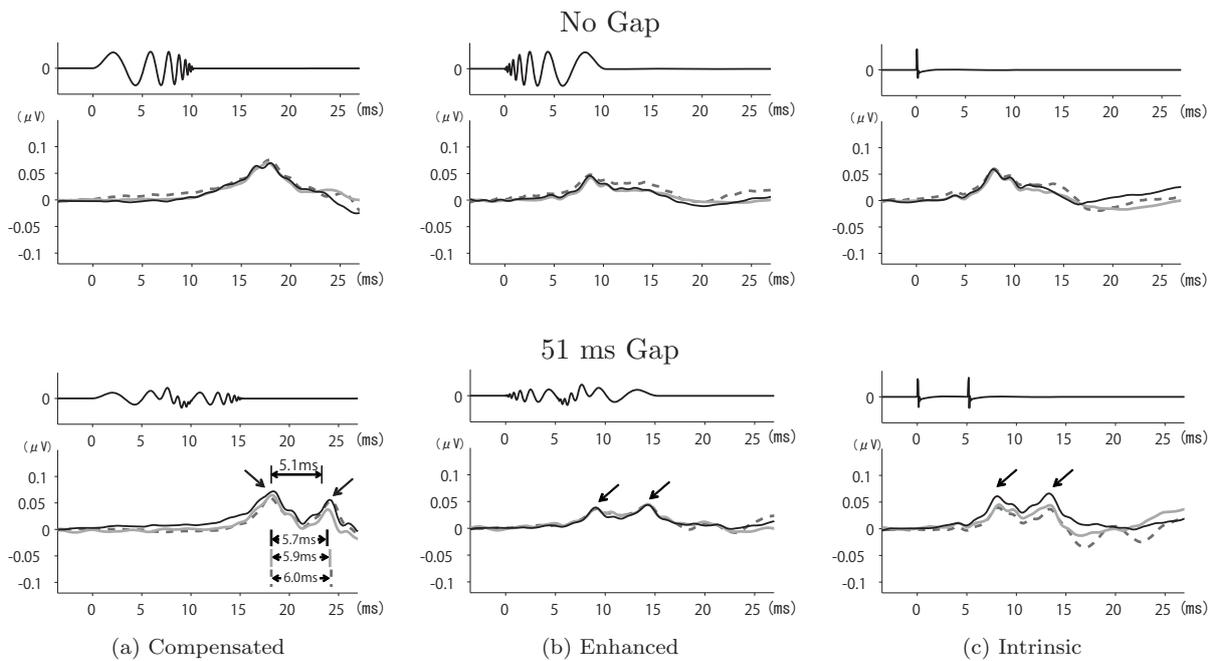


図 5 Waveforms of presented sounds (upper part of a panel) and averaged ABRs (lower part of a panel, black line: professional musician, gray solid line: amateur musician, gray broken line: non musician) for each sound-type with no gap and 5.1 ms gap.

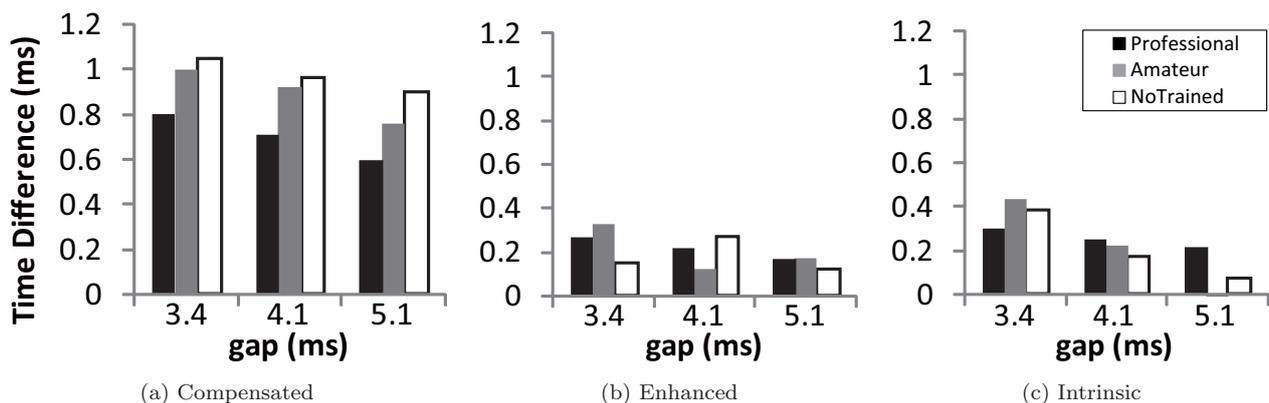


図 6 The average time differences between the physical stimuli gap and the interval between two wave-Vs in ms for each level of music experience, delay type and gap.

電極とした。生体信号を時定数 2 秒で増幅し (AB-601G, 日本光電), サンプリング周波数 20 kHz で A/D 変換した。加算回数は, 4000 回以上とした。呈示レベルは約 60 dB SPL であった。

4.3 実験参加者

実験参加者は, プロの演奏家 4 名 (演奏期間 25.2 ± 7.0 年), アマチュア演奏家 4 名 (4.8 ± 3.5), 非演奏家 4 名 (0 ± 0) である。

4.4 結果

図 5 に, ギャップなしおよび, 5.1 ms のギャップをもつ刺激によって引き起こされた各遅延タイプの聴性脳幹反応を示す。Dau *et al.*[4] によって報告された通り, 遅延補

正タイプにおいて最も急峻なピークが示された。これは, ギャップありの場合でも同じであった。

ギャップを加えることによる差を明確にするため, 物理的な刺激のギャップと聴性脳幹反応における 2 つのピーク間の時間間隔の差を求めた (図 6)。これらの時間間隔の差について, 3 要因の分散分析を行ったところ, ギャップ時間の効果が有意であり ($F(2, 107) = 8.65, p < .01$), ギャップが長くなればなるほど, 物理的な刺激のギャップと聴性脳幹反応における 2 つのピーク間の時間間隔の差が小さくなった。また, 演奏経験の要因と遅延タイプの交互作用が有意であり ($F(4, 107) = 2.58, p < .05$), 遅延補正タイプに関して, 演奏経験が長いほど物理的な刺激のギャップより聴性脳幹反応における 2 つのピーク間の時間間隔が有意に差が小さかった。

4.5 考察

遅延補正タイプにおいて最も急峻なピークが示されたことから、脳幹に至るまでの間に蝸牛遅延を打ち消すような処理が行われているわけではないことが示唆された。また、遅延補正タイプは、蝸牛基底膜上で全ての周波数になるべく同時にピークに達するように設計されたパルスであることから、結果として聴神経発火についても同時性が高まり、最も急峻な波形として観察される可能性が考えられる。

聴性脳幹反応において、最も急峻なピークを示した遅延補正タイプに関して、演奏経験が長いほど物理的な刺激のギャップと聴性脳幹反応における2つのピーク間の時間間隔の差が有意に小さくなった。すなわち、プロ演奏家の方が、1つ目のパルスに対する反応が2つ目のパルスに対する反応に影響を及ぼしにくくなっていると推察される。ギャップが長くなればなるほど、物理的な刺激のギャップと聴性脳幹反応における2つのピーク間の時間間隔の差が小さくなることから、この差の大小が知覚的な同時性判断の精度に関連している可能性が高いと考えられる。従って、継続的で注意深い同時性判断が、脳幹レベルでの時間分解能に影響を及している可能性がある他の遅延タイプにおいて、このような現象が観察されなかった理由としては、遅延補正タイプに比べてピークが緩やかであり、演奏経験による差が観察できるようなギャップの量では、2つのピークが明確に現れないためであると推察される。

5. 結論

本研究においては、音楽経験が、知覚および生理反応に影響を及ぼしているのかどうかを観察した。その結果、演奏経験が長いほど同時性判断の精度が有意に高くなり、継続的に注意深く聞き続けることによって知覚精度が高まることが示唆された。また、聴性脳幹反応においても、プロ演奏家の方が、脳幹レベルにおける時間分解能が高まっている可能性があり、継続的で注意深い同時性判断は、生理反応にも影響を及している可能性が示された。

謝辞 本研究、またその一部は、JSPS 科研費 (No.22730592, No.23730715, No.21330170, No. 24-10633) および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラムの補助を受けて実施された。

参考文献

- [1] Strait, D. L., Kraus, N., Skoe, E. and Ashley, R.: Musical experience and neural efficiency? effects of training on subcortical processing of vocal expressions of emotion, *European Journal of Neuroscience*, Vol. 29, No. 3, pp. 661-668 (2009).
- [2] Uppenkamp, S., Fobel, S. and Patterson, R. D.: The effects of temporal asymmetry on the detection and perception of short chirps, *Hearing Research*, Vol. 158, No. 1-2, pp. 71-83 (2001).

- [3] Békésy, G. v.: *Experiments in hearing*, McGraw-Hill, New York (1960).
- [4] Dau, T., Wegner, O., Mellert, V. and Kollmeier, B.: Auditory brainstem responses (ABR) with optimized chirp signals compensating basilar membrane dispersion, *J Acoust Soc Am*, Vol. 107, No. 3, pp. 1530-1540 (2000).
- [5] Aiba, E., Tsuzaki, M., Tanaka, S. and Unoki, M.: Judgment of perceptual synchrony between two pulses and verification of its relation to cochlear delay by an auditory model, *Japanese Psychological Research*, Vol. 50, No. 4, pp. 204-213 (2008).
- [6] Aiba, E., Kazai, K., Shimotomai, T., Matsui, T., Tsuzaki, M. and Noriko, N.: Accuracy of Synchrony Judgment and its Relation to the Auditory Brainstem Response: the Difference between Pianists and Non-pianists, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 15, No. 8, pp. 962-971 (2011).
- [7] Aiba, E., Kazai, K., Shimotomai, T., Tanaka, S., Nagata, N. and Tsuzaki, M.: Synchrony judgment and its relation to the auditory brainstem response: the difference between musicians and non-musicians, *Neuroscience and Music IV*, p. 21 (2011).