

耳には聞こえない高周波成分を含む音を発生させる楽器

栗林 龍馬・入戸野 宏

広島大学大学院総合科学研究科

Music Instruments That Produce Sounds with Inaudible High-Frequency Components

Ryuma KURIBAYASHI and Hiroshi NITTONO

Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

Abstract: Many kinds of audio-visual information from daily life have been digitized. Digitization accuracy is important to perceptions or evaluations of audio naturalness, and to listener comfort during the listening experience. High-resolution digital sound sources with inaudible high-frequency components (>20 kHz) have become available, owing to recent advances in information and communications technology. However, the effects of sounds that feature such components on human psychophysiological processes have not been sufficiently discussed. One of the reasons for this dearth of research could be that it remains unclear what musical instruments produce sounds with such components. In this technical note, we introduce some percussion instruments that produce sounds with inaudible high-frequency components, and present sound spectra and spectrograms of those sounds. High-frequency components in excess of 20 kHz appeared, in abundance, in the rising phase—but not in the falling phase—of a sound wave. In a sound wave of a tambourine, high-frequency components appeared not only in the rising phase but also in the falling phase. The

tambourine sound could be a feasible study subject, given how it features abundant inaudible high-frequency components; it could be used to examine the effects of sounds that feature them on human psychophysiological processes.

Keywords: inaudible high-frequency sounds, musical instruments, analog/digital conversion

1. はじめに

ヒトが生きていくうえで、視聴覚情報は重要である。わたしたちの生活空間には多くの視聴覚情報が存在し、ヒトは意識的・無意識的に影響を受けている。情報通信技術の発達にともなって、視聴覚情報の多くがデジタル化された情報におきかわっている。たとえば、テレビやパソコン・スマートフォンなどの電子機器のディスプレイ上に映し出される動画像、スピーカーやイヤホンを通して再生される音声や音楽、電子機器から発せられる音は、デジタル信号処理を介して（デジタル化されて）人為的に加工された視聴覚情報である。デジタル化された情報は劣化せずにコピーできるので、さまざまな視聴覚体験を多くの

人々に一斉に提供できるメリットがある。その一方で、人為的に加工された視聴覚情報がヒトに与える影響は十分に検討されていない。新しいメディアが発展・普及するたびに、それがヒトに与える社会的・心理生理学的な影響が検討されてきた (Potter & Bolls, 2012 入戸野監訳2014)。デジタル化が進む現代社会では、生活環境にある視聴覚情報の中で、人為的に加工された情報が占める割合が増加している。生の情報と人為的に加工された情報との物理的な違いを正確に把握し、その違いがヒトに与える影響を評価・予測することは、今後の視聴覚メディア市場に求められる要件の一つである。

本稿では、過去30年間に音質が大きく変化してきたオーディオメディアについて扱う。1982年にコンパクトディスク (compact disk: CD) が発売され、1990年代には、アナログ音源であるレコードに代わって、オーディオメディアの主流となった。21世紀に入ると、インターネットの高速化や音響データの圧縮技術の発達によって、パソコンや携帯電話でオーディオファイルのダウンロードが可能になった。さらに、CDやMP3形式 (MPEG [Moving Picture Experts Group] 1 or 2, layer III audio) の音源と比べて高精度にデジタル化された (生の聴覚情報により近い) 高解像度デジタル音源 (high-resolution audio: ハイレゾ音源) が、2008年からネット上で配信されはじめた。

ヒトが知覚できる音の高さ (可聴域) はおよそ20–20,000 Hz (20 kHz) といわれている。20 kHzをこえる高周波音は音質評価に影響せず (蘆原, 2000; Ashihara & Kiryu, 2003), 脳の聴覚誘発電位を生じさせることもない (Fujioka, Kakigi, Gunji, & Takeshima, 2002)。これらの知見に基づいて、CDやMP3形式のデジタルオーディオメディアでは、およそ20 kHzをこえる高周波成分がカットされている。

一方、楽器の生演奏や自然環境音には、20 kHzをこえる高周波成分がしばしば非定常的に含まれている (河合・大橋, 2013)。デジタル化の精度が大きく向上したハイレゾ音源が利用できるようになったことで、20 kHzをこえる高周波音を再生できるようになった。しかし、そのような高周

波成分の有無がヒトの心理生理状態に与える影響は十分に明らかになっていない。

青銅製の打楽器 (インドネシア・バリ島のガムラン楽器) やチェンバロによって演奏された音楽を用いた研究で、高周波成分をカットしていない音源の方が音質が優れている (e.g., 音が柔らかい, 耳当たりがよい) と評価されたという報告がある (Oohashi et al., 2000; Yagi, Nishina, & Oohashi, 2003)。高周波成分の有無が区別できるかどうかは音楽の種類や個人に依存するようである (Nishiguchi, Hamasaki, Ono, Iwaki, & Ando, 2009)。また、20 kHzをこえる高周波成分を含む音楽を聴いたときは、高周波成分をカットした音楽を聴いたときと比べて、脳波のアルファ帯域パワーが高くなることが示されている (Fukushima et al., 2014; Kuribayashi, Yamamoto, & Nittono, 2014; Oohashi et al., 2006; Oohashi et al., 2000; Yagi, Nishina, Honda, & Oohashi, 2003)。この脳反応が生じる理由について、リラックス効果を反映するという説 (e.g., Oohashi et al., 2000) や、適度な注意集中状態を反映するという説 (Kuribayashi, Yamamoto, & Nittono, 2014; 原田他, 2014) があるが、詳しいことはわかっていない。高周波成分がヒトの心理生理状態に与える効果には、音のスペクトル構造や持続時間の違いが関係していると考えられる。

研究が進んでいない理由の一つに、耳には聞こえない高周波成分がどのような音素材に多く含まれるのか、あまり知られていないことが挙げられる。高精度な録音環境で楽器の音を測定・解析する機会を得たため、本稿では、20 kHzをこえる高周波成分を含む音を発生させる楽器を紹介する。はじめに、生の聴覚情報がデジタル化される手順を概説する。

2. 音のデジタル化

音は、空気の振動によって生じる圧力の変化 (音波) を、ヒトの聴覚系が処理した結果生じる感覚である。圧力変化の速さ (周波数) が音の高さに対応し、圧力変化の大きさ (振幅) が音の大きさに対応する。周波数は、1秒間あたりに振動する

回数の中で、単位にはHz（ヘルツ）を用いる。音波の振幅（音圧）は、ヒトに聞こえる最小の音圧である20 μ Paを基準とした相対的な音圧比（音圧レベル）dB SPL（sound pressure level）で表現されることが多い。単一の周波数の正弦波から成る音波を純音とよぶ。周波数が高いほど、高い音が知覚される。振幅が大きいほど、大きな音が知覚される。電子機器の多くや音叉などは純音を発生させるが、楽器の音やヒトの声、せせらぎなどの自然物が生じさせる音の多くは、多数の周波数成分をもつ複合音である。周波数成分ごとのエネルギー量を示した図をサウンドスペクトルとよぶ。音に含まれる周波数成分の構造がわかる。楽器や声帯から生じる音は、固有のスペクトル構造をもつ。その構造が音色を特徴づける要因の一つである。

音波は、圧力が連続的に変化するアナログ信号である。音をデジタル音源として扱うためには、音波を離散的に変化するデジタル信号に変換する必要がある。この変換処理を、アナログ／デジタル変換（analog/digital conversion: A/D変換）とよぶ。A/D変換は、標本化と量子化の過程を経る。

標本化（sampling）は音波を時間軸で離散化することである。1秒間に離散化する回数をサンプリング周波数という。サンプリング周波数が高いほど元の波形を正確に復元できる。サンプリング周波数の2分の1（Nyquist frequency: ナイキスト周波数）が、復元可能な音波の最大周波数となる（標本化定理）。そのため、ある音波のスペクトル構造を完全に復元するためには、その音波の最大周波数の2倍をこえるサンプリング周波数で標本化する必要がある。ナイキスト周波数が復元したい音波の最大周波数を下回る場合、もとの音波には存在しない周波数の音波がデジタル化した音源に生じてしまう（aliasing: エイリアシング）。エイリアシングを防ぐために、A/D変換を行う前に、もとの音波に含まれるナイキスト周波数をこえる周波数帯域の信号を、ローパスフィルタを用いて除去するのが一般的である。

量子化（quantization）は、音波を音圧軸で離散化することである。音圧（電圧）を特定数の段階

に分け、サンプリングした時点の音圧（電圧）値をもっとも近い段階の値に決める。この段階が多いほど音圧の誤差（量子化誤差）が減少する。たとえば、CDでは、44,100 Hz（44.1 kHz）で標本化され、音圧の値が65,536段階（2の16乗、16 bits）で量子化されている。

デジタル化した音を元の音に近づけるためには、サンプリング周波数と量子化bit数の値を高く設定すればよい。一方、同じ時間長の音データでも、それらの値を高くするほど扱うデータ量が増加してしまう。そのため、CDのサンプリング周波数は、可聴周波数の上限（およそ20 kHz）よりも少し高い周波数の音を復元できる44.1 kHzと決められている。ハイレゾ音源の定義は、電子情報技術産業協会（Japan Electronics and Information Technology Industries Association: JEITA）によって、“LPCM 換算でサンプリング周波数、量子化 bit 数のいずれかが CD スペックを超えていればハイレゾオーディオとする。ただし、いずれかが CD スペックを超えていても、もう一方が CD スペック未満の場合は、非該当とする”とされている（電子情報技術産業協会、2014）。LPCM（linear pulse code modulation: リニアPCM[パルス符号変調]）とは、音楽CDで採用されているA/D変換の方式の一種である。日本オーディオ協会（Japan Audio Society: JAS）はJEITAの定義を踏まえて、録音フォーマット・入出力インターフェース・ファイル再生・信号処理・デジタル/アナログ変換が、サンプリング周波数96 kHz以上、量子化bit数24 bits以上の性能をもつデジタル機器をハイレゾ対応機器として認めている（日本オーディオ協会、2014）。

3. 耳には聞こえない高周波成分を含む音を発生させる楽器

これまでの研究では、打楽器（ガムラン楽器、チェンバロ、オルゴール）の音が20 kHzをこえる高周波成分を含むことが多いと経験的にいわれている。本稿では、いくつかの打楽器のスペクトル構造を測定した。

3.1. 測定方法

2015年2月9日に、広島大学大学院教育学研究科音楽棟ホールで録音計測を行った。音響振動計測分析システム（PULSE, Bruel & Kjar, Nærum, Denmark）を用いて、4–100,000 Hz（100 kHz）の周波数性能をもつ録音マイク（1/4 inch Type 4939A011, Bruel & Kjar, Nærum, Denmark）で録音を行った。計測対象と録音マイクの距離は1.5 mであった。楽器の演奏は、広島大学大学院教育学研究科音楽文化系コースの学生が、録音するのに十分な音量で、各楽器の一般的な方法で行った。およそ1秒間隔で5秒間楽器を鳴らしたときのサウンドスペクトル（ピークホールド）を計測した。また、録音した楽器の単音について時間周波数スペクトログラムを作成した（Adobe Audition CC, Adobe, San Jose, USA）。

楽器は、広島大学大学院教育学研究科音楽文化教育学講座が所有するものを使用した。以下の楽

器のサウンドスペクトルを計測した：カスタネット、クラベス、グロッケンシュピール、コンガ、鈴、タンバリン、チェンバロ、トライアングル、フィンガーシンバル、ボンゴ、マラカス、木魚。また、以下の楽器の時間周波数スペクトログラムを解析した：クラベス、グロッケンシュピール、タンバリン、チェンバロ、ボンゴ。

3.2. 音のスペクトル構造

Figure 1に、12種類の打楽器のサウンドスペクトルを示す。楽器によって音に含まれる周波数成分が異なることがわかる。100 kHzまでパワーをもつ楽器もある。周波数が高くなるにつれパワーが減衰している。音程の明確な楽器（e.g., グロッケンシュピール）は、いくつかのピーク周波数（倍音成分）が目立つ。音程が不明瞭な楽器（e.g., タンバリン、カスタネット）は、目立ったピーク周波数がなく、倍音成分が不明瞭で非倍音成分が多

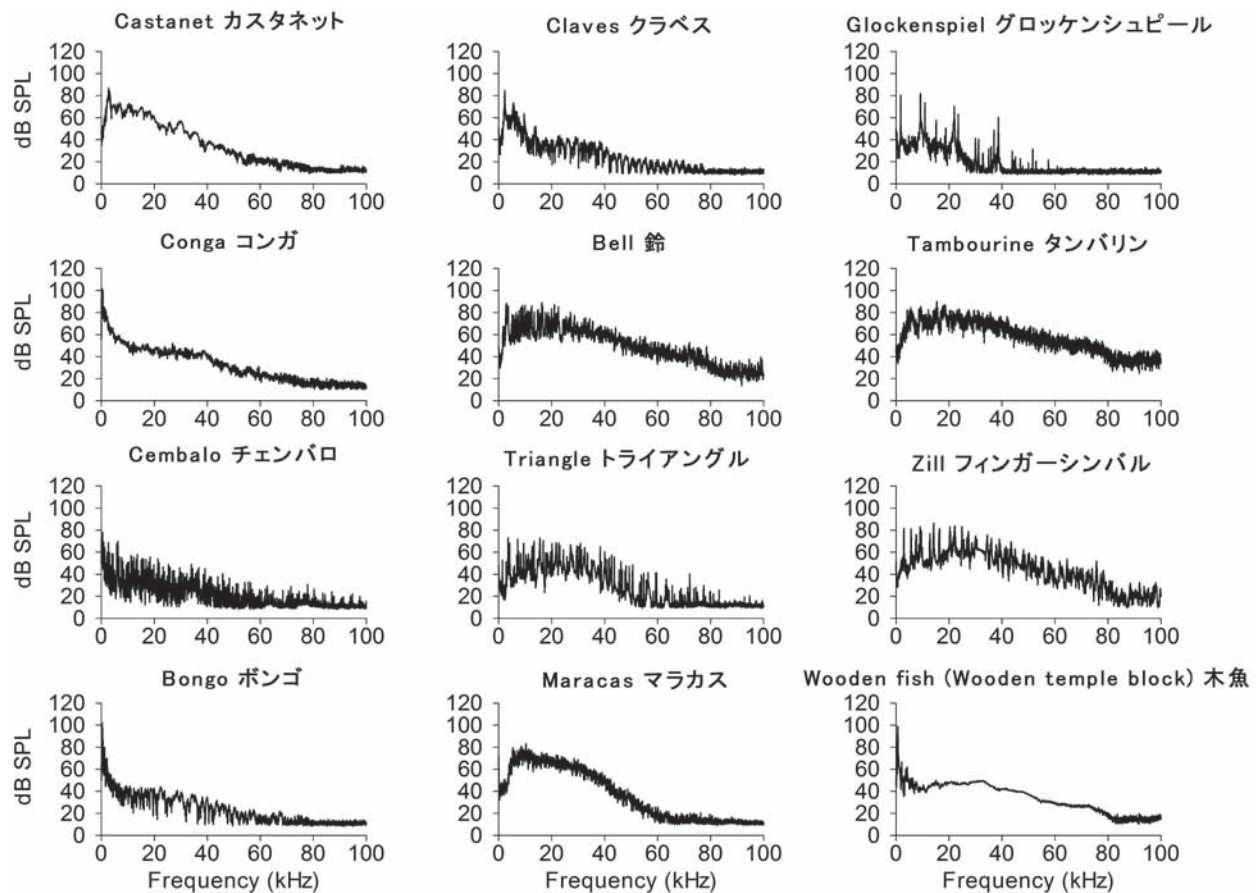


Figure 1. Sound spectra of 12 percussion instruments. Peak-hold sound pressure levels during a five-second playing time (approximately 1 beat per second) were measured.

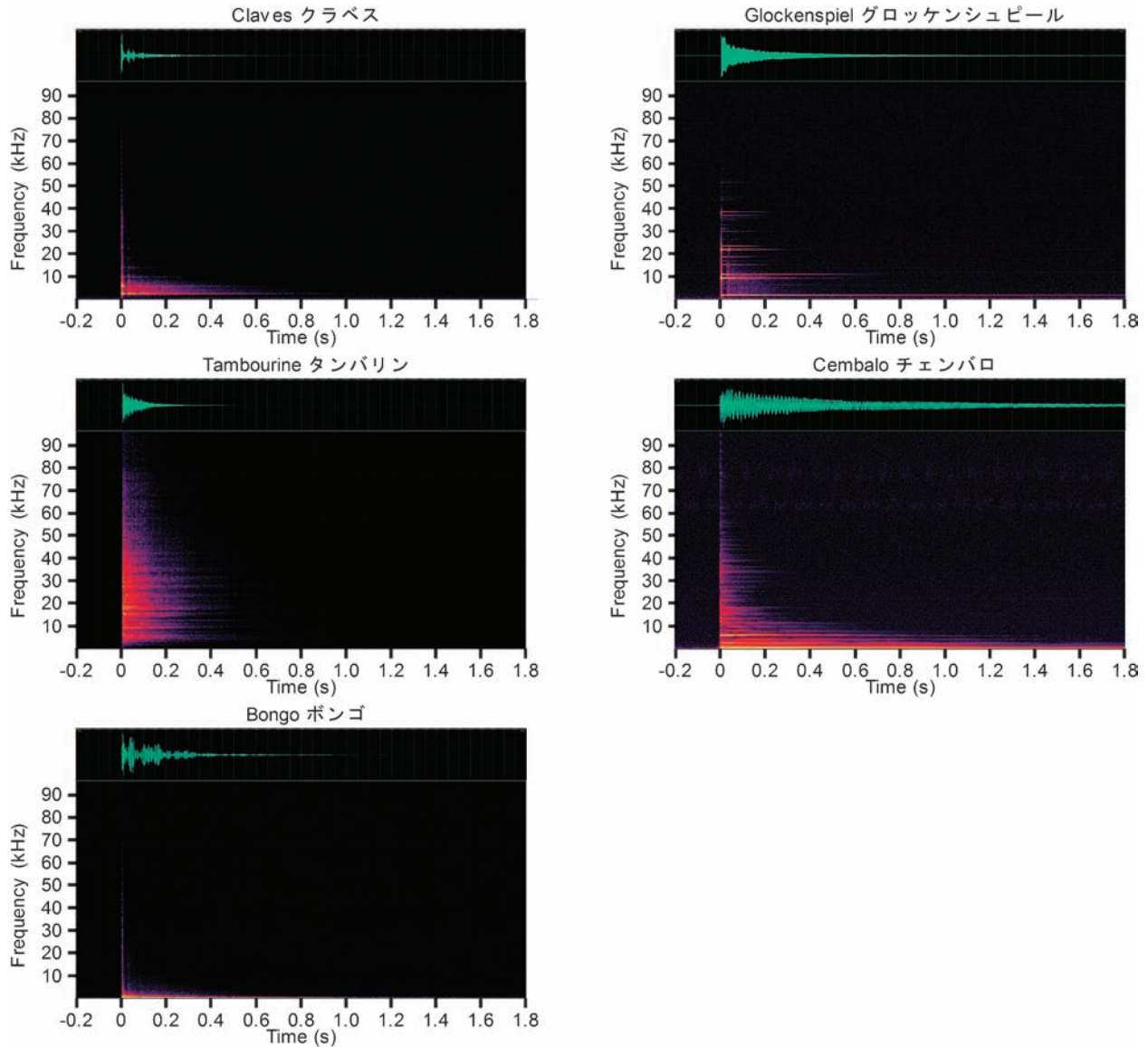


Figure 2. Sound waves (upper panel) and time-frequency spectrograms (lower panel) of five percussion instruments. The amplitude of each sound wave was normalized so as to have the same maximal value. The brighter yellow colors indicate the higher intensity of the frequency.

い。

Figure 2に、音が発生する200 ms前から1800 ms後までの単音の波形（上部）と、スペクトル構造の時間的变化（スペクトログラム、下部）を示す。横軸が時間、波形の縦軸が音圧、スペクトログラムの縦軸が周波数である。各周波数における音圧が大きいほど明るい黄色で示している。楽器ごとに、音の鳴り始めから鳴り終わりまでの波形（振幅包絡）が異なることがわかる。周波数構造だけでなく、振幅包絡の形状も音色を決める要素の一つである。20 kHzをこえる高周波成分は、音の鳴

り始めの短時間に豊富に含まれている。可聴域の周波数成分と比較して、高周波成分は減衰が速いといえる。タンバリンは、20 kHzをこえる高周波成分が含まれる鳴動時間が比較的長い。高周波成分が音の立ち上がり（物体が振動を始めた瞬間）に多く含まれることから、高周波成分が生じるのは、物体と物体が接触した瞬間である可能性がある。タンバリンの胴枠には、二枚合わせにされた小型の金属円盤が装着されている。そのため、タンバリンを叩くと金属円盤が持続して鳴り響く（物体の接触が持続される）。このことによって、

他の楽器の音と比べてタンバリンの音には、高周波成分が比較的長く含まれていたと考えられる。

4. まとめ

本稿では、20 kHzをこえる高周波成分を含む音を発生させる打楽器を紹介した。音に含まれる各周波数の振幅は、周波数が高いほど小さくなる。特に、20 kHzをこえる高周波成分は、音の立ち上がりに多く含まれるが、持続時間が短い。今回測定したなかでは、タンバリンが高周波成分を最も豊富に発生させる楽器であった。

音のスペクトル構造に関する検討課題として、音を奏でる強さや演奏方法を変えて楽器の音の計測を行うことが挙げられる。打楽器や鍵盤楽器の叩く強さを変えると、振幅だけでなく、周波数成分が変化する可能性がある。演奏の強度に関して客観的な測度（e.g., 打叩時の圧力）を測定しておけば、音のスペクトル構造と演奏強度との対応関係を評価できるだろう。また、タンバリンのようにいくつかの演奏方法（e.g., 振る、手で叩く、スティックで叩く）がある場合には、演奏方法によって音のスペクトル構造が変わる可能性もある。

これまでの視聴覚メディア市場では、製品の機能性や質など主観的に評価しやすい側面が重視されてきた。一方で、意識には上りにくい側面や言語的に表現できない側面が、潜在的にヒトの心理生理状態に影響している可能性もある。次世代の視聴覚メディアの規格は、学術的・技術的な議論が十分になされないまま、スペック先行で製品化や市販まで進んでしまうこともあるといわれている（東倉・大橋・小泉，2006）。人為的に加工された視聴覚情報がヒトに与える影響を明確にすることは、快適さを追求し、安全な生活環境を守っていくために重要といえる。

謝辞

本稿で紹介した楽器の録音を行うためにご助力いただいた、枝川一也先生、二矢田勝行先生、山本竜太氏に深謝する。広島大学大学院教育学研究科音楽文化教育学講座からは、楽器およびホー

ルを提供していただいた。ひろしま医工連携・先進医療イノベーション拠点からは、録音計測機材を提供していただいた。本稿は、JSPS科研費15J06118の助成を受けた研究の一環である。

引用文献

- 蘆原 郁 (2000). 純音および複合音聴取時の可聴域測定 電子情報通信学会技術研究報告, **100**, 33-39.
- Ashihara, K., & Kiryu, S. (2003). Audibility of components above 22 kHz in a harmonic complex tone. *Acta Acustica united with Acustica*, **89**, 540-546.
- 電子情報技術産業協会 (2014, March 26). ハイレゾオーディオの呼称について（周知）25JEITA-CP第42号, Retrieved from http://home.jeita.or.jp/page_file/20140328095728_rhsiN0Pz8x.pdf (2015年9月27日 閲覧)
- Fujioka, T., Kakigi, R., Gunji, A., & Takeshima, Y. (2002). The auditory evoked magnetic fields to very high frequency tones. *Neuroscience*, **112**, 367-381.
- Fukushima, A., Yagi, R., Kawai, N., Honda, M., Nishina, E., & Oohashi, T. (2014). Frequencies of inaudible high-frequency sounds differentially affect brain activity: Positive and negative hypersonic effects. *PLoS ONE*, **9**, e95464.
- 原田俊英・山本竜太・伊藤祥史・石崎文字・二矢田勝行 (2014). ハイレゾリューション音源が自律神経機能に及ぼす影響について 診療と新薬, **51**, 99-102.
- 河合徳枝・大橋 力 (2013). ハイパーソニックの光景 科学, **83**, 290-295.
- Kuribayashi, R., Yamamoto, R., & Nittono, H. (2014). High-resolution music with inaudible high-frequency components produces a lagged effect on human electroencephalographic activities. *Neuroreport*, **25**, 651-655.
- 日本オーディオ協会 (2014, June 12). ハイレゾリューション・オーディオ（サウンド）の取り組み. News release of Japan Audio Society, Retrieved from <http://www.jas-audio.or.jp/jas-cms/wp-content/uploads/2014/06/doc14061201.pdf> (2015年9月27日 閲覧)

- Nishiguchi, T., Hamasaki, K., Ono, K., Iwaki, M., & Ando, A. (2009). Perceptual discrimination of very high frequency components in wide frequency range musical sound. *Applied Acoustics*, **70**, 921-934.
- Oohashi, T., Kawai, N., Nishina, E., Honda, M., Yagi, R., Nakamura, S., . . . Shibasaki, H. (2006). The role of biological system other than auditory air-conduction in the emergence of the hypersonic effect. *Brain Research*, **1073-1074**, 339-347.
- Oohashi, T., Nishina, E., Honda, M., Yonekura, Y., Fuwamoto, Y., Kawai, N., . . . Shibasaki, H. (2000). Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: Hypersonic effect. *Journal of Neurophysiology*, **83**, 3548-3558.
- Potter, R. F., & Bolls, P. D. (2012). Psychophysiological measurement and meaning: Cognitive and emotional processing of Media. New York : Routledge. (ポッター, R. F., & ボウルズ, P. D. 入戸野 宏 (監訳) (2014). メディア心理生理学 北大路書房)
- 東倉洋一・大橋 力・小泉宣夫 (2006). 超高周波音が拓く音の新世界を探る 日本音響学会誌, **62**, 891-896.
- Yagi, R., Nishina, E., Honda, M., & Oohashi, T. (2003). Modulatory effect of inaudible high-frequency sounds on human acoustic perception. *Neuroscience Letters*, **351**, 191-195.