

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23330220

研究課題名(和文)複合低周波音による振動感覚の知覚特性に関する基礎的研究

研究課題名(英文)Basic study on the perceptual characteristics of vibratory sensation induced by complex low-frequency noise

研究代表者

高橋 幸雄 (TAKAHASHI, Yukio)

独立行政法人労働安全衛生総合研究所・人間工学・リスク管理研究グループ・上席研究員

研究者番号：40312300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円、(間接経費) 4,020,000円

研究成果の概要(和文)：二つの純音(16～80 Hz)を組み合わせた複合低周波音を用いて、それらによって頭部で知覚される振動感覚の閾値、等感度レベルを測定し、聴覚の場合と比較した。聴覚の場合には、周波数の高い成分が支配的にそれらの知覚に寄与していたが、頭部で知覚される振動感覚の場合には、周波数の低い成分からの寄与も無視できないことが示唆された。これは、振動感覚の閾値に近い音圧レベルの周波数成分を複数含む複合低周波音では、純音の場合よりも振動感覚が知覚されやすくなることを示す結果で、その心理的影響を評価する際には、振動感覚の効果も考慮することが必要と推測された。

研究成果の概要(英文)：By using complex low-frequency noise, which were made of two pure tones within the 16-80 Hz range, as test stimuli, we measured the threshold levels and the equal-sensation levels for "vibration perceived in the head", and compared them to those levels for hearing sensation. The hearing sensation was found to be contributed dominantly by a tonal component at a higher frequency, while the perception of vibration in the head was found to be contributed by both tonal components. This result suggests that vibratory sensation is more easily induced by complex low-frequency noise containing plural frequency components whose sound pressure levels are close to the threshold levels for inducing vibratory sensation. It is reasonably deduced that the effect of vibratory sensation needs to be taken into account in assessing psychological effects of such complex low-frequency noise.

研究分野：労働衛生工学(特に騒音・低周波音)

科研費の分科・細目：心理学・実験心理学

キーワード：低周波音 複合音 振動感覚 知覚 閾値 等感度レベル

1. 研究開始当初の背景

(1) 低周波音(周波数が概ね 100 Hz 以下の音)に対するヒトの聴覚感度は鈍く、低周波音が大きな音に感じられることは少ない。それにもかかわらず、可聴域騒音に低周波成分を付加することで不快感、アノイアンスが増大するという実験結果が、過去に多数報告されている(例えば、Persson Waye, "Health aspects of low frequency noise", Proc Inter-Noise 2006, Paper number 426 (2006))。低周波音には振動感覚を知覚させるという特徴があるが、この振動感覚が不快感の一因になっている可能性がある(Inukai et al., "A multidimensional evaluation method for the psychological effects of pure tones at low and infrasonic frequencies", J Low Freq Noise Vib, 5, 104-112 (1986))。低周波音の音圧レベルが高くなると振動感覚も大きく知覚され、その結果として不快感等の心理的影響も大きくなる可能性がある。

(2) 現在、国内において、低周波音に対する標準的な評価方法や許容基準・規制基準等は定められていない。将来的には、それらの確立が求められると予想されるが、特に作業環境(労働環境)等で発生する音圧レベルの高い低周波音については、聴覚による「音」の知覚の効果だけでなく振動感覚の効果も考慮することにより、より適切な影響評価方法・許容基準等を確立できる可能性があると考えられる。

(3) しかし現状では、低周波音による振動感覚の知覚特性に関する研究データの蓄積は十分とは言えない。研究代表者による先行研究で、低周波音(16~80 Hz)による振動感覚が、頭部で最も鋭敏に知覚されること(Takahashi, "Vibratory sensation induced by low-frequency noise: a pilot study on the threshold level", J Low Freq Noise Vib Active Control, 28, 245-253 (2009))、振動の知覚部位を頭部に限定した「頭部の振動感覚」の知覚閾値(16~80 Hz)が、聴覚閾値よりも5~15 dB(Z)程度高いこと(Takahashi, "Vibratory sensation induced by low-frequency noise: the threshold for "vibration perceived in the head" in normal-hearing subjects", J Low Freq Noise Vib Active Control, 32, 1-10 (2013))などが報告されているが、これらはいずれも純音を用いた結果で、実環境への応用を考えた場合に重要となる複合低周波音(複数の周波数成分を有する低周波音)による振動感覚の知覚特性がどのようなものなのかについては、データの蓄積が不十分である。

2. 研究の目的

本研究では、複合低周波音によって知覚される振動感覚の特性(閾値、等感度レベル、それらの周波数依存性など)を実験的に調べることにより、低周波音の知覚特性の解明に寄与するとともに、音圧レベルの高い低周波音

の影響評価方法の確立に向けた基礎データとすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、複合低周波音をテスト音とした被験者実験を実施した。実験の実施場所は、研究代表者の所属する独立行政法人労働安全衛生総合研究所の超低周波音実験室である。

(2) 本研究で対象とした振動感覚は、低周波音によって知覚される「頭部の振動感覚」である。これは、研究代表者による先行研究(Takahashi, 前掲(2009))で、低周波音による振動感覚が頭部で最も鋭敏に知覚されるという結果が得られていたためである。本研究では、「頭部」を「首から上」とし、「頭部の振動感覚」を「被験者の主観的判断に基づく、頭部の全体、または一部での振動の知覚(主観的な感覚で、実際に物理的振動が生じていなくてもかまわない)。聴覚や、他の部位での振動の知覚とは独立した感覚」と定義した。

(3) 本研究では、実験用のテスト音として、二つの純音を組み合わせた複合低周波音を使用した。また比較用のデータを得るために純音のテスト音も用いた。

純音テスト音は、8種類の純音(16、20、25、31.5、40、50、63、80 Hz)とした。複合テスト音は、キー成分と付加成分の2成分を組み合わせ作成した。キー成分は40 Hzまたは50 Hzの純音とし、付加成分は、キー成分と高調波の関係にならないように、キー成分が40 Hzの場合には16 Hz、25 Hzまたは63 Hzのいずれか、キー成分が50 Hzの場合には20 Hz、31.5 Hzまたは80 Hzのいずれかとした。40 Hzまたは50 Hz成分をキー成分としたのは、「頭部の振動感覚」の閾値曲線がこれらの周波数付近で特徴的な振る舞いをするのが、研究代表者の先行研究(Takahashi, 前掲(2013))で分かっていたためである。さらに、2成分の音圧レベルの差についても、レベル差無し、および-15 dB/oct.に相当するレベル差の二通りの設定を使用した。

(4) 複合低周波音による「頭部の振動感覚」閾値は、被験者調整法によって測定した。これは、テスト音の音圧レベルを被験者自身が調整して自身の閾値を探す方法である。音圧レベルの調整手順が結果に影響を及ぼす可能性があったため、上昇順による測定(振動感覚を知覚できない音圧レベルから、徐々に音圧レベルを上げながら閾値を探す方法)と下降順による測定(振動感覚をはっきりと知覚できる音圧レベルから、徐々に音圧レベルを下げながら閾値を探す方法)を各1回、計2回の測定を行い、その平均値を閾値とした。「頭部の振動感覚」閾値と比較するために、同じ複合テスト音、同じ測定手順による聴覚閾値も測定した。

さらに、これも比較用データとして、純音テスト音による「頭部の振動感覚」閾値、聴覚

閾値も、同じ測定手順で測定した。

(5) 複合低周波音による「頭部の振動感覚」の等感度レベルの測定では、50 Hz、85 dB(Z)の純音を基準音とし、それによって知覚される「頭部の振動感覚」を基準感覚とした。まず、被験者に基準音を10秒間聞かせ、その間に知覚される「頭部の振動感覚」を基準感覚として記憶させた。続いて、上記(4)と同じテスト音を再生し、それによって知覚される「頭部の振動感覚」の主観的な大きさが、基準感覚の主観的な大きさと同じになるようにテスト音の音圧レベルを調整させた。この場合の音圧レベルの調整手順は、上昇順と下降順のどちらでも可、あるいはそれらが混在しても可とし、2回の測定の平均値を等感度レベルとした。

「頭部の振動感覚」の等感度レベルと比較するために、同じ複合テスト音、同じ測定手順を用いて、複合低周波音による聴覚の等感度レベルも測定した。ただし、聴覚の場合の基準音には、50 Hz、70 dB(Z)の純音を使用した。

さらに、これも比較用データとして、純音テスト音による「頭部の振動感覚」の等感度レベル、聴覚の等感度レベルも、同様の測定方法で測定した(基準音は、どちらの感覚についても複合音の場合と同じ)。

4. 研究成果

(1) 以下では、学会等で発表済みの結果を述べる。これまでの学会発表では、煩雑さを避けるために、16~50 Hzのテスト音から成る複合テスト音による結果のみを使用した。学会発表時と同様に、ここでも、それらのテスト音をCN01~CN08と呼ぶ。それらの純音成分の組み合わせ、2成分のレベル差は、表1に示すとおりである。付加成分の括弧内のレベル設定は、キー成分に対する付加成分の音圧レベルの相対値である。

表1 「4. 研究成果」で言及する複合テスト音

Noise stimulus	Key tone	Additional tone (relative level setting)
CN01	40 Hz	16 Hz (0 dB)
CN02		25 Hz (0 dB)
CN03	50 Hz	20 Hz (0 dB)
CN04		31.5 Hz (0 dB)
CN05	40 Hz	16 Hz (+20 dB)
CN06		25 Hz (+10 dB)
CN07	50 Hz	20 Hz (+20 dB)
CN08		31.5 Hz (+10 dB)

(2) 複合テスト音による「頭部の振動感覚」閾値の測定結果(平均±SD)の例を図1、図2に示す([学会発表]の、)。これは、6人の被験者(男性が2人、女性が4人)によって得たもので、図1が複合テスト音CN01、

CN05 についての結果、図2が複合テスト音CN03、CN07についての結果である。両図ともに、黒丸が2成分の音圧レベルに差が無い場合、白丸が2成分の音圧レベルに-15 dB/oct.に相当する差がある場合である。また、両図中の点線は、同じ被験者の純音テスト音(16~50 Hz)に対する「頭部の振動感覚」閾値(平均)を示す。

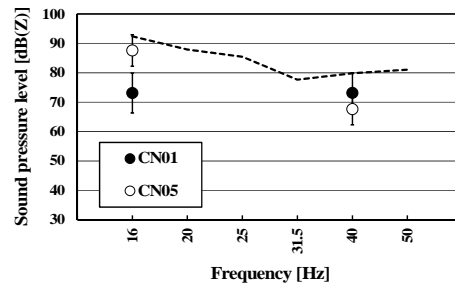


図1 複合テスト音CN01、CN05についての「頭部の振動感覚」閾値

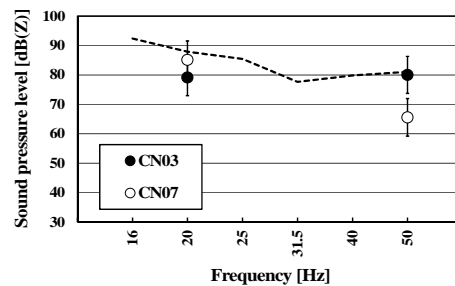


図2 複合テスト音CN03、CN07についての「頭部の振動感覚」閾値

被験者が「頭部の振動感覚」閾値と判断した場合の複合テスト音中の2成分の音圧レベルは、ともに純音テスト音での「頭部の振動感覚」閾値よりも低かった。これは、図示していないケース(CN02、CN04、CN06、CN08)でも同様であった。

「頭部の振動感覚」閾値と判断された複合テスト音中の2成分の音圧レベルと、純音テスト音を用いて測定された「頭部の振動感覚」閾値のレベル差を、表2にまとめる。全ての複合テスト音について、キー成分と付加成分の両方の音圧レベルとも、純音テスト音に対する「頭部の振動感覚」閾値よりも低くなっていた。それらの差は、キー成分では8例中の6例、付加成分では8例中の5例で統計的に有意であった($p < 0.05$, Wilcoxonの符号付順位和検定による)。これは、複合音の場合には、純音の場合よりも「頭部の振動感覚」の知覚が容易になることを示す結果と考えられた。

また、「頭部の振動感覚」閾値の場合には、後述の聴覚閾値の場合と異なり、必ずしも周波数の高い成分が支配的に閾値の判断に寄与しているわけではなく、周波数の低い成分

からの寄与も無視できないことが示唆された。例えば、CN01 の場合には 40 Hz 成分の方が純音の場合との差が小さかったが、CN05 の場合には、逆に 16 Hz 成分の方が純音の場合との差が小さかった。「頭部の振動感覚」の知覚における周波数の弁別は、聴覚の場合よりもあやふやなのではないかと推測できた。

表 2 「頭部の振動感覚」閾値と判断された複合テスト音中の 2 成分の音圧レベルと、「頭部の振動感覚」閾値と判断された純音テスト音の音圧レベルの差

Noise stimulus	Level difference (mean \pm SD) [dB(Z)]	
	Key tone	Additional tone
CN01	-6.7 \pm 6.3 *	-19.3 \pm 5.6 *
CN02	-7.9 \pm 5.9 *	-13.2 \pm 3.6 *
CN03	-1.0 \pm 9.4	-8.8 \pm 8.7 *
CN04	-6.1 \pm 6.5	-3.1 \pm 6.3
CN05	-12.2 \pm 5.1 *	-4.8 \pm 3.1 *
CN06	-11.7 \pm 4.6 *	-7.0 \pm 2.6 *
CN07	-15.5 \pm 5.7 *	-2.8 \pm 4.7
CN08	-17.4 \pm 8.7 *	-4.2 \pm 8.3

*: p<0.05

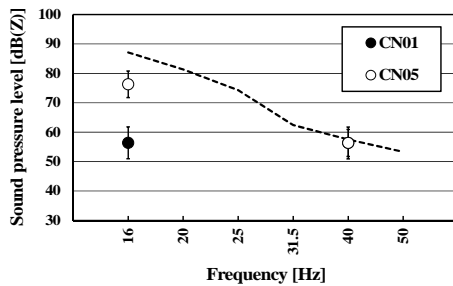


図 3 複合テスト音 CN01、CN05 についての聴覚閾値

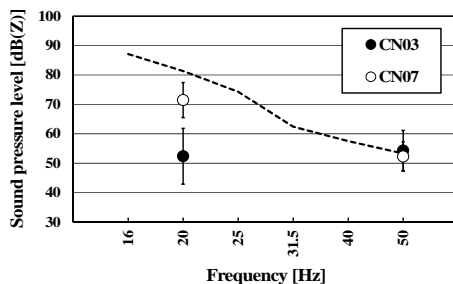


図 4 複合テスト音 CN03、CN07 についての聴覚閾値

(3) 「頭部の振動感覚」閾値と比較するために、複合テスト音による聴覚閾値の測定結果(平均 \pm SD)の例を図 3、図 4 に示す(学会発表)の、)。これは、「頭部の振動感覚」の場合と同じ 6 人の被験者(男性が 2 人、女性が 4 人)によって得たものである。図 3 が

複合テスト音 CN01、CN05 についての結果、図 4 が複合テスト音 CN03、CN07 についての結果を示す。黒丸、白丸の意味は図 1、図 2 と同じで、図中の点線は、同じ被験者の純音テスト音(16~50 Hz)に対する聴覚閾値(平均)を示す。

聴覚の場合には、複合テスト音中の 2 成分のレベル差に拘わらず、周波数の高い成分の音圧レベルが純音テスト音での閾値にほぼ一致する場合に、複合テスト音の閾値と判断されていた。これは、図示していないケース(CN02、CN04、CN06、CN08)でも同様であった。複合テスト音に対する聴覚閾値の判断には、周波数の高い成分が支配的に寄与していると考えられた。これに対して、前述の「頭部の振動感覚」の場合には、このような 2 成分の影響の差は見られず、2 成分がともに「頭部の振動感覚」の知覚に寄与していると考えられた。つまり、「頭部の振動感覚」の知覚メカニズムは、聴覚とは異なるものであることが示唆された。

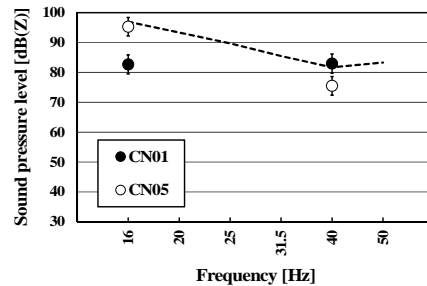


図 5 複合テスト音 CN01、CN05 についての「頭部の振動感覚」の等感度レベル

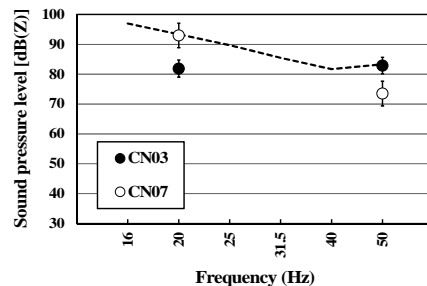


図 6 複合テスト音 CN03、CN07 についての「頭部の振動感覚」の等感度レベル

(4) 複合テスト音による「頭部の振動感覚」の等感度レベルの測定結果(平均 \pm SD)の例を図 5、図 6 に示す(学会発表)の、)。これは、5 人の被験者(男性が 2 人、女性が 3 人)によって得たもので、図 5 が複合テスト音 CN01、CN05 についての結果、図 6 が複合テスト音 CN03、CN07 についての結果である。両図ともに、黒丸が 2 成分の音圧レベルに差が無い場合、白丸が 2 成分の音圧レベルに -15 dB/oct. に相当する差がある場合である。また、両図中の点線は、同じ被験者の純

音テスト音(16~50 Hz)に対する「頭部の振動感覚」の等感度レベル(平均)を示す。50 Hz での等感度レベルは、基準音の 85 dB(Z) に近い値が得られた。

「頭部の振動感覚」閾値の場合ほどはっきりした傾向とは認められなかったが、被験者が「頭部の振動感覚」の等感度レベルと判断した場合の複合テスト音中の 2 成分の音圧レベルは、ともに純音テスト音での「頭部の振動感覚」の等感度レベルと同程度か、または低かった。また、後述の聴覚の場合と異なり、複合テスト音中の 2 成分のレベル差に拘わらず、純音テスト音による「頭部の振動感覚」の等感度レベルに近い方の成分が、等感度レベルの判断により大きく寄与しているようであった。この傾向は、図示していないケース(CN02、CN04、CN06、CN08)でも同様であった。

「頭部の振動感覚」の等感度レベルと判断された複合テスト音中の 2 成分の音圧レベルと、純音テスト音を用いて測定された「頭部の振動感覚」の等感度レベルの差を、表 3 にまとめる。

表 3 「頭部の振動感覚」の等感度レベルと判断された複合テスト音中の 2 成分の音圧レベルと、「頭部の振動感覚」の等感度レベルと判断された純音テスト音の音圧レベルの差

Noise stimulus	Level difference (mean ± SD) [dB(Z)]	
	Key tone	Additional tone
CN01	+2.4 ± 4.1	-14.3 ± 5.5 *
CN02	+0.9 ± 3.8	-7.9 ± 3.8 *
CN03	+0.3 ± 3.1	-11.5 ± 6.1 *
CN04	-1.1 ± 3.2	-4.5 ± 3.4
CN05	-5.1 ± 4.7	-1.7 ± 3.4
CN06	-4.5 ± 5.1	-3.4 ± 2.1
CN07	-9.0 ± 4.1 *	-0.4 ± 0.7
CN08	-7.8 ± 3.2 *	-1.1 ± 2.7

*: p<0.05

2 成分のレベル差が無い場合には、付加成分に統計的に有意な差が認められるという傾向がはっきりしていたが(p<0.05, Wilcoxon の符号付順位和検定)、2 成分にレベル差がある場合には、キー成分の差と付加成分の差が同程度になる傾向があった。閾値の場合と若干傾向が異なるが、2 成分の一方が支配的になるのではなく、2 成分がともに「頭部の振動感覚」の知覚に寄与していることを示すという点では、閾値の場合と一致する結果であった。つまり、閾値よりもやや高い音圧レベルでも、複合低周波音による「頭部の振動感覚」は、閾値付近で同様のメカニズムで知覚されていることが示唆された。

複合テスト音中の 2 成分の周波数の差による「頭部の振動感覚」の知覚への影響は、閾値の場合と同様、はっきりしなかった。16~50 Hz においては、「頭部の振動感覚」の知覚に

おける周波数の弁別は不明瞭と考えられた。(5) 「頭部の振動感覚」の等感度レベルと比較するために、複合テスト音による聴覚の等感度レベルの測定結果(平均±SD)の例を図 7、図 8 に示す([学会発表]の、)。これは、「頭部の振動感覚」の場合と同じ 5 人の被験者(男性が 2 人、女性が 3 人)によって得たものである。図 7 が複合テスト音 CN01、CN05 についての結果、図 8 が複合テスト音 CN03、CN07 についての結果を示す。黒丸、白丸の意味は図 5、図 6 と同じで、図中の点線は、同じ被験者の純音テスト音(16~50 Hz)に対する聴覚の等感度レベル(平均)を示す。ただし、聴覚の場合の基準音は 50 Hz、70 dB(Z)の純音を使用している。

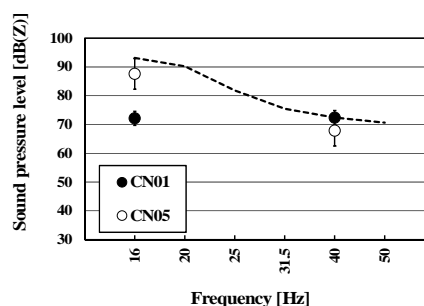


図 7 複合テスト音 CN01、CN05 についての聴覚の等感度レベル

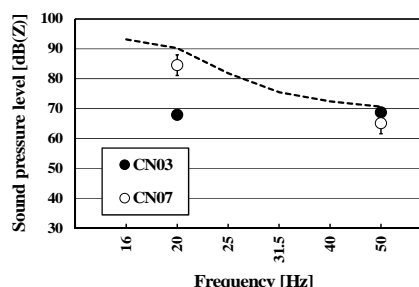


図 8 複合テスト音 CN03、CN07 についての聴覚の等感度レベル

50 Hz での等感度レベルは、基準音の 70 dB(Z) に近い値が得られた。

図 7、図 8 とともに、閾値の場合と同様に、複合テスト音中の 2 成分のレベル差に拘わらず、周波数の高い成分の音圧レベルが純音テスト音での等感度レベルにほぼ一致する場合には、複合テスト音の等感度レベルと判断されていた。これは、図示していないケース(CN02、CN04、CN06、CN08)でも同様であった。つまり、聴覚に関しては、等感度レベルについても閾値と同様に、周波数の高い成分が支配的に寄与していることを示唆する結果となり、「頭部の振動感覚」が聴覚とは異なるメカニズムで知覚されているという、閾値の結果に基づく推測が支持された。

(6) 研究代表者による先行研究では、「頭部の振動感覚」の知覚に聴覚機能が関与して

いる可能性が示唆されていた(Takahashi, 前掲(2013))。それに対して本研究の結果は、「頭部の振動感覚」の知覚メカニズムが聴覚のそれとは異なることを示唆するものであった。これらを合わせると、「頭部の振動感覚」の知覚には聴覚器官が関与している可能性があるが、それは、聴覚による「音」の知覚を「頭部の振動感覚」と誤認識しているのではなく、「音」の知覚メカニズム(音波が鼓膜の振動を誘発し、さらに蝸牛基底膜に伝わった振動が有毛細胞によって検出され、聴覚神経パルスが発生するという一連のメカニズム)とは異なる知覚メカニズムに依って「頭部の振動感覚」が知覚されていると考えられる。低周波音による振動感覚の知覚メカニズムに関連する興味深い結果と考えられる。

また、16~50 Hz の範囲では、各周波数成分の「頭部の振動感覚」を知覚させる性質に明確な差が認められなかった。「頭部の振動感覚」に関する「臨界帯域」のようなものを想定すれば、この周波数範囲では単一の「臨界帯域」になっている可能性があるかと推測できる。このことから、複数の周波数成分(個々の成分の音圧レベルが「頭部の振動感覚」閾値に近いことは必要かもしれない)を含む複合低周波音では、振動感覚がより知覚されやすくなる可能性がある。したがって、振動感覚の閾値に近い音圧レベルの周波数成分を複数含む複合低周波音による心理的影響を評価する場合には、「音」の効果だけでなく、振動感覚の効果も考慮することが必要と考えられる。

(7) 当初、本研究では、振動感覚の知覚メカニズムと「音」の知覚メカニズムの関連についても検討したいと考えていたが、研究代表者の所属機関内での異動などの影響もあって、残念ながら、予定の研究期間内には十分な成果が得られなかった。今後、63、80 Hz のデータも含めた取得済みのデータの追加解析、追加の実験実施などと併せて、それらについても検討したい。

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 0 件)

[学会発表](計 5 件)

高橋幸雄, 複合低周波音による振動感覚の知覚について, 第 87 回日本産業衛生学会 (2014 年 05 月 21-24 日, 岡山)

Yukio Takahashi, Measurement of the equal-sensation levels for the perception of vibration in the head of subjects exposed to complex low-frequency tones, 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2013) (2013 年 09 月 15-18 日,

インスブルック (オーストリア))

高橋幸雄, 複合低周波音による「頭部の振動感覚」の等感度レベルについて, 日本騒音制御工学会平成 25(2013)年秋季研究発表会 (2013 年 09 月 05-06 日, 熊本)

高橋幸雄, 複合低周波音による「頭部の振動感覚」の閾値について, 日本騒音制御工学会平成 24(2012)年秋季研究発表会 (2012 年 09 月 05-06 日, 東京)

Yukio Takahashi, A pilot study on the threshold levels for the perception of vibration in the head of subjects exposed to complex low-frequency tones, 41th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2012) (2012 年 08 月 19-22 日, ニューヨーク (アメリカ))

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 幸雄 (TAKAHASHI Yukio)

独立行政法人労働安全衛生総合研究所・人間工学・リスク管理研究グループ・上席研究員

研究者番号: 40312300