

超低周波音及び低周波音に関する 感覚反応実験について (第2報)

宮本俊二 末岡伸一

1 はじめに

最近、超低周波音及び低周波音による圧迫感、不快感、耳鳴り及び目まいなどの心理的・生理的影響を訴える事例が目立つようになってきている。このため、これらの音による人間への影響の解明を目的として、超低周波音及び低周波音の発生装置を開発し、感覚反応に関する実験を計画している。この第一段階として、感覚反応に関する閾値の実験を実施し、前報¹⁾においてこの概要と結果について報告した。この実験の発展として、この研究では、音のレベルによって感覚反応がどのように変化するかについての実験を実施したので、この概要と結果について報告する。

2 実験の概要

超低周波音及び低周波音による人間への影響については、これらの音と人間の知覚の対応が基本的な課題となることから、音に対する知覚の一つの形態である hearing (音の聞こえ) を対象として、とくに hearing threshold に関する研究が数多くおこなわれている。図1に、これらの研究結果の一部を例示した。研究者によって、hearing threshold には若干の違いがみられるが、その周波数特性はほぼ類似の傾向を示しており、周波数が低くなるに従って $-10 \sim -12 \text{ dB/oct.}$ の割合で聞こえが悪くなることを示している。

一方において、超低周波音及び低周波音に関しては、圧迫感がある、音を感じる及び耳鳴りがするなどの影響を訴える事例が比較的によく、また、前報において報告したように、筆者らも各種の発生源に関する実測調査²⁾において同様な体験をしたところである。これらのことから、これらの影響を実験的に検討するにあたっては、hearing に関する反応を対象とするよりは feeling (音を感じる) に関する反応を対象とするほ

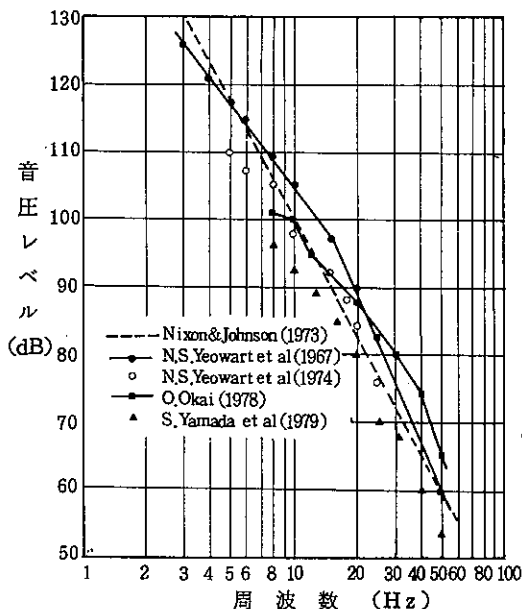


図1 hearing threshold

うがより直接的であり、かつ適切であると考えられた。

これを考慮して、本研究では、超低周波音及び低周波音のレベルによって feeling に関する反応がどのように変化するかを検討することとした。その第一段階として、超低周波音及び低周波音の発生装置を開発し、この装置を用いて feeling threshold に関する実験を上昇系列法および下降系列法により実施し、図2および表1に示す結果を得た。その詳細は、前報¹⁾に報告したとおりであるが

(1) feeling threshold は、個人差が大きい、周波数が低くなるに従ってレベルが高くなる傾向である。

(2) 8 Hzと100 Hzでは18 dBの感度差がみられ、低

周波域に比し、超低周波域では反応のあらわれが鈍い。
 (3) 主として、超低周波域では体に、低周波域では耳にそれぞれ反応があらわれ始める傾向である。

などが判明し、さらに破線で示すNixon & Johnsonらが発表したhearing threshold³⁾と対比することによって、超低周波域では、音が聞こえなくとも音を感じることがあり得ることが裏付けられた。

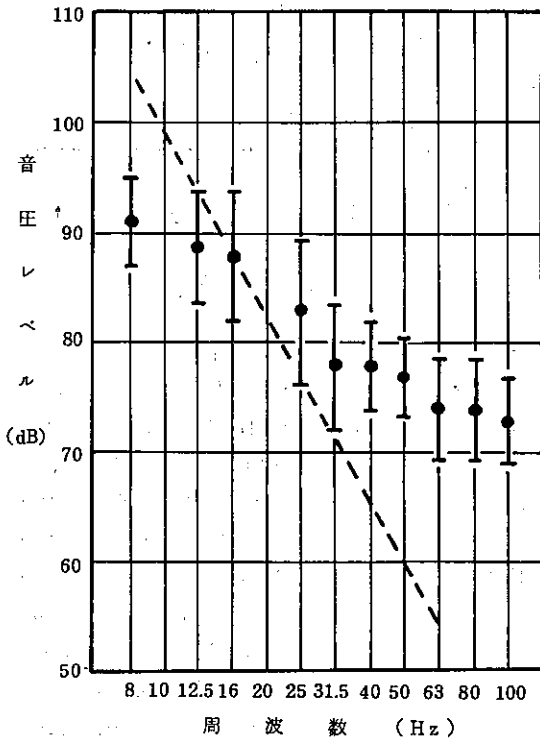


図 2 感覚閾値

表 1 反応別回答数

反応の内容		周波数 (Hz)									
		8	12.5	16	25	31.5	40	50	63	80	100
体に感じる	耳の圧迫感	0	2	3	3	6	5	6	6	7	7
	気になる	1	1	0	0	0	2	2	2	1	1
	全体	4	1	2	3	2	0	0	0	0	0
	ムネ	3	4	3	2	1	1	0	0	0	0
体	ウデ	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	ノド	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

この研究では、上記の音を感じ始めるおよび感じなくなるいわゆるfeeling thresholdに関する研究の発展として、超低周波音と低周波音のレベルとfeelingに関する反応の程度の対応についての検討をすることにした。

この種の実験では、ある周波数を基準とし、基準周波数のあるレベルの大きさと同等の大きさまたは等感と判断する他の周波数のレベルをつぎつぎに求めゆくいわゆる主観的等価値を求める方法で実施されている。この方法によるものとしては、ISO R226の可聴域の音に関する等ラウドネス曲線⁴⁾及び三輪らの振動の等感曲線⁵⁾がある。

超低周波音及び低周波音については、表1及び後述する表4に示すように、負荷する音の周波数とレベルによって、あらわれる反応の部位及び内容が著しく異ってくるために、同等の大きさまたは等感の判断をすることにかなりの難しさがあると考えられ、また、このことは予備実験においても認められた。さらに、レベルと反応の程度を関係づけるためには、反応の程度を具体的な量または形態で表示することが必要となるが、上記の方法では、これが困難である。

これらのことを考慮して、この研究では、実験は周波数別に実施することとし、反応の程度は“感じない”“わずかに感じる”“よく(はっきり)感じる”“強く感じる”“非常に強く感じる”の5段階のカテゴリーで表示することとした。実験では、種々のレベルを負荷し、負荷ごとの反応の程度を5段階のカテゴリーで判断させ、この結果から、各カテゴリーに対応する音圧レベルを周波数別に求めて、レベルと反応の程度の関係についての検討をおこなった。

3 実験装置

発生装置には、前報¹⁾において詳述した装置を用いたが、ここに改めて、その構成、構造及び主要性能を要約して紹介すると、次のようになる。

発生装置は、強制空冷式電動形加振機の駆動軸に振動板を直結し、振動板を強制加振することによって音を発生させる方式の装置であるが、構成及び構造に関して次のような特徴がある。

(1) 超低周波域の出力音圧レベルを大きくするために、ロングストローク形(ストローク100mm P-P)とした。

(2) 出力波形を良好とするために、駆動軸の支持機構は圧縮空気 (3~4 kg/cm²) により支持するエアベアリング方式とした。

(3) 駆動軸の中立保持は、ロングストローク形であること及び出力波形の面から機械的方法によらず、軸内に中立位置検出用差動トランスを封入し、その位置ずれ出力を駆動入力にフィードバックして保持する電気的方法によることとした。

(4) 振動板は、軽量であるわりに高い曲げ剛性を期待できるカーボン繊維板+制振層+アルミニカムのサンドウィッチ構造の円板 (径1,000mm, 厚さ24mm) とした。

(5) 強制空冷による騒音を低減するために、加振機は密閉構造とし、ダクトにより吸排気した。

図3に発生装置の構成及び構造の概形を、図4に振動板の構造をそれぞれ示した。図5に、発生装置の最大出力音圧レベルと歪率を示したが、測定位置は振動板中心軸上60cmである。ここでいう最大出力音圧レベルとは、歪率が6%以下もしくは振動板がびびるな

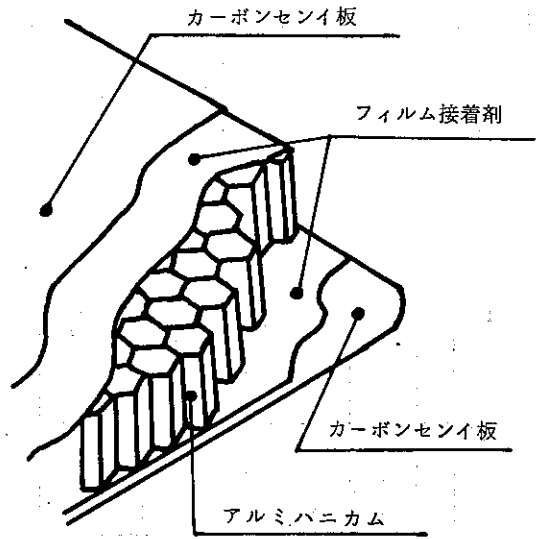


図4 振動板の構造

どの異常状態を示さない限界の音圧レベルである。最大出力音圧レベルは、8~25 Hzでは105~107dB, 31.5~100 Hzでは112~118dBである。歪率は、歪率計の関係から20 Hz以上について測定したが、最大出力音圧レベルでは20 Hzと25 Hzが約6%, 40 Hz以上では3%以下であり、音圧レベル100 dBでは20 Hz以上で3.5%以下となっている。また、16 Hz以下の周波数では、シンクロスコープによる波形観測により、20 Hz及び25 Hzとほぼ同等もしくはこれらより良好であることを確認した。図6及び図7に、振動板中心軸上60 cmの位置を中心とする鉛直方向及び水平方向におけるレベル分布を示したが、鉛直方向及び水平方向のいずれの場合も大半の周波数でレベル差は平均に対して±1 dBの範囲に入っている。なお、装置から発生する騒音は33dB(A)であり、主として強冷空冷に起因する騒音である。

以上の結果から、公害で問題となるレベル範囲を対象とする限りでは、本装置の出力レベルは十分であり、レベル分布は坐位での感覚反応実験に関して実用に供し得るものであり、さらに開放空間での実験が可能となるメリットもあると考えている。

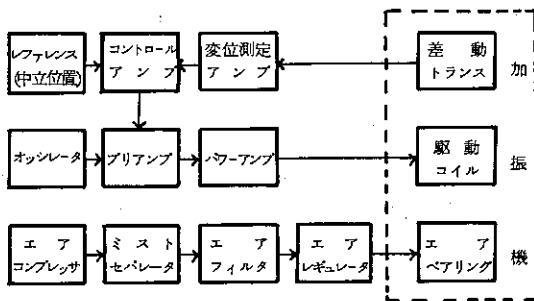
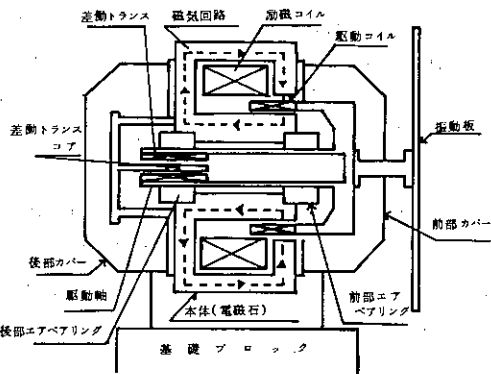


図3 発生装置の構成と構造

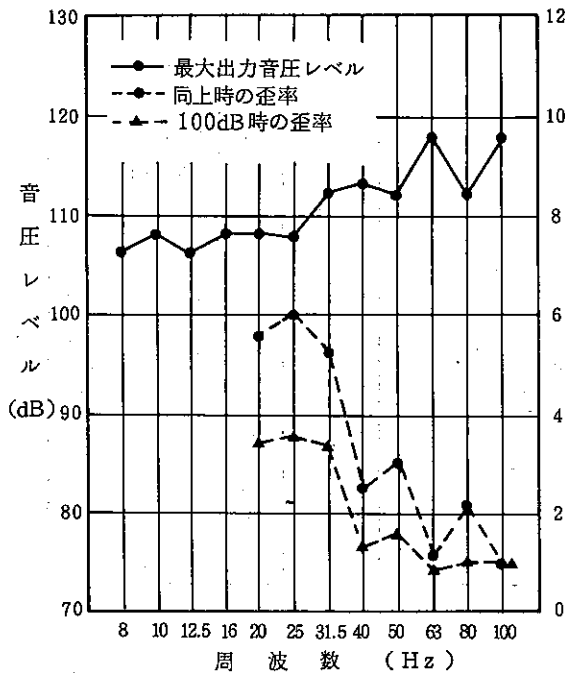


図5 最大出力音圧レベルと歪率

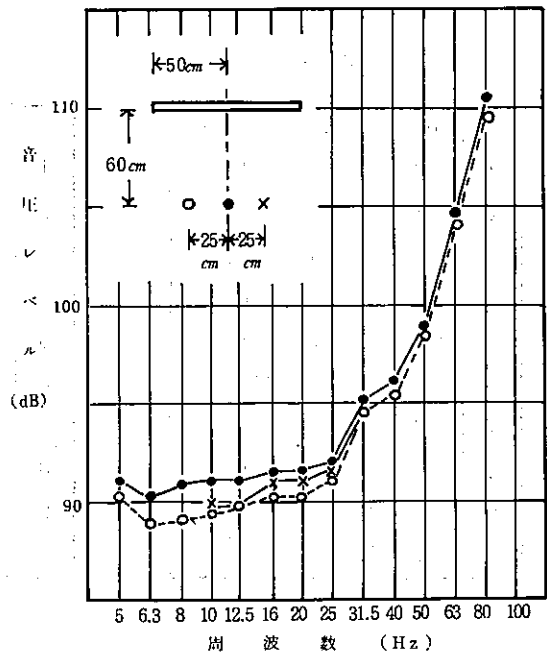


図7 水平方向の音圧レベルの分布

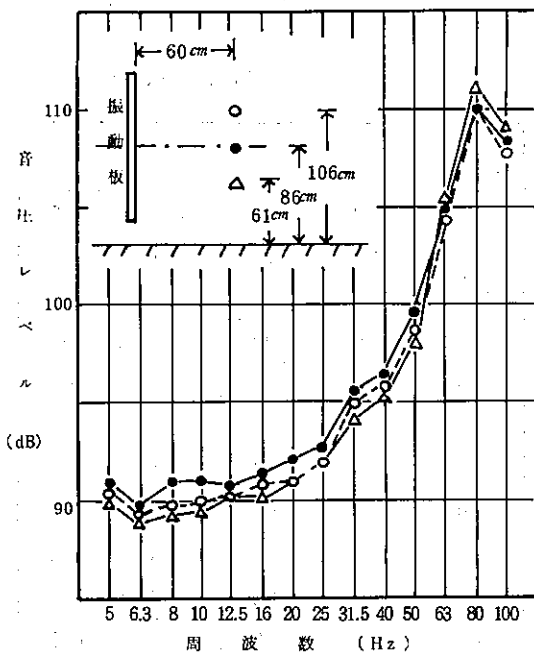


図6 鉛直方向の音圧レベルの分布

4 実験方法

実験は、被検者をワイシャツ等の軽衣の状態で、畳上、振動板から60cmの位置に胡坐させ、次のような方法で実施した。被検者は21~24才の男子10名で、実験した周波数は8~100Hzの1/3オクターブバンド中心周波数である。負荷する音のレベル範囲は、図5に示した発生装置の最大出力音圧レベル及び図2の感覚閾値を考慮して、8~20Hzは80~105dB、31.5Hz~100Hzは70~110dBとした。これらのレベル範囲の1dBステップの音をアットランダムな順序で、10秒負荷20秒休止の周期で負荷し、被検者には、負荷ごとにあらわれる反応の程度を“感じない”“僅かに感じる”“よく感じる”“強く感じる”“非常に強く感じる”の5段階のカテゴリーで判断させるとともに、実験終了後に、あらわれた反応の内容をカテゴリー別に記録させた。

負荷した音のレベルの発生順序は、JIS Z 9031 ランダム抜取方法の付表の乱数表により決定したが、これを表2に示した。また、音をステップ状に発生すると、とくにレベルが高い場合には、びっくりする及

表 2 発 生 順 序

(a) 31.4~100 Hz

	0	10	20	30	40
1	80	84	79	93	70
2	78	92	89	103	
3	99	75	85	87	
4	110	94	83	91	
5	107	100	77	98	
6	73	109	86	102	
7	82	95	106	105	
8	71	104	90	74	
9	88	101	72	81	
10	97	76	96	108	

(b) 25 Hz

	0	10	20	30
1	80	100	86	81
2	78	95	90	
3	99	104	96	
4	82	101	93	
5	88	76	103	
6	97	79	87	
7	84	89	91	
8	92	85	98	
9	75	83	102	
10	94	77	105	

(c) 8~20 Hz

	0	10	20
1	80	104	87
2	99	101	91
3	82	89	98
4	88	85	102
5	97	83	105
6	84	86	81
7	92	90	
8	94	96	
9	100	93	
10	95	103	

びはっとするなどの心理的影響を被検者に与え易く、さらに振動板に寄生振動を誘起するおそれがあるなどの影響を考慮して、負荷する音には約2秒の立上り及び立下り特性をもたせることとした。

実験において、これらの負荷条件を満足するように音を発生することは、かなりの困難さ及び煩しさを伴うことから、次のような方法をとった。正弦波発振器と連続可変形対数減衰器を用いて、約2秒の立上り及び立下り時間をもつ正弦波信号を手動で作成し、次にディケード形減衰器により上記のレベル範囲及び発生順序の1dBステップの正弦波信号とし、これを順次に磁気テープに録音しておき、実験時に再生信号を発生装置に導入して、自動的に所要のレベルの音を順次に発生させることとした。また、負荷についての予告も併せて録音し、スピーカから流すようにした。

実験にあたっては、事前に10, 20, 40, 80 Hzの周波数について種々のレベルの音を負荷し、被検者にレベルに対応してあらわれる反応の内容及び程度を習熟させるための訓練を実施した。

5 実験結果

表3及び図8に実験結果を示した。この結果は、次のような方法で整理して得たものである。負荷ごとの被検者の回答をレベル及びカテゴリ別に集計し、集

計結果において、被検者の6割以上がそのカテゴリと判断している最小の音圧レベルをそのカテゴリを代表する音圧レベルとした。回答が3つのカテゴリに跨っていてかつ被検者の5割がそのカテゴリと判断している音圧レベルが最小の音圧レベルとなって

表 3 反応の程度と音圧レベルの関係

カテゴリ 周波数 (Hz)	わずかに 感じる	よ く 感 じ る	強 く 感 じ る	非常に強 く感じる
8	92	98	101	105
10	92	98	101	105
12.5	90	98	101	105
16	90	98	101	105
20	88	94	100	105
25	87	96	101	105
31.5	84	94	101	107
40	83	94	102	107
50	81	90	98	105
63	79	89	98	105
80	79	89	98	105
100	78	87	98	102

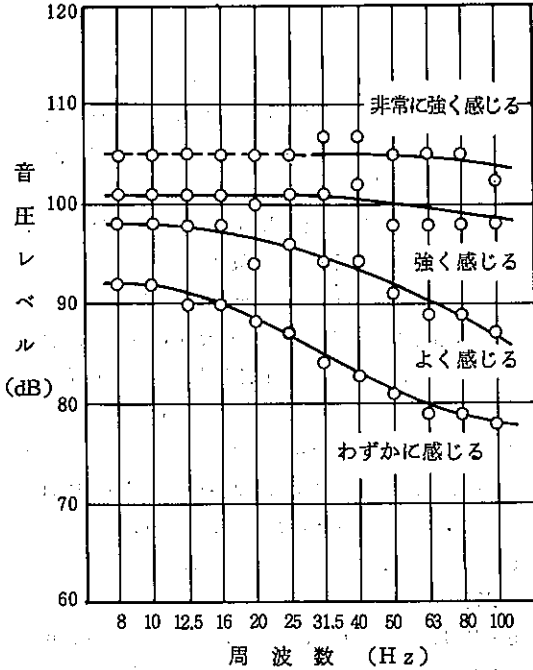


図8 反応の程度と音圧レベルの関係

いる場合は、その音圧レベルをそのカテゴリーを代表する音圧レベルとした。この事例は、総数48例に対して8 Hzの101dB、10 Hzの92 dBと98 dB、20 Hzの100 dB、63 Hzの98 dBの5例であった。また、カテゴリーを代表する音圧レベルより高い音圧レベルであるにも拘らず、そのカテゴリーよりも下位のカテゴリーに対応した事例は10 Hz 99 dBの1例のみであった。図8において、“非常に強く感じる”の曲線を25 Hz以下で点線としたのは、カテゴリーを代表した105 dB以上の音圧レベルの音を負荷していないことによる。

表3及び図8の実験結果から、音圧レベルと反応の程度との対応を調べると、次のようになる。“非常に強く感じる”は、音圧レベルが105~107dBであり、周波数に依らず、音圧レベルによって決っているが、25 Hz以下については負荷する最大音圧レベルの関係から、再検討する必要があると考えている。“強く感じる”は、31.5 Hz以下と50 Hz以上では若干の違いがみられるが、音圧レベルは100 dB前後とみなせることから、周波数に依らず、音圧レベルによって決まるとしてよいものと考えられる。“よく感じる”“僅かに感じる”には、上位の2つのカテゴリーと異り、周波数に依存する傾向がみられる。“よく感じる”は、8~16 Hzでは周波数に依らず音圧レベルで決まっているのに対して、20~100 Hzでは周波数に依存する傾向がみられ、16 Hzと100 Hzとでは11dBの感度差があり、8~16 Hzでの反応のあらわれが鈍いことを示している。“僅かに感じる”は、8~16 Hzが90~92 dBで周波数に依らずほぼ音圧レベルで決まっているとしてもよいが、全体としては周波数に依存する傾向がみられ、8 Hzと100 Hzでは14 dBの感度差があり、周波数が低くなるに従って反応のあらわれが鈍くなることを示している。

また、総体的にみると、8~16 Hzでは、50~100 Hzに比し、反応のあらわれは鈍いが、反応があらわれてからのレベルの上昇による反応の変化が大きいことを示している。

表4に、カテゴリー別の反応内容を示した。表4は、被検者が記録した結果から、半数以上が記録した反応内容を抽出してまとめたものである。表から、最初に反応があらわれる部位は、主として、超低周波域では胸などの体であり、低周波域では耳であることになる

表4 カテゴリー別の反応内容

カテゴリー \ 周波数 (Hz)	10	16	25	40	63	100
わずかに感じる	胸などに振動	胸などに振動	上半身に振動	耳に圧迫感	耳に振動, 圧迫感	耳に振動, 圧迫感
よく感じる	胸, 上半身に振動 又はゆすられる	胸, 上半身に振動 又はゆすられる	頭, 上半身に振動	耳に圧迫感, 上半身に振動	耳に圧迫感	耳に圧迫感
強く感じる	頭, 上半身に振動 又はゆすられる	頭, 上半身に振動 又はゆすられる	頭, 上半身に振動 又はびりつく	耳に圧迫感, 上半身に振動, 圧迫感	耳に圧迫感, 上半身に振動	耳なり, 圧迫感, 上半身に振動
非常に強く感じる	頭, 上半身に振動 又はゆすられる	頭, 上半身に振動 又はゆすられる	頭, 上半身に振動 又はびりつく	耳に圧迫感, 上半身に振動, 圧迫感	耳に圧迫感, 頭, 上半身に振動, 圧迫感	耳なり, 圧迫感, 頭, 上半身に振動, 圧迫感

が、これは前報に報告した feeling threshold の実験結果と一致している。そして、負荷するレベルが上昇するに従って、超低周波域では胸→上半身→頭、低周波域では耳→上半身→頭のように、反応する部位が拡ってゆくことがわかる。表において、10Hz及び16Hzの反応内容にゆすられるとあるが、これは必ずしもゆすられているわけではないが、ゆすられている感じがするという意味である。また、被検者のなかには、“強く感じる”及び“非常に強く感じる”の場合、とくに後者の場合に、63~100 Hzでは気分が悪くなるようなまたは耐えられないというような感じの不快感を伴うが、8~20 Hzではこのような不快感はあまりあらわれなかったと述べるものが多かった。

6 おわりに

本実験によって、超低周波音及び低周波音による感覚反応がレベルによってどのように変化するかについて、多くのことが判明し、前に実施した感覚閾値の結果と併せて、これらの音による影響を解明するための貴重な基礎資料が得られた。今後には、さらに被検者を増し、閾値実験も併せて実施し、データの充実を図るとともに、得られた結果をもとにして、実測調査等で得られた測定結果の解析を試み、超低周波音及び低周波音の評価方法の研究を進めることが必要であると

考えられる。

参 考 文 献

- 1) 宮本俊二ほか：超低周波音及び低周波音に関する感覚反応実験結果について（第1報），東京都公害研究所年報（1980）。
- 2) 宮本俊二ほか：超低周波音の実測調査について，東京都公害研究所年報（1980）。
- 3) C.W. Nixon, D.L. Johnson: *Infra Sound and Hearing, Proceedings of the International Congress on Noise as a Public Health Problem 1973*, Dubronik.
- 4) ISO R226 Normal Equal-Loudness Contour for Pure Tone and Normal Threshold of Hearing under Free Field Listening Condition.
- 5) 三輪俊輔：振動の評価方法，日本音響学会誌，27；（1971）。
- 6) W. Tempest: *Infrasound and Low Frequency Vibration*, Academic Press, (1976).
- 7) N. Bronen: *The Effect of Low Frequency Noise on People*, *J. of Sound and Vibration*, Vol 4, (1978).
- 8) L.S. Whittle, D.W. Robinson: *The Audibility of Low Frequency Sound*, *J. of Sound Vibration*, Vol 4, (1972).