

# 超低周波音および低周波音に関する 感覚反応実験について — 第3報 —

宮本 俊二 青木 一郎

## 1 はじめに

最近、超低周波音および低周波音による圧迫感、不快感、耳鳴りおよび目まいなどの感覚的および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、これらの影響を解明する研究の一環として、まず超低周波音・低周波音の発生装置を開発し、感覚反応の閾値の実験、さらに、この実験の発展として、レベルと反応の程度の対応に関する実験を実施してきた。これらの実験の概要と結果については、それぞれ第1報<sup>1)</sup>と第2報<sup>2)</sup>において報告したとおりである。

この研究では、感覚反応の閾値およびレベルと反応の程度の対応について、実験規模の拡大を目的として、追加実験を実施し、第1報<sup>1)</sup>および第2報<sup>2)</sup>の結果を含めて総合的な検討を行った。この報告では、この検討の概要と結果について述べる。

## 2 実験の概要

超低周波音および低周波音については、圧迫感がある、音を感じるおよび耳鳴りがあるなど感覚的影響を訴える事例が比較的によく、筆者らも各種の発生源に関する実測調査<sup>3)</sup>において同様な体験をしたところである。また、感覚反応実験の事前検討として、発生装置を用い、100dBまたは100dB以上のような高い音圧レベルの状態であられるすべての反応、音圧レベルを下げゆく過程で消えるおよび残っている反応、最後まで残っている反応、さらに高くしてゆく過程であられる反応のように、各段階における反応について調べた結果、次のようなことが判明した。負荷する音の周波数と音圧レベルによって、反応の内容、程度およびあられる部位は異なってくるが、総括的には、あられる反応は振動感、圧迫感およびこれに類する反応としてよく、超低周波域では振動感が、低周波域では圧迫感がそれぞれ卓越する傾向であった。そ

して、これらの反応が解明すべき感覚的影響に直接的に対応する反応であると考えられた。これらのことを考慮して、本研究では、振動感、圧迫感およびこれに類する反応を“音を感じる” feeling に関する反応という言葉で表現することとし、周波数および音圧レベルによって feeling に関する反応がどのように変化するかについて、実験的に検討することとした。この第1段階として、feeling threshold に関する実験を上昇系列および下降系列法により実施し、この結果は第1報<sup>1)</sup>で報告した。さらに、この実験の発展として、feeling に関する反応の程度が音圧レベルとどのように対応するかについての検討を行った。種々の音圧レベルの音を負荷し、負荷ごとにあられる反応の程度を“非常に強く感じる”“強く感じる”“よく感じる”“わずかに感じる”“感じない”の5段階のカテゴリーで判断させることにより、各カテゴリーに対応する音圧レベルを求めたが、この結果は第2報<sup>2)</sup>に報告したとおりである。この研究では、実験規模を拡大して結果の一般性を高めるために、上記の2種類の実験の追加実験を同様な実験方法により実施し、第1報<sup>1)</sup>および第2報<sup>2)</sup>のそれぞれで報告した結果とこの実験の結果を総合し、feeling threshold および feeling に関する反応の程度と音圧レベルの対応についての検討を行うことにした。

## 3 発生装置

発生装置には、第1報<sup>1)</sup>に詳述した装置を用いたが、その後の改良も含め、ここに改めて、その構成、構造およ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、強制空冷式動電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、その構

造の概要および構成は写真，図1のとおりである。発生装置として，とくに考慮した事項は，(1) 超低周波域の出力音圧レベルをなるべく大きくするために，ロングストローク形（ストローク長100mm P-P）とする。(2) 出力波形を良好とするために，駆動軸の支持機構を無接触となる圧縮空気（3～4 kg/m<sup>3</sup>）によるエアベアリング方式とし，さらに，駆動軸の中立保持は，機械的方法によらず，軸内に中立位置検出用差動は，機械的方法によらず，軸内に中立位置検出用差動

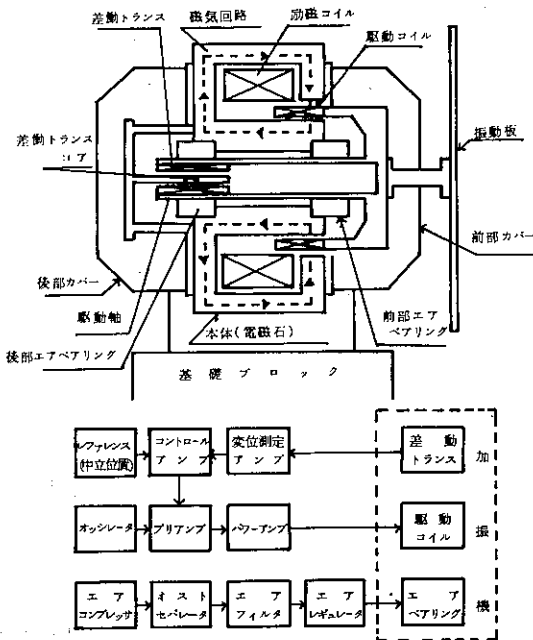
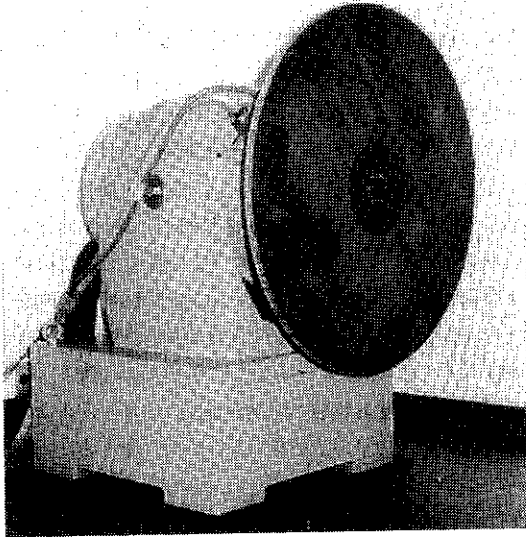


図1 発生装置の構成と構造

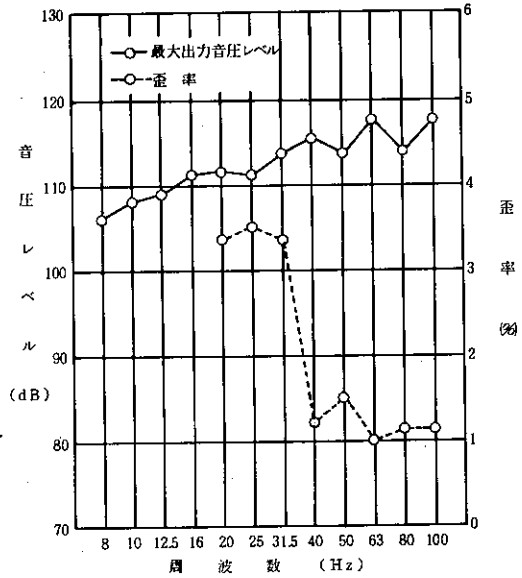


図2 最大出力音圧レベルと歪率

トランスを封入して，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にする。(3) 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で表面被覆したアルミニウム板（厚さ0.3mm）+制振層+アルミハニカムのサンドウィッチ構造の円板（直径1,000mm，厚さ40mm）とする。(4) 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，一部を吸音材で内貼りしたダクトにより吸排気する。などである。

図2に，発生装置の最大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，8Hzでは105dB，10Hzと12.5Hzでは107dB，16～100Hzでは110dB以上となっており，振動板の構成（表面板をカーボン繊維板→カーボン繊維で表面被覆したアルミニウム板に変更する）と厚さ（24mm→40mmと厚くする）を改良することにより，16～25Hzにおける最大出力音圧レベルを目標とする110dB以上とすることができた。歪率は，音圧レベルが100dBの場合について，歪率の関係から20～100Hzの1/3オクターブバンド中心周波数について測定したが，20～31.5Hz

が3.5%前後であり、40~100 Hzでは1~1.5%となっている。また、16 Hz以下の周波数については、シンクロスコープによる波形観測により、20 Hzおよび25 Hzの場合とほぼ同等もしくはこれら

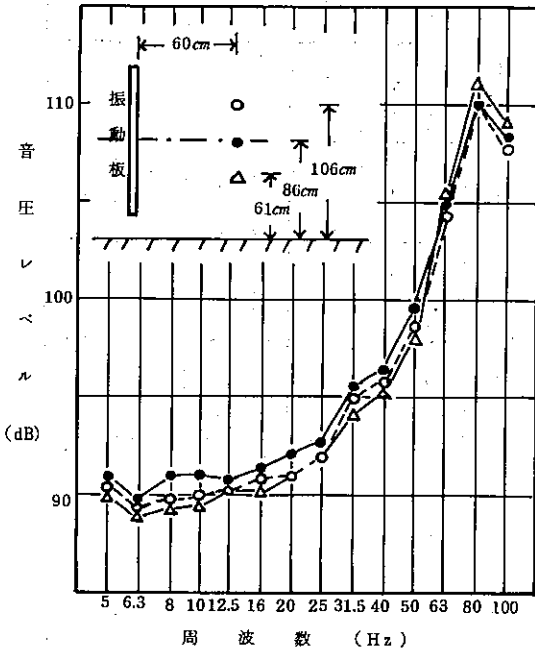


図3 鉛直方向の音圧レベル分布

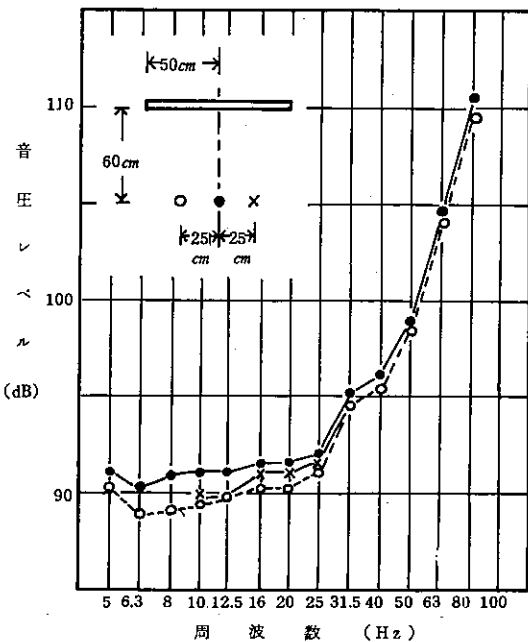


図4 水平方向の音圧レベル分布

より良好であることを確認した。図3および図4に、振動板中心軸上60cmの位置を中心として、鉛直方向および水平方向のレベル分布を示したが、鉛直方向および水平方向のいずれの場合も大半の周波数で平均に対して±1 dBの範囲に入っている。なお、発生装置から発生する付随騒音は、主として強制空冷による騒音であるが、振動板中心軸上60cmにおいて33 dB (A)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があると考えている。

#### 4 feeling threshold

##### (1) 実験方法

実験は、上衣等をぬぎ、ワイシャツ等の軽装の状態では被検者を畳上、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。実験者が、負荷する音のレベルを約1 dB/sの割合で増大(上昇系列)および減小(下降系列)させる過程で、被検者が感じ始めたおよび感じなくなった時に、合図を送らせ、その時の音圧レベルを測定した。実験は、8~100 Hzの範囲の1/3オクターブバンド中心周波数の各周波数について、被検者ごとに、上昇系列および下降系列を一組にして、原則として5回実施したが、被検者は19~22才の男子10名である。また、負荷した音の音圧レベルは、振動板中心部の振動加速度を測定し、予め測定しておいた振動加速度-音圧レベルの関係から求めたが、さらに、被検者の後方に設置したモニタマイクロホンにより、音圧レベルのチェックも行った。実験にあたっては、負荷する音のレベルに対応してあらわれる反応内容をよく認識させ、さらに、閾値の判断を習熟させるために、事前に10 Hz、20 Hz、40 Hz、80 Hzの4つの周波数による訓練を実施した。

##### (2) 実験結果

上昇系列および下降系列のそれぞれから得られた音圧レベルの平均をその実験における閾値とし、実験ごとに得られた閾値の平均をその被検者のその周波数における閾値とした。図5に、被検者10名の閾値の平均と標準偏差を示し、図6には、今回の実験と第1報<sup>1)</sup>

に述べた実験を総合した被検者19名の閾値の平均と標準偏差を示した。以下では図6に示す総合した結果について述べることにする。感覚反応における個人差は一般に指摘されるところであるが、この実験においても図6に示すように、標準偏差は大半の周波数で4~6 dBとなっており、閾値はばらつき、個人差があることを示している。また、被検者別にみると、実験ごとの閾値が3~5 dBの違いを示す事例もあったが、大半は1~2 dB程度の違いであって、被検者の判断の再現性は良いものであった。被検者19名の平均から求めた閾値は、図6に示すように、周波数によって異なるが、8~100 Hzにおいて、93~75 dBの範囲にあり、周波数が高くなるにしたがってレベルが低くなる傾向を示している。この傾向は、周波数によって若干の違いがあり、-3~-7 dB/oct となっているが、概括的には-5 dB/oct の割合になるとしてもよいと考えられる。8 Hz と100 Hzの閾値には18 dBのレベル差があるが、このことは100 Hzのほうが感じやすいことを意味し、また、上記の関係から、周波数が低くなるにしたがって-5 dB/oct の割合で感じ方が鈍くなるのがわかる。

実験において、被検者が感じ始めたおよび感じなく

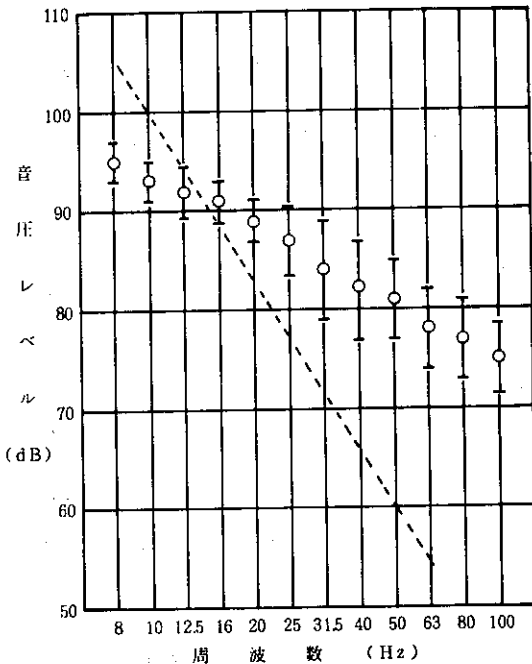


図5. feeling threshold

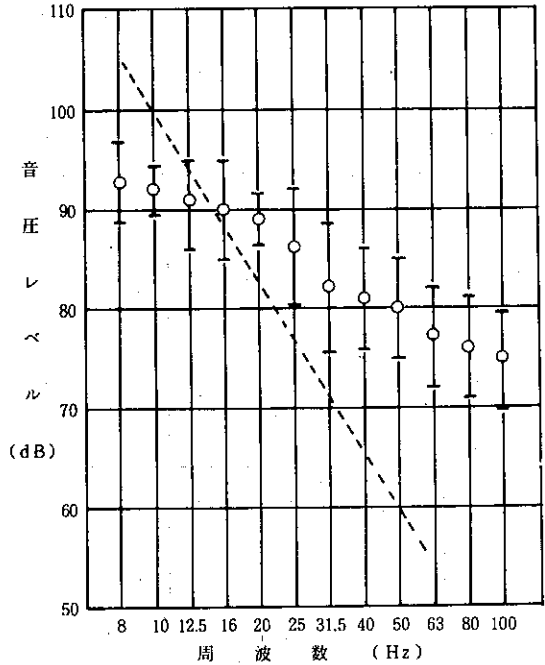


図6 feeling threshold

なったとした反応内容を大別すると、耳の圧迫感、胸、腕などの振動感などとなるが、これを周波数別に示すと、次のようになる。8~25 Hzの範囲では、胸または腕に振動感があらわれるという回答が大半を占めているが、ここでいう振動感とは、胸または腕などが振動しているのを感じるという意味ではなく、振動を感知したという意味である。3.15~100 Hzの範囲では、耳に圧迫感またはこもりを感じるという回答が大半を占めていた。

また、図5および図6には、参考として、Johnson-Nixonらが発表した hearing threshold<sup>4)</sup>を破線で示したが、本実験結果を対比とすると、音が聞えなくとも音を感じる周波数域があることになり、これが約20 Hzであることから、超低周波音の特徴を示すものと考えられる。

### 5 feelingに関する反応の程度と音圧レベルの対応

#### (1) 実験方法

実験は、被検者をワイシャツ等の軽装の状態では、畳上、振動板から60 cmの位置に胡坐させ、次のような方法で実施した。被検者は19~22才の男子10名

で、実験した周波数は8~100 Hzの範囲の1/3オクターブバンド中心周波数の各周波数である。負荷する音のレベル範囲は、図2に示した実験装置の最大出力音圧レベル及び図5の閾値を考慮して、8 Hzは80~105 dB、10 Hzと12.5 Hzは80~107 dB、16 Hzと20 Hzは80~110 dB、25~100 Hzは75~110 dBとした。これらのレベル範囲の1 dB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、実験終了後には、あらわれた反応内容をカテゴリー別に記録させた。

負荷した音のレベル順序は、JISZ9031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1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、びっくりするおよ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などの影響を考慮して、負荷する音には約2秒の立上りおよび立下り特性をもたせるとともに、負荷についての予告も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 Hz、20 Hz、40 Hz、80 Hzの周波数について、種々のレベルの音を負荷し、レベルに対応してあらわれる反応の内容および程度を習熟させるため

の訓練を実施した。

(2) 実験結果

図7に、実験結果を示したが、図に示す各カテゴリーを代表する音圧レベルは、次のような方法で決定した。負荷ごとの被検者の回答をカテゴリーおよび音圧レベル別に集計し、集計結果において、被検者の6割以上がそのカテゴリーと判断する最小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。また、回答が3つのカテゴリーにまたがっていかつ被検者の5割がそのカテゴリーと判断する音圧レベルが最小の音圧レベルとなっている場合には、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。図8には、今回の実験と第2報に述べた実験を総合した被検者20名の実験結果を示したが、以下では、この結果について述べることにする。

“非常に強く感じる”は、代表する音圧レベルが105~108 dBとなっており、このことは、周波数はあまり関与せず、音圧レベルのみが関係することを示している。“強く感じる”は、音圧レベルが98~103 dBとなっており、“非常に強く感じる”と同様に、周波数はあまり関与せず、音圧レベルのみが関与するとしてもよいと考えられる。“よく感じる”と“わずかに感じる”には、上位の2つのカテゴリーと異なり、周波数に依存する傾向があらわれている。“よく感じる”は、8~16 Hzでは音圧レベルが97~98 dBと

表 1 発生順序

(a) 34~100 Hz						(b) 16~25 Hz					(c) 10, 12.5 Hz				(d) 8 Hz			
	0	10	20	30	40		0	10	20	30		0	10	20		0	10	20
1	80	84	79	93	70	1	80	75	85	91	1	80	95	93	1	80	104	87
2	78	92	89	103		2	78	94	83	98	2	99	104	103	2	99	101	91
3	99	75	85	87		3	99	100	77	102	3	107	101	87	3	82	89	98
4	110	94	83	91		4	111	109	86	105	4	82	89	91	4	88	85	102
5	107	100	77	98		5	107	95	106	81	5	88	85	98	5	97	83	105
6	73	109	86	102		6	82	104	90	108	6	97	83	102	6	84	86	81
7	82	95	106	105		7	88	101	96		7	84	86	105	7	92	90	
8	71	104	90	74		8	97	76	93		8	92	106	81	8	94	96	
9	88	101	72	81		9	84	79	103		9	94	90		9	100	93	
10	97	76	96	108		10	92	89	87		10	100	96		10	95	103	

なっており、周波数はほとんど関係せず、音圧レベルのみが関係することを示している。これに対して、20～100 Hzでは、周波数が高くなるにしたがってレベルが低くなっており、周波数に依存する傾向があらわれている。8～16 Hzと50～100 Hzでは、7～12 dBのレベル差があり、50～100 Hzがより低いレベルでよく感じるようになることを示している。“わずかに感じる”は、8～16 Hzでは音圧レベルが90 dBとなっており、周波数は関与せず、音圧レベルのみが関係することを示している。これに対し、20～100 Hzでは、周波数が高くなるにしたがってレベルが低くなっており、周波数に依存する傾向があらわれている。8～16 Hzと50～100 Hzでは、9～12 dBのレベル差があり、50～100 Hzがより低いレベルでわずかに感じるようになることを示している。

カテゴリーを代表する音圧レベルは、上記の方法により決定したが、各カテゴリーにおける音圧レベル別の回答はばらついている。いま、これを標準偏差で示すと、次のようになる。“わずかに感じる”では8～25 Hzは4 dB、31.5～100 Hzは5 dB、“よく感じる”では8～16 Hzは3 dB、20～40 Hz

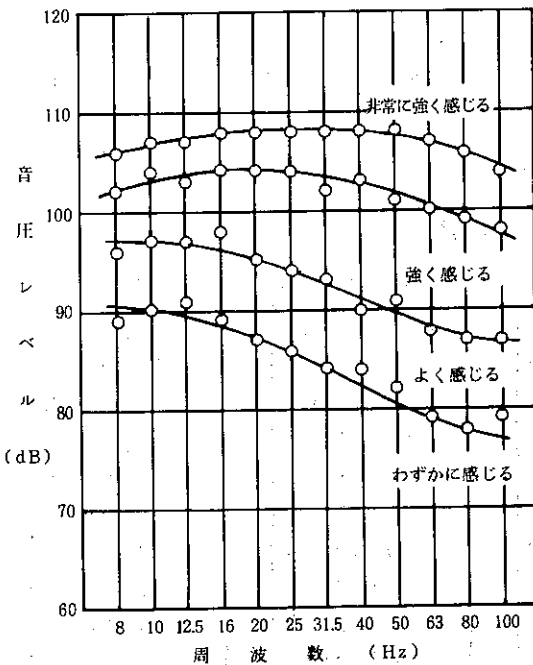


図7 反応の程度と音圧レベルの関係

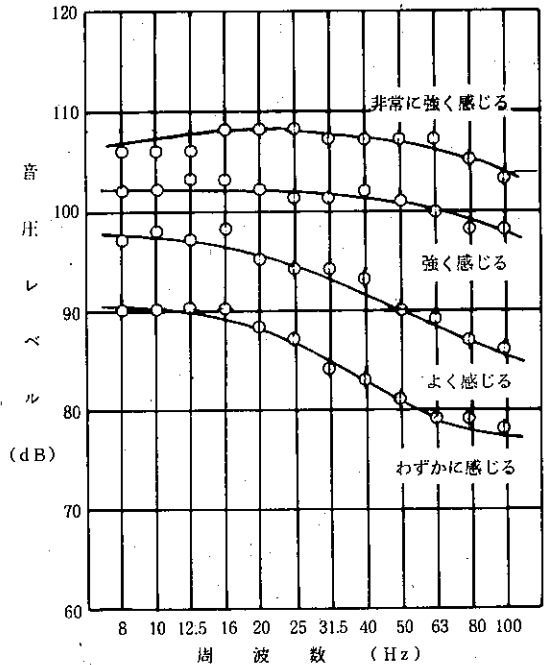


図8 反応の程度と音圧レベルの関係(総合)

は4 dB、50～100 Hzは5 dB、“強く感じる”では8～16 Hzは2 dB、20～40 Hzは3 dB、50～100 Hzは5 dBとなっている。各カテゴリーとも、高い周波数での標準偏差が低い周波数に比し大きくなる傾向にあるが、これは、図8にあらわれているカテゴリー間のレベル差が周波数が高いほど大きくなることに関係すると考えられる。また、図8において、“非常に強く感じる”と“わずかに感じる”のレベル差は、8 Hzで16 dB、20 Hzで20 dB、…、100 Hzでは25 dBのように、周波数が高くなるにしたがって大きくなる傾向を示している。このことは、8 Hz、10 Hzなどの低い周波数では、50～100 Hzなどの高い周波数に比して、反応のあらわれ方は鈍いが、反応があらわれてからのレベル上昇による反応の程度の変化が大きいことを示している。

表2に、カテゴリー別の反応内容を示した。表2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まとめたものである。表の見方は、例えば“強く感じる”の40 Hzの場合では、耳に圧迫感があり、上半身にも圧迫感と振動感があつて、全体的として“強く感じる”のようである。表から、反応があらわれ始

表 2 カテゴリー別反応内容

周波数 (Hz) カテゴリー	10	16	25	40	63	100
わずかに 感じる	腕または胸に 振動	腕又は胸など に振動	腕又は胸など に振動	耳に圧迫感又 は耳にこもる	耳に音がこも る。耳に振動	頭・耳に圧迫 感
よ く 感 じ る	腕・胸などの上 半身に振動又 はゆすられる	腕・胸などの上 半身に振動又 はゆすられる	腕・胸などの 上半身に振動	頭部・耳に圧 迫感、腕など に振動	頭・耳に圧迫 感、腕などに 振動	頭・耳に圧迫 感、腕などに 振動
強 く 感 じ る	頭など上半身 に振動又はゆ すられる	頭など上半身 に振動又はゆ すられる	頭など上半身 に振動又はゆ すられる	頭・耳の圧迫 感、上半身に 振動	頭・耳に圧迫 感、上半身に 振動	頭・耳に圧迫 感、上半身に 振動・圧迫感
非常に強く 感じる	全 上	全 上	全 上	全 上	全 上	全 上

めるのは、超低周波域では胸、腕などであり、低周波域では耳ということになるが、これは、前項で述べた feeling threshold の場合と一致している。そして、負荷する音のレベルが上昇するにしたがって、超低周波域では胸または腕など→上半身→頭、低周波域では耳→上半身→頭のように、反応のあらわれる部位が広がる傾向であることを示しており、また、先行してあらわれた部位における反応の程度は強くなってゆく傾向であることも判明した。

## 6 おわりに

超低周波音および低周波音については、音であるには違いないが、騒音とは異なった影響を与えており、この影響の要因およびメカニズムを解明し、さらに、これをもとにした評価方法の確立が必要とされ、このための調査研究が進められている。筆者からは、1978年から3年間にわたって、発生装置を開発し、超低周波音および低周波音によって誘起される感覚的影響を明らかにすべく、実験的な検討を重ねてきた。この結果として、

- (1) 超低周波音および低周波音は、振動感、圧迫感およびこれに類する反応、いわば feeling に関する反応を誘起し、
- (2) 主として、超低周波域では振動感、低周波域では圧迫感がそれぞれあらわれているが、音のレベルが増

大するにしたがって反応のあらわれる部位が拡大する傾向でもある。

(3) これらの反応があらわれ始めるのは、周波数によって異なるが、8 Hz で 93 dB、100 Hz で 75 dB となるが、周波数が高くなるにしたがって、音圧レベルが低くなる傾向にあり、各種の発生源のスペクトルから判断すると、感覚的には低周波音の方が問題となり易いと考えられる。

(4) 振動感、圧迫感およびこれに類する反応は不快につながる反応であると考えられ、これから、これらの反応があらわれ始めるもしくは僅かに感じるに対応すると判明した音圧レベル以下の状態を確保することが必要であると考えられる。この場合に、個人差を示す標準偏差を併せて考慮することが必要であろう。

などが判明し、これまで不明の点が多かった超低周波音および低周波音による感覚的影響について数多くの知見を得ることができた。

今後においては、各種の発生源を対象として、これからの超低周波音および低周波音の再生音による感覚反応実験を実施し、この実験結果と純音による本実験結果をもとに、評価方法の研究を進めることが必要であると考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 宮本俊二ほか：超低周波音および低周波音に関

する感覚反応実験について（第1報）東京都公害研究所年報（1980）。

2) 宮本俊二ほか：超低周波音および低周波音に関する感覚反応実験について（第2報）東京都公害研究所年報（1981）。

3) 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）。

4) C, W Nixon, D. L. Johnson : Infra Sound and Hearing, Proceedings of the International Congress on Noise as a Public Health Problem 1973. Dubronik.