

## 中小支間道路橋における低周波空気振動の 放射音圧レベルとスペクトルの推定

ESTIMATE OF SOUND PRESSURE LEVEL AND SPECTRA OF LOW FREQUENCY  
SOUND RADIATED FROM SHORT AND MID-SPAN HIGHWAY BRIDGES

五郎丸英博\*・白石捷夫\*\*・原 公\*\*\*・小森 武\*\*\*\*

By Hidehiro GOROMARU, Katsuo SHIRAIISHI, Hiroshi HARA and Takeshi KOMORI

This paper presents the estimation method for the sound pressure level and 1/3 octave band spectra of the low frequency sound radiated from bridges occurred owing to the bridge vibration excited by the passage of heavy vehicles. This estimation method involves as follows :

- (1) Measuring the vibration acceleration level of the bridge.
- (2) Calculating the radiation efficiency of the concrete slab.
- (3) Calculating the distance attenuation of the low frequency sound.

Based on the estimated and measured results above mentioned, these indicate clearly that the proposed method can estimate the sound pressure level and 1/3 octave band spectra of the low frequency sound.

*Keywords : low frequency sound, radiation efficiency, bridge vibration, estimation*

### 1. ま え が き

中小支間道路橋から放射される低周波空気振動には、ジョイント音とスパン音がある<sup>1)~8)</sup>。この低周波空気振動に関しては、発生機構を含めた橋梁振動と音響放射の関係の定性的な研究<sup>9)~14)</sup>や音響制御の面からの研究<sup>15)~17)</sup>が数多く行われてきた。一方、自動車走行による放射音(ジョイント音とスパン音)の推定や予測については、基礎的な検討が著者らによって実施<sup>18)</sup>されているが、系統的に十分な研究が行われていない。

数 Hz 成分のスパン音の計算については、大島<sup>14)</sup>らによりは理論に立脚した橋梁の振動解析と平面音波の式から最大音圧レベルを求める計算式が提案されているが、ジョイント音については今後の課題とされている。スパン音に比較して、ジョイント音は伸縮継手部の段差や端部剛性、走行車両の重量や速度、アプローチ部の路面凹凸等の影響を受けて、振動、放射音とも一様でなく、

理論的な解決を図るには解析上の工夫が必要となる。足立<sup>10)</sup>は上路トラス橋について、対傾構部分を鉛直ばねに置換し、床版には解析上の補助領域を設けて振動解析し、放射音の数値計算を行っている。そして、実測結果と比較して良好であることを示しているが、他の橋梁形式への適用計算はない。そこで著者らは実橋における床版の振動加速度から音響パワーへ変換効率である放射効率を1/3オクターブバンドごとに求めることにより、1 Hz から100 Hz までの放射音圧レベル(OA値)とスペクトルを推定する方法を提案する。この方法によれば、ジョイント音の推定もスパン音と同様に可能であるし、橋梁形式の相違にも対応できる。さらに、推定した放射音から空間へ放射された低周波空気振動の音圧レベルの推定方法についても論ずる。本方法による推定計算の検証は、実橋において、橋梁振動と低周波空気振動の音圧レベルの多点同時測定を実施して行っている。

本文では一連の推定方法とその検証結果について述べる。なお、低周波空気振動の音圧レベルの評価については、加重特性として現在のところ、ISO DIS-7196のG1, G2曲線や時田の提案するLSL曲線など、9つの方法があるが評価の視点に違いがあり、同種類の聴感特性になっていない<sup>19)</sup>。また、測定、分析方法も統一されていない<sup>7)</sup>。本研究ではこれらのことを考慮して評価す

\* 正会員 工修 日本大学講師 工学部土木工学科  
(〒963 郡山市田村町徳定)

\*\* 正会員 石川島播磨重工業(株)技術研究所  
(〒153-91 江東区豊洲3-1-15)

\*\*\* 正会員 工修 群馬高専教授 土木工学科  
(〒371 前橋市鳥羽町580)

\*\*\*\* 正会員 工修 桜田機械工業(株)  
(〒272 市川市二俣新町21)

る周波数を1~100 Hzまでに限定し、この周波数範囲をカバーする平坦特性の音圧レベル SPL で評価した。

## 2. 実橋の測定と分析方法

推定に先立ち、実橋で橋梁振動と低周波空気振動の音圧レベルの測定を実施した。測定橋梁は、鋼合成桁橋、鋼板桁橋、鋼トラス橋、PC-T桁橋で合計14橋である。これらは、いずれもジョイント音、スパン音の両音がともに測定可能な橋梁で、その寸法諸元と測定点の地形の状況を Table 1 に示す。測定地点の地形は全橋梁ともほぼ平坦で、周辺には地物が存在せず、障害物等による低周波空気振動の伝搬への影響および工場や事業所等の騒音や低周波空気振動の影響を受けない場所であった。測定は大型車両 (3.5t以上) の単独走行のものを100台以上について行っている。測定項目は、橋梁床版の振動、低周波空気振動の音圧レベル、車両速度、車両の種別、車両台数である。測定位置を Fig. 1 に示す。測点 S1 が放射音の測定位置であり、測点 S2 から測点 S6 が対象空間の音圧レベルの測定位置である。

低周波空気振動の音圧レベルの測定には低周波音レベル計 (リオン製, NA 17) を用いた。ジョイント音の測定位置は伸縮継手部であり、スパン音は支間中央部である。なお、伸縮継手部の状況は、伸縮装置前後の路面に局部的な不整が認められた橋梁もあったが装置自身の破損や欠陥は認められなかった。低周波音マイクロホンの設置箇所は、幅員中央の床版直下1mと床版端から橋軸直角方向へ水平に0, 5, 10, 20, 40mの位置で、地上1.2mの高さである。

橋梁床版の振動は圧電型の加速度ピックアップ (リオン製, PV-87) を使用し、床版の鉛直方向に作用する振動加速度を測定した。ピックアップの取付け箇所は低周波マイクロホンの設置箇所と同じ位置で橋梁断面の中央とした。なお、中央断面の橋面上または床版裏面に設置が困難なときには車道端に設置した。音と振動の記録にはデータレコーダを使用した。車両の測定点の通過、車種および荷台の状況は、音声信号をトランシーバを介してデータレコーダに録音し、データの読み取りはこの音

声信号で行った。

なお、対象空間の音圧レベルの推定は、放射音の伝搬特性を把握して行うので、データの充実を図るために、低周波空気振動の音圧レベルの測定を Table 1 に示す橋梁以外にも追加実施した。それらは、支間中央部が測定可能であった7橋、伸縮継手部において測定が可能であった5橋である。

周波数分析には1/3オクターブバンド分析器を用い、大型車両が測定点側の車線の測定点を通じたときの加速度と音圧レベルのピーク値をレベル記録計で読み取った。このときの動特性は Slow とした。ほかに、橋梁振動と放射音の対応を調べるのに FFT 分析器を使用した。測定と分析のブロックダイアグラムを Fig. 2 に示す。

音圧レベルの測定では、特に、風による影響を最小限におさえるため、マイクロホンに直径9cmの連続気泡

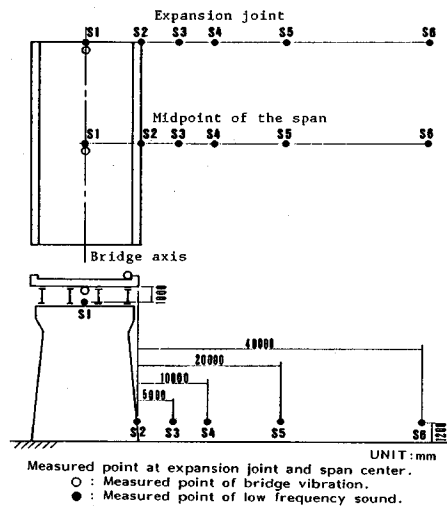


Fig. 1 Vibration and low frequency sound measurement positions.

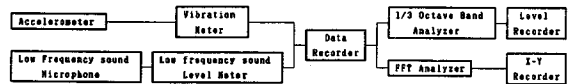


Fig. 2 Block diagram of measurement and analysis.

Table 1 Details of measured bridge and description of sites.

Symbol for Bridge Type	Bridge Type	Symbol for Each Bridge	Span Length (m)	Total Width (m)	Thickness of concrete of Slab (cm)	Thickness of Asphalt Pavement (cm)	Kind of Expansion Joint	Ground surface of measurement place	
								Joint	Center
SC	Steel Composite Girder Bridge	Simple A	37.3	8.8	19	5	Steel Finger	Flat grass ground, soft	Flat grass ground, soft
		Simple, Curved B	41.1	14.0	20	5	"	"	Flat hard ground
		Simple C	40.6	14.0	20	5	"	"	Flat grass ground, soft
		" D	34.5	7.5	18	4	"	"	Rough grass ground, hard
SP	Steel Plate Girder Bridge	Simple E	50.1	11.3	16	3	"	"	Flat grass ground, soft
		2-span continuous F	2846.1	8.7	18	5	"	Flat field	Flat grass and sand ground
		" G	40.1+52.5	11.4	22	8	"	Flat grass ground, hard	Flat soft ground
		Simple H	49.9	11.3	16	3	"	"	Flat grass ground, soft
ST	Steel Truss Bridge	3-span continuous I	59.1+98.5+59.1	11.3	20	5	"	Flat concrete surface	Flat sand ground
		4-span continuous J	4858.1	11.3	16	3	"	"	Flat grass ground, hard
		" K	4871.7	7.5	15	5	"	"	Gravel surface with pebble
PC	Prestressed Concrete T-girder Bridge	Simple L	38.4	8.8	15	7	Rubber	Paddy field	Flat asphalt surface
		" M	43.2	6.3	18	8	"	Flat grass ground, soft	Playing field
		" N	25.7	11.5	19	8	"	"	Flat hard ground
		" O					"	"	"

ポリウレタン防風スクリーンを取り付けた<sup>20)</sup>。そして、データの分析にあたっては、測点 S3 で音圧レベルと同時測定した風速が 1.2 m/s 以下のときの値を採用した<sup>21)</sup>。

### 3. 低周波空気振動の推定方法

大型車両が橋梁上を走行したときに発生する低周波空気振動の推定方法のフローダイアグラムを Fig. 3 に示す。本推定方法は 5 つのステップからなっている。以下に推定計算フローダイアグラムに従って推定の考え方、方法について述べる。

#### (1) 橋梁の床版振動の測定

本推定計算は、橋梁床版の振動加速度から低周波空気振動の放射音を推定するところに特徴がある。したがって、ジョイント音の推定では大型車両が伸縮継手部を通過したときの継手部の床版振動加速度を測定する。スパン音の推定では車両が支間中央走行時の支間中央部の振動加速度を測定する。

橋梁の床版振動から低周波空気振動の放射音の推定が可能なのは、橋梁の床版振動に伴って低周波空気振動が発生し、床版振動と放射音がよく対応しているからであ

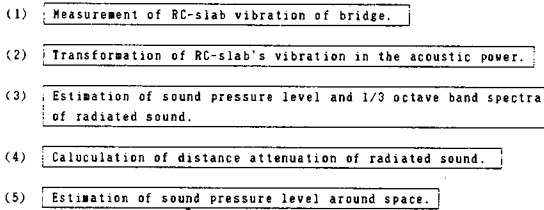
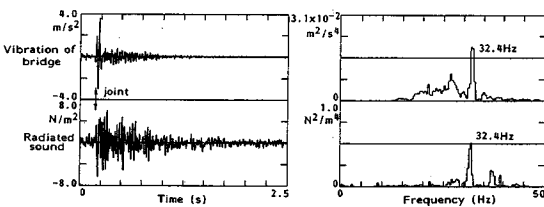
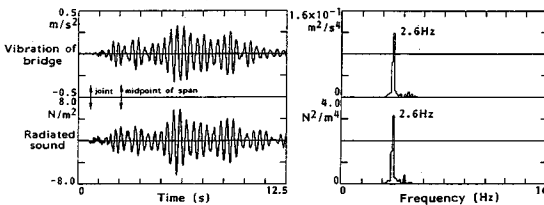


Fig. 3 Flow diagram of estimation of the low frequency sound radiated from the bridge.



(a) Joint sound at bridge A



(b) Span sound at bridge B

Fig. 4 Measured waveforms and power spectra.  
 ↓ : Passing of a heavy vehicle.

る。このことは既往の研究や測定結果<sup>1)~18)</sup>から十分明らかになっているが、本研究の考え方の出発点となる事項であるので、確認の意味で測定結果の一例を Fig. 4 (a), (b) に示す。

Fig. 4 (a) には A 橋の伸縮継手部を大型バスが速度 37 km/h で進入してきたときの結果を示してある。図の上が橋梁床版の加速度波形とそのパワースペクトルであり、下が放射音波形とそのパワースペクトルである。床版の加速度波形と放射音はバスの進入時に大きな振幅となり、放射音は振動加速度と比較して減衰が遅いのがわかる。卓越する周波数は、両者とも同じ 32.4 Hz である。

Fig. 4 (b) にはスパン音の例として土砂を満載した大型ダンプトラックが速度 50 km/h で B 橋を通過したときの結果を示してある。床版の振動加速度と放射音は非常によく対応しており、車両が支間中央の測定点を通過後に大きな振動振幅を示し、橋梁の低次の固有振動が励起され、音が放射されている様子が明瞭に認められる。この橋梁の多質点系モデルによる固有値計算の結果は、2.3 Hz が第一次固有振動数であった。したがって、図において卓越する周波数 2.6 Hz はこの橋梁の基本振動数と考えられる。このように、道路橋での低周波空気振動は、車両走行に起因する橋梁振動によって発生しているのがわかる。

#### (2) 橋梁の鉄筋コンクリート床版の放射効率

橋梁の床版振動（本研究では鉄筋コンクリート床版）に伴って発生する低周波空気振動の放射音圧レベルと 1/3 オクターブバンドスペクトルを推定計算するために、振動から音への変換効率である放射効率を求める。

橋梁床版の放射効率は床版から実際に放射される放射音のパワー  $W_s$  と、床版の振動振幅がすべて放射音に変換された場合のパワー  $W_{vib}$  の比として、次式で示される<sup>22)</sup>。

$$\sigma = W_s / W_{vib} \dots\dots\dots (1)$$

式 (1) の  $W_{vib}$  は式 (2) で表わされる。

$$W_{vib} = S \rho c \bar{v}^2 \dots\dots\dots (2)$$

ゆえに、式 (1), (2) より  $\sigma$  は次のようになる。

$$\sigma = W_s / W_{vib} = W_s / \rho c \bar{v}^2 S \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $S$  は放射面の面積 ( $m^2$ )、 $\rho c$  は空気固有インピーダンス  $\rho c = 415 (Ns/m^2)$  1 atm 20°C、 $\bar{v}^2$  は空間と時間に対する放射面の二乗平均速度 ( $m^2/s^2$ )

振動速度の実効値  $\bar{v}$  は加速度の実効値  $\bar{a}$  と周波数  $f$  を用いて式 (4) のように表わされる。

$$\bar{v} = \bar{a} / 2\pi f \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) を用いて式 (3) を対数表示すると式 (5) が得られる。

$$10 \log_{10} \sigma = 10 \log_{10} \left\{ \frac{W_s}{W_0} \cdot \frac{(2\pi f)^2}{(\bar{a}/a_0)^2 \cdot a_0^2} \cdot \frac{W_0}{\rho c S} \right\} \dots\dots (5)$$

ここで、 $W_0=1 \times 10^{-12}$  Nm/s (基準の音のパワー)、 $a_0=1 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup> (基準の加速度の実効値)として式(5)を整理すると、式(6)となる。

$$10 \log_{10} \sigma = PWL + 20 \log_{10} f - 10 \log_{10} S - VAL - 30.2 \quad (6)$$

ただし、 $PWL=10 \log_{10}(W_s/W_0)$ 、 $VAL=20 \log_{10}(\bar{a}/a_0)$ であり、 $PWL$ はパワーレベル(dB)、 $VAL$ は振動加速度レベル(dB)である。いま、放射音のパワーが有効面積 $S_0$ を通して伝達していると考え、音の強さのレベル $IL$ は式(7)で表わされる。

$$IL = PWL - 10 \log_{10} S_0 \quad (7)$$

式(7)を式(6)に代入すると式(8)が得られる。

$$10 \log_{10} \sigma = IL + 20 \log_{10} f - 10 \log_{10}(S/S_0) - VAL - 30.2 \quad (8)$$

式(8)の $IL$ は実測で得られた床版直下1mの音圧レベル $SPL$ に等しいと置くと、式(9)となる。

$$10 \log_{10} \sigma = SPL + 20 \log_{10} f - VAL - 10 \log_{10}(S/S_0) \quad (9)$$

$$-30.2 \dots \dots \dots (9)$$

したがって、橋梁床版の放射効率 $\sigma$ は式(9)から求められる。ここに、 $VAL$ は橋梁床版の振動加速度レベルの実測値であり、 $SPL$ は床版直下1mの音圧レベルの実測値である。 $10 \log_{10}(S/S_0)$ の値は、 $\sigma=1$ となる床版の限界周波数<sup>23)</sup>から決定される。

式(9)から各橋梁形式別に放射効率を求め、図示したものがFig.5である。図中の白印は伸縮継手部の放射効率であり、黒印は支間中央部のもので、各橋梁の大型車両50台分の平均値を示している。実線は各橋梁形式ごとの全橋について、最小二乗法により求めた周波数 $f$ による一次回帰式である。 $R$ は相関係数で、 $SD$ は標準偏差である。橋梁の放射効率はこの形式別の回帰式を用いて算出する。

放射効率は、支間中央部においては4形式とも平均約6 dB/octの傾きで上昇し、周波数に依存している。伸縮継手部では、鋼製の伸縮継手を有するSC、SP、STの3形式の橋梁が3 dB/oct、ゴム製の伸縮継手を有するPCが1.5 dB/octの傾きで上昇し、周波数にあまり依存していない。全橋梁形式とも床版の限界周波数付近で $10 \log_{10} \sigma$ がゼロに近づく傾向にある。

(3) 放射音圧レベルと1/3オクターブバンドスペクトルの計算

放射音(床版直下1m)の1/3オクターブバンドごとの音圧レベルは式(9)を書き改めた式(10)から計算することができ、スペクトル特性が求まる。

$$SPL_{1/3} = 10 \log_{10} \sigma - 20 \log_{10} f + VAL + 10 \log_{10}(S/S_0) + 30.2 \quad (10)$$

上式において、 $10 \log_{10} \sigma$ はFig.5に示した各橋梁形式ごとの最小二乗回帰直線を使用し、 $VAL$ は各橋梁の実測値を用いる。放射音圧レベルは、式(10)のバンドごとの音圧レベルを合成計算して、式(11)から求まる。

$$SPL_1 = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{21} 10^{\frac{SPL_{1/3,i}}{10}} \right) \quad (11)$$

(4) 放射音の距離減衰量の計算

対象空間の音圧レベルの推定は放射音の倍距離当たりの減衰量をあらかじめ算定しておき、この減衰量を使用した推定式を見出すことにより行う。したがって、ここでは放射音の減衰量の算定方法について述べる。算定方法は、実測した各橋梁の距離減衰量をもとに、減衰量に影響を及ぼす因子を考え、それらの因子を含んだ式の中で最も実測値に合致している推定式を求めることにした。考えられる因子は、次の6種類とした。

- ① 床版の全幅  $W$
- ② 橋梁の支間  $L$
- ③ 地面から床版裏面までの鉛直距離  $H$
- ④ 地上1.2 mの高さから床版裏面までの鉛直距離  $r$

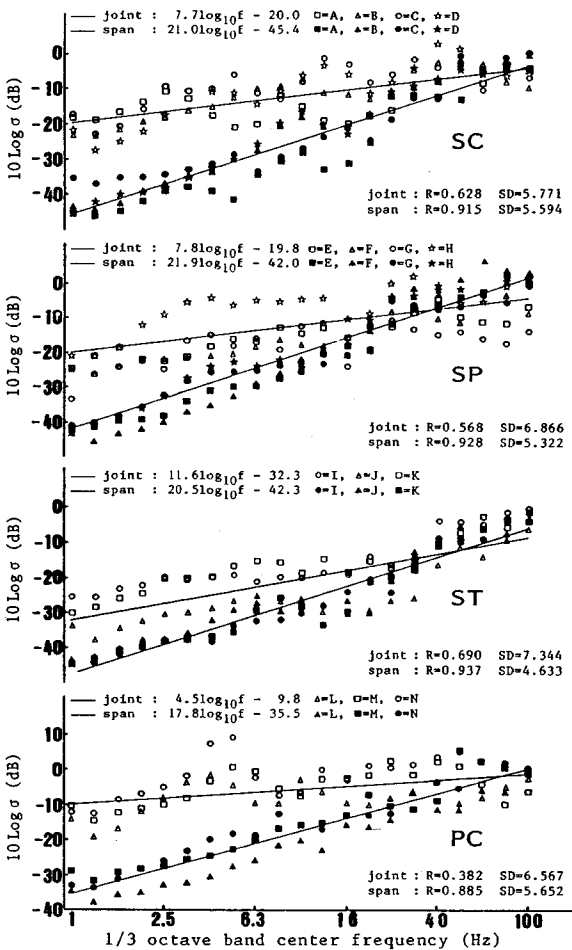


Fig.5 Radiation efficiency for each bridge type.

- ⑤ 床版裏面中央から測点 S2 までの距離  $l_1$
- ⑥ 伸縮継手部からスパン音の測定点までの橋軸方向距離  $l$

①, ②は音源の規模に関係した因子であり, ③から⑥は音源からの距離に関係した因子である。本研究では車両の重量, 走行速度, 車両の振動特性, 路面の凹凸, 伸縮継手部の段差などの影響を含んだ橋梁の床版振動を測定することによって放射音を推定しているため, 加振を受ける音源の規模に着目した。

ここに, ジョイント音, スパン音の距離減衰 (伝搬特性) の特徴の一例を Fig.6 に示す。図中の D 橋は比較的短支間の例であり, I 橋は支間が長い場合である。白印と破線はジョイント音の多数回の実測値と最小二乗回帰直線であり, 黒印と実線はスパン音の結果である。

ジョイント音の距離減衰勾配は, D 橋, I 橋いずれも  $-6.4 \text{ dB/D}$  である。両橋梁は倍距離で同一の減衰量を示すが, 4つの橋梁形式の実測値を合計してその算術平均を取ると, 距離減衰量は  $-5.6 \text{ dB/D}$  になる。その結果, ジョイント音の伝搬は, ほぼ距離の二乗に反比例して減衰している。このことは, 通常の騒音 (可聴音) の取扱いに似ており, 音源は点音源とみなすことができる。したがって, ジョイント音の減衰量の算定には音源に着目すればよいと考えられる。

一方, スパン音に関しては, 減衰量は D 橋で  $-5.7 \text{ dB/D}$  であり, I 橋では  $-3.6 \text{ dB/D}$  である。音源について考えると, 前者の橋梁は点音源に相当し, 後者

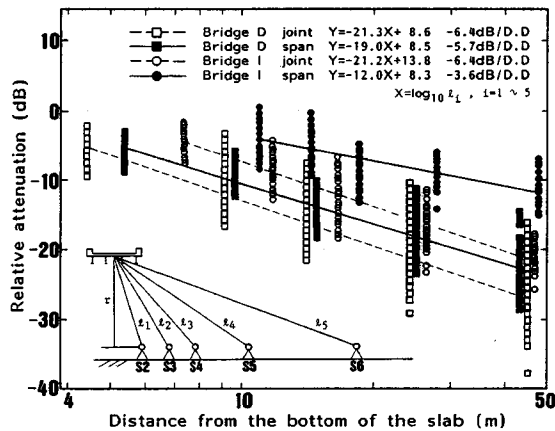


Fig.6 Examples of propagation properties radiated from the bridges.

Table 2 Examination of accuracy in estimation.

	Regression equation	eq.no.	R	Rc	P	Q	SD
span sound	$DA = 1.65 \log_{10}(l/W) - 5.37$	(12)	0.544	0.544	0.027	0.020	0.701
	$DA = 3.18 \log_{10}(L/H) - 7.04$	(13)	0.478	0.478	0.021	0.021	0.730
	$DA = 5.50 \log_{10}(l/r) - 3.99$	(14)	0.402	0.402	0.022	0.022	0.761
	$DA = 1.56 \log_{10}(W/H) - 4.44$	(15)	-0.244	-0.244	0.025	0.025	0.806
joint sound	$DA = -0.04(L/H) - 4.88$	(16)	-0.223	-0.222	0.023	0.023	0.899
	$DA = 0.34(\ln r / r) - 5.40$	(17)	0.091	0.091	-0.024	0.024	0.914
	$DA = 0.07(W/H) - 5.46$	(18)	0.164	0.164	-0.023	0.023	0.910

は線音源とみなすことができる。この理由として, D 橋は短支間であるので, スパン音はジョイント音に複合されて点音源に近づくものと考えられる。これに対して, 支間の長い I 橋は, ジョイント音の影響がなく, 音源は線音源として取り扱うことができる。これらの傾向は他の橋梁についても同様であった。したがって, スパン音の減衰量に関しては, 支間が長くジョイント音の複合がなければ, ほぼ線音源として考えることができるので, 伸縮継手からの距離  $l$  に着目するのがよいと思われる。

以上, 実測から得られた結果を考慮しながら①~⑥の因子を用いた減衰量の推定式を見出す。推定式の形式として, (a)  $y = ax + b$  と (b)  $y = a \log_{10} x + b$  の二通りの直線回帰式を考えた。その結果を Table 2 に示す。表中で  $R, R_c, P, Q$  の計算は文献 24) によって行った。R は最小二乗回帰において求まる重相関係数であり,  $R_c$  は推定式 (最小二乗回帰式) より推定値を求め, これと実測値との単純相関係数を表わす。P は実測値に対する残差の比を考えて, 残差の比の二乗平均である。Q は実測値と推定値の比が同一とみなして定義される二乗平均である。R,  $R_c$  は 1 に近いほど, P, Q は 0.0 に近いほど精度が高いことになる。また, SD は標準偏差である。(a), (b) の両形式で R,  $R_c, P, Q, SD$  を検討した結果, スパン音については (b) 形式が優れており, ジョ

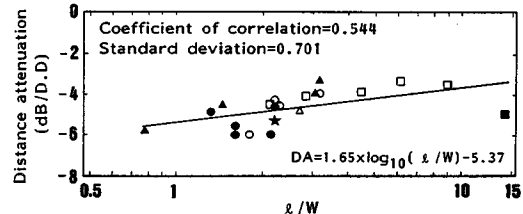


Fig.7 Distance attenuation of span sound for  $l/W$ .  $W$  = bridge width,  $l$  = distance from expansion joint to span center or to measured point  
○ = soft ground of grass, ● = hard ground of grass, □ = sand ground, ■ = gravel surface, △ = soft ground, ▲ = hard ground, ★ = concrete or asphalt surface

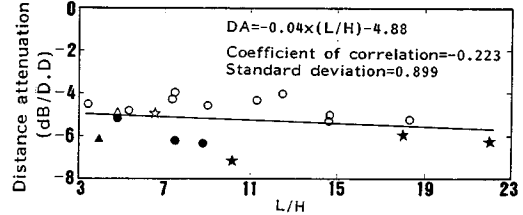


Fig.8 Distance attenuation of joint sound for  $L/H$ .  $L$  = span,  $H$  = distance from the bottom of the slab to ground level.  
○ = soft ground of grass, ● = hard ground of grass, △ = soft ground, ▲ = hard ground, ★ = concrete surface, ★ = paddy field

イント音は (a) 形式の方が優れていた。したがって、表中にはスパン音は (b) 形式、ジョイント音は (a) 形式の結果についてのみ示してある。最終的に減衰量の推定に採用した式は相関係数が大きく、標準偏差の小さいものとして、スパン音は式(12)、ジョイント音は式(16)を採用した。この両式と実測値との関係を示したのが Fig. 7, 8 である。

Fig. 7 にはスパン音について、横軸には  $l$  と  $W$  の比をとって、縦軸に倍距離当たりの減衰量を取って図示した。なお、この図には Table 1 に示した橋梁以外に、スパン音が測定可能であった7つの橋梁のデータもプロットしてある。減衰量は伸縮継手部から離れるに伴い減少し、線音源の減衰量に近づき、伸縮継手部に近づくとジョイント音が複合されているのがわかる。この影響はFFT分析器によるスペクトル分析結果と支間中央の各測定点での音圧レベルを、ジョイント音は式(23)から求め、スパン音は線音源と仮定して算出し、両音のdB和した結果と実測結果がほぼ一致していたことから確認した。この推定式によりスパン音の減衰量が計算される。

Fig. 8 にはジョイント音の距離減衰量を  $L$  と  $H$  で整理した結果を示す。この図にも Table 1 の橋梁以外にジョイント音が測定可能であった5橋のデータを追加してプロットしてある。減衰量はほぼ  $-4 \sim -6$  dB/D の範囲にあり、 $L$  と  $H$  を用いてジョイント音の減衰量が求められる。減衰量は詳細にみると、地面の状況が soft 面と hard 面で異なった傾向を示しているが、限られた19橋のデータなので、ここでは同一に扱っている。

なお、距離減衰を考える場合には、騒音の場合と同様に、音波の干渉、反射、超過減衰を考えることも必要である。また、前後の橋梁における低周波空気振動の影響もある。音波の干渉、反射については、測定点を地面近傍に設置することにより、直接音と反射音による干渉を無視でき、風による影響の点でも好都合となる<sup>25)</sup>。超過減衰については、40 m 程度の短距離では実用上無視できるものと考えられる<sup>26)</sup>。前後の橋梁の影響はスパン音、ジョイント音の両音に認められる。これは車両の分布状況、速度、重量および音源と受音点の距離に関係し、桁下高さが低く、短支間の場合にはその影響が大きい。この影響の程度はFFT分析器による両音のスペクトル分析と距離減衰量を算出することによって求められる。

(5) 対象空間の音圧レベルの推定計算

対象空間の音圧レベルの推定計算は、実測による値が、距離減衰傾向に合致するような推定式を考え、その中で、最も実測値に近似している推定式を見出すことを行った。考えられる推定式は、次の5種類とした。

$$SPL_i = SPL_1 - 20 \log_{10} l_i + B \dots\dots\dots(19)$$

$$SPL_i = SPL_1 - 10 \log_{10} l_i + B \dots\dots\dots(20)$$

$$SPL_i = SPL_1 - 20 \log_{10} l_i + 10 \log_{10} (r/l_i) + B \dots\dots\dots(21)$$

$$SPL_i = SPL_1 - 10 \log_{10} l_i + 10 \log_{10} (r/l_i) + B \dots\dots\dots(22)$$

$$SPL_i = SPL_1 - A \log_{10} l_i + 10 \log_{10} (r/l_i) + B \dots\dots\dots(23)$$

ここに、 $SPL_i$  は求める点の音圧レベル (dB)、 $SPL_1$  は式(10)より推定した床版直下 1 m の音圧レベル (dB)、 $l_i (i=1 \sim 5)$  は床版裏面より推定地点までの距離 (m)、 $r$  は床版裏面より地上 1.2 m までの高さ (m) である。

式(19)は点音源の減衰を主として考えたもので、式(20)は線音源の減衰として考えたものである。式(21)から(23)は音源と推定地点の高さの項を加味したものである。これらの推定式の検討結果の一例を Fig. 9 に示す。式(19)から(22)の係数  $B$  は測点 S2 から S6 までの実測値の平均と距離をおのおのの式に代入し、 $B$  を各測点で計算し、その算術平均値より求めた。式(23)の係数  $A, B$  の決定は、Fig. 7, 8 から求まる倍距離当たりの減衰量と測点 S2 の実測値の平均から算出した。詳細は付録に示す。図中において、最適なものあれば、かなりかけ離れたものもあり、まちまちである。スパン音については、式(22), (23) が比較的良好に実測値の平均に適合しており、ジョイント音では式(19), (22), (23) が良好である。したがって、最終的にジョイント音、スパン音が同一の式で表現できること、距離によって実測値の平均よりあまり下回っていないこと、すなわち、推定として安全側であることを考慮して式(23)を採用した。この式の使用にあたっては、測点 S2 の実測値を必要とする。この方法はより簡便な推定という点では難点があるが、この地点の測定は比較的容易であり、実測

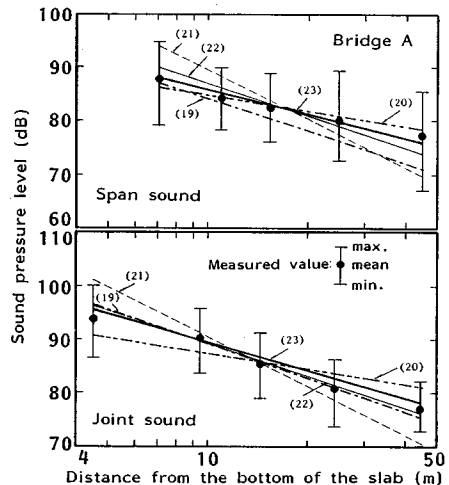


Fig. 9 Comparison of the presumption formula with the measured values.

値を使用することによって、橋梁近傍の音波干渉<sup>27)</sup>の影響を軽減できる。

#### 4. 推定結果と検証

(1) 放射音圧レベルと対象空間の音圧レベルの推定式(11)から推定した放射音圧レベル(S1)と式(23)を使用した対象空間(S2~S6)の音圧レベルの推定計算結果の代表例をFig.10に示す。結果はSCのD橋の-span音において、10 dB以上誤差を生じている点が認められるが、全体的にはほぼ10 dB以内の範囲で計算されている。特に、STのI橋のジョイント音と-span音は精度よく計算されている。Fig.10以外の橋梁においてもほぼ同様な結果が得られた。

#### (2) 放射音の1/3オクターブバンドスペクトルの推定

Fig.11には、式(10)から求めた放射音の1/3オクターブバンドスペクトルの推定結果を示す。-span音のスペクトルの推定結果は実測結果と比較してみるとよく一致しており、音圧レベルが卓越する周波数では一層対応が優れている。ジョイント音は多少ばらつきが認められる

ものの卓越する周波数での対応は優れており、全体的なスペクトルの特徴を表わしている。

#### (3) 検証結果

Table 3にはジョイント音と-span音の推定値の検証をするために、推定値と実測値のレベル差を算術平均した結果とその標準偏差を示してある。放射音の推定値は音圧レベルで±5.0 dB以内で、ほぼ精度よく算出されている。また、対象空間の音圧レベルの推定値についても±3.4 dB以内となっており、精度よく算出されている。

放射音圧レベルおよびスペクトルの推定は、全般的に-span音の方が精度よく算出されている。これは-span音が橋梁の低次の固有振動数で放射されるので、放射音は比較的定常音になり、レベル変動が小さいためである。これに対して、ジョイント音は音の性質上、衝撃的な音であり、走行車両の速度や重量および伸縮継手部の段差の相違により、伸縮継手部の振動特性が必ずしも一律でないためと考えられる。また、このことは、推定した放射効率の精度にも影響を及ぼしていると推察される。

Table 4にはTable 5に示した放射効率の回帰式に対

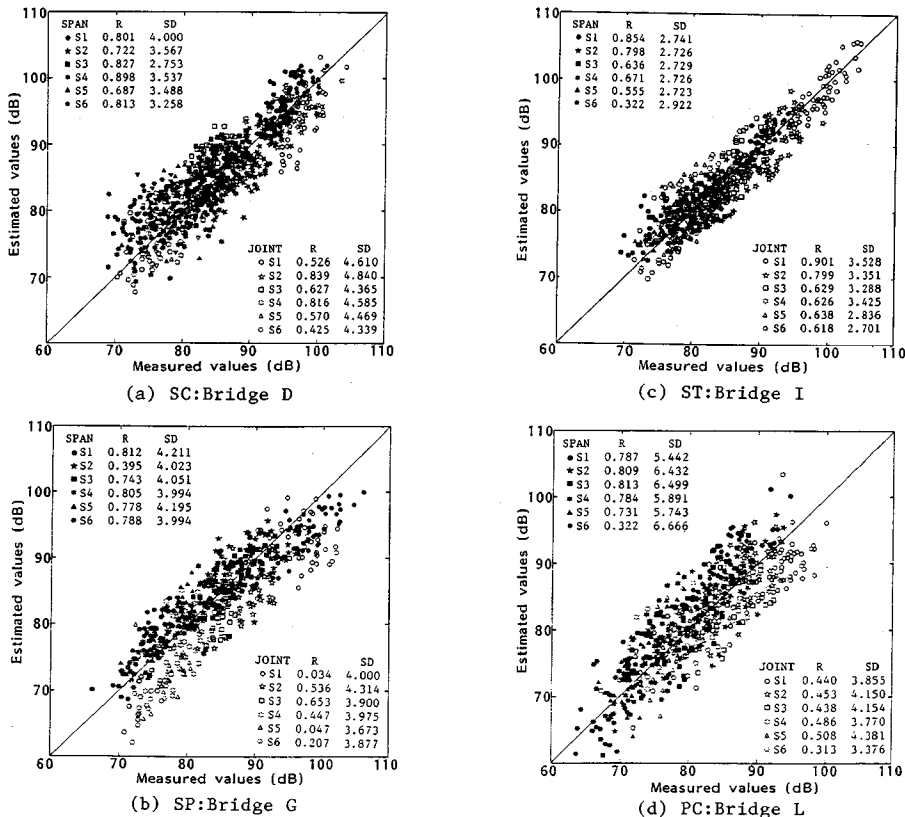


Fig.10 Comparisons between estimated and measured sound pressure level.

R=coefficient of correlation, SD=standard deviation.

Table 3 Average value of difference between estimated and measured sound pressure level and standard deviation. (unit: dB)

	SC:Bridge D				SP:Bridge G				ST:Bridge I				PC:Bridge L			
	joint sound		span sound		joint sound		span sound		joint sound		span sound		joint sound		span sound	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
S1	4.0	4.0	-1.0	2.4	5.0	5.1	3.9	2.1	0.3	1.2	-0.9	1.5	4.0	3.9	-4.2	3.7
S2	1.7	2.8	1.6	1.1	3.1	3.7	0.2	0.4	0.4	2.0	1.9	2.7	0.3	3.9	0.9	3.9
S3	-1.5	3.4	-0.3	1.5	3.4	3.0	-0.3	0.3	0.5	1.8	0.4	2.3	0.7	3.9	0.7	3.9
S4	-1.1	2.7	-0.1	1.6	1.5	3.6	-1.3	0.6	-0.1	1.2	-0.7	2.1	0.7	3.6	0.7	3.6
S5	-0.4	3.7	-0.1	1.9	2.2	4.1	-2.1	2.2	0.2	1.2	-2.0	1.6	-1.3	4.0	-1.3	4.0
S6	-0.7	4.2	-0.4	2.1	2.7	4.2	-2.8	2.5	0.0	1.4	-2.0	3.1	-0.2	4.5	-0.2	4.5

AV:Average value, SD:Standard deviation

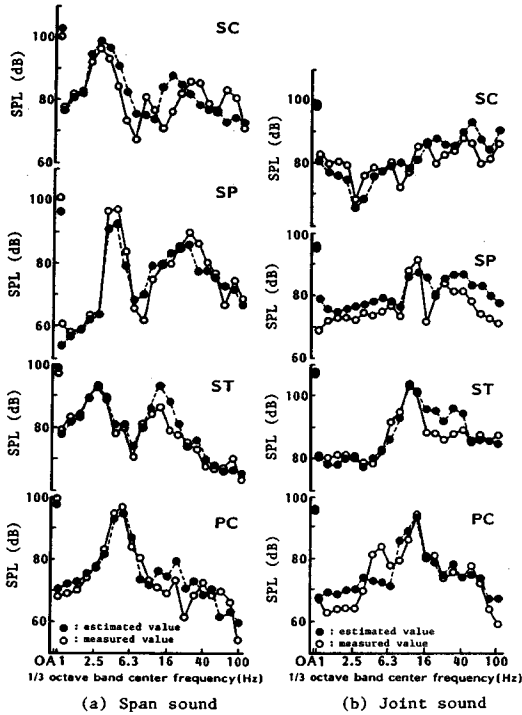


Fig. 11 Example of estimated values and measured values with 1/3 octave band center frequency.

する精度の検討を行った結果を示してある。放射音の推定精度の比較的悪かったSCのジョイント音, SPのジョイント音とスパン音, PCのジョイント音とスパン音のPまたはQはいずれも1.0以上であり, その精度が放射効率に支配されている。

5. まとめ

橋梁床版の振動加速度の実測結果を使用して, 低周波空気振動の放射音圧レベルと1/3オクターブバンドスペクトルの推定および対象空間の音圧レベルの推定を試みた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 低周波空気振動の放射音圧レベルとそのスペクトルは橋梁床版の放射効率に既知であれば, 橋梁の振動加速度を測定することにより推定が可能であることが確認された。

Table 4 Examination of accuracy in estimation.

	Regression equations	R	Rc	P	Q
SC	J= 7.7log <sub>10</sub> ef-20.0 S=21.0log <sub>10</sub> ef-45.4	0.628 0.915	0.628 0.915	1.476 0.981	0.179 0.154
SP	J= 7.8log <sub>10</sub> ef-19.8 S=21.9log <sub>10</sub> ef-42.0	0.568 0.928	0.568 0.928	1.730 1.027	0.281 2.254
ST	J=11.6log <sub>10</sub> ef-32.3 S=20.5log <sub>10</sub> ef-42.3	0.690 0.937	0.691 0.937	0.901 0.420	0.100 0.052
PC	J= 4.5log <sub>10</sub> ef- 9.8 S=17.8log <sub>10</sub> ef-35.5	0.382 0.885	0.382 0.884	1.833 1.185	1.615 0.581

J=S\*10log<sub>10</sub>ef; J:Joint; S:Span

(2) 対象空間の音圧レベルは, Fig. 7, 8 から求まる距離減衰量と式 (23) および式 (11) を用いることにより推定が可能である。

(3) 本推定方法の適用精度は放射効率に支配され, 推定音圧レベルと実測音圧レベルの差の平均値で表わすとほぼ±5 dB 以内であった。

その他, 低周波空気振動の伝搬特性は, ジョイント音が点音源からの距離減衰に類似し, スパン音が線音源からの距離減衰に類似していた。しかし, 架橋地点の地形や橋梁の振動特性の影響も受けていることが認められた。これらの点に関しては気象条件等も加味しながらデータを蓄積し, 検討を加えることによって, より正確な減衰量の把握が可能になるし, 音圧レベルの推定精度の向上につながるものと考えられる。今後はさらにこの手法を発展させることにより, 橋梁の計画や設計段階で, 放射音の推定や予測が可能と思われる。その方法として, 走行車両による橋梁の振動の推定計算—振動から音響パワーへの変換計算—対象空間の放射音圧レベルの計算—という計算システムが考えられる。

最後に, 本論のまとめにあたって, 日本大学教授 川口昌宏氏に多大のご指導, ご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。また, 各種測定, 分析に協力いただいた日本大学工学部卒業研究生諸氏に深く感謝申し上げる次第である。

付 録

式 (23) の係数 A, B の計算方法

$$SPL_i = SPL_1 - A \log_{10} l_{s2} + 10 \log_{10} (l_{s2}/r) + B \dots\dots\dots (23)$$

点 S2 の音圧レベルは式 (23) を使用して式 (a) のよ



うに表わせる.

$$SPL_{S2} = SPL_1 - A \log_{10} l_{S2} + 10 \log_{10} (l_{S2}/r) + B \dots\dots\dots (a)$$

点 S2 に対して床版裏面から倍距離となる点 S<sub>x</sub> の音圧レベルは式 (b) のように表わせる.

$$SPL_{Sx} = SPL_1 - A \log_{10} 2 \cdot l_{S2} + 10 \log_{10} (2 \cdot l_{S2}/r) + B \dots\dots\dots (b)$$

ここで, ジョイント音, スパン音について, それぞれ Fig. 7, 8 の回帰式より距離減衰量 ΔL を求める.

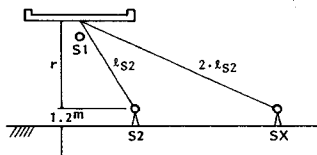
すなわち,

$$\Delta L = SPL_{Sx} - SPL_{S2} \dots\dots\dots (c)$$

よって, 式 (a), (b), (c) より係数 A, B が求まる.

$$A = \{\Delta L - 10 \log_{10} (1/2)\} / \log_{10} (1/2)$$

$$B = SPL_{S2} - SPL_1 + \{[\Delta L - 10 \log_{10} (1/2)] / \log_{10} (1/2)\} \times \log_{10} l_{S2} - 10 \log_{10} (r / l_{S2})$$



付図-1

参 考 文 献

- 1) Nishiwaki, N. and Mori, T. : Infrasound generated by oscillatory motion of a bridge in a freeway in Japan, *Internoise 76*, pp. 243~246, 1976.
- 2) 小川 清・小野正二: 橋梁振動に伴う低周波空気振動に関する試験研究, (その2), (その3), 日本道路公団試験所報告, pp. 234~252, 1975, pp. 259~278, 1976, pp. 194~201, 1977.
- 3) 内田英夫・栗田秀実: 中央高速道西宮線阿知川橋からの低周波空気振動と騒音・振動, 長野県衛生公害研究所報告, pp. 80~91, 1979.
- 4) 日本環境協会: 昭和 55 年度 環境庁委託業務結果報告書 (低周波空気振動緊急防止対策調査), pp. 77~95, 1980.
- 5) Nomachi, S., Oshima, T., Kakuta, Y. and Kishi, N. : On infrasound evaluation radiating from freeway bridge generated by a travelling load, *Internoise 80*, pp. 527~530, 1980.
- 6) Kaneyasu, K., Koyasu, M. and Shimizu, S. : Investigation on the radiation of low frequency sound from highway bridge, *Internoise 81*, pp. 321~324, 1981.
- 7) 清水和男・落合宏明: 橋梁振動と低周波音の測定, 騒音制御, Vol. 6, No. 6, pp. 15~18, 1982.
- 8) Goroumaru, H., Shiraishi, K. and Komori, T. : Study on Low Frequency Sound Characteristics of Steel Truss

- Bridge, *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 30, No. 2, pp. 37~42, 1988.
- 9) 今市憲作・辻本良信・高島 伸・北川晃一: 道路橋の振動に伴う放射音の理論解析, 日本機械学会論文集 (C 編), 46 巻 408 号, pp. 904~912, 1980.
- 10) 足立義男: 橋梁の振動性状が低周波域の空気振動に及ぼす影響に関する研究, 土木研究所報告, 第 164 号-1, pp. 1~61, 1984.
- 11) 山口道征・石井聖光: 高架道路下の騒音性状, 日本音響学会講演論文集, pp. 173~174, 1976 年 10 月.
- 12) Goroumaru, H., Shiraishi, K., Hara, H. and Komori, T. : Acoustic radiation of highway bridge in the range of row frequency sound, *Internoise 86*, pp. 353~358, 1986.
- 13) 大島俊之・能町純雄: 走行車両により橋梁から放射される低周波空気振動の解析, 日本音響学会誌, 39 巻 1 号, pp. 11~18, 1983.
- 14) 大島俊之・能町純雄・月田良博・三上修一: はり理論による低周波空気振動の放射音圧レベルの解析, 土木学会論文集, 第 356 号 / I-3, 1985 年 4 月.
- 15) 山田伸志・小坂敏文・中沢清人: 橋梁振動の低減に関する考察, 騒音制御, Vol. 2, No. 5, pp. 22~24, 1978.
- 16) 足立義雄・岡村宏一・島田 功: 道路橋床版の低周波域における振動性状について, 土木学会論文報告集, 第 330 号, pp. 37~48, 1983.
- 17) Ishino, K., Shirai, M. and Tanabe, S. : Control of the infrasound radiated from a bridge by a tuned mass damper, *Internoise 84*, pp. 563~566, 1984.
- 18) Goroumaru, H., Shiraishi, K., Hara, H. and Komori, T. : Prediction of Low Frequency Noise Radiated From Vibrating Highway Bridges, *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, Vol. 6, No. 4, pp. 155~166, 1987.
- 19) 時田保夫: 低周波音の評価について, 騒音研究会資料, 資料番号 N 86-01-2, pp. 1~6, 1986.
- 20) 清水和男・山下充康: 低周波音計測における風の影響, 日本音響学会講演論文集, pp. 175~176, 1980 年 5 月.
- 21) 住友聡一・辻本三郎丸・池沢 正: 低周波音測定値におよぼす風の影響について, 日本音響学会講演論文集, pp. 467~468, 1985 年 9 月.
- 22) Cremer, L. and Heckl, M. : *Structure-Bone Sound*, Springer Verlag, p. 459, 1973.
- 23) Cremer, L. and Heckl, M. : *Structure-Bone Sound*, Springer Verlag, pp. 482~499, 1973.
- 24) 加藤雅史・島田静雄: 橋梁振動特性の統計解析, 土木学会論文報告集, 第 311 号, pp. 49~58, 1981.
- 25) 福原博篤: 屋外騒音の計測手法に関する研究, 日本大学学位論文, pp. 173~218, 1985.
- 26) 産業公害防止協会: 低周波音防止技術解説書, p. 23, 1983.
- 27) 山田伸志: 超低周波音と低周波音, 環境技術研究会, pp. 10~11, 1984 年 7 月.

(1988. 11. 14・受付)