

I—28 実橋走行試験による低周波空気振動の発振特性の研究

北見工業大学 正員 ○三上 修一, 大島 俊之, 森 弘
 北大工学部 正員 角田 与史雄, 能町 純雄

1. まえがき

高架橋梁上を重量車両が高速で通過する際に、床版の振動にともなう橋梁表面から低周波空気振動が発生し、橋梁周辺におけるいくつかの環境問題をひきおこし、最近訴訟に発展している例もある。また、この問題を土木工学的立場から考えてみると、橋梁の材質、床版厚、主桁間隔、床組構造などの構造的な面、車両の重量、走行速度からなる車の運動エネルギー、自動車車体の固有振動数と橋梁の固有振動数との関係、などが解析すべき関連因子として考えられる。また床版、床組の設計において、応力的に許容範囲内に入れることのほかに、剛性(たわみ性)等の面でも上記の問題を生じさせないようにチェックする必要が生じてくることが予想される。

本論文においては、文献(2)の第1報にひきつづき、この問題の実験的研究の解析結果として、原波形のスペクトル解析による卓越振動数、パワースペクトルのピーク値の比較、および音圧レベルの予測のために評価図について報告する。

2. 実験概要

実験は一昨年の昭和54年11月に札幌市北東部の一般道道滝野上野幌線の旧豊平川に架設され供用直前の「落合橋」で行なった。同橋は、支間24.1m、床版厚21cm、主桁間隔3mの4本主桁、歩道・自転車道が片側に設けられた非対象構造となっている。橋梁の低周波空気振動発振特性を調査するという観点から、床版直下の音圧、床版下面の上下振動加速度、走行車両の上下振動の測定を図1のように行なっている。

測定箇所は、4本の主桁と、川の左流側から G_1, G_2, G_3, G_4 とすると、そのうちの G_2 と G_3 に対して装置を取りつけた。支間中央には加速度計 $A_1(G_2)$, $A_4(G_3)$ 、低周波マイクロフォン $M_1(G_2)$, $M_4(G_3)$ 、スパン1/4点に $A_2(G_2)$, $A_5(G_3)$, $M_2(G_2)$, $M_5(G_3)$ 、支点に $A_3(G_2)$, $A_6(G_3)$, $M_3(G_2)$, $M_6(G_3)$ を配置した。車両には、前輪車軸中央に At_1 、後輪車軸左右に At_2, At_3 を車軸の上下振動測定、さらに荷台前方に At_4 、荷台後方左右に At_5, At_6 を車体の上下振動測定を目的として加速度計を取りつけた。

測定項目は表1に示すとおりであり、路面状態、自動車重量、走行車線、走行速度、走行方向を変えて合計32回の実験を行っている。表中の記号で、Sは路面状態平坦の場合(Smooth)、Rは4.6×24.5cmの断面のチェッカープレートに橋長を4等分するように3ヶ所設置して段差走行した場合(Rough)、2番目の20と10は自動車重量(t)、3番目のA, Bは走行車線のCase AとCase B、4番目の数字は支承位置の通過時間から推定した平均走行時速(km/h)、5番目のX, Yは走行方向(図1に示している)をそれぞれ意味している。

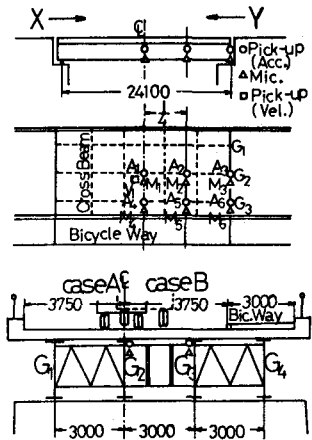


図1 計器配置図

表1 実験項目

20 t	CODE	10 t	CODE
(1)	S-20-A-41.7-X	[1]	S-10-A-41.9-X
(2)	S-20-A-40.0-Y	[2]	S-10-A-41.1-Y
(3)	S-20-A-49.9-X	[3]	S-10-A-62.0-X
(4)	S-20-A-54.3-Y	[4]	S-10-A-55.3-Y
(5)	S-20-B-37.6-X	[5]	S-10-B-43.4-X
(6)	S-20-B-37.7-Y	[6]	S-10-B-40.2-Y
(7)	S-20-B-45.7-X	[7]	S-10-B-54.9-X
(8)	S-20-B-52.6-Y	[8]	S-10-B-63.8-Y
(9)	R-20-A-38.9-X	[9]	R-10-A-38.6-X
(10)	R-20-A-39.4-Y	[10]	R-10-A-39.4-Y
(11)	R-20-A-49.9-X	[11]	R-10-A-52.9-X
(12)	R-20-A-53.9-Y	[12]	R-10-A-57.5-Y
(13)	R-20-B-34.3-X	[13]	R-10-B-39.6-X
(14)	R-20-B-36.2-Y	[14]	R-10-B-37.5-Y
(15)	R-20-B-48.2-X	[15]	R-10-B-58.6-X
(16)	R-20-B-53.9-X	[16]	R-10-B-55.3-Y

3. 原波形のスペクトル解析結果 — 卓越振動数について —

表2, 表3, 表4は原波形のスペクトル解析結果を示したもので, 表中 $V_1 \sim V_5$ の床版の振動速度の波形は, 加速度波形を台形公式を用いた積分フィルターを通して数値的に積分した後の波形を意味している。

表2は自動車の加速度波形の卓越振動数, 表3は自動車重量が20tのときの床版の加速度波形($A_1 \sim A_5$), 振動速度波形($V_1 \sim V_5$), および音圧波形($M_1 \sim M_6$)の卓越振動数, 表4は同じく自動車重量10tのときの卓越振動数を示しており, 表中空欄の所と欠けている所は, 実験および解析の過程で欠落したものである。また実橋の1次曲げ振動の固有振動数 f_1 は, 帯板要素法を用いたモデル化による計算結果では4.4Hzと得られた。

まず表2について, 全体としてはバネ下加速度 $A_{t1} \sim A_{t5}$ は10~15Hzの範囲にばらついているのに対して, バネ上加速度 $A_{a1} \sim A_{a5}$ は自動車重量 $W=20t$ のときは2.5~3.8Hz, $W=10t$ のときは3~15Hzの範囲にばらついているのが特徴で, 20tの場合に f_1 に近い値を示している点が注目される。

次に表3と表4の比較では $A_1 \sim A_5$, $V_1 \sim V_5$ の試験番号(1)~(8), [1]~[8]までの平滑路面に対して, A_3 を除き $W=20t$ に対しては, 3.6~3.9Hz, $W=10t$ に対しては4.4~5.6Hzおよび15Hz付近にばらついており, 20tと10tの場合で床版振動の卓越振動数にちがいが出ている点が注目される。また段差走行の場合には両者ともほぼ15Hz付近にピーク値があり, 段差の設置状況と対応しているものと思われる。支承位置の加速度 A_3 は高次の振動が卓越している。また V_3 では高次振動成分がフィルターにより減少している。一方音圧 $M_1 \sim M_6$ の面からみると, 表3では全体として音圧の結果は床版振動に対応していることが読みとれるとともに, 支承位置の音圧(M_3, M_6)にも支間中央より生じた音波が卓越して入っている点が明らかである。

表4でも, 表3と多少の差異があるものの上記と同

表3 床版加速度, 速度, 音圧波形の卓越振動数(20t)

	A1	A2	A3	A4	A5	V1	V2	V3	V4	V5	M1	M2	M3	M4	M5	M6
(1)	3.6	3.6	90.6 8.9	3.6	3.6	3.6	3.8	3.8	3.8	3.8	3.1	11.6 3.1	11.6	3.6	11.1	11.1
(2)	3.6	3.6	18.7 37.3	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6			3.6	11.6	11.6	3.6	3.6	12.2
(3)	3.8	3.8	31.0 53.2	3.8	3.8	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
(4)	3.7	3.7	35.7 36.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	11.0
(5)	3.7	3.7	25.7 25.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	11.8
(6)	3.7	3.7	27.1	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.6	11.4	11.4	3.7	11.4
(7)	3.9	21.0 31.3 3.9	28.4 31.3 3.9	3.9	21.0 3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	12.2
(8)	3.7	3.7	25.0	3.7	3.7	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	11.9
(9)	15.6	15.6	29.8	15.6	15.6	15.6	15.6	10.6	15.6	15.6	6.2	11.1	11.6	15.6 6.2	11.1	11.1
(10)	14.7	14.7	30.2 29.3	14.7	14.7	14.7	14.7	11.1	14.7	14.7	6.7	12.0	12.0	14.7	12.0	12.0
(11)	14.7	13.0	22.3	14.7	14.7	2.7	2.7	14.7	13.0	14.7	14.7	7.6	11.9	11.9	14.7	13.0
(12)	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7				14.7	11.0	11.0
(13)	14.1	21.7	21.7	14.1	21.7	2.7	2.7	21.7	14.1	21.7	7.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
(14)	14.1	21.4	21.4	14.1	21.4	21.4	21.4	21.4	14.1	21.4	12.5	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2

表2 自動車加速度波形の卓越振動数(Hz)

20t	1	2	3	4	5	6	10t	1	2	3	4	5	6
(1)	11.5 15.1	12.0	12.0	3.6	3.1	3.1	[1]	11.1	3.1	11.1	11.6	3.1	16.4 3.1
(2)	9.3 8.0	12.9	11.6	3.6 2.2	3.6	3.6	[2]	11.1	9.3	11.6	14.2	4.0	2.2
(3)	16.8	16.3	14.1	3.8	3.8	3.8	[3]	14.0 15.4	4.9	9.8	9.8	5.6 4.2	4.9
(4)	11.0	11.0	11.0	3.0	3.0	3.0	[4]	11.9	4.2	9.8	9.8	3.5	4.2
(5)	10.2 13.8	10.2	10.2	2.0 3.7	3.7	3.7	[5]	14.7 13.7	18.6 1.9	11.7	12.2	3.9 8.3	8.3
(6)	11.4 10.9	11.0	11.0	2.0 3.7	3.7	3.7	[6]	10.2 11.6	9.8 4.0	11.6	11.6	2.2 2.9	2.9
(7)	13.7 10.3	15.2	12.2	2.4	2.4	2.4	[7]	15.9 18.9	4.9	9.2	9.2	4.9	4.9
(8)	10.3	15.2	10.3 11.4	2.7	3.3	3.3	[8]	11.2 12.6	4.9	11.2	8.4 13.3	3.5	3.5
(9)	12.0	13.8 15.6	13.3	2.7 8.0	2.7	2.7	[9]	11.4	5.7 2.4	7.3 13.8	5.7	5.7	5.7
(10)	10.7 12.4	14.7	14.7	1.8	2.7	2.7	[10]	10.6	5.7	7.3	4.1 19.6	2.4	2.4
(11)	12.5	15.2	9.8	2.7	2.7	2.7	[11]	10.9 13.0	3.0	8.1	3.3 3.3	3.3	3.3
(12)	11.6	10.4	11.0 11.6	2.4	3.7	3.7	[12]	12.2	3.0	6.7 12.2	9.2	3.0	3.0
(13)	11.9	14.1	9.7	9.8 2.7	2.7	2.7	[13]	12.0	5.3	14.7	12.9 29.8	5.3	5.3
(14)	11.0	9.2 11.6	8.6	2.4	3.6	3.7	[14]	10.2	2.7 5.6	12.0	12.4 13.3	2.7 2.2	2.7
							[15]	11.9	3.3	11.4	11.9 53.8	11.4	11.4
							[16]	12.2	3.1	6.7	9.2	3.1	3.1

表4 床版加速度, 速度, 音圧波形の卓越振動数(10t)

	A1	A2	A3	A4	A5	V1	V2	V3	V4	V5	M1	M2	M3	M4	M5	M6
(1)	15.1	15.1	41.3 15.1	15.1	15.1	5.8	5.8	3.7 6.4	15.1	15.1 5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
(2)	15.6	15.1	38.2 19.1	15.6	15.6	4.0	4.0	6.4 12.0	4.0	4.0	6.2	12.0	12.0	6.2	12.0	12.0
(3)	5.6	5.6	52.3	5.6	4.9	5.6	5.6	5.6	4.9	4.9	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
(4)	4.2	4.2	31.4	4.9	4.9	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.9	5.6	5.6	4.9	11.9	11.9
(5)	15.6	15.6	20.3	15.6	15.6	3.9	3.9	8.8 6.4	3.9	3.9	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	12.2
(6)	15.1	15.1	19.1 29.8	15.1	15.1	4.4	4.4	2.2	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	11.6
(7)	4.9	4.9	73.3	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	11.6
(8)	5.6	5.6	72.8	5.6	5.2	5.6	5.6	4.9	5.6	4.9	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
(9)	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	11.8	11.8	15.1	11.8	11.8
(10)	14.3	15.9	21.2	14.7 15.9	14.7	5.7	5.7	53.0	14.2	14.7	5.7	11.8	11.8	5.7	11.0	11.0
(11)	15.2	21.2	21.2	15.2	21.2	4.9	4.9	21.2	4.9	4.9	4.9	11.4	12.2	5.5	11.6	11.4
(12)	30.0 14.0	30.0	30.0	30.0	30.0	5.5	5.5	30.0	4.9	4.9	5.5	11.6	11.6	5.5	11.6	12.2
(13)	15.6	15.6	21.3	15.6	15.6	5.3	5.3	21.3	15.6	15.6	5.3	11.6	12.0	16.9	12.0	11.6
(14)	14.2	14.2	30.2	14.2	14.2	5.3	5.3	5.3	14.2	14.2	5.6 16.9	12.0	12.0	16.9	12.0	12.0
(15)	14.7	14.7	28.3 14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	11.0	11.0	14.7	11.0	11.0	11.0
(16)	15.3	15.3	29.9	15.3	15.3	15.3	15.3	30.0	15.3	15.3	17.1	12.2	12.2	17.1	12.2	12.2

様のことが言える。

4. パワースペクトルのピーク値の比較

床版加速度と音圧波形のパワースペクトルのピーク値を表5(W=20t)と表6(W=10t)に示しているが、この中で音圧M₁~M₆の結果については振動レベル計の基準値のとり方によってピーク値が変化しており、音圧波形の振幅の大きさの相対的關係にのみ意味をもっている。

表5で加速度波形A₁~A₅については、まず試験番号(1)~(8)と(9)~(16)の間に段差のための大きなピーク値の差異がある。また、A₁, A₂, A₃という順に値を比較すると徐々に小さくなって支間中央のパワーが大きいくことを示している。また(1)と(9), (2)と(10)などの段差の有無による違いは、50倍~100倍以上の差異となっている。一方音圧波形M₁~M₆の面からみると次節の図2, 図3で示すように絶対値そのものには10dB程度の差異となってあらわれているが、前述した理由から波形のパワーとしては平均的に10倍程度の増加にしかなっていない。

表5. 床版加速度と音圧波形のパワースペクトルのピーク値

	A					M					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
(1)	22.2	10.3	0.13	16.2	9.3	0.5	0.33	0.72	4.83	3.33	7.74
(2)	15.5	9.6	0.73	12.9	9.2	0.5	0.33	0.73	0.50	0.36	0.79
(3)	42.1	26.4	0.23	33.3	24.4	1.25	0.91	0.54	1.44	1.03	0.68
(4)	33.4	17.7	1.89	22.7	14.6	0.99	0.71	0.43	0.95	0.64	1.11
(5)	3.81	2.32	0.10	3.43	2.75	0.21	0.16	0.10	0.20	0.14	0.19
(6)	15.2	9.69	0.71	15.4	11.1	0.61	0.82	1.69	0.60	0.79	1.78
(7)	6.19	6.69	0.14	6.32	6.92	0.23	0.16	0.26	0.18	0.13	2.55
(8)	20.9	10.6	1.11	19.8	12.4	0.59	0.43	0.28	0.54	0.40	0.31
(9)	1103.	448.	1.87	1610.	888.	0.43	2.56	4.81	0.13	1.79	4.73
(10)	1222.	829.	5.92	1558.	1169.	0.20	5.66	13.5	0.065	4.55	14.2
(11)	1418	751.	11.0	1813.	1109.	0.27	2.55	8.18	0.11	1.90	5.84
(12)	11200.	6190.	24.6	14100.	8600.				0.56	1.74	4.43
(13)						3.87	9.16	19.8	3.29	11.3	16.1
(14)						3.11	67.1	112.	2.62	47.8	65.2
(15)	781.	1148.	21.4	1010.	1532.	0.058	1.84	4.81	0.0554	1.57	4.50
(16)	1223.	2577.	47.0	1456.	3509.	0.12	0.86	2.00	0.13	0.79	2.00

また、表6についても同じような傾向がみられるが、音圧のパワーについては[1]~[8]と[9]~[16]の間に顕著な違いがみられる。

5. 音圧レベルの評価図

横軸に、自動車の運動エネルギー $\frac{1}{2}WV^2$ を橋の1次の固有振動数 f_1 (この場合 $f_1 \approx 4.4\text{Hz}$ とする)で割った $K = \frac{1}{2}WV^2 / f_1$ の対数を用い、縦軸には音圧レベルの結果をIL(dB)であらわした評価図を図2(W=20t)と図3(W=10t)に示している。図では上下2群にプロットが分かれているが、下側の点が平滑路面の場合、上側の点が段差のある路面の場合の結果を示している。平均的にみると上下のレベルの間に10dB程度の差異がみられる。また全体の傾向としては、左肩下がりの直線的相関関係がみとめられるとともに、平滑路面の場合102~103 dB付近、段差のある路面の場合110~115 dB付近に音圧レベルが分布する傾向にある。

高速道路においては、路面の凹凸は非常に小さく、わたちのできた路面でも、その影響は本研究の段差(4cm)ほどにはならないので、上述の分布範囲に入るものと予想される。

その他の実験結果としては、実験の際の自動車の平均速度は35~60 km/hの範囲に分布している。段差がある場合の自動車加速度A_tの卓越振動数は10~15 Hz付近にあるので、 $f_1 \approx 4.4\text{Hz}$ との間にちがいがあり、高次振動モードを強制することになるため波形としては大きな振幅になっていないものと推定される。このことは自己相関関

表6 床版加速度と音圧波形のパワースペクトルのピーク値

	A					M					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
[1]	10.0	5.05	0.082	14.0	8.08	0.20	0.17	0.098	0.22	0.17	0.14
[2]	1.69	1.19	0.51	2.43	1.61	0.077	0.097	0.17	0.0858	0.14	0.29
[3]	20.4	10.6	0.26	8.70	6.45	0.79	0.48	0.38	0.84	0.64	0.42
[4]	9.98	8.55	3.12	11.5	8.40	0.45	0.87	1.77	0.57	1.04	2.33
[5]	2.53	1.25	0.059	3.97	2.15	0.32	0.17	1.43	0.23	0.32	0.16
[6]	2.44	1.46	0.21	3.85	2.50	0.063	0.044	0.042	0.0801	0.053	0.059
[7]	0.27	0.13	0.38	19.8	13.9	0.88	0.64	0.41	1.09	0.73	0.55
[8]	0.096	17.1	2.34	34.0	19.8	1.66	1.17	0.72	2.05	1.39	0.98
[9]	5027.	2742.	7.69	7267.	4559.	9.68	22.3	38.1	10.3	24.3	46.6
[10]	1009.	689.	5.70	1414.	956.	10.9	13.0	20.1	10.9	16.2	25.5
[11]	607.	1521.	32.9	885.	2154.	9.45	9.46	15.6	1.15	1.33	2.48
[12]	14.9	71.6	72.5	112.	53.5	7.09	8.25	13.1	1.14	1.25	2.68
[13]	7.14	604.	9.54	1941.	1123.	9.32	11.4	18.4	1.05	1.32	2.63
[14]	948.	339.	13.3	1166.	730.	6.88	9.45	17.5	0.93	1.11	2.64
[15]	6746.	3272.	14.6	8391.	53.7	5.45	18.8	21.8	1.07	3.06	5.09
[16]	917.	612.	39.5	1224.	1013.	4.64	9.15	16.3	0.62	1.34	3.04

数の図において卓越したピークが存在しないことから予想される。

6. 結 論

本研究においては低周波空気振動の床版表面からの発振評価の問題に焦点をしばって、実験を計画し、結果を解析した。本論文において明らかにされたことを要約するとおおよそ次のようになる。

(1) 原波形のスペクトル解析による卓越振動数の検討からは本実験で用いたトラックのバネ下固有振動数は10~15 Hz付近、バネ上は荷重載荷($W=20t$)のとき2.5~3.8 Hz, 空車のとき3~15 Hzの範囲にある。

(2) 床版の振動加速度および速度の卓越振動数は音圧の卓越振動数に対応している。支承部のマイクには支間中央での音波が計測されている。また $W=20t$ と $W=10t$ の場合の振動モードに差異がみられ、自動車自身の振動との連成の効果などが影響しているものと思われる。

(3) パワースペクトルのピーク値の比較からは、段差の床版加速度に対する影響が明らかになったとともに、パワーレベルとしては支承部の値より支間中央の値がかなり大きいことが明らかにされた。

(4) 音圧レベルとパラメータ $K(=\frac{1}{2}WV^2/f_1)$ との関係からほぼ両者に直線的関係があることが認められるとともに、発振音圧レベルとしては平坦路面の場合102~103 dB, 路面に段差(4cm)のある場合110~115 dB程度の値になることが明らかになった。

今後はこれらの結果にもとずき、さらに詳細な検討が必要なものと思われ、その一助となれば幸いである。

本研究の実験データの解析にあたっては、北見工大開発工学科寒地開発研究室の石田洋英、寺田寿両君および昭和54年度卒業生の野本優人君の多大な助力を受けました。深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Nomachi, Ohshima, Kakuta, Kishi : On Infrasound Evaluation Radiating From Freeway Bridge Generated By a Travelling Load, The 1980 International Conference on Noise Control Engineering, Miami, USA, Dec. 1980.
- 2) 大島, 森, 角田, 能町: 道路橋床版の低周波空気振動発振評価に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 才36号, 1980.
- 3) 小川, 小野: 橋梁振動に伴う低周波空気振動に関する試験研究, 日本道路公団試験所報告, その1(50年), その2(52年)
- 4) 能町, 角田, 岸: 走行荷重による箱桁の低周波発振評価の一試案, 環境情報科学, 6-4, 1977.

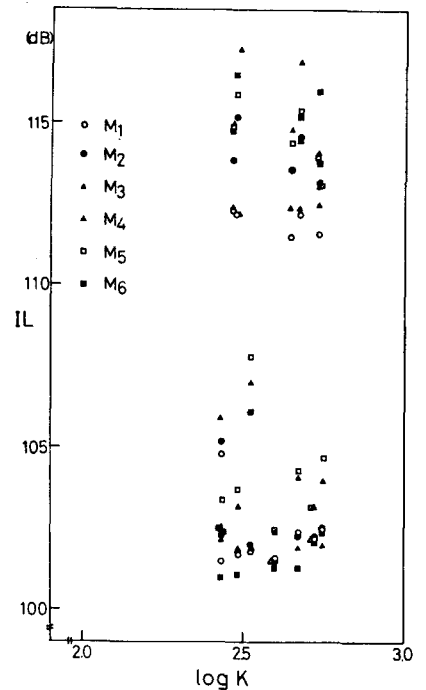


図2 音圧レベルの評価図(20t)

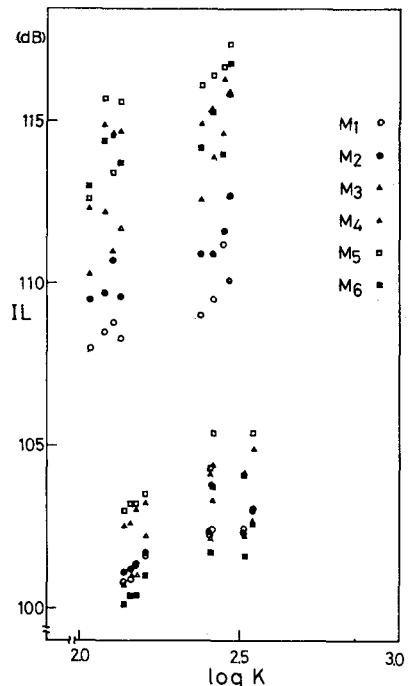


図3 音圧レベルの評価図(10t)