

板厚と床衝撃音の関係について

折 笠 輝 雄

久保田 喜八郎

§ 1. はじめに

集合住宅における音響上の問題の1つに床衝撃音（人の歩行やとびはね、椅子や卓の移動などによって床に衝撃が加えられたとき、その下階の室に生ずる音）がありしばしば居住者の苦情対象となっている。これに対応して、定性的にえられている床衝撃音の発生機構や、実験的にえられた結果をもとにして各種の軽減対策が試みられており、それなりの成果もあげられてきている。

床衝撃音は衝撃に対する床構造の音響的応答の問題であって、その応答を支配する主要素は構造躯体である鉄筋コンクリート床版である。この観点から床衝撃音の軽減対策における最近の傾向は床版の厚さを増加させようとする方向にある。しかし、床版の厚さと軽減効果との関係が定量的に把握されていないため、床版の設計に際してその厚さをどう定めるかが論議的になっている。

上記の事情から、本報は衝撃力と床衝撃音発生量に関する解析結果を紹介し、その結果を、床版の厚さに着目した模型実験によって検証したものである。

§ 2. 加振力と床衝撃音

2.1 加振力による板への入力パワー

板に角周波数 w の加振力 F_w が加わったとき、板に屈曲振動を生じさせる入力パワー（単位時間あたりの入力エネルギー） P_t は、板の機械インピーダンスを Z とすると、

$$P_t = \frac{F_w^2}{Z} \quad \dots\dots(1)$$

となる。

実際の床版は、有限な大きさをもった板ではあるが、板の厚さが屈曲振動の波長に較べて十分小さく、加振力が板の1点に加わる場合には、1次固有振動数付近を除き、機械インピーダンスは無限大板の駆動点インピーダ

ンスで近似でき、次式のように周波数に無関係に与えられる¹⁾。

$$Z = 8\sqrt{mB} \doteq 2.3\rho c_L h^2 \quad \dots\dots(2)$$

m ：板の面密度

B ：板の曲げ剛性

ρ ：板材の密度

c_L ：板材中の縦波伝搬速度

h ：板の厚さ

2.2 板の振動による消費エネルギー²⁾

板に入力されたエネルギーによって、板が平均的な振動速度 v をもって屈曲振動しているとすると、この振動エネルギーは、

①板の内部損失、板の支持部での損失や他の部材へのエネルギー逸散

②音波の放射

によって消費される。①、②のそれぞれによるエネルギー消費の係数を η_a 、 η_r とすると、単位時間に消費されるエネルギー P_s は、

$$P_s = \eta w m S v^2 \quad \dots\dots(3)$$

w ：振動の角周波数

S ：板の面積

η ： $\eta_a + \eta_r$

となり、これは加振力 F_w によって板に入力されたパワー P_t と釣合っていないなければならない。すなわち、式(1)と式(3)とより、

$$\frac{F_w^2}{Z} = \eta w m S v^2 \quad \dots\dots(4)$$

である。

2.3 板の音響放射パワーと室内音圧

次に、板の振動とこれによって室内に生ずる音圧 p との関係を求めると下記ようになる。

面積 S をもった板が、平均的な振動速度 v で屈曲振動を行なっているとき、室内へ供給される音のパワー P_r

は、板の音響放射係数を κ とすると、

$$P_r = \kappa \rho_0 c_0 S v^2 \quad \dots\dots(5)$$

ρ_0 : 空気の密度

c_0 : 空気中の音速

である。この式で $\rho_0 c_0 S v^2$ は無限大の板が振動速度 v をもってピストン運動をしているとき、面積 S の部分が放射する音のパワーである。

室へ供給される音のパワー P_r によって室内に生ずる音圧 p は、室内の吸音力を A とし室内で音が拡散状態にあるとすれば、

$$p^2 = \frac{4\rho_0 c_0}{A} P_r = \frac{(2\rho_0 c_0)^2 \kappa S v^2}{A} \quad \dots\dots(6)$$

となる。

2.4 加振力 F_w と音圧 p との関係

以上に求められた式(4)と式(6)とを用いて振動速度 v を消去すると、

$$p^2 = \frac{(2\rho_0 c_0)^2 \kappa}{Z \eta w m A} F_w^2 \quad \dots\dots(7)$$

のように加振力 F_w と音圧 p との関係がえられる。

さらに、式(2)および面密度 $m = \rho h$ を代入すると、

$$p^2 = \frac{(2\rho_0 c_0)^2 \kappa}{2 \cdot 3\rho^2 c_L \eta w A h^3} F_w^2 \quad \dots\dots(8)$$

となり、両辺を p_0^2 (p_0 は音圧の基準値で $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$) で除し、常用対数をとったのち10倍することによって音圧レベル、すなわち本報で対象としている床衝撃音レベル L が次のように表わされる。

$$L = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \log_{10} \frac{(2\rho_0 c_0)^2 \kappa}{2 \cdot 3\rho^2 c_L \eta w A h^3} \cdot \frac{F_w^2}{p_0^2} \text{ (dB)} \quad \dots\dots(9)$$

上式において、もし h 以外のパラメータ κ , η などが一定であるような場合には、音圧の2乗値は板厚の3乗に反比例する。床衝撃音レベルでいえば、厚さが2倍になるごとに9dB ずつ低減することになる。しかし、 κ や η は次節で述べるように、一般には板の材質、板の固定条件、板厚などに関係するとともに周波数にも関係しており、上記が成立つのは限られた周波数範囲においてである。

§ 3. 板厚の変化にともなう床衝撃音レベルの変化

3.1 床衝撃音レベルの規定要因

本報は板の厚さに着目して床衝撃音レベルの変化を考察しようとするものであるが、前節で求めた式(9)によれば床衝撃音レベルを規定する要因には次のものがある。

- (1)加振力とその周波数特性 F_w
- (2)板材の密度 ρ と材中の縦波伝搬速度 c_L
- (3)板の音響放射係数 κ
- (4)板の音響放射による損失まで含めた損失係数 η
- (5)室内の吸音力 A
- (6)板の厚さ h

厚さの異なる2枚の板の床衝撃音レベルを実験的に比較するにあたって板の材質、加振源、床衝撃音の測定室のそれぞれを同一に保つことは容易であるから、上記の要因のうち F_w , ρ , c_L , A の値を一定にすることができる。残りの要因である音響放射係数 κ は、次項に示すように一般的には板の大きさと板厚に応じて異なった特性値をもつ。また、損失係数 η には音響放射にともなう損失も含まれているから、これにも板厚が関係する。

したがって、式(9)をもとに板厚の異なる2枚の板の床衝撃音レベルの差異 ΔL は、それぞれの板厚を h_1 , h_2 、音響放射係数を κ_1 , κ_2 、損失係数を η_1 , η_2 とし、それぞれの床衝撃音レベルを L_1 , L_2 とすれば、

$$\begin{aligned} \Delta L = L_1 - L_2 &= 10 \log_{10} \frac{\kappa_1 \cdot \eta_2 \cdot h_2^3}{\kappa_2 \cdot \eta_1 \cdot h_1^3} \\ &= 30 \log_{10} \frac{h_2}{h_1} - 10 \log_{10} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \\ &\quad + 10 \log_{10} \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad \dots\dots(10) \end{aligned}$$

で表わされる。

3.2 音響放射係数 κ

内部損失の小さい板で、拡散的な屈曲振動のみが音響放射に寄与している場合の音響放射係数 κ は、

$$\kappa = \begin{cases} \frac{f_0}{f_c} \sqrt{\frac{f}{f_c}} \left(1 - \frac{f}{f_c}\right)^{-\frac{3}{2}} & f < f_c \\ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f_c}{f}} & f = f_c \\ \left(1 - \frac{f_c}{f}\right)^{-\frac{1}{2}} & f > f_c \end{cases} \quad \dots\dots(11)$$

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi l} \quad l = \frac{\pi ab}{2(a+b)}$$

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \div \frac{c_0^2}{1 \cdot 8 c_L h} \quad \dots\dots(12)$$

で与えられる³⁾。 f_c はコインシデンス効果の限界周波数

と呼ばれる。

上式において $f \ll f_c$ の周波数範囲を考えると、厚さが h_1, h_2 のそれぞれのコインシデンス効果の限界周波数を f_{c1}, f_{c2} とすれば、式(10)の第2項は、

$$10 \log_{10} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \div 10 \log_{10} \left(\frac{f_{c1}}{f_{c2}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots(13)$$

となり、式(12)を用い厚さで表示すると、

$$10 \log_{10} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \div 10 \log_{10} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots(14)$$

となる。同様に $f = f_c$ のときは次式がえられる。

$$10 \log_{10} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \div 10 \log_{10} \left(\frac{f_{c2}}{f_{c1}} \right)^{\frac{1}{2}} \\ = -10 \log_{10} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots(15)$$

また、 $f \gg f_c$ の周波数範囲を考えると、音響放射係数 κ は板厚に関係なく1で近似できるので、

$$10 \log_{10} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \div 0 \quad \dots\dots(16)$$

となる。

3.3 損失係数 η

すでに述べたように、ここでいう損失係数 η には板の材質に係わる内部損失、および板の支持条件に係わる損失係数 η_a のほか、音響放射にともなう損失係数 η_r が含まれる。損失 η_r は、板の平均的な振動速度 v をもった屈曲振動によって放射される音響パワー P_r [式(5)] と、板がもっている屈曲振動のパワー $w m S v^2$ との比で与えられる。すなわち、

$$\eta_r = \frac{2\rho_0 c_0 S v_2 \kappa}{w m S v^2} = \frac{2\rho_0 c_0 \kappa}{w m} = \frac{2\rho_0 c_0}{w \rho} \cdot \frac{\kappa}{h} \quad \dots\dots(17)$$

である。上式で分子の音響放射パワーを2倍してあるのは、板の両面から音が放射されるからである。また、損失係数 η は式から解るように、音響放射量が増すとともに大きくなっていくことに注意を要する。さて、音響放射に伴う損失係数 η_r と、板の材質や支持条件に係わる損失係数 η_a との大小関係は一般には $\eta_r \ll \eta_a$ である。したがって、 $\eta = \eta_a + \eta_r \div \eta_a$ とおくことができる。そして、板の材質と支持条件を同一に保っていれば板厚を極端に変えない限り、 η_a の変化はほとんどないと考えられるので、

$$10 \log_{10} \frac{\eta_2}{\eta_1} = 10 \log_{10} \frac{\eta_{a2}}{\eta_{a1}} = 0 \quad \dots\dots(18)$$

となる。

一方、 η_r が η_a より大きくなるのは板の材質等の損失が小さく、厚さも薄く、対象とする周波数領域が低いと

いった特殊な場合である（たとえば薄鋼板）。 $\eta_r \gg \eta_a$ のときには、 $\eta \div \eta_r$ とおけるので、

$$10 \log_{10} \frac{\eta_2}{\eta_1} \div 10 \log_{10} \frac{\eta_{r1}}{\eta_{r2}}$$

となり、式(17)より、

$$10 \log_{10} \frac{\eta_2}{\eta_1} = 10 \log_{10} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} - 10 \log_{10} \frac{h_2}{h_1} \quad \dots\dots(19)$$

のように表わされる。

3.4 板厚比と床衝撃音のレベル差

式(10)に対して、音響放射係数 κ と損失係数 η についての検討結果を、一般的なケースである $\eta_a \gg \eta_r$ の条件下で適用すると、板厚の変化にともなう床衝撃音レベルの変化量 ΔL は、次のように整理される。

板厚が小さい方の板の床衝撃音レベルを L_1 (レベル大) として、

(1) $f \ll f_c$ の周波数範囲では：

$$\Delta L = L_1 - L_2 \div 15 \log_{10} \frac{h_2}{h_1} \quad \dots\dots(20)$$

(2) コインシデンス効果の限界周波数 f_c のみに着目した比較では：

$$\Delta L = L_1 - L_2 \div 35 \log_{10} \frac{h_2}{h_1} \quad \dots\dots(21)$$

(3) $f \gg f_c$ の周波数範囲では：

$$\Delta L = L_1 - L_2 \div 30 \log_{10} \frac{h_2}{h_1} \quad \dots\dots(22)$$

となる。ただし、すでに述べてあるように板の1次固有振動数付近には適用できない。

なお、参考までに $\eta_a \ll \eta_r$ となる特殊な条件下では、

$$\Delta L = L_1 - L_2 \div 20 \log_{10} \frac{h_2}{h_1} \quad \dots\dots(23)$$

となり、遮音における質量則に対応した式となる。

§ 4. 実験方法

4.1 実験装置

(1) 試験体

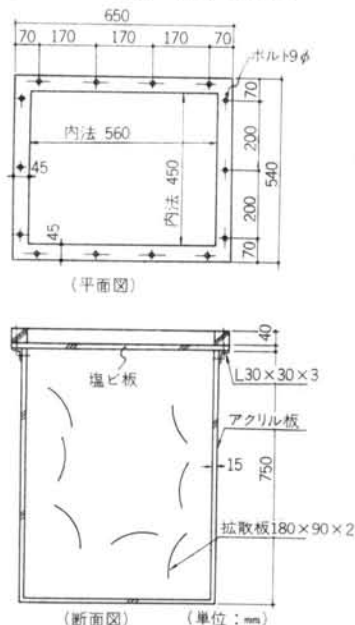
板の厚さを変化させ、これに対応する床衝撃音レベルの変化を調べるため模型実験によることとし、床版に相当する試験体として $45\text{cm} \times 56\text{cm}$ の大きさをもった矩形の硬質塩化ビニール板を用いた。厚さとして、10mm, 16.5mm, 21mm, 25mm, 29mm, 41mm, の9種とした。塩化ビニール板の主要な物理定数を表-1に、またそれぞれの厚さをもった板のコインシデンス効果の限界周波数 f_c の

密度	$\rho=1370\text{kg/m}^3$
ヤング率	$E=3.6\times 10^9\text{N/m}^2$
縦波伝搬速度	$c_L=1620\text{m/sec}$

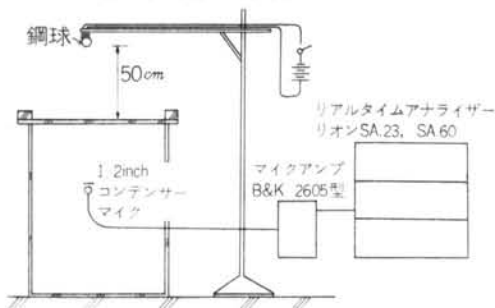
表—1 硬質塩化ビニル板の物理定数

板厚 h (cm)	10.0	16.5	21.0	25.0	29.0	41.0
f_c (kHz)	3.96	2.40	1.89	1.59	1.37	0.97

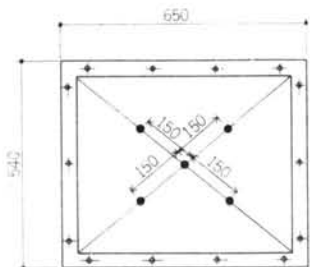
表—2 コインシデンス効果の限界周波数 f_c



図—1 試験体の平面図及び断面図



図—2 測定装置のブロックダイヤグラム



図—3 衝撃位置図 (●: 衝撃点)

計算結果を表—2に示す。

(2) 受音室および試験体の装着

床衝撃音レベルを測定する空間として、図—1に示すような硬質アクリル樹脂板で一面が開口となっている箱を造り、その開口面に剛な枠を介して試験体を装着する。また、箱内には拡散音場がえられるようにするため、多数の拡散板を設置してある。

(3) 加振装置

加振源には、できるだけ広い周波数範囲にわたって安定した力の周波数特性をうるとともに、十分な音圧レベルで床衝撃音を測定できるようにするため、予備実験を通じて半径2mmの鋼球を用いることにし、試験体上50cmの高さに電磁石で保持し、電源を切断することによって自由落下させ、試験体に単一衝撃を加えた。

(4) 受音装置

床衝撃音レベルの測定装置を、ブロックダイヤグラムで図—2に示す。

4.2 測定方法

衝撃位置は図—3に示す5点とし、各衝撃位置ごとに箱内の5点で床衝撃音レベルを $1/3$ オクターブ帯域別に測定する。

§ 5. 測定結果

各板厚ごとにえられた床衝撃音レベルの平均値と標準偏差を表—3に示す。周波数が1kHz以下の範囲では、受音箱の寸法が音の波長に比べて同等かまたは小さいので拡散音場がえられず、データのばらつきが大きくなっている。一方、1.25kHz以上では標準偏差は2例を除いて1dB程度となっており、床衝撃音レベルの板厚による変化をみるデータとしての信頼性は高い。

§ 6. 考察

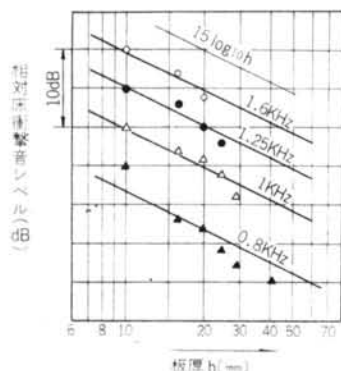
図—4～6は、それぞれコインシデンス効果の限界周波数 f_c 以下の周波数範囲、各板の f_c 域および f_c 以上の周波数範囲にわけて、測定結果表—3から、板厚10mmの床衝撃音レベルを基準にとり、板厚の変化にともなう床衝撃音レベルの変化をプロットした図である。

図中の実線は、§4.での解析でえられた式(20)、(21)、(22)を示したものである。

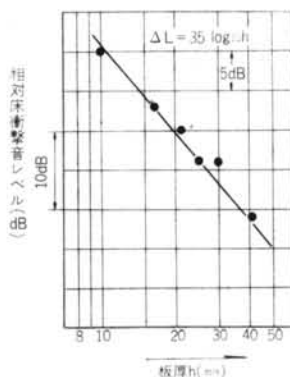
f_c 以下の周波数範囲での実験値を示した図—4では、

f (Hz)		630	800	1 K	1.25K	1.6K	2 K	2.5K	3.15K	4 K	5 K	6.3K	8 K	10K	12.5K
板厚 h	平均値	70	68	68	69	69	69	72	75	75	75	74	73	71	71
	標準偏差値	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
10mm	平均値	60	61	65	67	66	67	68	70	69	68	67	66	65	65
	標準偏差値	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
16.5mm	平均値	60	60	64	64	63	65	66	68	66	65	64	64	63	63
	標準偏差値	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
21mm	平均値	58	57	62	62	61	63	65	65	64	63	62	62	60	60
	標準偏差値	3	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
25mm	平均値	56	55	59	61	60	61	62	63	62	60	60	59	58	59
	標準偏差値	4	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29mm	平均値	51	53	54	56	57	58	58	59	58	57	56	55	54	54
	標準偏差値	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0	1
41mm	平均値														
	標準偏差値														

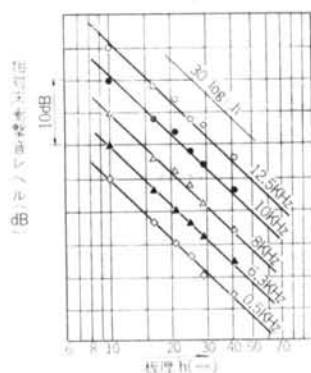
表—3 床衝撃音レベルの測定結果



図—4 板厚と床衝撃音の関係
($f < f_c$)



図—5 板厚と床衝撃音の関係
($f \approx f_c$)



図—6 板厚と床衝撃音の関係
($f > f_c$)

式(2)と必ずしも一致していないが、一応の傾向はとらえている。一致しない主な理由としては、受音箱内の音場が拡散的になっていないことのほか、放射係数 κ の導入時に設けた対象とする周波数範囲が、 f_c より十分小さいという条件を満たしていないことも考えられる。

図—5、図—6は、ほぼ理論式(2)、(3)と合致している。なお、図—6において放射係数 κ が1となる周波数範囲は、 f_c よりも十分大きい周波数との制限条件があるにもかかわらず、 f_c 近辺まで式(2)が成立っているのは注目すべきことと思われる。

§ 7. 結論

床版の厚さと床衝撃音レベルの関係を解析的に導き、これを硬質塩化ビニール板を床版にみたてた模型実験で確めた結果、板のコインシデンス効果の限界周波数 f_c [式(2)]以下の周波数範囲では検討すべき余地は残っているが、次のような結論がえられる。

床衝撃音レベルの変化量 ΔL は、

(1)板の1次固有振動数付近を除く f_c より低い周波数範囲では、 $\Delta L \propto 15 \log_{10} h$ となり、板厚が2倍になると4.5dBの低減効果がえられる。

(2) f_c に相当する周波数同士の比較では $\Delta L \propto 35 \log_{10} h$ となり、板厚が2倍になると11.5dBの低減効果がえら

れる。

(3) f_c より高い周波数では $\Delta L \propto 30 \log_{10} h$ となり、板厚が2倍になると 9dB の低減効果がえられる。

なお、上にえられた結論の適用にあたっては、解析過程で示してあるように、床衝撃音の発生が専ら板の屈曲

振動に支配されているという条件があることに留意する必要がある。板中に生じる縦波振動による音響放射が、床衝撃音発生に大きく寄与するケースでは適用できない。このケースは、板が非常に厚い場合に生じると思われる。この問題は今後の検討課題としたい。

<参考文献>

- 1) R. Clark Thomas: "The Driving-Point Impedance of an Infinite Solid Plate" J. Acoust. Soc. Am. Vol. 17, No. 4 (1946) pp. 334~336
- 2) L. Cremer, M. Heckl & E. E. Ungar: "Structure-Borne Sound" Springer (1973)
- 3) 荒井昌昭: "相關法による音響放射率の計算" 日本音響学会講演論文集 昭和39年10月 pp. 79~80
- (その他の参考文献)
- 1) Leo L. Beranek: "Noise and Vibration Control" McGraw-Hill (1971)
- 2) B. G. Watters: "Impact-Noise Characteristics of Female Hard-Heeled Foot Traffic" J. Acoust. Soc. Am. Vol. 37 (1965) pp. 619~630
- 3) R. D. Foad, D. C. Hothersall & A. C. C. Warnock: "The Impact Insulation Assessment of Covered Concrete Floors" Journal of Sound and Vibration Vol. 33, No. 1 (1974) pp. 103~115
- 4) R. Breeuwer & J. C. Tukker: "Resilient Mounting Systems in Buildings" Applied Acoustics Vol. 9 (1976)
- 5) 永田 徳: "衝撃音のしゃ断について" 建築音響 No. 7 (Oct. 1966)
- 6) T. J. Schultz: "Alternative Test Method for Evaluating Impact Noise" J. Acoust. Soc. Am. Vol. 60, No. 3 (1976)
- 7) 早田保実: "パルス電子工学" 日刊工業新聞社 昭和34年
- 8) 桜井良文, 小畑耕郎: "振動・衝撃の計測" 朝倉書店 昭和42年
- 9) 高橋利衛: "振動工学演習" オーム社 昭和37年
- 10) 早坂・吉川: "音響振動論" 丸善 昭和49年
- 11) S. P. Timoshenko & J. N. Goodier: "Theory of Elasticity" McGraw-Hill (1970)
- 12) R. Melzig-Thiel & G. Meltzer: "Messung und Berechnung der Eingangsamplituden von Gebäudedecken" 7th I.C.A., Budapest (1971)
- 13) 山本照二: "音響モデルによる室内音響特性の検討法" NHK技術研究 25巻 (1973)
- 14) 橘秀樹, 石井聖光, 平野興彦: "N₂置換法による音響模型実験" 日本音響学会誌 26巻3号 (1971)
- 15) 折笠輝雄, 橘秀樹, 石井聖光: "遮音に関する模型実験" 日本音響学会建築音響研究委員会資料 資料番号AA73-10
- 16) 折笠輝雄, 橘秀樹, 石井聖光: "騒音対策模型実験のための模型用遮音材料の検討" 日本音響学会講演論文集 昭和48年5月 pp. 421~422
- 17) 橘秀樹, 石井聖光: "音響模型実験における相似則と実験方法" 日本音響学会誌 32巻10号 (1976) pp. 621~630
- 18) 松田由利, 橘秀樹, 石井聖光, 矢野博夫: "床衝撃音に関する縮尺模型実験について" 日本音響学会講演論文集 昭和52年4月 p. 263
- 19) M. Heckl & E. Rathe: "Relationship Between the Transmission Loss and the Impact-Noise Isolation of Floor Structures" J. Acoust. Soc. Am. Vol. 35 (1963) pp. 1825~1830
- 20) M. Heckl: "Structure-Borne-Sound in Buildings" Inter-Noise '75 (1975) pp. 335~342
- 21) 折笠輝雄, 久保田喜八郎: "衝撃源の形態と床衝撃音の周波数特性" 日本音響学会講演論文集 昭和51年10月 pp. 229~230
- 22) 折笠輝雄, 久保田喜八郎: "床厚と床衝撃音について一模型実験による検討" 日本音響学会講演論文集 昭和52年4月 pp. 266~267
- 23) 折笠輝雄, 久保田喜八郎: "床厚と床衝撃音について一その2一" 日本音響学会講演論文集 昭和52年10月
- 24) 日本音響材料協会編: "騒音対策ハンドブック" 技報堂 昭和48年