

建築構造躯体による固体音の伝搬について

—建築部材の交差部等の反射・透過性状—

久我新一
(東京都研究員)

1 はじめに

最近の騒音問題においては、固体音によるものが増加し、その対策の確立が求められている。

例えば、集合住宅において、上階床上の足音やとびはねの音、窓や扉の開閉音、給排水設備（便所、台所、浴室等）の音などは、建築構造躯体に衝撃や振動の外力が供給され、その振動が躯体中を伝搬して騒音を遠方の居室に伝える固体音障害の身近かな例であり、集合住宅内の「気になる騒音」の上位を占めている。このほかにトラックや地下鉄からの振動も、地盤中を伝搬してから建築躯体に振動を伝えて居室内に騒音を供給しており、工場機械や空調関係などの設備機器なども固体音を伴うものが多くなっている。空气中を伝わる音に対しては、吸音・遮音・防音壁などの対策が確立されてきているが、固体音については防振・緩衝・制振などの基本的な対策資料も上記生活騒音範囲では十分に整っていない。このために建築構造躯体内の固体音の伝搬性状を適確に把握し、固体音対策に結びつけることが必要になってきている。

固体音の取扱いについてはL. Cremerらの著書¹⁾で初めて集大成され、空気音と異なって固体中の縦波・曲げ波・表面波・振り波・剪断波など多くの波を取扱う必要があり、測定も建築躯体の内部の波を、躯体の外側からピックアップで波の種類と振動のベクトル量を判断しながら行うなど解析も実測も新しい手段を必要とし、対策技法も多面に亘ることを示している。安岡²⁾は、固体音対策の基礎事項を取りまとめるとともに、床衝撃音、給排水設備音、ピアノ音などの固体音

対策手法を示している。

しかし建築躯体中の固体音の伝搬性状についての予測計算は未だ困難な状況にあって、マクロな立場から実測によって距離減衰を検討し³⁾、またミクロな立場から建築部材内の振動伝搬性状が検討されている段階といえよう。

本稿では、藤原の方法⁴⁾を用い、建築部材の直角交差部、隅角部等節点の断面の異なる組合せについて、反射・透過率の数値計算を行った結果を要約して報告し、今後の固体音伝搬性状の検討の一資料としたい。

2 計算式

本報では詳細は省略するが、藤原の方法は、先ず部材の節点に注目し、横方向振動速度（ x y 2方向）に関して、一部材からの入射により生ずる反射・透過波が縦波と曲げ波と近傍波^(注1)で成るものとして平衡式をたてる。平衡式の数は部材数 $\times 2$ （ x , y 2方向）であるが、これらには部材数 $\times 3$ （波の3種）の未知数（速度伝搬率）を含んでいる。したがって平衡式に関して境界条件を与えて未知数の数だけの関係式を求める。すなわち十字型でいえば節点に関して、①各部材の横方向速度振幅が x 方向と y 方向の、それぞれに等しいことから6本、②各部材の回転角速度が等しいことから3本、③各部材から働く剪断力が x 方向、 y 方向で釣合うことから2本、④各部材による曲げモーメントの釣合いから1本、の計12本の多元連立1次方程式を求め、その各係数を使用部材の物性と寸法を

注1 空気音の場合は、境界面で「粒子速度 v の連続」と「音圧 p の釣合い」の2条件を連立させて、音圧反射率 r 透過率 t を解く。固体音の場合は、場の変数が「横方向振動速度 v 、角速度 ω 、剪断力 F 、曲げモー

メント M 、の4種のため、1つの境界面でも4種のパラメーターが必要となる。このために境界面から距離とともに減衰する近傍波の反射率 r_j と、透過率 t_j が定常成分に関する反射率 r 、透過率 t のほかに導入された。

用いて導入し、電算機を用いて解くもので実用性が高い。

3 計算条件

(1) コンクリート構造体を想定し、ヤング率(E) 2.6×10^{10} (N), 比重量(γ) 2.3×10^8 (kgf/m³) ポアソン比(σ) 0.17を用いる。

(2) 柱と梁の直角節点部のエネルギー反射率およびエネルギー透過率を算定するものとし、節点部の形式、として+形、⊥形、┌形、および└形を採りあげる。

(3) 柱と梁の幅は単位幅とし、その厚さの組合わせを変化させながら計算する。すなわち、図1に+形の節点の例を示したが、部材番号を時計回りに①~④にとり、部材の厚さは、 $h_1 = h_3$, $h_2 = h_4$ とし、厚さ比 $n = h_2/h_1$ を 0.25 ~ 4 に変化させる。

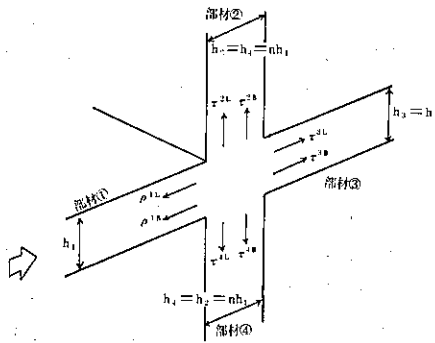


図1 十字型結合部モデル

(4) 部材の長さは十分に長いものとし、節点以外からの反射波は無視する。

(5) 入射波は、部材①から節点に入るものとし、曲げ波(B)と縦波(L)の入射について別個に計算する。

(6) 部材①からの入射によって、部材①の反射率 ρ^{1B} , ρ^{1L} , 部材②などへの透過率 τ^{2B} , τ^{2L} などが算定されるが、一般に、部材①からの曲げ波入射による部材①への縦波の反射率を ρ^{1L} のように書く。

(7) 計算は図1の+形の場合、4種の近傍波を含み、12種の伝搬率を持つため、12元連立方程式を解くことになるので大型計算機(東京理科大 IBM370)を用いる。なお、計算の実行は、田中治(東京理科大学工学部建築学科・助手)が担当した。

(8) 計算結果は、縦軸に伝搬率、横軸に周波数を表わすパラメータ $\beta^2 = (C_{B1}/C_{L1})^2 = 2\pi h \cdot f \sqrt{\gamma/12E}$ を目盛って示す。

4 計算結果と二三の考察

これらの計算結果のうちで特に+形に関するnによる変化の概要は、別報⁵⁾で報告しているので、ここでは先ず、+形、⊥形、┌形、└形の各形について、n = 1の場合の例を、曲げ波入射に関して図2~5に、縦波入射に関して図6~9に示した。これらによって次の考察ができる。

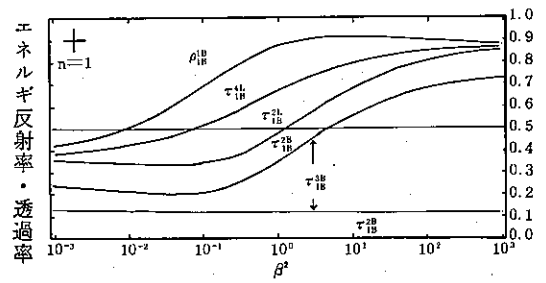


図2 十字型結合部へ曲げ波が入射した場合

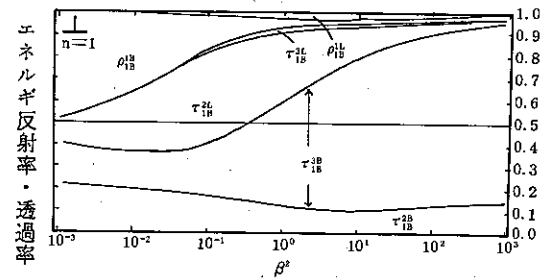


図3 T字型(⊥)結合部へ曲げ波が入射した場合

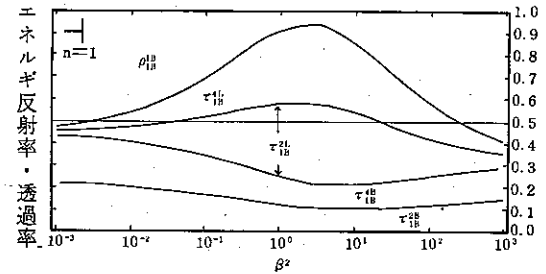


図4 T字型(┌)結合部へ曲げ波が入射した場合

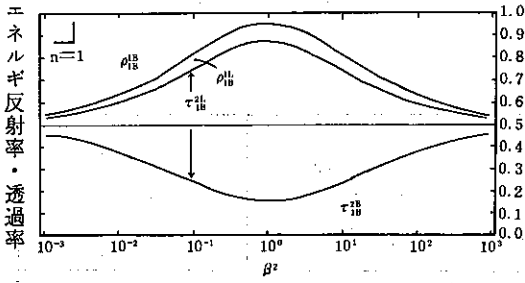


図5 L字型(┘)結合部へ曲げ波が入射した場合

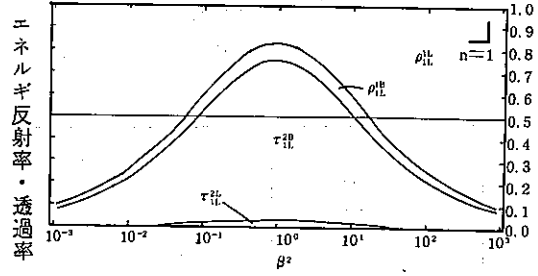


図9 L字型(┘)結合部へ縦波が入射した場合

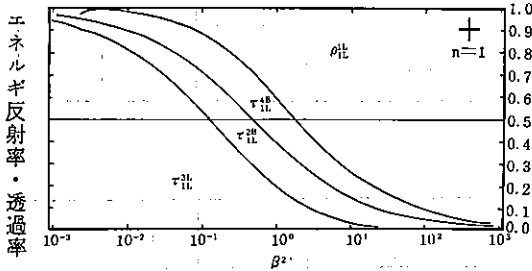


図6 十字型結合部に縦波が入射した場合

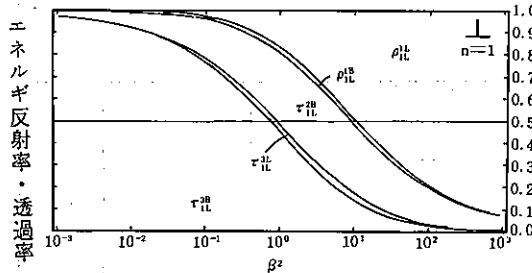


図7 T字型(┘)結合部へ縦波が入射した場合

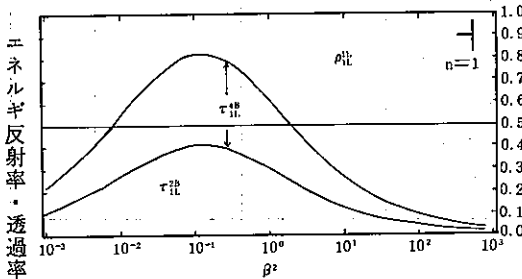


図8 T字型(┘)結合部へ縦波が入射した場合

(1) 曲げ波入射 (図2~5) の場合

① 実用上重要な8つの伝搬率のうちで、 ρ_{1B}^{1L} , τ_{1B}^{3L} は発生が少ない。特に、入射波に対して上下対称の+形(図2)と-形(図4)では無視できる。

② 上下対称形(図2, 4)では $\tau_{1B}^{2L} = \tau_{1B}^{4L}$ かつ $\tau_{1B}^{2B} = \tau_{1B}^{4B}$ である。

③ -形(図5)と+形(図4)を比較すると、近似的に図5の τ_{1B}^{2B} と τ_{1B}^{2L} がそれぞれ図4の $\tau_{1B}^{2B} + \tau_{1B}^{4B}$, $\tau_{1B}^{2L} + \tau_{1B}^{4L}$ に等分される傾向が見られる。また図5では図形が $\beta^2 = 1$ を中心に周波数に関して左右対称で、 $\beta^2 = 1$ において ρ_{1B}^{1L} , τ_{1B}^{2L} が最大、 $\beta^2 \gg 1$ および $\beta^2 \ll 1$ では $\rho_{1B}^{1B} \sim \tau_{1B}^{2B} \sim 0.5$ となる。図4では対称性がやや崩れている。

④ 図2(+形)と図3(┘形)を比較すると、 ρ_{1B}^{1B} は図2の方が見掛けの剛性が大きいために増加し、近似的に図2の $\tau_{1B}^{2L} + \tau_{1B}^{4L}$, $\tau_{1B}^{2B} + \tau_{1B}^{3B} + \tau_{1B}^{4B}$ が、それぞれ図3の τ_{1B}^{2L} , $\tau_{1B}^{2B} + \tau_{1B}^{3B}$ と周波数をずらすと形状が重なりあう。特に上下対称の図2の場合、 $\tau_{1B}^{2B} = \tau_{1B}^{4B}$ で周波数による変化がなく(注2)、また $\tau_{1B}^{2L} = \tau_{1B}^{4L}$ でその値は $\beta^2 \sim 0.5$ で最大(約0.2)となり、 $\beta^2 \gg 0.5$ と $\beta^2 \ll 0.5$ で消滅する。一方 ρ_{1B}^{1B} と τ_{1B}^{3B} は周波数に対して消長が逆傾向を持ち、 $\beta^2 \ll 1$ で $\rho_{1B}^{1B} \sim 0.6$, $\beta^2 \gg 1$ で $\tau_{1B}^{3B} \sim 0.6$ となる。図3ではそれらの関係がやや崩れている。

(2) 縦波入射 (図6~9) の場合

① 8つの伝搬率のうちで ρ_{1L}^{1B} , τ_{1L}^{2L} , τ_{1L}^{4L} , τ_{1L}^{3B} の発生が少なく、特に上下対称形の+形(図6)と-形(図8)では全く無視できる。

注2 この値は、 $\tau_{1B}^{2B} = \tau_{1B}^{4B} = 0.5 / (n^4 + n^{-4})^2$ となる。¹⁾

表1 コンクリート部材の組合わせ(n)による垂直入射時の反射率(ρ)と透過率(τ)の概数

α. 曲げ波入射の場合 $E = 2.6 \times 10^{10} (N)$ $\rho = 2.3 \times 10^8 (kg/m^2)$ $\sigma = 0.17$
 $h_1 = 0.15 (m)$ $n = h_2/h_1$

イ) +形

ρ, τ	ρ_{1B}^{1L}			ρ_{1B}^{1B}			$\tau_{1B}^{2L}(\tau_{1B}^{4L})$			$\tau_{1B}^{2B}(\tau_{1B}^{4B})$			τ_{1B}^{3L}			τ_{1B}^{3B}			備考
	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	
1:4	-	-	-	0.95	0.93	0.85	0.01	0.02	0.06	0.01	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-	図2参照
1:1	-	-	-	0.58	0.51	0.33	0.03	0.07	0.16	0.13	0.13	0.13	-	-	-	0.10	0.10	0.10	
1:1/4	-	-	-	0.39	0.25	0.08	0.10	0.18	0.19	0.01	0.01	0.01	-	-	-	0.39	0.36	0.50	

ロ) ⊥形

1:4	-	0.01	0.01	0.91	0.86	0.71	0.03	0.08	0.21	0.05	0.04	0.04	-	0.01	0.01	-	-	0.01	図3参照
1:1	-	-	0.01	0.48	0.37	0.17	0.11	0.25	0.41	0.22	0.21	0.18	-	-	0.01	0.19	0.16	0.21	
1:1/4	-	-	-	0.30	0.14	0.03	0.31	0.41	0.29	0.02	0.01	0.01	-	-	-	0.37	0.43	0.67	

ハ) ⊥形

1:4	-	-	-	0.95	0.93	0.84	0.01	0.02	0.06	0.02	0.01	0.01	図4参照					
1:1	-	-	-	0.52	0.47	0.32	0.02	0.06	0.16	0.22	0.21	0.18						
1:1/4	-	-	-	0.78	0.61	0.28	0.06	0.15	0.32	0.05	0.05	0.04						

ニ) ⊥形

1:4	0.01	0.02	0.02	0.91	0.85	0.69	0.03	0.11	0.25	0.05	0.04	0.05	図5参照					
1:1	0.01	0.03	0.07	0.45	0.38	0.20	0.08	0.20	0.47	0.46	0.39	0.26						
1:1/4	-	-	-	0.73	0.46	0.16	0.22	0.50	0.80	0.05	0.05	0.04						

注1 各周波数で $\Sigma\rho + \Sigma\tau = 1$

注2 -は 0.01 以下を示す

表2 コンクリート部材の組合わせ(n)による垂直入射時の反射率(ρ)と透過率(τ)の概数

b. 縦波入射の場合 $E=2.6 \times 10^{10}$ (N) $\rho=2.3 \times 10^3$ (kg/m³) $\sigma=0.17$

$h_1=0.15$ m $n=h_2/h_1$

イ) +形

ρ, τ	ρ_{1L}^{1L}			ρ_{1L}^{1B}			$\tau_{1L}^{2L}(\tau_{1L}^{4B})$			$\tau_{1L}^{2B}(\tau_{1L}^{4B})$			τ_{1L}^{3L}			τ_{1L}^{3B}			備 考
	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	10	100	1KHz	
1:4	0.08	0.30	0.65	-	-	-	-	-	-	0.15	0.21	0.14	0.61	0.28	0.06	-	-	-	図6参照
1:1	-	0.01	0.09	-	-	-	-	-	-	0.03	0.07	0.16	0.94	0.84	0.58	-	-	-	
1: $\frac{1}{4}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.03	0.99	0.98	0.93	-	-	-		

ロ) ⊥形

1:4	0.01	0.05	0.25	-	0.01	0.01	-	-	-	0.11	0.25	0.39	0.87	0.69	0.34	-	0.01	0.01	図7参照
1:1	-	-	0.02	-	-	0.01	-	-	-	0.02	0.06	0.16	0.97	0.93	0.79	-	-	0.01	
1: $\frac{1}{4}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.03	0.99	0.99	0.97	-	-	-		

ハ) ⊥形

1:4	0.20	0.28	0.64	-	-	-	-	-	-	0.40	0.36	0.18	図8参照					
1:1	0.77	0.50	0.18	-	-	-	-	-	-	0.11	0.25	0.41						
1: $\frac{1}{4}$	0.96	0.91	0.76	-	-	-	-	-	-	0.02	0.04	0.12						

ニ) ⊥形

1:4	0.60	0.27	0.23	0.01	0.02	0.02	-	-	-	0.39	0.71	0.75	図9参照					
1:1	0.91	0.77	0.44	0.01	0.03	0.07	-	-	-	0.08	0.20	0.47						
1: $\frac{1}{4}$	0.98	0.96	0.87	-	-	-	-	-	-	0.02	0.04	0.13						

注 表1の注を参照

- ② 上下対称形では $\tau_{1L}^{2B} = \tau_{1L}^{4B}$ である。
- ③ J形(図9)とI形(図8)によれば、 ρ_{1L}^{1L} および τ_{1L}^{2B} (τ_{1L}^{4B}) に著しい周波数変化がみられ、特に図9においては $\beta^2 = 1$ に関して左右対称であり、 ρ_{1L}^{1L} の値は $\beta^2 = 1$ で 0.15、 $\beta^2 > 1$ と $\beta^2 < 1$ で 0.9を示す。図8では対象の中心が $\beta^2 = 10^{-1}$ に移動している。
- ④ 図6(+形)と図7(⊥形)によれば、+形の方が見掛けの重量が大きいため ρ_{1L}^{1L} が大きくなっており、 $\beta^2 < 1$ のとき $\tau_{1L}^{3L} \sim 1$ 、 $\beta^2 > 1$ のとき $\rho_{1L}^{1L} \sim 1$ となる。また図6の $\tau_{1L}^{2B} + \tau_{1L}^{4B}$ が周波数をずらすと、図7の τ_{1L}^{2B} と同等となっている。特に上下左右対称の図6の場合、図形は $\beta^2 \sim 0.5$ を中心に逆対称となっており、 $\tau_{1L}^{2B} = \tau_{1L}^{4B}$ の値は $\beta^2 = 0.5$ で最大値(約0.2)を示し、 $\beta^2 < 0.5$ と $\beta^2 > 0.5$ では消滅してしまう。図7では $\rho_{1L}^{1B} = \tau_{1L}^{3B}$ のわずかな発生のほか、多少の崩れがみられ、周波数の中心は $\beta^2 = 2.5$ に移動している。

(3) 曲げ波入射と縦波入射の可逆則について

図2と図6、図4と図7、図3と図8、図5と図9を対比すると、それぞれの場合において各周波数で $\tau_{1B}^{2L(4L)} = \tau_{1L}^{2B(4B)}$ が成立していることを見ることが出来る。これらは可逆則(この場合、同じ部材の組合せにおいて周波数を固定するとB波が入射してL波の生ずる量は、L波が入射してB波の生ずる量に等しい)の成立を示している。

5 計算結果の二三の応用

(1) 図2~9などの計算結果は、コンクリートに関するものであり、縦波速度 $C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} = 3414$ m/s、曲げ波速度 $C_B = \sqrt{\frac{\pi C_L h f}{3}} = 78.65 \sqrt{hf}$ m/s、 $\beta^2 = 2\pi fh \sqrt{\rho/12E} = 5.278 \times 10^{-4} \times fh$ の場合に適用される。しかし曲げ波の伝搬計算においては $\lambda_B > 6h$ の制限があり、このとき $\beta^2 < 10^{-1}$ とならねばならないので $h = 0.15$ mを想定すると、 $f < 1000$ Hzについて利用できる。表1と2は、実用周波数域の代表周波数 1000 Hz ($\beta^2 = 10^{-1}$)、100 Hz ($\beta^2 = 10^{-3}$) について伝搬率の概数を、 n の影響をも含めて表記したものである。図2~9と併用することによって実構

造の伝搬率の推定の資料とすることが出来よう。

(2) 固体音問題では部材の曲げ波が特にコインシデンスの限界周波数 f_c 以上の周波数域で音響放射効率の大きいこと ($krd \approx 1$) で重要である (f_c においては $\beta^2 = (\frac{C_a}{C_L})^2 \approx 10^{-2}$ となり (C_a は空気中の音速)、部材①において表1の周波数範囲は f_c を含んでいる。入射材の部材が厚いとき ($n > 1$) その f_c は、さらに低音域に移る)。

そのような音響放射パワーは、 $P = krad \cdot \rho c \cdot V^2 S$ で算定されるが、表1の伝搬率はエネルギー透過率であるので、例えば $\tau_{1B}^{2B} = \frac{m_2 C_{B_2}}{m_1 C_{B_1}} \frac{V_2^2}{V_1^2} = n^{\frac{2}{3}} \left| \frac{V_2}{V_1} \right|^2$ の関係で V_2 の補正が必要となり、 $n < 1$ のとき伝搬先の放射が大きいことに注意する必要がある。

(3) 曲げ波の伝搬に関して表1を要約すると、実用周波数域で、 $\tau_{1B}^{2B} = \tau_{1B}^{4B}$ は+形では $n = 1$ で最大で 0.125 となり、③部材や④部材を欠くと大きくなること、 τ_{1B}^{3B} は $n = 1$ でほぼ 0.1 となり、 $n < 1$ のとき大きくなること、そして ρ_{1B}^{1B} が 0.5 内外と大きいことが見られる。

(4) 縦波入射による曲げ波成分の発生は、特にI形やJ形のような周辺節点で大きく、かつ周波数特性の大きな変化に注意が必要である。 $n = 1$ の場合、 f_c 以上の領域では $\tau_{1L}^{2B(4B)}$ が、それらでは 0.4 以上になる。+形でも高音域では $n > 1$ では τ_{1L}^{2B} が 0.15 以上となる。しかし τ_{1L}^{3B} は無視できる。すなわち縦波は直線的に縦波で伝搬し、隅角部や終端部で側方材に曲げ波を能率的に発生させる一般性があり、中間の交差部材では阻止性の強い厚い部材の場合に高音成分を曲げ波で伝える傾向がある。

6 むすび

本報では、コンクリート部材の節点に曲げ波と縦波が垂直に入射する場合の伝搬性状を計算結果を用いて検討した。今後は、斜入射の場合の性状変化の検討⁶⁾、模型試験による理論の適用性の検討、実大建築物での測定値との比較検討などを経て予測計算方法を組上げてゆきたい。その過程で部材の固有振動の影響、固有振動以下の低周波数域の挙動、 $\lambda_B < 6h$ の高音域の伝搬性状なども明らかにしてゆく必要がある。

参 考 文 献

- 1) Cremer, L. & M. Heckl: *Korperschall*, Springer Verlag (1966).
 (L. Cremer & M. Heckl translated by E. E. Ungar to English: *Structure-Borne Sound*, Springer Verlag (1973).)
- 2) 安岡正人: 固体音の防止, 騒音振動対策ハンドブック第2編第7章, 技報堂出版, PP 331 ~ 396, (1982).
- 3) 田中治・久我新一: 軽衝撃源による躯体振動伝搬の二, 三の実測例, 日本音響学会建築音響研究委員会資料, AA-81-10, (1981).
- 4) 藤原恭司: ブロックキングマスを有する結合部での固体音伝搬, 日本音響学会建築音響研究委員会資料, AA-81-11, (1981).
- 5) 田中治, 久我新一: 直交隅角部・交差部の断面寸法の組合せによる固体音の伝搬性状の変化の二三の計算例, 日本騒音制御工学会講演論文集, (1982).
- 6) 田中洪: 壁体と床板の交叉部における斜入射曲げ波の伝搬について, 日本音響学会建築音響研究委員会資料, AA-81-12, (1981).