

# 環境振動による固体伝搬音予測手法に関する研究（その5） 寄与解析システムの適用例

Research on the Prediction of Structure-Borne Sound Due to the Environmental Ground Vibration  
(Part 5. Application examples of the contribution analysis system)

小林 真人<sup>1</sup> 上明 戸 昇<sup>1</sup>  
Masahito Kobayashi Noboru Kamiakito  
塩田 正 純<sup>2</sup> 山下 恭 弘<sup>3</sup>  
Masazumi Shioda Yasuhiro Yamashita

## 【要旨】

筆者らは、これまでに多次元スペクトル解析を発展させ、入力信号同士に相関のある多入力-単出力系における寄与を明らかにする指標である MCODS を提案し、その妥当性を検討してきた。本報では MCODS 解析システムの概要を示し、集合住宅において地下鉄から発生した固体伝搬音・隣室間遮音性能・床衝撃音遮断性能に対する室内の影響部位について解析した結果について示す。

【キーワード】 固体伝搬音 多次元スペクトル解析 音響放射寄与

## 1. はじめに

集合住宅等においては建物内外部の振動源による固体伝搬音や、上階や隣室からの騒音に対する静穏設計がなされているが、入居者の生活状況や、事業者による販売時の説明と入居者の生活実感の相違などから、時として騒音・振動障害として問題化することがある。これらに関しては発生源側で対策を施すことが重要であるが、困難な場合は、伝搬経路や受音（振）部での影響部位を特定し対策を検討しなければならない。

複数の伝搬・放射系がある場合、各系に作用する入力信号間に相関があるため、個々の系による影響を明らかにすることは困難である。この問題について、筆者らはこれまでに多次元スペクトル解析理論<sup>1)</sup>を発展させ、相関のある多入力-単出力系において入力部位に対する寄与を明らかにする指標（Multiple Coherent Output Divided Spectrum, 以下 MCODS と記す）を提案<sup>2)</sup>し

ている。また、前報<sup>3)</sup>では MCODS の解析条件および解析精度について報告した。本報では MCODS 解析システムの概要を示し、竣工時の集合住宅において地下鉄から発生する固体伝搬音・隣室間遮音性能・床衝撃音遮断性能に関して寄与解析を適用した事例について紹介する。

## 2. 解析システムの概要

### 2.1 多入力 - 1 出力系の概要

多入力 - 1 出力系の例として、6 入力 - 1 出力系の系統図を図 1 に示す。入力信号  $X_i$  が伝達関数  $H_i$  を通過して信号  $U_i$  となり、外乱ノイズ  $N$  と合成されて出力信号  $Y$  が生じる系を考える。この時、出力信号  $Y$  を線形に表現できる程度をコヒーレンスにより表現する。通常は Ordinary Coherent Function (OCF) を使用するが、入力信号  $X_i$  間に相関がある場合に OCF のみでは、各入力信号で表現可能なエネルギーが個々に含まれることにより、

1. 本社 技術研究所 環境研究室  
3. 信州大学工学部 社会開発工学科 教授

2. 執行役員 常務

合成信号が出力信号 Y と一致しない問題が生じる．このような状態の解析パラメータとして Multiple Coherent Function (MCF) , Partial Coherent Function(PCF)が提案されている．MCF は入力信号  $X_i$  全てと出力信号 Y とのコヒーレンスを示す．PCF は特定の入力信号と出力信号 Y の関係を示すために，他入力信号で線形表現可能な要素，およびノイズを対象信号から削除して求めたコヒーレンスである．MCF から表されるスペクトルレベルを Multiple Coherent Output Spectrum (MCOS) , PCF から表されスペクトルレベルを Partial Coherent Output Spectrum(PCOS)とする．また，MCOS 内における PCOS の比を Partial Coherent Output Power Ratio(PCOPR)とする．

以上が文献<sup>1)</sup>により示されるパラメータであるが，筆者等は入力信号  $X_i$  が伝達関数  $H_i$  を通過した直後の  $U_i$  を求めることを考え，この値を MCODS として提案している．MCODS は図1に示す伝達関数  $H_i$  を求めることにより算出可能であり， $H_i$  は入力信号間の相関成分を除去した任意信号間の伝達関数  $L_{iy}$  から求めることが可能である<sup>2)</sup>．本報で示す事例では  $X_i$  を振動速度， $H_{iy}$  を放射面情報と空間情報を表す伝達関数， $N$  を非線形要素， $Y$  を音圧として扱う．

## 2.2 計算フロー

ソフトウェアはC言語+Windows API による DLL の計算部を Visual Basic 上から操作する構成で作成されており，図2のフローで示される内容となっている．

入力部は解析用初期パラメータ保持用のファイルを用意し，サンプリング周波数・入力信号数・FFT 長・平均回数・定常波形・衝撃波形・窓関数・トリガ値（衝撃波形のみ）のパラメータを保持する．また図3に示すようにプログラム上での設定も可能である．入力信号はキャリアプレーション・暗騒音・暗振動・解析対象に関して録音操作（AD 変換），もしくは WAV ファイル指定による取込を可能としている．

計算部は振動速度・音圧・クロススペクトル・残差スペクトル・各種伝達関数・OCF・PCF・MCF・PCOS・MCOS・PCOPR・MCODS に関してスペクトル，およびオクターブバンドレベル（1/1,1/3）を求める．また図

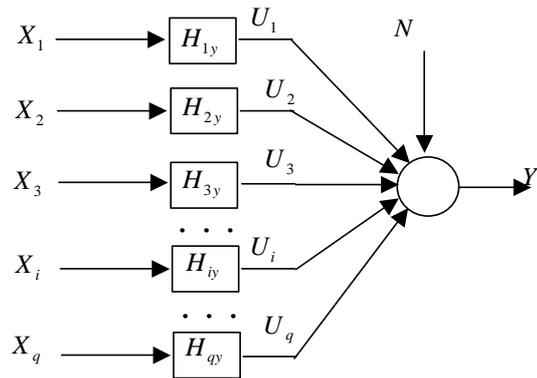


図1 6入力 - 1出力系の系統図

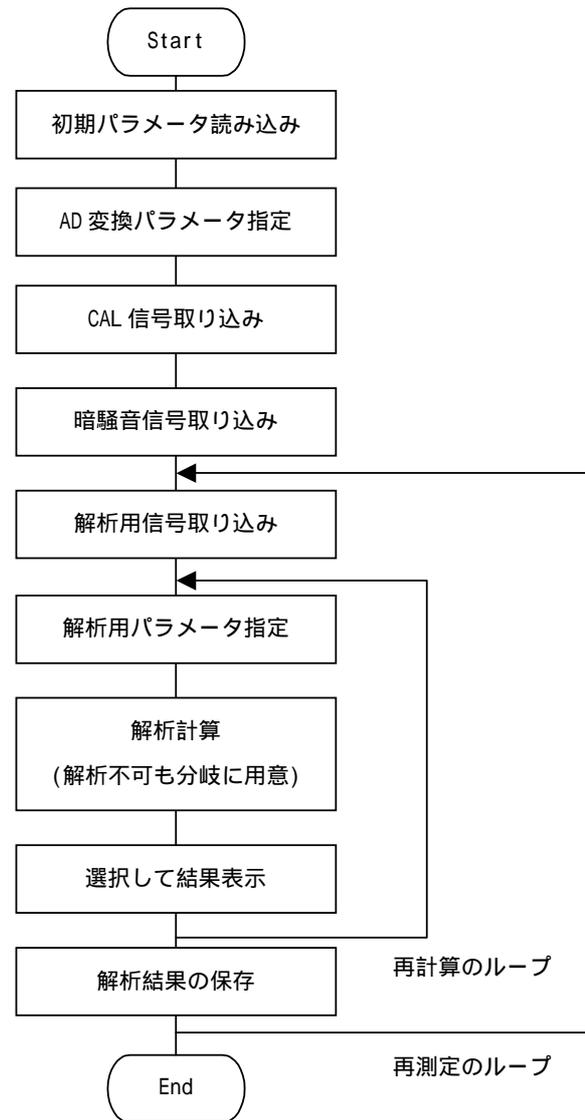


図2 解析フロー

4に示すように伝達関数の収束度を二乗和で表示し平均回数の妥当性を確認するとともに，図5に示すようなインパルス応答を求めることで伝達系の回り込み成分による影響の有無について確認を行える．これらの結果から

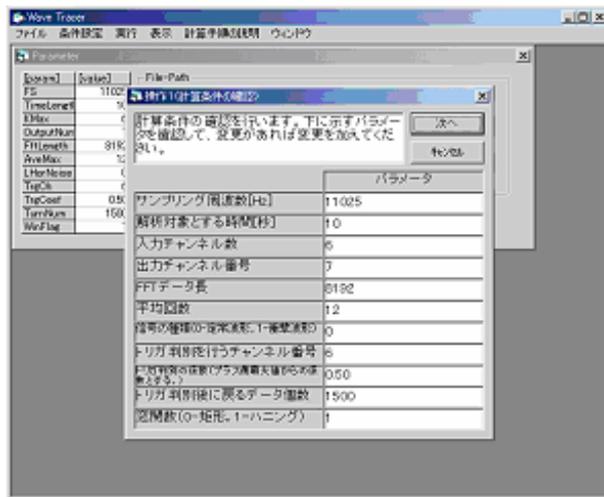


図3 解析パラメータ設定

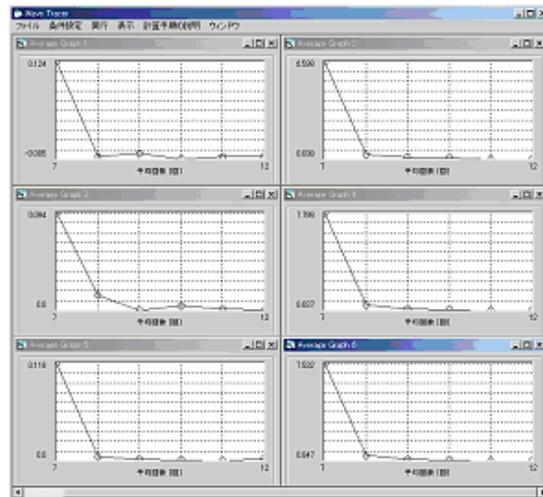


図4 伝達関数の収束度

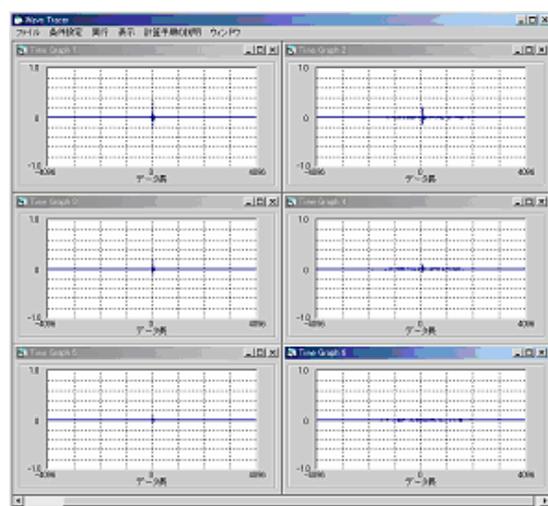


図5 インパルス応答

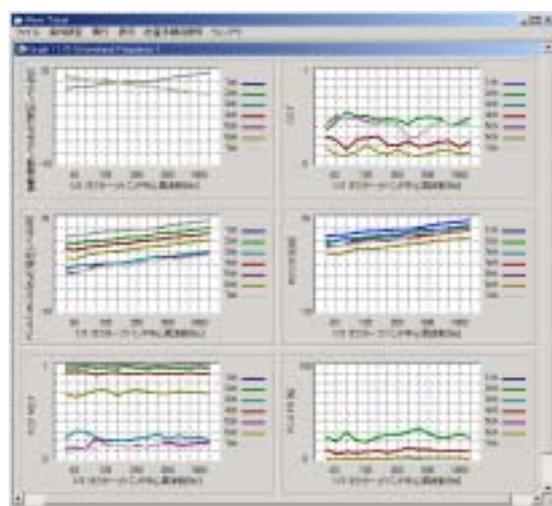


図6 解析結果の表示 (1/3oct.)

再解析が必要と判断した場合には、パラメータの再設定に戻る操作となる。計算結果は予め指定したフォルダ CSV 形式で保存される。また、図6に示すようにプログラム上で結果表示することができる。

### 3. 適用事例

竣工時の集合住宅において地下鉄から発生する固体伝搬音・隣室間遮音性能・床衝撃音遮断性能に関して寄与解析を行った。以下にこれらの結果を示す。

#### 3.1 地下鉄走行による固体伝搬音

固体伝搬音の解析は図7に示すように地下通過時の室6面の振動速度を入力信号、室中央部での音圧を出力とした6入力-1出力系として行った。解析条件はFFTデータ個数8192、サンプリング周波数11025Hz、12回平均としている。

図8に地下鉄通過時に室内で発生した固体伝搬音計測

結果の一例を示す。計測結果は地下鉄振動に起因する125Hzで卓越した特性となり、日本建築学会による室内騒音の評価はN-40である。同学会による室内騒音の適用等級で評価すれば2級の評価となるものであるが、暗騒音の周波数特性に比べて地下鉄による固体伝搬音は単一周波数で卓越するので、聴感上でも明らかとなるものである。このような状態に対して室各面のMCODSを解析した結果を図9に示す。125Hz帯域に着目すると最も影響が大きいのは外壁1であることが判る。外壁2も外壁1と同様にGL工法による壁面であるが、面積が小さいため外壁1のMCODSより小さく考えられる。ただし、室内で発生した固体伝搬音に対して絶対優位となる放射面が確認できない。このことを確認するためMCODSを室内音圧に対するエネルギー比として求めた結果を表1に示す。125Hzに着目すると外壁1による固体伝搬音への寄与は約30%であることが判る。

これらのことから、地下鉄振動のように建物躯体を拡散して伝搬する振動による固体伝搬音に関しては、集合住宅としての用途を考えた場合に受音側での対策は効果的でないことが示される。効果的な対策としては地

盤～建物躯体系における振動絶縁であり免震工法などの適用を検討すべきである。また、ホールや会議室等の特定空間のみの静穏性が要求される場合は浮き構造による振動絶縁が効果的であると考えられる。

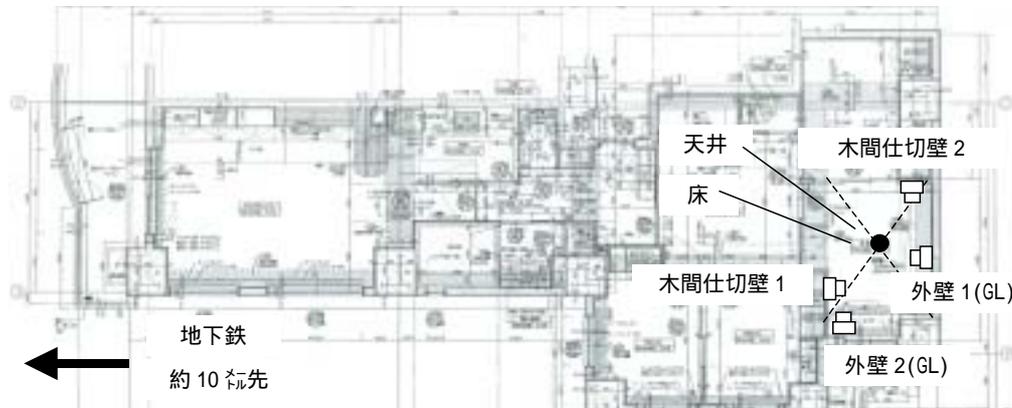


図7 固体伝搬音の計測位置

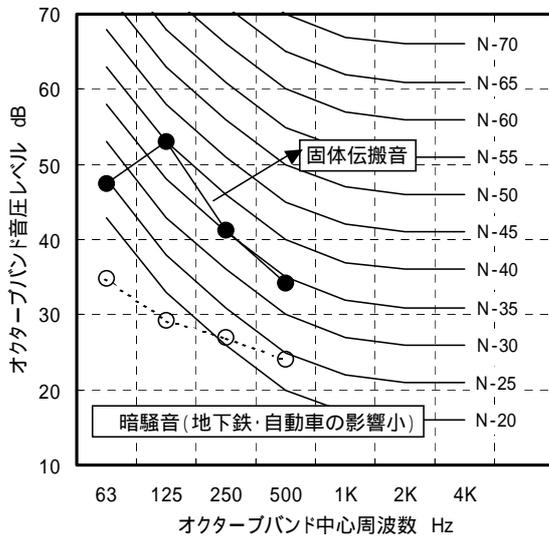


図8 固体伝搬音の計測結果

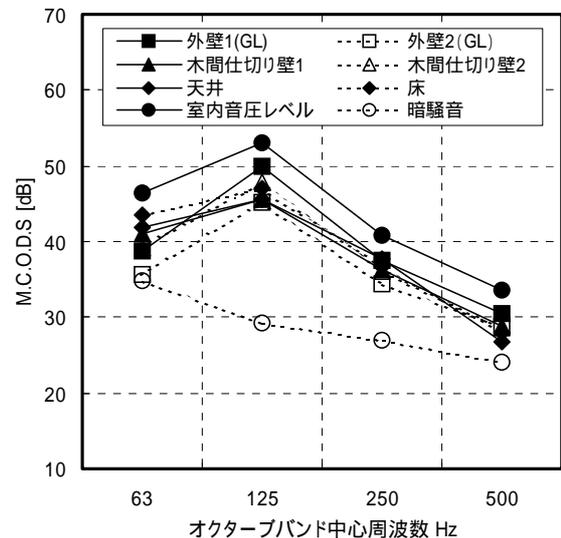


図9 室各面のMCODS

表1 固体伝搬音に対する各面の寄与

Oct. [Hz]	外壁1	外壁2	間仕切壁1	間仕切壁2	天井	床	SPL [dB]
	RC150+PB 12.5(GL)	RC150+PB 12.5(GL)	PB12.5 (LGS)	PB12.5+ 合板20	RC200+PB 9.5(AS80)	RC200 置き床	
63	0.11	0.05	0.19	0.12	0.22	0.31	46.4
125	0.31	0.11	0.12	0.20	0.11	0.16	53.1
250	0.20	0.10	0.15	0.15	0.22	0.17	40.8
500	0.25	0.17	0.17	0.16	0.11	0.14	33.5

### 3.2 空間遮音性能

解析は、図10に示すように音源発生時の受音室6面と窓面の振動速度を入力信号、室中央部での音圧を出力とした7入力-1出力系とした。解析条件はFFTデータ個数16384、サンプリング周波数11025Hz、30回平均としている。室間平均音圧レベ

ル差はJIS法に準拠して計測した。

室間平均音圧レベル差の計測結果を図11に示す。界壁はRC200mmであるが、2kHz・4kHzで遮音性能が低下し、側路伝搬音の影響が疑われる結果となっている。このことを確認するために音源発生時の受音室各面のMCODSを解析した結果を図12に示す。2kHz

以下の周波数領域においては界壁であるB面と外壁側のGL面であるA面が高い値を示しており、4kHzでは窓面のMCODSが高い値である事が分かる。さらに、表2に示すようにMCODSを室内音圧に対するエネルギー比として求めた結果から、2kHzの落ち込みは外壁面(RC150mm+PB12.5mm GL)から約40%弱の回り込み、4kHzの落ち込みは窓面から約60%の回り込みの影響である

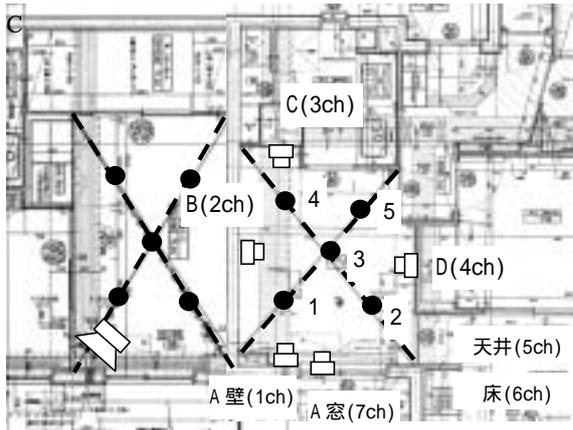


図10 室間遮音性能の計測位置  
(左：音源室，右：受音室)

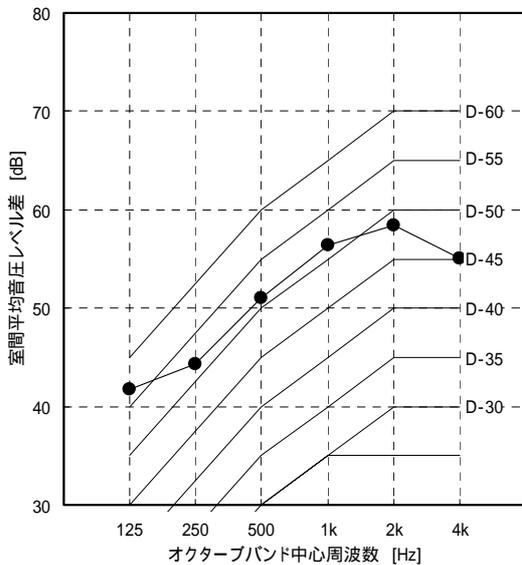


図11 室間遮音性能の計測結果

ことが確認できる。

集合住宅においては、隣室間遮音性能の目標値として日本建築学会1級(D-50 (JIS))を要求されるのが一般的である。しかしながら、実際の設計・施工においては界壁単体の遮音性能の検討はなされているものの、他伝搬経路に対する性能検討が不十分な事例が多い。室間遮音性能は隣り合った室相互間での遮音性能を評価するものであるから、床・壁・天井の全ての伝搬経路に対する遮音性能が目標値を満足しなければ、トータルとしての性能確保ができないことになる。特に外壁や窓からの回り込み音(側路伝搬音)に対する検討は十分に行うべきである。この意味において、例えばD-50相当の遮音性能が要求される場合には、外壁部でGL工法は採用すべきでなく、木下地とするか、GL工法を採用するのであれば、制振ボード等を増し貼りする等の対策が必要である。窓・サッシについては、単体でTs-25以上の音響透過損失を有するものを、設置距離を離すなどして配置する配慮が必要である。

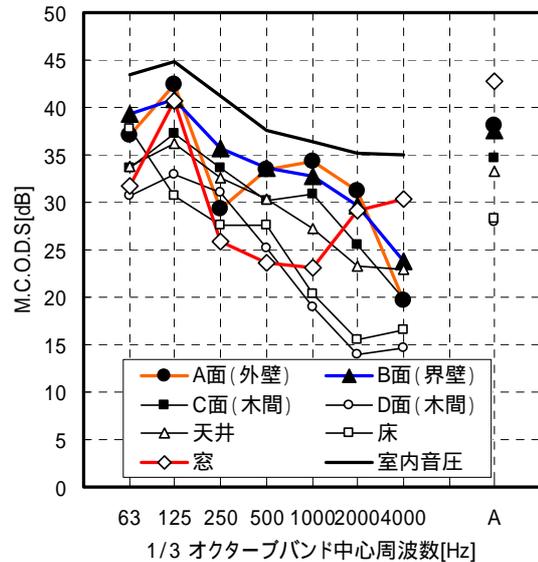


図12 室各面のMCODS

表2 室内音圧に対する各面の寄与

Oct. [Hz]	A面	B面	C面	D面	天井	床	窓	M.C.O.S [dB]
	外壁: RC150mm+ PB12.5GL	界壁 RC200mm	間仕切り PB12.5, LG S	間仕切り PB12.5, LG S	RC200mm+ PB9.5(LGS)	置き床 +RC200mm	窓 t=6mm	
63	0.19	0.32	0.09	0.04	0.09	0.22	0.06	43.4
125	0.32	0.23	0.10	0.04	0.08	0.02	0.22	44.8
250	0.08	0.34	0.21	0.12	0.17	0.05	0.03	41.2
500	0.28	0.30	0.13	0.04	0.14	0.07	0.03	37.6
1000	0.39	0.29	0.18	0.01	0.08	0.02	0.03	36.3
2000	0.36	0.25	0.10	0.01	0.06	0.01	0.22	35.1
4000	0.05	0.13	0.05	0.02	0.11	0.03	0.61	35.0

### 3.3 床衝撃音遮断性能

床衝撃音においては図 13 に示すように床衝撃時の下室 6 面の振動速度を入力信号, 室中央部での音圧を出力信号とした 6 入力 - 1 出力系での解析を行った。解析条件は FFT データ個数 16384, サンプリング周波数 11025Hz, 30 回平均としている。ただし, 重量衝撃時はトリガを設定した。床衝撃音レベルは JIS 法に準拠して計測した。ここで, 入力点は対象面の振動速度を多点で同時計測し, 面内で周波数特性の大きく異なることを条件に設定している。

床衝撃音レベル計測結果を図 14 に示す。重量床衝撃音レベルは L-55(決定周波数 63Hz 帯域), 軽量床衝撃音レベルは L-45(同 250Hz 帯域)である。室間音圧レベル差と同様に受音室各面の MCODS を図 15,

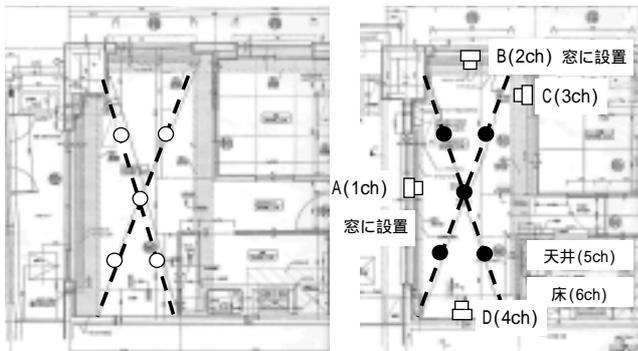


図 13 床衝撃音遮断性能の計測位置  
(左: 加振室, 右: 受音室)

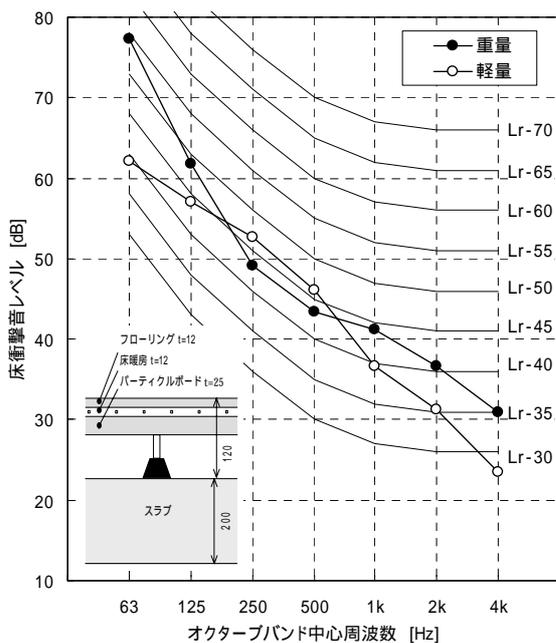


図 14 床衝撃音レベル計測結果

図 16 に示す。図 15 の重量衝撃音に着目すると, 衝撃音は 63Hz 帯域では天井面の MCODS が最も高く, 表 3 に示す寄与率から評価すれば, 約 60% が天井面からの放射音で構成されることが判る。床構造は RC 200mm に置き床(B

社製:AS120mm), および天井 (PB9.5mm, AS150mm) であるから, 解析結果は, このような床構造における一般的傾向を示すものである。一方, 床スラブと構造的に連続した界壁 (RC200mm) からの寄与も大きく, 注目すべき結果となっている。図 16 の軽量衝撃音に着目すると, 決定周波数である 250Hz 帯域での MCODS は, 界壁と間仕切り壁 (PB12.5mm, LGS) の値が大きく, 表 4 にも示すように天井面からの寄与は大きくないことが判る。床仕上げ構造はスラブとの接点は防振支持されているものの, 際根太が施工されているため, 上下躯体間の振動伝搬により受音室壁面からの寄与が大きくなっ

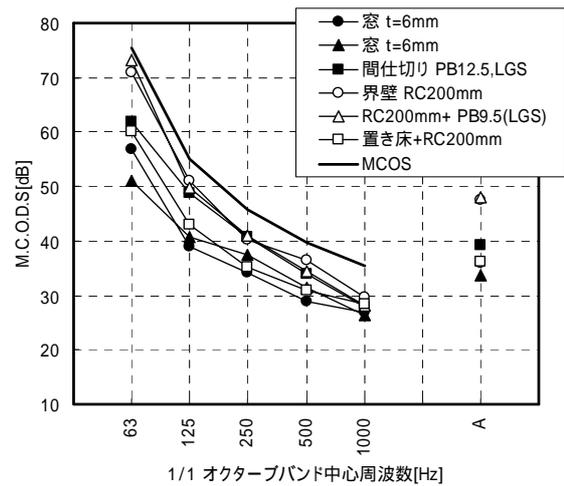


図 15 室各面の MCODS (重量)

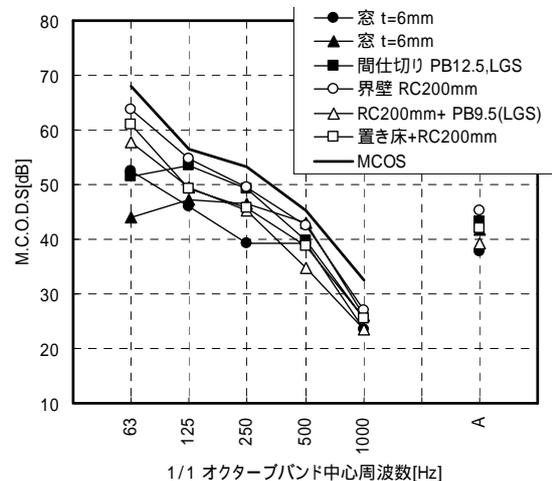


図 16 室各面の MCODS (軽量)

ていると推察できる。

上階から発生する床衝撃音の放射部位としてスラブ～天井系を主体として考えがちであるが、床仕上げ構造に入力された衝撃振動は、それを支持する部材から近接する空間の壁面等へ伝達され二次放射音（固体伝搬音）を発生させる。実験結果にも示した

ように置き床においては、特に際根太からの振動伝搬による影響は見逃せないものがある。また、際根太以外にも支持脚の防振や空気層の共振防止などの対策が重要である。これらの詳細は「住宅の品質確保の促進等に関する法律/住宅性能表示制度」に記載されているので参考にして頂きたい。

表 3 室内音圧に対する各面の寄与（重量）

Oct. [Hz]	A面	B面	C面	D面	天井	床	M.C.O.S [dB]	S.P.L [dB]
	窓 t=6mm	窓 t=6mm	間仕切り PB12.5,LGS	界壁 RC200mm	RC200mm+ PB9.5(LGS)	置き床 +RC200mm		
63	0.01	0.00	0.04	0.33	0.59	0.03	75.5	75.5
125	0.02	0.03	0.22	0.38	0.29	0.06	55.0	55.2
250	0.06	0.12	0.25	0.22	0.27	0.07	45.6	46.5
500	0.06	0.11	0.19	0.33	0.21	0.09	39.6	41.5
1000	0.13	0.12	0.16	0.25	0.17	0.18	35.5	39.2

表 4 室内音圧に対する各面の寄与（軽量）

Oct. [Hz]	A面	B面	C面	D面	天井	床	M.C.O.S [dB]	S.P.L [dB]
	窓 t=6mm	窓 t=6mm	間仕切り PB12.5,LGS	界壁 RC200mm	RC200mm+ PB9.5(LGS)	置き床 +RC200mm		
63	0.04	0.01	0.03	0.51	0.13	0.28	67.9	67.9
125	0.05	0.07	0.28	0.38	0.11	0.11	56.4	56.5
250	0.03	0.16	0.28	0.30	0.11	0.13	53.2	53.2
500	0.13	0.31	0.14	0.27	0.05	0.11	45.3	45.7
1000	0.11	0.19	0.17	0.25	0.11	0.18	32.6	35.5

#### 4. まとめ

本報では MCODS を適用し、住宅内の遮音性能への影響部位を検討した。本手法は、例えば入居後の苦情等により音源側で対策が取れない場合の、状況判断や対策の考え方として有効に寄与するものである。

現場調査に関して、関東建築支店建築部工務課大谷課長（元藤和根津作業所長）、および作業所の皆様にご多大なるご協力をいただきました。深謝致します。

#### 【参考文献】

- 1) Bendat, J.S : Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, New York, Wiley, 1980.
- 2) 小林, 他: 環境振動による固体伝搬音の放射に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集第 549 号, pp7-12, 2001.11
- 3) 上明戸, 他: 環境振動による固体伝搬音予測に関する研究(その4) 解析条件と解析精度に関する検討, とびしま技報, 2004.3

**Summary** MCODS, a parameter for multiple spectrum analysis, is an index to the contribution in the "multiple input / single output" model. The authors have proposed MCODS and examined its applicability. This part of the paper reports on the following: An outline of the MCODS analysis system; analysis results regarding the contribution of each surface of a room in an apartment house to the structure-borne sound due to ground vibration caused by subway; analysis results regarding the contribution of each surface to the sound insulation performance between adjoining rooms; and analysis results regarding the contribution of each surface to the floor impact sound insulation performance.

**【Keywords】** structure-borne sound, multiple spectrum analysis, sound radiation contribution