

環境振動による固体伝搬音予測手法に関する研究(その4) 寄与解析の条件および解析精度に関する検討

Research on the Prediction of Structure-Borne Sound Due to the Environmental Ground
Vibration (Part 4. Restriction and accuracy of contribution analysis)

上 明 戸 昇¹ 小 林 真 人¹
Noboru Kamiakito Masahito Kobayashi
塩 田 正 純² 山 下 恭 弘³
Masazumi Shioda Yasuhiro Yamashita

【要旨】

環境振動に起因して集合住宅等の居室内に生じる音を対象として室を構成する各面の寄与を求めようとする、入力信号間に相関があるために単純な伝達関数推定による解析方法では正しい解が得られない問題がある。この点について、筆者らは Julius S. Bendat の多入力/単出力系モデルにより相関のある入力信号から発生する個々の信号を求めて室各面の寄与を明らかにする手法を提案している。本報では、この手法において有用な解析を行うために必要な入力点数の検討、スピーカシステムによる解析値妥当性の検討、数値計算による SN 比の検討結果について報告する。

【キーワード】 環境振動 固体伝搬音 多次元スペクトル解析 寄与解析

1. はじめに

筆者らは鉄道や自動車等の交通振動や建設作業振動により建物内部で発生する固体伝搬音について、発生源・伝搬経路・受振(受音)部まで系統立てて予測する方法について検討している。前報(その3)¹⁾では多次元スペクトル解析²⁾の計算手法を利用して室各面の寄与に対応するパラメータとして Multiple Coherent Output Divided Spectrum (MCODS)を提案し、有用なパラメータであることを実験的に示している。本報では、MCODS 解析における解析条件および精度について実験および数値計算により検討した内容について報告する。第1に、室内の6面の寄与を明らかにするために必要な入力点数を実験的に検討した。第2に、スピーカシステムにより多入力/単出力系を作成して実験信号による MCODES を解析

し、計測条件に対する MCODES の妥当性を確認した。第3に、数値計算により MCODES の解析において共通成分、固有成分のノイズ混入の影響を確認した。以上の検討結果について報告する。

2. MCODES について

多次元スペクトル解析の計算手法に関する詳細は連報である次報(その5)³⁾に示す。建物外部から振動が入力し、その振動に起因して室内に固体音が発生する場合を想定する。この系は室内を構成する各面の振動(速度)情報を入力信号、室内音圧を出力信号として考えれば、多入力/単出力系のモデルとして扱うことができる。このとき取得可能な信号は、壁面振動とその振動に起因し

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

て発生する室内音圧である．これらの信号を取得して多次元スペクトル解析を行う事により，各入力チャンネルに対応する出力信号中の成分としてMCODSが求められる．得られたMCODSは，寄与レベルとして評価する事ができるパラメータである．

3．実験および数値計算

3.1 MCODES 算出に必要な入力点数

室内の6面の寄与を明らかにするために必要な入力点数を検討する．図1に計測システムを示す．RC造実験住宅において1F床面中央に設置した動電型加振機から1kHz以下のM系列信号を出力した．図2に振動加速度の計測点候補を示すが，133点を計測点候補として振動加速度の同期信号を取得した．得られた振動加速度信号を入力信号，音圧を出力信号としてサンプリング周波数11025Hz，FFTデータ長8192，窓関数をハニング，平均回数30回として解析した．

当初の解析予定では133入力/1出力系における各面のMCODESを求め6入力/1出力系におけるMCODESとの比較確認を行う想定で解析を進めていたが，計算途中で発散が生じる結果となった．発散挙動を示す図として，計算途中値の1つである残差パワースペクトル $S_{ii \cdot k!} (i=133)$ をプロットした結果を図3に示す．チャンネル変動の大きな変化を見るために25Hz(1/3 Oct.)から1000Hz(1/3 Oct.)の値をすべて黒の細線として表している．30チャンネルの残差計算以降，残差パワースペクトルの大きさが0となり，以降の値が正しく得られない．このような計算不能に陥る原因として以下の2点が考えられる．第一として，コンピュータの解析精度の限界が挙げられる．第二として，入力点の位置が近くなる事により，すべての入力信号を使用しなくとも出力信号を表せる状態になっている可能性がある．この問題については

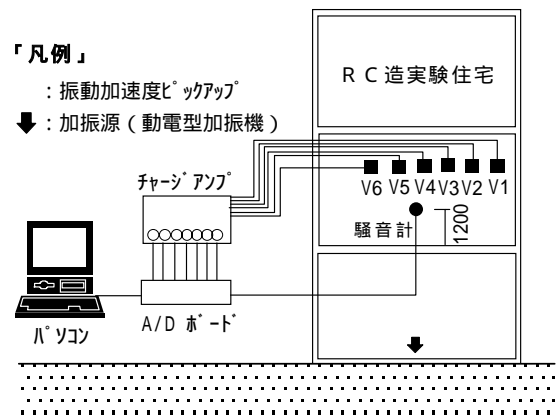


図1 計測システム

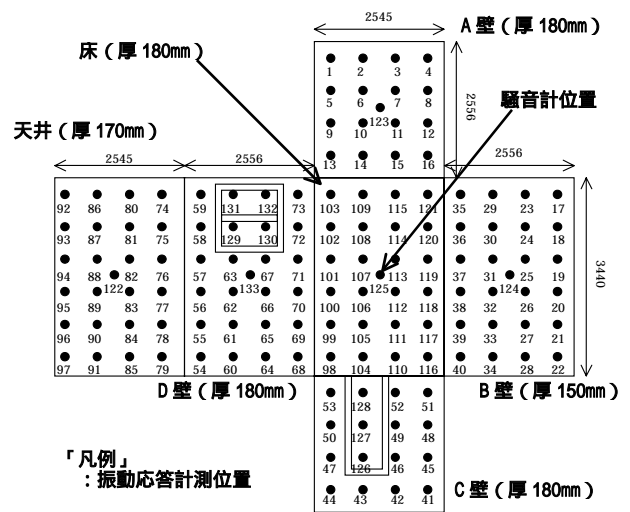


図2 振動加速度の計測点候補 (133点)

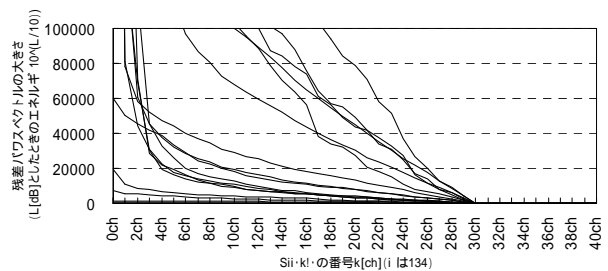


図3 残差パワースペクトルの大きさの変化

今後の検討課題として残すが，以上の挙動から今回は29入力以下の信号数による検討を行う事とした．

表1 解析パターン (入力点数の違いによる)

		A壁	B壁	C壁	D壁	天井	床	コメント
設定1	6ch	123	124	46	133	122	125	入力点数は各面に1点
設定2	12ch	6,11	25,32	46,127	62,67	82,89	106,113	入力点数は各面に2点
設定3	17ch	6,11,123	25,32,124	46,127	62,67,133	82,89,122	106,113,125	入力点数は各面に3点
設定4	17ch	5,12,123	24,33,124	45,50	61,133,130	81,90,122	105,114,125	入力点数は各面に3点
設定5	17ch	2,15,123	19,38,124	42,128	56,71,133	76,95,122	100,119,125	入力点数は各面に3点
設定6	24ch	1,6,7, 10,11,16	18,25,26 31,32,39	41,46,49, 53,126,127	55,62,63, 66,67,72	75,82,83, 88,89,96	99,106,107, 112,113,120	入力点数は各面に6点

*表中の[ch]はチャンネルを表し，本検討では「入力点数」にも対応する．

表1の解析パターンによるMCODS解析計算を行い、入力点数を設定1から設定6まで変えた場合について、各面のMCODSの変動を見るものとする。

解析結果を図4、図5、図6に示す。6入力、12入力、17入力と比べると、24入力は他の設定に比べてMCODSが大きい。今回は、30入力では解析が正確に行われているか保証されない事から24入力設定の時点で正しいMCODSが得られていない可能性がある。一方、17入力、12入力設定では、ほぼ同様の値が得られている。さらに、17入力は3パターンの場合について解析を行っているが、大きな変化の無いことを確認した。しかし、図4左の6入力設定を見ると、A壁の200Hz、250Hz(1/3 octave band)において約10dB程度の落ち込みが見られている。

しかし、6入力においてもA壁の結果のみが大きく異なる結果である事から、A壁の入力点が何らかの原因により、はずれた値となっている可能性がある。

この点をさらに調べるために、表2に示すA壁の入力点を中央点付近4配置と隅部1配置に変化させた場合のMCODSを求めA壁のMCODSの平均値に対する差を求めてあばれ値とし、図7に示す。図4左で落ち込みが見られる部分に対応する6chと端部設置点である6chの場合において値が大きく離れており6chについてみれば、200Hzであれば値-7.0dB、250Hzではあばれ値-8.0dBである。しかし、その他の中央点付近を入力点とした場合には、±5dB範囲内であることが確認できる。すなわち、今回の検討結果では、隅部の設置点では適切な値を

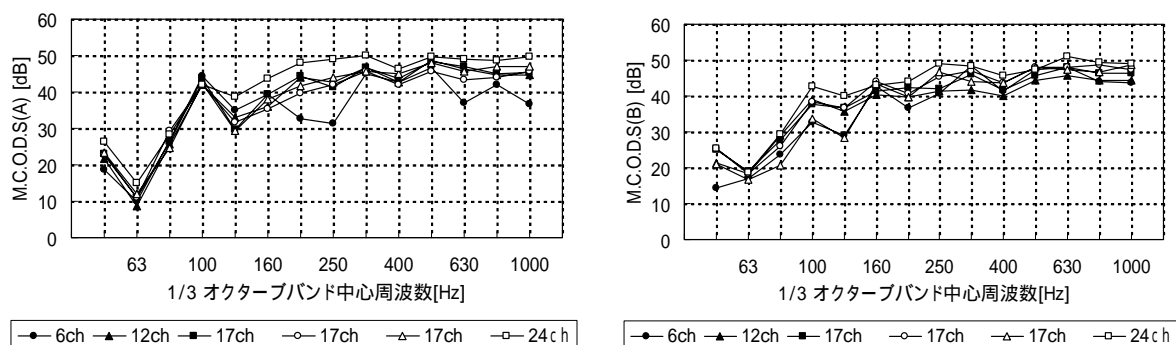


図4 入力点数の違いによる面毎のMCODS (左:A壁, 右:B壁)

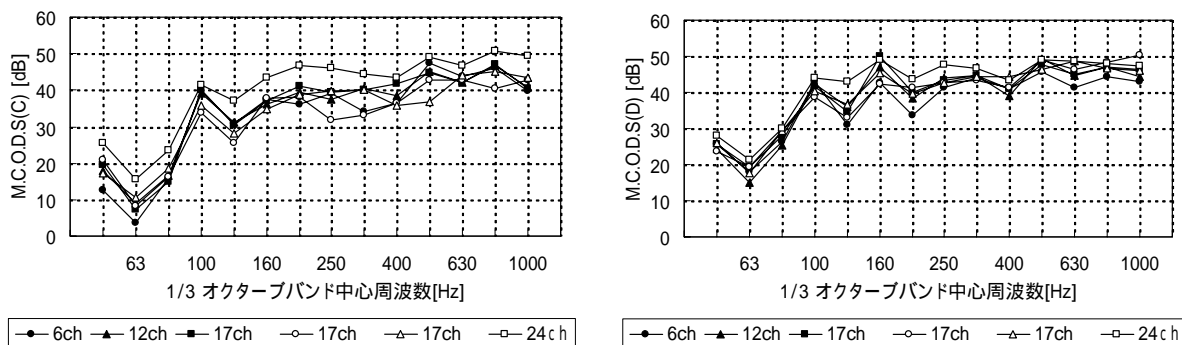


図5 入力点数の違いによる面毎のMCODS (左:C壁, 右:D壁)

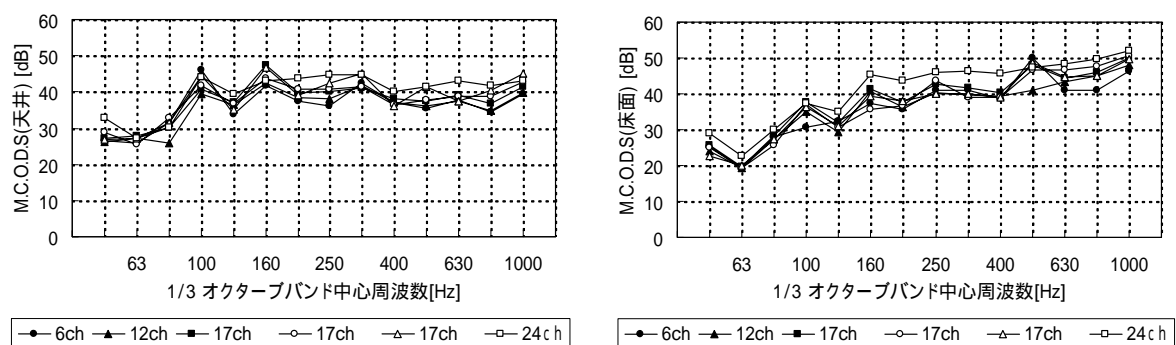


図6 入力点数の違いによる面毎のMCODS (左:天井, 右:床)

得る事が難しく、中央付近の設置点であれば適切な値が得られると考えられる。以上の結果から、中央点付近を設置点とする事により6入力/1出力の設定による解析で、各面に対応するMCODSが得られているものと考えられる。すなわち、中央付近を設置点として1面につき1点の振動を取得することで各面のMCODSが適切に得られる事を確かめた。

3.2 スピーカの多チャンネルシステムによるMCODS分析

6入力($X_i, i=1,2,\dots,6$) / 1出力($=Y$)からなる多入力/単出力系を想定し、6個のスピーカとマイクロホンを図8に示す要領で無響室内に設置する。計測は図9に示す計測システムにもとづき、まず表3に示す試験音源をスピーカ1から6まで順に出力し、個々のスピーカからの音圧(MCODS)を計測する。次に全てのスピーカから同時に出力し音圧(全出力 Y)を計測する。この時の個々のスピーカへの増幅前の入力信号と全出力から、6入力/1出力系におけるMCODSを解析する。解析はサンプリング周波数11025Hz, FFTデータ長8192,窓関数はハニング,平均回数30回として行う。解析されたMCODSと個々のスピーカからの音圧を比較し、両者が一致していればMCODSが解析上正しく得られていると判断できる。

表3に示す試験音源は、M系列信号により固有成分と共通成分の振幅比を任意に設定し作成したType1からType3,表2の設定6chの条件であるときの壁面等における速度信号からType4, Type4に対策を想定し、1と2の信号を12dB減じたものとしてType5を設定した。

音源Type別にMCODS解析値と実測値を比較したものを図10から図14に示す。ただし、スピーカ1の結果で例示する。図10は音源Type1による結果である。Type1は入力信号の固有成分が大きく、共通成分が小さい設定

表3 試験用音源の構成

Type	成分	スピーカの配置					
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
1	固有	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	共通	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2	固有	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	共通	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3	固有	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0
	共通	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1
4	速度	壁A	壁B	壁C	壁D	天井	床
5	速度	壁A	壁B	壁C	壁D	天井	床

表2 解析パターン(6入力 - 1出力)

	A	B	C	D	天	床
6ch	123	124	46	133	122	125
6ch	6	124	46	133	122	125
6ch	10	124	46	133	122	125
6ch	7	124	46	133	122	125
6ch	11	124	46	133	122	125
6ch	1	124	46	133	122	125

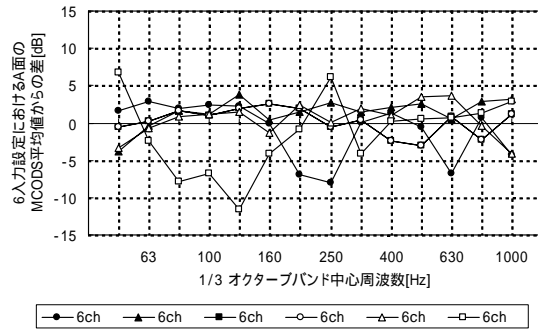


図7 6入力 - 1出力系のMCODS (A面入力点の平均値からのあばれ値)

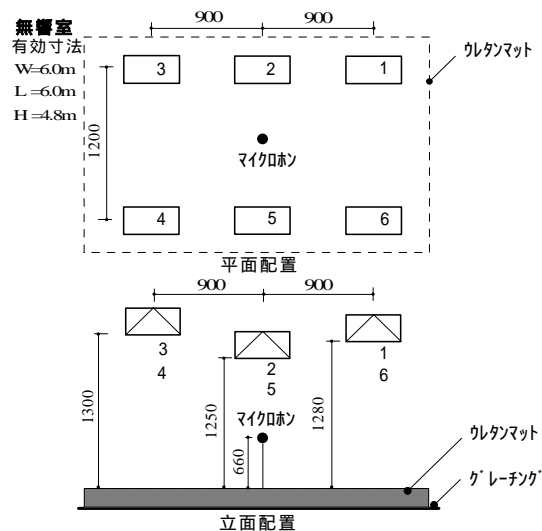


図8 スピーカーとマイクロホンの配置

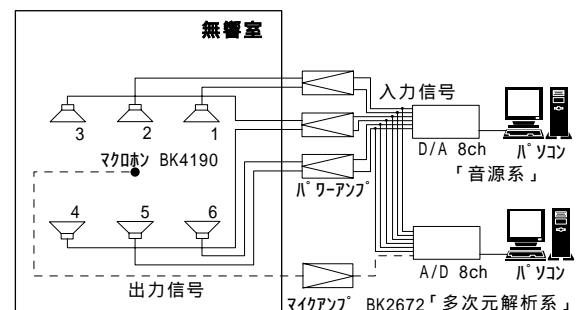


図9 計測システム

で, Ordinary Coherent Function (OCF) からも寄与が分離できる条件である。その結果, 当然であるが MCODS と単一スピーカ出力による値は一致し, 本研究で提案する MCODS で寄与の分析が可能なが示される。図 11

は音源 Type2 による結果である。Type2 は入力信号の固有成分が小さく共通成分が大きい設定である。この設定は前報¹⁾に示されているように固体伝搬音を対象とした入力成分構成に近い条件であり、OCF では寄与の分析が困難な設定である。この条件においても MCODS と単一スピーカ出力による値は一致し、MCODS により寄与の分析が可能なが示される 図 12 は音源 Type3 による結果である。これはスピーカ 1,3,5 と 2,4,6 で共通成分と固有成分の振幅比率が交互に異なる条件である。この条件での解析は、多次元スペクトル解析の評価項である Partial Coherent Function (PCF, 入力間相互の影響成分を取り除いた残差系における出力信号に対する入力信号の寄与率を示す) や、Partial Coherent Output Power Ratio (PCOPR, 線形表現される出力信号成分に対する入力信号固有成分の割合を示す) においても交互に異なる傾向を示す複雑な条件の入出力系を想定したものである

が、この条件においても MCODS が正しく得られていることが確認できる。図 13 は音源 Type4 による結果である。この設定は建物壁面等の中央部において取得した振動速度を入力したものであるが、同様の結果が得られている。

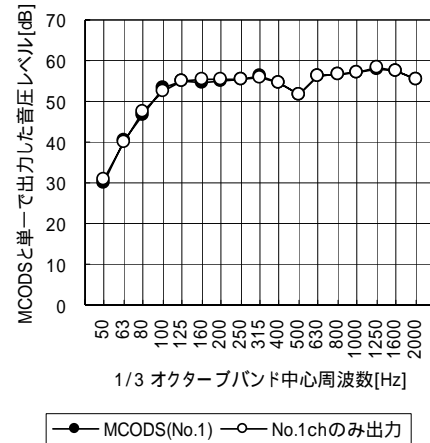


図 10 音源 Type1 での比較

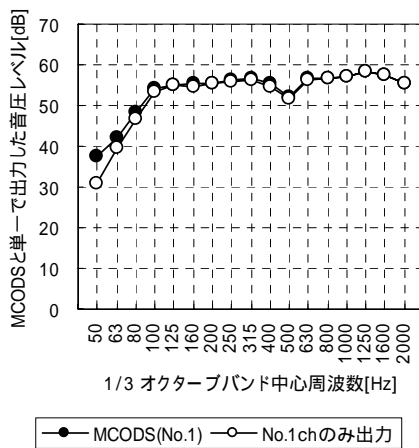


図 11 音源 Type2 での比較

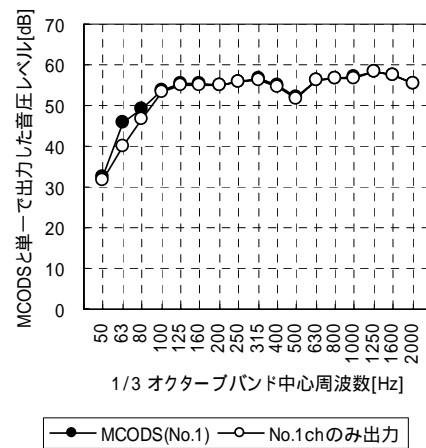


図 12 音源 Type3 での比較

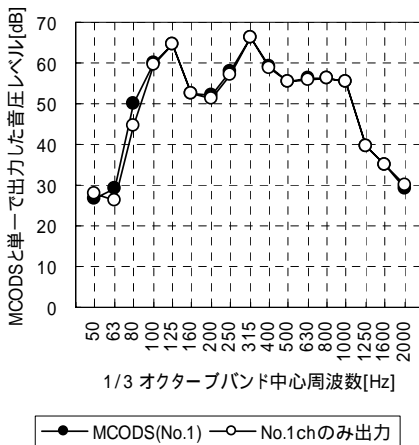


図 13 音源 Type4 での比較

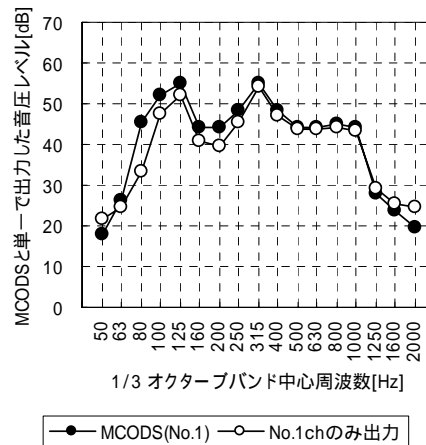


図 14 音源 Type5 での比較

また、面中央部以外の点での速度信号を入力した場合についても同様の結果が得られている。図 14 は音源 Type5 による結果である。この設定は対策を想定し、1 と 2 の入力を Type4 に比べて 12dB 減じた条件である。低音域で S/N の影響によると思われる若干の乖離が見られるが、MCODS の実測値と解析値はほぼ一致することが確認できる。各音源を比較すると、信号の構成条件が複雑になるほど若干ではあるが解析値と実測値に乖離が生じ、特に固体伝搬音で評価対象となる低音域でこの傾向が見られる。しかし、このように解析値と実測値に乖離が生じる傾向は、解析時の平均回数等により変化するものと考えられ、今後の検討課題である。

3.3 数値計算による誤差混入に対する MCODES の精度検討

数値計算により MCODES 解析における外乱ノイズ混入の影響を検討する。以下に計算対象とするモデル作成の操作を記す。

入力信号および出力信号の構成を図 15 に示す。k は離散時間であるとして M 系列信号 $m(k)$ を作成して基準信号とする。基準信号 $m(k)$ から重ならない部分を 8 個取り出し $m_0(k) \sim m_7(k)$ とする。また、入力信号、および外乱ノイズの共通成分比 $\alpha_1 \sim \alpha_7$ と固有成分比 $\beta_1 \sim \beta_7$ を決めておく。このとき、入力信号 $x_i(k)$ および外乱ノイズ $n(k)$ は以下のように表わされる(ただし、i は 1 ~ 6 である)。

$$x_i(k) = \alpha_i \cdot m_0(k) + \beta_i \cdot m_i(k) \quad \dots (1)$$

$$n(k) = \alpha_7 \cdot m_0(k) + \beta_7 \cdot m_7(k) \quad \dots (2)$$

信号 $x_i(k)$ に伝達関数 $h_i(\tau)$ の畳込み計算を行う。

$$u_i(k) = h_i(\tau) * x_i(k) \quad \dots (3)$$

式中の $u_i(k)$ は MCODES に対応する。信号 $u_i(k)$ とノイズ信号 $n(k)$ を合成して出力信号 $y(k)$ が得られる。

$$y(k) = \sum_{i=1}^6 u_i(k) + n(k) \quad \dots (4)$$

以上の操作中、(1)式、(4)式から得られる信号 $x_i(k)$ 、 $y(k)$ を数値計算用信号とする。数値計算信号は基準信号の振幅に係数をかけて作成している。そのため、基準

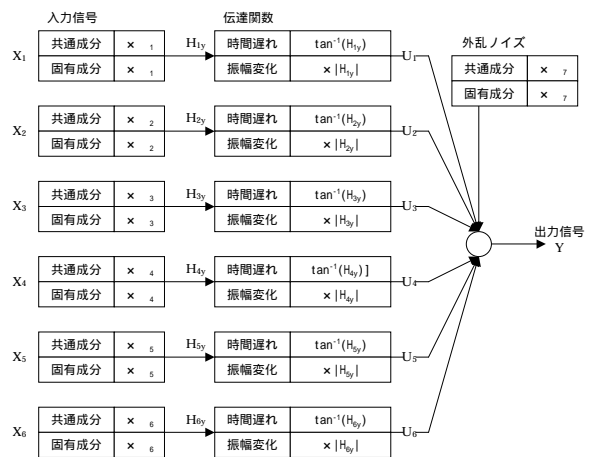


図 15 6 入力 - 1 出力系の想定図

表 4 数値計算の設定 A

	1 ~ 6	1 ~ 6	変化させるパラメータ
設定 1	× 1.0	× 0.1	α_7 を 0.1 倍から 2.0 倍まで変化
設定 2			β_7 を 0.1 倍から 2.0 倍まで変化

表 5 伝達関数の設定

	H1	H2	H3	H4	H5	H6
時間遅れ	3.4mSec	5.1mSec	3.7mSec	5.1mSec	3.7mSec	4.1mSec
振幅変化	× 1.0 (= -0dB)	× 0.6 (= -5dB)	× 0.6 (= -5dB)	× 0.3 (= -10dB)	× 0.3 (= -10dB)	× 0.2 (= -15dB)

信号からの係数を用いた SN 比を用いる事を考え、振幅情報による SN 比 [dB] とする。以下に計算式を示す。

$$SN \text{ 比} = 10 \log_{10} \frac{\sum \left(|H_i| \cdot \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \right)^2 + (\alpha_7^2 + \beta_7^2)}{(\alpha_7^2 + \beta_7^2)} \quad \dots (5)$$

計算設定は、表 4 に示すように入力信号の共通成分と固有成分の振幅倍率 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 、 $\beta_1 \sim \beta_6$ を決めておき、外乱ノイズの共通成分と固有成分である振幅倍率 α_7 、 β_7 を変化させるものとする。 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 、 $\beta_1 \sim \beta_6$ は、前報¹⁾ に示される実験室実験結果の傾向として固有成分比が小さくなる設定とした。表 4 に示す計算設定は、実測に近い入力信号の成分比を与えて、外乱ノイズが共通成分のみである場合(設定 1)と外乱ノイズが固有成分のみである場合(設定 2)にどのような差が生じるかを確認するための想定である。伝達関数の設定を表 5 に示す。伝達関数の時間遅れは図 2 の受音室壁面中央から、室中央に配置したマイクロホンまでの伝搬時間を計算した値とし、また全ての伝達系が同一とならないよう、時間遅れが同値の系では振幅変化が異なる様に設定する。解析条

件はサンプリング周波数 11.025kHz FFT データ長は 8192, 窓関数はハニング, 平均回数は 30 回とし, 外乱ノイズである γ あるいは γ を変化させたときの MCODS を求め, ノイズ振幅が分割計算に与える影響を検討した.

設定 1 の計算結果を図 16 に示す 共通成分が外乱ノイズであるとき 振幅情報のみによる SN 比の変化に対する MCODS の動きをみれば, SN 比が大きい状態では大きな変動がなく, 想定されたレベル位置 (表 5 に示す伝達関数の振幅変化) を示している状態である. しかし, およそ 15dB から変化が見られ, 10dB 以下では入力チャンネルに対する MCODS の順位が逆転する個所が生じている.

設定 2 の計算結果を図 17 に示す 固有成分が外乱ノイズであるときの結果は, 計算した設定すべてにおいて大きな誤差を持つ結果となった. 考えられる理由として, 入力信号における固有成分の振幅比は 0.1 倍であり, 単純に共通成分に比べて 20dB 不利な条件での計算である点が挙げられる. 確認のため, 表 6 に示す設定による数値計算を行った. この設定は, 入力信号における共通成分と固有成分の比を同じにして, 外乱ノイズの条件のみが変化する設定としている. 伝達関数の設定は表 5 に従っている. 計算結果を図 18, 図 19 に示す. 結果として外乱ノイズが共通成分である場合, 外乱ノイズが固有成分である場合の共に 15dB から 10dB の間に大きく変化し始め, 10dB から 5dB の間でチャンネル間のレベル順位の逆転や判別困難な差となり, 有効な判断が可能である範囲が振幅情報の SN 比で約 10dB 以上であるという点において大きな違いは生じていない. 以上の結果から, MCODS を構成する共通成分と固有成分それぞれに対応して, 外乱ノイズの大きさにより有効な判断が可能である範囲は, 入力信号に含まれる共通成分と固有成分にも影響して変

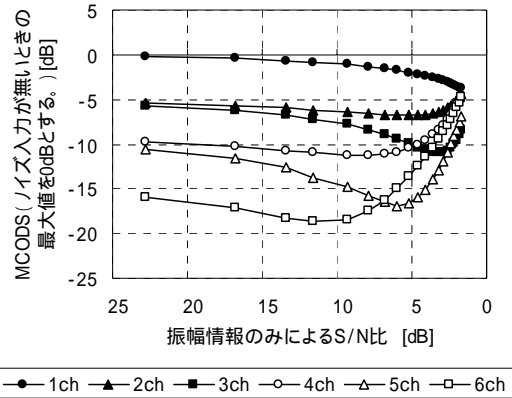


図 16 設定 1 の数値計算結果 (125Hz(1/3 Oct.))

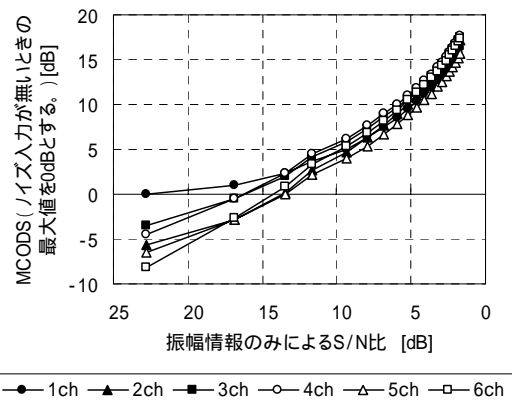


図 17 設定 2 の数値計算結果 (125Hz(1/3 Oct.))

表 6 数値計算の設定 B

	1 ~ 6	1 ~ 6	変化させるパラメータ
設定 3	× 1.0	× 1.0	γ を 0.1 倍から 2.0 倍まで変化
設定 4			γ を 0.1 倍から 2.0 倍まで変化

化し, 本計算設定では振幅のみによる SN 比が約 10dB であれば判別可能であり, 5dB ではレベル順位が逆転する

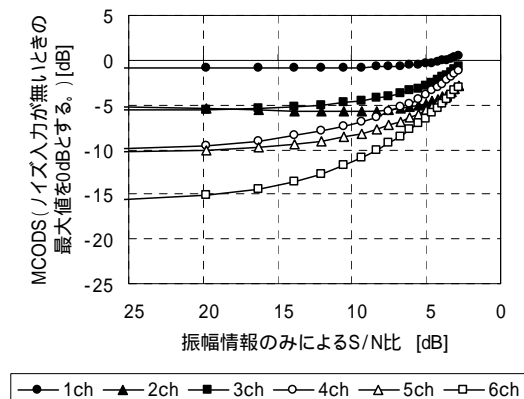
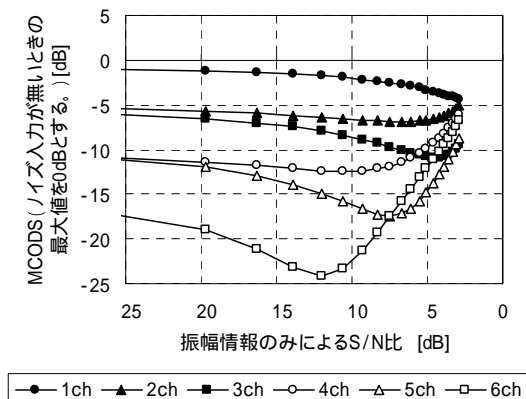


図 18 設定 3 の数値計算結果 (125Hz(1/3 Oct.))

個所を生じる挙動である事を確かめた。なお、本計算条件における想定は、入力点では表わせなかった入力信号が外乱ノイズとして出力 Y に影響すると仮定した場合の計算である。以上の考えから、固有成分は共通成分に比べて非常に小さな信号であり、入力信号中から外乱ノイズとなる固有成分はさらに微小であると考えれば、通常の建物において固有成分を外乱ノイズとした SN 比による判断は、考慮外とされると考えられる。以上の考察から、SN 比による判断は設定 1 の計算結果のみ考えれば良い事となり 図 16 から約 10dB 程度の SN 比であれば有用な MCODS が求められることを確認した。

4. まとめ

MCODS に関する解析条件および精度について実験および数値計算による検討を行い、以下の点を確認した。

- ・入力チャンネル数を変えて各面の MCODS を求め、各面毎の MCODS を得るために必要なチャンネル数を検討した。その結果、中央点付近を入力点とすることにより各面の入力点を 1 点として適切な MCODS が得られる事を実験的に確認した。
- ・スピーカシステムによる MCODS 妥当性確認を目的とした検討を行い、入力信号内に固有成分と共通成分が混在する多入力/単出力系の解析から適切な MCODS が得られる事を実験的に示した。
- ・入力信号が 6 入力で表わしきれない部分が外乱ノイズ

図 19 設定 4 の数値計算結果 (125Hz(1/3 Oct.))

として働く条件であるときの MCODS の変動を数値計算から求めて確認した。

【参考文献】

- 1) 小林真人, 他: 環境振動による固体伝搬音の放射に関する研究 (その 3) - 室各面の寄与と固体伝搬音 -, とびしま技報 < 建築 > No. 35, pp59-65, 2003.
- 2) Julius S. Bendat and Allan G. Piersol: Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, New York, Wiley, 1980.
- 3) 小林真人, 他: 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 -, とびしま技報, 2004.
- 4) 上明戸昇, 他: 環境振動による固体伝搬音予測に関する研究 その 4. 分割計算における入力点数が解析精度に及ぼす影響, 日本音響学会講演論文集, pp937-938, 2001.10
- 5) 小林真人, 他: 環境振動による固体伝搬音予測に関する研究 - その 8 MCODS の妥当性に関する研究 (スピーカシステムの場合) -, 日本音響学会講演論文集, pp859-860, 2002.3
- 6) 上明戸昇, 他: 環境振動による固体伝搬音予測に関する研究 - その 9 ノイズ成分の大きさによる MCODS 解析の可否について -, 日本音響学会講演論文集, pp855-856, 2002.3

Summary The authors attempt to clarify the contribution of each plane of a room, e.g., of an apartment house, to the noise caused by environmental ground vibration. Accurate contributions cannot be obtained by the analysis based on the single linear system of general signal processing, due to correlation between the indoor input signals. To solve this problem, the authors propose a method of clarifying the contribution of each plane by a technique based on Julius S. Bendat's "multiple input /single output model." This part of the paper reports on the results of investigation into the number of input points necessary for useful analysis, verification of the analytical values by a speaker system, and examination of the signal-noise ratio determined by numeric calculation

【 Keywords 】 environmental ground vibration, structure-borne sound, multiple spectrum analysis, contribution analysis