

# 環境振動による固体伝搬音予測手法に関する研究（その6） —入力チャンネル数増加による単一面内の詳細な寄与解析検討—

Research on the Prediction of Structure-Borne Sound Due to Environmental Ground  
Vibration Part 6 Contribution analysis with an increased number of multiinput signals

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

## 【要旨】

一般に屋外の環境振動に起因し集合住宅等の居室内に生じる音について室を構成する各面の寄与を求めようとすると入力信号間に相関がある事から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 Julius S. Bendat の提案する多入力/単出力系モデルから相関のある入力信号により発生する個々の信号を求める事により室各面の寄与を明らかにする手法を提案してきた。

本報では、計測対象信号と入力センサ感度の関係により正しい MCODS が得られない条件が生じる事を明らかにした。今回の検討では残差スペクトルの SN 比が 8dB である場合には正しい計算結果が得られ、3dB、0dB である場合には、明らかに異なる解となる事を確かめた。また、これまで開発を進めてきた寄与解析システムの入力数拡張により単一面内の詳細な寄与解析が可能であるか実験的な検討を行った。その結果、GL 工法による壁面を対象としてセンサ設置位置が下地条件がボンドである場合、中空層である場合に分けて入力信号を取得し解析を行なったところ、特徴的な分類が行なえる結果が得られ、入力数の増加により詳細な寄与解析が行なえる事を示した。

【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

筆者等は環境振動による固体伝搬音予測に関して、多次元スペクトル解析<sup>1)</sup>を発展させ、室各面の寄与を得る指標である Multiple Coherent Output Divided Spectrum (MCODS) を提案し、その解析理論や利便性について報告している<sup>2)~6)</sup>。

前報 (その5)<sup>7)</sup>では室内を構成する各面に1点ずつ入力センサ (振動加速度ピックアップ) を設置し、室内中央点の騒音計で取得された音圧信号を構成する要素を各面に振り分けた評価を行なうための寄与解析装置のシステム化を進め、集合住宅で発生する固体伝搬音等への適用例について報告している。しかし、多次元スペクトル解析は解析条件により誤差の大きい解を出力したり発散する場合があります。実用化を進めるにあたり適用範囲を明確にしさらに詳細な調査を可能にするための検討を進める必要がある。

本報では、使用する入力センサの感度によっては、多入力モデルの計算手法上の条件から正しい解が得られない場合があり、その挙動を監視するため残差スペクトルの SN 比について考察した結果について報告する。また、これまで入力センサ数は室を構成する6面にそれぞれ1点ずつとした6入力の計測システム構築を進めてきたが、1面内の詳細な寄与解析が本装置の拡張により可能であるか実験的な検討を行った点について報告する。

## 2. 計測対象信号と入力センサ感度の検討

### 2.1 正しい MCODS を得るための条件

これまでに寄与解析システムの構築および検討を進めていく中で、計測対象信号と入力センサ感度の関係から正しい MCODS が得られない場合が生じている。この問題点について挙動を明らかにするための検討を行った。

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

## 1) 設定

入力感度が異なる2種類のセンサ（圧電式加速度ピックアップ）を使用して自己ノイズの違いによる出力解の変化を確かめた。センサ1（電荷感度  $41\text{pC}/(\text{m}/\text{s}^2)$ ，質量  $115\text{g}$ ）は感度が高いものの質量が大きい。センサ2（電荷感度  $6.42\text{pC}/(\text{m}/\text{s}^2)$ ，質量  $23\text{g}$ ）は感度が下がるものの質量はセンサ1に対して  $1/5$  である。簡易な計測を行う場合は取り付けが容易なセンサ2を使用する事が望ましいが、対象とする入力振動が小さい計測条件ではSN比を確保するためにセンサ1を使用せざるを得ない場合がある。実験条件を以下に記す。室を構成するそれぞれの面に1個ずつセンサを設置する。全てのセンサが同じ場合、B壁のセンサが他のセンサと異なる場合の測定を行う。図1に計測システムを示す。計測機器は騒音計、振動加速度ピックアップ、チャージアンプ、A/Dボード、パソコンにより構成される。実験対象は音響実験棟住宅用実験室（RC造）として、この時の応答を2Fで取得した。固体音の発生源を1F床面に加振機を設置してM系列信号を出力し、 $1\text{kHz}$ 以下のLPFを掛けて駆動した。図2に入力センサ（加速度ピックアップ）の設置位置を示す。また、表1に計測設定の一覧を示す。センサ1からセンサ2へ変更する事によるMCODSの変化を確かめるため、全てセンサ1である場合、全てセンサ2である場合、B壁のみセンサ2である場合の3設定において計測を行った。解析条件はサンプリング周波数  $11025\text{Hz}$ ，FFT長は  $16384$ ，平均回数  $30$  とし、窓関数はハニングを使用した。写真1に計測状況を示す。室内中央にマイクロホン、それぞれの壁に1個ずつ入力センサを設置して室外から入射する振動と、振動に起因して室内に発生する音を記録する。

## 2) 結果

今回の解析ではこれまでの実験から安定した解が得られている（実験室条件による）周波数範囲でのMCODSを対象とする事を考え、MCODSの確認を行う周波数範囲を  $80\text{Hz}$  ( $1/3$  oct.) から  $200\text{Hz}$  ( $1/3$  oct.) とした。計測設定に対するMCODSを図3に示す。設定1と設定3はB壁以外の入力点に対するMCODSの傾向は、ほぼ同じレベルが得られているが、B壁のMCODSは大きく異なる。設定1と設定2の傾向は同様であるものの絶対的なレベルがす

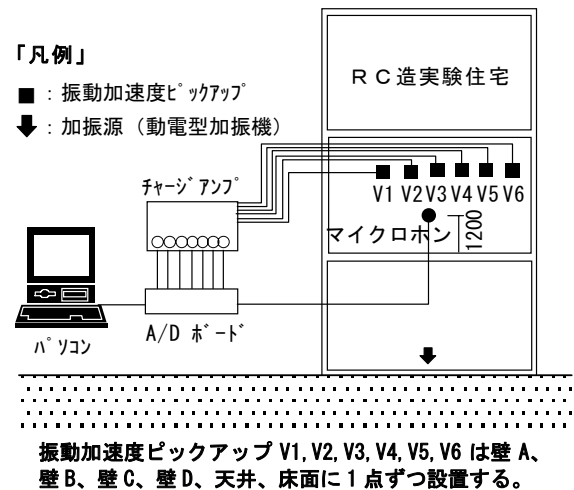


図1 計測システム

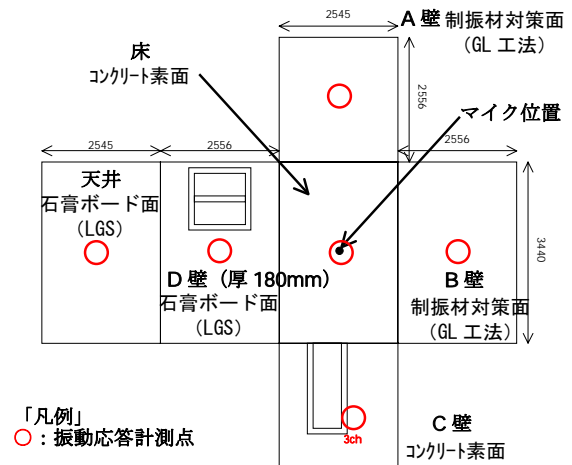


図2 入力センサ（振動加速度ピックアップ）の設置位置

表1 計測設定

設定番号	設定内容
1	全てセンサ1
2	全てセンサ2
3	B面以外はセンサ1, B面はセンサ2



写真1 計測状況（正面はB壁とC壁）

べて変動する傾向となっている。この中でさらにB壁のMCODSについて着目し図4に示す。解析条件に問題がなければ一致するはずの結果が、計測設定毎に異なる結果となり、結果的に入力センサの変更によりMCODSが変化している。このようにMCODSの解析結果に変化を生じる原因を調べたところ、今回の計測ではMCODS算出に使用する残差パワースペクトル<sup>1)</sup>がノイズレベルまで低下したために生じた挙動であると考えられた。そこで、この点について確認を行った。

図5にB壁に対する残差パワースペクトルの変動を80Hz(1/3 oct.)から200Hz(1/3 oct.)までのエネルギー合成値として示す。B壁の振動速度レベルに対して繰り返し残差の処理が行われる過程が表されるが、最後に得られる $S_{66.51}$ (B壁の振動から表される音圧波形のエネルギーであり、B壁の振動速度から他の振動入力部位に相関のある要素はすべて差し引かれたもの)が壁面振動から室内音圧への伝達関数を求めるためのパラメータとして用いられる。設定1における残差パワースペクトル( $S_{ii,k}$ )の減衰挙動に対して設定2、設定3における残差パワースペクトルの減衰は小さい。また、図5では設定1(信号なし)、設定2(信号なし)の場合を合わせて計測しているのと同様に残差パワースペクトルを対応させて示している。ここで設定2(信号なし)の場合におけるB壁の残差パワースペクトルを周波数特性の変動について確認すると計測時の電気ノイズと考えられるわずかに卓越した50Hzの倍音のみを減衰させる挙動であり、センサの自己ノイズに十分近いと考えられる特性となっている事を確かめている。そのため設定2(信号なし)は設定3(信号なし)と同じ値となるものと考えて各設定における残差パワースペクトルのSN比を求めて図6に示す。最終段であるときの $S_{66.51}$ のSN比(信号があるとき、無いときの残差パワースペクトルの差)は設定1では8dB、設定2では3dB、設定3では0dBとなっており、設定1に対して設定3における残差パワースペクトルのSN比は小さくなっている。この結果から、今回の計測条件ではB壁のセンサ1をセンサ2に変更したときに計測対象である信号に対して残差処理を進めていく段階でノイズレベルに埋もれてしまい正しいMCODSが得られない状態となっているものと考えられる。また、設定2においては、設定1に比べて残差パワースペクトルのSN比が下がっていることから、

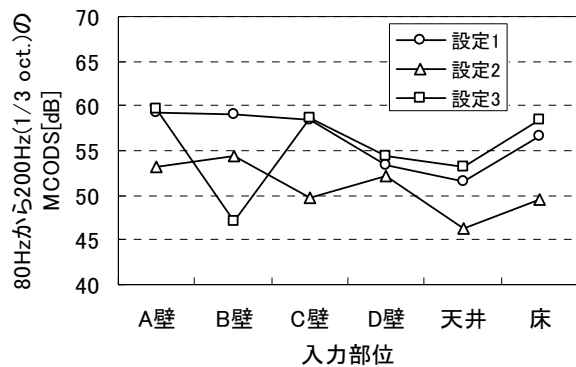


図3 MCOCS 解析結果

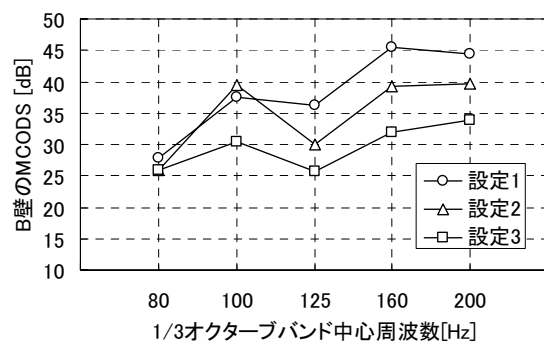


図4 B壁のMCODS

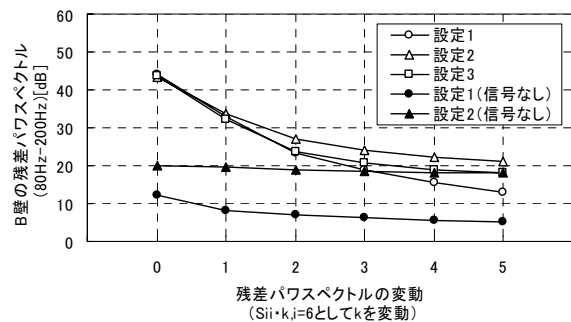


図5 B壁に対する残差パワースペクトル

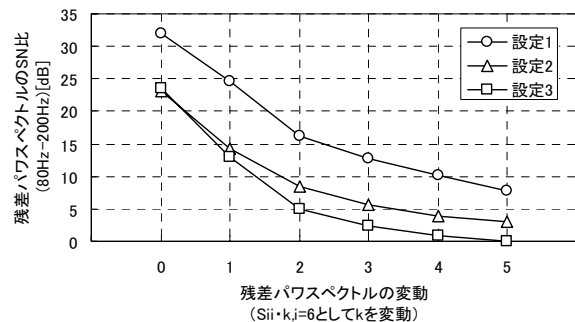


図6 B壁に対する残差パワースペクトルのSN比

線形に表現できるMCODSの情報が低下したのと考えられる。

以上の結果から、多次元スペクトル解析による寄与解析ではセンサの自己ノイズと計測対象信号の関係から残差パワースペクトルがノイズレベルに埋もれる事により正しいMCODS が得られない場合がある事を明らかにした。

### 3. 単一面内の詳細寄与解析の検討

#### 3.1 解析プログラムの動作確認

前報（その5）で開発した寄与解析システムでは6入力/1出力系の解析プログラムを用意して検討を進めていたが、今回の入力チャンネル数増加検討のために解析プログラムに修正を加えている。しかし従来使用していた解析プログラムはチャンネル数の増加に伴い使用メモリが増大し、パソコンが動作しない問題が生じた。そのため、12チャンネル入力によるデータ解析は計算途中値を全てハードディスク上に書き込んで最終計算までの動作を行わせるようにプログラムへ変更を加えている。従来使用してきた全ての値をメモリ上に保持して計算するプログラムを解析プログラム①とし、変更を加えたハードディスク上に計算途中値を書き込むプログラムを解析プログラム②とする。解析プログラム②では、ハードディスク上に書き込んだファイルアクセスに時間がかかるため、解析プログラム①にある残差の繰り返しループを減らしている。そのため、解析プログラム①では得られていたパラメータであるPCF、PCOSを解析プログラム②では算出していない。

表2に解析プログラムに対して計算条件により使用するメモリサイズおよびハードディスク容量を示す。現在寄与解析用に使用しているPCのメモリサイズは512MB、HDは40GBである。解析プログラム①ではサンプリング

周波数11025Hz、FFT長8192設定である場合、平均回数60回までは使用するメモリサイズは512MB以下であるが、12チャンネル入力設定となるとメモリサイズを越えてしまう。通常メモリサイズを若干越えてもハードディスクに書き込みを行い処理は行われるが計算速度は非常に遅くなる問題が発生し、大幅にメモリサイズを越える場合は計算用の領域を確保できずにエラー終了してしまう。これに対して解析プログラム②ではサンプリング周波数44100Hzとして12入力信号における計算設定でも従来の周波数分解能に対応するFFT長32768、平均回数30および60の場合でも使用するメモリサイズは512MB以下であり、ハードディスクの使用容量も166MB程度である。次に、数値計算を行い計算時間の確認を行った。解析条件を以下に記す。

- 振動面から2.0m～1.3m離れて騒音計で固体音が記録されるものとして伝達関数の時間遅れを仮定している。
- サンプリング周波数は44100Hzとする。
- FFT長は32768とする。
- 平均回数を30、60とした場合を計算する。
- 多入力系のチャンネル数は6チャンネルと12チャンネルとする。
- 伝達関数の振幅倍率は12チャンネル入力とする計算設定における最小倍率を0.1倍として0.1ずつ倍率を上げる値として仮定した。
- 6入力/1出力系の信号の作成条件を表3に示す。12入力/1出力系の信号の作成条件を表4に示す。計算条件名に対応する使用プログラム、平均回数、入力信号数を表5に示す。

表2 計算条件に対して使用するメモリサイズおよびハードディスクの使用容量

計算条件					使用するメモリサイズ[MByte]		解析プログラム②が使用するHDDサイズ[MByte]
入力信号数	出力信号数	サンプリング周波数	FFT長	平均回数	解析プログラム①	解析プログラム②	
6	1	11025	8192	30	134.0	-	-
6	1	11025	8192	60	180.9	-	-
12	1	11025	8192	30	<b>577.5</b>	-	-
12	1	11025	8192	60	<b>661.2</b>	-	-
6	1	44100	32768	30	<b>535.8</b>	84.9	39.3
6	1	44100	32768	60	<b>723.4</b>	163.6	39.3
12	1	44100	32768	30	<b>2424.7</b>	84.9	166.1
12	1	44100	32768	60	<b>2644.9</b>	163.6	166.1

表3 信号の作成条件 (6入力/1出力系)

		係数		伝達関数	
		共通成分	固有成分	倍率	時間遅れ
入力信号	1ch	1.0	0.1	1.2	5.9mSec(259 サンプル)
	2ch	1.0	0.1	1.1	5.3mSec(233 サンプル)
	3ch	1.0	0.1	1.0	4.7mSec(208 サンプル)
	4ch	1.0	0.1	0.9	4.4mSec(195 サンプル)
	5ch	1.0	0.1	0.8	4.1mSec(182 サンプル)
	6ch	1.0	0.1	0.7	3.8mSec(169 サンプル)
外乱ノイズ	-	0	0	-	-

表4 信号の作成条件 (12入力/1出力系)

		係数		伝達関数	
		共通成分	固有成分	倍率	時間遅れ
入力信号	1ch	1.0	0.1	1.2	5.9mSec(259 サンプル)
	2ch	1.0	0.1	1.1	5.3mSec(233 サンプル)
	3ch	1.0	0.1	1.0	4.7mSec(208 サンプル)
	4ch	1.0	0.1	0.9	4.4mSec(195 サンプル)
	5ch	1.0	0.1	0.8	4.1mSec(182 サンプル)
	6ch	1.0	0.1	0.7	3.8mSec(169 サンプル)
	7ch	1.0	0.1	0.6	5.9mSec(259 サンプル)
	8ch	1.0	0.1	0.5	5.3mSec(233 サンプル)
	9ch	1.0	0.1	0.4	4.7mSec(208 サンプル)
	10ch	1.0	0.1	0.3	4.4mSec(195 サンプル)
	11ch	1.0	0.1	0.2	4.1mSec(182 サンプル)
	12ch	1.0	0.1	0.1	3.8mSec(169 サンプル)
外乱ノイズ	-	0	0	-	-

表5 計算条件名に対応する設定

計算条件名	計算プログラム	平均回数	入力信号数
MEM_44100_32768_30_6	メモリ上のみですべて計算	30	6
MEM_44100_32768_60_6	メモリ上のみですべて計算	60	6
HDD_44100_32768_30_6	ハードディスクへ計算途中値を書き込み	30	6
HDD_44100_32768_60_6	ハードディスクへ計算途中値を書き込み	60	6
HDD_44100_32768_30_12	ハードディスクへ計算途中値を書き込み	30	12
HDD_44100_32768_60_12	ハードディスクへ計算途中値を書き込み	60	12

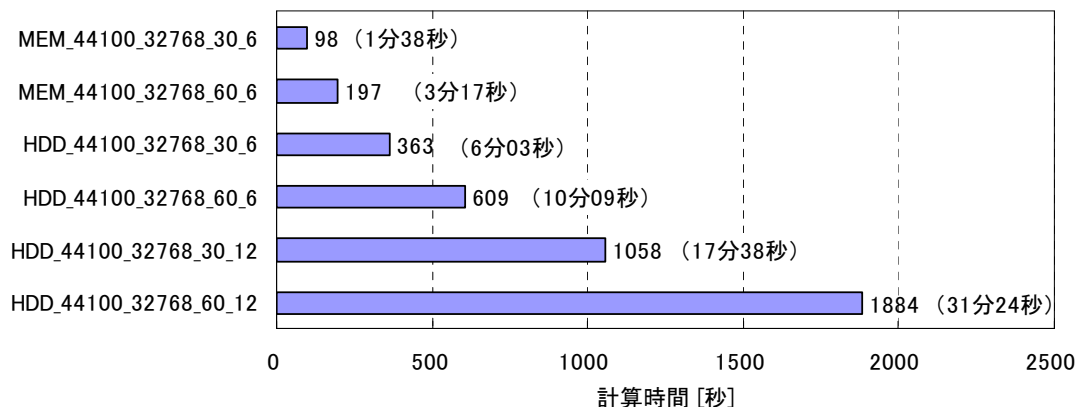


図7 計算時間の確認

図7に計算時間の確認結果を示す。OSがWindows98 (MS)での動作であるため、計算以外の要素が含まれた時間である事が予想され参考値であるが、メモリ上の計算プログラムで 98 秒である計算が計算途中値をハードディスク上におくプログラムでは363秒かかる。また、同じ平均回数30で12入力の計算を行う場合1058秒の計算時間がかかることを確認した。

### 3.2 単一面内の詳細な寄与解析検討

これまで6入力/1出力系の寄与解析システム構築を進めてきたが、さらに詳細な解析を行なう事を考え、システムを多チャンネル化して単一面内の寄与を把握する事が可能であるか実験的な検討を行なった。

#### 1) 設定

6入力/1出力系による解析を行ない特定の面の寄与が大きいと判断された場合に、その面内の室内音圧に影響の大きいエリア、小さいエリアを把握することが可能

であるか検討を行なった。計測システムは図1に準じ振動加速度の入力信号数を12まで増やして使用した。実験対象は音響実験棟住宅実験室 (RC造) 2Fとし、固体音の発生源は1F床面に加振機を設置してM系列信号を出力し、1kHz以下のLPFを掛けて駆動した。計測条件は図2で示した条件を基本設定とした。また、入力センサは全て前述のセンサ1 (電荷感度 41pC/(m/s<sup>2</sup>), 質量 115g) を使用した。この計測条件ではA壁のMCOADSが最も高い値となる事を事前に確認しているため、A壁内を詳細に解析できるかどうか検討を行なう事とした。計測室内の仕上げを一覧表として表6に示す。A壁はGL工法に制振材の対策を施した仕上げであり、GL面内の詳細なエリア判別を考慮して入力センサ設置点をボンド上、中空部の2箇所を調べて設置し寄与解析により判別可能な結果が得られるか確かめる事とした。

図8に入力センサの設置候補点と12入力/1出力系の条件で解析に使用した入力点を示す。

表6 実験室の室内仕上げ条件

面	仕上げ状態
A 壁	RC150mm+ウレタン 25mm+P.B9.5mm(GL)+ブチル系制振材
B 壁	RC150mm+ウレタン 25mm+P.B9.5mm(GL)+紙系制振材
C 壁	RC180mm (扉あり)
D 壁	RC180mm+ウレタン 25mm+P.B9.5mm(LGS)(窓あり)
天井	RC170mm+ウレタン 25mm+P.B9.5mm(LGS)
床	RC180mm

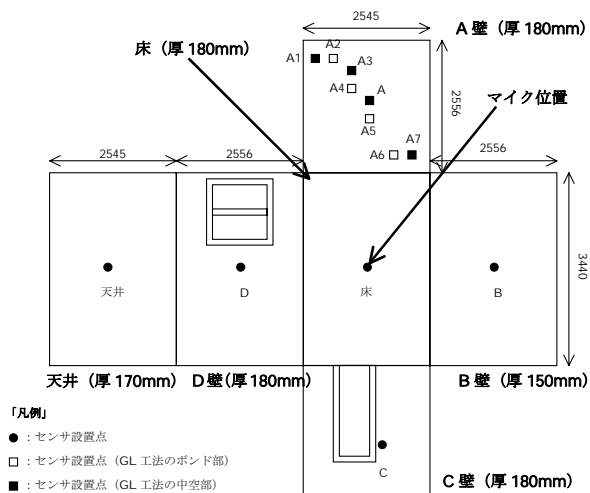


図8 12入力/1出力系の入力センサ配置 (A壁に集中して設置)

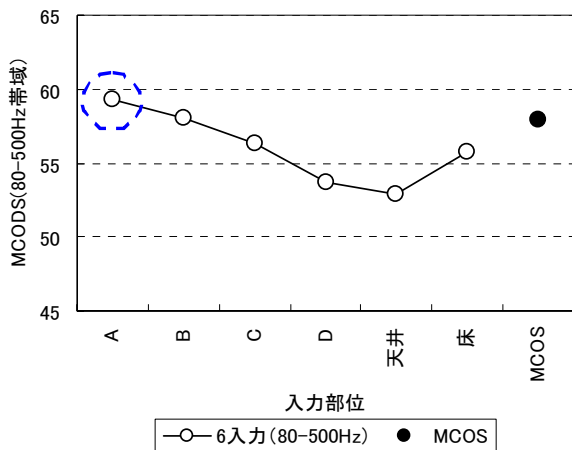
## 2) 結果

図9に解析条件を6入力とした場合、12入力とした場合のMCODS解析結果を示す。本検討の目的は単一面の入力点数を増やして詳細な寄与を解析したとき、MCODSはどのような挙動を示すかを確認する事である。結果をみると6面の中で最も高い値を示したA壁を詳細に分割したところ、6入力系の解析条件では1点で得られているA壁のMCODSを分割したような形で多点のMCODSに分割されており、総和であるMCOSは一致している。しかし、A壁以外のMCODSを見ると順位は変わらないもののレベルが相対的に変化する挙動が見られる。これは入力チャンネル数を増やした事により、多入力/単出力系モデル内で線形に表現できるエネルギーが変化することによる条件

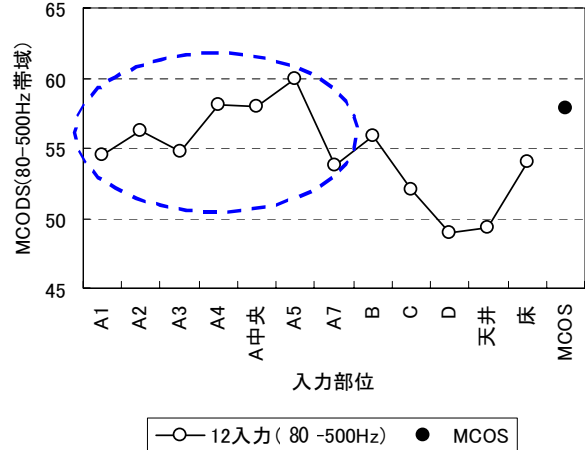
の変化と、共通成分を持つ入力数が増える事による条件の変化が影響していると考えられ、前述の残差パワースペクトルによるSN比の確認を含めた理論的な挙動把握が今後の検討課題として残る。

また、図10にA壁内のMCODSについてGL工法のボンド部、中空部に分かれた特徴が見られるか確認した結果を示す。その結果、ボンド部、中空部で大小に分かれる特性が得られており、特徴的な放射部位の判別が可能な結果が得られている。

以上の結果から、多次元スペクトル解析による寄与解析手法を用いて入力数を増加する事により単一面の寄与を詳細に解析する事が可能である事を示した。



6入力/1出力系の解析から得られた MCODES



12入力/1出力系の解析から得られた MCODES

図9 入力系設定を変更した場合の MCODES (A壁)

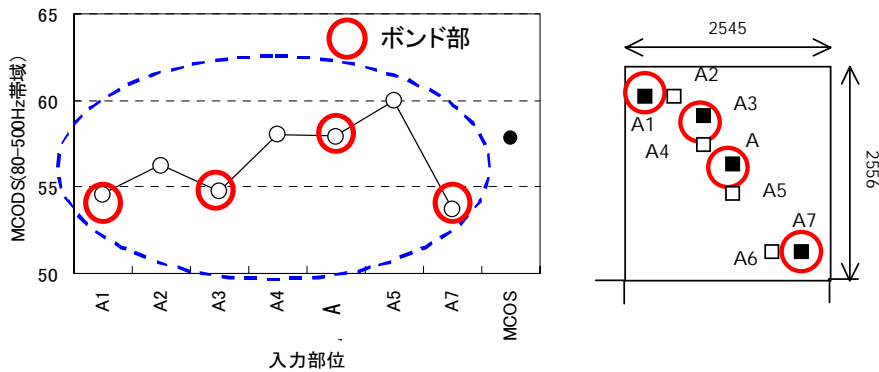


図10 A壁 (GL工法対策面) 内のボンド部、中空部の判別

#### 4. まとめ

環境振動の固体音予測に関して多次元スペクトル解析による寄与解析システムの構築を進める中で、正しい寄与計算が行われない場合があり、今回の検討では残差パワースペクトルがセンサの自己ノイズに近くなるために生じる問題である事を明らかにした。

また、これまで開発を進めてきた6入力/1出力系の寄与解析システムに対してシステム拡張を行い、より詳細な寄与解析を試みた。多チャンネル化に伴い解析プログラムの動作について確認し、特定する1面に入力センサを集中して配置した場合についてのMCODSを求めた。その結果、従来の6入力/1出力系から単一面内の入力数を増やす事により、詳細な寄与解析が行える事を示した。しかし、入力数の変化によりMCODSのレベルが相対的に変動する挙動が生じており、理論的な考察を進めていく必要がある。

#### 【参考文献】

- 1) Bendat, J. S: Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, New York, Wiley, 1980.
- 2) 小林真人, 上明戸昇, 山下恭弘他: 環境振動による固体伝搬音予測に関する研究 その1~その11, 日本音響学会講演論文集, 2000. 9~.
- 3) 小林真人, 塩田正純, 山下恭弘: 鉄道からの固体伝搬音予測手法に関する研究 (その1) - 固体伝搬音予測手法の考え方-, とびしま技報 No. 33, pp48-52, 2000. 03
- 4) 小林真人, 塩田正純, 山下恭弘: 環境振動による固体伝搬音予測手法に関する研究 (その2) - 固体伝搬音予測手法の提案-, とびしま技報 No. 34, pp58-65, 2001. 03
- 5) 小林真人, 塩田正純, 山下恭弘: 環境振動による固体伝搬音予測手法に関する研究 (その3) - 室各面の寄与と固体伝搬音-, とびしま技報 No. 35, pp59-66, 2002
- 6) 上明戸昇, 小林真人, 塩田正純, 山下恭弘: 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-, とびしま技報 No. 53, pp74-82, 2003. 03
- 7) 小林真人, 上明戸昇, 塩田正純, 山下恭弘: 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) - 寄与解析システム適用例-, とびしま技報 No. 53, pp82-89, 2003. 03

**Summary** The authors proposed a technique that clarifies the contribution of each surface of a room to the noise in the room generated by environmental ground vibration based on the multi-input/single-output model proposed by Julius S. Bendat. By this technique, individual signals generated by input signals of the model correlated with one another can be determined.

In this report, it is clarified that correct MCODES cannot be obtained under certain conditions of the relationship between the signal volume and the input sensor sensitivity. A correct calculation result is obtained when the signal-noise ratio of the residual error spectrum is 8dB, but cannot be obtained when it is 3dB or 0dB. Moreover, experimental investigation revealed that classification of noises is possible by detailed contribution analysis of a single surface. Detailed contribution analysis is therefore found feasible by increasing the number of multiinput signals.

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