累積調波分析を用いた構造物のパッシブ診断*

◎高橋義典 (都立産技高専), 後藤理, 東山三樹夫 (早大)

1　まえがき

本稿では，累積調波分析 (CHA: cumulative harmonic analysis [1]) を用いて，環境雑音等で加振される構造物の振動から，伝達系の調波構造を可視化する手法について論じる．従来の機械診断の分野では，対象物を診断用インパルスハンマで叩く或は加振器によって試験信号を与え，別の場所に設置した加速度ピックアップで観測される伝達特性を解析する手法が研究されてきた [2]．この時，伝達特性に見られるダンピングファクターの時間変動から構造体の異常を診断することができる．ダンピングファクターは，伝達関数における振幅周波数特性のピーク (固有振動数) の先鋭度合いより読み取ることができる [3]．しかし，インパルスハンマや加振器による試験振動を必要とする従来法では，観測を実施したときしか建造物の状態を知る事ができない．もし環境雑音による構造物の僅かな振動を利用して，その振動中に含まれる伝達系の調波構造の変化を分析できれば，構造物の状態を常時モニタリングすることができる．しかしながら構造物の振動系における伝達関数分析には，音源信号の詳細な特性が必要であることから，雑音信号から独立して構造物の伝達関数の特徴を得ることは困難である [4, 5].

共振特性に代表される周波数選択性は，無数の同相正弦波成分の累積効果として捉えることができる．また，共振系のインパルス応答を有限数列として扱う信号処理においては，伝達系の共振特性の分析に有効な信号長が伸びることをダンピングの減少と捉えることができる．このような時間とともに進行するスペクトルの周波数選択性は，サンプル毎のスペクトル加算分析が効果的である．Berman 等はスピーカの設計・評価を目的として，インパルス応答波形を 1 サンプル毎に分析する累積スペクトル分析（CSA: Cumulative Spectral Analysis）を提案している [8]. CSA は時間とともに進行するステップ関数を用いて，サンプル毎にスペクトル分析を行い，時系列に従ってスペクトルを蓄積表現することで，スペクトルの生成過程を可視化する時間周波数分析である．筆者等は CSA のステップ関数を一般化し，スペクトルを時間とともに同相加算していくことで信号の調波構造を分析する CHA を提案した [1]．CHA はサンプル毎のスペクトルの同相加算によって，音源信号スペクトルに埋もれた定常的な伝達系の極を強調する．筆者等は，この極の強調効果を利用して，試験信号を用いること無く，周囲雑音による構造物の振動波形から構造物のダンピング変化をモニタリングする手法を提案してきている [9]．これまでに，シミュレーションと模型実験によってその効果を検証してきた [10, 11]. 本稿では模型実験とその評価について報告する．

2　模型実験とによる雑音振動の生成

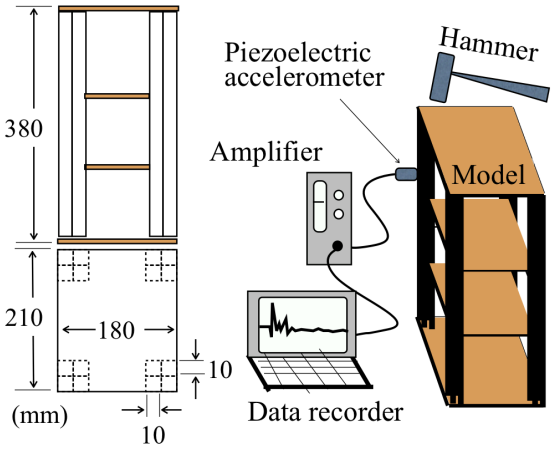

Fig. 1　Scale model and experimental system.

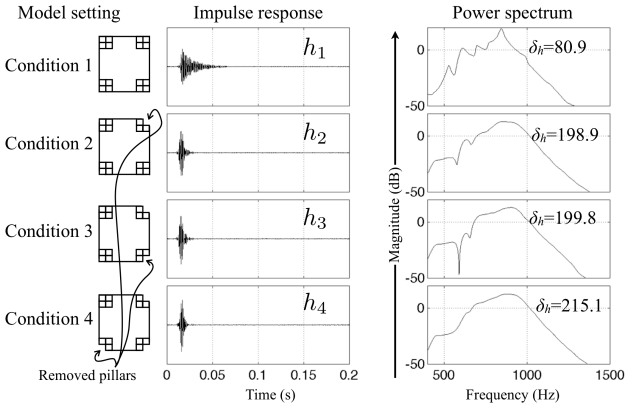

Fig. 2　Measured impulse responses and conditions.

本報告では模型のインパルス応答を各条件毎に測定し，予め録音されている環境雑音との時変畳み込みによって，ダンピング変化を含む雑音振動を生成した．インパルス応答は模型の柱の本数を変えることでダンピングを変化させた．インパルス応答は Fig. 1 に示す模型を用いて測定した．模型は 4 枚の板を 4ヶ所の柱でささせる仕組みとなっている．各ヶ所の柱はそれぞれ 4 本のの角材でできている．インパルス応答の測定はインパルスハンマーで模型を加振し，加速度ピックアップ (PV-90B, RION) で測定した．インパルス応答の測定は柱に用いられている角材を 1 本ずつ減らしながら各柱の条件毎にインパルス応答を測定した．Fig. 2 に測定したインパルス応答波形と

*Passive diagnostics for structure using cumulative harmonic analysis. by Yoshinori Takahashi (Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology), Satoru Gotoh, Mikio Tohyama, (Waseda University)

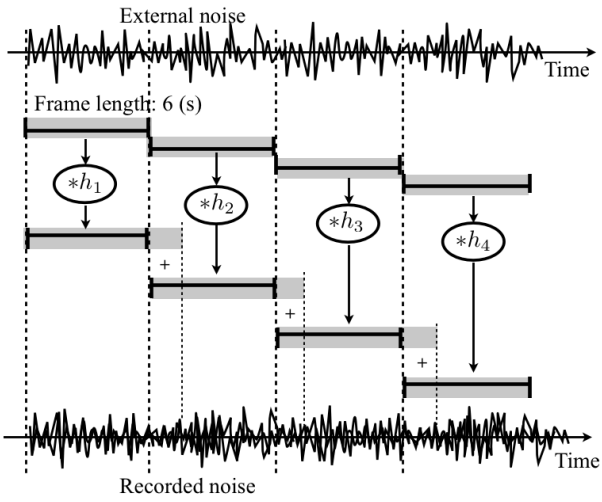

Fig. 3　Time variant convolution.

振幅周波数特性を示す．本報告では 600 − 1000(Hz) にあるスペクトルピークに着目し分析した．測定された各応答には帯域通過フィルターが用いられている．本報告では環境雑音として，ジェット機内の騒音，街頭の雑音，砂浜での波の音の 3 種類をもちいた．これらの環境雑音に対し，6 秒毎に条件を変えたインパルス応答の時変畳み込み (Fig. 3) を行った．

3　分析手法

本報告では Fig. 4 に示す分析手法について評価した．提案する CHA 分析 (a) は，窓関数とスペクトル累積の関係から累積窓関数を用いた分析手法 (b) によって計算できる [1]．本報告では従来法として，短時間フーリエ変換 (STFT: short time Fourier transform) による分析手法 (c) と．指数窓関数 (EW: exponential windowing) を用いた分析手法 (d) による評価も行った．EW では観測されている過去のデータに対して指数忘却がかけられる．CHA では指数忘却の代わりに三角窓関数によって，観測データに忘却の重みを付加する．CHA では信号の時変性に応じて，スペクトル累積と累積のリフレッシュが可能である．Fig. 5 は各分析手法による分析例を示したものである．この例では，4 秒毎に 0.1 秒のフレーム長で CHA 及び STFT スペクトルを分析している．EW による分析では，フレーム処理を行わずに 4 秒毎にそれ以前の全ての信号が用いられている．

4　ダンピング変化の推定と評価

モーダルバンド幅 B_M は，Fig. 6 に示すような信号の振幅スペクトルと同面積となる長方形スペクトルで表される等価帯域幅として知られている．ダンピングファクター δ は，振動のモーダルバンド幅 B_M から

$$\delta = B_M/\pi \tag{1}$$

として計算できる．

Fig. 7 は雑音振動から CHA, STFT, EW を用いて推定したダンピングファクター δ_{CHA}, δ_{STFT}, δ_{EW} を各平均値で正規化して示した分析例である．それぞれ，理論値としてインパルス応答から推定したダンピングファクター δ_h(Fig. 2) を $\delta_h - \mathrm{E}[\delta_h]$ としてオンプロットした．ただし $\mathrm{E}[x]$ は x の平均を意味する CHA と STFT による推定精度は分析窓長に依存する．また EW の指数窓 $\mathrm{e}^{\alpha t}$ における係数 α に依存する．本報告では，CHA, STFT の分析窓長と，EW の係数 α について評価した．

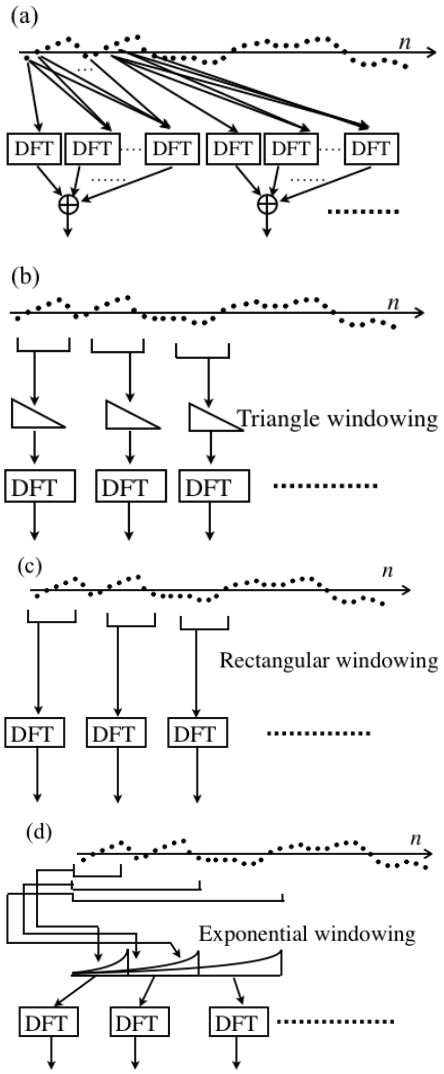

Fig. 4　Analysis methods. (a) CHA process, (b) CHA with triangular windowing, (c) STFT, (d) EW.

Fig. 8 は，さまざまな分析窓長について，正規化したダンピングファクター $\delta_{\mathrm{CHA}} - \mathrm{E}[\delta_{\mathrm{CHA}}]$, $\delta_{\mathrm{STFT}} - \mathrm{E}[\delta_{\mathrm{STFT}}]$ と理論値 $\delta_h - \mathrm{E}[\delta_h]$ の相関係数を示したものである．横軸は窓関数長を，縦軸は相関係数をそれぞれ示す．この結果から，窓長が短い場合には，STFT "×"に比べて CHA"○"の方が安定的に推定できていることが確認できる．

Fig. 9 は，EW の指数窓 $\mathrm{e}^{\alpha t}$ の係数 α に対する，分析されたダンピングファクター $\delta_{\mathrm{EW}} - \mathrm{E}[\delta_{\mathrm{EW}}]$ と理論値 $\delta_h - \mathrm{E}[\delta_h]$ の相関係数を示したものである．安定して分析可能な係数 α が使用する音源に依存して

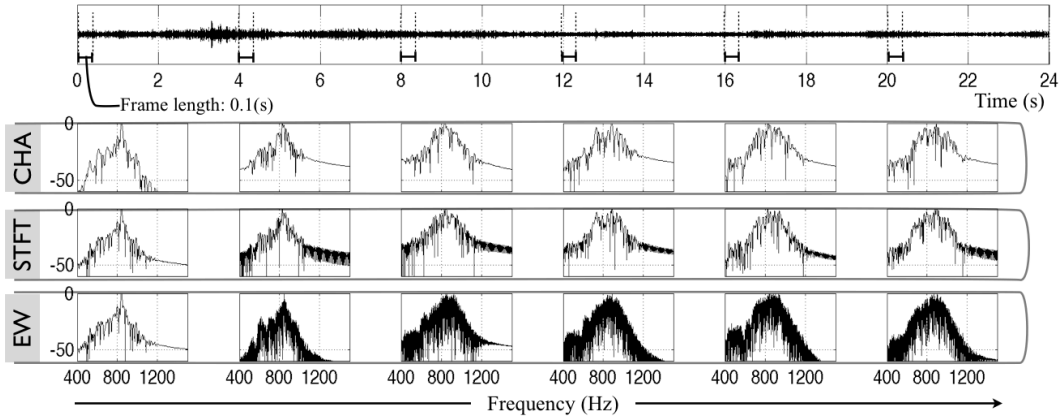

Fig. 5　Examples of spectrum analysis for each method.

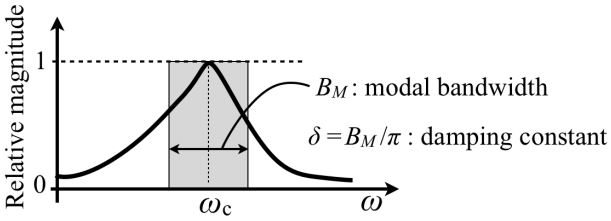

Fig. 6　Modal bandwidth and damping constant.

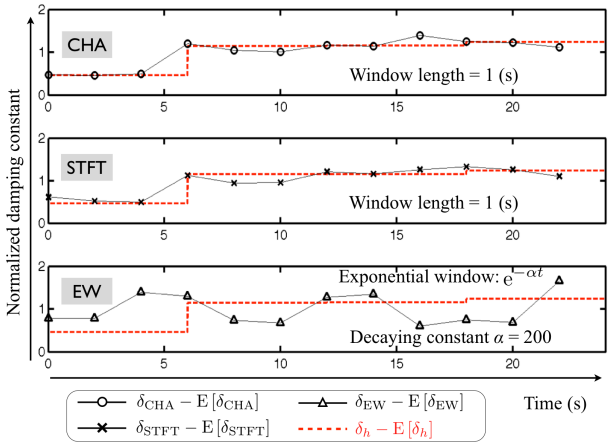

Fig. 7　Monitoring examples of δ transition.

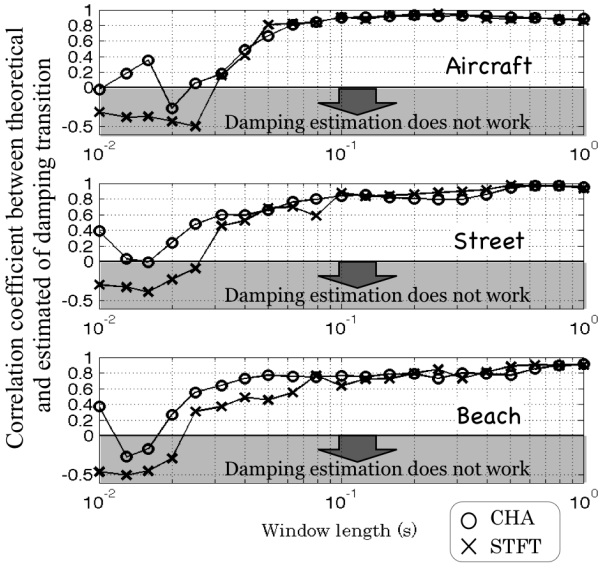

Fig. 8　Correlation of damping constants estimated from the random vibration records by using CHA or STFT and from the impulse response data.

いることが確認できる．従来の EW を用いた診断では，既知の音源信号を用いる場合に最も効果的に分析できる係数 α を定めることで，有効なダンピング推定が可能となるものの，音源が未知で最適な α が設定できない診断モニタリングにおいては，不向きな手法である．

5　あとがき

本報告では，Berman 等の CSA におけるステップ関数を，スペクトル累積関数に置き換えた累積調波分析 (CHA) を提案し，CHA を用いた構造物の診断モニタリング手法について論じた．模型実験の結果，CHA が被診断部材に対する加振信号を必要とすることなく，環境雑音によって生じる雑音振動から伝達系のダンピング変化をモニタリングする手法として有効であることを示した．CHA を用いることで，短時間の雑音振動から従来の STFT よりも安定して伝達系の調波構造の特徴を強調・可視化できることを確認した．また音源が未知で従来の EW を用いた診断手法が不可能である場合でも，フレーム長をある程度長くとることで CHA あるいは STFT を用いた分析が有効であるを確認した．

診断・振動解析の分野では，最適な分析窓長と音源・伝達系の関係について検証されていない．これはフレーム処理を用いない CHA においても累積のリフレッシュ間隔を決める上で重要である．これまで，伝達系推定に関する研究，例えばコンサートホールの残響伝達関数のスペクトルピークの推定等では，インパルス応答長あるいは残響時間よりも長い分析窓が用いられてきた．しかし人間は経験的にもっと短い時間の音楽フレーズからホールの響きの特徴を聞き分けることができる．これは短い観測信号であっても伝達系の特徴が十分に含まれているからと考えられる．一般に音源と伝達系の振幅ケプストラム長を比べ

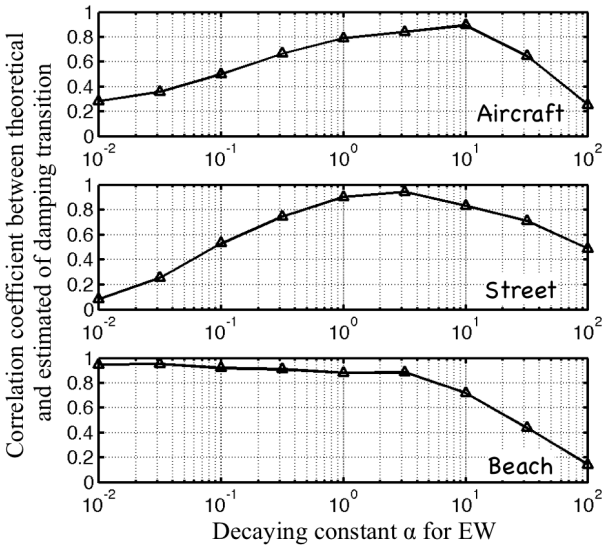

Fig. 9　Correlation of damping constants estimated from the random vibration records by using EW and from the impulse response data.

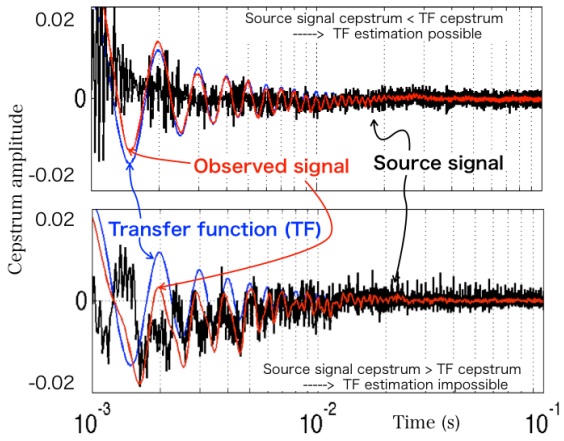

Fig. 10　Magnitude cepstrum of source signal and transfer function.

ると，伝達系のケプストラムの方が長い．この場合，後部の音源よりも伝達系の振幅ケプストラムが優位なケプストラム長よりも長い分析窓を用いることで，観測信号から伝達系ケプストラムの推定が可能となる (Fig. 10)．CHA の累積区間の決定方法として，振幅ケプストラムの分散等に着目したケプストラム長の評価と，ケプストラム長より短い累積区間の設定が有効であると考えられる．

謝辞　本研究は科研費 (課題番号: 21860084) の助成を受けたものである．さらに平田能睦博士のモデル実験における御支援に対し感謝申し上げる．

参考文献

[1] Y. Takahashi, M. Tohyama, and Y. Yamasaki, Cumulative spectral analysis for transient decaying signals in a transmission system including a feedback loop, *Journal of the Audio Engineering Society*, 54(7/8), 620-629, 2006.

[2] R. H. Lyon, Propagative phase trend in multi-degree-of freedom system, *Journal of the Acoustical Society of America*, 79(4), 1223-1229, 1983.

[3] Y. Hirata, Non-harmonic Fourier analysis available for detecting very low-frequency components, *Journal of Sound and Vibration*, 287, 611-613, 2005.

[4] P. J. Halliday and K. Grosh, Maximum likelihood estimation of structural wave components from noisy data, *Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), 1709-1717, 2002.

[5] J. G. Mc Daniel and W. S. Shepard, Jr., Estimation of structural wave numbers from spatially sparse response measurements, *Journal of the Acoustical Society of America*, 108(4), 1674-1682, 2000.

[6] Y. Hirata, A method for monitoring invisible changes in a structure using its non-stationary vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 270, 1041-1044, 2004.

[7] M. Kazama, K. Yoshida and M. Tohyama, Signal representation including waveform envelope by clustered line-spectrum modeling, *Journal of the Audio Engineering Society*, 51(3), 123-137, 2003.

[8] J. M. Berman and L. R. Fincham, The application of digital techniques to the measurement of loudspeakers, *Journal of the Audio Engineering Society*, 25(6), 370-384. 1977.

[9] Y. Takahashi, T. Taniguchi, M. Tohyama, Structural Condition Monitoring by Cumulative Harmonic Analysis (CHA) of Random Vibration, *Advances in Acoustics and Vibration*, vol. 2008, Article ID 261758, 2008.

[10] Y. Takahashi, M. Tohyama, Analysis and Modeling of Modal Experiment on Structural Condition Monitoring by Cumulative Harmonic Analysis, *10th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics*, No. 102, 2010.

[11] 高橋義典, 後藤理, 東山三樹夫, 累積調波分析を用いた構造物の診断手法, 信学技法 *EA2010-98 (2010-12)*, 7-12, 2010.