

機関番号：52605

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860084

研究課題名（和文） 累積調波分析を用いた建造物の診断モニタリング

研究課題名（英文） Structural health monitoring using cumulative harmonic analysis

研究代表者

高橋 義典 (TAKAHASHI YOSHINORI)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・助教

研究者番号：30547732

研究成果の概要（和文）：本報告は、Berman, Fincham の累積スペクトル分析(CSA: cumulative spectral analysis)における段階的な窓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: Cumulative Harmonic Analysis)と、それを用いた建造物の診断モニタリング手法について論じる。CHA は被診断部材に対する加振信号を必要とすることなく、伝達系のダンピングを推定・可視化することが可能である。伝達系のダンピングは建造物の共振周波数に相当する主要なスペクトルピーク付近の極の分布に関係する。このような極の分布は環境雑音によって生じる短時間の建造物の振動から CHA によって可視化することができる。本研究等々は、これまでに伝達系のダンピングに着目した CHA によるモニタリング効果を示してきた。本研究では CHA によるモニタリング手法の有効性を模型実験によって確認した。

研究成果の概要（英文）：This study describes a cumulative harmonic analysis (CHA) that replaces the stepwise time window function of Berman and Fincham's cumulative spectral analysis with a spectral accumulation function, thereby enabling a new structural health monitoring method. CHA estimates and visualizes system damping conditions without the need of transient-vibration records. The damping conditions are closely related to the spectral distribution around the dominant spectral peaks due to structural resonance. This type of spectral distribution can be visualized with CHA even within a short interval of random vibration samples. The effect of CHA on monitoring with respect to the damping conditions was reported by the present authors in a previous study. In this study, the authors confirmed the usefulness of CHA for structural condition monitoring by conducting scale model experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010 年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築環境・設備

キーワード：調波分析，音響信号処理，建造物診断

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年，我が国では震度 6 強から震度 7 程

度の地震に対しても，生命に危害を及ぼすような建造物の倒壊等の被害を生じない事

を目標とした耐震基準がもうけられており、新築の建造物に関しては関東大震災程度の地震では安全であると言われている。しかし、建造物は長期間に渡り自然環境にさらされることで、壁面のひび割れ、骨組みや接合部の疲労等、構造体の損傷が生じてくる。そこで、地震等の自然災害によって、致命的な損害が生じる前に、建造物の状態を診断し破損の有無やその位置を発見する必要がある。火災センサーと同じように 24 時間 建造物の状態をモニタリングすることができれば、居住者の安全と安心を確保する事ができる。

(2) 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ー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いる。この時、伝達特性に見られるダンピングファクターの変化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。しかし、インパルスハンマー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建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、建造物の状態を常時モニタリングすることができる。しかしながら建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建造物の伝達関数の特徴を得ることは困難である。

(3) 本研究等々は、観測信号に含まれる伝達関数の極(スペクトルピーク)を強調する分析手法「累積調波分析 (CHA: cumulative harmonic analysis)」を、これまでに提案してきている。CHA は入力サンプル毎に計算されるスペクトルを同相加算することで、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。CHA は Berman 等がスピーカの設計・評価を目的に提案した累積スペクトル分析 (CSA: cumulative spectral analysis) のステップ関数を一般化し、スペクトル累積効果のある三角窓関数等の時間窓関数に置き換えた分析手法である。CSA はスペクトルの生成過程を 1 サンプル毎に進行するステップ関数を用いて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手法であった。これまでに本研究等々が取り組んできた研究によって、CHA は従来の CSA に比べ、一位の極が二位の極に強調されることが示され、拡声システム等でハウリングに発達する可能性のある調波成分の予測に成功している。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、試験振動を用いることなく、風や暗騒音等による僅かな振動を利用した、建造物の状態を常時モニタリングする手法の確立と、そのシステムの検討である。

(2) 本研究では、CHA による極の強調効果を利用して、試験信号を用いることなく、周囲雑音による建造物の振動波形から建造物のダンピング変化をモニタリングする手法を提案するとともに、シミュレーションと模型実験によってその効果を検証する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、構造物模型のインパルス応答を条件毎に測定し、予め録音されている環境雑音との時変量み込みによって、ダンピング変化を含む雑音振動を生成した。本実験では、図 1 に示す模型のインパルス応答を用いた。模型は 4 枚の板を 4 カ所の柱で支える構造となっている。各箇所の柱はそれぞれ 4 本の角材からなる。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で模型の振動を観測した。柱に用いられる角材を 1 本ずつ減らしながら柱の条件毎にインパルス応答を測定した。

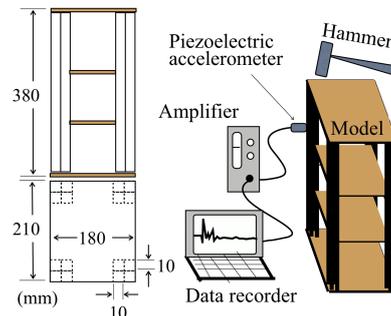


図 1. 模型のインパルス応答の測定.

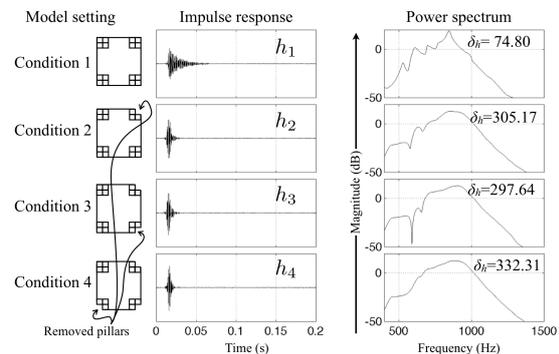


図 2. 模型のインパルス応答と振幅周波数特性

図 2 に測定したインパルス応答波形と振幅周波数特性を示す。今回の実験では 600-1000 (Hz) にあるスペクトルピークに着目し、帯域通過フィルターを用いて分析した。本実

験では環境雑音として、白色雑音、ジェット機内の騒音、街頭の雑音、砂浜での波の音の3種類を用いた。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を行った。

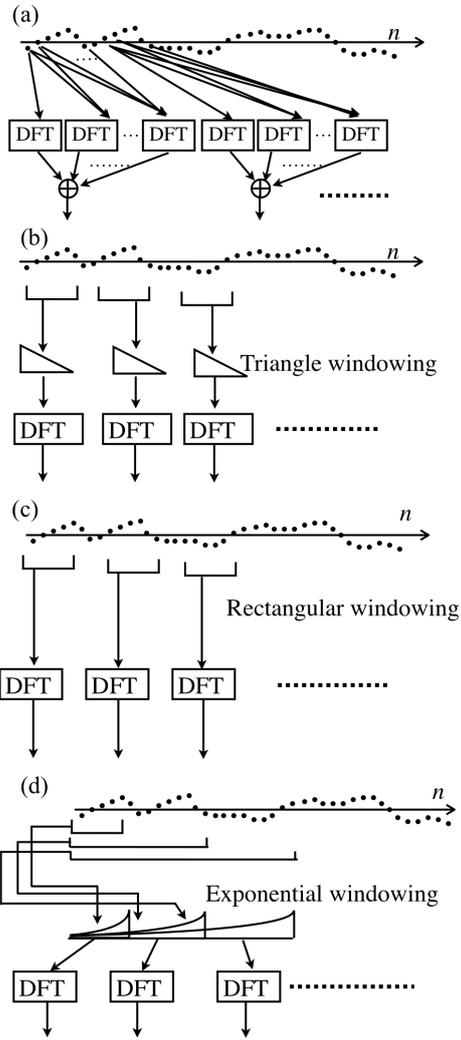


図3. 分析手法. (a)累積調波分析(CHA), (b)三角窓を用いたCHAアルゴリズム, (c)短時間フーリエ変換(STFT)による分析, (d)指数窓関数による分析(EW).

(2) 本報告では3種類の分析手法について評価した。提案するCHA(図3-a)は、窓関数とスペクトル累積の関係

$$\begin{aligned} \text{CHA}(n, z^{-1}) &= \sum_{m=0}^n w(m)x(m)z^{-m} \\ &= (x(0)z^{-0}) + (x(0)z^{-0} + x(1)z^{-1}) + \dots \\ &\quad \dots + (x(0)z^{-0} + x(1)z^{-1} + \dots + x(n)z^{-n}) \\ &= n x(0)z^{-0} + (n-1)x(1)z^{-1} + \dots + x(n)z^{-n} \end{aligned} \quad <1>$$

から累積窓関数を用いた分析手法(図3-b)によって計算できる。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)

$$\text{STFT}(n, z^{-1}) = \sum_{m=0}^n x(m)z^{-m} \quad <2>$$

による分析手法(図3-c)及び、従来から診断分野で用いられている指数窓関数(EW: exponential windowing)

$$\text{EW}(n, z^{-1}) = \sum_{m=0}^n e^{-\alpha m/f_s} x(m)z^{-m} \quad <3>$$

を用いた分析手法(図3-d)での評価も行った。式<3>において f_s はサンプリング周波数である。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。図4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た。EWによる分析では、フレーム処理を行わず4秒毎にそれ以前の全ての信号が用いられている。

(3) 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 によって

$$\delta = B_M / \pi \quad <4>$$

として推定することができる。モーダルバンド幅 B_M は図4に示すような等価帯域幅で推定することができる。図5はCHAによるダンピング変化のモニタリング例である。

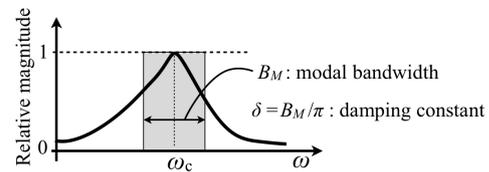


図4. モーダルバンド幅とダンピングファクター.

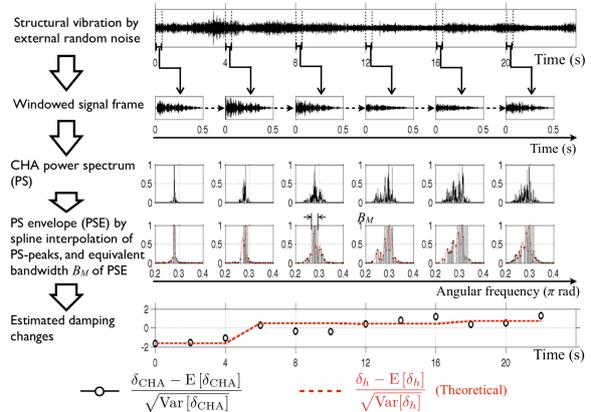


図5. CHAによるダンピングファクター δ の変化のモニタリング.

図5において一番上のパネルは観測された雑音振動である。雑音振動は累積窓関数を用いて切り出され、CHA 振幅周波数特性の包絡（CHA 振幅周波数特性ピークのスプライン補間による）が計算される。このスペクトル包絡の等価帯域幅から推定したダンピングファクターを、伝達系のダンピングファクターの変化として評価する。

4. 研究成果

(1)図6はCHA あるいはSTFT を用いて推定したダンピングファクターとインパルス応答から予め計算しておいたダンピングファクター δ_h (図2) の相関係数を示したものである。横軸は窓関数長 (インパルス応答 h_1 の残響時間 $T_R=0.1$ (s)で正規化されている), 縦軸は相関係数である。波の音のように信号の時変性が大きくなるに連れ、窓長が短い場合, CHA "○" は STFT "×" より正確に推定できていることが確認できる。音源信号の時変性は振幅ケプストラムの周期 (図7) によって評価できる。

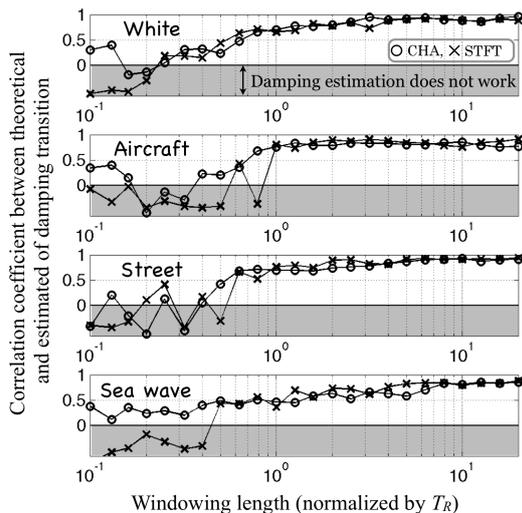


図6. インパルス応答のダンピングファクターとCHA あるいはSTFT を用いて雑音振動から推定したダンピングファクターの相関係数。

(2)図8はEW を用いて分析したダンピングファクターとインパルス応答から予め計算しておいたダンピングファクター δ_h (図2) の相関係数を示したものである。横軸は指数窓関数 e^{α} の減衰係数 α である。この図から、減衰定数 α は信号に依存していることが確認できる。従って音源信号が未知である場合、最適な窓関数 e^{α} を決定することは難しい。これらの結果から未知の音源信号による雑音振動を利用したダンピング変化モニタリングにはCHA が効果的であることが結論づけられる。

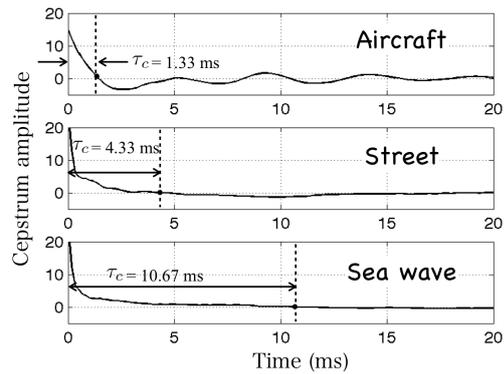


図7. 音源信号の振幅ケプストラムとその周期。

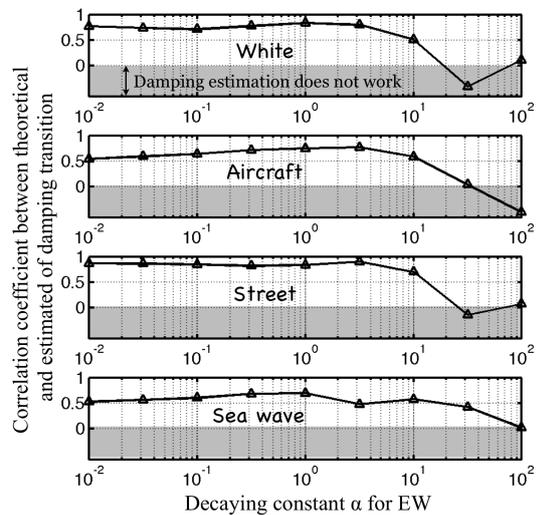


図8. インパルス応答のダンピングファクターとEW を用いて雑音振動から推定したダンピングファクターの相関係数。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

高橋義典, 安藤彰男, Down-Mixing of Multi-channel Audio for Sound Field Reproduction based on Spatial Covariance, Applied Acoustics, 査読有, 71 巻, 2010, pp. 1177-1184

[学会発表] (計7件)

①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パッシブ診断, 日本音響学会春季研究発表会, 2011年3月11日, 早稲田大学 (東京都)

②駒橋明江, 大野陽, 高橋義典, 音場共分散に基づくステレオ再生手法の検討, 日本音響学会春季研究発表会, 2011年3月11日, 早稲田大学 (東京都)

- ③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, 応用音響研究会, 2010年12月10日, 筑波大学 (茨城県)
- ④萩原大樹, 高橋義典, 三好和憲, 音場共分散行列に基づく音場再生手法による波面再生, 応用音響研究会, 2010年12月10日, 筑波大学 (茨城県)
- ⑤萩原大樹, 高橋義典, 三好和憲, Wave Front Reconstruction Using the Spatial Covariance Matrices, 40th AES International Conference, 2010年10月9日, 東京藝術大学(東京都)
- ⑥高橋義典, 東山三樹夫, Analysis and Modeling of Modal Experiment on Structural Condition Monitoring by Cumulative Harmonic Analysis, 10th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, 2010年7月14日, Southampton University (英国)
- ⑦高橋義典, 累積調波分析を用いた音響伝達関数の特徴分析, 第54回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010年5月21日, 京都リサーチパーク (京都府)

[その他]

<http://www.acoust.rise.waseda.ac.jp/~takahashi>

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 義典 (TAKAHASHI YOSHINORI)
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・助教
研究者番号：30547732

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

東山 三樹夫 (TOHYAMA MIKIO)
早稲田大学・国際情報通信研究センター・教授
研究者番号：90255604