

時間一周波数解析を用いた ボルトの緩み検出方法に関する一考察

A method to detect bolt loosening using time-frequency analyses

村上琢哉*・盛川 仁**

Takuya Murakami and Hitoshi Morikawa

* 工修 JFE 技研株式会社主任研究員 土木・建築研究部 (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1)

** 工博 東京工業大学助教授 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

The applicability of methods using free vibration data to detect damage of a cantilevered column steel model is discussed. Firstly, time histories of vibration were measured by the hammering tests under the conditions in which some bolts at the base plate are artificially loosen. Next the Fourier analysis and some techniques of time-frequency domain analysis are applied. In conclusion, the technique of Hilbert-Huang Transform (HHT), which is a one of time-frequency analysis, can clearly display the differences between the time-frequency distributions of damaged and undamaged cases and better than some other methods including Fourier analysis and wavelet analysis.

Key Words: bolt loosening, detection of damage, free vibration, HHT(Hilbert-Huang transform)

1. まえがき

わが国では、国土交通省が所管する既存社会資本整備量の総額は、2001 年度に約 405 兆円に達している。高度経済成長期に建設した社会基盤施設は建設後数十年経過しているため、何らかの損傷を生じている構造物が徐々に増加しつつある。このため、将来にわたって効率的な維持管理を継続していくためには、簡便な健全度評価手法・損傷同定手法が望まれる。

損傷によって構造物の振動特性が変化することを利用して損傷判定法は、例えば、熟練者がハンマリングによる打音の変化に基づいて判定する方法が様々な分野で用いられていることからわかるように、比較的簡便な損傷同定法の一つといえる。たとえば、音響モニタリングの手法などの検討¹⁾が行なわれている。また、熟練者によらずに損傷を同定するために、何らかの方法で計測された構造物の時刻歴波形や卓越振動数の変化を利用することも広く試みられており、例えば、橋脚の洗掘状況の調査などで既に実用化されている²⁾。また、ボルトの緩み、鋼構造物の亀裂といった微細な損傷を検出しようとする事例もあり³⁾。⁴⁾種々の研究が行われているものの、一般には、損傷がかなり進行してはじめて時刻歴波形の形状や卓越振動数に違いが現れることが多いため、初期段階の軽微な損傷の検出には、自ずと限界があるものと考えられる。

一方、振動を利用して、減衰定数等の構造系の基

本的なパラメータを直接同定することにより損傷の有無を判定しようとする試みも行われている(たとえば、阿部ほか⁵⁾)。特に、カルマンフィルタ⁶⁾等の非定常現象を取り扱うことが可能なフィルタを用いた解析手法は、構造系の非定常な変化にもある程度追従できるので、リアルタイムに損傷同定を行うことが可能であり、構造物の常時モニタリングなどの目的で有望な手法であるといえる^{7),8)}。

このように、損傷同定のために振動を用いる手法としては様々なアプローチで研究が行われているが、本研究では、もっとも簡便な方法の一つである、ハンマリングによって得られる自由振動の波形を解析して構造物の振動特性の変化を抽出し、損傷の有無を判定する手法を取り扱う。初期段階の軽微な損傷を精度よく発見するためには、卓越振動数の変化に着目するだけでは、損傷に対する感度に限界があると考えられるため、時間軸方向の振動特性の変化にも着目する。すなわち、損傷時の振動特性の時間的な変化は非損傷時とは異なることが期待されることから、振動数軸上の特性変化だけでなく、時間軸上の特性変化を見ることにより高い感度で損傷同定が可能になるのではないかと考え、時間一周波数解析による損傷同定について検討する。

時間一周波数解析については、幾つかの手法があるが、本研究では、周波数方向に高解像度で時間方向の追従性も優れている時間一周波数解析手法として、近年注目されている Hilbert-Huang Transform (HHT)¹¹⁾ の

適用性を中心に検討し、従来から広く用いられている wavelet 解析⁹⁾や spectrogram (短時間 Fourier 変換)¹⁰⁾, Wigner 分布¹⁰⁾といった解析手法については、HHT と比較検討する形で用いた。

対象構造物は、手法の妥当性を議論しやすいように、振動性状が単純で、損傷による振動特性の変化が物理的に理解しやすく、かつ、損傷の具合をある程度を定量的に評価できる構造物を選んだ。具体的には、近年、振動、損傷が問題となっている標識柱、照明柱を想定して、一つの柱状鋼構造物をとりあげ、その基部のボルトの緩みを損傷とみなし、様々な損傷レベルの構造物をハンマリングすることによって得られる自由振動波形を解析して、どの程度のボルト軸力の低下を損傷としてとらえることができるか、を検討した。なお、ボルトの緩みの損傷同定については、今までの多くの研究において、ボルトを完全に緩めた場合のみが擬似損傷として検討されている。しかし、本研究では、損傷程度をパラメータとして取り入れることに重点をおき、軸力の変化を計測することでボルトの緩みを定量的に管理している点を強調しておく。

2. Hilbert-Huang Transform の基礎理論

本研究では、ハンマリングによって得られる自由振動の時系列波形を解析するにあたって、Fourier 解析だけではなく、時間一周波数解析として、wavelet 解析、spectrogram、Wigner 分布、HHT を適用するが、HHT 以外の手法については既に多くの成書が著されているのでそれらを参照されたい(例えば文献 10))。以下では、HHT についてのみ、文献 11) からその基本的な考え方を簡単に述べるにとどめる。

HHT は Huang ら¹¹⁾によって提案された時間一周波数解析法の一つであり、海の波や地震動など様々な時系列波形への適用例が彼ら自身によって示されている^{12)~17)}。また、Pines ら¹⁸⁾はボルトを緩めて模擬損傷を与えた建物模型を対象として HHT によって損傷同定が可能であることを示している。

適当な複素時系列波形(以下では単に複素信号と呼ぶ)、 $s(t)$ を考え、それが、

$$s(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (1)$$

と表されるものとする。ここで、 $j = \sqrt{-1}$ 、 $A(t)$ と $\phi(t)$ は実信号で、それぞれ $s(t)$ の振幅と位相を表している。このとき、ある時刻 t における信号の瞬間的な周波数を代表する量である瞬間周波数は、 $\phi(t)$ の時間微分 $\phi'(t)$ によって表される¹⁰⁾。

$s(t)$ が実信号であった場合、上記の定義によって求められる瞬間周波数は常に 0 となる。そのため、物

理的に意味のある瞬間周波数を得られるようにするためには、何らかの方法で虚部を与えなくてはならない。虚部は自由に与えてよいが、負の周波数に対して 0 となるようなスペクトルを有するように虚部を決定する、という条件を与えると、実信号 $s(t)$ の虚部は $s(t)$ のヒルベルト変換として一意的に与えることができる。このようにして得られた複素信号を解析信号と呼ぶが、現実の実験によって得られる波形の記録はほぼ例外なく実信号であるため、以下では解析信号を取り扱うこととなる。

意味のある瞬間周波数を得るためには、信号が 0 を挟んで上下で対称であることが要請されるため、Huang ら¹¹⁾は局所平均が 0 であるような信号 (intrinsic mode function; IMF と呼ぶ) でこれを代用するとしている。しかも、同時に 2 つ以上の振動数成分からなる信号の瞬間周波数は物理的に理解しにくい性質を示すため、各時刻でそれらの振動数成分が分離されるように複数の成分波に信号を分解しなくてはならない。従って、任意の実信号 $s(t)$ が与えられたとき、その信号を IMF の和に分解したのち、それぞれの IMF の解析関数を構成して、瞬間周波数を求めることになる。信号の分解には empirical mode decomposition (EMD) と呼ばれる Huang ら¹¹⁾によって提案されている手続きを用いる。

以上より、 k 番目の IMF に関する時刻 t の振幅を $A_k(t)$ 、瞬間周波数を $\omega_k(t) = \phi_k'(t)$ とすると、 $A_k(t)$ が $\omega_k(t)$ にも依存することに注意して、時間一周波数分布は $A_k(t, \omega_k(t))$ によって与えられる。Huang ら¹¹⁾はこれをヒルベルトスペクトルと呼んでおり、本論文でも、HHT によって得られた時間一周波数分布の呼び方として、必要に応じて、ヒルベルトスペクトルという術語を用いる。

3. 実験概要

(1) 実験方法

柱状構造物をハンマで打撃し、その自由振動波形を記録した。このときの実験供試体を図-1 に示す。供試体は、高さ 4m、直径 216.8mm の鋼管柱であり、基部は板厚 12mm の 8 本のリブで補強されている。25mm 厚のベースプレートは 4 本の普通ボルト (M24) により固定されている。写真-1 に基部付近の供試体の様子を示す。実験は、軸力を調整した後に、約 1.2m 高さを人力でハンマリングすることにより減衰自由振動波形を計測した。ボルト軸力の計測には、ボルト用埋込みひずみゲージ (東京測器製 BTM ゲージ) を用いた。また、変位計は、計測者の設置高さの制約を考

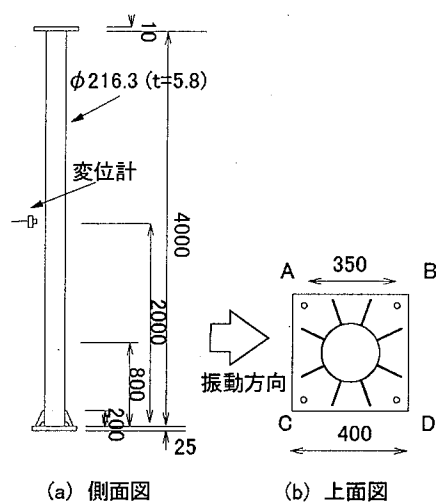


図-1 実験供試体

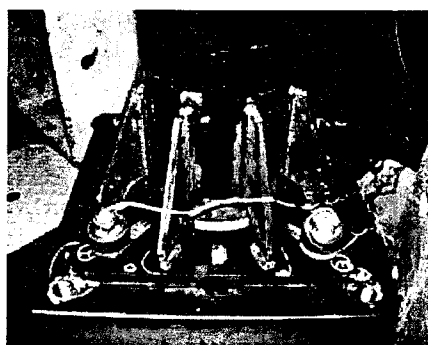


写真-1 供試体基部の拡大

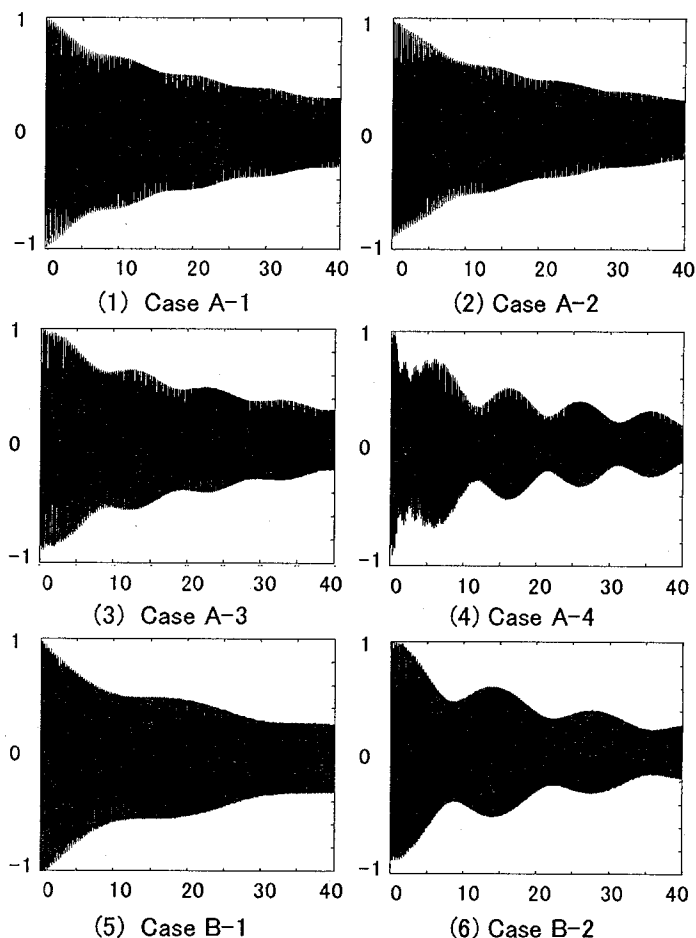
表-1 実験ケース

Case	ボルト軸力程度(%)				実験回数
	A	B	C	D	
A-1	100	100	100	100	5
A-2	100	100	100	75	3
A-3	100	100	100	50	3
A-4	100	100	100	25	3
A-5	100	100	100	0	3
B-1	100	100	50	50	3
B-2	100	50	50	50	3

(備考)

軸力0%は、ボルトを取り外して実施した。
ボルト軸力程度は100%が23kNを示す。

慮して、高さ2mの位置に高精度渦電流式デジタル変位計（キーエンス製EX-V）を設置して、サンプリング間隔0.1msで計測した。実験ケースを表-1に示す。実験ケースは、4本のボルト（図-1中のA、B、C、D）について、作業員が通常に締付けた時の軸力23kNを標準値（軸力100%）として、ボルトの緩みがない正常な状態、ボルトDのみ適宜緩めて軸力を変化させたケース、軸力50%を複数本としたケースを選定した。実験は、各ケースで3回以上実施した。



(備考) 横軸：時間(sec.) 縦軸：正規化した振幅

図-2 時刻歴波形

(2) 実験結果

a) 時刻歴波形

Case A-5 はボルト D を取り外しているため、他のケースとは固定条件が明確に異なる。そこで、これ以外のケースについて記録された時刻歴波形の1例を図-2 (1)～(6) に示す。各図は、最大振幅が0.5mmとなる時刻をゼロとして、40秒間の時刻歴波形を描いており、縦軸は全て最大値が1となるように正規化している。また、記録された波形は1次モードが卓越した振動であるため、それぞれの波形の特徴が顕著に現れる包絡線の形状が見やすいように左右をつめて表示した。

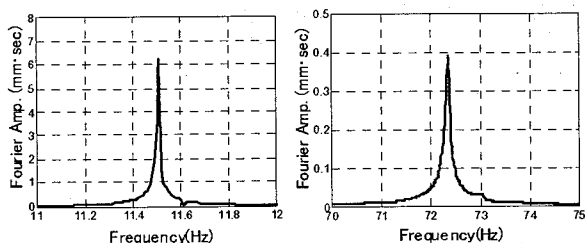
b) 卓越振動数の変化

測定振幅が約0.6mmの時刻から100秒の減衰波形を取り出し、フーリエ振幅スペクトルを求めて、卓越周波数を算定した。したがって周波数分解能は0.01Hzとなる。

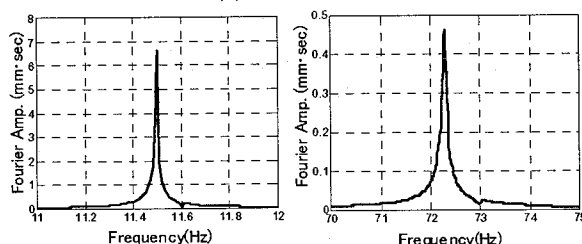
曲げ1次モード、2次モードの固有振動数を固有値解析結果と比較して表-2に示す。表中の解析モデルは、ベースプレートより上部をシェル要素として作成

表-2 卓越振動数の変化

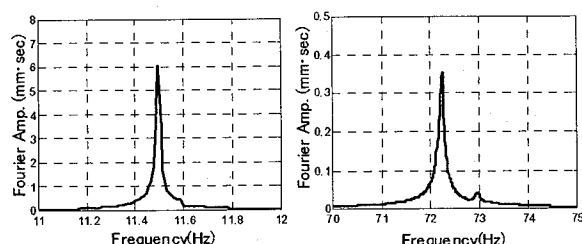
Case	ボルト軸力程度(%)				卓越振動数 (Hz)		低減率(%) (A-1との比)	
	A	B	C	D	1st	2nd	1st	2nd
A-1	100	100	100	100	11.52	72.34	-	-
A-2	100	100	100	75	11.50	72.30	-0.2%	-0.1%
A-3	100	100	100	50	11.49	72.25	-0.3%	-0.1%
A-4	100	100	100	25	11.47	72.10	-0.4%	-0.3%
A-5	100	100	100	0	11.39	72.70	-1.1%	0.5%
B-1	100	100	50	50	11.48	72.13	-0.3%	-0.3%
B-2	100	50	50	50	11.48	71.90	-0.3%	-0.6%
解析	100	100	100	100	11.98	77.73	4.0%	7.5%



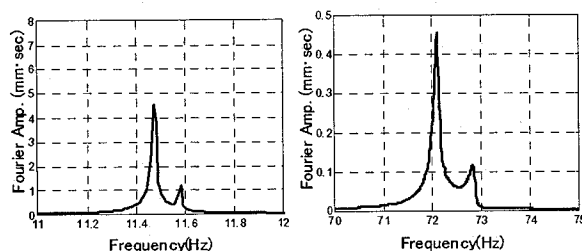
(1) Case A-1



(2) Case A-2



(3) Case A-3



(4) Case A-4

(備考) 左図：1次モード，右図：2次モード

図-3 フーリエ振幅スペクトル

し、ボルト孔部分を固定端としたモデルによって数値的に求めたものである。表-2より、実験値は解析値よりもやや小さく、1次モードで約4%、2次モードで約7%の差がある。これは、本実験を実施した場所が鋼製テストベッド上であり、解析モデルで設定した

完全な固定条件ではなかったことにも原因があると考えられる。また、代表例としてCaseA-1～A-4のフーリエ振幅スペクトルを1次モード、2次モードの周辺を拡大して図-3(1)～(4)に示す。

c) 時間一周波数分布

時間一周波数解析を行なう場合には、時間と周波数方向のデータを取り扱わねばならないため、データ量が膨大になる。そこで、解析を始める前に、データ量を減じる操作を加えた。まず、オリジナルデータによる解析結果と Fourier 振幅スペクトルから判断して、対象とする周波数帯域を 2Hz ～400Hz に定め、時間軸上でバンドパスフィルターをかけたのち、オリジナルのデータを10個ずつとばして、サンプリング間隔を1msとした。そのうえで、解析区間として記録のはじめから25秒だけを切り出して解析用のデータを生成した。なお、このようなデータ処理の後に解析を行っても、オリジナルの記録を用いて直接解析をした場合と解析結果に相違がないことをいくつかの記録において確認している。

ハンマリングは人力で行なわれているため、最大振幅が計測毎に異なる。そこで、図-1で示した時刻歴波形のように、最大振幅が1となるように波形を正規化して、解析を行なった。HHTにより得られた各ケースの時間一周波数分布(ヒルベルトスペクトル)を図-4(1)～(6)に示す。

4. 議論

(1) 損傷時の時刻歴波形の特徴

図-2の時刻歴波形を見ると、1本のボルト軸力が50%まで低下すると、包絡線の形状が少し乱れてうなりが観察され(同図(3))、軸力が25%まで低下すると、包絡線がはっきりと波打ち、大きなうなりを伴った波形となることがわかる(同図(4))。従って、ボルトの軸力が25%程度まで低下した場合には、時刻歴波形の観察によって損傷を検出できることがわかる。この場合には、打撃音も正常な試験体とは、はっきりと異なっており、耳で聞いても異常は明らかであった。この違いは、柱状構造物の基部のボルトを緩めることにより、物理的には固定端として機能を失い、基部プレートと設置面との接触状態が、逐次変化しているために生じていると判断される。また、2本のボルト軸力が50%まで低下した場合には(同図(5))、1本のみが低下した場合との違いはあまり明確ではないが、3本のボルト軸力が低下した場合には、大きなうなりを伴う波形となり、はっきりとした違いが見られる。ただし、1本のボルト軸力が25%まで低下した場合に比べると、うなりの周期も長く、波形の乱れも少ない。

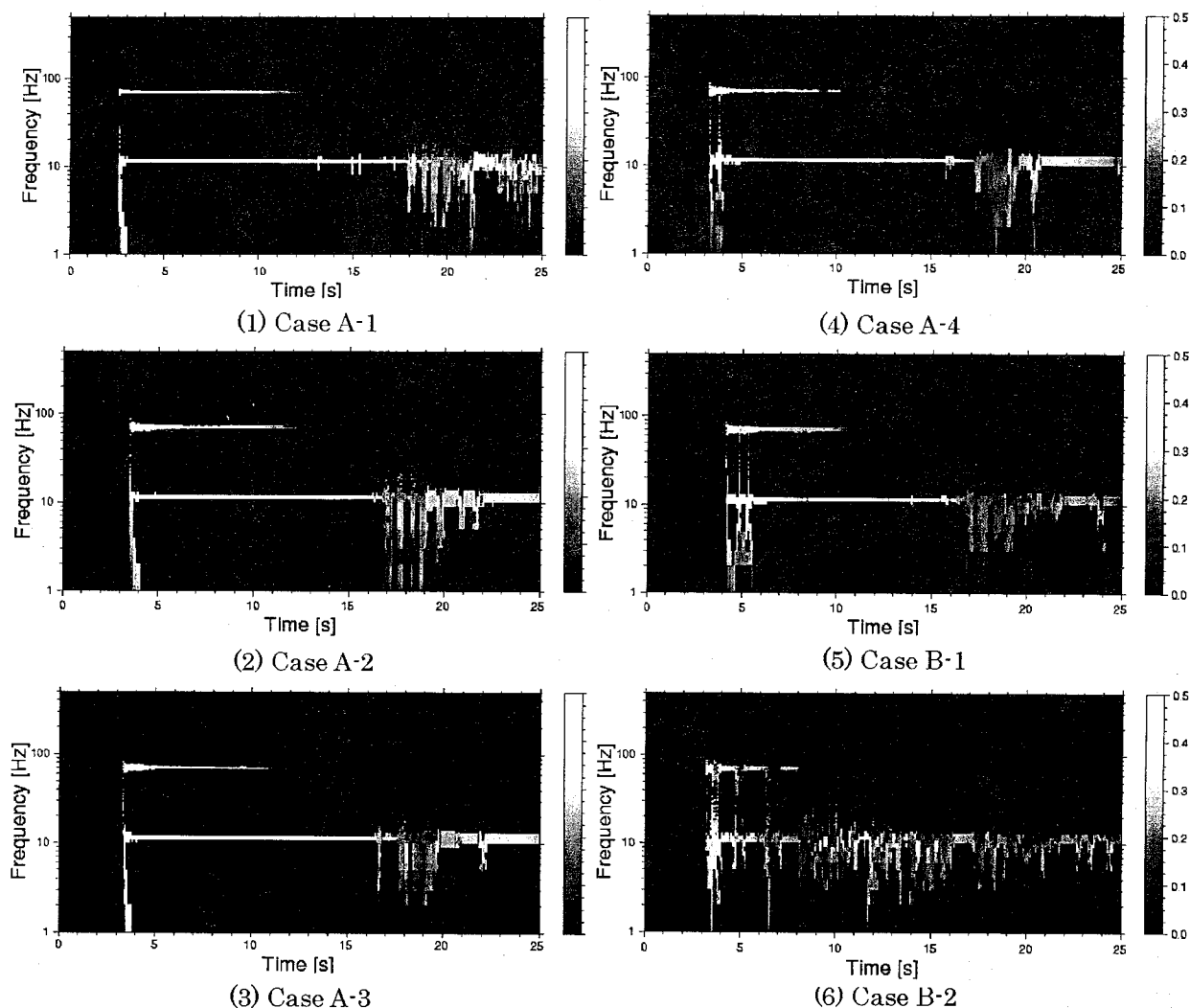


図-4 HHTによる時間一周波数分布 (ヒルベルトスペクトル)

以上のことから、本供試体では、時刻歴波形で観察する場合には、少なくとも1本のボルト軸力が半分以上にまで低下した状況で、損傷のないケースとの違いが現れ、軸力が25%まで低下すると明確に損傷の存在を判定できるようになる、と言える。

(2) 損傷時の卓越振動数の変化

表-2 に示した卓越振動数の変化を見ると、全ての場合において、1次モード、2次モードともに卓越振動数の変化は小さい。1本のボルト軸力が変化した場合で見ると、初期軸力の50%で0.03Hz、25%で0.05Hz、2本以上のボルトの軸力が変化した場合でも、振動数の変化は0.03~0.05Hzであり、ほとんどのケースで卓越振動数の変化率は1%に満たない。

複数回の計測結果について、一律にFourier解析を行った結果、上述の卓越振動数の変化には再現性が見られ、その誤差は±0.01Hzであった。従って、損傷に伴う卓越周波数の変化は周波数の分解能に対して少なくとも3倍以上の変化を示しており、卓越周波数の

変化を調べることでボルトの緩みを検出できる可能性があることがわかる。しかし、現実の構造物での適用にあたっては、温度変化、微動等の外乱の影響などを受けるために、必ずしも卓越周波数の変化のみからボルトの緩みを検出する事は難しいと考えられる。

Fourier 振幅スペクトル(図-3)について見ると、Case A-2 (軸力75%)ではCase A-1 (軸力100%)と明確な違いが認められないものの、Case A-3 (軸力50%)、A-4 (軸力25%)では、卓越振動数より少し高い周波数域でスペクトル形状に変化が見られる。Case A-3 では2次モードの卓越振動数より0.7Hzほど高い73Hz付近に小さなピークが現れ、Case A-4 では1次モード、2次モードのいずれについても、その卓越振動数より少し高い振動数成分に明確な違いが確認できる。これは、時刻歴波形に見られるうなりの影響と判断される。したがって、Fourier スペクトルの卓越振動数周辺の形状変化に着目した場合の損傷の検出感度は時刻歴波形と同程度である。すなわち、本供試体では、軸力が50%程度まで低下した場合には損傷の予想が可能となり、

確実に損傷を検出できるのは軸力が 25%以下の場合と言える。

(3) 時間一周波数解析による損傷判定の可能性

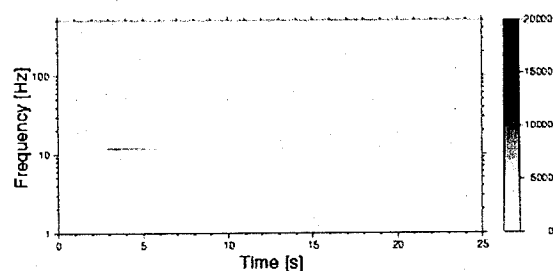
a) 損傷がない場合の時間一周波数分布の特徴

図-4 に示したHHTによる時間一周波数解析の結果を見ると、いずれの場合についても、打撃直後に、ごくわずかに振動数特性の乱れが見られる。これは、Huangらの表現によれば¹¹⁾、Gibbs効果に対応するものと考えられる。最初の振動数の乱れの後、1次と2次モードに対応する振動数付近にはっきりと卓越した振動成分が見られる。また、2次モードは1次モードに比べて減衰が早く、損傷の程度に拘らず初動から15秒前後経過したところで、2次モードが見えなくなり、それと同時に1次モードの振動数特性が大きく乱れている。このことは、2次モードが減衰して、その振幅が非常に小さくなってしまい、2次モードに対応する周波数を含むIMFを正確に分離することができず、瞬時振動数が1次モードと2次モードの間をゆらぐことが原因であると考えられる。また、2次モードが図の上から消える直前は、周波数の幅が時間とともに大きく広がっており、Gibbs効果のような様子を示している。

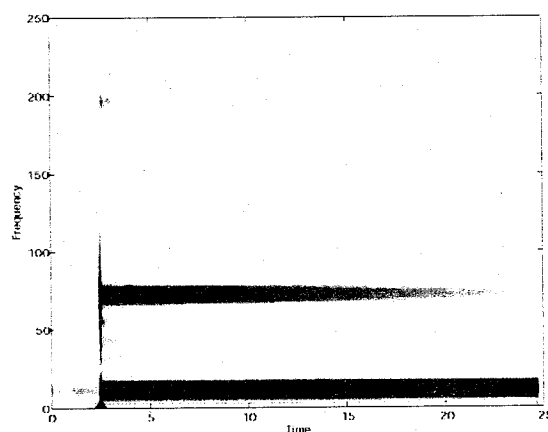
以上は、損傷の有無に拘らず、どのようなケースについてもみられる傾向である。本項では、損傷が無い場合について、その特徴をもう少し詳しく調べる。

最初に、時間一周波数解析手法の違いによって、時間一周波数分布がどのように異なるかを検討する。図-5 に Wigner 分布、Spectrogram、連続 wavelet 解析の結果を示す。比較のために、バンドパスフィルターをかけて、抽出した1次モード、2次モードの自由振動波形も載せた。図-5 (1)の Wigner 分布では、2次モードに相当すると思われる成分が非物理的なモード (Wigner 分布のクロス項に起因して見かけ上現れるが、実際には存在しない振動成分) に邪魔されてわかりにくくなっていることがわかる。

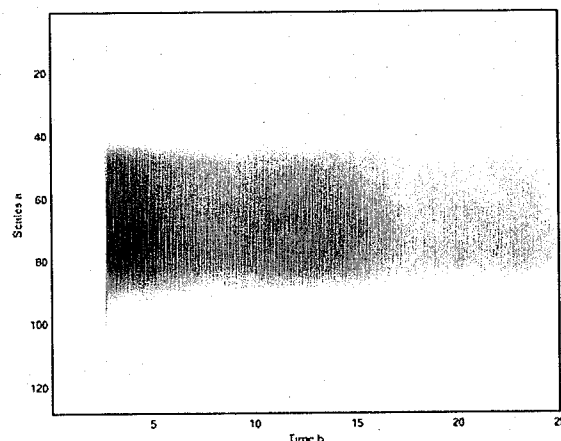
また、図-5 (2)の spectrogram では、卓越振動数と思われる振動成分が非常にはっきりと示されている。ただし、この図では、縦軸をこれまでとは異なり線形で表示している。そのため、卓越振動数がはっきりしたピークとして示されているように見えるが、対数軸で描くと卓越振動数付近で大きな値を持つ部分の幅が非常に大きいことには注意が必要である。また、200Hz 付近にみえる振動数成分は、片持ち梁の理論値、固有値解析結果から判断すると3次モードに対応していると考えられるが、150Hz に見える振動成分の物理的な意味については解釈が難しい。さらに、他の手法、自由振動波形と比較すると、2次モードの減衰が小さいように見える。これは、spectrogram を計算する際に



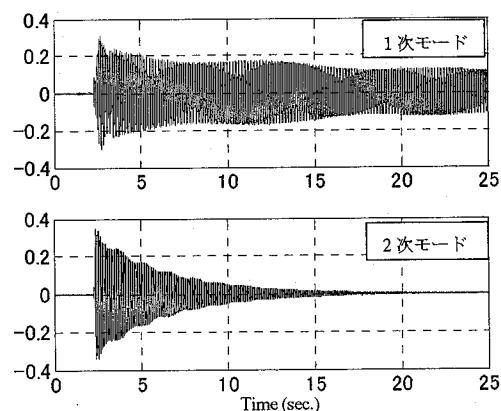
(1) Wigner 分布



(2) Spectrogram (時間窓の長さ: 1.024 秒)



(3) 連続 Wavelet (Mother wavelet: Meyer)



(備考) 各モード成分の自由振動波形 (縦軸: 振幅(mm))

図-5 種々の時間一周波数分布の例 (A-1)

与える時間窓の幅に依存することを考慮に入れても、2次モードの継続時間が長く表現されていると言える。

図-5 (3)の連続 wavelet については、縦軸が線形で、しかも周波数ではなく周波数の足をとっているため、数値が小さくなるほど（縦軸の上に行くほど）高周波数である。これより、2次モードは比較的早く減衰しており、HHT でみたものよりもやや減衰が大きいようである。また、低周波数領域の周波数の解像度が低く、1次モードがどこにあるのかわかりにくい。mother wavelet を工夫すれば良好な時間一周波数分布を得ることができる可能性もあるが、このことは、実際の計測などの際に現場での mother wavelet のチューニングが必要である事を意味しており、あまり効率の良い方法とは言えないと判断される。

図-4 (1)および図-5 を比較するとわかるように、ヒルベルトスペクトルは他の時間一周波数解析手法と比べて、物理的な理解との対応も良く、また、時間、振動数ともにほどよいバランスで高い解像度を示していることがわかる。これは、従来の時間一周波数解析では、不確定性原理の制約を受けて、時間方向と周波数方向の解像度を同時に高めることは困難であることに関連している。すなわち、HHT の周波数方向の情報は、IMF から求めた瞬時周波数以外の値については何も定義されていないという特徴を持つ。従って、HHT では周波数方向の情報量は不完全であるものの、必要な（あるいは、卓越する）振動数だけを EMD で抽出し、時間方向の解像度を確保しようとする手法であると解釈できる。

これによって、HHT は、時間と周波数の両方について比較的高い解像度を持っているように見える時間一周波数分布が得られるのである。このような特徴から、HHT は、今回適用した供試体の様な単純な構造物、すなわち、固有振動数が近接しておらずモノトニックな振動波形が得られる構造物に対しては、他の手法に比べて物理的解釈をしやすい時間一周波数分布を描くことができ、損傷同定への適用性に優れていると判断できる。さらに、HHT は解析方法に任意性がないため、常に同じ手続きで、ある一定の結果に至るという点も本研究のような目的には適切であろう。

次に、損傷がない場合のヒルベルトスペクトルに見られる卓越振動数について議論する。卓越振動数は、表-2 に示したように Fourier 解析からは 11.52Hz と 72.34Hz と求められており、固有値解析値よりもやや小さいが、HHT から求められる卓越周波数も必ずしもこれらの結果と厳密には一致していない。1次モードと2次モードの部分の振動数成分の様子がよくわかるように、横軸に時刻、縦軸に線形で瞬時周波数をとったものを図-6 に示す。この図には、同時に Fourier

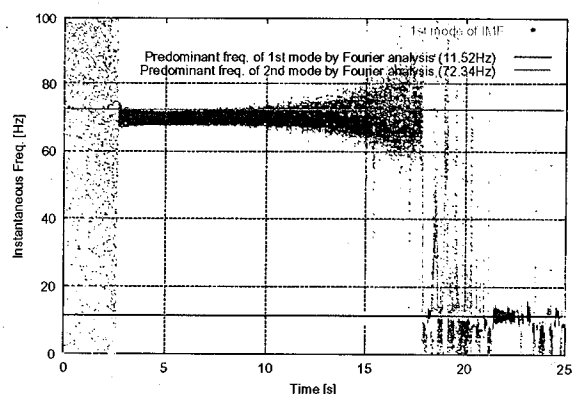


図-6 Case A-1 の瞬時周波数の時刻歴

解析から求められた卓越周波数も水平な線として描いた。図-6 からわかるように、IMF の一階微分として求められる瞬時周波数は時刻によって激しくばらつくため、Fourier 解析のように全記録を用いて得られる平均的なスペクトルのピーク値と直接的に対応するものではない。しかし、両者はある程度整合性のある結果が得られることが期待される。打撃直後から約 15 秒間の 2 つのモードが安定して見えている区間を見ても、1次モードは互いに良い対応を示しているのに対して、ヒルベルトスペクトルに見られる 2 次モードの卓越振動数はかなり低いことがわかる。この違いは、Fourier 解析が解析区間全体の平均的なスペクトル特性を求めるものであることも原因であると考えられる。1次モードは、減衰が小さいので解析区間全体にわたって同じ周波数で振動する成分が含まれているために、Fourier 解析でも精度の良い結果が得られるが、その一方で、2次モードは減衰が大きくその継続時間が短いため、Fourier 解析による解析区間全体に対してごく一部分しか、有意な記録が含まれていないために、このような非定常な波形の Fourier 解析の結果には誤差が含まれやすいと判断される。

b) 損傷を受けた場合の時間一周波数分布

時刻歴波形をみただけで、明らかに損傷を受けていることがわかる Case A-4 の場合まで含めて、図-4 のヒルベルトスペクトルを一見した限りでは、それらの違いを認識することは難しい。なお、図-4 (4)は初動の部分で、振動数が大きく乱れているが、これは、ハンマで叩いたときに、意図せずに 2 度叩いてしまったことが原因ではないかと考えられる。なぜなら、同じ条件下で記録されている他の 2 回の記録からはこのような振動数の乱れは認められなかったからである。

ヒルベルトスペクトルで示される卓越振動数を調べてみても、Fourier 解析で見られたような変化は見られない。図-6 で見たように、瞬時周波数は時間に対して大きなゆらぎを示すため、0.05Hz 程度の小さな振動

数の変化をヒルベルトスペクトルとして認識することは困難であることが原因であろう。

柱状構造物の基部のボルトが緩む現象は、物理的には固定端としての機能を失う、ということに相当し、基部のボルトが緩むことにより、一般的に考えれば、高次モードの減衰が大きくなることが予想される。実際、ヒルベルトスペクトルにおいて、2次モードが減衰して図から消えるまでの時間を見ると、有意な差が存在する。「2次モードが消えるまでの時間」をどのように定義するか、はいくぶん主観的に決める部分があるため、あまり数学的ではないが、第一近似として、「初動から1次モードの振動数が大きく乱れはじめる瞬間まで」を図-4から直接読み取った。この程度の定義でも、1次モードの振動数が大きく乱れはじめる部分は、同図からもわかるとおり、非常にはっきりしているため、計測する人によるばらつきはそれほど大きくはないと考えている。以上のようにして調べた2次モードの継続時間を表-3に整理した。Case A-3の3回目の記録が A-1 の平均値と変わらないこと、Case A-4の1回目の記録で、継続時間が14.0秒となっていてCase A-1の5回目とあまり違いがないことが目立つものの、それ以外の場合については、少なくとも0.5秒以上継続時間が短いことがわかる。サンプル数が非常に少ないため平均値にはほとんど統計的な意味はないが、概ね、ボルトが少しでも緩むと2次モードの継続時間は有意に短くなると判断される。このことは2本以上のボルトが緩んでいるCase B-1、B-2についても同様であった。ボルトが緩んだ場合ほど継続時間はばらついていく傾向にあるが、これはHHTが振動波形の変化を敏感に捉えられる手法であると考えられる。すなわち、固定端としての機能がある程度失っている場合には、固定プレートと設置面の接触条件が振動中に常に変化して、振動波形に微妙な変化が見られ、その違いが現れた結果であると推察される。

以上より、ボルトの緩みの定量的な損傷は明確にはわからないものの、2次モードの継続時間をヒルベルトスペクトルから読み取ることで、ボルトがわずかに緩んだだけでも、それを判別することが可能であると期待される。

2次モードの減衰が損傷の判断基準になる、ということであれば、時刻歴波形から直接対数減衰率を算出してその違いを比較する、あるいは対象とする振幅区間を通過する時間の差を比較することでも判別できることが考えられる。まず、観測された時刻歴波形にバンドパスフィルターをかけて2次モードを抽出し、自由振動波形の振幅-対数減衰率の関係を算出した。算出にあたっては、対数減衰率を算定する振幅について、振幅がピークとなるところから80波(約1秒)

表-3 ヒルベルトスペクトルから算定した
2次モードの継続時間

Case	2次モードの継続時間(秒)					
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
A-1	15.25	14.63	14.63	14.44	14.38	14.67
A-2	13.19	13.38	14.13	—	—	13.57
A-3	13.25	13.25	14.63	—	—	13.71
A-4	14.00	11.25	13.88	—	—	13.04

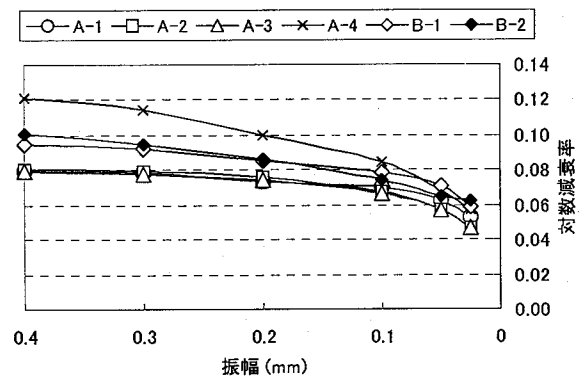


図-7 2次モードの振動波形の対数減衰率

の波形を取り出して計算に用いた。得られた対数減衰率を図-7に示す。対数減衰率は、各ケースで実施した実験回数の平均値である。これにより、波形から求められる対数減衰率は、一本のボルト軸力が50%に低下するまで(Case A-1～A-3)は有意な差が見られないこと、25%に低下した場合(Case A-4)には減衰が大きく増加することがわかる。2本以上のボルト軸力が50%低下した場合には、1本のみ軸力低下時よりも減衰が大きくなるという傾向が見られる。

また、観測された時刻歴波形にバンドパスフィルターをかけて2次モードを抽出し、時刻歴波形の包絡線から、ある振幅区間を通過する時間を算出した。対象とする振幅区間は0.2-0.3mm, 0.1-0.2mm, 0.05-0.1mm, 0.025-0.05mmの4区間とした。得られた所要時間を図-8に示す。各ケースについて、各試験回数と平均値を示したが、Case A-1で5回実施した内の1回は、振幅区間が0.2-0.3mmに満たなかったため、その試験データは記載していない。また、Case B-2については、波形の乱れから包絡線の振幅0.025-0.05mmの通過時間を0.05-0.1mmの通過時間と区別できなかったため、0.025-0.05mmの通過時間を記載していない。これより、損傷がないCase A-1では、通過時間の各試験回数のばらつきは大きくないことがわかる。一方、1本のボルト軸力が低下した場合には、Case A-2, Case A-4では各試験回数でのばらつきが認められるものの、Case A-3ではCase A-1と概ね同程度のばらつきであることがわかる。各振幅区間の通過時間を比較すると、振幅0.2-0.3mmの通過時間はCase A-1よりもCase A-2, A-3

の方が短くなっているが、Case A-4 では同程度であり、ボルト軸力の減少と通過時間は比例関係になく、振幅 0.1-0.2mm ではどのケースも大きな違いがない。振幅 0.025-0.3mm と大きな振幅区間の通過時間をとった場合には、Case A-1 は、Case A-2~A-4 と比べて、平均値で約 0.5 秒通過時間が長いことがわかる。

以上の結果は、損傷によって 2 次モードの減衰が大きくなるというヒルベルトスペクトルの結果と定性的には一致している。しかし、ヒルベルトスペクトルで見たように、Case A-2 のように 1 本のボルトがわずかに緩んだだけでも、そのことを発見可能である、という結果とあまり整合しないように見える。しかし、損傷が生じている構造系では、固定条件が時間とともに非定常に変化しており、自由振動の波形も非定常な揺らぎを持っているものと考えられる。したがって、比較的短い時間での対数減衰率を厳密に計算するよりも、大きな振幅変化を伴う区間の通過時間をとる方法、あるいは、減衰の様子を大まかにとらえる時間一周波数分布のほうが、平均的な傾向をよく捉えることができ、その結果として損傷の有無の判定をわかりやすくしているであろう、と考えている。また、Case A-1 の各試験において、加振振幅にはばらつきが見られるものの、ヒルベルトスペクトルから 2 次モードの継続時間を算定した今回の算定結果には、あまりばらつきが見られない。これは、今回の算定方法は 2 次モードと 1 次モードの振幅比によって決まっていると考えられるため、打撃力の違いによる絶対振幅の違いによらず、ある程度安定した結果が得られた、と考えている。

最後に、実験の再現性について述べておく。Case A-1 では、同じ条件のもとで 5 回の計測を行ったが、いずれの解析結果を見ても上に述べたヒルベルトスペクトルの全体的な特徴は同じである。卓越振動数の値も毎回同じ値を示している。また、図-8 から各試験回数における振幅区間の通過時間のばらつきは大きくない。人力のハンマリングであり、外力が若干不安定であるものの、2 次モードの減衰に要する時間はある程度安定したパラメータであると判断される。

以上より、モニタリングな波形が得られる構造物に対して、ハンマリングによる自由振動波形から損傷を同定する手法については、HHT を適用する手法が、フーリエ解析による方法、他の時間一周波数解析による方法よりも有効であると判断できる。ただし、ボルトの緩みを損傷として考えた場合に、HHT によるヒルベルトスペクトルから得られる 2 次モードの継続時間によって損傷程度を定量的に判断できるかについては現段階では難しいと考えられる。さらに、今回対象とした供試体は、単純な片持ち梁構造とは言え、

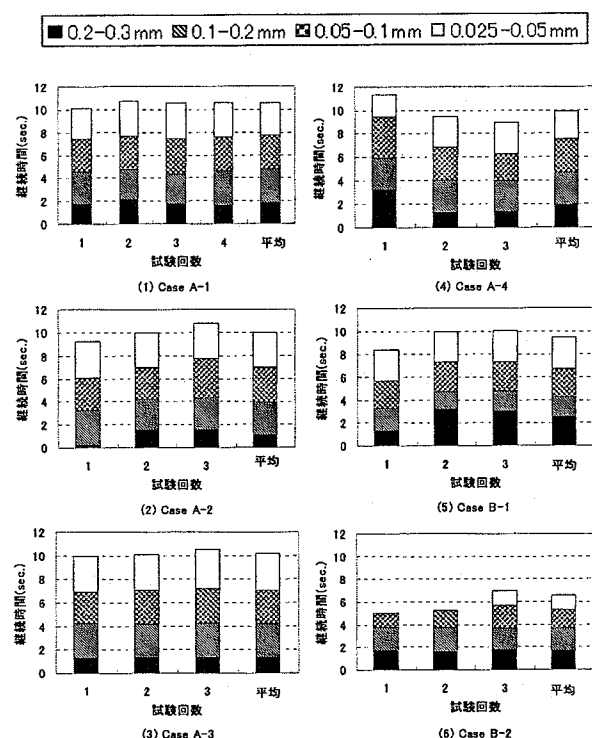


図-8 時刻歴波形の振幅区間の継続時間（2次モード）

固定端の条件は、設置場所の凹凸、底鋼板の溶接によるひずみ量、ボルトによる固定方法、導入するボルト軸力等により変化するため、振動特性が変化する状況は個々の構造物で異なってくることが予想される。そのため、損傷の有無の判断には有効であることはわかったが、損傷をどの程度の損傷から推定できるかなど、定量的な損傷同定に関しては今後の課題となる。今後、より多くの実験を実施することで明らかにできると考えている。

5. 結論

照明柱、標識柱等を想定して、一つの柱状鋼構造物基部のボルトの緩みを損傷の対象として、振動特性に着目した損傷同定手法が、どの程度まで検出可能かを、時間一周波数解析手法を用いて検討した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 今回の供試体では、ボルトの軸力が 50%程度まで低下すると、時刻歴波形にうなりが見られるため、自由振動波形を目視だけで判定が可能である。特に、軸力が 25%まで低下すると非常にはっきりとしたうなりを生じており、打撃音からでも判定が可能である。卓越振動数の変化は、周波数分解能の 3~5 倍程度であった。
- (2) 今回の実験供試体では、ボルトの軸力が 50%以下になると、卓越周波数の近くの Fourier 振幅スペ

クトルの形状に違いが現れ、25%まで低下した場合には、卓越周波数より少し高振動数に小さなピークが現れる。これらは、うなりの原因となる振動数成分と考えられ、損傷の判定に有効である。

- (3) 時間一周波数解析手法の一つである HHT によって得られるヒルベルトスペクトルは、他の手法 (Wigner 分布, spectrogram, 連続 wavelet 解析) に比べて振動数および時間の解像度のバランスが優れており、自由振動の物理的な特性と良く合った時間一周波数特性を示す。特に、今回実施したモニタリングな振動波形が得られるような構造物に対しては、HHT は損傷同定法としての適用性に優れていると言える。
- (4) Fourier 解析によって得られる損傷に伴う卓越振動数の変化は、ヒルベルトスペクトルでは認められなかった。これは、瞬時周波数の揺らぎの中に、卓越振動数の変化が埋もれてしまうためであると考えられる。
- (5) 今回実施した供試体では、ボルトを緩めた場合には HHT によって得られるヒルベルトスペクトルから算定された2次モードの継続時間が有意に短くなることがわかった。フーリエ解析による方法、他の時間一周波数解析による方法よりも軽微なボルト軸力変動による振動特性の違いを認識できていることから、HHT は初期段階の軽微な損傷の発見に有用なツールになり得る可能性がある。ただし、ボルトの緩みの程度によって、継続時間のばらつきが大きい場合があり、継続時間だけで損傷程度を定量化することは難しいと判断される。

参考文献

- 1) 小幡ら：鋼橋の損傷同定における音響モニタリングの適用に関する基礎的研究，応用力学論文集，Vol.5，pp.827-836,2002年9月。
- 2) 土木学会構造工学委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，丸善，平成12年10月。
- 3) 大西ら：高次振動解析による鋼桁ボルトのゆるみの検出，土木学会第56回年次学術講演会，I-A157，pp.314-315,2001年10月。
- 4) 小幡ら：振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.531-538,2000.3。
- 5) 阿部ら：常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋の適用例，土木学会論文集 No.689/I-57，pp.261-274,2001年10月。
- 6) 片山徹：新版 応用カルマンフィルタ，朝倉書店，2000。
- 7) 星谷勝・斎藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析と

応用 -カルマンフィルタを中心として-，鹿島出版会，1991。

- 8) 佐藤忠信ら：各種統計的フィルタ理論の合成に基づく非線形構造同定アルゴリズムの開発，第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp.1-6,2002年2月。
- 9) Ingrid Daubechies: Ten Lectures on Wavelets, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, 1992.
- 10) コーエン, L.: 時間一周波数解析, 吉川昭・佐藤俊輔訳, 朝倉書店, 1998.
- 11) Huang, N., et al.: The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis", *Proc. of the Royal Society of London*, 454, pp.903-995, 1998.
- 12) Long, S.R., N.E. Huang, C.C. Tung, M.L. Wu, R.Q. Lin, E. Mollo-Christensen, and Y. Yuan: The Hilbert techniques: an alternate approach for non-steady time series analysis", *IEEE Geoscience Remote Sensing Soc. Letter*, Vol.3, pp.6-11, 1995.
- 13) Huang, N.E., S.R. Long, and Z. Shin: The mechanism for frequency downshift in nonlinear wave evolution", *Advances in Applied Mechanics*, Vol.32, pp.59-121, 1996.
- 14) Huang, N.E., Z. Shen, and S.R. Long: A new view of nonlinear water waves: the Hilbert Spectrum", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.31, pp.417-457, 1999.
- 15) Huang, N.E., C.C. Chen, K. Huang, L.W. Salvino, S.R. Long, and K.L. Fan: A new spectral representation of earthquake data: Hilbert Spectral analysis of station TCU129, Chi-Chi, Taiwan, 21 September 1999," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.91, pp.1310-1338, 2001.
- 16) Jann N. Yang, Ying Lei, Shuwen Pan and Norden Huang: System identification of linear structures based on Hilbert-Huang Spectral analysis. Part 1: normal modes, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol.32, pp.1443-1467, 2003.
- 17) Jann N. Yang, Ying Lei, Shuwen Pan and Norden Huang: System identification of linear structures based on Hilbert-Huang Spectral analysis. Part 2: complex modes, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol.32, pp.1533-1554, 2003.
- 18) Darryll Pines, Liming Salvino: Health monitoring of One dimensional Structures Using Empirical Mode Decomposition and the Hilbert-Huang Transform, *Proc. of SPIE*, Vol.4701, pp.127-143, 2002.

(2006年4月13日受付)