

1. はじめに

近年における構造物の多くは、巨大化・長大化し、それともなって構造物の動特性はより複雑になってきている。特に振動情報のモニタリングなどにおいては、高い精度の振動計測、及び解析の必要性が高まっている。そこで、振動計測により得られた実測データから、動特性を推定する構造同定（逆解析）が重要な手がかりとなる。

本研究では、既存構造物から加速度データを計測し、それをもとに振動数領域同定プログラムで対象構造物の振動特性を同定し、その精度を検証することを目的としている。この一連の処理を実現するための手段の一つとして、データ処理と計測に特化した仮想計測器ソフトウェア「LabVIEW」を用いて、視覚的な画面構成で扱いやすい振動特性推定システムを開発した。（図-1、図-2）

2. 振動データ計測の流れ

計測システムのデータ集録の流れは次のとおりである。

- ① 対象構造物に取り付けられた多数の加速度計からの信号が、加速度計用アンプを通じて出力され、端子台ボックスで認識され、データ集録ボード(DAQボード)により A/D 変換される。
- ② LabVIEW が A/D 変換されたデータを読み取り、取り込んだデータをモニター表示で確認した上で、集録を行う。集録した波形はグラフ表示で確認し、ファイルへ保存する。
- ③ 集録されたデータは、LabVIEW による同定プログラムにより処理することで、振動特性が推定される。

①におけるデータ処理では、データ長、サンプリング間隔を設定できる。従来の振動計測装置が全て仮想計測器としてソフトウェアで処理される。そのため、装置の軽量化、データ処理の高速化及び統一した処理が可能となる。計測システムの構成概要を図-3 に示す。

3. 同定の流れ

上記③における、集録されたデータにより振動数領域で同定を行う上で、次の主要なデータ処理を行う。

- i) 自由振動を、バンドパスフィルタに通してk次振動情報の自由振動へ還元する。バンドパスフィルタとして、自由振動時系列データをフーリエ変換して特定振動数情報を抽出し、逆フーリエ変換で時系列に戻す作業を行う。
- ii) 時間領域の k 次自由振動に、非線形最小二乗法により曲線適合して、振動特性を推定する。曲線適合には LabVIEW に組み込まれた Levenberg-Marquardt 法を用いている。

常時微動データの場合は、まず相関関数に変換し、それを自由振動データとみなして上記の i)、ii) の作業を行う。同定プロ

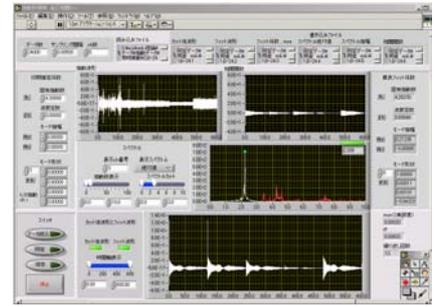


図-1 フロントパネル

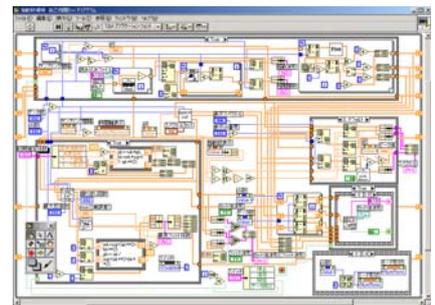


図-2 ブロックダイアグラム

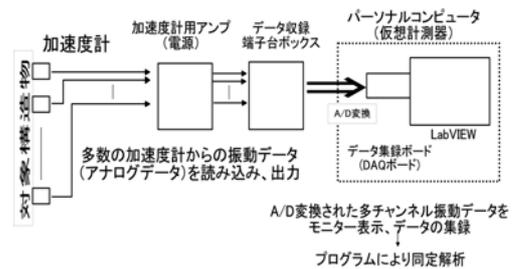


図-3 計測システムの概要

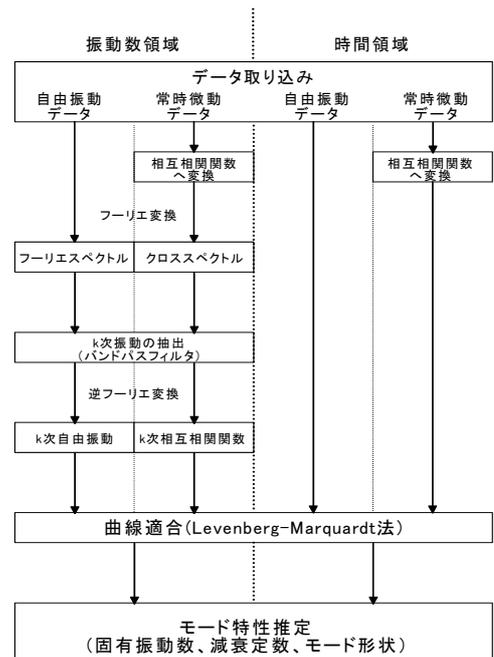


図-4 同定の流れ

グラム（図-4）の主なフローチャートを図-4に示す。

同定における設定について、これまでの研究¹⁾からは以下の点を変更している。

- 理論式において、振動モードの設定をモード振幅比によるモードから実モードへ変更している。これは、より実際の構造物の特性に合わせるためである。
- 常時微動データにおける相関関数への変換において、自己相関から相互相関に変更している。これは、各測定点間の位相差情報を含ませるためである。

4. 計測したデータ

データ計測は、本学 25 号館 2F 設計演習室に設置されている名港中央大橋風洞実験模型での自由振動データ、本学 3 号館での常時微動データの計測を行った。しかし、常時微動データについては、装置のノイズトラブルにより有意なデータは得られず、同定に用いることはできなかった。このトラブルについて、LabVIEW の製造元である National Instruments に問い合わせ、計測に用いたプログラムの見直し、全ての装置に対してアースをとることを試したが改善されなかった。また、ペンレコーダーで加速度計、アンプからの信号を確認したところ異常はみられず、トラブルの原因は端子台、DAQ ボードにあると思われる。

5. 同定に用いたデータ

本研究では、分布パラメータ系シミュレーションデータ、上記の橋梁模型での自由振動データ、立石の修士論文¹⁾ で用いた用倉大橋での常時微動データを用いて同定し、その同定結果の精度を検証した。

6. 分布パラメータ系シミュレーション

図-5 に示す単純はりモデルを想定して、シミュレーション波形を作成し、振動数領域同定プログラムの精度を検証した。測定点を 3 つ、3 つのモードを含んだ波形を作成した。CaseA1 として、振動数が離れている場合、CaseA2 として、振動数が接近している場合を想定した。また、それぞれノイズ付加した場合も作成した。モード形状は測定点①を基準とした。初期推定値には、固有振動数のみ卓越スペクトルから確認した値を入力し、その他は全て 0 とした。以後同定にはこの方法をとっている。

比較対象として、真値と mse を用いた。mse とは、観測データと同定結果との残差二乗誤差を観測データの分散で除し、平方根をとった値で、同定による波形の再現度を表わす指標となる。

同定結果を図-6～図-8 に示す。固有振動数は全ての場合でほぼ誤差無く同定できた。減衰定数は A2 で大きな誤差を出したが、値が非常に小さいので特に問題のない程度である。モード形状では、振動形状自体は問題なかったが、A2 は A1 よりも誤差が大きく、A1、A2 とともに 3 次モードで誤差が大きくなった。後者は、3 次のスペクトルが非常に小さな振幅であったためと考えられる。全ての場合でノイズの影響は見られなかった。mse は非常に小さく、全体的に精度良く同定できたと言えるが、スペクトルの形状により振動情報が取り出し辛い状態であると精度が落ちた。特にモード形状において顕著であり、対象とする波形データのスペクトル情報に左右されることがわかった。

7. 橋梁風洞実験模型での自由振動波形の同定

上記の橋梁模型において自由振動データを計測し、そのデータを用いて同定した。計測における詳細を図-9、表-1 に示す。対称モードでは i 点を鉛直下向きに加振し、逆対称モードでは i 点を鉛直方向に支持して ii 点を鉛直下向きに加振した。加振は直接手で行った。加速度計 2 個、サンプリング間隔 0.01(sec)、

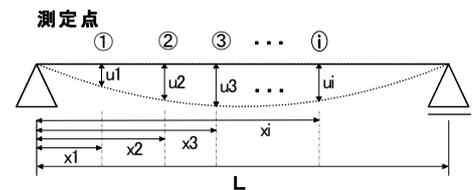


図-5 分布パラメータ系モデル図

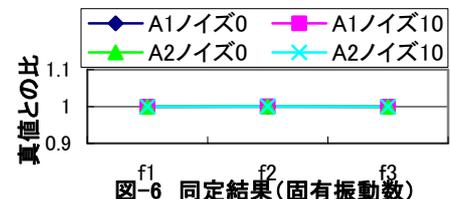


図-6 同定結果(固有振動数)

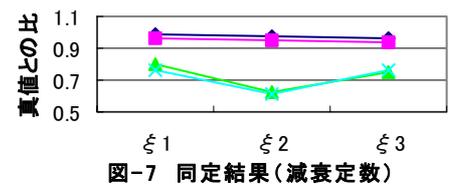


図-7 同定結果(減衰定数)

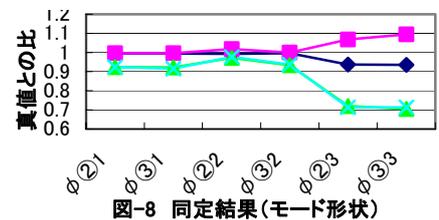


図-8 同定結果(モード形状)

データ長 10(sec)で表-1 に示す実験 CaseB1~B4 について計測した。比較対象として、mse、時間領域での同定結果、平成 6 年の模型が作られた当時に行われた風洞試験結果²⁾を用いた。時間領域での同定は精度のよい結果が得られることがこれまでの研究からわかっている。B2 でのスペクトルを図-10 に示し、同定結果を図-11~図-15 に示す。

B1、B3 は、たわみ 1 次の振動であり、問題なく同定できた。B2、B4 では、たわみ 2 次の振動を起こさせたはずが、卓越スペクトルが 3 つ出ており 3 つのモードが励起されていた。これは、模型が老朽化していること、手での加振での誤差と考えられる。実際、目視で減衰が非常に大きいことが確認できた。B2、B4 の同定結果は、1 次と 2 次の固有振動数が接近しており、B1、B3 と比べ精度が下がった。mse も若干大きくなっていった。しかし、固有振動数はほぼ一致し、減衰定数の時間領域との比をとった差は最大 30% であり、これらには特に大きな差は無かった。風洞試験結果と比較すると、固有振動数は全てのケースで試験結果よりも大きな値を示した。これも模型の老朽化が原因と考えられる。モード形状について、たわみ 1 次については B1、B3 では特に大きな差は見られなかったが、B2 では、若干の差がみられ、B4 では支間 1/2 点よりも支間 1/4 点の形状が大きくなっていった。この原因として、計測した波形データが、複素モードとなっていたことが挙げられる。そしてこれも老朽化の影響と考えられる。たわみ 2 次では、振動形状の節がずれており、正負が逆となっていた。これは老朽化も考えられるが、加振方法にも問題があったとも言える。

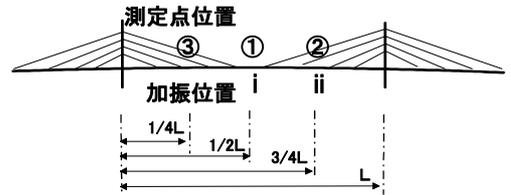


図-9 データ計測詳細

表-1 計測データ詳細

Case	測定点位置	振動モード
B1	①、②	対称モード(たわみ1次)
B2	①、②	逆対称モード(たわみ2次)
B3	①、③	対称モード(たわみ1次)
B4	①、③	逆対称モード(たわみ2次)

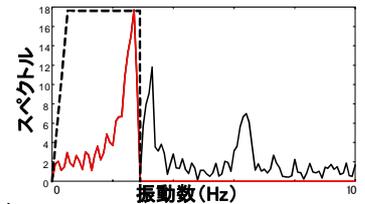


図-10 スペクトル(B2)

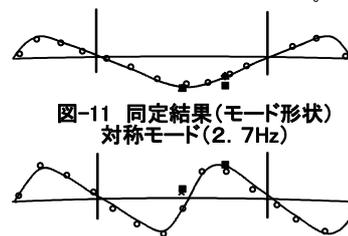


図-11 同定結果(モード形状)
対称モード(2.7Hz)



図-12 同定結果(モード形状)
逆対称モード(3.2Hz)

- 実橋解析値
- 模型実測値
- ▲ B1 振動数領域
- ◆ B1 時間領域
- B2 振動数領域
- × B2 時間領域

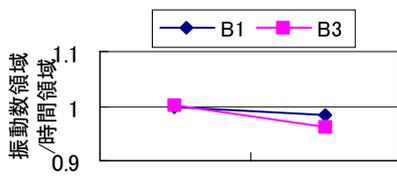


図-13 同定結果

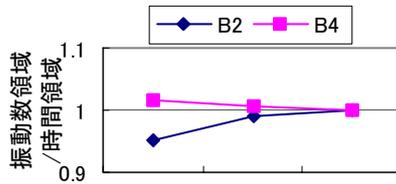


図-14 同定結果(固有振動数)

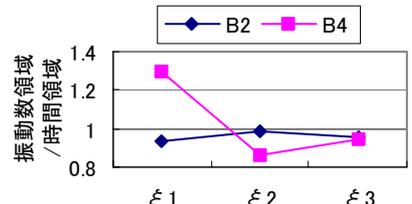


図-15 同定結果(減衰定数)

次に、精度の悪かった B2、B4 について、接近している卓越スペクトルを全体で抽出し、2 自由度で同定する。これを手法 3 とし、これまでの振動数領域、時間領域での同定をそれぞれ手法 1、手法 2 として、その精度を検証する。

B2 でのスペクトルを図-16 に示し、同定結果を図-17、図-18 に示す。手法 3 を用いたことで、mse が小さくなり精度が上がったことが確認できた。固有振動数、減衰定数については、ほぼ全てにおいて時間領域との差が小さくなった。モード形状については、手法 1 とあまり変わりなく、少し差が小さくなった程度だった。風洞試験結果との比較では、手法 1 と変わらず、同じ傾向を示した。

これにより、接近している卓越スペクトルを抽出するには、その全体をフィルタ幅とし、含んでいるモード数で同定することで精度を上げられることが確認できた。

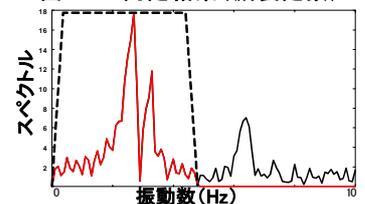


図-16 スペクトル(B2)

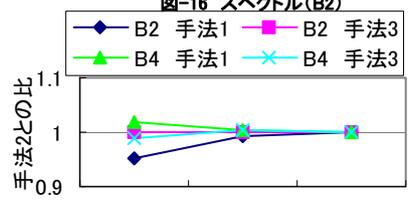


図-17 同定結果(固有振動数)

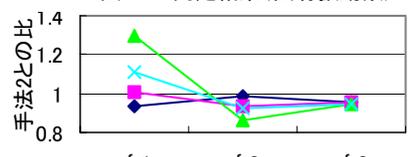


図-18 同定結果(減衰定数)

8. 用倉大橋常時微動波形の同定

用倉大橋は 2 面吊り三径間木製斜長橋である。データは 60000 点 (5min) であったが、各 5000 点に分け、データ C1 ~ C4 とし、0-5000, 5000-10000, 25000-30000, 30000-35000 を同定した。測定点は 5 つであり、位置を図-19 に示す。ここで、逆対称モードを求める際測定点①ではなく

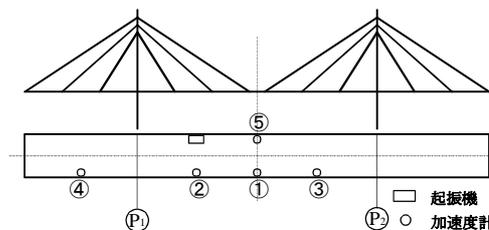


図-19 計測器配置図

測定点②を基準として相互相関関数を求めた。このスペクトルは振幅が小さく、かつ隣り合う卓越スペクトルに接近し抽出し辛いのでデータ C5 とし、0-24000 点 (2min) のデータで同定した。これにより、同定では、たわみ 1 次、2 次、3 次、ねじれ 1 次が抽出された。

比較対象として、立石の修士論文、用倉大橋振動実験の報告書、時間領域での同定結果を用いた。同定結果を表-2 に、たわみ 3 次モード形状について、図-20 に示す。立石の結果を従来法、本研究での結果を提案法としている。たわみ 1 次、2 次

表-2 用倉大橋常時微動 同定結果

	実験解析値	従来法	提案法	時間領域	提案法 / 従来法	提案法 / 時間領域	提案法 / 実験解析値
f1 たわみ1次	2.21	2.21	2.21	2.21	1.00	1.00	1.00
f2 たわみ2次	3.45	3.46	3.46	3.46	1.00	1.00	1.00
f3 ねじれ1次	4.09	4.27	4.27	4.27	1.00	1.00	1.04
f4 たわみ3次	5.02	-	4.59	4.60	-	1.00	0.92
ε1 たわみ1次	0.00891	0.00928	0.00650	0.00656	0.70066	0.99	0.73
ε2 たわみ2次	0.01448	0.00500	0.00614	0.00650	1.22712	0.94	0.42
ε3 ねじれ1次	0.00907	0.00589	0.00646	0.00669	1.09681	0.97	0.71
ε4 たわみ3次	0.00456	-	0.00163	0.00146	-	1.12	0.36

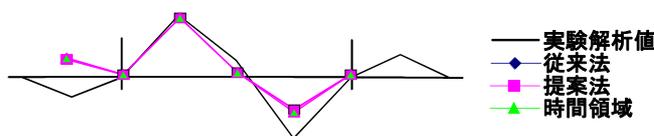


図-20 モード形状たわみ3次(4.60Hz)

及びねじれ 1 次は C1~C4 の平均で、たわみ 3 次は C5 の結果を表わしている。表-2 により、たわみ 3 次以外では固有振動数は問題なく一致していることは明らかである。たわみ 3 次については、クロススペクトルでのピークが違った値を示していたためである。減衰定数については、値が小さいことを考慮すると問題ない程度の差であった。モード形状は、中央径間においてはほぼ問題なく一致していたが、側径間において逆位相となるモードがあった。そこで、測定点④の位相差を確認したが、 $\pi/20$ 程度であり、大きな位相差は出ていなかった。時間領域での同定結果とは差は見られず、同じ程度で同定できた。従来法とでは、側径間の一部のモードで逆位相となったが、中央径間においてはよい一致がみられた。

9. 結論

本研究では、振動データ計測システムの開発、及び実計測データからの振動数領域でのモード特性の同定プログラムの有効性を検証している。分布パラメータ系シミュレーション、実計測自由振動データ、用倉大橋での常時微動データについて同定を行い、それぞれ検証した。

計測システムは、自由振動データは問題なく集録できた。数値シミュレーションにより、自由振動データからの同定プログラムの精度が確認できた。しかし、振動数領域が有効かどうかは、計測データにより左右されることがわかった。実計測自由振動データの結果から、卓越スペクトルが接近している場合、同定は困難になるが、固有振動数、減衰定数はある程度同定できることがわかった。接近している卓越スペクトルの抽出において、接近している全範囲で取り出し、含んでいるモード数で同定する方法を提案し、良い精度が得られることが確認できた。常時微動データの同定結果で、側径間でのモード形状が実験値と逆位相となるモードがあったが、中央径間では問題無く、その他パラメータにも特に大きな差も無く、同定プログラムの有効性が確認できた。

自由振動データについては目的とする測定システムが実現できた。今後、常時微動計測でも、計測システムのノイズ除去が成功すれば、計測からモード特性同定までの一連の作業が実現されると考えられる。

参考文献

- 1) 立石智久；「LabVIEW」による振動実験波形からの振動モード特性の同定 2004
- 2) 土木学会第 49 回年次学術講演会論文集；名港中央大橋の全体完成系風洞試験 1994