

# ランキング形式による構造損傷評価法の提案

盆子原 康博<sup>a)</sup>・近藤 孝広<sup>b)</sup>・花内 勇也<sup>c)</sup>・濱畑 貴之<sup>d)</sup>

## A Ranking Approach to Estimating Structural Damages

Yasuhiro BONKOBARA, Takahiro KONDOU, Yuya HANAUCHI, Takayuki HAMAHATA

### Abstract

Recently, structural health monitoring for assessing safety of buildings and constructions has received a lot of attention as a practical method for detection of aged deterioration or earthquake damage. The damage identification analysis based on filtering theory has a potentially effectiveness as a global monitoring both for identifying the damage locations and for estimating the extent of damage. In the computation process, the natural frequencies of the analysis object are utilized as observation data, and then the inverse analysis are performed recurrently to obtain the estimate values of system parameters. However, it is difficult to experimentally measure a large number of natural frequencies accurately. The purpose of this study is to develop a ranking approach to estimating structural damages. In this method, it is needed for only a few lower natural frequencies which can be measured experimentally. Although the location and extent of damages cannot be determined, the damage potential rankings are obtained as minimum required information to detect damage locations. In this paper, the evaluation method for choosing the observation data appropriately is newly proposed in order to improve the computation accuracy. The validity of the present method is confirmed by the results of the damage detection experiments.

**Keywords:** Damage Estimation, Natural Frequency, Filtering Theory, Inverse Problem

### 1. はじめに

近年、建物や構造物の安全性を診断するために、経年劣化や地震等による損傷の部位やその程度を検出できる構造ヘルスマニタリング技術が注目されている。主な手法として、超音波などを利用して探傷を行う非破壊検査法（ローカルモニタリング）や、損傷前後の動的データの測定結果を基に、逆解析により部材の物性値の変化量を求める損傷同定解析法（グローバルモニタリング）がある。前者は部材ごとの局所的な損傷を直接探索する場合に適しており、後者は構造物全体に対して部材を最小単位として損傷探索を行う場合に適している。これらの特徴から、多数の部材で構成される構造物を検査対象とする場合には、まず損傷同定解析法を適用して損傷箇所をある程度まで絞り込み、その後、超音波探傷などで局所的に損傷箇所を検出することが効果的であると考えられる。さらには、損傷箇所を絞り込んだ後に、その箇所に対して損傷同定解析法を重ねて適用することで、非破壊検査をほとんど行うことなく損傷を高精度に検出することも期待できる。これが可能となれば、構造ヘルスマニタリング技術への寄与は極めて大きなものになる。ただし、そのためには、損傷同定解析

法によって損傷箇所を精度良く検出することが必要不可欠である。このような観点から、著者らは、実用的で高精度な損傷同定解析を実現する解析法の開発を行っている。

本研究では、既報<sup>1)</sup>において、カルマンフィルタを用いた損傷同定解析法について検討を行った。カルマンフィルタのアルゴリズムでは、観測雑音を考慮した離散時間確率ダイナミックシステム<sup>2)</sup>として解析対象をモデル化する。そして、損傷によって生じる振動特性（固有振動数）の変化を観測データとして、フィルタ計算により解析対象の状態量の推定値を逐次計算する。その際、状態量の推定値に対する固有振動数を計算するために自由振動解析を繰り返し実行する必要があるが、本研究では一般化伝達剛性係数法<sup>3)</sup>を導入することによって、自由振動解析の計算コストを大幅に低減することに成功した。

一方、損傷同定解析を精度良く実行するためには、観測データをなるべく多く用いる必要がある。しかしながら、一般的な構造物に対して低次から高次にかけて固有振動数を精度良く測定することは実際には困難である。この問題に対して既報<sup>4)</sup>では、対象構造物に付加質量を与えた構造変更モデルを利用して、比較的測定が容易な低次の固有振動数を複数のモデルで測定し、これらを観測データとして用いることで高精度な損傷同定が可能であることを示した。しかしながら、実際に解析対象の構造を変更するのは容易なことではなく、実用性の面で問題が残る。

そこで本報では、比較的精度良く測定可能な低次の固有

a)機械設計システム工学科准教授

b)九州大学大学院工学研究院機械工学部門教授

c)工学専攻大学院生

d)教育研究支援センター技術職員

振動数だけを用いる方法として、ランキング形式による損傷評価法を提案する。この手法では、損傷箇所や損傷程度を求めるのではなく、構造物の損傷箇所を検出するために最低限必要な情報として、部材が損傷を有する可能性を示す順位付け（ランキング）を求めることを目的とする。本報では、最も単純な直線状配管を対象としてランキング形式による損傷評価法のアルゴリズムの定式化を行うとともに、具体的な損傷実験と数値計算の結果に基づいて提案する手法の有効性を検証する。

## 2. 直線状配管モデル

### 2.1 実験装置

本報では、図1に示すような直線状配管を実験対象として、提案する計算アルゴリズムの有効性について検証する。対象とした配管は、外径 25.5 mm、内径 23.0 mm、長さ 1 600 mm の鋼製一様な中空丸棒（電線管 E25）である。配管の両端にはアルミ製のフランジが設置されており、配管はそのフランジに取り付けたワイヤーによって天井から水平に吊り支持されている。ワイヤーによる水平方向の支持剛性は配管の剛性に比べて十分に小さいため、数値計算においてはその支持条件を自由端とすることができる。

フィルタ計算で観測データとして利用する固有振動数を測定するために、配管の一部に損傷を与えて打撃試験を行った。その際、配管に損傷を与える範囲は左端から中央までとした。これは、配管が左右対称である場合、損傷が左右対称の位置のどちら側にあるのか分からず、同定が困難となるためである。この検討では、図1に示すように対象とする範囲を8つに等間隔で区分した。便宜上、以下ではこれを領域と呼び、左側から順番にそれぞれ番号1～8を付す。本実験では、同一の配管を9本用意して、そのうち1本は無損傷とし、残りの8本には領域1～8の一方所に損傷を与えたものを1本ずつ用意した。損傷を与える方法としては、図2に示すように、領域全体に等間隔に直径 4.0 mm の貫通穴を開けた。なお、使用した9本の配管で

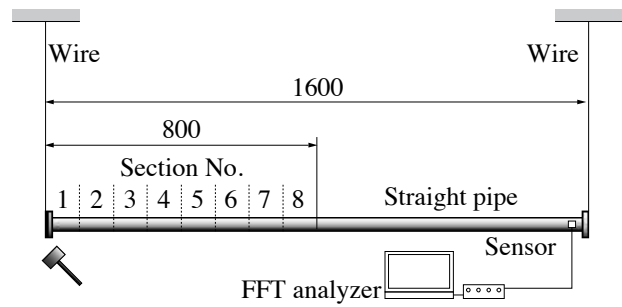


図1. 実験装置.

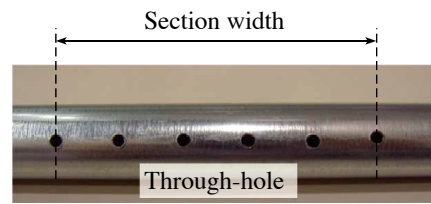


図2. 損傷箇所の写真.

は、無損傷時に測定した固有振動数はいずれもほぼ一致していることを確認している。

### 2.2 打撃試験結果

9本の配管をそれぞれ水平に設置した後、水平面内曲げ振動を対象として打撃試験を行い、加速度ピックアップとFFTアナライザを用いて固有振動数の測定を行った。本実験では、1 600 Hz までの範囲で振動数の測定を行ったが、いずれの配管でも1次から7次までの固有振動数を測定することができた。一例として、無損傷の配管と領域7を損傷させた配管の固有振動数の測定結果を表1に示す。各次数とも、損傷後に固有振動数が低下しており、変化率はいずれも1.0%以下であった。その他の配管においても同様の傾向が確認された。

表1. 固有振動数の測定結果.

No.	Non-damaged [Hz]	Damaged at section 7 [Hz]	Amount of change [Hz]	Ratio of change [%]
1st	56.875	56.375	-0.50	-0.88
2nd	157.625	156.875	-0.75	-0.48
3rd	309.125	308.125	-1.0	-0.32
4th	510.25	507.25	-3.0	-0.59
5th	757.50	756.125	-1.375	-0.18
6th	1052.50	1046.75	-5.75	-0.55
7th	1384.25	1379.25	-5.0	-0.36

本報では、測定された固有振動数をフィルタ計算の観測データとして用いた。ただし、実際の構造物と数値計算で用いる解析モデルとの間に不可避的な差違があるために、実測値をそのまま観測データとして用いるとフィルタ計算の精度が悪化してしまう。そこで、損傷前後の固有振動数の変化率を観測データとして用いることとした。この妥当性についての詳細な検討結果は省略するが、観測データとして実測値をそのまま用いる場合と損傷前後の変化率を用いる場合でそれぞれフィルタ計算を行い、後者の方が高精度であることを確認している。

### 3. ランキング形式による損傷評価法

本研究では、なるべく少ない観測データを用いて配管中の損傷箇所を精度良く検出するために、ランキング形式による損傷評価法（以下、ランキング法と呼ぶ）を新たに提案する。既報<sup>1)</sup>で提案した通常のフィルタ理論による損傷同定計算手続き（以下、従来法と呼ぶ）では、観測データに基づいてフィルタ計算を行うことにより各領域の状態量を同定し、その状態量の変化から損傷箇所および損傷程度が求められる。ただし、十分な計算精度で状態量を求めるには、多くの観測データが必要となる。これに対してランキング法では、具体的に損傷箇所や損傷程度を求めるのではなく、各領域が損傷を有する可能性を示す順位（ランキング）を得ることを目的とする。このランキングからは、損傷箇所の個数やその程度は分からないものの、損傷可能性が高い領域はランキングの上位に求められる。本章では、ランキング法の具体的な計算手続きについて述べる。

#### 3.1 解析モデル

ランキング法では、従来法と同様にカルマンフィルタの計算手続きを援用して状態量の推定値を逐次計算する。解析にあたり、配管の領域ごとの損傷程度を剛性（縦弾性係数）の変化によって表すものとする。ただし、簡単のために損傷後の縦弾性係数は領域内で一様に変化し、損傷によるその他のパラメータの変化は無いものとする。いま、配管が左右対称であるため、その左半分が  $n$  個の領域に分けられているとする。また、一様な配管の無損傷時の縦弾性係数を  $\hat{E}$ 、損傷後の縦弾性係数を  $E_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) で表す。このとき、各領域の損傷程度を示す損傷係数  $z_i$  と状態ベクトル  $\mathbf{z}$  を次のように定める。

$$z_i = E_i / \hat{E}, \quad \mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T \quad (1)$$

損傷係数  $z_i$  は、無損傷時には 1.0 であり、損傷程度が大きいほど小さな値となる。

フィルタ計算では、一般化伝達剛性係数法<sup>2)</sup>を適用して配管の水平面内曲げ自由振動解析を行う。この計算にあたり、配管を一様な中空丸棒として取り扱い、全体を 1/24 分割した集中系にモデル化した。なお、両端のフランジは

剛体円板として取り扱い、中空丸棒の両端は自由端とした。

#### 3.2 離散時間確率ダイナミックシステム

カルマンフィルタのアルゴリズムでは、システムノイズを考慮した状態方程式と観測ノイズを考慮した観測方程式で表される、離散時間確率ダイナミックシステムを取り扱う。本報で対象とする損傷同定問題では、フィルタ計算の過程において式(1)の状態ベクトル  $\mathbf{z}$  は時間的推移構造を持たず、システムノイズの混入もないと考えられる。このことから、状態方程式は次のように表すことができる。

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{z}_k \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{z}_k$  は  $k$  回目のフィルタ計算における状態ベクトルを意味している。

一方、固有振動数は状態ベクトル  $\mathbf{z}$  によって一意に求められるが、一般に両者の関係は非線形となる。このことから、観測方程式は次のように表される。

$$\mathbf{y} = \mathbf{m}_k(\mathbf{z}_k) + \mathbf{v}_k \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{m}_k(\mathbf{z}_k)$  は状態ベクトル  $\mathbf{z}_k$  に対する固有振動数を成分に持つベクトル、 $\mathbf{v}_k$  は観測雑音ベクトルである。このベクトル  $\mathbf{m}_k(\mathbf{z}_k)$  に関しては、一般化伝達剛性係数法による自由振動解析によって非常に効率的に求めることができる。なお、カルマンフィルタのアルゴリズムを適用するため、感度行列  $\mathbf{M}_k$  を用いて式(3)を以下のように線形化する。

$$\mathbf{y} = \mathbf{M}_k \mathbf{z}_k + \mathbf{v}_k, \quad \mathbf{M}_k = \frac{\partial \mathbf{m}_k(\mathbf{z}_k)}{\partial \mathbf{z}_k} \quad (4)$$

#### 3.3 離散時間確率ダイナミックシステム

本報では、式(2)および式(4)で表される離散時間確率ダイナミックシステムに対して、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに基づいて、状態量ベクトルを同定する。具体的なアルゴリズムは次の通りである<sup>2)</sup>。

フィルタ方程式：

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{z}_k + \mathbf{K}_k [\mathbf{y} - \mathbf{M}_k \mathbf{z}_k] \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

カルマンゲイン：

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{R}_k \mathbf{M}_k^T [\mathbf{M}_k \mathbf{R}_k \mathbf{M}_k^T + \mathbf{Q}]^{-1} \quad (6)$$

推定誤差共分散行列：

$$\mathbf{R}_{k+1} = \mathbf{R}_k - \mathbf{K}_k \mathbf{M}_k \mathbf{R}_k \quad (7)$$

初期条件：

$$\mathbf{z}_0 = [1.0, 1.0, \dots, 1.0]^T, \quad \mathbf{R}_0 = \mathbf{I} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{K}_k$  はカルマンゲイン、 $\mathbf{R}_k$  は推定誤差共分散行列、

$Q$  は観測誤差共分散行列、 $I$  は単位行列である。以上の式(5)から式(8)を用いて、状態ベクトル  $z_k$  について逐次フィルタ計算を行う。そして、状態量の変化量が収束判定値以下になった時点で同定計算を終了する。

なお、拡張カルマンフィルタの推定精度および収束性能は状態ベクトルの初期値に依存するところが大きい。そこで、逐次計算が一定のフィルタリング回数行われるごとに、推定誤差共分散を初期化して、更新された状態ベクトルを初期値としてフィルタ計算を行う。これにより、推定値の収束性と推定精度を向上させることができる<sup>1)</sup>。

### 3.4 ランキング法の計算手続き

損傷同定は逆問題であるので、一度のフィルタ計算により各領域の損傷係数を正確に求めることは困難である。そのため、既報<sup>4)</sup>のように損傷係数の計算条件を様々に変更しながら複数回のフィルタ計算を行い、何らかの方法でその平均を取るのが良いと考えられるが、その具体的な手続きを含めて、妥当性については明確には分かっていない。そこで本研究では、得られた結果から有意な情報を得る手法としてランキング法の一連の手続きを考案した。ランキング法では、測定が比較的容易な低次の固有振動数のみを用いて精度良く損傷を検出することを目的としている。まず、少ない観測データからより多くの情報を得るために、損傷係数の計算条件を種々変更してフィルタ計算を複数回実行する。そして、計算条件ごとに得られた結果を総合的に評価し、損傷可能性が低い領域を一つずつ順番に決定することで、最終的に各領域が損傷を有する可能性を示すランキングを得る。具体的な計算手順は次の通りである。

- (1) 3.1 節で述べたように、損傷の有無を調べる範囲を  $n$  個の領域に分割し、それぞれ損傷係数  $z_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) を定義する。
- (2) 測定された損傷前後の固有振動数の変化率を観測データとして用いてフィルタ計算を行う。その際、 $n$  個の領域のうち1つの領域の損傷係数を 1.0 (正常値) に固定し、その他の領域を対象としてフィルタ計算を行う。ここで、領域  $j$  の損傷係数を正常値に固定して求められた領域  $i$  の損傷係数を  $z_i(j)$  とし、 $z_1(j)$  から  $z_n(j)$  までを成分に持つ状態ベクトルを  $z(j)$  と表す。上述の計算を全ての領域を対象として順番に実行することで、状態ベクトル  $z(1) \sim z(n)$  が求められる。
- (3) 手順(2)によって得られた状態ベクトル  $z(1) \sim z(n)$  を総合的に評価することにより、損傷可能性が最も低い領域を1つ決定する。これがランキング法の最も重要な計算手続きである。その具体的な評価法については3.5 節で述べる。
- (4) 手順(3)によって損傷可能性の低い領域が1つ決定した時点で、再び手順(2)のフィルタ計算を行う。その際、損傷可能性が低いと判定された領域は、その損傷係数を常に正常値 1.0 に固定し、これ以降のフィルタ計算ではその領域を計算から除外する。

- (5)  $n-1$  回の計算を行えば、全ての領域に対して損傷可能性が順位付けられる。すなわち、早い段階で損傷係数を正常値に固定した領域ほど損傷可能性が低く、最後までフィルタ計算の対象として残った領域ほど、損傷可能性が高いことが期待される。順位付けでは、損傷可能性が高い領域が上位となるような順番でランキングを作成する。

### 3.5 状態ベクトルの評価法

前節で述べた手順(2)のフィルタ計算の結果として得られる状態ベクトル  $z(1) \sim z(n)$  の成分を並べると表2のようになる。ここに、表中には縦に領域  $j$  の損傷係数を、横に領域  $j$  を正常値 1.0 としたときの損傷係数を並べている。例えば、領域 1 の損傷係数を 1.0 に固定したとき、各領域の損傷係数の推定値は 1.0、 $z_2(1)$ 、 $\dots$ 、 $z_n(1)$  と表されている。表 2 の結果に現れる傾向として次のようなことが挙げられる。

- (i) 損傷の無い領域の損傷係数を 1.0 に固定した場合、推定値は正解に近い値となりやすいが、損傷箇所の損傷係数を 1.0 に固定した場合、実際とは異なる条件設定であるため、得られる推定値は正解とは大きく異なる値となる。
- (ii) 誤った前提から得られた推定値は、正しい前提から得られた他の推定値と比べて値が異なることが多い。

傾向(i)より、表 2 に対して縦に損傷係数の平均を取り、その値によって損傷可能性を評価すると、明らかに誤って求められた推定値が平均値の算出に含まれるため、評価の正確性に欠ける。そこで傾向(ii)を利用して、まず下記の手順(1)から手順(3)により、各領域の損傷可能性を評価する計算から誤った前提から得られた推定値を除く。続いて、手順(4)および手順(5)により、損傷可能性の評価を行う。具体的な計算手順は以下の通りである。

- (1) 表 2 のように得られる収束結果に対して、縦に並べた損傷係数の平均値  $\bar{z}_i$  を求める。

$$\bar{z}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_i(j) \quad (9)$$

- (2) 横に並んだ損傷係数  $z_i(j)$  と平均値  $\bar{z}_i$  との差の 2 乗  $s_i(j)$  を計算する。

表 2. フィルタ計算過程で求める損傷係数.

The number of fixed section: $j$	Damage coefficient			
	$z_1(j)$	$z_2(j)$	$\dots$	$z_n(j)$
1	1.0	$z_2(1)$	$\dots$	$z_n(1)$
2	$z_1(2)$	1.0	$\dots$	$z_n(2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$n$	$z_1(n)$	$z_2(n)$	$\dots$	1.0



$$s_i(j) = \{z_i(j) - \bar{z}_i\}^2 \quad (10)$$

例えば、領域  $k$  が損傷している場合、その領域の損傷係数を正常値 1.0 に固定して得られた推定値  $z_i(k)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) は、平均値  $\bar{z}_i$  とは異なる値を取るため、 $s_i(k)$  は他と比べて大きな値となりやすい。

(3) 次式のように  $s_i(j)$  の総和  $s(j)$  を求める。

$$s(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{z_i(j) - \bar{z}_i\}^2 \quad (11)$$

この値が最大である推定値  $z(j)$  は誤った前提で計算された可能性が高いため、 $s(j)$  が最大となる領域  $j$  の損傷係数を固定値としたときの結果を、次の手順(4)で行う評価値の計算から除外する。

(4) 収束結果に対して、手順(3)により  $s(k)$  が最大となった場合、その一行を除外して、縦に並べた損傷係数の平均値を計算する。このとき、評価値  $\bar{z}_i$  は次式のように表すことができる。

$$\bar{z}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq k}^n z_i(j) \quad (12)$$

(5) 損傷が小さい領域ほど損傷係数の値は大きくなることから、手順(4)で求めた評価値  $\bar{z}_i$  が最大となる領域を損傷可能性が最も低いものと決定する。

上述の評価を繰り返し行って領域を一つずつ評価対象から除外していく過程で、残りの領域が2つになった場合には、 $s(j)$  が最大となる行を収束結果から除く操作は必要ないため、手順(1)から手順(3)を省略する。なお、上述の評価法では最終的に残った2つの領域について損傷可能性を評価することはできないが、ここでは上述の手順に従って順位付けを行い、1位となる領域(最も損傷可能性が高い領域)を決定する。

### 3.6 損傷係数の上限値および下限値

フィルタ計算では、損傷係数が無損傷時の値である 1.0 よりも大きな値で収束することがあるが、これは明らかに間違った解である。そこで、フィルタ計算の過程で損傷係数が取りうる値に制限を設けるが、上限値を 1.0 とすると過度な制限となりフィルタ計算中の損傷係数の推移が安定しないため、次のように上限値と下限値を設定する。

$$0.1 \leq z_i \leq 2.0 \quad (13)$$

フィルタ計算の過程で損傷係数の推定値が式(13)の範囲を超える値となった場合には、強制的に値を上限値または下限値に戻す。このような手続きを行ったとき、フィルタ計算の過程で、推定値の推移が何度も上限値または下限値に到達することがしばしば生じる。この場合には、損傷係数の推移が不安定であると判断して、推定値が一定回数以上制限値に達した段階で、その計算で得られる推定値は

評価値の計算から除外する。さらに、フィルタ計算が上限回数繰り返された場合にも、推定値の変動が一定値以上であれば評価値の計算から除外する。この手続きにより、安定した推移を経て得られた推定値のみを用いて各領域の損傷可能性を評価することができる。

## 4. 数値計算結果および考察

本章では、具体的な数値計算結果に基づいて従来法とランキング法の性能比較を行う。2章で述べたように、直線状配管の左半分には8つの領域を設け、それぞれの領域に損傷を与えた8本の配管と無損傷の1本の配管を対象として打撃試験を行った。その結果、いずれの配管においても1次から7次までの固有振動数を測定することができた。以下では、損傷を与えた8本の配管を対象として、測定した損傷前後の固有振動数の変化率を観測データとして使用し、両手法により損傷同定計算を行った。

### 4.1 従来法による計算結果

まず、従来法を適用して、8本の配管に対して損傷同定計算を行って各領域の損傷係数を求めた。本検討では、与える観測データの個数が計算結果に及ぼす影響について調べた。得られた結果を表3~5に示す。このうち、表3は観測データの個数を1次から3次までの3個とした場合の結果、表4は1次から5次までの5個とした場合の結果、表5は1次から7次までの7個とした場合の結果である。表中の値は、フィルタ計算が収束したとき、あるいは計算回数が上限回数(本報では1000回に設定した)に達したときに得られた各領域の損傷係数であり、8本の配管に対する結果を順番に並べている。なお、損傷箇所に対応する損傷係数を赤字、最小値を黄色の網掛けで記している。

従来法では、損傷の有無や程度を損傷係数の値で評価するため、損傷箇所の損傷係数が1.0以下となり、損傷の無い領域については正常値1.0となるような計算結果が得られることが望ましい。このような観点から、得られた結果を検証する。まず、表3では、いずれの結果も損傷係数が小さくなるのが損傷箇所だけでなく、損傷箇所よりも小さな値を取る正常領域や、正常値1.0より大きな値を取る正常領域が存在している。そのため、表中の赤字と黄色の網掛けの位置が一致しない結果となっている。また、フィルタ計算の回数も数百回を要するものが多く、特に領域7および領域8に損傷を与えた結果では、損傷箇所の損傷係数が比較的小さな値をとっているものの、フィルタリング回数が上限値に達している。このように、観測データを3個だけ用いた場合では、得られた結果から損傷箇所を正確に検出することは難しいと言える。

一方、表4および表5の結果を見ると、表3の結果に比べて、観測データの個数が増えるにつれて、損傷箇所の損傷係数が小さくなっており、無損傷の領域との差が大きくなっている。また、フィルタリング回数も大幅に減少し

表3. 1次から3次までの固有振動数を用いて求めた損傷係数.

Damaged section number	Damage coefficient								Number of filtering
	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_2$	$\bar{z}_3$	$\bar{z}_4$	$\bar{z}_5$	$\bar{z}_6$	$\bar{z}_7$	$\bar{z}_8$	
1	1.000	0.993	0.987	0.989	1.002	1.015	1.005	0.988	14
2	1.000	0.989	0.980	0.981	0.992	1.010	1.007	0.997	36
3	1.002	0.979	0.961	0.960	0.978	1.022	1.008	0.973	740
4	0.992	0.968	0.952	0.953	0.967	1.010	1.025	1.004	200
5	1.001	0.998	0.985	0.972	0.958	0.951	0.989	1.013	137
6	1.008	1.012	1.009	1.000	0.973	0.932	0.942	0.965	300
7	1.002	1.005	1.003	0.999	0.988	0.956	0.952	0.962	1000
8	1.001	0.998	0.997	0.998	1.018	1.012	0.908	0.902	1000

表4. 1次から5次までの固有振動数を用いて求めた損傷係数.

Damaged section number	Damage coefficient								Number of filtering
	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_2$	$\bar{z}_3$	$\bar{z}_4$	$\bar{z}_5$	$\bar{z}_6$	$\bar{z}_7$	$\bar{z}_8$	
1	0.991	0.986	0.989	0.999	0.993	1.007	1.028	0.977	16
2	0.946	0.947	0.960	1.019	0.991	0.983	1.029	0.992	48
3	0.983	0.957	0.949	0.955	1.015	1.000	0.988	0.992	38
4	1.014	0.999	0.971	0.913	0.992	1.022	0.997	1.018	16
5	0.997	1.003	1.014	0.974	0.925	0.961	1.030	0.984	75
6	0.993	0.991	1.005	1.023	0.952	0.944	0.937	0.967	400
7	1.013	1.007	1.005	0.981	1.004	0.968	0.919	0.982	429
8	0.983	1.006	0.997	1.040	0.955	1.037	0.935	0.882	29

表5. 1次から7次までの固有振動数を用いて求めた損傷係数.

Damaged section number	Damage coefficient								Number of filtering
	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_2$	$\bar{z}_3$	$\bar{z}_4$	$\bar{z}_5$	$\bar{z}_6$	$\bar{z}_7$	$\bar{z}_8$	
1	0.897	0.965	1.026	0.972	1.005	1.008	1.022	0.980	23
2	0.921	0.935	0.974	1.012	0.988	0.992	1.019	0.996	28
3	1.056	0.992	0.911	0.983	1.004	0.996	0.997	0.987	158
4	0.898	1.035	0.961	0.911	1.002	1.008	1.008	1.014	29
5	0.984	1.003	1.009	0.986	0.908	0.982	1.011	0.991	38
6	1.004	1.009	1.000	1.002	0.993	0.900	0.975	0.952	180
7	1.021	1.001	1.006	0.987	0.993	0.981	0.910	0.986	30
8	0.949	1.027	1.000	1.008	1.005	0.978	0.977	0.869	168

表 6. 1次から3次までの固有振動数を用いて求めたランキング結果.

Damaged section number	High ←		Risk of damage						→ Low
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	
1	1	2	8	3	4	5	7	6	
2	2	3	1	4	8	5	7	6	
3	3	4	2	8	1	5	7	6	
4	3	4	5	1	2	8	6	7	
5	1	5	6	4	3	2	7	8	
6	6	7	8	5	4	3	1	2	
7	7	8	6	5	4	1	3	2	
8	7	8	4	1	2	3	6	5	

表 7. 1次から5次までの固有振動数を用いて求めたランキング結果.

Damaged section number	High ←		Risk of damage						→ Low
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	
1	1	8	5	4	6	2	3	7	
2	1	2	4	5	8	3	6	7	
3	3	4	8	7	2	6	1	5	
4	4	7	3	6	5	2	1	8	
5	4	5	8	6	1	2	3	7	
6	1	6	7	5	8	2	3	4	
7	5	7	8	4	3	6	2	1	
8	6	8	7	5	1	2	4	3	

表 8. 1次から7次までの固有振動数を用いて求めたランキング結果.

Damaged section number	High ←		Risk of damage						→ Low
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	
1	1	4	8	6	5	2	3	7	
2	2	8	6	5	3	7	1	4	
3	3	8	4	6	7	5	2	1	
4	3	4	6	7	8	5	1	2	
5	5	8	1	6	4	3	7	2	
6	6	8	5	7	3	4	2	1	
7	7	8	6	4	5	3	1	2	
8	1	8	6	4	7	3	5	2	

ていることが分かる。7個の観測データを用いた表5の結果では、損傷箇所損傷係数が10%程度減少しているものが多く、表中の赤字と黄色の網掛けの位置もよく一致しており、損傷箇所を見出しやすい結果となっている。ただし、表5の結果においても、領域2や領域4に損傷を与えた結果では、赤字と黄色の網掛けの位置は一致しておらず、特に領域4に損傷を与えた結果では、損傷箇所から離れた領域1の損傷係数が最も小さくなっている。

以上のように、従来法では観測データの個数が多いほど精度良く損傷を検出することが可能となっているが、観測データを7個用いた場合でも、損傷箇所が確実に検出できるわけではないことが分かる。

#### 4.2 ランキング法による計算結果

次に、ランキング法を適用して、8本の配管に対して損傷可能性を示すランキングを求める計算を行った。本検討では、前節と同様に与える観測データの個数が計算結果に及ぼす影響について調べた。得られた結果を表6~8に示す。このうち、表6は観測データの個数を1次から3次までの3個とした場合の結果、表7は1次から5次までの5個とした場合の結果、表8は1次から7次までの7個とした場合の結果である。表中の値は、順位付けされた領域の番号であり、左側にあるほど損傷を有する可能性が高く、右側にあるほど損傷を有する可能性が低いことを示している。なお、損傷箇所に相当する領域の番号は赤字で記している。

3.5節で述べたように、ランキング法では、最終的に残った2つの領域については、損傷可能性の優劣を付けることができない。このため、単一損傷の場合には、損傷箇所に相当する領域が2位以内に順位付けされることが望ましい。このような観点から得られた結果を見ると、いずれの結果も損傷箇所に相当する領域が2位以内に求められている。このことから、3.5節で述べた状態ベクトルの評価法が適切であると言える。従来法では、7個の観測データを用いた場合でも損傷箇所を同定できないことがあったが、ランキング法によれば観測データの個数は3個でも十分精度良く損傷箇所を検出することが可能である。

なお、ランキング法で得られるランキングは、領域が損傷を有する可能性だけを示すものであり、順位が高いほど損傷の程度が大きい訳ではない。求められたランキングでは、損傷を有する領域が全てランキングの上位に位置づけられ、無損傷の領域がそれに続いて順位付けされている。したがって、どこまでの領域が実際に損傷を有しているの

かについて別途調べることが必要となる。この問題の対策としては、超音波探傷などのローカルモニタリングを併用することが考えられる。すなわち、ランキング上位の領域から順に検査を行って損傷の有無を確認し、損傷の無い領域が確認された段階で、それ以降の領域には損傷が無いものと判断できる。このようにすれば、検査する領域を最小限にすることができるため、ローカルモニタリングによる損傷検査を効率的に実行できる可能性がある。

#### 5. 結論

構造物の損傷箇所を効率的に検出する手法として、ランキング形式による損傷評価法を新たに提案した。そして、直線状配管を対象として、実際に損傷を与えたときの固有振動数を測定し、その結果を用いて実際に損傷同定計算を行うことにより、提案手法の有効性について検証した。その結果、カルマンフィルタのアルゴリズムによって損傷係数を計算する従来の方法では、観測データを多く用いても損傷箇所を同定できないこともあったが、提案手法によれば、損傷を有する可能性を示すランキングだけを求めることにより、少ない観測データでも精度良く損傷箇所を推定できることを確認した。今後は、損傷の与え方の違いによる影響や複数損傷を有する場合に対する有効性について検証するとともに、得られたランキングから損傷箇所および損傷程度をより詳細に見出すための計算手続きについて検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 黒木 宏之, 近藤 孝広, 盆子原 康博, 坂本 裕一郎: 拡張カルマンフィルタ理論を用いた複数損傷同定解析手法の提案, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集, No.09-23 (CD-ROM), Paper No.220, 2009.
- 2) 登坂 宣好, 大西 和榮, 山本 昌宏, 逆問題の数理と解法(偏微分方程式の逆解析), pp. 251-269, 東京大学出版会, 1999.
- 3) 盆子原 康博, 近藤 孝広, 綾部 隆, 崔 銘秀: グラフ理論を利用した一般化伝達剛性係数法の提案, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 712, pp. 9-16, 2005.
- 4) H. Kuroki, T. Kondou, Y. Bonkobara, Y. Sakamoto: Multiple Damage Identification Analysis Based on Filtering Theory for a Framed Structure by Using Low Order Natural Frequency Change, Proc. of the 14<sup>th</sup> Asia Pacific Vibration conference, Vol.3, pp. 1493-1502, 2011.