打音検査による欠陥定量的評価の高精度化 に対する随伴変数法の適用

松岡 瑛喜* 廣瀬 陽一* 倉橋 貴彦*
村上 祐貴** 外山 茂浩*** 池田 富士雄****
井山 徹郎**** 井原 郁夫*

Application of Adjoint Variable Method for High Accurate Numerical Evaluation of Defect Based on Hammering Test

by

Eiki MATSUOKA*, Yoichi HIROSE*, Takahiko KURAHASHI*, Yuki MURAKAMI**, Shigehiro TOYAMA***, Fujio IKEDA****,
Tetsuro IYAMA**** and Ikuo IHARA*

In this paper, we present the inverse analysis for identification of the cavity position and the cavity size in structures. The performance function is defined by square sum of residual between the observed and the computed sound pressure. Here, the observed sound pressure is measured by the microphone in the experiment of hammering test. The problem is to find the cavity position and the cavity size so as to minimize the performance function. The formulation for this problem is carried out by the adjoint variable method, and the numerical simulation of the sound pressure propagation is carried out based on the wave equation and the finite element method. In addition, the identification of the cavity position and the cavity size is also carried out based on the adjoint variable and the finite element methods. The hammering signal is also identified by the observed sound pressure. To do that, it is important how to give the initial condition of the cavity position and the cavity size. In this study, the result of the clustering based on the self-organizing map is employed to determine the initial condition of the cavity position and the cavity size. The identification of the cavity position and the cavity size for a partial problem is shown in this paper.

Key words:

Non-destructive testing, Hammering test, Self-organizing map, Clustering, Wave equation, Finite element method, Adjoint variable method.

1 緒言

打音検査^{1)~3)}は簡便な非破壊検査手法であり、2012年の笹子トンネル崩落事故より注目されているが、構造物内の不良箇所等を特定するためには検査者の経験則などが影響するといった欠点も有している。そのため、現在ではマイクロフォン等で打音時の電圧波形を計測し、構造物内の介在物等を探査する研究も行われている⁴⁾。また、加振特性を考慮した打撃応答特性としての周波数応答関数を用いて構造物内の空洞の大きさおよび位置について自己組織化マップによって分類をする研究も行われている⁵⁾。文献⁵⁾内では、インパルスハンマと加速度センサを用いて出力の変位波形を用いた非破壊検査を提案している。この研究では、加速度センサによる測定値から得られる変位波形に対して高速フーリエ変換を適用し、算定された周波数応答関数を用いて、自己組織化マップを作成することにより空洞の大きさおよび位置を分類している。また、文献⁶⁾内では空洞深さを変えた打

音試験結果に自己組織化マップを適用している。結果として、空洞深さが70mm程度になると空洞の大きさや深さの判別が困難であるという知見を得ている。本論文では、自己組織化マップによる空洞の大きさや位置の判別に対する精度の向上を目指し、随伴変数法を適用した空洞の大きさや位置の同定シミュレーションを行う。同定シミュレーションにおいては、一般に直接微分法⁷⁾や随伴変数法⁸⁾が適用される。直接微分法では未知パラメータの数に応じて計算時間が大きく異なることもあるが、随伴変数法では未知パラメータの数が計算時間に大きな影響を与えないという利点がある。このような点も考慮し、本論文では随伴変数法を適用して、測定音圧履歴に基づく空洞の大きさおよび位置の同定シミュレーションを行う。解析対象領域の音圧分布を表すためには、3次元モデルを対象とした有限要素法を適用する。また、本論文では、随伴変数法による欠陥(空洞)の定量的評価の高精度化に焦点を当て、実験モデルはSS400を用いた

† 原稿受理 平成 29 年 12 月 6 日 Received Dec. 6, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 長岡技術科学大学大学院 機械創造工学専攻 機械情報・制御工学講座 〒940-2188 長岡市上富岡町
Dept. of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology, Kamitomioka-cho, Nagaoka, 940-2188.

** 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 〒940-8532 長岡市西片貝町
Dept. of Civil Engineering, National Institute of Technology, Nagaoka College, Nishikata-cho, Nagaoka, 940-8532.

*** 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科 〒940-8532 長岡市西片貝町
Dept. of Electrical & Electronic Systems Engineering, National Institute of Technology, Nagaoka College, Nishikata-cho, Nagaoka, 940-8532.

**** 長岡工業高等専門学校 機械工学科 〒940-8532 長岡市西片貝町
Dept. of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Nagaoka College, Nishikata-cho, Nagaoka, 940-8532.

簡便な空洞モデルを適用する。

2 自己組織化マップを用いた空洞の大きさおよび位置のクラスタリングと粗探查

2.1 自己組織化マップの利用

自己組織化マップ⁹⁾ (Self-Organizing Map, 以下 SOM とする) とは, 階層型ニューラルネットワークのひとつであり, 教師データを必要としないクラスタリング手法である。SOM には, 任意に設定した複数の変数についての類似性をクラスタリングによって可視化できるという利点がある。本論文では, 試験片として大きさおよび位置を変えた円筒状の空洞を開けた SS400 のブロックを用意し, マイクロホン (MI-1531 マイクロホン (株) 小野測器), 周波数範囲 10[Hz]~100[kHz] によって計測した打音時の音圧波形をもとにした空洞の大きさおよび位置のクラスタリングについて検討する。

2.2 特徴属性の設定

SOM において, クラスタリングの指標として任意に設定する変数を特徴属性と呼ぶ。特徴属性によるクラスタリングに用いられる, Glass によるデルタ Δ の計算式を式 (1) に示す。

$$\Delta = \frac{M_1 - M_2}{s_2} \quad (1)$$

ここで, M_1 は特徴属性を分類したい空洞位置における特徴属性の平均値, M_2 はクラスタリングを適用する特徴属性全体の平均値, s_2 は全体の特徴属性の不偏標準偏差である。この Δ の値が大きいくほど全体の平均値から離れた値を持っているということであり, その特徴属性が有意な特徴をもっているということになる。本論文では, この特徴属性としてマイクロフォンによって計測した音圧波形の周波数特性, 打音継続時間および打音時の最大振幅を設定する。本論文では周波数を 200[Hz] ごとに区画割りし, 区画内の周波数を数値積分したものを特徴属性の 1 つとして, 0~20,000[Hz] の間で合計 100 の特徴属性を用意する。これに加えて, 音圧波形の打音継続時間および最大振幅を特徴属性とし, 合計 102 の特徴属性によるクラスタリングを行う。

2.3 クラスタリングによる空洞の分類に関する実験

本論文では, 試験片として幅 100[mm], 高さ 100[mm], 奥行き 45[mm] に切り出した SS400 のブロック材に対して大きさおよび深さを変えた穴をあけたものを用いる。Case 1 では空洞なしの試験片を取り扱い, Case 2~5 では Fig.1 に示すような試験片モデルを取り扱う。穴径および深さの条件を Table 1 に示す。本論文では, インパルスハンマの使用が困難となる狭小区間を想定しており, 狭い場所においても安定した打音量を得られるよう, 小型の打撃治具を製作した。製作した打撃治具の図面および実験の様子を Fig.2 および Fig.3 に示す。本検討で用いる治具は Fig.2 の中心部に取り付けられたピストン部を引張ることにより, バネの復元力を利用して試験体表面を打撃する仕組みにしている。また形状については, 本検討にお

いて行う打音試験時の使用しやすさを考え設計している。打音点は空洞直上となるように試験片右端から 50[mm] の位置に配置し, 観測点となるマイクロフォンは試験片右端から 5[mm], 試験片上面から 5[mm] 離れた位置に配置する。本実験では, 音圧波形計測には LabView にて作成したプログラムを用いる。計測時間を 1[s] とし, サンプリング数およびサンプリングレートを 40000[Hz] とする。また, ゲインを 20[dB], マイク感度を -28.9[V/Pa] に設定する。実際に計測された音圧波形および高速フーリエ変換を適用した周波数特性について, Table 1 に示した Case 1~5 につき各 5 回試行したデータ (P1~P5) を用いて SOM を作成する。このとき作成されたクラスタリングマップを Fig.4 に示す。また, 各グループによる分類結果をまとめたものを Table 2 に示す。Case 1 はグループ III と IV の 2 つに分けられ, Case 5 はグループ VI と VII の 2 つに分けられたが, Case 2, 4 の結果は 5 つすべてのデータがそれぞれ同グループとしてクラスタリングされる結果となった。Case 3 のうち一つが Case 2 と同グループに分けられる結果となったが, グループ I において支配的であるのは Case 2 の条件となるため, グループ I は Case 2 の分類であるとみなす。

Table 1 Cavity conditions.

Case	Diameter ϕ [mm]	Depth d [mm]
1	Nothing	Nothing
2	10.0	25.0
3	15.0	25.0
4	10.0	50.0
5	15.0	50.0

Fig. 1 Experimental model.

Fig. 2 Drawing of hammering jig.

Fig. 3 Experimental apparatus.

Fig. 4 Result of self-organizing map.

Table 2 Results of clustering.

Group	Characteristic attribute [Hz]	Case of the cavity
I	8600, 14600, 17600	Case 2 No.1~5, Case 3 No.5
II	7800, 18200, 18400	Case 4 No.1~5
III	6000, 9400, 17400	Case 1 No.1~4
IV	11200, 11400, 12000	Case 1 No.5
V	16600, 14800, 18000	Case 3 No.1~4
VI	3600, 6400, 6600	Case 5 No.4,5
VII	18600, 18800, 19800	Case 5 No.1~3

2.4 クラスタリングデータを用いた空洞の大きさおよび位置の粗探査

前節同様、直径 15[mm]、深さ 30[mm]の空洞を有する試験片で実験を行い、得られた打音データに前節のクラスタリングデータを適用することで、実験の打音データが条件として最も近いグループに分類されるか検証する。ここで、クラスタリングデータから各グループの式(1)から求められる Δ の値が大きい上位3つの特徴属性である周波数を抜き出し、各周波数におけるクラスタリングデータの振幅と実験値の振幅との差を比較する。このとき、振幅の差が最も小さい周波数を特徴属性に持つグループが実験の打音データに最も近いクラスタリングデータであると判定する。実験によって打音データを10回取得し、周波数解析結果をFig.5に、また分類を判定した結果をTable 3に示す。本実験において、Table 1に示したクラスタリングのCase 1~5の中で今回の試験片に最も近い条件はCase 3の直径 $\phi=15$ [mm]、深さ $d=25$ [mm]で、クラスタリングマップにおけるグループVである。Fig.5より本実験の再現性を確認でき、またTable 3に示す通り、10回中7回はこの最も近い条件に分類されており、おおむね正しい結果を得られていることを確認できる。

Fig. 5 Relationship between spectrum value for output signal and frequency.

Table 3 Results of experiment.

No.	The most similar group
1	Group II $\phi=10$ [mm], $d=50$ [mm]
2	Group V $\phi=15$ [mm], $d=25$ [mm]
3	Group V $\phi=15$ [mm], $d=25$ [mm]
4	Group V $\phi=15$ [mm], $d=25$ [mm]
5	Group V $\phi=15$ [mm], $d=25$ [mm]
6	Group V $\phi=15$ [mm], $d=25$ [mm]
7	Group II $\phi=10$ [mm], $d=50$ [mm]
8	Group II $\phi=10$ [mm], $d=50$ [mm]
9	Group V $\phi=15$ [mm], $d=25$ [mm]
10	Group V $\phi=15$ [mm], $d=25$ [mm]

3 打音量および空洞の大きさ・位置同定に対する計算アルゴリズム

3.1 評価関数の定義および制約条件式について

本論文では、実験によりマイクロフォンから得られる音圧波形を用いて、打音信号や空洞の大きさ・位置の評価指標となる式を作成する。打音信号および空洞の大きさ・位置の同定に際し、まず測定した音圧波形を $p_{obs.}$ とし、シミュレーションで得られる音圧値 p との差の二乗積分値を評価関数として式 (2) のように定義する。

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} (p - p_{obs.}) Q (p - p_{obs.}) d\Omega dt \quad (2)$$

ここで、 t_0 は解析の開始時刻、 t_f は解析の終端時刻、 Q は重み定数であり、マイクロフォンによる観測点において 1、それ以外において 0 と設定する。音圧の計算には式 (3) に示す波動方程式および式 (4) ~ 式 (7) に示す初期条件・境界条件を用いる。式 (2) において、ドットは時間微分、カンマは空間微分、添え字 i は総和規約に基づいて記載している。本論文では、3次元モデルを対象として、これらをもとに評価関数を最小とする空洞の大きさおよび位置を求める。

$$\ddot{p} - c^2 p_{,ii} = 0 \quad (3)$$

$$p = \hat{p} \quad \text{at} \quad t = t_0 \quad \text{in} \quad \Omega \quad (4)$$

$$\dot{p} = \hat{\dot{p}} \quad \text{at} \quad t = t_0 \quad \text{in} \quad \Omega \quad (5)$$

$$p = \text{unknown} \quad \text{on} \quad \Gamma_1 \quad (6)$$

$$b = c^2 p_{,i} n_i = \hat{b} \quad \text{on} \quad \Gamma_2 \text{ and } \Gamma_3 \quad (7)$$

ここで、 c は音速、 n_i は外向きの単位法線ベクトル、ハットは既知量、 Ω は計算領域、 Γ_1 は音圧の打音点、 Γ_2 はそれ以外の外部境界、 Γ_3 は内部の空洞周りの境界を表す。計算領域の図をFig.6に示す。また、 b は式 (3) に対する第2種境界条件である。

Fig. 6 Definition of computational area and boundaries.

3.2 随伴変数法の導入および停留条件の導出

本論文では、空洞位置同定のために随伴変数法⁸⁾を適用する。式 (2) ~ 式 (7) に示した拘束条件のもと評価関数が最小となる問題を解く際、随伴変数 λ を導入し、式 (8) に示すラグランジュ関数を得る。

$$J^* = J + \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} \lambda (\ddot{p} - c^2 p_{,ii}) d\Omega dt \quad (8)$$

ここで、ラグランジュ関数の停留条件を導出する。ラグランジュ関数の第一変分を計算することにより、式 (9) に示す随伴方程式および式 (10) ~ 式 (13) に示す随伴変数に対する終端条件・境界条件を得る。

$$\ddot{\lambda} - c^2 \lambda_{,ii} + Q (p - p_{obs.}) = 0 \quad (9)$$

$$\lambda = 0 \quad \text{at} \quad t = t_f \quad \text{in} \quad \Omega \quad (10)$$

$$\dot{\lambda} = 0 \quad \text{at} \quad t = t_f \quad \text{in} \quad \Omega \quad (11)$$

$$\lambda = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_1 \quad (12)$$

$$s = c^2 \lambda_{,i} n_i = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_2 \text{ and } \Gamma_3 \quad (13)$$

ここに、 s は式 (9) に示す随伴方程式に対する第2種境界条件である。また、式 (3) および式 (9) の空間方向の離散化には有限要素法、時間方向の離散化には後退差分法を適用する¹⁰⁾。

3.3 反復計算および節点移動について

本論文では、ラグランジュ関数の最小化には最急降下法¹¹⁾を適用する。打音点における入力としての打音信号および空洞位置の更新式は式 (14) および式 (15) に示す。また、空洞の大きさに関して半径 r の更新式を式 (16) に示す。ここで、 l は反復回数、 α_1 および α_2 、 α_3 はそれぞれのステップ長さ、 θ は空洞中心からみた各節点の位置する角度を示す。また、 Γ_3 は空洞周りの境界を表す。

$$p^{(l+1)} = p^{(l)} - \alpha_1^{(l)} \frac{\partial J^{*(l)}}{\partial p^{(l)}} \quad \text{on} \quad \Gamma_1 \quad (14)$$

$$z^{(l+1)} = z^{(l)} - \alpha_2^{(l)} \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Gamma_3} \frac{\partial J^{*(l)}}{\partial p^{(l)}} \frac{\partial p^{(l)}}{\partial z^{(l)}} d\Gamma dt \quad \text{on} \quad \Gamma_3 \quad (15)$$

$$r^{(l+1)} = r^{(l)} - \alpha_3^{(l)} \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Gamma_3} \frac{\partial J^{*(l)}}{\partial p^{(l)}} \left(\frac{\partial p^{(l)}}{\partial z^{(l)}} \sin \theta + \frac{\partial p^{(l)}}{\partial x^{(l)}} \cos \theta \right) d\Gamma dt \quad \text{on } \Gamma_3 \quad (16)$$

また、空洞の大きさおよび位置の更新に際し、空洞に直接関与しない節点の移動にはラプラス方程式を導入する。これにより、各反復計算において、空洞が移動することによる節点および要素の干渉を抑えることができる。支配方程式および境界条件を式 (17) ～式 (20) に示す。ここで、 Δx , Δz は節点の移動量、 $\hat{\cdot}$ は既知の値を示す。

$$\frac{\partial^2 \Delta x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta x}{\partial z^2} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta z}{\partial z^2} = 0 \quad (18)$$

$$\Delta x = 0, \Delta z = 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \text{ and } \Gamma_2 \quad (19)$$

$$\Delta x = \Delta \hat{x}, \Delta z = \Delta \hat{z} \quad \text{on } \Gamma_3 \quad (20)$$

本論文における計算アルゴリズムを以下に説明する。空洞の大きさおよび位置の同定計算では、打音信号の境界条件が必要になることから、解析の初めに打音信号の同定計算を行い、その後に空洞の大きさおよび位置の計算を行う必要がある。本論文では、「打音信号」および「空洞の大きさおよび位置」の同定解析を2サイクル実施することにより、解析を行う。また、評価関数の収束計算の際に、反復過程において評価関数の変動値が小さくなることがあり、評価関数の差に関する収束判定基準では、評価関数が十分に下がる前に計算が終了し、適切な同定解を得られない場合がある。そのため、本検討では、最初の評価関数の値について正規化した評価関数に対して7割を下回った後、評価関数の差に関する収束判定基準を満たした場合に同定解とする。「打音信号」および「空洞の大きさおよび位置」の同定解析では、各々収束判定定数を設定し解析を実施する。

4 打音検査結果の高精度化に向けた数値実験

4.1 空洞の深さのみが未知変数となる場合の同定解析

数値実験に用いる計算モデルをFig.7に示す。打音点以外の外部境界においては音圧に関する流束ベクトル（第二種境界条件）を零とする。ここで、計算モデルにおいて空洞位置を上面より25.0[mm]の深さに設定しているが、マイクロフォンから音圧波形を観測する際には試験片として空洞の深さが30.0[mm]のものをを用いている。これにより計算モデルにおいて空洞位置が数値実験によって正解位置に近づくか否かについて検討する。また、空洞位置を求める際には、既知の境界条件としてマイクロフォンからの観測音圧を与えるが、打音点における音圧の境界条件は未知であることから、本論文では、空洞位置の同定をするために境界条件として打音時の音圧波形も併せて数値的に求めることにする。計算条件をTable 4に示す。収束判定定数 ε_1 は打音信号の計算時に

用いる収束判定であり、 ε_2 は空洞位置の計算時に用いるものである。また、各反復回数における評価関数の計算値の差を初回の評価関数により正規化した値を収束判定に用いる。ここで、打音時の音圧波形と空洞位置は順次計算し、音圧波形と空洞位置の同定を行う。打音信号同定時の評価関数の収束履歴および空洞位置同定時の評価関数の収束履歴をそれぞれFig.8およびTable 5に示す。Table 5において、左の列の(Cycle)は打音信号の同定計算と空洞位置の同定計算のサイクル番号を示し、No. は各サイクル内での反復回数を示す。また、打音点および観測点における音圧の経時履歴をそれぞれFig.9およびFig.10に示す。Fig.9では、打音波形と見られるピーク以外にもノイズのような波形が見られるが、Fig.10において既知の境界条件とした観測値と計算による音圧波形はおおむね一致している。Fig.11に空洞位置の移動履歴を示す。実験における空洞深さは70.00[mm]であり、最終イタレーションにおいて70.011[mm]と正しく収束していることがわかる。Fig.12に打音直後となる0.02625[s]時の音圧分布を示す。打音点周りが最も値が大きく、周囲へ正しく伝ばしていることがわかる。

Fig. 7 Finite element mesh.

Table 4 Computational conditions.

Total number of nodes	7842
Total number of elements	38427
Time increment Δt , s	0.000025
Wave velocity c , m/s	5106
Time step	6000
Sound pressure at the first iteration at hammering point, Pa	0.0
Convergence criterion 1 ε_1	10^{-3}
Convergence criterion 2 ε_2	10^{-3}

Fig. 8 Variation of performance function in case of input signal identification.

Fig. 10 Time history of sound pressure at observation point.

Table 5 Variation of performance function in case of cavity position identification.

(Cycle)-No.	Calculated performance function	Normalized performance function	Difference of normalized performance function
(1)-0	3.5549E-3	1.00000	-
(1)-1	3.5538E-3	0.99683	-
(1)-2	3.55153E-3	0.99905	-
(1)-3	3.54820E-3	0.99811	-
(1)-4	3.54380E-3	0.99688	-
(1)-5	3.53840E-3	0.99536	-
(1)-6	3.53206E-3	0.99358	-
(1)-7	3.52486E-3	0.99155	-
(1)-8	3.51687E-3	0.98930	-
(1)-9	3.50823E-3	0.98687	-
(1)-10	3.49903E-3	0.98428	-
(2)-0	2.19460E-3	0.61734	-
(2)-1	2.18898E-3	0.61576	1.58106E-3
(2)-2	2.18396E-3	0.61435	1.41089E-3
(2)-3	2.17971E-3	0.61316	1.19634E-3
(2)-4	2.17638E-3	0.61222	9.36217E-4

Fig. 11 Variation of z coordinate of center position in the cavity.

Fig. 9 Time history of sound pressure at hammering point.

Fig. 12 Distribution of the sound pressure at 0.02625[s].

4・2 空洞の大きさおよび深さの両変数が未知となる場合の同定解析

2.4 節において空洞の大きさおよび深さの粗探査結果を示したが、解析事前のクラスタリング実験において初期条件が一意に定まるとは限らない。本論文においても、粗探査実験による 10 回の試行データはグループ II とグ

ループ V に分類されており、どちらを初期条件に設定した場合においても空洞の大きさおよび深さを決定することが望ましい。前節では、クラスタリング実験において最も多く分類されたグループ V の条件を初期条件として設定したが、グループ II を初期条件として設定した場合についても考察を行う。グループ II では空洞の大きさも正解値と異なることから、空洞の大きさおよび深さの両変数が未知であるとした場合を取り扱うことになる。そのため、前節のように空洞の深さを未知数とする問題と併せて空洞の半径 r も同定するための変数として設定する必要がある。そこで、式 (16) に示す空洞の半径に対する更新式を定義し、空洞の大きさおよび深さを同時に同定できる方法について検討を行う。計算条件として Fig.13 に計算モデル、また Table 5 に計算条件を示す。本検討では、前節と異なり、 ε_2 の条件を 10^{-7} と設定する。本モデルでは、空洞の大きさおよび深さの同定計算において、前節と比べ、比較的緩やかに評価関数の値が減少するため 10^{-3} と設定すると正解値に近づく前に同定計算が終了してしまうことになる。そのため、本検討では $\varepsilon_2 = 10^{-7}$ と設定している。グループ II の条件に基づき初期条件を設定するため、直径 10[mm]、深さ 50[mm] を空洞の初期条件とし、正解とする直径 15[mm]、深さ 30[mm] の同定可能性について検証する。計算結果として、打音信号同定時の評価関数の収束履歴を Fig.14 に、打音点における音圧の経時履歴を Fig.15 に、観測点における同定計算終了時の音圧と実験において測定された音圧の比較を Fig.16 に示す。観測点において、同定計算終了時の音圧は測定音圧とおおむね一致しており、良好に同定計算を行えていることが確認できる。同定計算終了時 (50 イタレーション目) のメッシュ図を Fig.17 に示す。本検討では、 $\varepsilon_2 = 10^{-7}$ の条件を満足する前にメッシュが破綻し計算は終了する結果となったが、計算終了時の空洞の大きさおよび深さは、直径 12.14[mm]、深さ 35[mm] と、初期条件に比べて正解値には近づいている結果となった。しかし、完全に正解値と一致しない点については、メッシュの干渉が問題として考えられ、メッシュの節点位置を再配置する等の改良を要すると思われる。この点については今後の課題とする。

5 結言

本論文では、有限要素法および随伴変数法に基づき、打音試験におけるマイクロフォンからの音圧履歴の情報から空洞の位置を高精度に同定する方法に関する検討を行った。また、空洞の初期位置を設定するにあたり、自己組織化マップによるクラスタリングの情報を用いた。実験・解析モデルとしては SS400 の試験片 (空洞については $\phi 15\text{mm}, d25\text{mm}$ および $\phi 10\text{mm}, d50\text{mm}$ のモデル) を用い、音圧の伝ば状態を解析するために 3 次元の波動方程式を適用した。本論文で示した検討より、自己組織化マップのデータより空洞位置・サイズが異なっており得られたとしても、随伴変数法に基づく同定シミュレーション

を行うことにより、実際の空洞サイズ・位置に近い結果が得られることを確認した。しかしながら、空洞の大きさおよび深さの設定によっては計算メッシュの干渉が問題となることもあるため、この点は今後の課題とする。

Fig. 13 Finite element mesh

Table 6 Computational conditions.

Total number of nodes	3544
Total number of elements	17312
Time increment Δt , s	0.000025
Wave velocity c , m/s	5106
Time step	6000
Sound pressure at the first iteration at hammering point, Pa	0.0
Convergence criterion 1 ε_1	10^{-3}
Convergence criterion 2 ε_2	10^{-7}

Fig. 14 Variation of performance function in case of input signal identification.

Fig. 15 Time history of sound pressure at hammering point.

Fig. 16 Time history of sound pressure at observation point.

Fig. 17 Finite element mesh at 50 iterations.

本論文を執筆するにあたり、新潟県建設技術センターおよび長岡技術科学大学学長戦略的経費(㊟材料科学領域：未来を牽引する高信頼性材料分野)から研究助成を受けた。また、自己組織化マップの検討では、長岡工業高等専門学校専攻科環境都市工学専攻の野内彩可様に多大なるご協力を頂いた。本論文中に示した数値実験を行うにあたり、九州大学情報基盤研究開発センターの高性能演算サーバーシステムを利用させて頂いた。関係皆様に対して、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) T. Kamada, M. Asano, M. Kunieda and K. Rokugo, "Quantitative non-destructive evaluation of defects in concrete surface layer by impact acoustics methods", *Dobokou Gakkai Ronbunshu*, Vol.22, No.704, pp.65-79, 2002.
- 2) Y. Ito and T. Uomoto, "Impact acoustics of reinforced concrete beams with cracks", *Domoku Gakkai Ronbunshu*, Vol.35, No.564, pp.169-176, 1997.
- 3) H. Enomoto, T. Inagawa and H. Yokoyama, "A study on the best specification of the inspection device of tunnel concrete lining", *Doboku Gakkai Ronbunshu*, Vol.66, No.784, pp. 87-97, 2005.
- 4) M. Asano, T. Kamada, M. Kunishi and K. Rokugo, "Quantitative relationship between the size and depth of defect in concrete and hammering characteristics", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.23, No.1, pp.589-594, 2001.
- 5) A. Nouchi, Y. Murakami, T. Iyama and F.Ikeda, "Evaluation of internal defects in concrete based on frequency response function considering vibration characteristics by hitting", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.38, No.1, pp.2133-2138, 2016.
- 6) A. Nouchi, Y. Murakami, T. Kurahashi, T. Iyama, F. Ikeda and S. Toyama, "Fundamental study for judgment of characteristics of cavity in concrete based on hammering test using output signal at fixed position", *JSCE annual meeting in Niigata*, pp.344-347, 2017.
- 7) T. Matsumoto and M. Tanaka, "Steady-state heat condition design sensitivity analysis of mold by 3D BEM", *Journal of Society of Materials Science, Japan, Series A*, Vol.59, No.567, pp.2750-2757, 1993.
- 8) T. Kurahashi, "Investigations on boundary temperature control analysis considering a moving body based on the adjoint variable and the fictitious domain finite element methods", *Numerical methods in engineering*, Vol.103, No.8, pp.582-597, 2015.
- 9) T. Kohonen, "Self-Organizing Maps", pp.110-182 (2005) Springer-Verlag Tokyo.
- 10) N. Takeuchi, K. Kashiwayama and K. Terada, "Computational Mechanics", (2003) MORIKITA PUBLISHING CO., LTD.
- 11) H. Kano, "Optimum theory and optimization of the system", (1986) CORONA PUBLISHING CO., LTD.