愛媛大学 学生員 〇唐川和輝 愛媛大学 正員 中畑和之

1. はじめに

長尺材料である鉄道レールの内部のきずを非破壊的 に評価するために, 効率的な超音波検査法が求められ ている. 超音波検査の1つとして, ガイド波が注目さ れている.ガイド波は、板などのウェーブガイドに沿っ て伝搬する超音波のことで、バルク波に比べて減衰が 少なく長距離伝搬が可能であることから、広範囲が一 度に検査できる.しかし、周波数や板厚に依存して超 音波の伝搬速度が変化したり(分散性),1つの周波数 において複数の伝搬モードが発生したり(重畳性)す るために、きずからのエコーの識別が困難となる場合 がある.事前に伝搬特性を把握しておくことで,意図 した伝搬モードを用いた超音波検査が可能となる.平 板や中実丸棒のような単純な断面形状を持つ部材の分 散曲線は解析的に求めることができるが, 鉄道レール などの複雑な形状を有する部材においては数値計算に 頼らざるを得ない.

そこで、本研究では、任意断面を有する長尺材料 のガイド波の分散曲線を半解析的有限要素法¹⁾(Semianalytical finite element method:SAFE)を用いて計算 することを試みる.SAFE は有限要素を用いて伝搬す る材料の断面を離散化し、固有値問題に帰着させて伝 搬モードを求める方法である.本研究では、まず解析 解を用いて SAFE の解の精度を検証する.次に、鉄道 レールの分散曲線を SAFE によって計算した例を示す. また、各固有値に対応する固有ベクトルから伝搬モー ドの形状を把握する.

2. SAFE の定式化

3次元問題における SAFE の定式化は論文¹⁾ に詳細 が記されている.ここでは、3角形要素、4角形1次要 素、4角形2次要素を用いて SAFE の解の精度を比較 する.長尺材料の長手方向(伝搬方向)をz軸とし、そ の断面をx-yとする.任意点(x, y, z)における変位と 応力を、それぞれuと σ とする.j番目の要素におけ る弾性波動を支配する方程式は、仮想仕事の原理を用 いて次のように書ける.

$$\int_{V_j} \left(\partial \boldsymbol{u}^* \right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\sigma} dV + \int_{V_j} \rho \left(\boldsymbol{u}^* \right)^{\mathrm{T}} \ddot{\boldsymbol{u}} dV = 0 \qquad (1$$

〒790-8577 愛媛県松山市文京町3

Key Words: 超音波検査,ガイド波,半解析的有限要素法 (SAFE), 伝搬モード

ここで、* は複素共役、 ρ は密度、{} は時間 t に関する 2 階微分、 $\int_{V_j} \cdot dV$ は j 番目の要素における体積積分で ある.このとき、z 方向に伝搬する超音波の変位ベク トルは、複素波数 ξ 、複素振幅 U、形状関数 N、角振 動数 ω を用いて、以下のようにフェーザ表示できる.

$$\boldsymbol{u}(x,y,z) = N(x,y)\boldsymbol{U}\exp(i\xi z - i\omega t)$$
(2)

これを式(1)に代入して離散化し、一般化固有値問題 に帰着させる.

$$[\mathbf{A}(\omega) - \xi \mathbf{B}(\omega)]\mathbf{Q} = 0 \tag{3}$$

上式の, A, B, Qの具体的な表現は論文¹⁾を参照されたい.式(3)の一般化固有値問題を数値的に解くことによって m 番目の固有値 ξ_m を求め,この結果を次式に代入することで,位相速度 c_p^m を得る.

$$c_p^m = \frac{\omega}{\xi_m} \tag{4}$$

3. SAFE の精度検証

まず, SAFE の数値解の精度を確認するために,中実 丸棒における解析解²⁾と比較を行った.ここでは,直 径 1mm のアルミニウム (縦波音速は c_L =6.4km/s,横 波音速は c_T =3.0km/s,密度 ρ =2700kg/m³)棒について, 要素数 32(4 角形 2 次要素)の SAFE による解と解析解 (ここでは,LモードとTモードのみ)を比較する.図-1 に,数値解と解析解をプロットしたものを示す.SAFE はすべてのモードが同時に計算されるので,Lモード とTモード以外も出現している.この図から,SAFE と解析解は良好に一致していることがわかる.

4. 鉄道レール中を伝搬するガイド波のモード

ここでは,鉄道レールのガイド波検査を想定して,伝 搬モードの推定を行った.レール断面を図-2(a)に示す. レールの高さは140mmであり,応力0の境界条件とし た.材質は炭素鋼を想定し, c_L =5.8km/s, c_T =3.1km/s, ρ =7800kg/m³ としている.4角形2次要素を用いて,要 素数160のときのSAFEによって得られた位相速度と 群速度の分散曲線を図-2(b) と (c) に示す.

図-2(b)では離散的に位相速度分布が求まったが,その点がどのモード形状を有しているかは,固有値に

愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻, FAX 089-927-9840



図-1 中実アルミニウム丸棒に対する分散曲線



図-2 (a) 鉄道レールの断面, (b) 位相速度, (c) 群速度

対応した固有ベクトルをプロットすることで把握できる.図-3(a)と(b)に,0.6kHzのときの*c*_p=4.11km/sと0.93km/sのときの伝搬モード形状をそれぞれ示す.図-3(a)は,長手方向に偏向していることから縦モードで



図-3 0.6kHz のときの鉄道レールの伝搬モード形状. (a) 縦 モード, (b) ねじれモード

ある.また,図-3(b)はねじれモードであり,断面内で ねじれながら伝搬していることがわかる.

伝搬モード形状を可視化することで,どのような形 態で伝搬しているかが把握できる.これは,断面内の どこにきずがあるのかを識別することに応用できる. 例えば,鉄道レール断面の下部のみが揺れるような伝 搬モードを選択することで,もし反射エコーが計測さ れるならば,断面内のきずが下部に存在することを示 唆している.今後は実験を行い,SAFEの妥当性を検 証するとともに,ガイド波探傷に応用していきたい.

参考文献

- 1) T. Hayashi, W-J. Song, J. L. Rose : Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example, *Ultrasonics*, Vol.41, pp.175-183, 2003.
- 2) J. L. Rose : *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, New York, 1999.