

並列化差分法による超音波伝搬解析

○東京工業大学大学院 学生員 以頭 卓磨
岡山大学大学院 正 員 木本 和志
東京工業大学大学院 正 員 廣瀬 壮一

1. はじめに

超音波探傷試験の結果を定量的に評価し、高精度な評価を行うためには、超音波の伝播・散乱解析を行う数値解析ツールが必要である。超音波探傷試験の数値シミュレーションは、波長に比較して解析領域が大きいために、ごく単純な問題設定であっても非常に大規模な波動解析を行う必要があり、さらに、内部きずの形状や送受信の条件も種々のものに対して解析を行うことが求められる。

本研究はそのような解析を、データ入出力を含めて、効率よく行うことができる波動解析コードを開発することを目的として行ったものである。波動解析には時間領域の差分法を用い、使用可能な計算機台数に応じて最大限のパフォーマンスを得ることが出来るようプログラムの並列化を行う。開発したコードは、その並列化効率を調べるとともに、並列化によりアレイ超音波探傷試験の大規模なシミュレーションが可能となることを示す。

2. 問題設定と基礎式

等方均質な弾性体 D を伝播する超音波波動場を考える。領域形状は任意とし、内部に空洞が複数個含まれる場合も許容する。簡単のため、2次元問題として超音波を面内弾性波として扱う。入射波は領域表面 ∂D の一部 S_t に作用する既知の表面力 $f(x, t)$ によって励起されるものとする。このとき、速度場 v は運動方程式

$$\rho \dot{v}_i = \sigma_{ij,j} \quad (1)$$

と、応力と速度の関係

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda v_{\alpha,\alpha} \delta_{ij} + \mu (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2)$$

を満たすものとする。ただし、これらの式では応力テンソルおよび速度ベクトルの成分をそれぞれ σ_{ij} と v_i で、時間と空間に関する微分を $(\dot{})$ と $\{\}_{,k}$ で表している。また、 ρ は密度を、 λ と μ はラメ定数を意味する。領域 D を占める弾性体は時刻ゼロでは静止状態にあるものとし、また、表面力 f が作用する S_t 以外は自由境界であるとする。すなわち、外向き法線ベクトル (n_1, n_2) を用いて

$$\sigma_{ij} n_j = \begin{cases} 0 & x \in \partial D \setminus S_t \\ f_i(x, t) & x \in S_t \end{cases} \quad (3)$$

で境界条件を与える。以上を満足する速度場 $v(x, t)$ を指定された時間範囲で数値的に求めることがここでの問題である。

3. 差分法コードの概要

本研究で開発した差分法コードは、前節で示した基礎式を動弾性有限領域積分法の考え方に従って離散化することで得られる差分公式に基づくもので、いわゆる FDTD 法と

同様な差分式を用いている。今回開発したコードは以下のような点が特徴的である。

(1) 領域形状の入力

領域形状データの作成と入力を容易にするため、領域内部を白(1)、外部を黒(0)としたビットマップ形式の画像データを作成し、そこから差分格子を作成できるようにした。このような画像ファイルは通常のドローイングソフトで簡単かつ正確に作成できるため、これにより入力データ作成を大幅に省力化することができる。

(2) 入射点と入射波形

アレイ探傷を模擬できるように、複数の入射点を領域外表面の直線部分に設定できるようにした。これらは等間隔に設定でき、分布あるいは点波源とすることができる。入射点に与える表面力はその点の直応力によって与え、時間変化はリッカーウェーブレットと正弦パルス波のいずれかを選択できる。さらに、送信タイミングに遅延時間を設定して、ビームフォーカスやステアリングを行うことができるようにしており、その際の集束点や入射角は任意に指定できる。

(3) 並列化

分散メモリ環境での計算が可能なよう MPI を用い、解析領域を図-1のように分割して、各プロセッサに差分公式の計算を割り当てることで並列計算を行う。

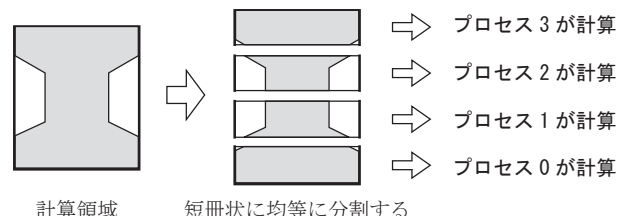


図-1 並列計算のための領域分割

(4) 計算結果の出力

速度場のスナップショットを作成できるように、一定の時間ステップ間隔で全格子点の速度を出力する。ただし、出力データサイズを抑えることができるように必要に応じてダウンサンプリングを行なうこともできる。速度データの出力に当たっては、CPU 間の通信量を減らすために、各々のプロセスが担当した部分を独立に出力する方法をとった。その結果分割されて出力されたデータは、計算終了後に統合して可視化できるようにしている。また、全入射点が同時に観測点にもなっているものとして、各点における速度の時間変化も出力するようにしている。

4. 性能の検証

並列化効率を検証するために、グリッド数が (a)2000 ×

Key Words: 超音波探傷, 差分法, 並列化, MPI

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 TEL 03-5734-3587 FAX 03-5734-3587

2000 と (b)4000 × 4000 の 2 種類 の モデル について、使用す
る CPU の 数 を 変 化 さ せ て 解 析 を 行 な っ た . 解 析 に は 図-3
に 示 した 形 状 で、領 域 右 上 の 空 洞 は 含 ま ない モデル を 用 い、
一 辺 の 長 さ は (a)75mm, (b)150mm と した . 入 射 波 は 底 辺
中 央 に 点 波 源 を 設 け て 与 え、計 算 は モデル (b) に お い て 縦
波 が 領 域 を 一 往 復 す る 時 間 ま で 行 う も の と し て、総 時 間 ス
テ ッ プ 数 を 14241 と した .

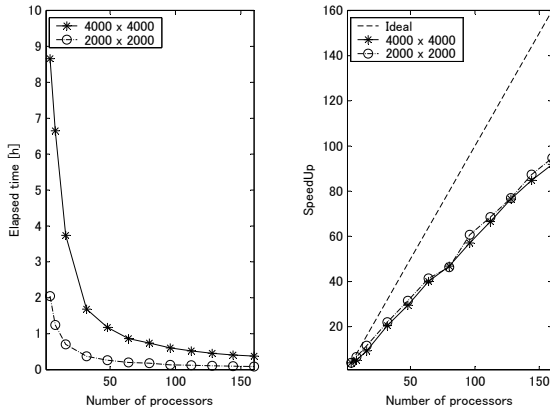


図-2 CPU 数と計算速度の関係、(左) 計算時間、(右) 速度の向上率.

図-2 の 左 側 の グラフ は CPU 数 対 する 計 算 時 間 の 変 化
を 示 した も の で あ り、同 図 右 は 並 列 化 に よ る 計 算 速 度 の 向
上 率 を 示 した も の で あ る . た だ し、CPU 数 n の と き の 計 算
に 要 した 時 間 を $t(n)$ と し、計 算 速 度 の 向 上 率 $\text{SpeedUp}(n)$
を 次 の よう に 定 義 した .

$$\text{SpeedUp}(n) = \frac{4t(4)}{t(n)} \quad (4)$$

す な わ ち 4CPU で の 計 算 速 度 の 向 上 率 を 4 と し て、他 の CPU
数 で の 計 算 速 度 を 比 と し て 表 した も の で あ る . 理 想 的 に は
 $\text{SpeedUp}(n)=n$ だ が、CPU 間 の 通 信 に か か る 時 間 の た め 実
際 に は そ れ 以 下 に し か な ら ない . 実 際、図-2 に 示 した 結 果
を 見 る と、理 想 の 60 ~ 70 % 程 度 程 とな っ て お り、CPU 数 が
 k 倍 に な れ ば、計 算 速 度 は 約 $0.7k$ 倍、計 算 に 要 す る 時 間 は
お よ そ $\frac{1}{0.7k} \approx \frac{1.43}{k}$ 倍 とな っ て い る . ま た、4000 × 4000 の
場 合 で は、2000 × 2000 に 比 べ て 格 子 点 数 は 4 倍 で あ る が、
計 算 に 要 した 時 間 は お よ そ 4.2 ~ 4.5 倍 にな っ て い る . こ れ
は、格 子 点 数 が 増 え た の と 同 時 に、通 信 に 要 す る 時 間 も 増 え
た た め と 考 え ら れ る . し か し な が ら、CPU 数 の 増 加 対 し て
、計 算 速 度 は ほ ぼ 線 形 に 向 上 し て お り、良 好 な 並 列 化 効 率
が 達 成 さ れ て い る と い え る .

5. 数値解析例

図-3 に 示 した モデル を 用 い て、アレイ 超 音 波 探 傷 試 験 の
シミュレーションを行なった . こ こ で は、鋼パイプなどの素
材 とな る 角 ビレット の 探 傷 を 想 定 し、面 取 り を 行 っ た 角 棒
断 面 を モデル 化 した も の を 用 い て い る . 入 射 波 は 64 素 子
の アレイ 探 傷 子 に よ っ て 発 生 さ せ た 場 合 を 考 え、等 間 隔 に
設 け た 64 点 の 入 射 点 から 領 域 角 部 付 近 に あ る 空 洞 ヘビ
ム フォーカス を 行 う . グリッド 数 は 4000 × 4000 で、60μ
秒 間 を 計 算 し、時 間 ステ ッ プ は 16122 ステ ッ プ で あ る . 表
面 力 の 時 間 変 化 は 中 心 周 波 数 5MHz の リ ッ カ ー 波 で あ る .
こ の 計 算 結 果 を 可 視 化 した 図-4 を 見 る と、合 成 した ビー

ム の 波 面 が P 波 ・ S 波 と も に は っ き り と 見 え、右 上 の 空 洞
へ 向 か っ て 伝 播 す る 様 子 が 分 か る . ま た、空 洞 に 当 た っ た
後 に 見 え る 4 つ の 波 面 は、元 の P 波 が、空 洞 と 外 側 界 界 で 反
射 し て P 波 と S 波 に 分 か れ て 散 乱 した も の で あ る .

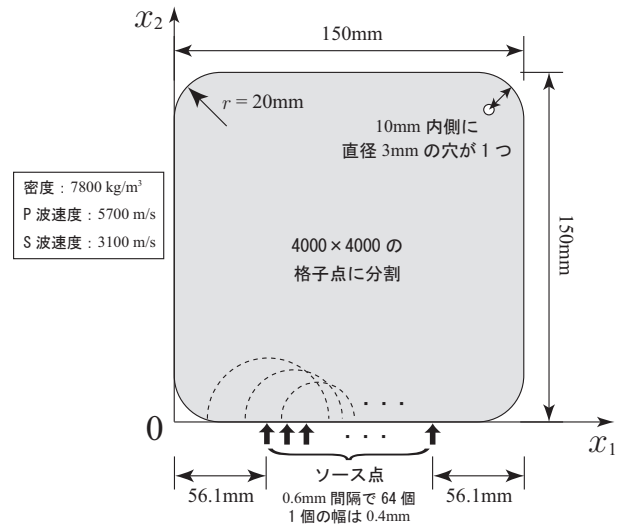


図-3 角ビレットの超音波探傷試験のシミュレーションモデル

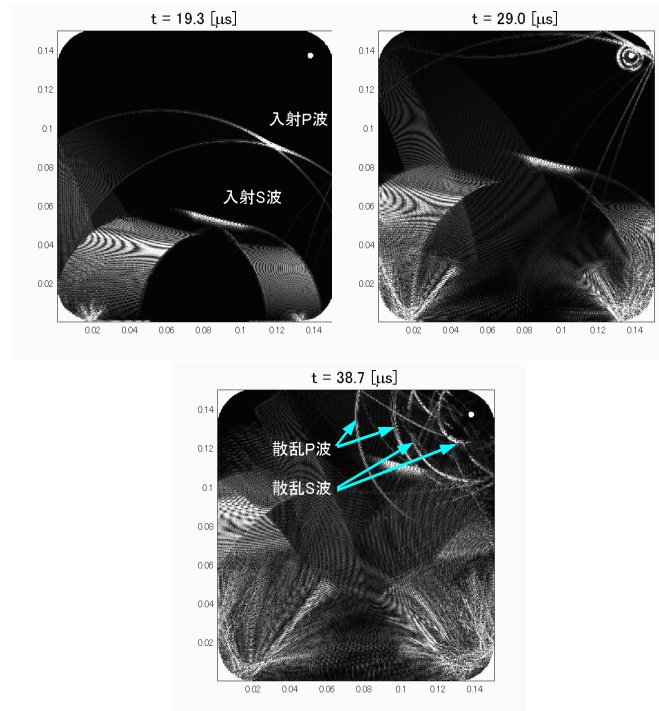


図-4 速度場 $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$ のスナップショット . t は送信開始時刻からの経過時間

6. 結論

本研究で得られた結論は、以下の通りである .

- 並列化によって大きな実行速度の改善が得られ、超音波探傷シミュレーションとして十分なサイズの問題を解くことができる .
- 入力データの作成が極めて容易にでき、簡単に解析を行なうことができる .

今後の課題は、3次元問題、異方性や非均質のある材料に対するシミュレーションコードを開発することである .