

I-42

ワークステーションによる応力波動伝播の Visual Simulation

中神土木設計 正員 本間 美樹治

(株) ズコーシャ 日下田 貴男

(株) ズコーシャ 葛西 隆一

北見工大 正員 大島 俊之

1. はじめに

近年のワークステーションの発達と画像処理ソフトウェアの開発にはめざましいものがある。高速のワークステーションは大量のデータを短時間で処理できるので、画像処理のために用いてもかなり有効である。また物理現象の数値シミュレーションはスーパーコンピュータを用いてFEMなどにより実施することができ、空間及び時間の細かい座標ピッチに対して個々のデータを作成することができる。このスーパーコンピュータ+ワークステーション+画像処理ソフトウェアのつながりはこれまで種々の不都合から実施できなかったコンピュータ上での数値実験を可能なものとしつつある。本論文ではこのようなコンピュータ上での数値実験の例として非破壊評価技術に応用するため材料中を伝播する応力波動の解析結果を示す。このような可視化技術は従来単なる数値データの処理手法としてしか評価されていないが、最近SVA (Scientific Visual Analysis) としてその処理技術の進歩とともに評価が高まっている。この証拠として、International Video Journal of Engineering Research という国際雑誌が最近発刊されたがこの雑誌への投稿の際には論文および画像処理結果の映像のビデオテープの提出が義務づけられ、その両方が審査の対象となっている。

2. 最近の画像処理技術とその応用

(1) 非破壊評価に応用する Visual Simulation

定量的非破壊評価 (Quantitative Nondestructive Evaluation: QNDE) において構造部材内部の欠陥などの検出や材料の力学的評価 (Nondestructive Characterization) のために超音波を用いた診断が広く行われている。¹⁾ この超音波による材料診断の精度は材料表面から入射される応力波動の伝播挙動の解析の精度に大きく依存しており、部材内部の小さな欠陥や微小な組織の変化を検出するためには入射波の特性や試験方法を適切に選定するとともに受信波の解析に対しても種々の工夫を必要としている。また部材中を伝播する超音波は欠陥や内包物によって応力波動としての反射や散乱が発生し、複雑に波動モードの変換が生ずる。したがって我々の目には見ることでできない複雑な応力波動の伝播現象を理解し、解析するうえで、Scientific Visual Analysis (SVA) ²⁾ の応用はスーパーコンピュータの高速処理とワークステーション上の画像処理ソフトウェアの組合せにより今日強力な武器となりつつある。非破壊評価のための手法としてはこれまで実験的研究と数値計算によるシミュレーションが用いられてきたが、第3の手法として、シミュレーションをさらに発展させて、SVAによりコンピュータ上で物理的実験が可能となっている。

(2) SVAとコンピュータ・グラフィックス (CG)

近年のアメリカにおけるコンピュータグラフィックスソフトウェアの開発には目ざましいものがあるが、中でもPV-WAVE(Sun.HP)、Silicon Graphics、Stardent などは使用性の点で特に優れている。またイリノイ大学のNCSA(National Center for Supercomputing Applications) では米国政府の支援を受けてコンピ

Visual Simulation of Stress Wave Propagation on Workstation

by Mikiiji HONMA, Takao HIGETA, Ryuichi KASAI and Toshiyuki OSHIMA

ユーターグラフィックスの広範囲な利用技術の開発に取り組んでいる。

これはグラフィックスに用いるデータをスーパーコンピュータやコネクション・マシンにより準備し、これをワークステーションに転送して得られたデータの解釈を様々な方面から解析するものである。このような手法を用いることによって、これまで現実にもることのできなかった物理現象の内部までせまることができ、現象の直感的理解を印象強いものとし、さらに深い分析のためのアイディアを提供することとなる。

一般にコンピュータグラフィックスでは現実の座標系（世界座標系と呼ぶ）において得られた3次元（3D）のデータを一度2次元（2D）の視平面に投影する。これを視平面座標系(View Plane Coordinates)への射影と呼ぶ。さらにこの投影された2Dのデータをコンピュータの画面上に再構成して表示するため座標値およびスケールを調整する。これを正規化装置座標系(Normalized Device Coordinates)への変換と呼ぶ。これらの座標変換の解析にはベクトル解析の理論が用いられている。

このようなデータの種々の操作は使用性の良いソフトウェアほど簡単な命令で実施することができ、これがこの分野の発展の原動力となっている。

3. 補強材を有するはり中を伝播する応力波動の数値実験

(1) 数値実験データの準備

図1のように衝撃入射荷重を受ける二次元積層長方形ばりを考える。この複合材料は中央面にInterphase層を有する補強材層を一層有している。ここでInterphase層とは母材と補強材の境界にあって、ある厚さを有するInterface領域を意味する。このInterphase層内では弾性定数が母材の弾性定数から補強材の弾性定数に近づく形で連続的に増加しており、Interfaceにおける不連続な弾性定数の変化を緩和し、母材と補強材の剥離を発生しにくくしたものであり、先端材料の分野で利用されている。

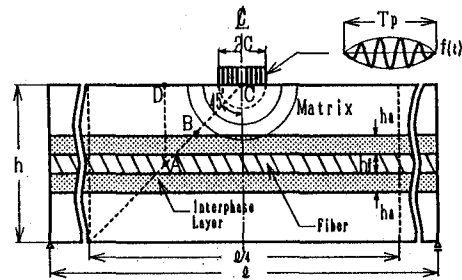


図1 衝撃入射を受ける積層複合ばり

この二次元の複合材料ばりを定式化するために帯板要素法 (Finite Strip Method: F S M) を用いる。F S Mにおいては二次元長方形帯板要素に対して、変位を長軸方向にFourier級数展開表示、短辺方向には直線変化を仮定し、Galarkin法を用いて要素関係式が求められる。^{3), 4)}

このような問題にF S Mを用いる有効性の一つは解析の過程で長軸方向にFourier変換を用いることである。すなわち長軸方向の座標軸に関する端部の境界条件を考慮したFourier変換による写像を行なうことにより、その後の解析は短辺方向の一つの座標軸及び時間にのみ着目して解析することができる。一般によく用いられるF E Mでは入射点からどんなに遠方の領域でも分割しなければならず、計算量を増大する要因となるが、F S Mでは逆変換する際に着目する領域のみに焦点を絞ることができる。また時間軸についてF S Mを用いる方法ではモーダル解析と直接積分法の両方を用いることができることである。モーダル解析では解析の過程で固有値、固有ベクトルが求まりさえすれば解の不安定性は存在しない利点がある。

はり全体を構成するすべての帯板要素に対しての要素関係式を適用し、全構造について動的応答に関する式が得られる。

$$[K] \{\delta_{st}\} + [C] \{\dot{\delta}_{st}\} + [M] \{\ddot{\delta}_{st}\} = \{F_{st}\} \quad (1)$$

ただし $[K]$ = 剛性マトリックス, $[C]$ = 粘性マトリックス, $[M]$ = 質量マトリックス,

$\{\delta_{st}\}$ = 変位ベクトル, $\{F_{st}\}$ = 外力ベクトル

またブライム'は時間に関する微分を意味する。

式(1)についてモード解析とDuhamel積分を用い、波動応答関数が得られる。

本論文においてはモード解析においてモード間の連成を無視し、固有値を計算する際には減衰の影響を無視している。

また減衰係数 h_r は周波数依存性を有するものとして次式を用いる。

$$h_r = \frac{b\omega_r}{\omega_r^2 + a} \quad (2)$$

ただし a, b は実験により与えられる。^{4), 5)}

波動応答を単純化するため両端で単純支持されたはりに中央面に一層の補強材を有する積層複合材を考える。入射荷重ははり中央上縁に有限の幅で衝撃荷重として作用するが入力荷重は実際の超音波実験により得られたものをモデル化して用いる。すなわち

$$f(t) = \begin{cases} F_0 \sin 2\pi f_a t \sin 2\pi f_c t & 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & t \geq T_p \end{cases} \quad (3)$$

ただし T_p は入射荷重の継続時間である。数値計算に用いた数値は以下のである。

$E_m = 30 \text{ GPa}$, $E_r = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.17$, $\nu_r = 0.30$, $\rho = 0.2347 \text{ g/cm}^3$, $\rho_r = 0.801 \text{ g/cm}^3$,

$l = 320 \text{ cm}$, $h = 40 \text{ cm}$, $h_r = 4 \text{ cm}$, $2c = 6 \text{ cm}$, $M = 80$, $n = 100$, $T_p = 50 \mu\text{s}$,

$f_a = 10 \text{ KHz}$, $f_c = 80 \text{ KHz}$, $\Delta t = 2 \mu\text{s}$, $F_0 = 1$, $a = 13935$, $b = 15.52$

数値計算は時間について $2 \mu\text{s}$ の時間ステップにより $300 \mu\text{s}$ まで実行され、画像用データははりの中央部の 200×100 の正方形に分割された格子点について作成された。この格子上のメッシュの面積ははり全体の $1/4$ 部分に相当し $80 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ の大きさで支間中央に対して対称にはり中央部に位置している。

はり中央上縁に載荷された衝撃入射波は過渡応答の応力波動としてはり中を伝播し、はりの境界からの反射波が徐々に到達する過程ではり全体の振動モードに移行する。これらの応力波動伝播挙動は数値シミュレーションとして示される。シミュレーションにおいて実際の変位応答は長軸方向と鉛直方向の2成分の合成として得られ、また応力応答は変位の数値微分より求められる。

(2) ワークステーション上での数値実験結果

複合積層材料中を伝播する応力波動であるため、伝播する波動モードの種類は縦波、横波及び表面波、さらに補強層中を伝播するLamb波の4種類のモードに分類される。そして我々の研究の興味はこれらの相異なる波動モード間でどのように波動モード変換が生じるかを映像としてとらえるとともに、それぞれの波動モードの波動エネルギーが波動の伝播や散乱の過程でどのようにその分散して行くかを追跡することである。画像シミュレーションでははっきりとそれぞれの波動モードの伝播が可視化されている。さらに垂直応力やせん断応力及び主応力の動的応答を検討することによってさら

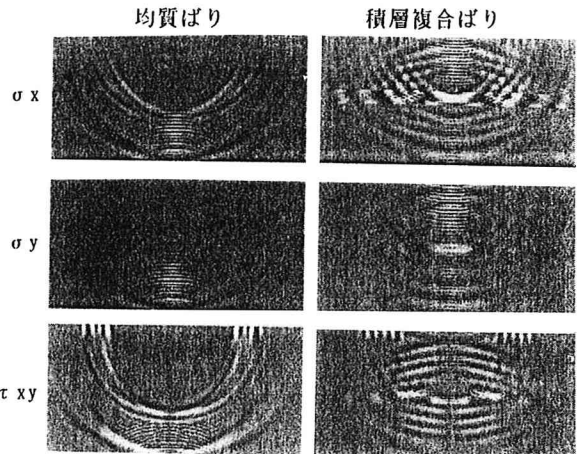


図2 応力波動伝播画像

に明確な波動モードの特徴が見られる。図2には補強材がある場合とない場合の σ_x , σ_y および τ_{xy} の3種類の応力のアニメーションの結果を示している。図より縦波、横波及び表面波の伝播がみられる。図3においては補強材中を伝播するLamb波モードがみられる。Lamb波モードは補強層中央面に関して対称モードと逆対称モードに分けられる。もし入射波の波長が補強層の厚さに比較して短い場合には波動分散効果により波動伝播速度は遅くなる。また極端に短い場合には補強層の表面波速度あるいは特別な場合としてStoneley波速度となる。

はり上縁中央から入射された超音波エネルギーは、はり内部の補強材に到達すると一部は補強材より反射し、はり上縁で反射エコーとして計測される。この場合補強材と母材の付着面の性状によって反射エコーに変化があらわれる。図4には2種類の異なる付着条件の場合の数値実験結果を示しており、いずれも第1波群は入射波、第2波群は補強材からの反射波エコー、第3波群は底面からの反射エコーの波形である。これらは図2の波動伝播の映像と対比される。次に応力波動のエネルギー流束(Energy Flux)は、はり各部の応力と粒子速度の応答結果から計算される。⁶⁾ またこのエネルギー流束の分布を追跡することにより波動エネルギーがはり内部でどのように分散していくかを可視化して理解することができる。図5には図5(a)に示すようにはり上部(Gate A)と補強材位置(Gate B)の2カ所に図のようにFlux gateを設けてこのgateを通過する波動エネルギーを数値実験により計測した。(図5(b),(c))さらにこれらのA, B点のEnergy fluxを時間平均(16 μ s毎)した結果を図5(d)、また反射エコーがはり上縁で再度反射していく状況の画像を図5(e)にゲートとともに示している。

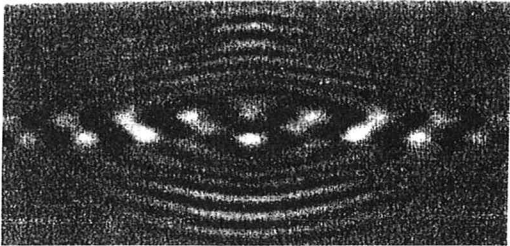


図3 Lamb波モード

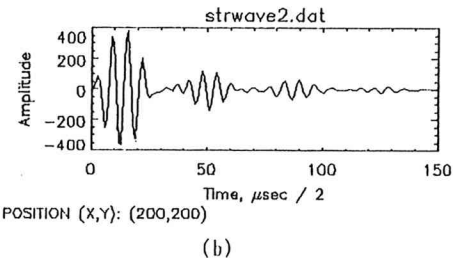
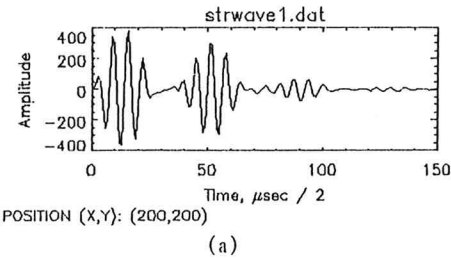


図4 はり上縁中央での観測波形

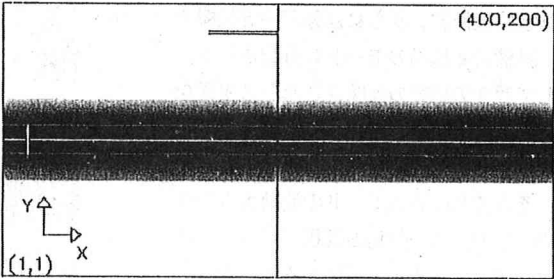


図5 (a) Energy flux gate

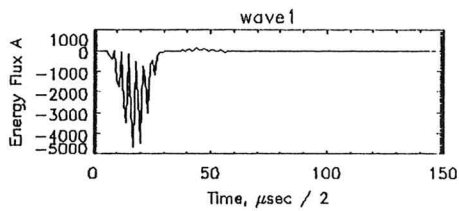


図5 (b) Gate A を通過するEnergy flux

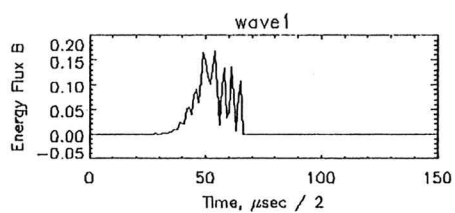


図5 (c) Gate B を通過するEnergy flux

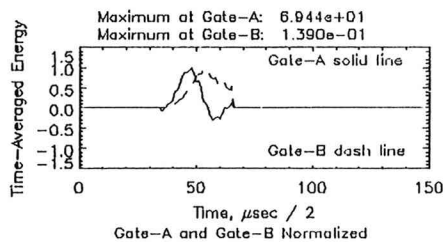


図5 (d) Energy fluxの比

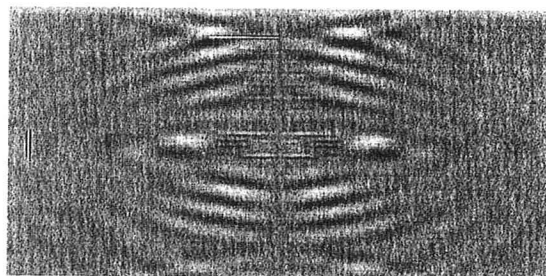


図5 (e) 上縁での反射の画像

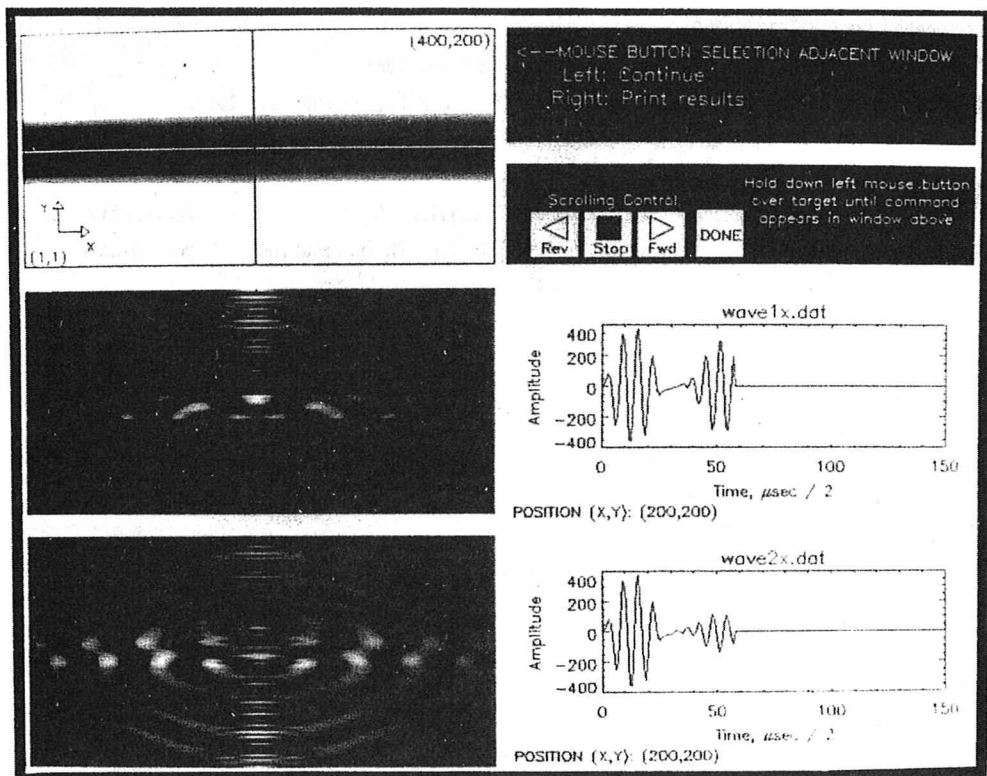


図6 ワークステーション上での数値実験のセットアップ

4. あとがき

本論文では応力波動伝播問題を対象として大型計算機によるシミュレーションのデータをワークステーション上に転送し、画像処理ソフトウェアを用いて、コンピュータ上で数値実験を実施した結果について述べた。このような数値実験の手法を用いることにより、物理的現象の解釈を発展させることができるとともに、たとえば実際の実験に先立ちセンサーの配置、適切なセンサーの選択など種々の実験計画の検討にも応用することができる。また実験データの解釈に対しても有効に活用することができる。実際このシステムを用いてこれまで応力波動の伝播に関する多くの新しい知見が得られた。^{7), 8)}

参考文献

- 1) R.O.Thompson and D.E.Chimenti: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.1(1982)~10(1991).
- 2) R.D.Kriz,O.H.Griffin Jr.: Visualization Practicum: Sun World, Vol.4, No.8, 1991.
- 3) Y.K. Cheung: Finite Strip Method in Structural Analysis, Pergamon Press, 1976.
- 4) T. Oshima, S.Mikami, S.G. Nomachi: Analysis of Stress Wave Propagation in Composite Rectangular Beam in the Case of Ultrasonic Pulse Method. Proc. of Japan Society of Civil Engineers, No.416/I-13, 1990.
- 5) H. Kolsky: Stress Waves in Solids, Dover Publications, 1963.
- 6) B.Auld: Acoustic Fields and Waves in Solids, Krieger Pub., Second ed., 1990.
- 7) 大島, クリツ: 複合材料中を伝播する応力波動のVisual Simulation, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, 1991.
- 8) T.Oshima,R.D.Kriz,S.G.Nomachi: Simulation and Visualization of Stress Wave Propagation in Composite Laminate with Interphase Layer, Proc. of the 5th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, 1992.