

JAERI - M
87-033

高レベル放射性ガラス固化体の破壊挙動解析

1987年3月

武田 常夫・丹羽 一邦*・中村 治人

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷㈱

高レベル放射性ガラス固化体の破壊挙動解析

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

武田常夫・丹羽一邦*・中村治人

(1987年2月5日受理)

高レベル廃棄物取扱施設の安全性について評価を行う場合、ガラス固化体の機械的強度に関する項目は、重要な項目の一つである。ガラス固化体の機械的性質、とりわけ破壊挙動を解析するためには、新しい計算手法が必要となってくる。そこで、剛体-バネモデルによる破壊挙動解析コード ADEKAT-G を開発した。

本報では、下記の問題に対する ADEKAT-G コードの計算結果について述べている。

- (1) 徐冷中の熱衝撃
- (2) 9 m 垂直落下
- (3) 落下高さの影響 (0.5 m から 9 m まで)
- (4) ピット内に既に収納されているキャニスタ上への落下
- (5) コーナー落下

である。

Evaluation of Deconstruction Behavior of
High-level Radioactive Waste Glass

Tsuneo TAKEDA, Kunikazu NIWA* and Haruto NAKAMURA

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment,
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 5, 1987)

The evaluation of deconstruction behavior of high-level radioactive waste (HLW) glass caused by drop impact and thermal impact is one of the most important items in safety analysis of HLW handling facilities. To evaluate the deconstruction behavior, a new calculation method is necessary. Therefore, a computer code ADEKAT-G has been developed by using a rigid-body spring model.

In this paper, results estimated by ADEKAT-G are summarized in the following problems;

- (1) Thermal impact under a condition of cooling after vitrification,
- (2) 9m free drop in a vertical position on a flat floor,
- (3) Effects on drop height (0.5m to 9m),
- (4) Free drop on a head of another HLW canister settled in a pit and
- (5) Corner drop on a flat floor.

Keywords: HLW, Glass, ADEKAT-G Code, Crack, Deconstruction, Thermal Impact, Drop Impact, Free Drop, Corner Drop, Rigid-Body Spring Model

* Nuclear Data Corp.

目 次

1. はじめに	1
2. ADEKAT -G コード概要	1
3. 高レベル廃棄物ガラス固化体の形状と物性	6
4. 高レベル廃棄物ガラス固化体の熱応力破壊解析	9
4.1 概 要	9
4.2 解析条件	9
(1) 形 状	9
(2) 模擬ガラス固化体の物性値	9
(3) 熱解析の解析条件	9
(4) 破壊解析の解析条件	10
4.3 解析結果と考察	10
(1) 熱解析結果	10
(2) 熱応力破壊解析結果	11
5. 高レベル廃棄物ガラス固化体の垂直落下破壊解析	18
5.1 概 要	18
5.2 垂直落下解析Ⅰ（9m落下解析）	18
(1) 解析概要	18
(2) 解析条件	18
① 固化体形状	18
② 要素分割	18
③ 材料定数	19
④ 初期条件	19
⑤ 境界条件	19
⑥ 自由度数	19
⑦ 時間ステップ幅及び解析時間	20
(3) STEALTH コードによる結果と考察	20
(4) ADEKAT -G コードによる結果と考察	21
5.3 垂直落下解析Ⅱ（落下高さによる比較）	38
(1) 解析概要	38
(2) 解析条件	38
(3) 比較計算の結果と考察	38
5.4 垂直落下解析Ⅲ（固化体頭部の破壊）	48
(1) 解析概要	48
(2) 問題Ⅰの解析モデルと結果	48

① 解析概要	48
② 解析条件	49
③ 解析結果と考察	50
(3) 問題 2 の解析モデルと結果	51
① 解析概要	51
② 解析条件	51
③ 解析結果と考察	52
6. 高レベル廃棄物ガラス固化体のコーナー落下解析	63
6.1 概要	63
6.2 簡易モデルによるコーナー落下解析	63
(1) 解析概要	63
(2) モデル化及び解析条件	63
① 解析モデルの形状	63
② 要素分割	64
③ 材料定数	64
④ 初期条件	64
⑤ 境界条件	64
⑥ 自由度数	64
⑦ 時間ステップ幅及び解析時間	64
(3) 解析結果と考察	65
① 変位, 速度, 加速度の時刻歴	65
② 応力と歪の時刻歴	65
③ 応力分布の時間変化	65
④ 固化体の変形	65
⑤ 固化体の破壊	66
6.3 3次元 1/2モデルによるコーナー落下解析	66
(1) 解析概要	66
(2) 解析条件とモデル化	66
① 解析モデルの形状	66
② 要素分割	66
③ 材料定数	66
④ 初期条件	66
⑤ 境界条件	67
⑥ 自由度数	67
⑦ 時間ステップ幅及び解析時間	67
(3) 解析結果と考察	67
7. おわりに	85
参考文献	86

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of AEDKET-G Code	1
3. Geometric Factor and Material Properties of HLW	6
4. Failure Analysis of HLW for Thermal Stress	9
4.1 Outline of Analysis	9
4.2 Analytical Conditions	9
(1) Geometric Functions	9
(2) Material Properties of Simulated HLW	9
(3) Parameters on Thermal Analysis	9
(4) Parameters on Failure Analysis	10
4.3 Results and Discussions	10
(1) Results of Thermal Analysis	10
(2) Results of Failure Analysis	11
5. Failure Analysis of HLW for Vertical Drop	18
5.1 Outline of Analysis	18
5.2 Analysis of Vertical Drop I (9 m Free Fall)	18
(1) Outline of Analysis	18
(2) Analytical Conditions	18
1) Geometric Functions	18
2) Meshing	18
3) Material Properties	19
4) Initial Conditions	19
5) Boundary Conditions	19
6) Freedom on Calculation	19
7) Time Step and Time Required for Calculation	20
(3) Discussions on Results of STEALTH Code	20
(4) Discussions on Results of ADEKAT-G Code	21
5.3 Analysis of Vertical Drop II (Comparison of Drop Height)	38
(1) Outline of Analysis	38
(2) Analytical Conditions	38
(3) Results and Discussions	38
5.4 Analysis of Vertical Drop III (Drop on Head of Another HLW Package)	48
(1) Outline of Analysis	48

(2) Modelling and Results of Problem I	48
1) Outline of Analysis	48
2) Analytical Conditions	49
3) Results and Discussions	50
(3) Modelling and Results of Problem II	51
1) Outline of Analysis	51
2) Analytical Conditions	51
3) Results and Discussions	52
6. Failure Analysis of HLW for Corner Drop	63
6.1 Outline of Analysis	63
6.2 Analysis of Corner Drop Using Simplified Model	63
(1) Outline of Analysis	63
(2) Modelling and Analytical Conditions	63
1) Geometric Functions	63
2) Meshing	64
3) Material Properties	64
4) Initial Conditions	64
5) Boundary Conditions	64
6) Freedom on Calculation	64
7) Time Step and Time Required for Calculation	64
(3) Results and Discussions	65
1) Time History of Displacement, Velocity and Accelaration	65
2) Time History of Stress and Distortion	65
3) Tiem History of Stress Distribution	65
4) Deformation of HLW Package	65
5) Destruction of HLW Package	65
6.3 Analysis of Corner Drop Using 1/2 Scale Model	66
(1) Outline of Analysis	66
(2) Modelling and Analytical Conditions	66
1) Geometric Functions	66
2) Meshing	66
3) Material Properties	66
4) Initial Conditions	66
5) Boundary Conditions	67
6) Freedom on Calculation	67
7) Time Step and Time Required for Calculation	67

(3) Results and Discussions	67
7. Summary	85
References	86

1. はじめに

高レベル廃棄物取扱施設の安全性について評価を行う場合、ガラス固化体の機械的強度に関する項目は、重要な項目の一つである。

具体的には、貯蔵施設等の取扱施設においてガラス固化体を取扱う場合に、検査、貯蔵等の各工程においてクレーンや専用の治具により移送されたりする。このときに、クレーンからセル床面へ脱落したり、貯蔵用ピット内で落下したりする事故についても検討を加えておく必要がある。

ガラス固化体は一般金属材料とは異なり、機械的な衝撃を受けた場合には、単なる変形に留まらず割れを生ずることになる。従来、構造強度の分野では、有限要素法が多用されてきたが、上記の割れ（破壊）を生ずる現象の解析には必ずしも好都合とは言えない。

そのため、本報では、新たに開発したガラス固化体破壊解析コード ADEKAT-G* を用い、いくつかの典型的なガラスの破壊挙動について解析を試みたので報告する。それらは、熱応力破壊、9m垂直落下、落下高さの影響、ピット内落下、コーナー落下である。

解析に主に用いた計算コードはガラス固化体の破壊挙動を模擬できるよう著者らが特に開発した ADEKAT-G コードである^{1)~5)}。このコードは構造物や固体の最終的な強度を評価するため考案された剛体-バネモデル (RBSM; Rigid Bodies Spring Model) を用いている。このモデルはいくつかの剛体要素と要素間に分布するバネで構成されており、このバネによって力や変位が伝達されるというものである。剛体-バネモデルは非常に簡易であるが、破壊や接触などの不連続な特性を扱う場合には有限要素モデルよりも有利であると思われる。

第2章では、解析に用いた ADEKAT-G コードについて、その概要を述べる。第3章は、高レベル廃棄物ガラス固化体の形状と破壊解析に必要な固化体の物性値をまとめている。第4章で熱応力破壊解析を扱い、第5章と第6章では、固化体の垂直落下による破壊解析とコーナー落下による破壊解析について述べる。最後に第7章では本報告書のまとめと今後課題とすべきいくつかの問題点を指摘する。

2. ADEKAT-Gコード概要

本解析コードは落下事故時の安全解析等を行えるようにするため、ガラス固化体の破壊挙動を模擬できるよう新たに開発した計算コードである。本コードでは構造や固体の最終的強度を評価するために川井により考案された剛体-バネモデル (RBSM) を用いている。このモデルはいくつかの剛体要素と隣接要素間に分布するバネで構成されており、このバネによって力や変位が伝達されるとする簡易なモデルである。これをガラス固化体の破壊解析に用いる場合には有限要素モデル等他のモデルを摘要する場合に比べ次のような利点がある。

* Advanced Deformation Evaluation Key and Tools - Glass より命名した。

1. はじめに

高レベル廃棄物取扱施設の安全性について評価を行う場合、ガラス固化体の機械的強度に関する項目は、重要な項目の一つである。

具体的には、貯蔵施設等の取扱施設においてガラス固化体を取扱う場合に、検査、貯蔵等の各工程においてクレーンや専用の治具により移送されたりする。このときに、クレーンからセル床面へ脱落したり、貯蔵用ピット内で落下したりする事故についても検討を加えておく必要がある。

ガラス固化体は一般金属材料とは異なり、機械的な衝撃を受けた場合には、単なる変形に留まらず割れを生ずることになる。従来、構造強度の分野では、有限要素法が多用されてきたが、上記の割れ（破壊）を生ずる現象の解析には必ずしも好都合とは言えない。

そのため、本報では、新たに開発したガラス固化体破壊解析コード ADEKAT-G* を用い、いくつかの典型的なガラスの破壊挙動について解析を試みたので報告する。それらは、熱応力破壊、9m 垂直落下、落下高さの影響、ピット内落下、コーナー落下である。

解析に主に用いた計算コードはガラス固化体の破壊挙動を模擬できるよう著者らが特に開発した ADEKAT-G コードである^{1)~5)}。このコードは構造物や固体の最終的な強度を評価するため考案された剛体-バネモデル (RBSM; Rigid Bodies Spring Model) を用いている。このモデルはいくつかの剛体要素と要素間に分布するバネで構成されており、このバネによって力や変位が伝達されるというものである。剛体-バネモデルは非常に簡易であるが、破壊や接触などの不連続な特性を扱う場合には有限要素モデルよりも有利であると思われる。

第2章では、解析に用いた ADEKAT-G コードについて、その概要を述べる。第3章は、高レベル廃棄物ガラス固化体の形状と破壊解析に必要な固化体の物性値をまとめている。第4章で熱応力破壊解析を扱い、第5章と第6章では、固化体の垂直落下による破壊解析とコーナー落下による破壊解析について述べる。最後に第7章では本報告書のまとめと今後課題とすべきいくつかの問題点を指摘する。

2. ADEKAT-Gコード概要

本解析コードは落下事故時の安全解析等を行えるようにするため、ガラス固化体の破壊挙動を模擬できるよう新たに開発した計算コードである。本コードでは構造や固体の最終的強度を評価するために川井により考案された剛体-バネモデル (RBSM) を用いている。このモデルはいくつかの剛体要素と隣接要素間に分布するバネで構成されており、このバネによって力や変位が伝達されるとする簡易なモデルである。これをガラス固化体の破壊解析に用いる場合には有限要素モデル等他のモデルを摘要する場合に比べ次のような利点がある。

* Advanced Deformation Evaluation Key and Tools - Glass より命名した。

- (i) 材料の降伏による塑性変形の本質はスベリとして考えることができるが⁶⁾⁷⁾、剛体-バネモデルではスベリ線やスベリ面を容易に表現できるので実験による観測結果との対応付けが比較的容易に行える。
- (ii) 材料が破壊するときに生ずるクラックや、破壊後の構成方程式の扱い（残留強度や再接触など）が比較的簡単に行え、クラックの進展の様子が把握しやすい。
- (iii) 有限要素解析で用いられている解析手法⁸⁾⁹⁾、例えば時間積分法、増分理論に基づく反復解法等が剛体-バネモデルを用いる解析アルゴリズムについても使用できる。さらに、剛体-バネモデル自体は簡易なモデルであるため計算アルゴリズムはより簡潔なものとなり、解析に要する計算時間を短縮させることができる。

次に剛体-バネモデルの基本的な考え方を要約する。

剛体-バネモデルは、構造非線形問題の解析のために開発された物理モデルである。これは、対象物を有限個の任意の形状の微小要素に分割し、それ自身は剛体であると考え、要素どうしをその境界上に連続的に分布しているスプリングによって結び付けている。図 2.1 は固化体の変形に伴う要素 I と II の重心変位及び要素間相対変位を示したものである。固体が変形すると、剛体要素は互いに変位し、要素間 ABC-ABC には相対変位 $\delta = (\delta_x, \delta_y, \delta_z)^T$ が発生する。この変形エネルギーは要素間に分布している垂直バネとせん断バネに歪エネルギーとして蓄えられ、歪み $\epsilon = (\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)^T$ と応力 $\sigma = (\tau_x, \tau_y, \sigma_z)^T$ が要素間に発生する。剛体-バネモデルでは要素の変位と要素の受ける荷重を要素の重心で評価し、歪みと応力は要素間の境界で定義している。従来広く用いられている有限要素法と同様、要素剛性マトリックスの作成と構造全体の剛性マトリックスの重ね合わせを行い与えられた荷重 F に対し剛性方程式を解き要素変位を計算する。

$$KU = F$$

さらに、相対変位 δ を求め、歪み ϵ 、応力 σ を計算する。

$$\delta = BU$$

$$\epsilon = (1/h) \delta$$

$$\sigma = D \delta$$

ただし、B は要素変位を要素間相対変位に換算するマトリックス、h は要素重心間距離を要素境界面に立てた法線に射影した長さ、D はバネ定数マトリックスである。また、熱応力解析では構造物内温度分布から初期歪みを計算し、初期応力より要素内合力圧を求めた後、上式により応力歪みを計算する。

一方、ガラス固化体の落下衝撃破壊解析等を行う場合に重要かつ不可欠な課題となっている接触問題及び有限変形問題に付いても ADEKAT-G コードで扱うことができる。

接触問題の解析手法としては既に有限要素法や差分法に基づく計算コード¹⁰⁾に取り入れられている方法を参考に剛体-バネモデルに適した手法を導入した。この手法は剛体-バネモデル自身が本来接触問題の解析に有利なモデルとなっているという点を考慮して開発されたものである。ADEKAT-G コードの接触問題に対するこの機能により具体的には以下のような問題の取り扱いが可能になった。

- (i) ガラス固化体が落下して床と衝突する場合、床との接触離脱を考慮した解析

(ii) ガラス固化体が突起物等のある床に衝突する場合、床の形状を考慮した解析

(iii) 衝突時の摩擦力を考慮した解析

有限変形解析では接点座標を解析の進行と共に修正し、時間 $(t + \Delta t)$ での応力歪み等は時間 t の座標値に基づいて計算する。扱う応力はいわゆる 2nd - Piora Kirchhof の応力歪み、Green の歪みである。破壊の判定や降伏応力の計算にはこれらの応力歪みを用いる。

有限変形解析機能で可能となる具体的例題として次のようなものが考えられる。

a) キャニスタの変形解析

キャニスタは9m落下などで局所的に大きく変形すると思われるが、この変形形状を解析することが可能となる。図 2.2 はキャニスタ底部の落下後のいわゆるはみだしを示したものである。

b) ガラス固化体の傾斜落下解析

傾斜落下では固化体底部が床に衝突した後リバウンドする。このため図 2.3 破線に示したように固化体全体が回転し分割された要素の変位と回転はもはや単なる微小変形の範囲で処理できない。

本解析コードはデカルト座標表示あるいは円筒座標表示された3次元の解析モデルを扱っており、解析できる問題は次の6種類である。

(i) 静的熱弾性解析

(ii) 静的熱弾塑性解析

(iii) 静的弾塑性破壊解析

(iv) 静的弾性解析

(v) 動的弾塑性解析

(vi) 動的弾塑性塑性破壊解析

非線形解析では不釣合力解消のための反復計算法として Newton - Raphson 法, BFGS (Broyden - Fletcher - Goldfarb - Shanno) が利用できる⁸⁾。また、時間積分法には中央差分法 Newmark - β 法を使用できる⁸⁾。

剛体要素としては形状関数がデカルト座標表示あるいは円筒座標表示された五面体要素及び六面体要素、拘束条件や荷重条件を与えるための境界要素、解析の対称性を指定して要素数を減少させるのに用いる対称要素、接触応力を評価するための接触要素及び剛体壁要素があり、3次元構造物を解析するのに使用性の高い充分な要素を用意している。

材料モデルではガラス固化体が熱応力解析などを考慮するとかなり高い温度になると考えられるため、熱に依存する物性値が扱えるよう配慮している。用意している材料モデルは

(i) 弾性材料

(ii) 熱弾性材料

(iii) 破壊を伴う弾塑性等方硬化材料 (応力-歪み曲線は多直線近似する)

(iv) 破壊を伴う熱弾塑性等方硬化材料 (応力-歪み曲線は2直線近似する)

である。

材料の構成方程式、降伏条件、破壊条件として一般によく使用されているミーゼス、トレスカ等の条件や引張破壊応力値等による破壊の条件はプログラム内にライブラリーとして内蔵してい

る。ユーザーがこれらの新しい条件をプログラムに導入する場合を考慮してユーザーがプログラムを作成できるようにユーザーサブルーチンを用意している。ADEKAT-G コードでは解析モデルに対する入力データをチェックするため及び動的解析結果の出力処理と整理を容易にするため、図化処理コード ADEKAT-G/PLOTTER コード (ポストプロセッサ) を利用することができる。この ADEKAT-G/PLOTTER コードは ADEKAT-G 本体の計算結果であるポストファイルからユーザーの要望に応じて時刻歴図, 分布図, ベクトル図及び破壊進展図を選択的に図化出力する機能を有している。

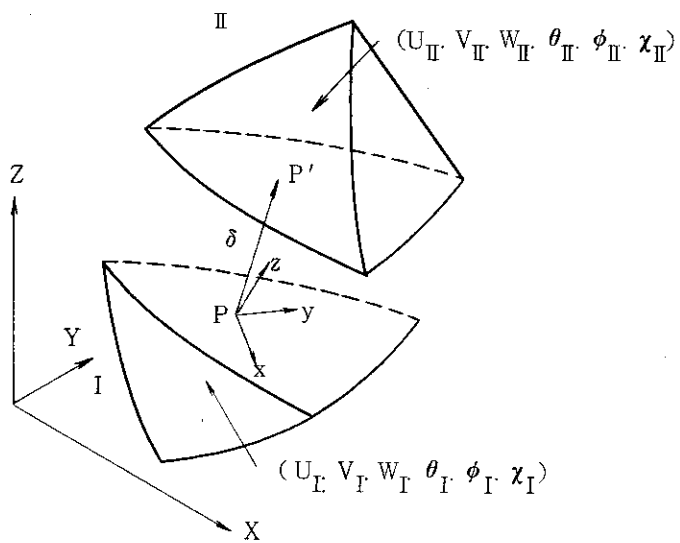


図 2.1 要素重心変位と相対変位

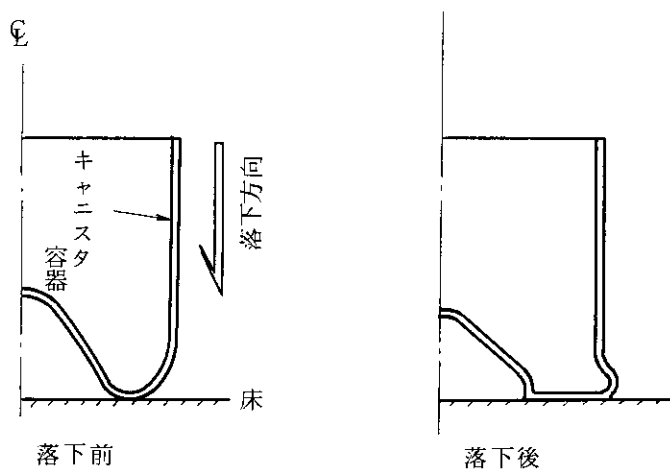


図 2.2 キャニスタ底部の変形予想図

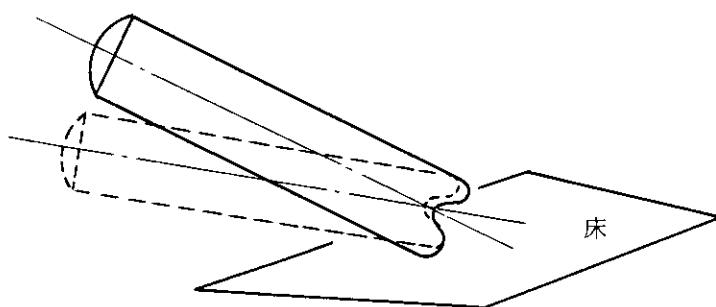


図 2.3 落下後の転倒予想図

3. 高レベル廃棄物ガラス固化体の形状と物性

高レベル廃棄物ガラス固化体の形状及び物性については未だに確定しない部分もある。しかし、ガラス固化体の破壊挙動解析を行うためには何等かの具体的な数値が必要となってくる。そこで、ここでは計算用として以下のとおり設定することにした。

キャニスタ形状及び寸法については図 3.1 と仮定しキャニスタ材は SUS 309 S 相当と仮定した。固化体を貯蔵するピットは図 3.2 に示す 4 段積みと仮定した。また、破壊解析に必要なキャニスタ材及びガラス固化体の物性は表 3.1 に示す通りである。

これらはいくまでも計算用に設定したものであって公表された値ではないため別途吟味すべきであるが、将来の固化体と大差ないものと考えられる。これらの値を以降の解析に共通して用いた。

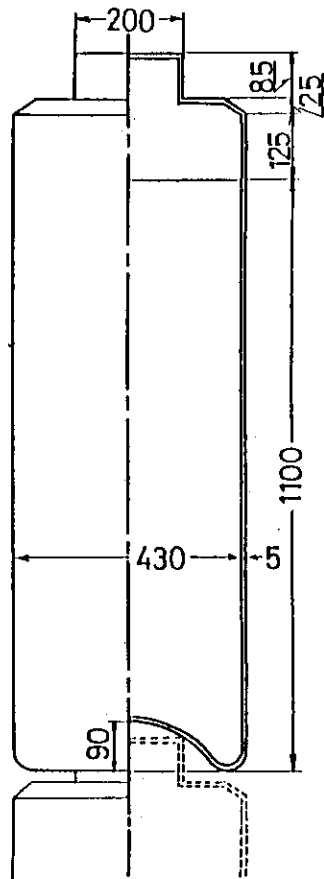


図 3.1 キャニスタの形状

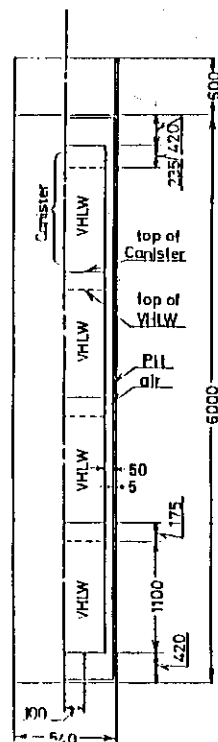


図 3.2 Tarapul 型ピット

表 3.1 入力用物性値

(1) キャニスタ材 (ステンレス鋼)

E (ヤング率) ($\times 10^9$ kg/m ²)	ν (ポアソン比) (/)	σ_y (0.2%耐力) ($\times 10^6$ kg/m ²)	E_T (接線係数)	α (熱膨張率) ($\times 10^8$ /°C)
19.7 (15 °C)				
19.6 (24 °C)	0.30 (24 °C)	21.0 (40 °C)		16.00 (68 °C)
18.8 (149 °C)	0.31 (149 °C)	18.8 (100 °C)		16.31 (168 °C)
18.1 (260 °C)	0.35 (260 °C)	16.8 (200 °C)	*	16.69 (368 °C)
17.2 (371 °C)	0.35 (371 °C)	15.2 (300 °C)	ひずみ硬化	16.87 (518 °C)
16.1 (482 °C)	0.30 (482 °C)	14.0 (400 °C)	なしとする。	17.14 (618 °C)
15.1 (593 °C)	0.29 (593 °C)	12.9 (500 °C)		
14.1 (704 °C)	0.29 (704 °C)			
11.2 (816 °C)	0.21 (816 °C)			

ρ (密度) (kg/m ³)	C_p (比熱) (kcal/kg·°C)	K (熱伝導率) (kcal/m·h·°C)
8.03×10^3	0.12 (0 ~ 100 °C)	10.56 (168 °C)
		12.20 (368 °C)
		13.54 (518 °C)
		15.02 (718 °C)
		16.67 (918 °C)

組 成

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
%	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	13.5	23.0

* SUS 304 では E_T は E の 2%程度であるので、数値計算上ひずみ硬化なしとした。

(2) ガラス固化体

E (ヤング率) ($\times 10^9 \text{ kg/m}^2$)	ν (ポアソン比) (/)	σ_y (0.2%耐力)	E_T (接線係数)	α (熱膨張率) ($1/^\circ\text{C}$)
8.61 (100 °C)	0.25 (100 °C)	∞ (弾性として扱う)	なし	84.6×10^{-7} (室温 ~ 300 °C) 96.5×10^{-7} (300 ~ 400 °C)
8.57 (200 °C)	0.25 (200 °C)			
8.51 (300 °C)	0.253 (300 °C)			
8.41 (400 °C)	0.243 (400 °C)			
7.70 (500 °C)	0.250 (500 °C)			
7.34 (520 °C)	0.250 (550 °C)			

ρ (密度) ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	C_p (比熱) ($\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	K (熱伝導率) ($\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)	引張り圧縮強度 (kg/mm^2)
*2.7 (20 °C)	0.23 (100 °C)	0.96 (100 °C)	引張り : 3.92 圧縮 : 133.0
	0.25 (200 °C)	1.04 (200 °C)	
	0.28 (300 °C)	1.14 (300 °C)	
	0.30 (400 °C)	1.24 (400 °C)	
	0.32 (500 °C)	1.35 (500 °C)	
	0.318 (600 °C)	1.47 (600 °C)	

組成

元素	%
SiO ₂	45.2
B ₂ O ₃	13.9
Al ₂ O ₃	4.9
Na ₂ O	9.8
CaO	4.0
Fe ₂ O ₃	2.9
NiO	0.4
Cr ₂ O ₃	0.5
P ₂ O ₅	0.3
ZrO ₂	1.0
Li ₂ O	2.0
ZnO	2.5
FP 酸化物	11.1
Ac 酸化物	0.9
不溶解金属粒子	0.7

* 2.7 (20 °C), 2.68 (300 °C), 2.67 (400 °C) であるが有効ケタは2ケタであるので温度依存なしとする。

4. 高レベル廃棄物ガラス固化体の熱応力破壊解析

4.1 概要

高レベル廃棄物はガラス化しキャニスタの中に熔融状態で流し込み徐冷後溶接封入する。この時ガラス固化体内には徐々に熱応力が蓄積するが、徐冷環境によってはクラックの発生を伴い機械的強度の劣化を招く場合もある。本章では3次元剛体-バネモデルによる破壊解析コード ADEKAT-G を用いて徐冷時の固化体応力とクラックの発生について解析を試みた。なお、解析条件としての試料の形状は WASTE F におけるコールド実験で試作した 5 ℓ のガラス固化体の形状に合わせ、徐冷条件が適切でないことにより破壊したケースの破壊モードと比較した。

4.2 解析条件

(1) 形状

直径約 12.5 cm、高さ約 44 cm の円柱形で、図 4.1 に示すように上端部に深さ約 10 cm の凹みを有している。

(2) 模擬ガラス固化体の物性値

解析に使用した熱的物性値を表 3.1 に示す。破壊応力以外の物性値はいずれも温度依存性を持つものとして扱う。

熱伝導率については約 48 時間で固化体中心部が初期温度 500 °C から 20 °C (+ 10 °C) 程度になるように決めた。これには「伝熱工学資料」(日本機械学会編)に示されているハスラ-線図を用い、伝導度を 2.12 W/m² °C とした。

(3) 熱解析の解析条件

① 要素分割

先行する熱解析と破壊解析で要素分割のパターンを同一にした。これは熱解析の結果を破壊解析で直接利用できるようにするためである。ただし、ADINA による熱解析では使用要素として軸対称平面要素を用いた。図 4.1 に要素分割図を示す。要素数、接点数、自由度は以下のとおりである。

要素数	209
接点数	133
総自由度数	133

② 初期条件

固化体部及び表面とも一様に 500 °C とした。

③ 境界条件

固化体表面は総て熱伝導度 2.12 W/m² °C を持つ伝達境界として扱う。即ち、固化体の周囲環境の変化を考慮せず、雰囲気温度も 20 °C の一定値に保たれていると仮定する。図 4.1

に境界条件を示す。

④ 時間ステップの幅

熱解析の精度と数値的安定性を考慮し、解析ステップと時間ステップの関係を次のように設定した。

解析ステップ	時間ステップ (sec)
0 ~ 2回	500
3 ~ 7回	1000
8 ~ 12回	2500
13 ~ 22回	5000
23 ~ 42回	10000

(4) 破壊解析の解析条件

① 要素分割

ADEKAT-G コードは 3次元破壊解析コードであるため、要素分割は図 4.1 に示すように円周方向に角度 1° の開きを持つ三角柱要素を用い、3次元要素を使用した軸対称解析とする。X-Z 面の要素分割のパターンは熱解析の場合と同一とした。要素数、接点数、総自由度、応力を評価するスプリング数はそれぞれ以下のものである。

要素数	440
接点数	266
総自由度数	1386
スプリング数	517

ただし、要素数が熱解析の場合より多いのは、剛体-バネモデルで特有な要素、即ち軸対称条件を考慮するための対称要素と境界条件を設定するための境界要素が含まれるためである。

② 初期条件

初期温度 500°C のとき固化体内の残留応力歪みはないと仮定した。

③ 境界条件

固化体の中心軸上で対称性を考慮するため、半径方向変位を固定し、下端で軸方向変位を拘束した。図 4.1 に境界条件を示す。

④ 時間ステップ幅

熱解析の時間ステップ幅と一致させた。

4.3 解析結果と考察

(1) 熱解析結果



図 4.2 は固化体内温度分布を解析時刻の初期において ($t = 11000 \text{ sec}$ まで) 等高線で示したものである。固化体の上部凸部で温度勾配が大きく中間部では中心温度と表面温度の差はむしろ小さい。中間部における半径方向の温度分布を解析時刻をパラメータにして示したものが図 4.3 である。時刻が進むにつれて、半径方向の温度もほぼ一様に低下しており、中心部と表面の温度差は $t = 5000 \text{ sec}$ 前後で最大となるがその値は約 20°C と小さい。

(2) 熱応力破壊解析結果

図 4.3 はそれぞれ固化体中間部の半径方向、円周方向、軸方向の応力分布及び温度分布を示している。半径方向応力は時間と共に中心部は引張側に移っているが、外側では応力自身も小さくあまり変化しない。円周方向応力は中心部応力が時間とともに圧縮側から引張側に移っており破壊応力寸前まできている。しかし、 $r = 3.0$ cm 付近では応力は小さく時間による変化もそれほど見られない。表面付近では応力は引張側から圧縮側へ移っている。軸方向応力の分布は中心部から表面までの変化が時間がたつにつれて大きくなっている。しかし、引張側の応力値はそれほど高くない。

図 4.4 は固化体中間部の中心部及び表面側の円周方向応力の時効歴を示している。 $t = 32500$ sec (約9時間) で破壊応力に達したことを示している。図中 * 印で示した区間はこの時刻における反復計算の中での応力変化の内訳を表している。

同図で示した中心側の円周方向応力は 6 回目の反復計算の時に引張で破壊し、その直後大きな圧縮応力を受けるが、それ以後は応力ゼロとなっている。また、外側の円周方向応力は、反復計算の初期では比較的高い圧縮応力を受けているが、中心側の円周方向応力が破壊応力に達したところから急激に引張側に変化し、ついに破壊応力にまで達する。

図 4.5 は固化体内部の破壊の進展の様子を示している。図中の記号  及び  は縦断面内に生じた破壊面を示しており、前者はそのステップで新しく生じた破壊面を、後者は既にできていた破壊面を表している。また、太点線及び太実線は円周方向にそってできた破壊面で、前者が新規のもの、後者が既存のものを示す。図中 No. 1 は最初の破壊 ($t = 23500$ sec), No. 2 ~ 5 は $t = 32500$ sec 後、それぞれ反復回数 5, 10, 13, 15 の破壊の様子を示す。破壊の大部分は円周方向応力に起因するものであり、中心部から表面に向かって破壊が進行している。この破壊は円柱上端部を除くほぼ全域に広がっており、これを横断面で見ると固化体中心から無数の放射状のクラックが外周に向かって走ることになる。この結果は図 4.6 に示す模擬ガラス固化体のコールド試験で経験した、徐冷中に経験した割れの状況と類似している。即ち、中央の小さい円盤状の割れを中心に放射状に割れが広がっている。

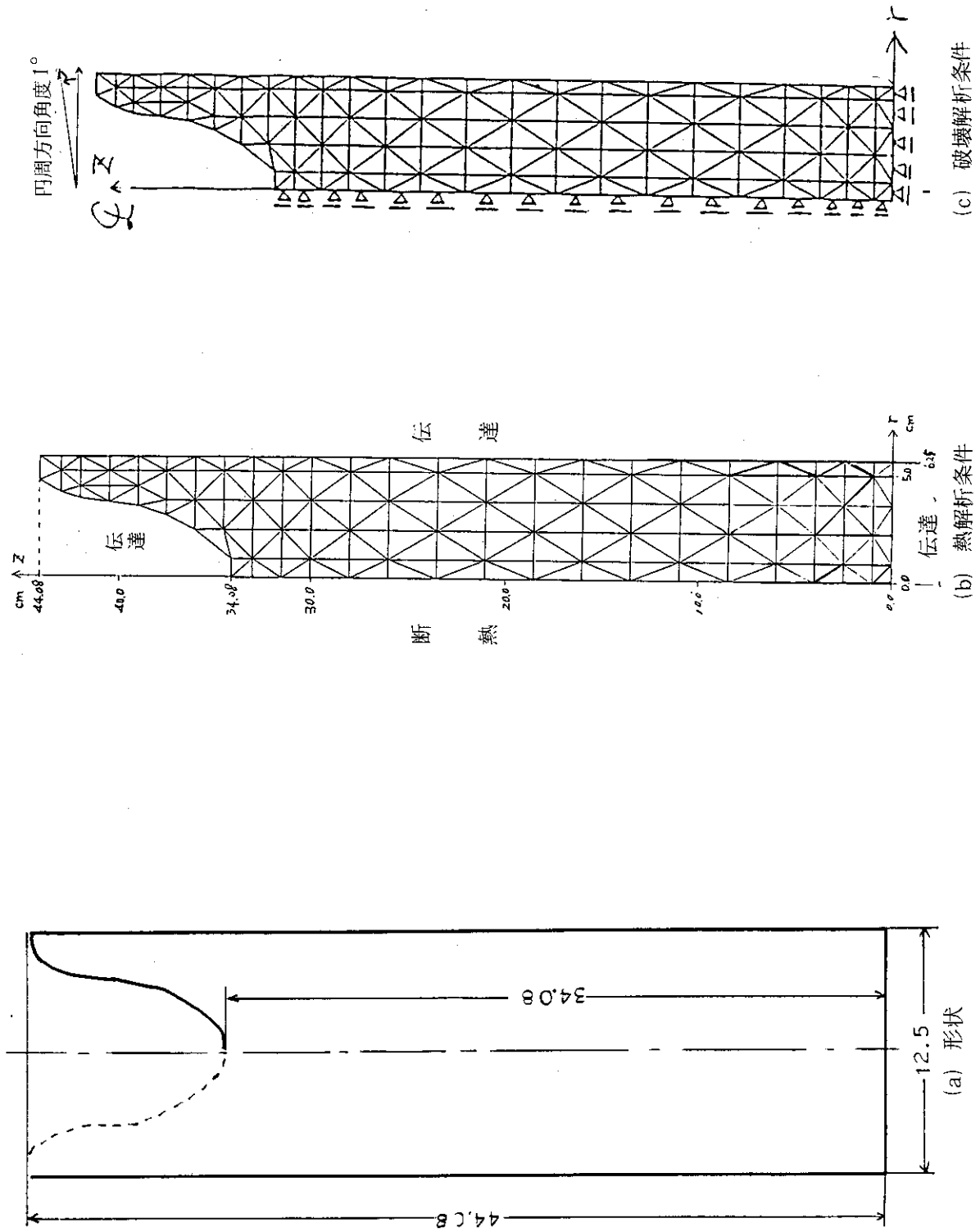


図 4.1 要素分割及び境界条件

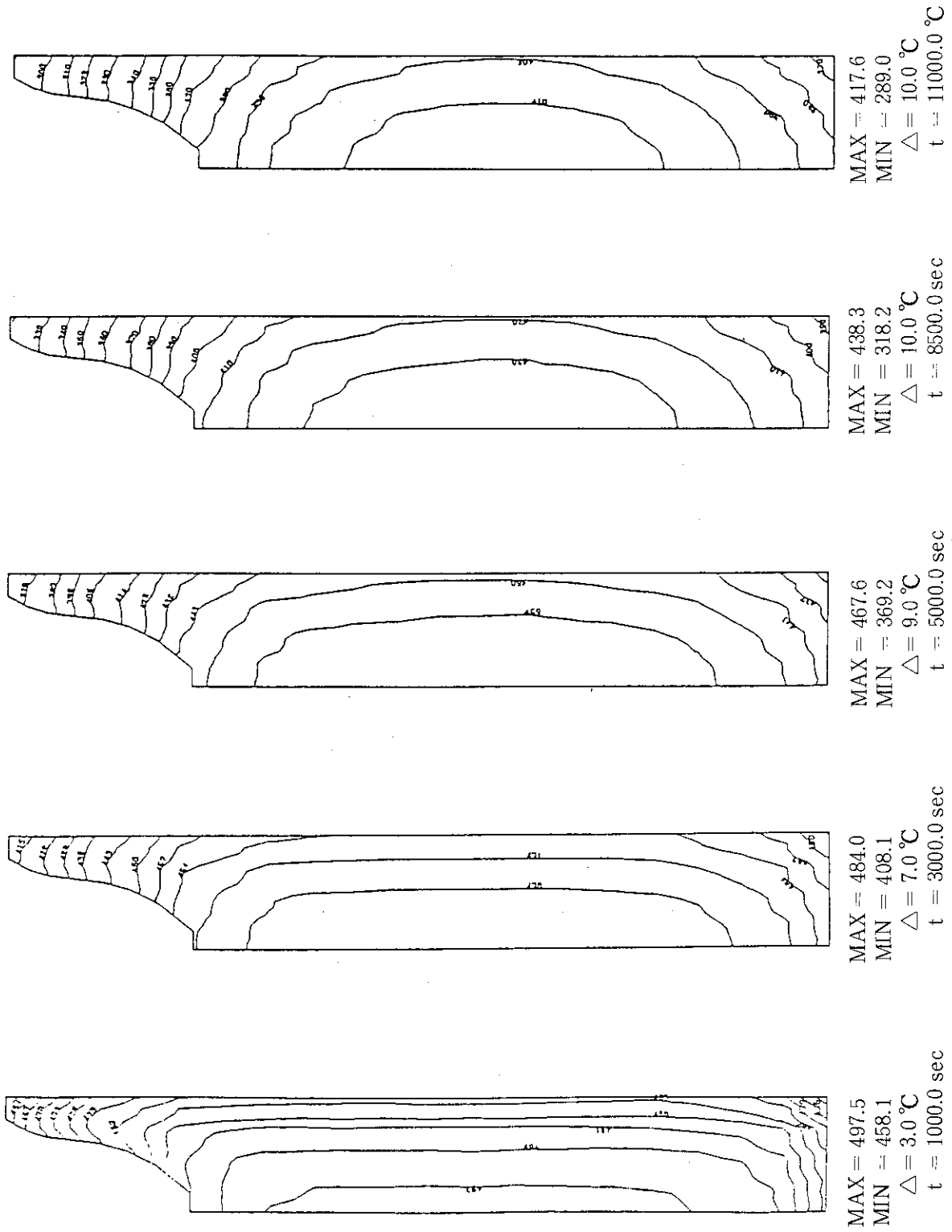
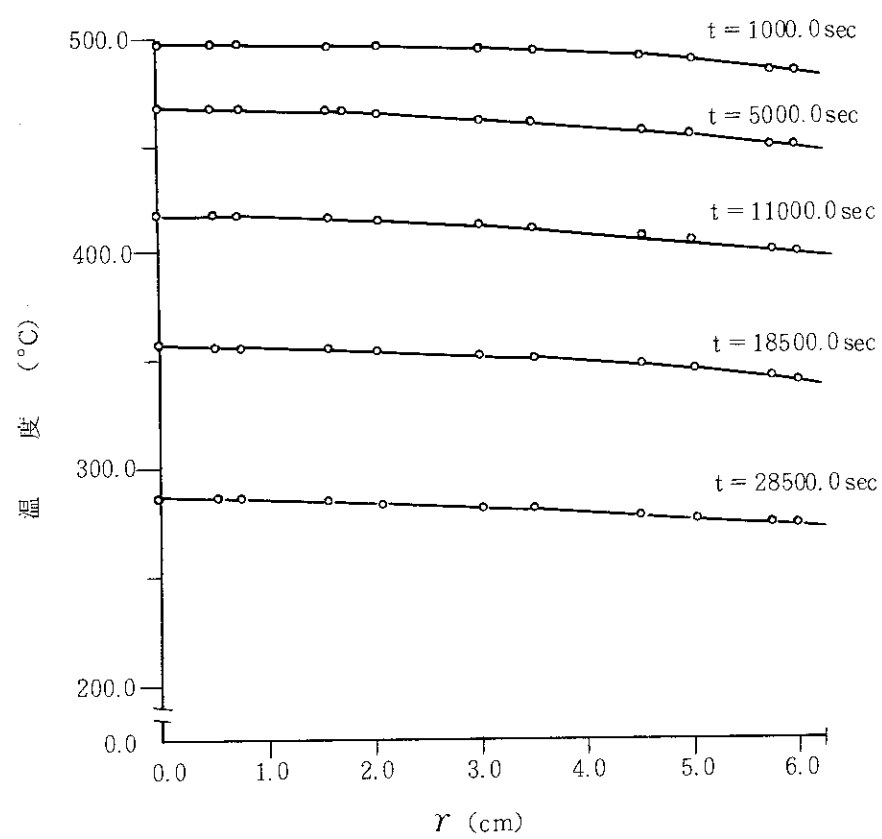
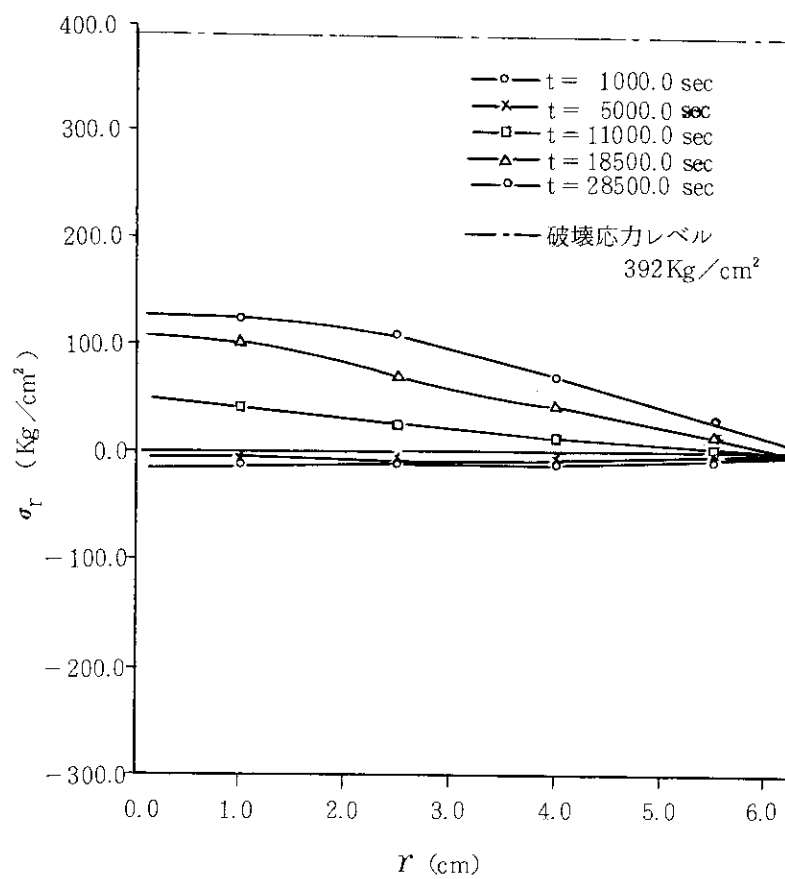


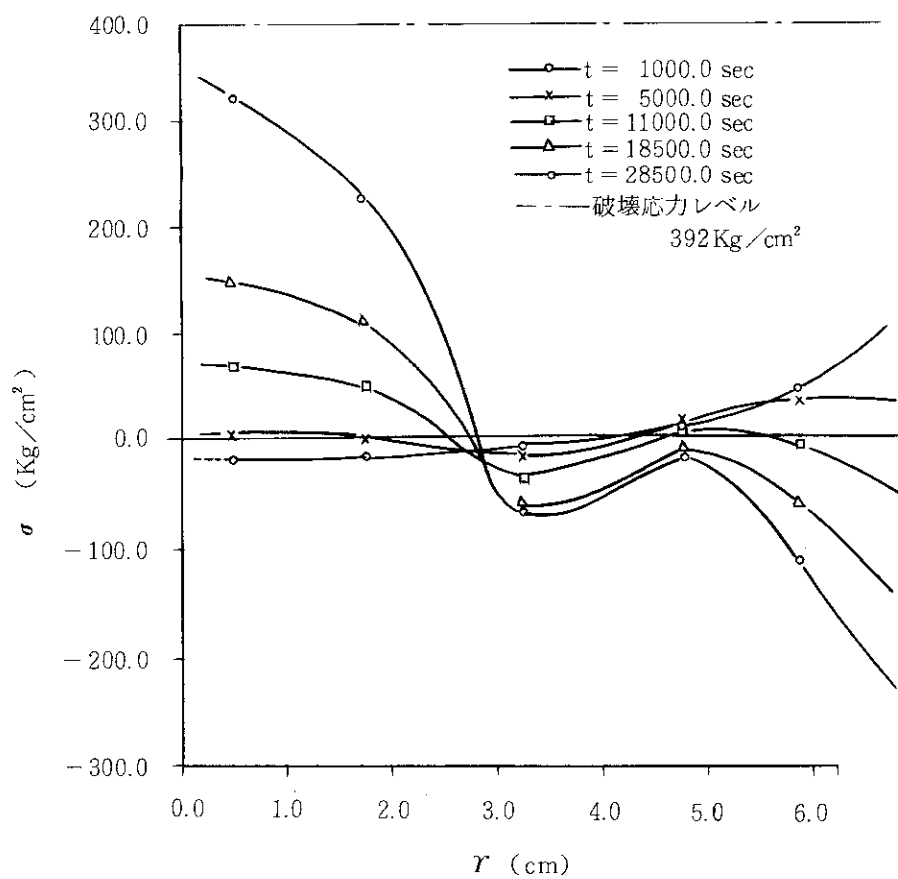
図 4.2 固体体内温度分布



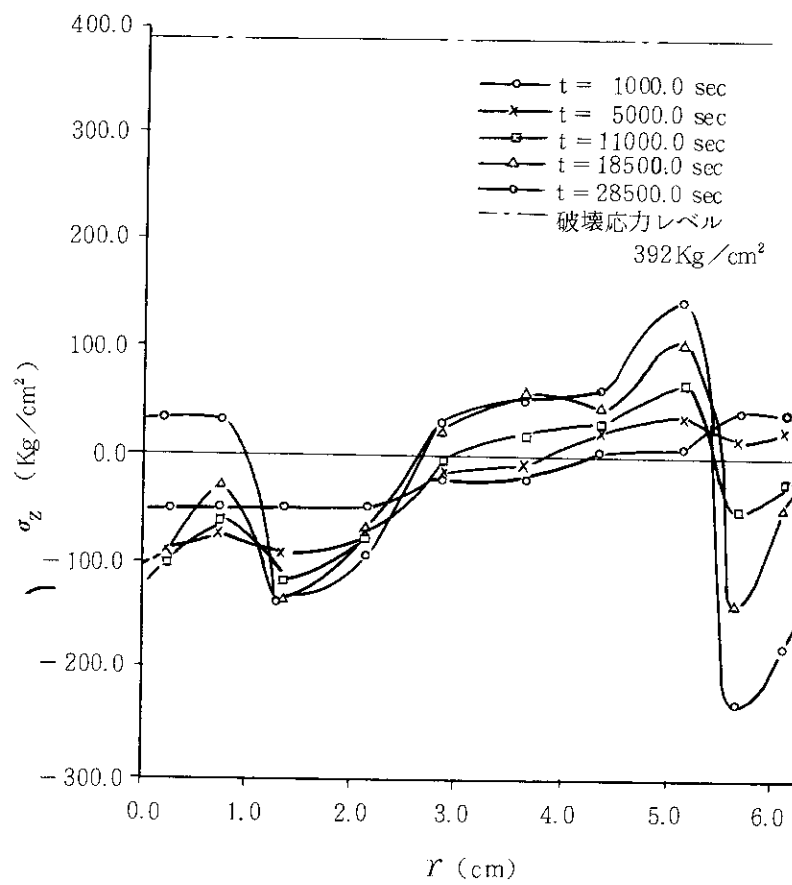
(a) 温度分布



(b) 半径方向応力分布 (Z = 18.9 cm)



(c) 円周方向応力分布 (Z = 18.5 cm)



(d) 軸方向応力分布 (Z = 18.5 cm)

図4.3 温度分布及び中間部の応力分布

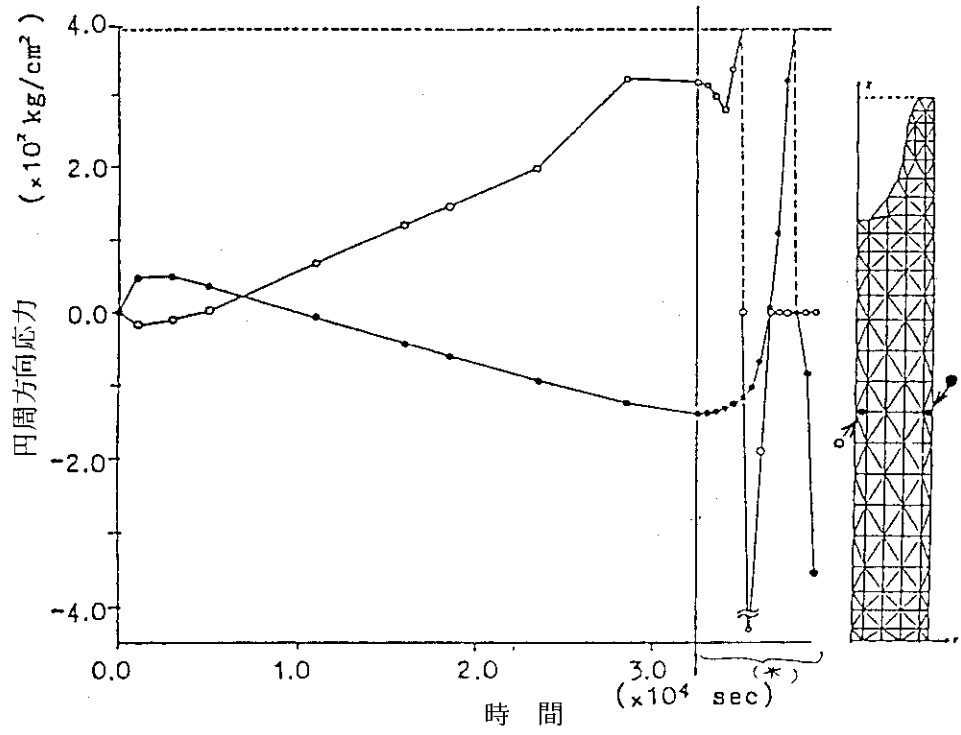


図 4.4 円周方向応力の時刻歴

(*) この区間の応力変動は $t = 3.25 \times 10^4 \text{ sec}$ のステップにおけるくり返し計算の内訳を示している。

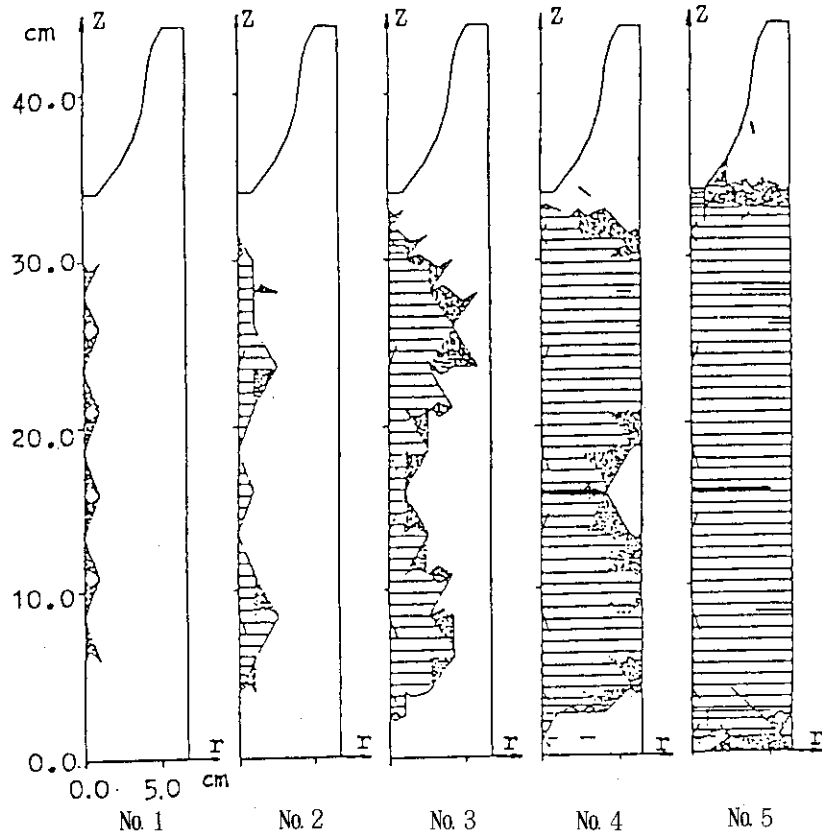


図 4.5 破壊の進展状況の解析結果

- 新しい破壊領域
- 前ステップでの破壊領域

5. 高レベル廃棄物ガラス固化体の垂直落下破壊解析

5.1 概要

本章ではキャニスタに封入されたガラス固化体について下記の垂直落下解析を行った。

3次元剛体-バネモデルによる破壊解析コードADEKAT-Gと差分法による非線形衝突解析コードSTEALTHを用いて固化体の破壊挙動の評価を試みた。取扱った問題は次のようである。

- i) 高さ9mの位置からの固化体の垂直落下によって生ずる固化体下部の破壊挙動
- ii) 垂直落下破壊損傷の落下高さによる比較
- iii) 固化体貯蔵ピットに既に収納されているガラス固化体に、収納途中にあるもう一つのガラス固化体が落下衝突する場合の破壊挙動

5.2 垂直落下解析 I (9m落下解析)

(1) 解析概要

円柱状のガラス固化体（ガラス材とその底部及び側面を覆うキャニスタ材より構成されている）について、高さ9mの位置から落下させた場合の衝撃解析を行った。落下衝突の際ガラス固化体は中心軸は床面に対し垂直である（以下このような落下を垂直落下と呼ぶ）と仮定する。落下衝突時にガラス固化体を受ける衝撃力は、衝突前に固化体が持っている運動量の変化として与えられる。この運動量は衝突前の固化体落下速度 $2gh$ (g : 重力加速度, h : 落下高さ) と質量から決まる。また、床面は滑らかな剛体床とし、衝突前後でエネルギーの損失はないものと仮定した。一方、固化体の変形は中心軸に対称であるとし、ガラス材とキャニスタ材の接触部は無限大の摩擦係数を持ち、一体となって変形すると仮定した。

解析では、ADEKAT-Gコードを用いて次の問題を取扱う。また、比較検討のためSTEALTHコードでも同様の計算を行った。具体的には底部中心に凹部のある円柱形ガラス固化体を9m垂直落下させガラス材の破損とキャニスタ材の塑性に着目した解析を行った。

STEALTHコードを用いた解析では、固化体が床からリバウンドするまで追跡することとした。

一方、ADEKAT-Gコードによる解析では固化体下部の破損の進展に着目して解析を進めた。

(2) 解析条件

① 固化体形状

図5.1(a)に示すように、長さ110cm、直径43cmの底部に凹部を有する円柱形ガラス固化体とした。キャニスタ材は厚さ0.5cmで固化体の底部及び側面を覆っている。

② 要素分割

STEALTHコードでは2次元メッシュであり、メッシュ形状は矩形である。また、その

大きさは、底部の床接触部付近は細かく上部中心に向かって漸次粗くした。(図 5.1 (b))
この場合

ゾーン数	528
グリッドポイント数	578
総自由度数	1156

である。

一方、ADEAT-G では図 5.1 (c) に示すように開度 1 度のくさび形メッシュとなっている。全体に底部は細かく上部へ向かって粗い分割とした。解析によって得られる破壊のパターンはメッシュ分割の方法に依存する部分があるが、ここではこの依存性をできるだけ少なくするような分割を試みた。即ち、破壊がどの方向にも進展していける可能性を持たせた分割とした。使用した要素は五面体及び六面体の立体要素、境界要素及び軸対称性を指定する対称要素である。

要素数	268
(このうち境界要素は	18)
要素境界のバネ数	631
総自由度数	1608

③ 材料定数

STEALTH コードは温度に依存した材料定数を用いる。固化体貯蔵後 1000 時間経過した時間の温度分布に従って A~G の領域に分け、各領域内部では領域内の平均的温度をとってその領域の温度とした。この温度に対する材料定数を表 3.1 を使って表 5.1 のように決めた。

一方、ADEKAT-G では材料の温度依存性は考慮せず、固化体温度を 200 °C として材料定数を決めた。これを表 5.2 に示す。また、ガラス材とキャニスタの境界の材料としてはガラス材の値を用いた。

④ 初期条件

STEALTH コードではガラス固化体の貯蔵時間 1000 時間までに蓄積する応力を考慮に入れた。この応力値にはキャニスタ部の円周方向応力は降伏応力レベルを越えた部分があり、ガラス部外周の円周方向応力についても、ガラスの引張破壊応力寸前の値を示している部分がある。

そこで、計算に使用する初期応力として表 5.1 に示す数値を使った。

ADEKAT-G コードでは初期応力を直接入力する機能がないので初期応力値はひとまず考慮しないこととした。

一方、初期速度は両コードとも $v = 2gh = 1.329 \times 10^{-3} \text{ cm} / \mu\text{sec}$ をガラス固化体に与えることにした。

⑤ 境界条件

対称軸上 ($x = 0$) で半径方向変位、速度、加速度をゼロとし、床面上 ($y = 0$) で軸方向変位、速度、加速度をゼロとする。STEALTH コードではリバウンドも考慮する。

⑥ 自由度数

STEALTH コードでは総自由度数は 1156 であるが、鉛直軸上の拘束自由度を除くと 1122

となる。ADEKAT-Gでは総自由度数 3786 であるが、各要素の軸対称変形のみが許容されること、また、境界での拘束条件を考慮すると 767 となる。

⑦ 時間ステップ幅及び解析時間

固化体内を伝わる衝撃波速度 C_v は

$$C_v = (K + 4G/3) / \rho$$

で与えられる。ここに、 K は体積弾性率、 G はせん断弾性率である。 C_v を表 5.1 のデータからガラス材及びキャニスタ材について計算すると

$$\text{ガラス材} \quad : C_v = 0.611 \text{ cm} / \mu\text{sec}$$

$$\text{キャニスタ材} \quad : C_v = 0.579 \text{ cm} / \mu\text{sec}$$

となる。これを用いて解析解が安定となる条件（クーランの安定条件）から時間ステップ幅を求める。即ち、

$$(\text{時間ステップ幅}) = [(\text{最小メッシュ幅}) / (\text{衝撃波速度})] \times (\text{余裕率})$$

図 5.1 に示した要素分割ではどちらのコードに対しても最小メッシュ幅は 0.5 cm であり、余裕率を 0.667 とすると上式より時間ステップ幅 $\Delta t = 0.576 \mu\text{sec}$ となる。STEALTH コードでは上式を考慮して各ステップの Δt をプログラム内部で自動的に設定している。一方、ADEKAT-G コードでは Δt は解析を通して一定という制約がある。そこで Δt を 0.025, 0.1, 0.5 μsec とした。

一方、解析時間は衝突によって最初に生じた圧縮応力波が固化体の上端部で反射し、再び底部に到達するまでの時間を目安とした。この時間は、おおむね棒の縦振動一次固有周期 $4l\rho/E = 724.1 \mu\text{sec}$ の 1/2 の値 362.1 μsec 程度かそれより少し長いと考えられる。

以上のべた解析モデルを STEALTH コードと ADEKAT-G コードについて比較すると表 5.3 のようになる。

(3) STEALTH コードによる結果と考察

① 頭部変位、速度、加速度の時刻歴

図 5.2 (a) は頭部変位の時刻歴である。変位は約 400 μsec で最大となり、約 0.36 cm 沈下する。これ以後は応力波の影響により漸次変位量は減少している。図 5.2 (b) は軸方向速度の時刻歴であるが、落下衝撃による応力波が約 200 μsec から頭部に到達していることがわかる。また、400 μsec 以後は上向き速度となり沈下量の減少に寄与していることがわかる。図 5.2 (c) は軸方向加速度の履歴図である。約 100 μsec までの加速度振幅は、それ以後のものよりおおきくなっている。これは、一つの初期応力による不釣合が生じたためであると考えられる。

② 軸方向応力の時刻歴

図 5.3 は床接地部のキャニスタとガラス材の軸方向応力の履歴図である。300 μsec ~ 400 μsec で最大圧応力となっており、この時刻は頭部沈下量が最大になる時刻より僅かに早い。また、400 μsec 以後は振動周波数も減少し徐々に応力が緩和されている。キャニスタとガラスで応力値に大きな違いはない。しかし、キャニスタについては、降伏応力 ($1.65 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$) をはるかに越える値になっている。ガラス材については圧縮強度 $1.33 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ に至っていない。図 5.3 (b) は底部中心のガラス材の軸方向応力履歴である。約

130 μsec までは強い引張力のピークが見られ、引張破壊応力 $3.92 \times 10^2 \text{ kg/cm}$ を上まわっている。しかし、その後は圧縮力が支配的である。図 5.3 (c) は固化体中間部 (高さ約 55 cm の位置) でガラス材の軸方向応力履歴である。衝突による応力波が 80 ~ 90 μsec で到達していることを示しており、それまではほぼ初期応力値を保っている。その後圧縮応力となり反射波が返ってくるにつれて引張側に移っている。ガラス材は、650 μsec 以降で引張破壊応力を越えている。

③ 底部キャニスタの応力分布

底部キャニスタ半径方向、円周方向及び軸方向の各応力分布は床から直接に衝撃を受ける位置 (A 点) の応力は 600 μsec まではどの方向の応力についてもいつも最大の圧縮応力となっており、その値は 300 ~ 400 μsec で最大値となっている。図 5.4 (a) に 300 μsec の応力分布を示す。A 点から離れると急激に応力が緩和されており、ほぼ降伏応力レベルの間に収まっている。

④ 中心軸上の応力分布

中心軸上下部 (高さ約 23 cm まで) の半径方向応力及び円周方向応力は単に強い引張力を示しておりそのピーク値はガラスの引張破壊応力を越えている。一方、軸方向応力は 500 μsec までは、全体に圧縮力が支配的であるが、600 μsec 以後は反射応力波の影響により引張側に移り、引張破壊応力をはるかに越える応力値となっている。図 5.4 (B) に 600 μsec の中心軸上の応力分布を示す。

⑤ 床接地点上の応力分布

図 5.1 (c) に床接地点上の応力分布を示す。床との接地点ではどの方向の応力成分についても終始非常に強い圧縮力となっている。この点以外の場所での軸方向力は 600 μsec まで圧縮力が支配的でそれ以後は引張力に変わっている。また、半径方向応力、円周方向応力は下部 (高さ約 18 cm まで) で破壊応力を越える引張力がいつも現れている。

⑥ 変形図

図 5.5 固化体下部 (高さ約 30 cm まで) の変形形状を時刻と共に示したものである。大きな変形は床との接地点部キャニスタに見られ、ガラス材について顕著な変形は見られない。キャニスタの床接地点の変形は応力値の変化を考え合わせると 400 μsec 前後が最大であり、それ以後見られる変形は約 400 μsec までに生じた塑性変形によるものと考えられる。図では明確に現れないが、500 μsec から 600 μsec の間でリバウンドが生じている。

⑦ 初期応力、重力加速度及びリバウンドを考慮しない場合の効果

図 5.6 (a) は初期応力の他に重力加速度も考慮した場合、(b) はリバウンドを考慮しない場合、それぞれ床接地点での軸方向応力の時刻歴を示している。強い衝撃力を受ける場合にその応力値は初期応力にそれほど影響されないが、リバウンドが生じる場合 500 μsec 以後で (a) と顕著な違いが見られる。

(4) ADEKAT - G コードによる結果と考察

① 代表点における z 方向の変位、速度、加速度の時刻歴

図 5.7 (A) は衝突点 (キャニスタ材) における変位、速度、加速度の z 方向の時刻歴である。加速度のピークは約 3 μsec で約 $6.2 \times 10^{-4} \text{ cm}/\mu\text{sec}^2$ である。これ以後は約 2.0

$\times 10^{-4} \text{ cm} / \mu\text{sec}^2$ の振幅で振動している。速度の時刻歴は最初は初速であり、約 $3 \mu\text{sec}$ でゼロである。これ以後は約 $\pm 2.5 \times 10^{-4} \text{ cm} / \mu\text{sec}$ の振幅で振動している。変位はピークが約 $3 \mu\text{sec}$ で -0.002 cm である。図 5.7 (B) は衝突点から約 11 cm 上方の点で z 方向の変位、速度、加速度の時刻歴である。この図より約 $16 \mu\text{sec}$ でこの点に応力波が伝わるのがわかる。この値は次元波動伝播より得られる理論値 (約 $18 \mu\text{sec}$) よりやや小さい。この差には数値解析により誤差を含んでいると思われるが、その値は小さく解析結果に与える影響は少ないと思われる。また、同じ点の変位の時刻歴は加速度の変化が微小なため直線的に変化する。

② 軸方向応力時刻歴

図 5.8 は軸方向の応力時刻歴である。(C) は接触点における接触応力の時刻歴である。この図より最初高い接触応力 $4.1 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ が発生しているが、時間の経過とともに応力値が小さくなっていることが分かる。(b) は衝突点直上のガラスとガラスの間のバネの時刻歴である。この図より圧縮が支配的であるが、圧縮破壊に至ることはない。また、理論値 2.15 kg/cm^2 とオーダーが一致する。図 5.8 の (d) ~ (i) は衝突点から離れている場所の時刻歴であり、衝突点から離れるに従って応力波が伝わる時刻が遅くなるのがわかる。

③ ガラスの破壊とキャニスタの変形

各要素の切断面の生成状況の解析結果を図 5.9 (a), (b), (c) に示す。下部の凸起部はどの面も切断し、離散するのに対し上部では一部の面のみが切断し、割れが生ずるが離散には至らないことがわかる。また、図 5.9 下部にキャニスタの変形の解析結果を示す。予想通り外側にはみ出すことがわかる。

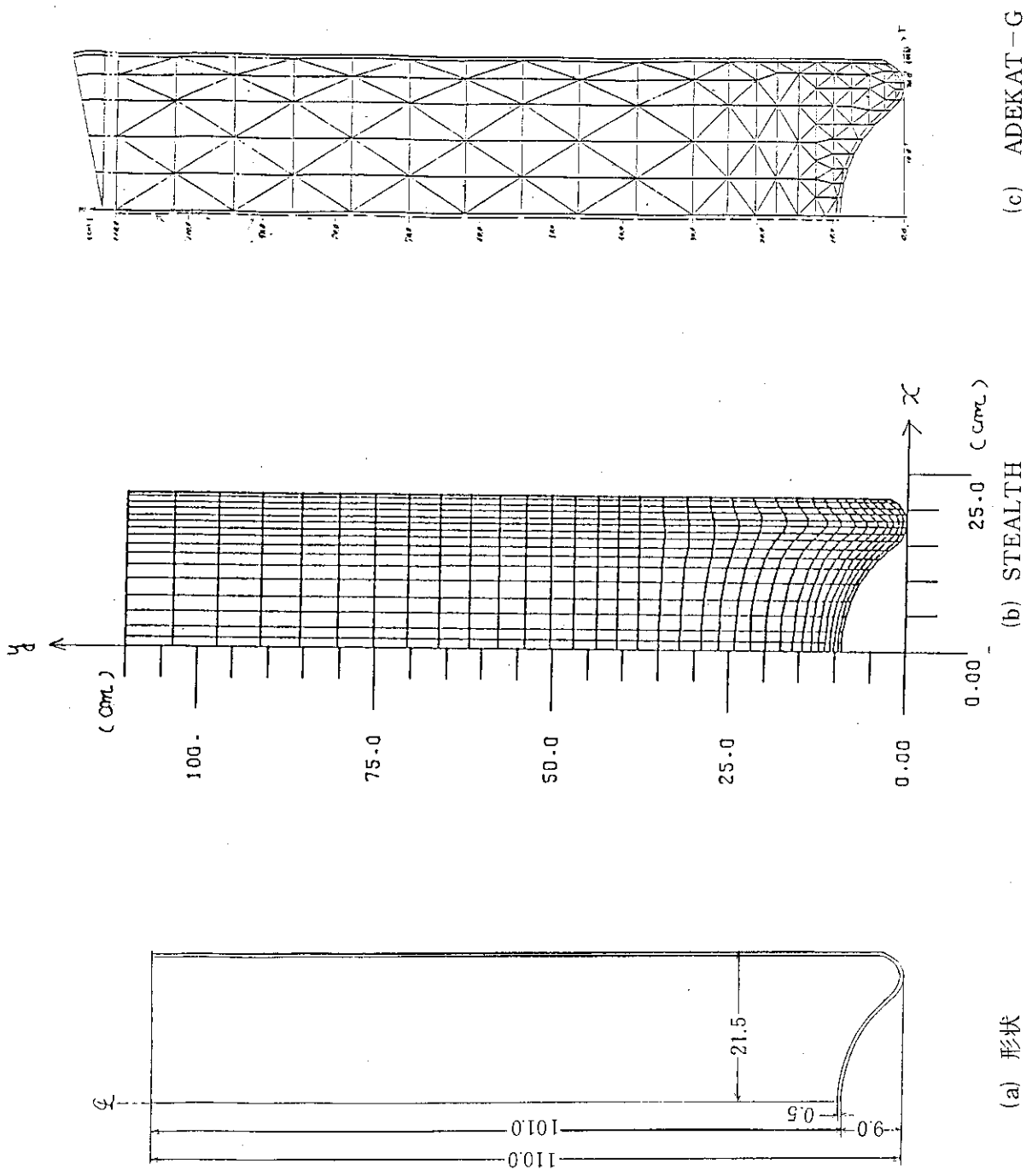


図 5.1 要素分割

表 5.1 STEALTH入力データ (①~④キャニスタ, A~G ガラス)

① 初期応力

	温度 °C	半径方向応力 ($\times 10^2 \text{ kg/cm}^2$)	軸方向応力 ($\times 10^2 \text{ kg/cm}^2$)	円周方向応力 ($\times 10^2 \text{ kg/cm}^2$)	せん断応力 ($\times 10^2 \text{ kg/cm}^2$)
①	175.0	0.73	17.94	18.33	0.16
②	125.0	- 0.05	19.20	16.99	0.0
③	125.0	13.08	5.70	16.99	- 1.47
④	175.0	16.65	3.50	17.46	5.70
A	160.0	- 0.50	3.40	3.55	- 0.18
B	240.0	0.11	0.30	2.68	- 1.18
C	237.5	- 2.00	- 1.90	- 0.86	0.09
D	200.0	- 1.00	- 0.04	1.84	0.10
E	189.5	- 2.00	1.00	- 0.70	1.63
F	152.5	- 1.10	- 0.60	0.20	1.41
G	125.5	- 0.40	0.40	2.47	0.64

② 材料定数

	ヤング率 $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	ポアソン比	密度 $\times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$	降伏応力 $\times 10^2 \text{ kg/cm}^2$
① ④	18.70	0.320	8.03	17.00
② ③	19.10	0.310	8.03	18.50
A	8.57	0.250	2.70	} 引張強度
B	8.54	0.252	2.70	
C	8.54	0.252	2.70	} 133.00
D	8.57	0.250	2.70	
E	8.56	0.250	2.70	}
F	8.59	0.250	2.70	
G	8.60	0.250	2.70	

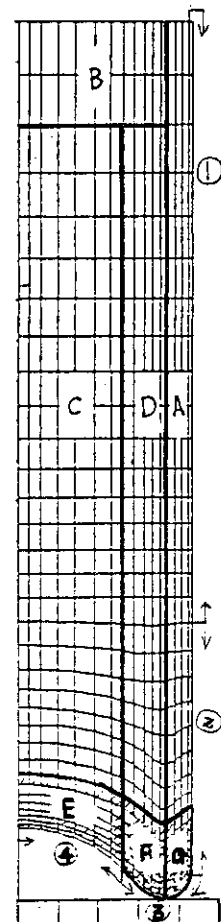


表 5.2 ADEKAT-G 入力材料定数

	ガラス固化体	キャニスタ
ヤング率	$8.41 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$18.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
ポアソン比	0.25	0.33
密度	2.7 g/cm^3	8.03 g/cm^3
降伏応力	-	$1.62 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
接線剛性	-	0.0
引張強度	$3.85 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$	-
圧縮強度	$1.30 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$	-

表 5.3 解析モデルの比較 (要約)

比較項目		STEALTH version 3-2A	ADEKAT-G コード
問題		底部中心凹形円柱形ガラス固化体 (底部, 側部をキャニスタが覆う) が 9 m 垂直落下した場合のガラス材の破壊とキャニスタ材の塑性に着目した解析をする。	
形状		直径 43.0 cm, 長さ 110.0 cm の底部中央に凹部のある円柱形。キャニスタ厚さ 0.5 cm	
要素分割		ゾーン数 528 グリッドポイント数 578	要素数 268 要素境界バネ数 631
材料特性	ガラス材 G2-ガラス	温度に依存した弾性材料	200 °C の時の弾性材料 引張, 圧縮破壊考慮
	キャニスタ材 SUS 304S	温度に依存した完全弾塑性材料	200 °C の時の完全弾塑性材料
初期条件		初期速度および領域に分けて初期応力を入力する	初期速度のみ
境界条件		軸対称条件とリバウンドを考慮	軸対称条件と底部床接触要素の鉛直方向自由度を拘束
自由度数	総自由度数	1156	3786
	拘束自由度を除く自由度数	1122	767
時間ステップ幅		初期幅 $0.075 \mu\text{sec}$ 平均 $0.5 \mu\text{sec}$	$0.1 \mu\text{sec}$
解析時間		$750 \mu\text{sec}$	$100 \mu\text{sec}$

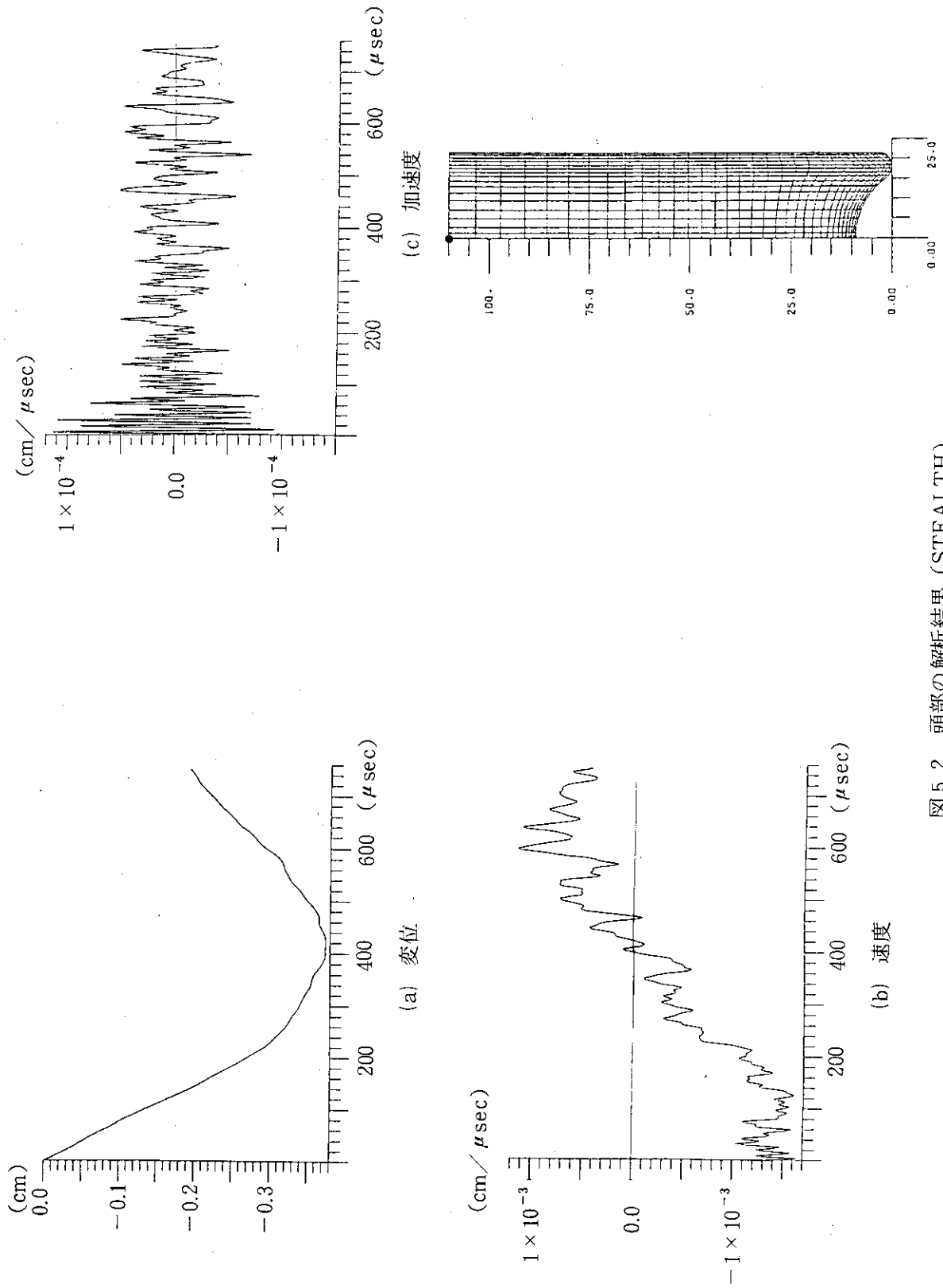


図 5.2 頭部の解析結果 (STEALTH)

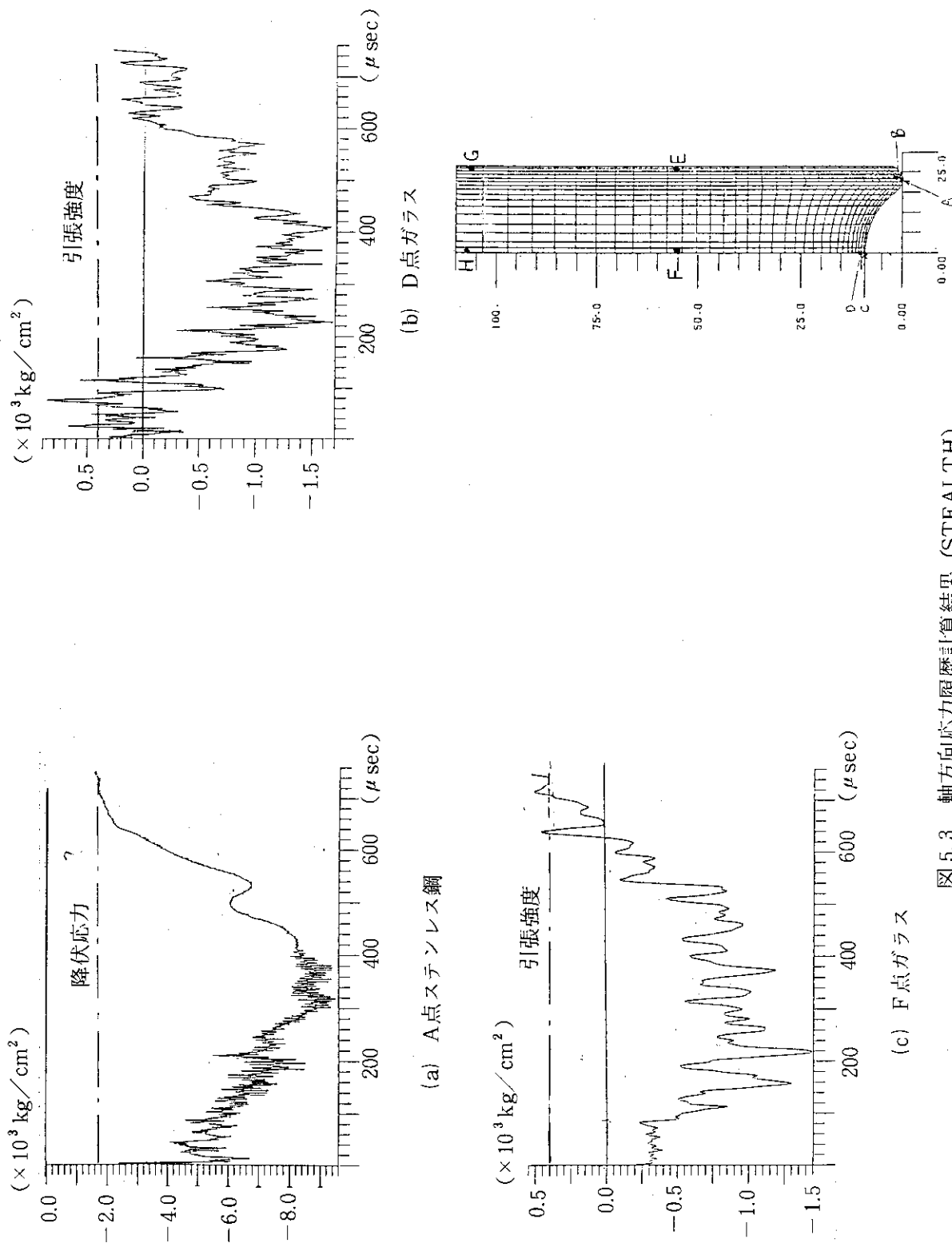


図 5.3 軸方向応力履歴計算結果 (STEALTH)

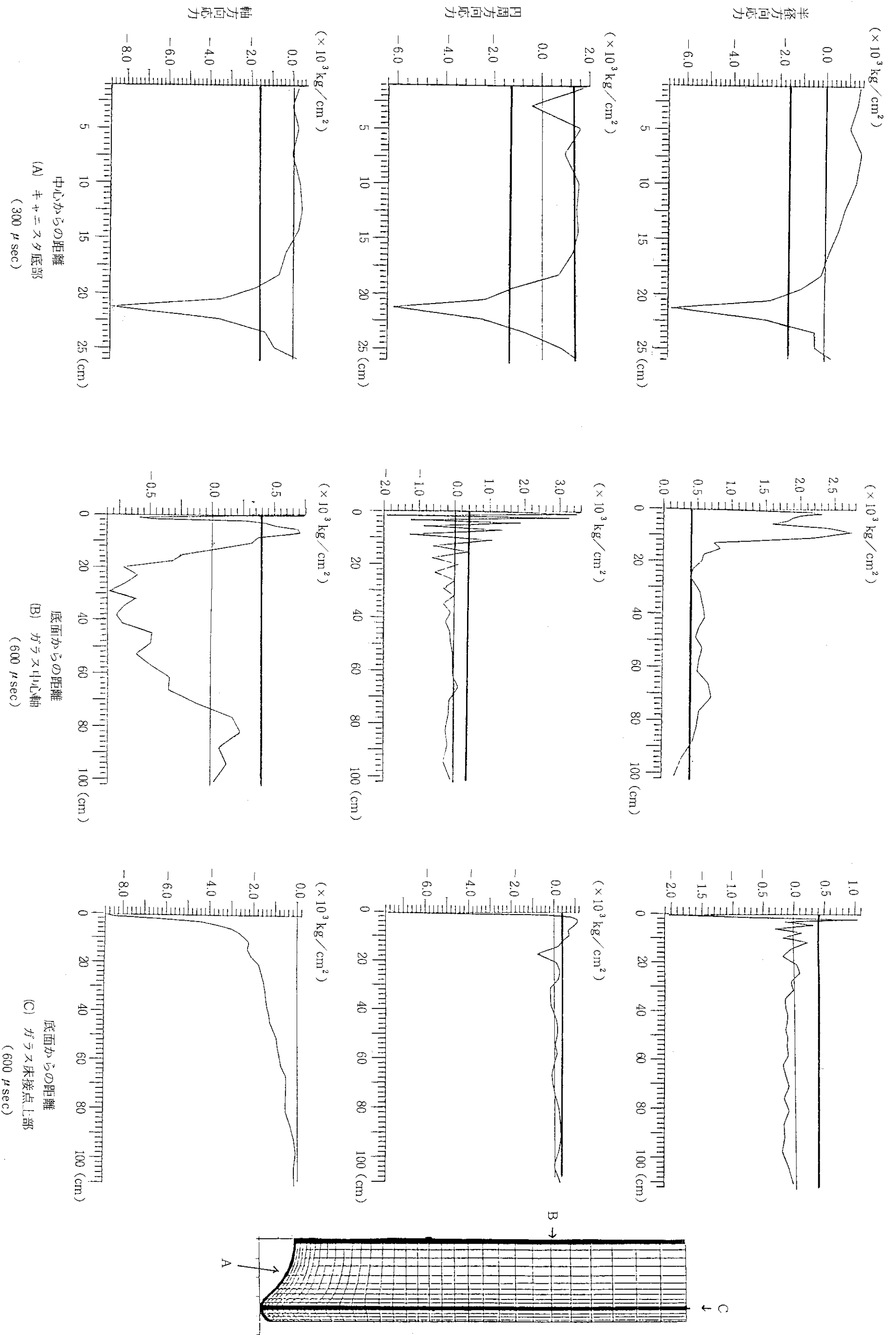


図 5.4 各位置の応力分布

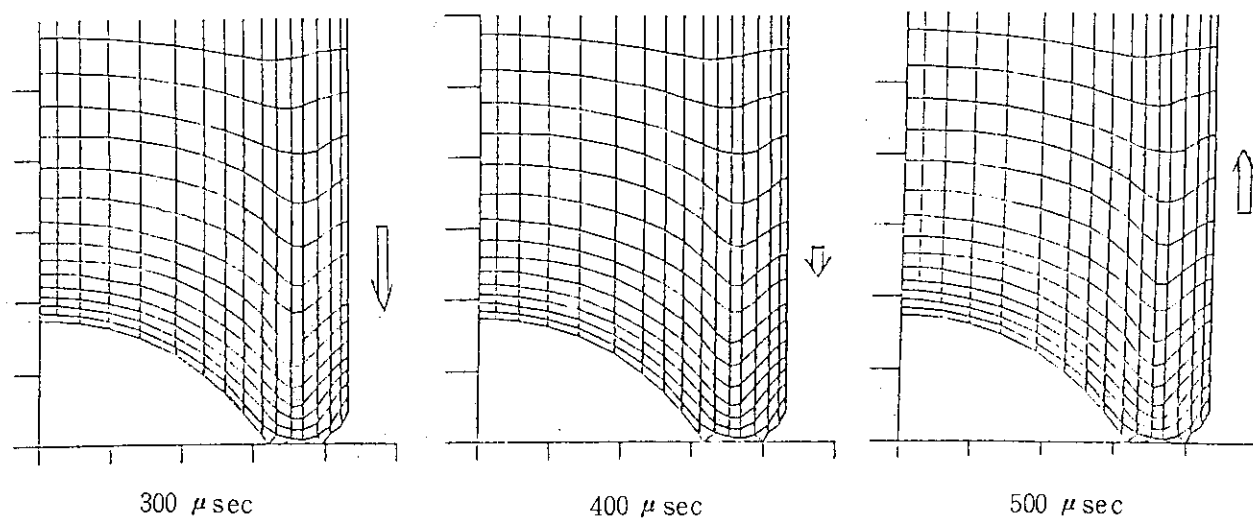


図 5.5 変形図

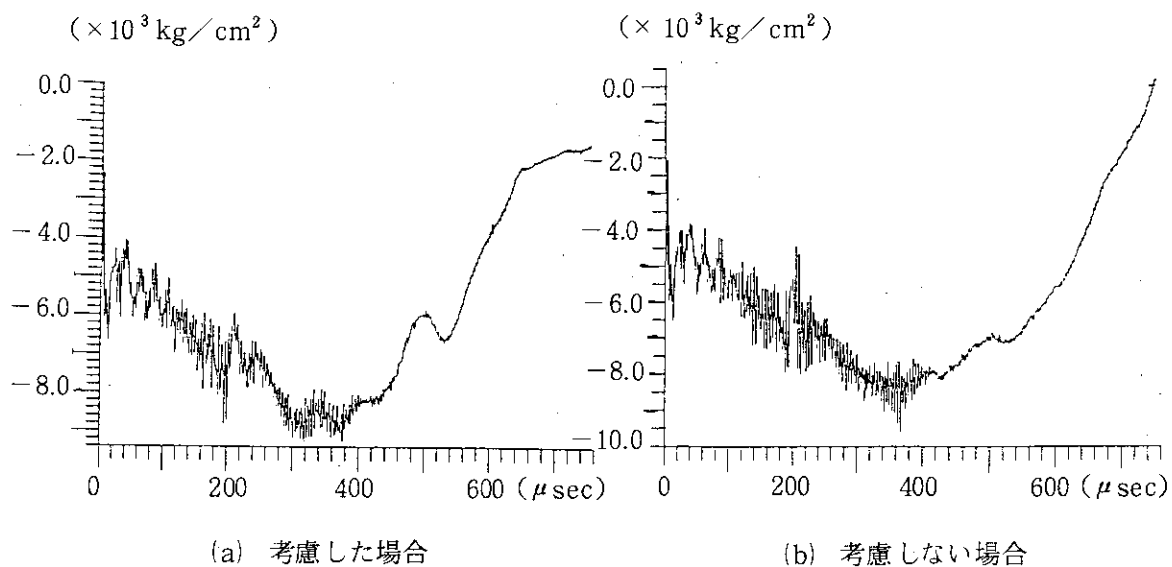


図 5.6 リバウンドの軸応力への影響
(衝突点)

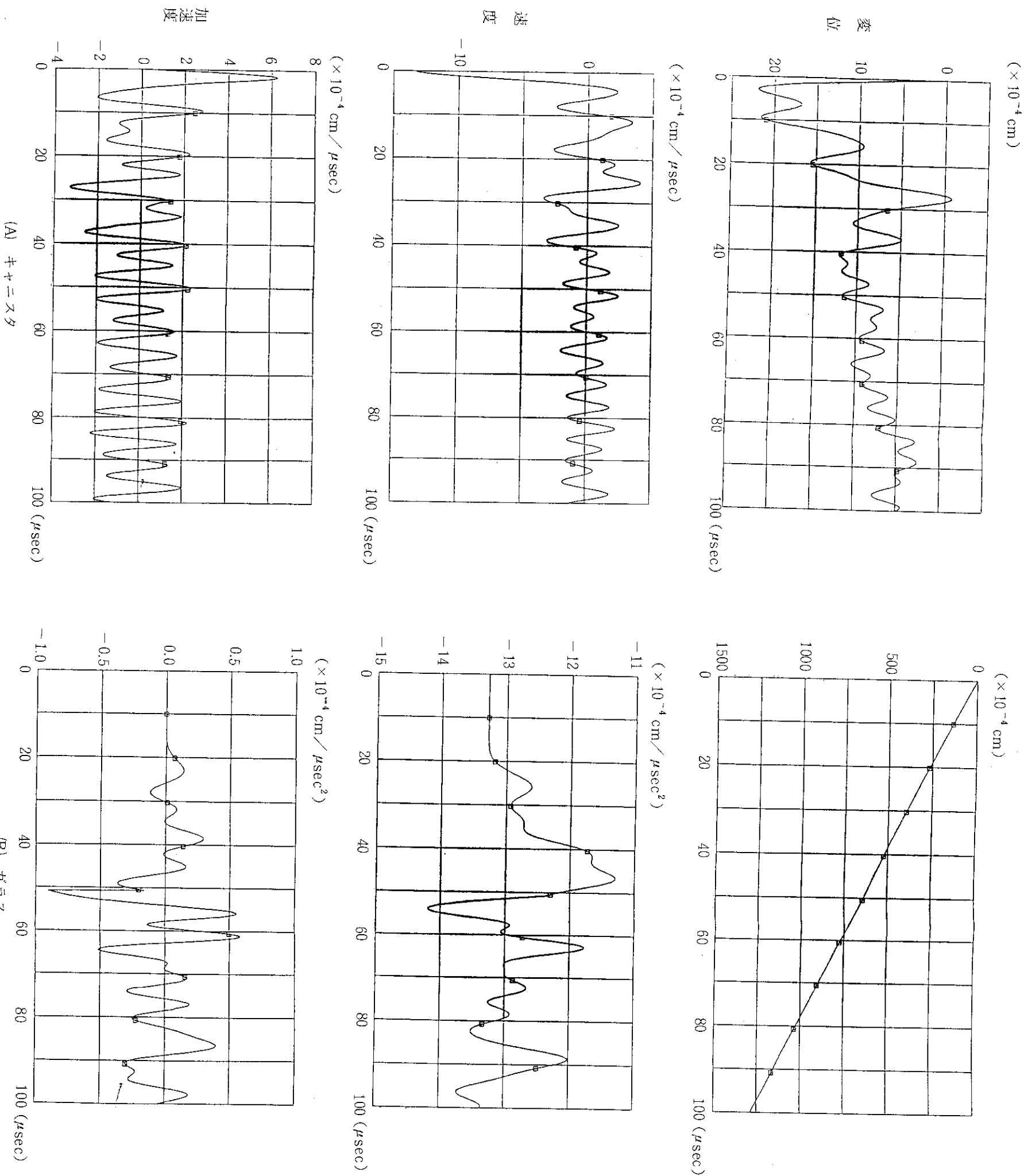


図 5.7 変位, 速度, 加速度の計算結果 (ADEKAT-G)

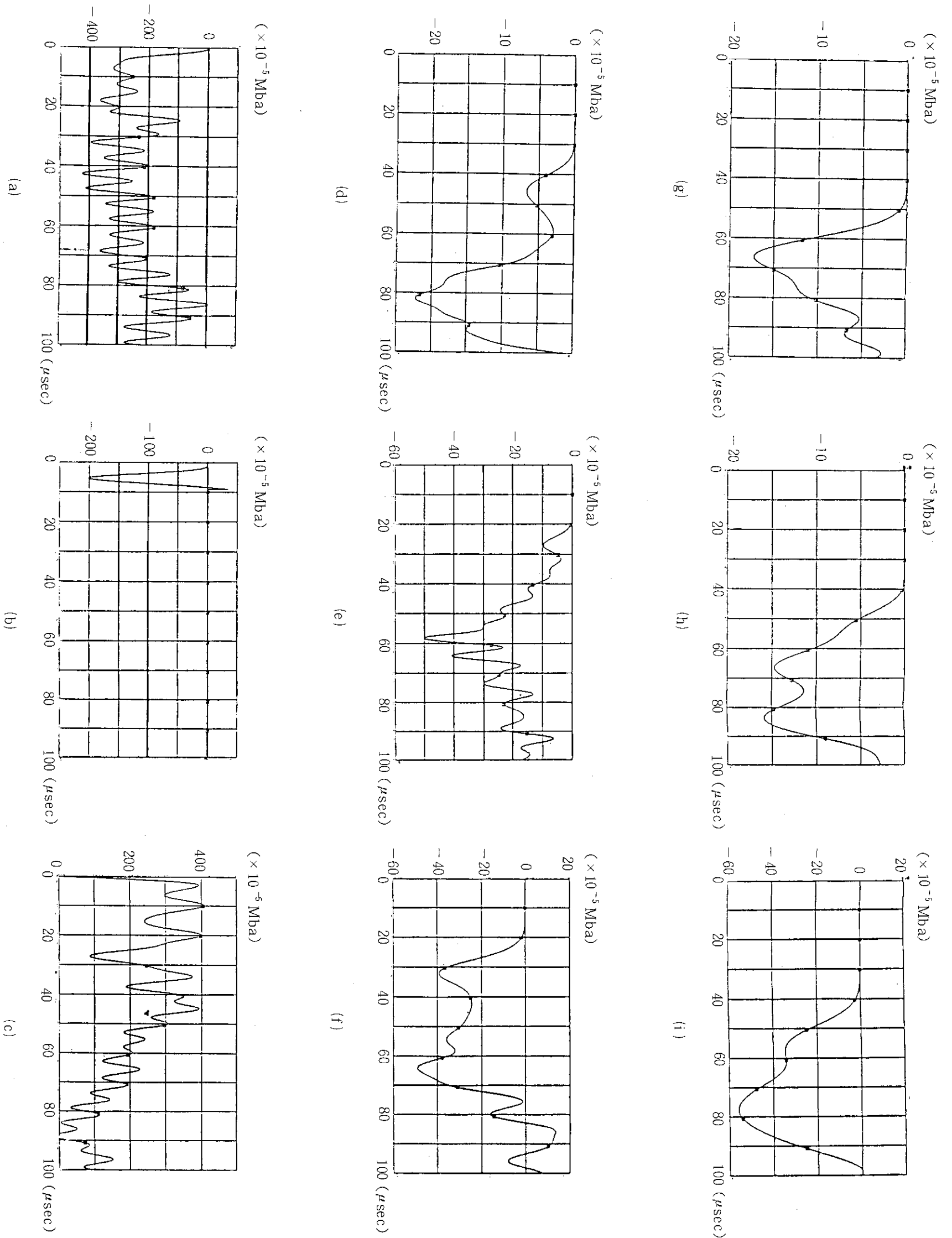


図 5.8 軸方向応力の時間変化

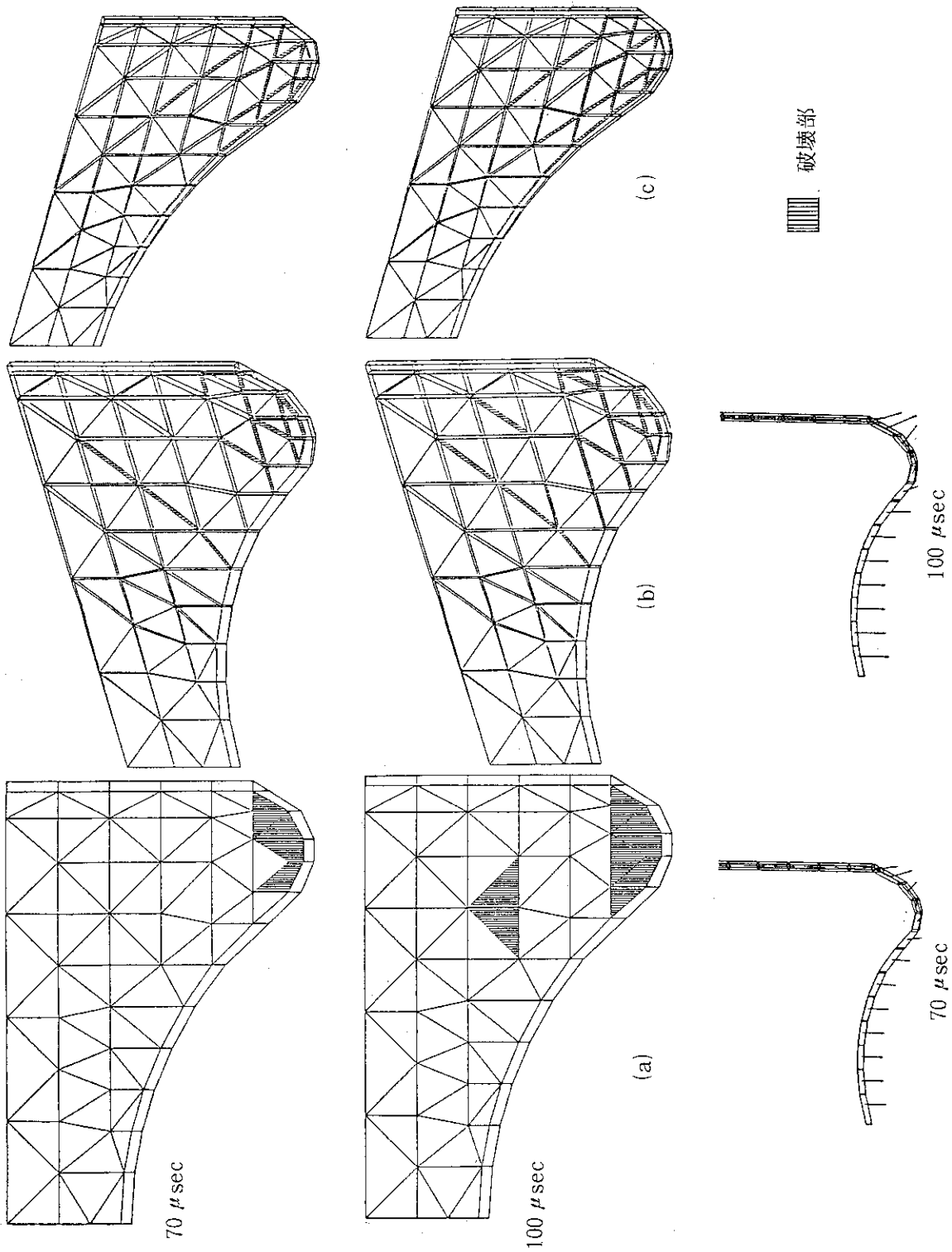


図 5.9 破壊進展図及びキャニスタの変形ベクトル解析結果 (ADEKAT-G)

5.3 垂直落下解析Ⅱ（落下高さによる比較）

(1) 解析概要

前節と同様円柱状のガラス固化体について落下高さを変えて垂直落下解析を行い落下衝突による固化体の破壊を比較検討した。落下高さ以外の解析条件は前節に述べた9m垂直落下の条件と同一であり、解析コードとしてADEKAT-Gを用いた。

(2) 解析条件

固化体形状、要素分割、材料定数、境界条件、自由度、時間ステップ幅については、前節で述べたADEKAT-Gコードによる解析条件と全く同一である。

初期条件としての初期速度は $v = 2gh$ 式に従って落下高さに応じて変わる。ここでは固化体の落下高さを0.5, 1.0, 3.0, 6.0, 9.0 mにとる。この時の初速度の計算値を表5.4に示す。

(3) 比較計算の結果と考察

① 代表的な点での加速度の時刻歴

図5.10に加速度の時刻歴の計算結果を示す。(a), (b)の図は衝突付近の加速度でその値は激しく振動している。ピークの値はいずれの落下距離でも衝突後約 $2 \mu\text{sec}$ で生じており9m落下の場合約 $6 \times 10^{-4} \text{ cm} / \mu\text{sec}^2$ ($6 \times 10^5 G$)、0.5mでは $1.5 \times 10^{-4} \text{ cm} / \mu\text{sec}^2$ となっている。また、振幅の時間変化は落下距離9mと6mがほぼ同じで約 $\pm 2.5 \times 10^{-4} \text{ cm} / \mu\text{sec}$ である。また、3, 1, 0.5mの加速度振幅もよく似ており、約 $\pm 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm} / \mu\text{sec}^2$ となっている。(c)に示す加速度の時刻歴より応力波が約 $17 \mu\text{sec}$ でこの点に伝わるのがわかる。この値は一次元波動伝播より得られる理論値 ($19.6 \mu\text{sec}$) よりやや小さい。この差には数値解析による誤差を含んでいると思われるがその値は小さく解析結果に与える影響は少ないと思われる。(d)の加速度の時刻歴より応力波が約 $34 \mu\text{sec}$ で伝わることを示している。この値は理論値 ($37.6 \mu\text{sec}$) よりやや小さく数値計算による誤差を僅かに含んでいる。

② 代表点における応力時刻歴

図5.11(b)は衝突点における応力の時刻歴である。最初のピークの応力を表5.5に示す。落下距離の平方根に比例していることがわかる。図5.11(a)は衝突部直上ガラス部の軸方向応力の時刻歴である。最初に圧縮応力が働き、その後引張応力が発生し、その応力により破壊が生じている。落下距離と引張破壊が生じる時刻との関係を表5.6に示す。

応力波が伝わる時間は衝突点からの距離によって変わるが落下距離にはあまり関係ない。表5.7に落下距離と一次元の理論値より得られる衝撃応力の関係を示す。これらの衝撃応力と図5.11(b)の応力時刻歴とオーダーで一致している。

③ 破壊進展図

100 μsec における破壊の進展を図5.12に示す。図(a)に示す周方向から見た図から、衝突位置から3cm上方のところまで破壊が進展していることがわかる。(b)は容器の内側、(c)は容器の外側から見た破壊進展図である。この図で落下距離が0.5mでは衝突点の位置より3cm上方のところまで破壊が進展している。落下距離が1.0m以上になると衝突による衝撃力以外の影響がでていると思われる。

④ 破壊に至るまでの時間

表 5.7 に落下距離と各点が破壊に至るまでの時間を示す。衝突点からの距離が離れるに従って破壊に至る時間が遅くなることがわかる。また、同じスプリング番号で落下距離が小さくなると急激に破壊にいたる時間が遅くなることがわかる。

⑤ 変形ベクトル

図 5.13 にキャニスタ材の変形ベクトルを示す。衝突点付近に着目すると変形は時間とともに容器の外側に変形する。落下距離と衝突点のキャニスタ要素の変位ベクトルの大きさとの関係を表 5.8 に示す。この結果から変位量は落下距離の平方根にはほぼ比例することがわかる。

表 5.4 落下高さ と 初期速度

落下高さ (cm)	初期速度 (cm/μsec)
50.0	3.13×10^{-4}
100.0	4.43×10^{-4}
300.0	7.67×10^{-4}
600.0	10.85×10^{-4}
900.0	13.29×10^{-4}

表 5.5 落下距離 と ピーク応力

落下距離 h (cm)	応力値 σ (kg/mm ²)	$\sqrt{h/900}$	$40.79 \times \sqrt{h/900}$
900	40.79	1.0	40.79
600	32.63	0.816	33.30
300	23.45	0.577	23.55
100	14.76	0.333	13.60
50	9.69	0.236	9.61

表 5.6 引張り破壊の発生時刻

落下距離 h (cm)	時刻 (μsec)
900	9.1
600	10.5
300	13.9
100	21.4
50	29.9

表 5.7 落下距離と衝撃応力

落下高さ h (cm)	初速 (v_0) (cm/ μsec)	衝撃応力 (σ)	
		kg/cm ²	(Mpa)
50	3.13×10^{-4}	0.507×10^3	(= 0.497×10^{-3})
100	4.43 "	0.719 "	(= 0.705 ")
300	7.67 "	1.241 "	(= 1.217 ")
600	10.85 "	1.754 "	(= 1.720 ")
900	13.29 "	2.153 "	(= 2.111 ")

$$\sigma = \rho \cdot c \cdot v_0$$

$$\rho = 2.7 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$$

$$c = 0.6112 \text{ cm}/\mu\text{sec}$$

$$v_0 = \sqrt{2gh}$$

$$g : 9.81 \times 10^{-10} \text{ cm}/\mu\text{sec}^2$$

$$h : \text{落下距離 (cm)}$$

表 5.8 落下距離と変位ベクトル

落下距離 h (cm)	変位量 (cm)	$\sqrt{h/900}$	6.965×10^{-2} $\times \sqrt{h/900}$
900	6.965×10^{-2}	1	6.965×10^{-2}
600	6.204 "	0.8165	5.687 "
300	4.576 "	0.5774	4.022 "
100	2.378 "	0.3333	2.322 "
50	1.282 "	0.2357	1.642 "

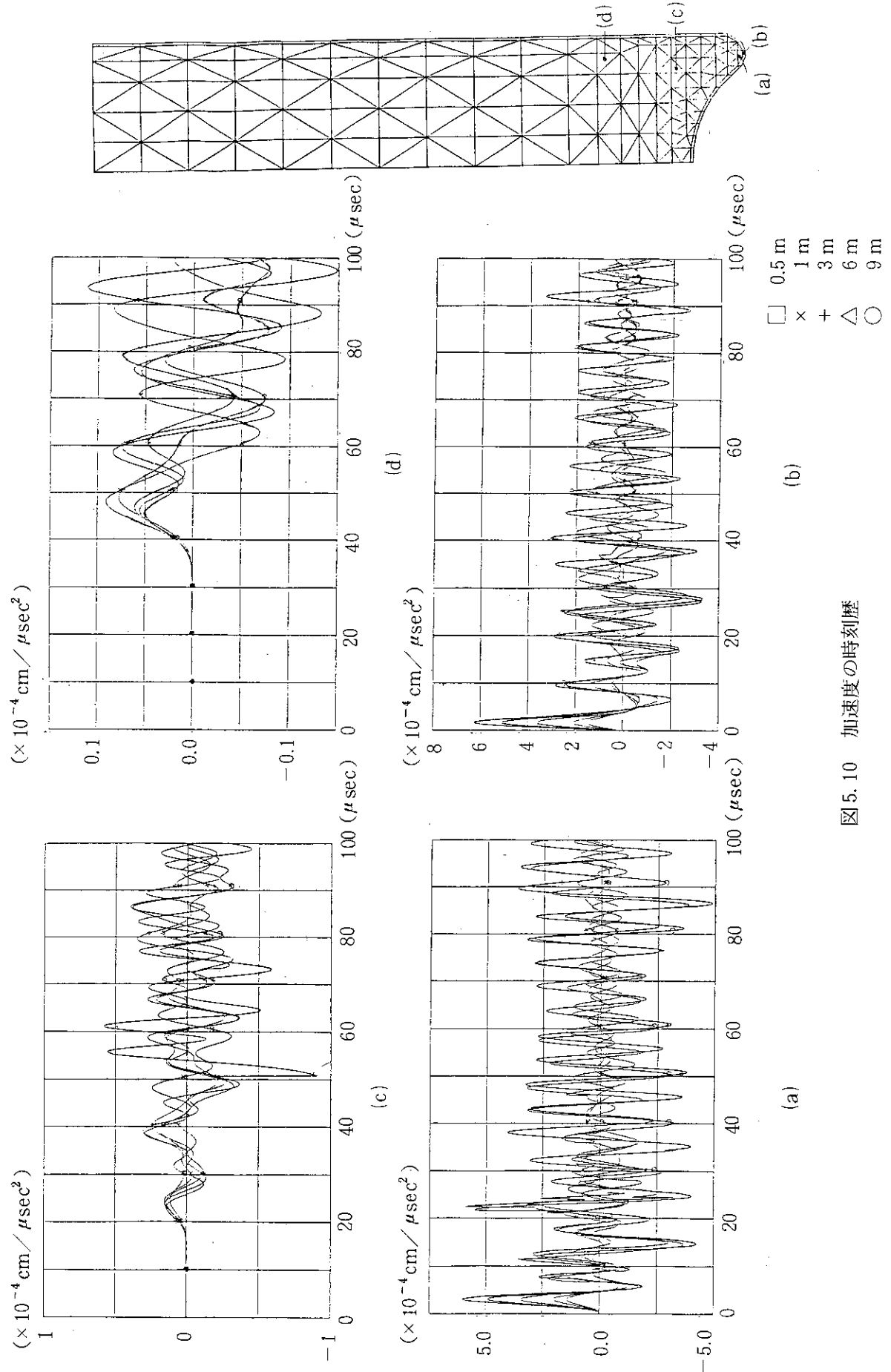


図 5.10 加速度の時刻歴

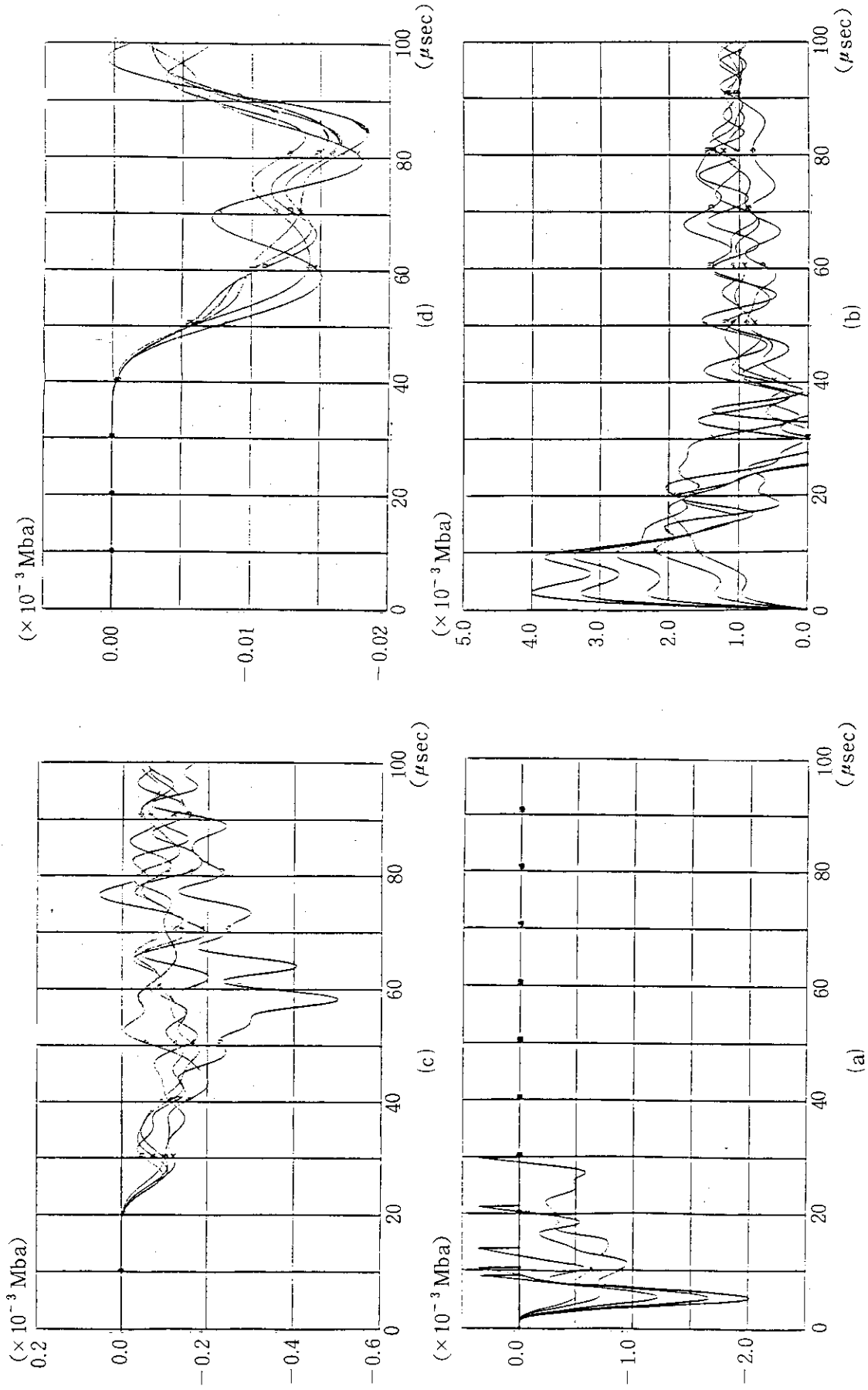


図 5.11 軸方向応力の時刻歴
(a)(b)(c)(d)の位置は図 5.10 の同じ記号の要素の接触面

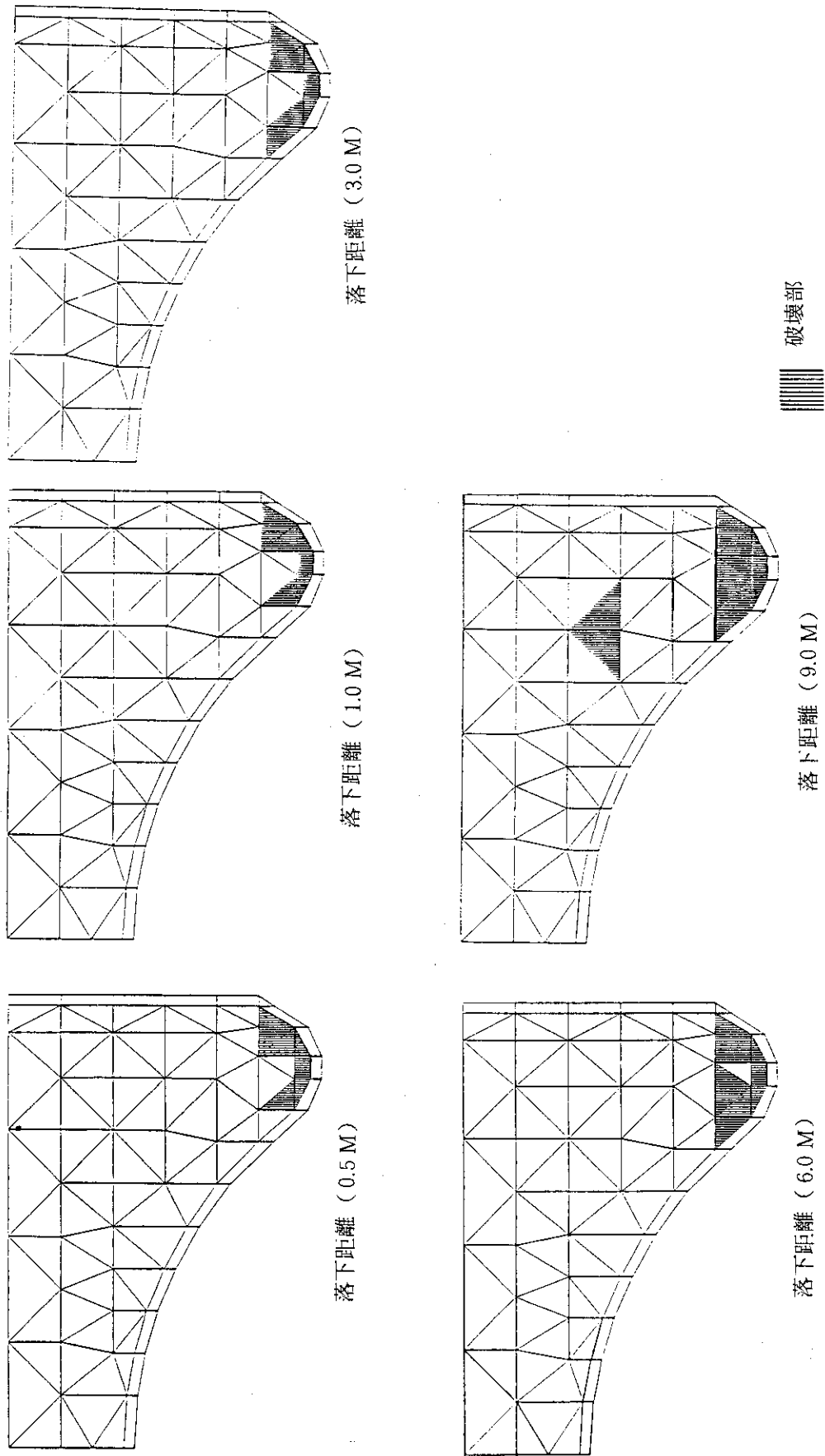


図 5. 12(a) 周方向から見た破壊進展図
(100 μ sec後)

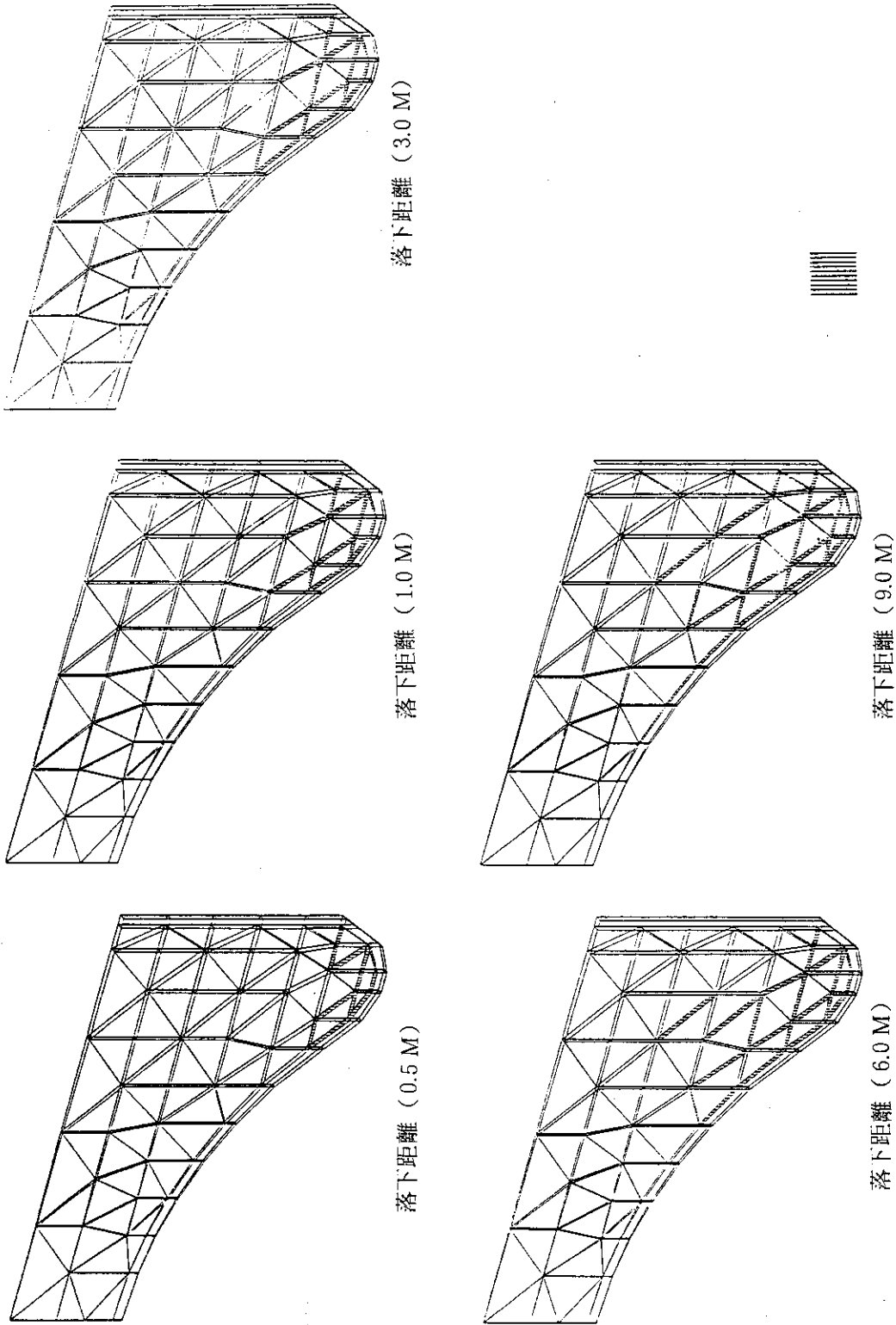
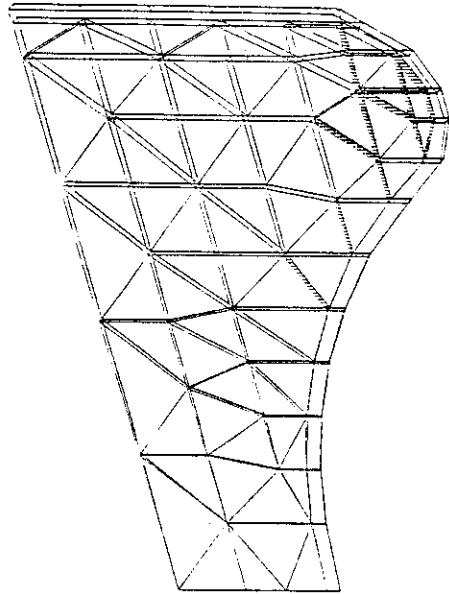
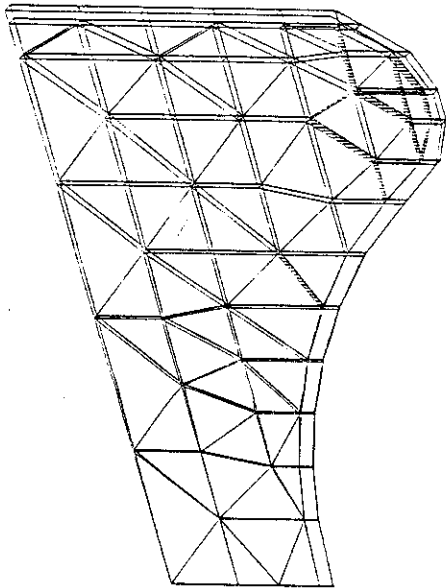


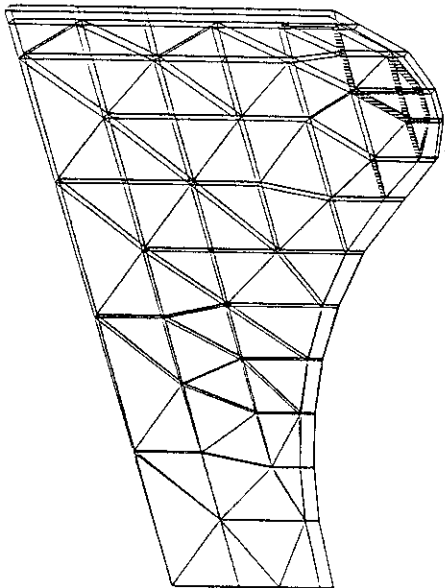
図 5.12 (b) 容器の内側から見た破壊図
(100 μ sec)



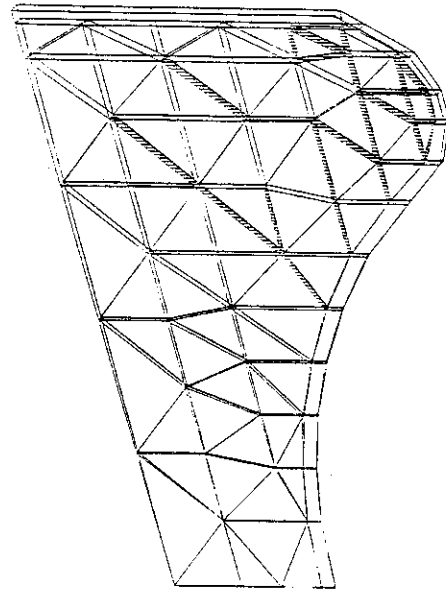
落下距離 (3.0 M)



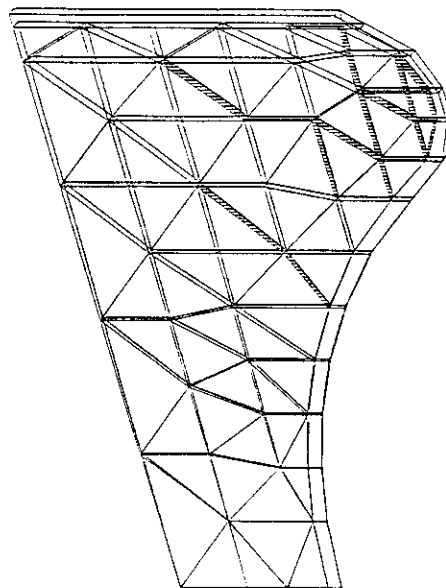
落下距離 (1.0 M)



落下距離 (0.5 M)



落下距離 (9.0 M)



落下距離 (6.0 M)



図 5.12(c) 容器の外側から見た破壊図
(100 μ sec)

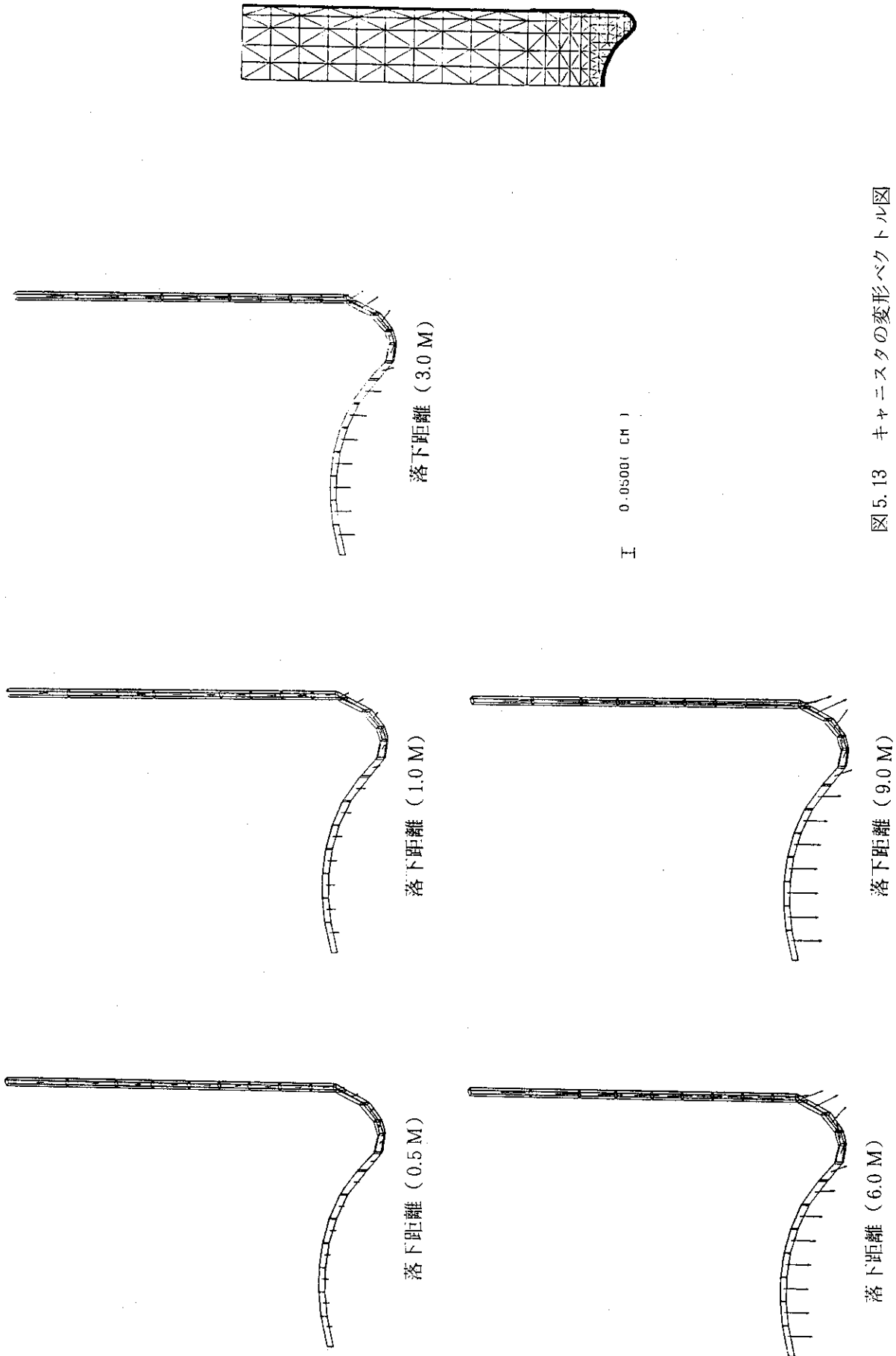
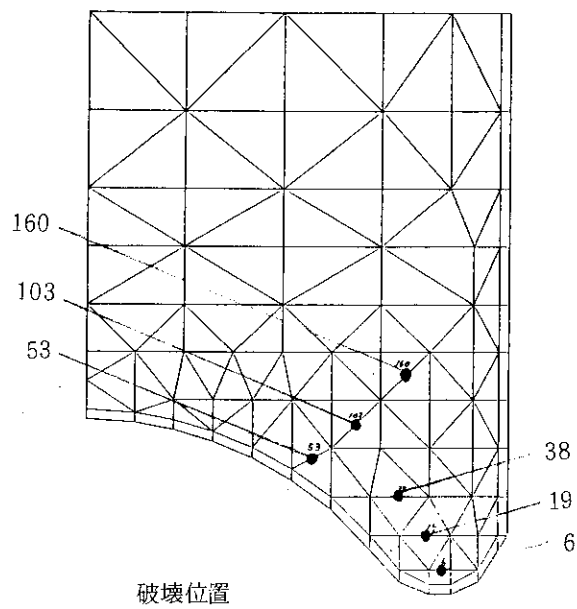


図5.13 キャニスタの変形ベクトル図
(100 μ sec)

表 5.7 落下距離と破壊にいたる時間

落下距離 (m) 破壊位置	0.5	1.0	3.0	6.0	9.0
6	30	21	14	11	9.1
19	—	—	93	22	20
38	—	—	—	95	73
53	—	40	32	30	29
103	—	—	—	58	37
160	—	—	—	—	51



5.4 垂直落下解析Ⅲ（固化体頭部の破壊）

(1) 解析概要

ここではピット内に既に収納されているガラス固化体に上部からの落下物、即ち、収納途中にあるもう一つのガラス固化体が落下衝突する事故について考える。そして、両固化体の動的接触問題を考慮した破壊解析問題を設定し、収納済み固化体のガラス頭部の破壊挙動を追跡する。この問題の解析に当たっては、収納済み固化体キャニスタ蓋部の衝突による変形、形状及び吸収エネルギーを推定するための解析（以後問題1と称す）と、この結果を解析条件に取り入れた固化体ガラス頭部の破壊解析（以後問題2と称す）の2つに分けて実施する。

ガラス固化体頭部は、凸形状をした薄肉のキャニスタ蓋部で覆われており、図3.1に示すようにガラス頭部とキャニスタ蓋部の間には凸形の空間ができています。この蓋部は結果的に落下物に対してその衝撃を緩和する緩衝材の役割を果たすことが考えられる。即ち、落下固化体の持つエネルギーの一部はキャニスタ蓋部の変形による歪みエネルギーとして吸収され、ガラス頭部の受ける衝撃は落下固化体により押し潰されたキャニスタ蓋部を介した間接的なものになると考えられる。そこで、キャニスタ蓋部の吸収エネルギーと衝突による変形形状を考慮してガラス頭部の破壊解析を行った。このため、解析を次の2つの問題に分けて行った。

問題1： 高さ9mの位置から垂直落下する落下固化体によって収納済み固化体の頭部キャニスタ蓋部の受ける変形を追跡し、この変形による歪みエネルギーを推定する。

問題2： 問題1で得られたキャニスタ蓋部の変形を考慮し、固化体のガラス頭部の落下固化体の衝突によって受ける破壊の様子を解析する。この際、落下固化体の持つ運動エネルギーはキャニスタ蓋部に衝突する直前に持っている運動エネルギー（ $=Mgh$ 、 M ：落下固化体の質量、 g ：重力加速度、 h ：高さ9m）からキャニスタ蓋部の変形によって吸収されたエネルギーを差し引いた量に等しいとする。

ただし、問題1、問題2とも落下固化体については剛体として扱う。問題1は衝撃による大変形問題を含んでおり、解析コードにはSTEALTHを用いる。一方、問題2ではガラスの破壊と接触問題を解析することになるので接触問題の機能を追加したADEKAT-Gコードを使用した。

(2) 問題1の解析モデルと結果

① 解析概要

ピット内に既に収納されているガラス固化体に上方からの落下物、ここでは収納途中にある別のガラス固化体が落下衝突する場合を考えている。問題1はこの衝突によって収納済みガラス固化体のキャニスタ頭部凸部が受ける変形形状と吸収エネルギーを推定するために設定されたものである。

落下固化体の姿勢は、その対称軸が収納済み固化体の対称軸と一致して落下固化体の底部が収納済み固化体の頭部に衝突するものとする。衝突の後も両者の軸は一致しているものと仮定する。

落下固化体の衝突時の速度は、9m落下を想定して $2gh$ （ g ：重力加速度、 h ：落下距離）から計算し、この速度は衝突の間変わらないとした。これは落下固化体が衝突時に持つ

ている運動量に対して収納済固化体のキャニスタ頭部の質量が小さく、落下固化体が収納済固化体の頭部ガラス部から受ける反力の影響が少ない間は、落下固化体の運動量の損失は少ないと考えられるからである。また、ここでは収納済固化体のキャニスタ頭部凸部の変形に着目していることから落下固化体は剛体として扱い、キャニスタ頭部のみを有限差分メッシュに分割した。使用する材料定数は文献 1) で使用されたデータ、即ち、固化体が熱的に安定な状態になる固化後 1000 時間目の固化体平均 (代表的) 温度に基づいて決定する。使用する計算コードは STEALTH-2D (3-2V ver.) である。

② 解析条件

(a) 形状

図 5. 14 に示すような最大径 21.5 cm、最小径 10.0 cm であり、厚さ 0.5 cm のキャニスタ頭部凸部と底部に凹部を有する半径 21.5 cm の円柱状固化体を考える。

(b) 要素分割

キャニスタ頭部凸部は有限差分メッシュで厚さ方向に 2 層とり、長手方向は 88 ゾーンに分割した (図 5. 14)。メッシュの縦横比は平均 8 : 5 となっており、最小メッシュ幅は 0.25 cm である。この結果

ゾーン数	176
グリッドポイント数	267
総自由度数	534

となる。

一方、落下固化体はその底部の外径を 15 の直線で近似して現し、これらの直線は解析では剛体壁として扱った。

(c) 材料定数

キャニスタの温度を一様に 200 °C と仮定した。これは、落下事故が固化体貯蔵後 1000 時間経過した後に起こるとし、その時の固化体平均温度をとったものである。200 °C のときのキャニスタの材料定数は表 3. 1 の値を用いて設定した。

(d) 初期条件

キャニスタ頭部は静止していると仮定した。一方、落下固化体をモデル化した剛体壁は速度 $= 2 \text{ gh} = 1.329 \times 10^{-3} \text{ cm} / \mu \text{ sec}$ をもって落下しているものとした。衝突時やその後もこの速度は一定に保たれているものとした。また、キャニスタ中のグリッドポイント $(i, j) = (3, 69)$ (図 5. 14 参照) は時刻ゼロで剛体壁と接触している。また、キャニスタ内の初期応力はゼロである。

(e) 境界条件

軸対称解析であることから対称軸上 ($x = 0$) で半径方向の変位、速度、加速度成分ゼロとした。また、キャニスタの付け根 ($j = 1$ のグリッドポイント) は完全固定とした。さらに、グリッドポイント $(i, j) = (3, 69)$ は剛体壁との間で運動量の授受が不可能ないわゆる wall interaction boundary として扱った。

(f) 自由度数

各グリッドポイントは x 方向と y 方向の 2 自由度を有している。したがって総自由度数は

534であるが、このうちの境界条件によって拘束されている自由度を除くと525となる。

(g) 時間ステップ幅及び解析時間

キャニスタ内部を伝わる衝撃波速度 C_v は

$$C_v = \sqrt{(K + 4G/3) / \rho}$$

で与えられる。ここに、 K は体積弾性率、 G はせん断弾性率、 ρ は密度である。 C_v を表3.1の材料定数を使って計算すると

$$C_v = 0.579 \text{ cm} / \mu\text{sec}$$

となる。これを用いて解析解が安定となる条件（クーランの安定条件）を満たすように、時間ステップ幅を決める。即ち、

$$(\text{時間ステップ幅}) = \{ (\text{最小メッシュ幅}) / (\text{衝撃波速度}) \} \times (\text{安全率})$$

図5.14に示したメッシュの最小幅は0.25 cm、安全率を0.8とすると、時間ステップ幅 Δt は $\Delta t < 0.346 \mu\text{sec}$ となる。一方、解析時間の一つの目安として、落下固化体の最下部が収納済固化体のガラス頭部（図5.14の $y = 0$ の位置）に到達するまでの時間を求めると $1.3 \times 10^4 \mu\text{sec}$ となり、この時間まで解析を進めるとすると計算の繰返し回数は少なくとも37579回必要となる。

③ 解析結果と考察

図5.15に時刻400 μsec から2400 μsec までのキャニスタ頭部凸部の変形過程をしめしている。落下固化体に衝突するキャニスタの角部Bは500 μsec までは落下固化体に接触しているようであるが、1000 μsec 以後ではキャニスタ頭部の変形の方が落下固化体の速度よりも速く進んでいる。そして2400 μsec で今度はキャニスタの角部Dが落下固化体と接触する。しかし、この部分の接触に対しては計算条件に考慮されていないため、接触するとして計算処理されず、キャニスタと落下固化体が重なり合うような結果となる。従って、これ以後この条件を修正しないと計算の続行は不合理となる。

2400 μsec までの変形はC、Dのコーナー部の回転に集中しており、他の部分には著しい変形は見られない。ただし、A-E間のC、D以外の直線部にも塑性歪みは残留している。図5.15には対応した速度ベクトル図をあわせて示し変形の進行する様子を表している。やはりC、D部に変形が集中することがわかる。図5.16は2500 μsec までのキャニスタに吸収された変形エネルギー量の時刻歴を示している。これは、時刻と共にほぼ線形に増加している。500 μsec と1000 μsec 付近で多少の変動があるのは、メッシュのリゾーニングによるものと思われる。図5.17はこの例を示したものである。即ち、450 μsec から480 μsec にかけてリゾーニングを行い、図5.17(a)がリゾーニング直前のメッシュ、図5.17(b)がリゾーニング直後のメッシュである。アワーグラス状のメッシュの不整がほとんど修正されていることがわかる。一方、図5.17にはリゾーニング前後の速度ベクトルの分布も合わせて示しているが、リゾーニングによって速度場が大きく乱されていることがわかる。しかし、この乱れも時刻と共に消える。リゾーニングの与える影響は全体の解析から見れば微少であると考えられる。

ところで、落下固化体の最下部が収納固化体のガラス部まで到達する時間は約13000 μsec であるので、ここでの解析は、この時間の1/5弱となっている。また、2500 μsec 以後の

変形は、前述のようにD点と落下固化体の衝突など益々複雑な過程を経て行くと思われる、最終的なキャニスタの変形形状の正確な予測は困難である。しかし、2500 μ sec 以後の変形は、D点の衝突によるE-F間の座屈などC-D-E-F間で大きいと思われる。そこで、問題2の解析を行うためのキャニスタ変形形状を図5.18のように仮定することにした。一方、キャニスタの変形による吸収エネルギーは2500 μ sec での値 3.95×10^{-4} eu を時刻13018 μ sec まで外挿して0.182 eu とした。

(3) 問題2の解析モデルと結果

① 解析概要

問題2は問題1で得られたキャニスタ蓋部の変形形状と変形による吸収エネルギーを考慮して収納済固化体ガラス部頭部の衝撃破壊解析を行った。落下固化体の底部の形状を剛体壁で置き換え落下固化体の変形や応力は無視した。また、ADEKAT-Gコードに適用されている剛体壁は変位しない不動のモデルであるため、収納済固化体に初速度を与えて、剛体壁に衝突させることにした。このことによって物体内の速度場は実際の場合と相反したものになるが、応力場については変わらず固化体の破壊に着目した解析である限り支障はないと考えられる。

収納済固化体に与える初速度は落下固化体がキャニスタ蓋部に衝突する直前に持っていた落下エネルギーから、キャニスタ蓋部の変形による吸収エネルギーを差引いた残りのエネルギーがすべて運動エネルギーであるとして計算した。ここで着目している収納済ガラス固化体頭部の破壊は衝突による最初の応力波によって起こされるもので、例えば固化体の底部まで伝わった波の反射波の影響といったものは取り扱わないことにした。そのため、収納済固化体全体を解析の対象とする必要は必ずしもなく、局部破壊の進行がある程度安定するまで目安として解析した。この解析時間は100 μ sec が妥当と考えられ、応力波の伝播距離を考えると、収納済固化体の上部約半分を解析の対象とすればよい(図5.19参照)。

② 解析条件

(a) 形状

キャニスタ頭部は問題1で得られた形状とし、その他の固化体部分については図5.1の形状とした。ただし、解析で考慮される固化体はキャニスタ上部までガラスで満たされており、上部約半分の長さまでとした。(図5.19参照)

(b) 要素分割

図5.20に示すようにキャニスタは六面体要素を使って分割しガラス部は五面体要素でメッシュの方向性が生じないように分割する。最小メッシュ幅はキャニスタの厚さと同じ0.5 cmである。剛体壁要素は落下固化体の底部形状を表すのに用いられている。また、接触要素はキャニスタ頭部の剛体壁に接触する可能性がある位置に設けた。

要素数	立体要素	294
	接触要素	22
	剛体壁要素	13
境界バネ数		720
総自由度数		1764

(c) 材料定数

材料定数は表 3.1 のものを用いた。即ち、キャニスタに対しては塑性を考慮し、ガラス部に対し引張及び圧縮の破壊を考慮する。また、剛体壁の接触剛性はキャニスタのヤング率を用い摩擦は考慮しないことにした。

(d) 初期条件

落下固化体を表す剛体壁は停止しており、収納ガラス固化体に以下で求める初速度を与えた。落下固化体が高さ 9 m の位置から落下する場合の運動エネルギー K_0 は

$$K_0 = M_f g h = 0.354 \text{ eu} \quad (1 \cdot 10^{12} \text{ erg})$$

となる。ここに M_f は落下固化体の質量である。 M_f は図 5.19 の形状に基づいて計算している。一方、前節で述べたように衝突によってキャニスタに吸収されるエネルギー D は 0.182 eu であるから、初速度 v は

$$v = \sqrt{2 (K_0 - D) / M_f} = 0.000927 \text{ cm} / \mu \text{ sec}$$

となる。この速度は 9 m 落下の場合の速度 $0.001329 \text{ cm} / \mu \text{ sec}$ の約 70 % である。

(e) 境界条件

軸対称解析であることから z 軸に接する要素は z 軸方向の並進変位のみ自由度を持っており、その他の自由度は総て拘束した。一方、キャニスタ頭部の落下固化体の剛体壁に接触する可能性のある面には接触要素を設け、剛壁と収能固化体の間の運動量の交換が行えるようにした。

(f) 自由度

境界条件による自由度の拘束の他に軸対称解析であることから立体要素の持つ 6 自由度のうち、円周方向並進変位と半径方向軸まわりの回転変位及び z 軸まわりの回転変位が総て拘束される。従って、これら拘束自由度を除く解析自由度は 864 である。

(g) 時間ステップ幅及び解析時間

衝撃波伝播速度最小メッシュ幅より時間ステップ幅 Δt を求めると $0.576 \mu \text{ sec}$ (安全率を 0.667 とした) となる。しかし、剛体バネモデルを用いる場合には $\Delta t = 0.576 \mu \text{ sec}$ ではまた解が発散する可能性があるので、 $\Delta t = 0.1 \mu \text{ sec}$ を用いることとする。解析時間は衝突による最初の応力波が最下部に到着する時刻約 $100 \mu \text{ sec}$ を目安として考えた。

③ 解析結果と考察

(a) 応力の時刻歴

図 5.21 (a) ~ (e) は衝突点から下方 185 cm の位置までの軸方向応力の時刻歴を示している。(a) と (b) は衝突点直下のキャニスタに付着しているガラス部の応力であり、中心に近い側の応力を示す。(a) では約 $45 \mu \text{ sec}$ で圧縮を起こしている。(b) は外側に隣接した位置での圧力であるがここでは圧壊までには至らず、時刻約 $65 \mu \text{ sec}$ で最大の圧縮応力 $-1.08 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ となり、その後は徐々に圧縮応力が低下する傾向にある。(c) ~ (e) はそれぞれ衝突点下 1.5 cm, 8.5 cm, 185 cm の位置での応力図であり、圧縮応力波の伝播の様子を示している。(c) では最大圧縮応力は $60 \mu \text{ sec}$ で $-3.8 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ であり、(d) では $-1.45 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、(e) では $-6.7 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ と衝突点から離れるにつれて絶対値は減少している。特に、(c) の $40 \mu \text{ sec}$ のピークは (d) では 56

μ sec 前後のピーク及び (e) では 75μ sec に表れるピークにそれぞれ対応しているものと思われ、圧縮応力のピークの減少の様子を示すと図 5.22 のように衝突点から離れるにつれて指数関数的に絶対値が減少する。

(b) 降伏域と破壊の進展

図 5.23 は解析の結果得られた収納済固化体の破壊の進展の様子を時間の経過とともに示したものである。

キャニスタの塑性は時刻 5μ sec の時から落下固化体直下の付近に現れる。この降伏域ははじめのうちそれほど広がってはいないが 30μ sec を過ぎると図 5.23 (g) ~ (j) に現れるように急速に進展している。しかし、キャニスタの頭部凸部にまでは達していない。また、この部分の角部は落下固化体の底部に接触するが、その影響はここで実施した解析時間 (100μ sec) の間では少ないと思われる。それは角部付近に塑性域が生じないためである。

一方、ガラス部の破壊は図 5.23 (c) に示すように時刻 15μ sec で落下固化体直下の少し離れた部分に現れ、衝撃によって衝突点から生ずると思われる半円筒状の応力波の面と直行するような破面となっている。これは応力波の伝わる方向には圧縮力があらわれるが、それと直交する面では逆に引張り応力が生じ、この応力がガラスの破壊応力を越えたためである。しかし、固化体の側面や角部に生ずる破壊はむしろ引張り応力として反射する反射波の影響を強く受けているものと思われる。

落下固化体との衝突点を中心にして放射状に延びる破壊の進展は時刻約 50μ sec まで続いている。しかし、 $60 \sim 70 \mu$ sec では新しい放射状破壊面の成長は見られず、衝突によって生じた一次応力波に直接起因する破壊の進展が停止していると思われる。このこととは対照的に $60, 70 \mu$ sec では衝突付近に細かい破壊が進んでいる。この破壊が起こるのは次のことも一因と考えられる。即ち、破壊によって急激に解放された応力が破壊要素の受ける反力として作用するためにその要素は運動量を供給される。その運動量が大きいと破壊要素に隣接する要素の運動を誘発し発生応力を大きなものになっているということである。解析の結果得られた破壊の領域は衝突点から半径 $5 \sim 6$ cm の内部に集中しているが、その外側にも衝突点を中心にした放射状に延びる破壊が部分的に発生している。また、衝突点下 18.5 cm 以下では破壊は発生しない。

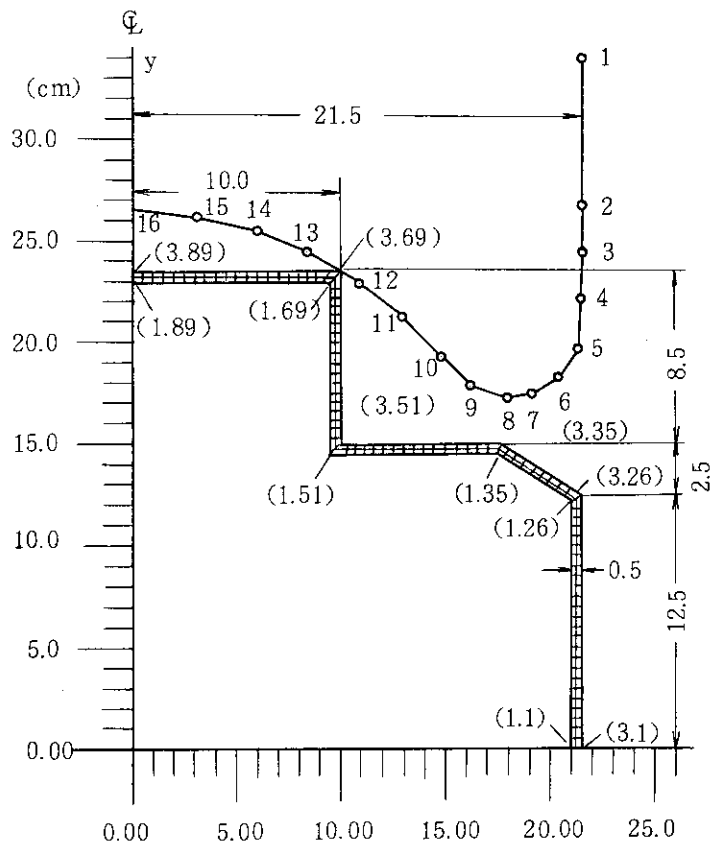


図 5.14 要素分割

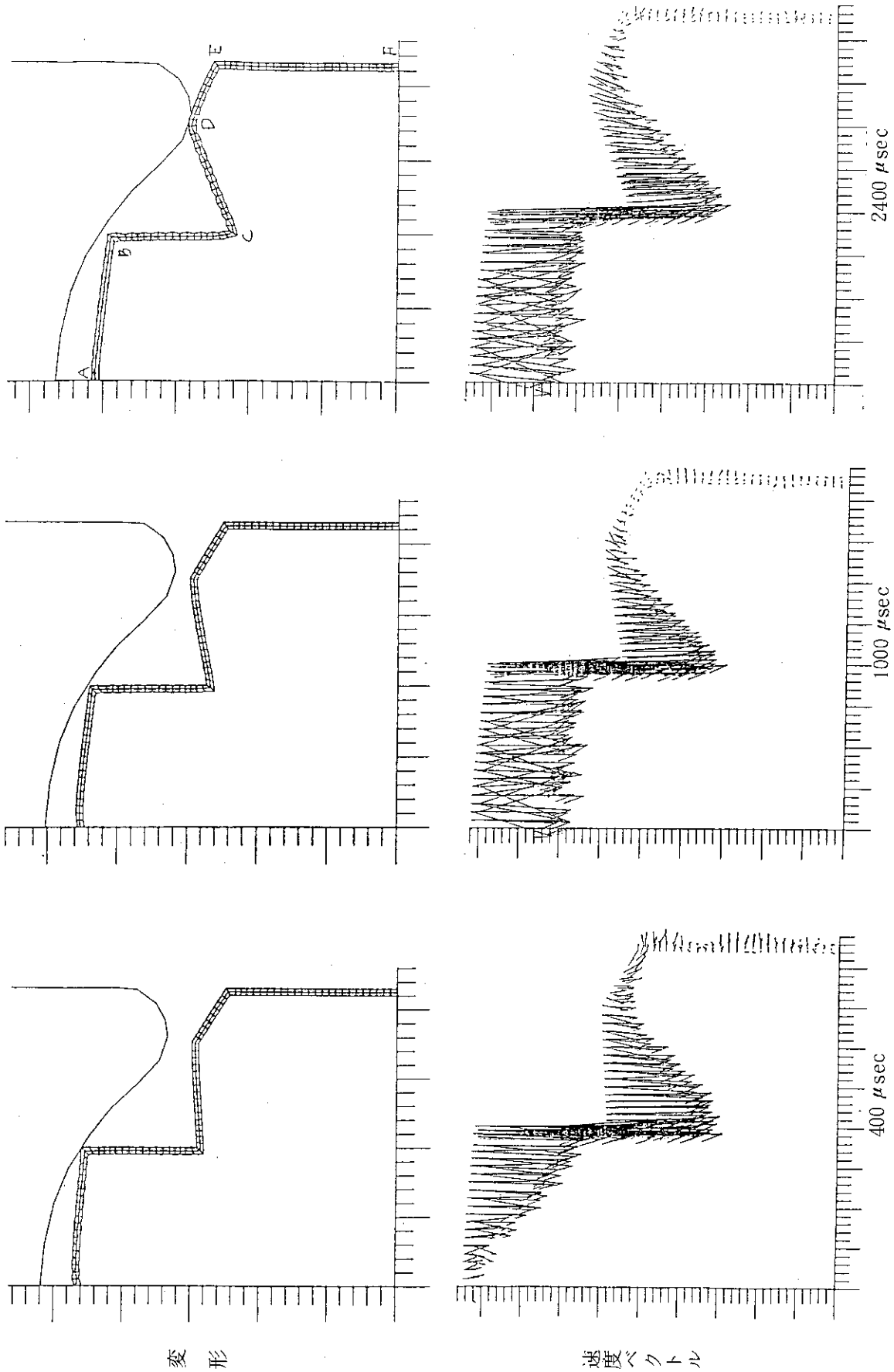


図 5.15 変形及び速度ベクトルの時間変化

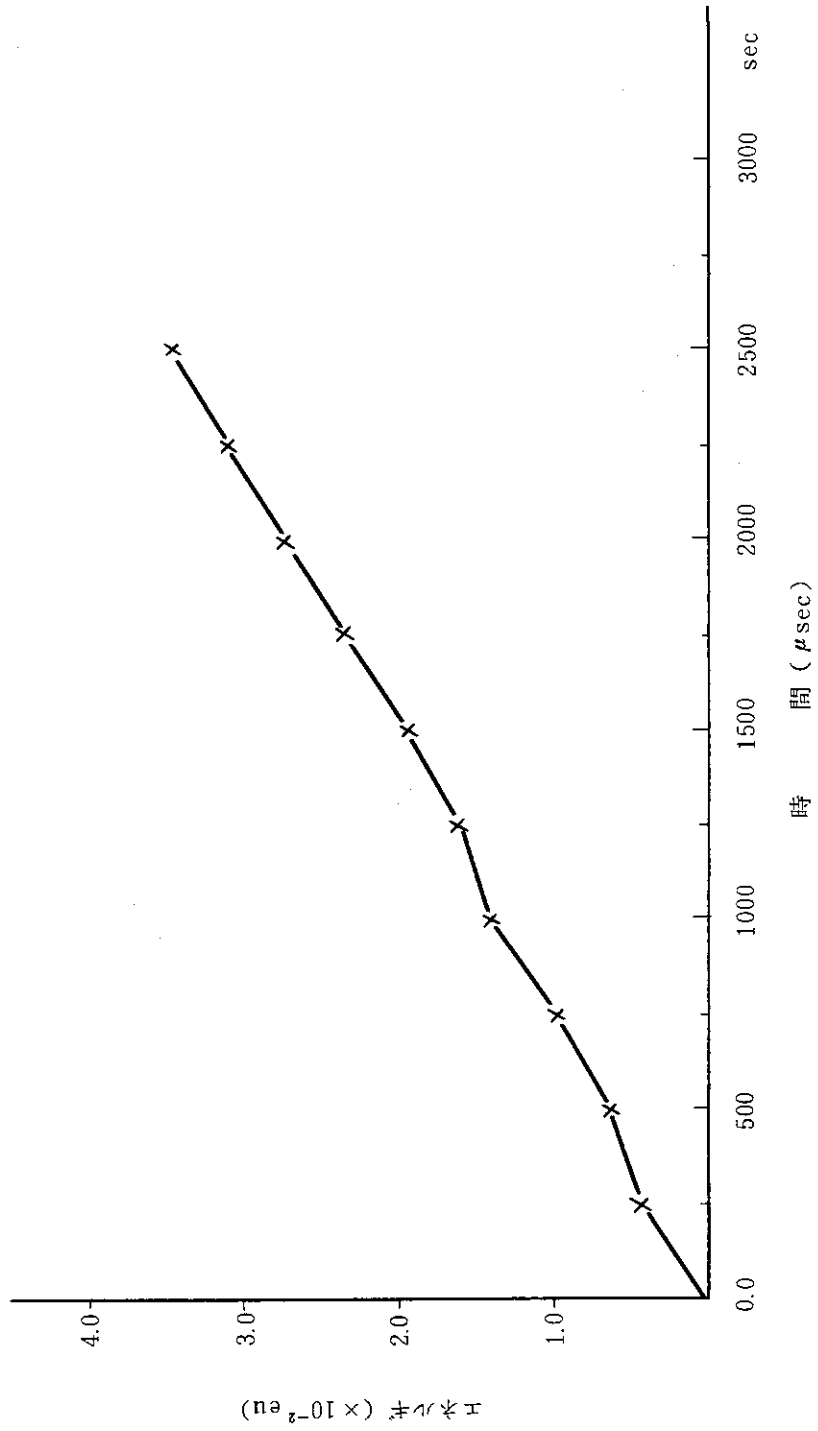


図 5.16 キャニスタによる吸収エネルギー

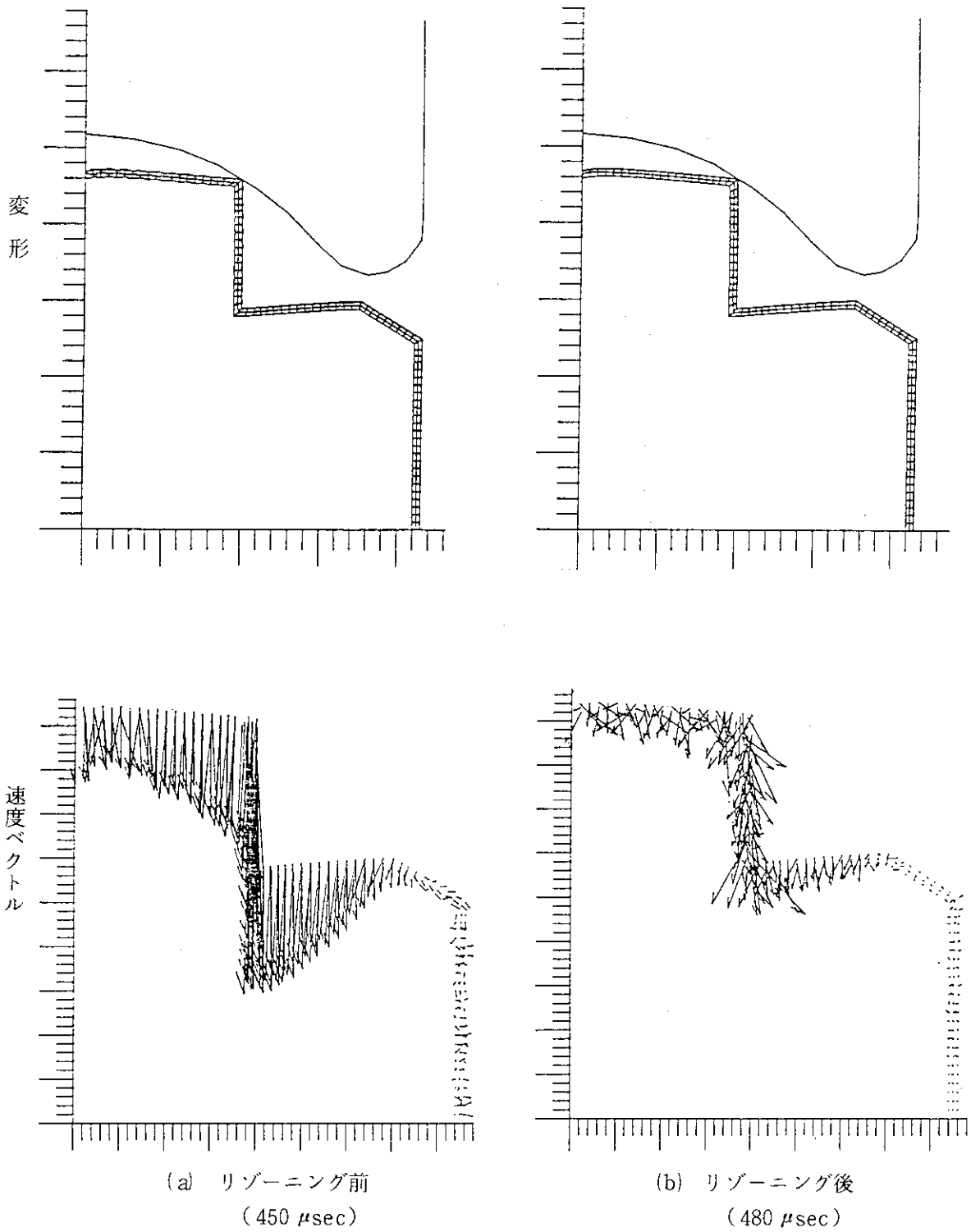


図 5.17 リゾーニング前後の変形及び速度ベクトル

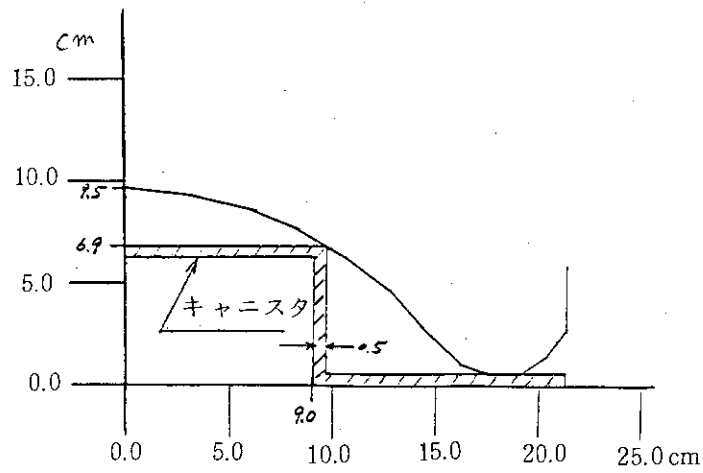


図 5.18 キャニスタの頭

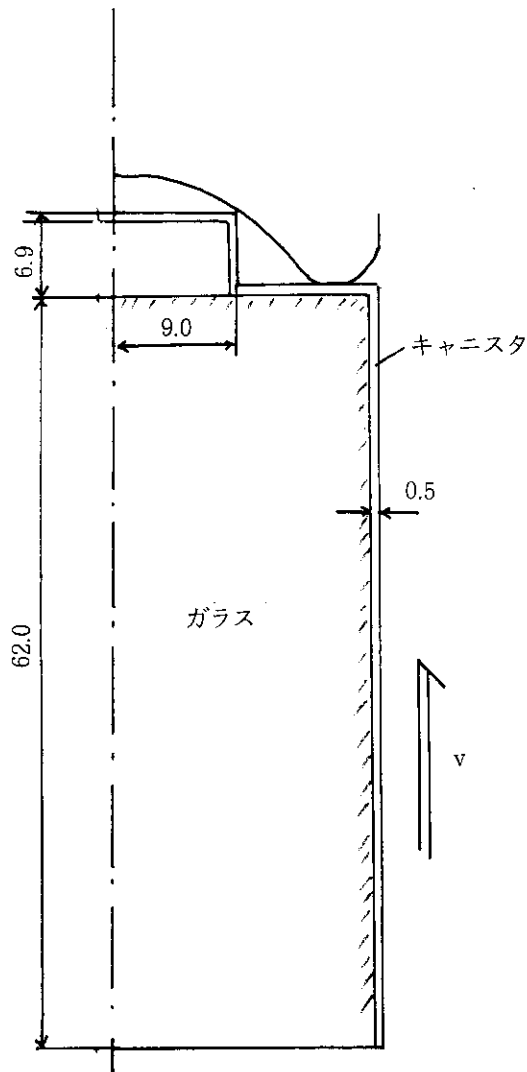


図 5.19 固化体の形状

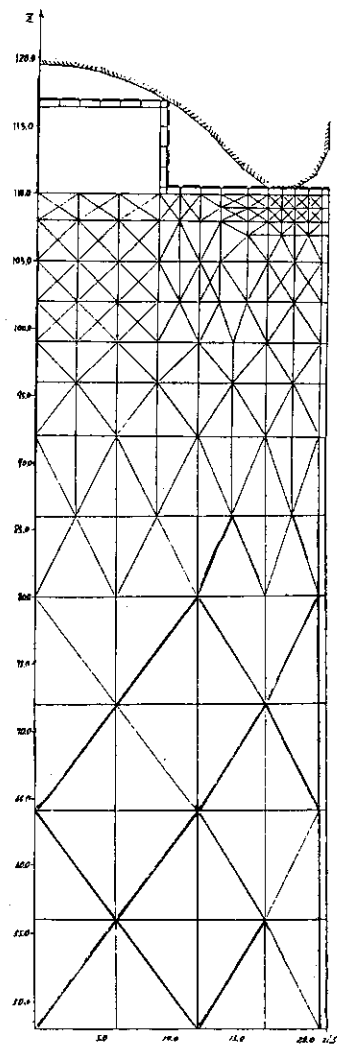


図 5.20 要素分割

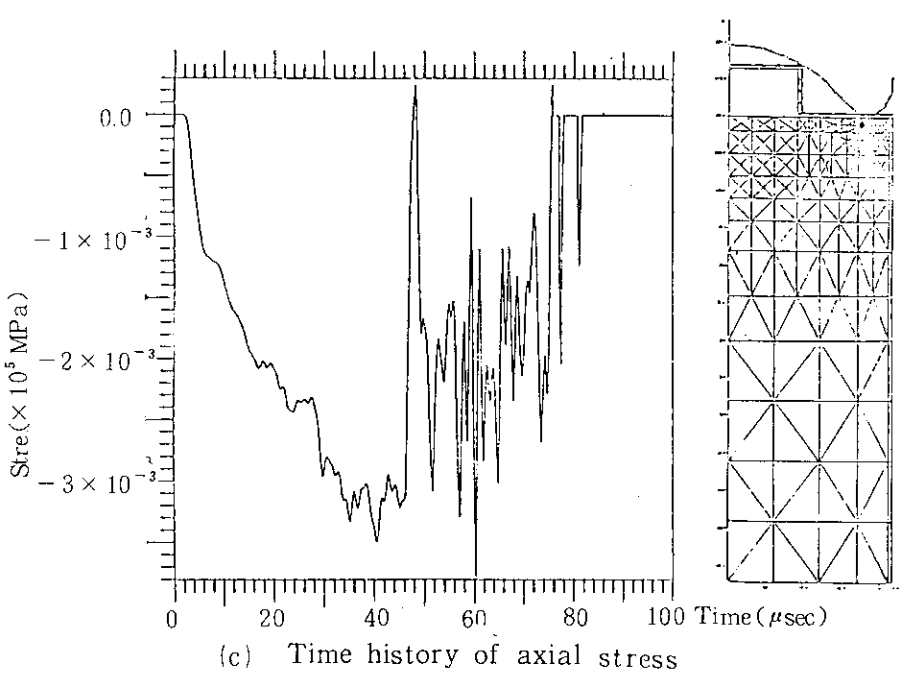
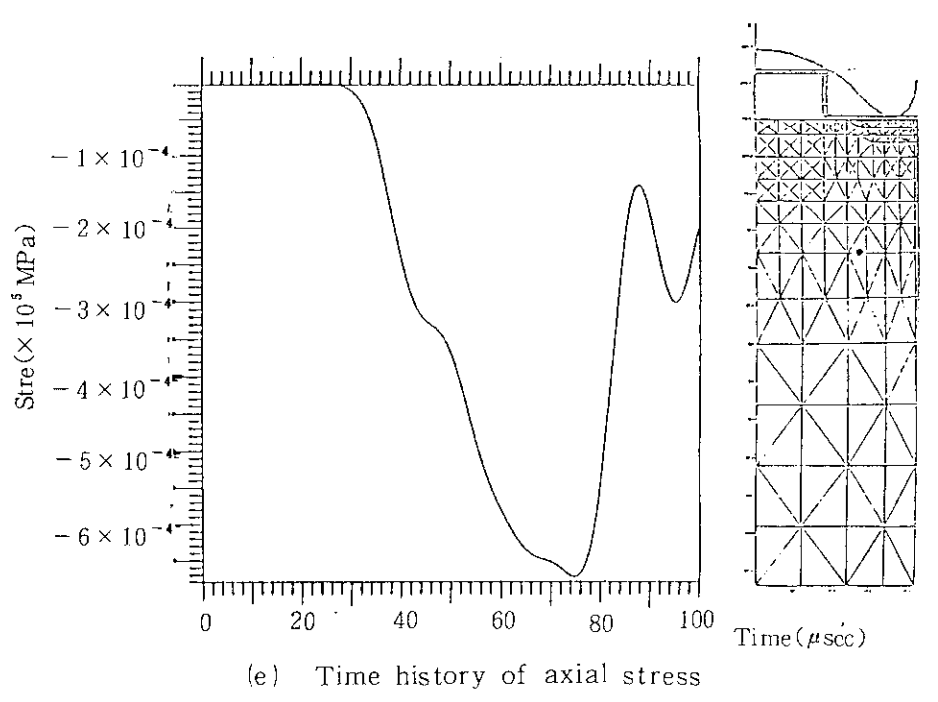
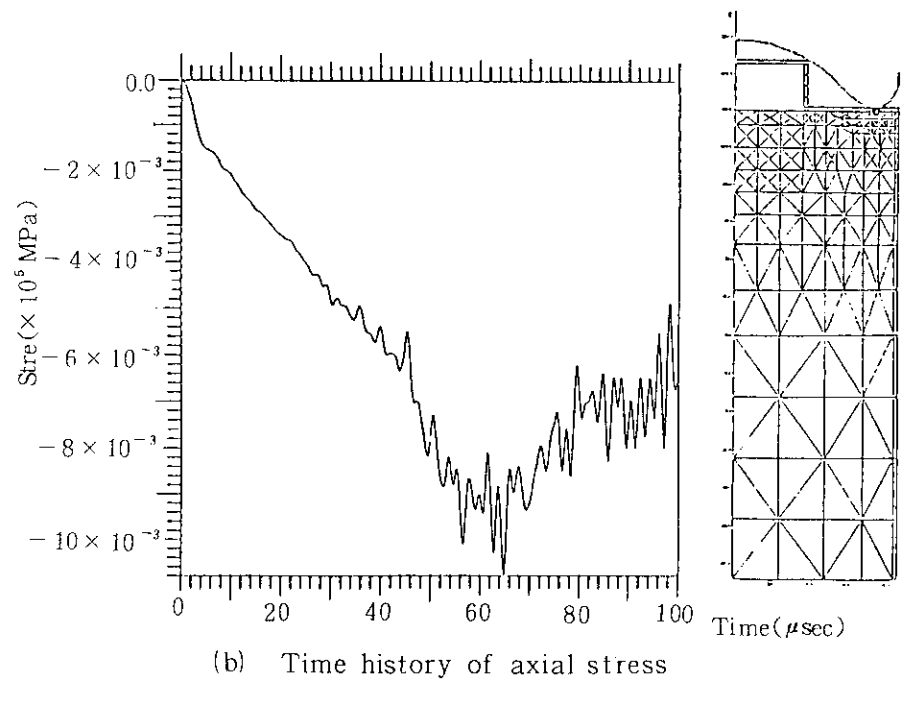
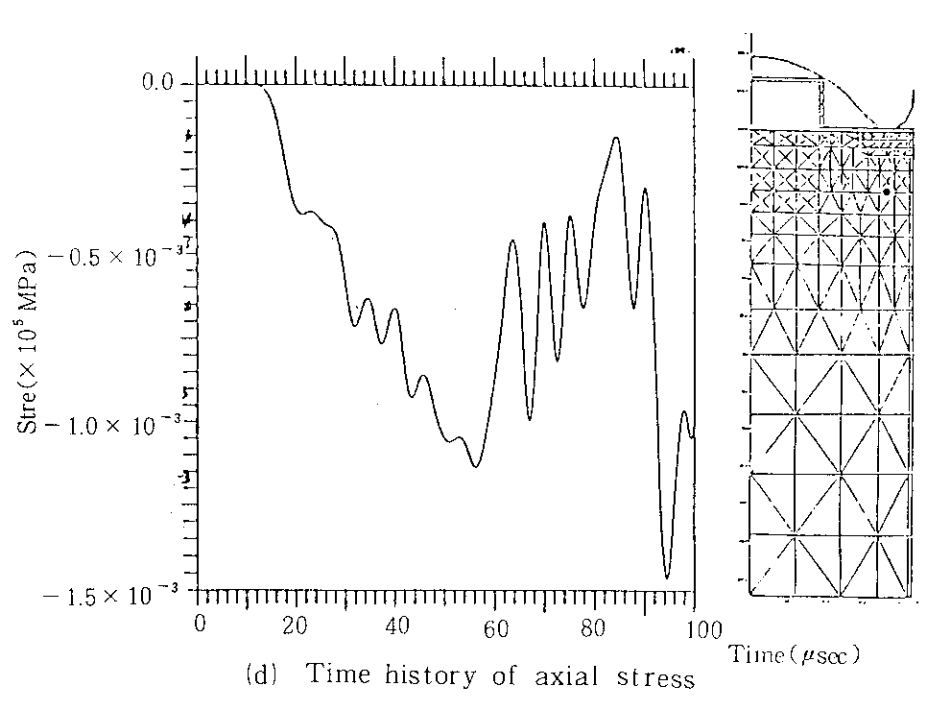
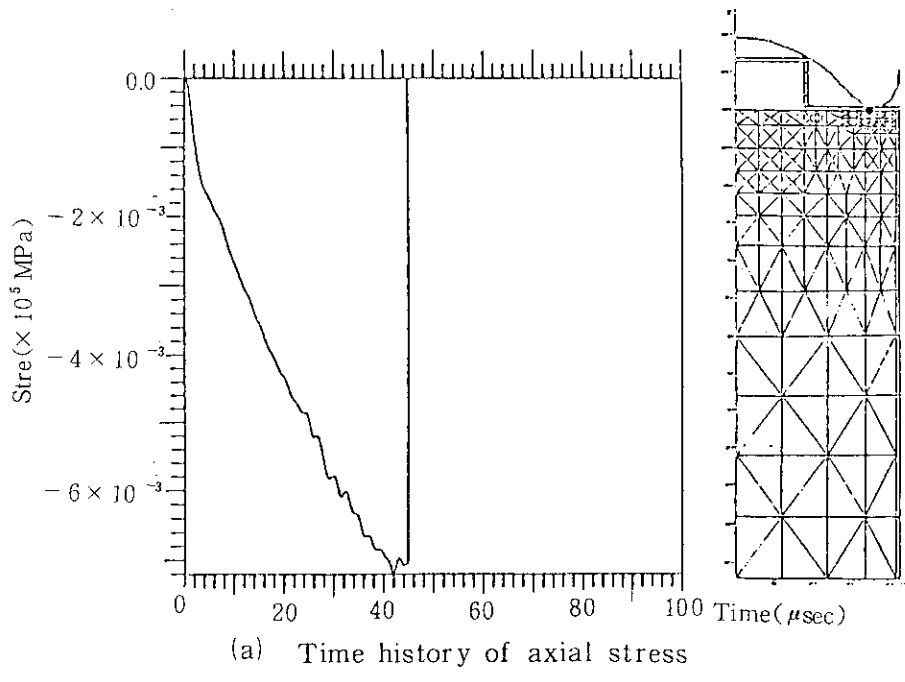


図 5.21 応力の時刻歴

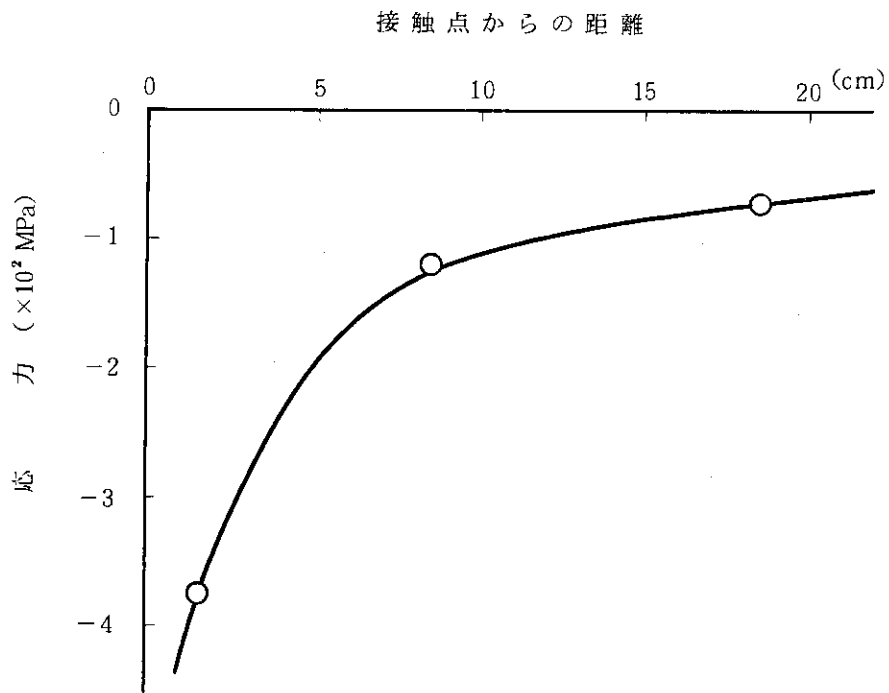


図 5.22 最大圧縮応力と接触点からの距離との関係

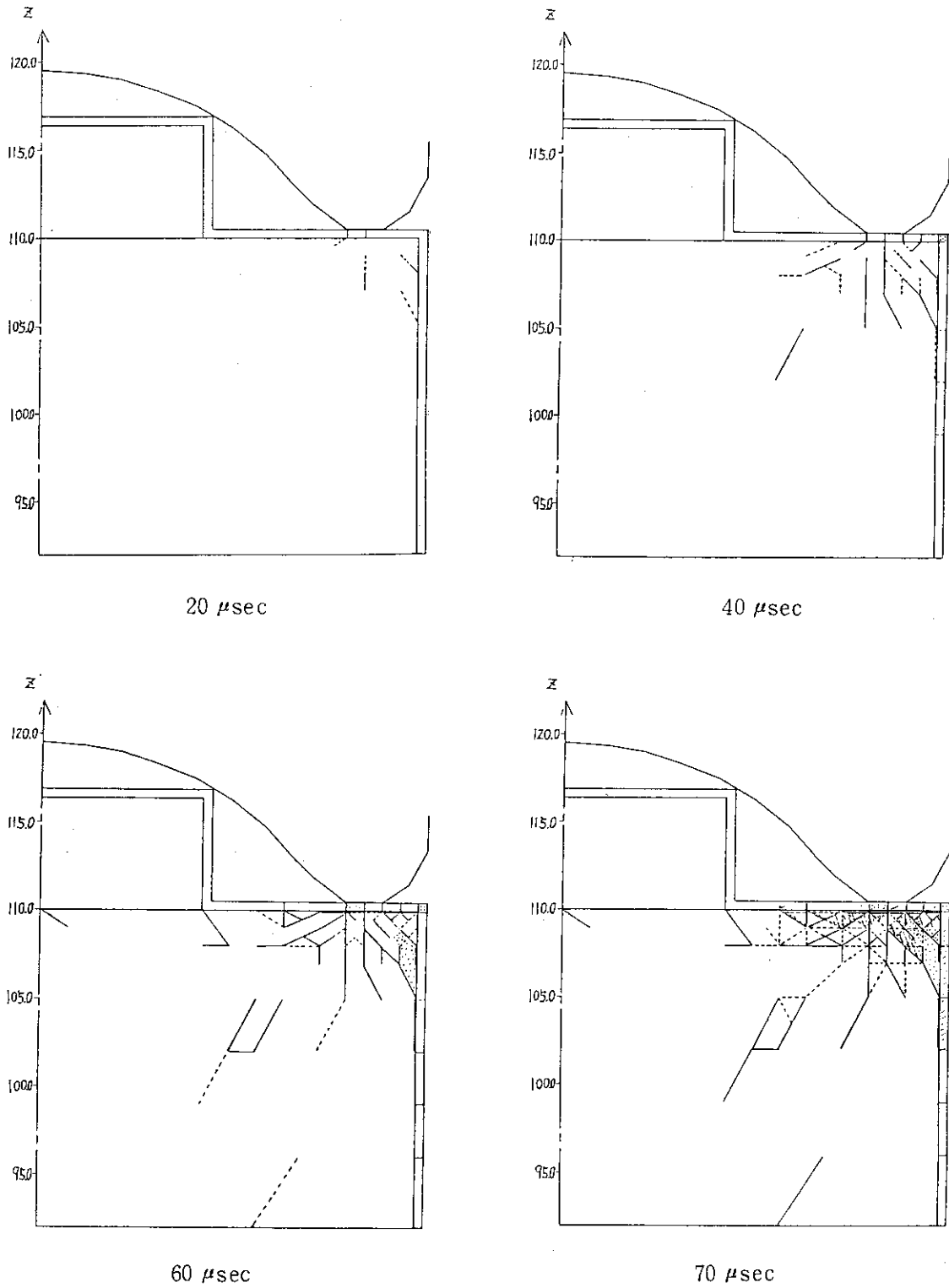


図 5.23 破壊の進展状況

6. 高レベル廃棄物ガラス固化体のコーナー落下解析

6.1 概要

下に述べるガラス固化体のコーナー落下問題を取り扱い、ADEKAT-Gコードの大変形解析機能を使って解析した。ADEKAT-Gコードの機能は、キャニスタの局所的な変形を解析するだけでなく、固化体がコーナー落下による衝突後、床が受ける反力によって固化体重心まわりに回転モーメントが生じ、急激な回転運動を引き起こす様子や、このモーメントのために起こる破壊の様子を解析することを可能にしている。

本章では、まず、コーナー落下による固化体全体の挙動をおおまかに把握し、次に、固化体の破壊について述べる。以下、前者の問題を「簡易モデルによるコーナー落下」、後者の問題を「3次元1/2モデルによるコーナー落下解析」と呼ぶことにする。

6.2 簡易モデルによるコーナー落下解析

(1) 解析概要

図 6.1 に示すガラス固化体が傾斜落下し、剛な床に衝突する場合の挙動を解析し、床反力によって生ずるモーメントにより引き起こされるガラス固化体の破壊を調べた。

コーナー落下の問題を扱う場合、通常変形の対称性を考慮した1/2モデルを用いる。しかし、このモデルを扱うには、解析自由度が膨大となり、計算機に対する負荷を考慮すると現実には実行困難なモデルである。このため、ここでは疑似3次元モデルを用いてシュミレーションを実施した。

ガラス固化体はその外側をキャニスタに覆われているが、ここでは簡易モデルであるため固化体のマクロな落下挙動に着目するため、被覆材となっているキャニスタと蓋部のキャニスタは解析には考慮にいれなかった。また、同様の理由から固化体底部の凹部はないものとした。さらに、疑似3次元モデルとして扱うため、固化体を図 6.1 に示すような形状とした。これは、固化体の長さはもとのままで、横幅を元の固化体の直径に等しくとり、厚みは固化体全体の重量が変化しないように換算した。

落下高さは9mとし、落下衝突した時の固化体の姿勢は、図 6.1 に示すように固化体の軸と床のなす角度が45°であるとし、衝突後、固化体が右まわりに回転するよう設定した。床は剛で摩擦のない滑らかなものとし、床と固化体のリバウンドを考慮することにした。

(2) モデル化及び解析条件

① 解析モデルの形状

高さ $l = 110.0$ cm、幅 43.0 cm、厚さ 33.77 cm の直方体とするが、固化体の衝突点で数値解析上は接触の取り扱いをする必要がある。ADEKAT-Gコードでは点の接触は取扱えないので、衝突点を図 6.2 に示すように面として仮定した。このことは、固化体が落下衝突直

後に局部的破壊を起こすことに対応しており、局部破壊後の挙動に着目するためである。

② 要素分割

図 6.3 に示すように、六面体及び五面体要素を用い要素分割する。床との接触点に近い部分は接触反力の伝達に方向性が生じないような配慮をした。y 方向の分割は行わなかった。

要素数	3次元要素	18
	接触要素	5
	剛体壁(床)要素	2
	スプリング(境界バネ)数	24
	総自由度数	108

③ 材料定数

ガラス固化体については表 3.1 の値を用いた。また、床の接触剛性は固化体のヤング率を用い摩擦は考慮しないことにした。

④ 初期条件

ガラス固化体全体に 9 m 落下する場合の衝突直前の速度を与える。図 6.1 に示したよう全体座標系を固化体の時刻ゼロでの軸にそって定義したので、初速度の成分 v_{0x} , v_{0y} , v_{0z} は

$$\begin{aligned}v_{0x} &= 9.390 \times 10^{-4} \text{ cm} / \mu \text{ sec} \\v_{0y} &= 0.0 \\v_{0z} &= -9.390 \times 10^{-4} \text{ cm} / \mu \text{ sec}\end{aligned}$$

となる。

⑤ 境界条件

図 6.3 に示したように固化体が床と接触している部分及びこれと接触する部分に接触要素を設ける。接触点では床反力のみを考慮し摩擦は取り扱わなかった。

⑥ 自由度

解析対象の形状及び変形は y 方向には変形しないので、全要素について y 方向の並進変位、x 軸及び y 軸まわりの回転自由度を拘束した。従って、これらの拘束自由度数から差し引くと、解析自由度は 54 である。

⑦ 時間ステップ幅及び解析時間

固化体内を伝播する衝撃波速度 v_e は

$$v_e = \sqrt{(K + 4G/3) / \rho}$$

で与えられる。ここに

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = 0.5603 \text{ Mbar} \quad (5.603 \times 10^{-2} \text{ GPa})$$

$$G = \frac{E}{2(1-2\nu)} = 0.3362 \text{ Mbar} \quad (3.362 \times 10^{-2} \text{ GPa})$$

であるから、

$$v_e = 0.611 \text{ cm} / \mu \text{ sec}$$

一方、要素の最小長さ l_{\min} を 10 cm とし余裕率を 0.1 とすると、時間ステップ幅 Δt は、 $1.64 \mu \text{ sec}$ となるので、これを用いた。

また、応力波が固化体頭部に達する時間は $T_e = l / v_e \doteq 180 \mu \text{ sec}$ である。

(3) 解析結果と考察

① 変位、速度、加速度の時刻歴

図 6. 4 は x 方向、z 方向の加速度と y 軸まわりの角加速度の時刻歴である。0.185 $\mu \text{ sec}$ 付近から加速度の挙動が急激に変化している。これは後で述べるように引張破壊が生じた影響である。

② 応力と歪の時刻歴

図 6. 5 と図 6. 6 は歪と応力の時刻歴である。a 点では、 $t = 18.04 \mu \text{ sec}$ で引張破壊を生じており、これ以後は応力はゼロとなっている。一方、対応する歪は、引張破壊を生じた後も増加しており $t = 0.165 \mu \text{ sec}$ 付近で最大となっている。b 点では応力と歪は、圧縮側にでており、圧縮応力の最大値は $-2.1 \times 10^2 \text{ MPa}$ であり、圧縮破壊応力 $-1.30 \times 10^3 \text{ MPa}$ よりもかなり小さい。c 点での応力と歪は、 $t = 178.0 \mu \text{ sec}$ までは圧縮側にでているがそれ以後引張応力状態に転じ $t = 186.96 \mu \text{ sec}$ では引張破壊に至っている。この引張破壊は固化体の頭部で反射された圧縮応力波となって伝播してくるためと考えられる。

③ 応力分布の時間変化

図 6. 8 は z 方向応力の時間 $t = 49.2 \mu \text{ sec}$, $98.4 \mu \text{ sec}$, $147.6 \mu \text{ sec}$, $196.8 \mu \text{ sec}$ と約 50 $\mu \text{ sec}$ 毎に示している。49.2 $\mu \text{ sec}$ (a) では、応力は図中に示した (ii) のレベルまでしか上方に伝播していない。また、(i) (ii) のレベルでも中心軸より左側には応力波の値も小さく、ほとんど伝播していないと思われる。これは固化体の衝突による応力波は床面から垂直上方につたわっていくためであり (a) 中の 2 点鎖線で示した付近が、この時の応力波の先端を示していると思われる。98.4 $\mu \text{ sec}$ (b) では、図中に示した 2 点鎖線まで応力波が到着していると思われる。応力はレベル (i) (v) のほとんど圧縮状態であり、特に中心軸の右側ではその大きさもかなり大きい。一方、中心軸の左側は右側に比べて圧縮応力の値が低くレベル (i) の左端では引張側の応力も現れている。これは、図 6. 7 に示すように圧縮波が上方の側面で反射し下側から伝わってくる圧縮波を打ち消すように働くからと考えられる。147.6 $\mu \text{ sec}$ になると応力波は固化体頭部付近まで伝播しており、196.8 $\mu \text{ sec}$ では今度は固化体頭部で反射した応力波のため × 印を付けた点で引張破壊を生じている。

④ 固化体の変形

図 6. 9 に固化体の変形の様子を示す。図には各要素の重心点変位のベクトルを示した。固化体頭部がほぼ床に垂直な方向に変位しているのに対し、床との衝突の影響を受けている下部は左側にスライドしている。

図 6. 4 に固化体頭部の z 方向の加速度の時刻歴を示しているが、178 $\mu \text{ sec}$ までは加速度が上向きに働いているのに対し、この時刻以後は下向きの加速度となっている。この挙動は固化体頭部の 2 次衝突に寄与する。

⑤ 固化体の破壊

図 6.10 に固化体内の亀裂位置と亀裂発生時刻を示す。①④で示される亀裂は、固化体の衝突が直接の原因となって生じていると考えられるのに対し、⑤⑥の亀裂は応力波の反射によって起きる亀裂と考えられる。

6.3 3次元 1/2モデルによるコーナー落下解析

(1) 解析概要

ガラス固化体が9mの高さから傾斜落下し、剛な床に衝突する場合に、固化体下部の衝突の影響の最も大きいと思われる部分について破壊解析を行った。

図 6.11 は、この固化体下部 1/2 モデルを示しており、固化体全長 110 cm のうちの下部 43 cm の部分を対象とした。ガラス固化体はその側面と底部をキャニスタに覆われており、底部に凹部を有する。落下衝突時の固化体の姿勢は図 6.11 に示すように固化体の軸と床のなす角度が 45° であるとした。床は剛で摩擦のない滑らかなものとし、床と固化体の接触を考慮して解析した。

(2) 解析条件とモデル化

① 解析モデルの形状

図 6.11 のような底部に凹部を有する外径 43 cm 高さ 43 cm の円柱形状とした。キャニスタの厚さ 0.5 cm で固化体の剛面と底部を覆っている。

② 要素分割

図 6.12 に示すように六面体及び五面体要素と接触要素、剛体床要素を用いて要素分割する。床との接触点に近い部分は細い要素で、接触反力の伝達が円滑に進むよう分割した。また、円周方向の分割では半円を 6 分割し、接触点に遠ざかるにしたがって粗くなる不等分割とした。

(a) は $x-z$ 面に表れる要素分割を示しており、分割のパターンは固化体中心軸について対称とした。(b) はキャニスタ部のみの要素分割の様子を示し、(c) ~ (h) は固化体の要素分割を円周方向に回転して示した。接点数、要素数等は以下のとおりである。

接点数	508
通常要素数	776
接触要素数	6
剛体壁要素数	1
スプリング数	1519

③ 材料定数

表 3.1 に示す。

④ 初期条件

ガラス固化体全体に、9m落下する場合の衝突直前の速度を与えた。図 6.11 に示したように全体摩擦座標系を固化体の時刻ゼロでの軸にとって定義したので、初速度の成分 v_{0x} , v_{0y} , v_{0z} は、

$$v_{0x} = 9.390 \times 10^4 \text{ cm} / \mu \text{ sec}$$

$$v_{0y} = 0.0$$

$$v_{0z} = -9.390 \times 10^4 \text{ cm} / \mu \text{ sec}$$

となる。

⑤ 境界条件

図 6. 13 に示すように固化体が床接触している部分及び隣接している部分に接触要素を設けた。接触点では反力のみを考慮し、摩擦は無視した。 $y = 0$ の $x - y$ 面に対称条件を設定するため、この面には対称要素を使ってこの処理を行った。

⑥ 自由度

対称性による拘束を自由度を持たない対称要素により処理したので、総自由度数は通常要素の持つ自由度のみで (通常要素数) \times (6 自由度) = 4656 である。

⑦ 時間ステップ幅及び解析時間

固化体を伝播する衝撃波速度と要素最小長さから時間ステップ幅を決定した。ここでは、 $\Delta t = 0.1 \mu \text{ sec}$ とした。解析時間は衝撃波が図 6. 11 の頭部に達するまでとし、 $T_e = 70.3 \mu \text{ sec}$ となるので、ここでは $75 \mu \text{ sec}$ まで計算した。

(3) 解析結果と考察

① 加速度の時刻歴

x 方向及び z 方向の加速度の時刻歴を図 6. 14 に示す。出力点は図中に示してあるように、 $y = 0$ の $x - z$ 面に近く、衝突点に近い要素から中心軸近くまでの 6 要素についての結果である。(c) (d) は衝突点からそれぞれ約 10 cm, 約 21.6 cm 上方の要素の加速度である。これらの点に衝撃波が到達する時刻は約 $14 \mu \text{ sec}$ 及び $23 \mu \text{ sec}$ となっているが、(距離) \div (衝撃波速度) よりこの時刻を求めると要素 31 に対して $16.4 \mu \text{ sec}$, 要素 39 に対して $35.4 \mu \text{ sec}$ となる。要素 31 については両者はほぼ一致しているが、要素 39 については解析結果の方が約 65% 小さく、従って波が早く伝わって来ていることになる。(a) (e) を見ると約 $47 \mu \text{ sec} \sim 50 \mu \text{ sec}$ にかけて大きな加速度を生じていることがわかる。これは後で述べるように要素 3 と 1010 の間のバネが圧壊したために生じるものである。即ち、この部分のガラスが圧壊したことを示している。ADEKAT-G コードではバネの切断によって圧壊を表現し、圧壊後は特別な処理を行っていない。従って圧壊したバネに隣接する要素、ここでは 3 番と 1010 番の要素は、圧壊時に非常に大きな反力を受けている。加速度に見られる $47 \mu \text{ sec}$ 以後の挙動は、この反力の影響が非常に大きいことをしめしている。ADEKAT-G コードの圧壊後の処理については今後検討を必要とする部分であり、 $47 \mu \text{ sec}$ 以後のデータは実際の現象を模擬しているとは限られない。また、この圧壊の影響は波として固化体内を伝播して行くので他の箇所では、この影響が現れる以前の結果についてのみここで検討することとする。例えば (b) (f) では $55 \mu \text{ sec}$ 前後にこの影響が現れ始めている。この図で示されている要素 1013 は自由表面にもなっている。

② 応力の時刻歴

図 6. 15 は応力の時刻歴図である。出力図は図中にスプリング番号で示した位置の応力で、○印は円周方向応力を、⊙印は矢印の方向に働く要素境界に垂直な応力であることを示す。

(h) 図は前述のように約 $47 \mu\text{sec}$ で圧縮強度に達し圧壊を生じることを示している。(a) (f) 図はいずれも引張による破壊が起こっていることを示している。(g) はキャニスタと剛体床の衝突時に発生する接触力を示したもので、(a) 図は接触応力(圧力)である。接触圧は、 $47 \mu\text{sec}$ で最大 140kg/cm^2 となっているが、圧力及び時間的推移は図(h)の圧壊をおこしたバネの挙動と類似している。

③ 破壊の進展

図 6. 16 は落下衝突によってガラス固化体内に生ずる破壊の進展の様子を示す。 $10 \mu\text{sec}$ ~ $30 \mu\text{sec}$ にかけて、接触面の隣接する固化体とキャニスタの接触部がはがれ、それが時間と共に進行しているのがわかる。 $40 \mu\text{sec}$ では対称面 ($y = 0$, $x - z$ 面) 内にも破壊が入っているのがわかる。 $50 \mu\text{sec}$ では中心部に破壊が入っており、この破壊は落下衝突点から進行している破壊とは別と考えられる。 $70 \mu\text{sec}$ では固化体凸部がほぼ破壊されているのがわかる。 $70 \mu\text{sec}$ における破壊の領域を略図で示すと図 6. 17 のようになり、衝突点と反対側の凸部は全く破壊を生じていない。

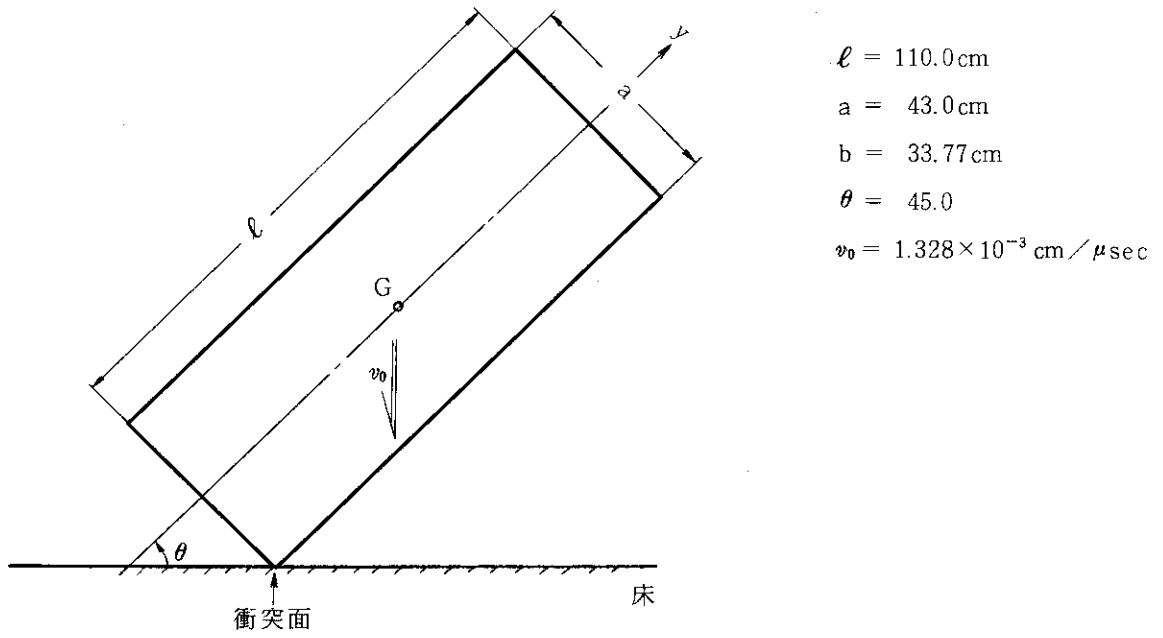


図 6.1 コーナー落下姿勢

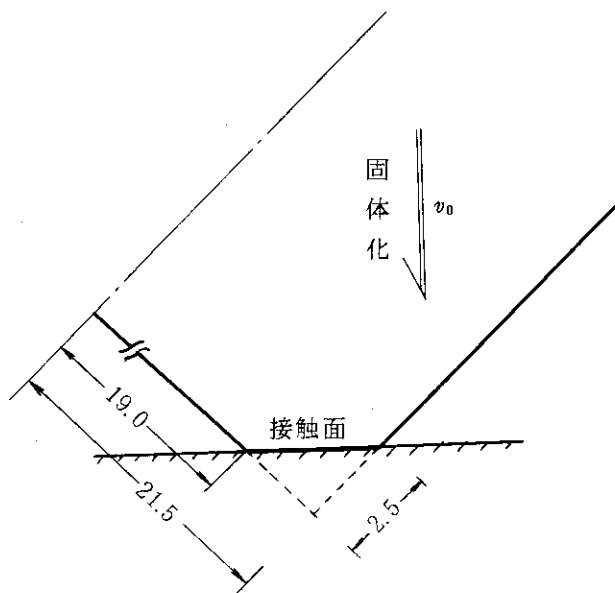


図 6.2 固化体と床の接触面

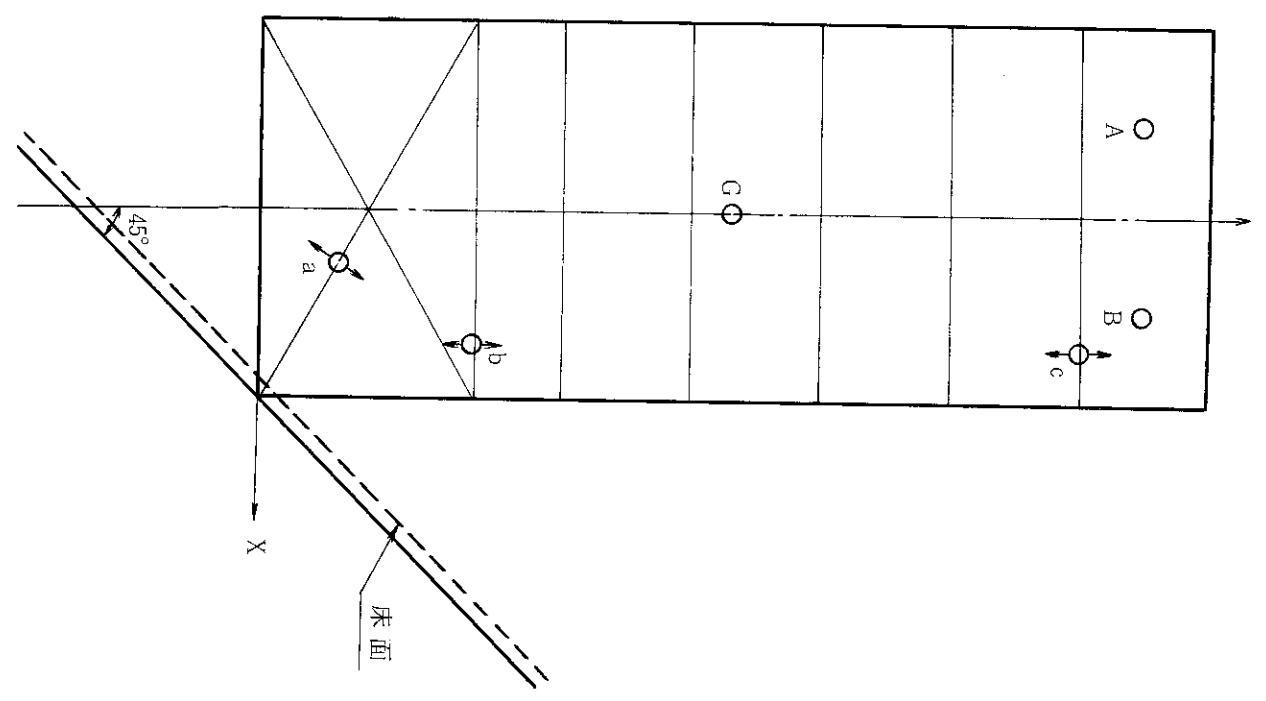
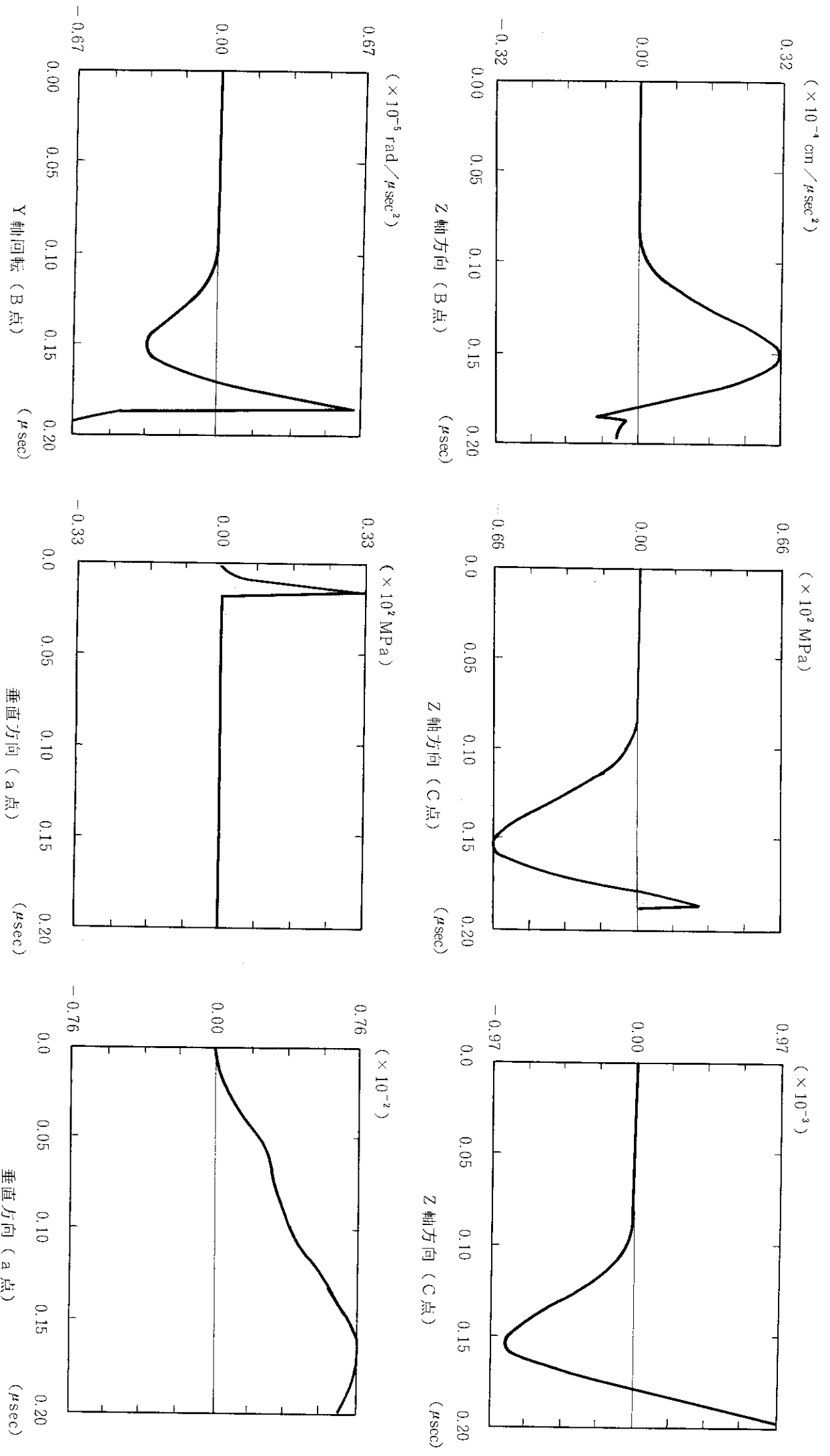
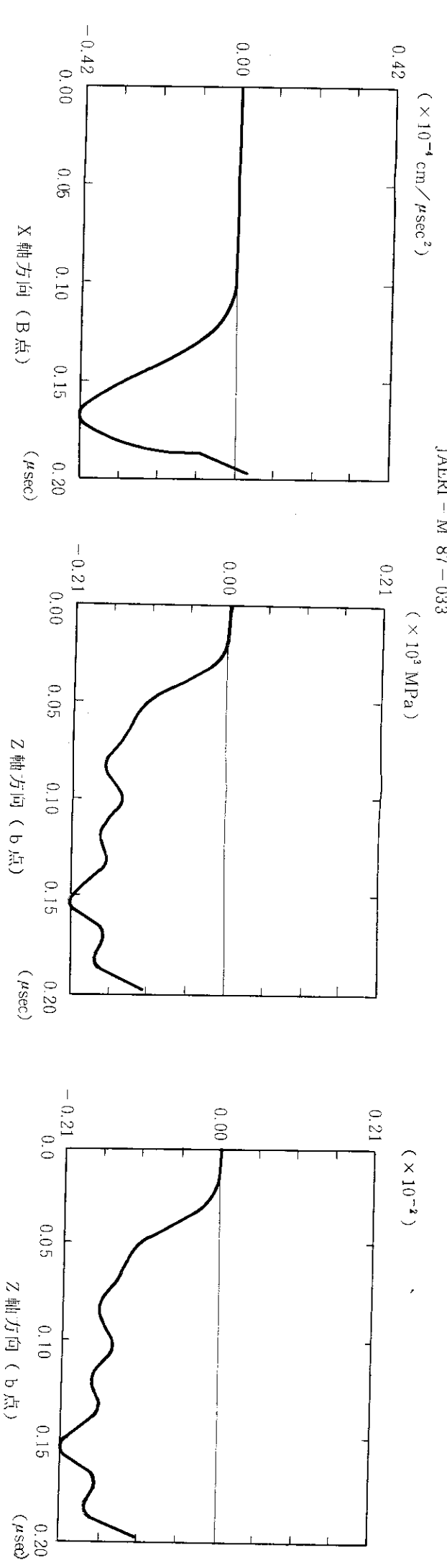


図6.3 要素分割及び出力点

図6.4 加速度

図6.5 応力

図6.6 歪

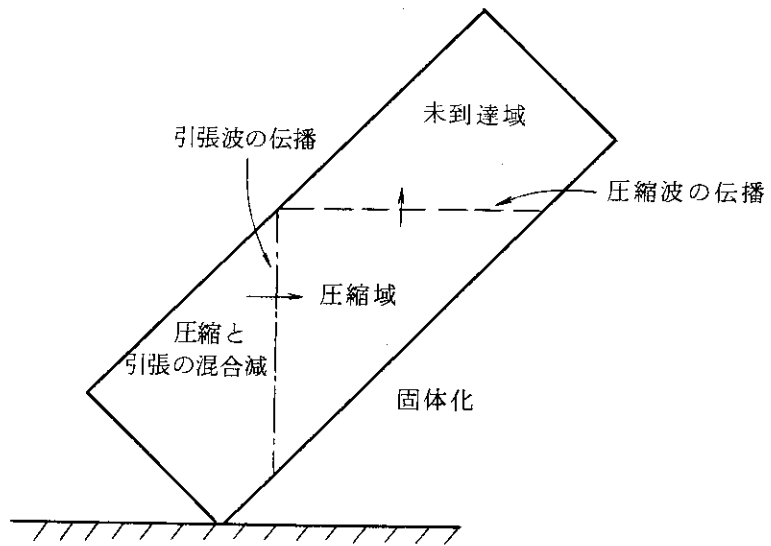


図 6.7 固化体内を伝播する応力波の様子

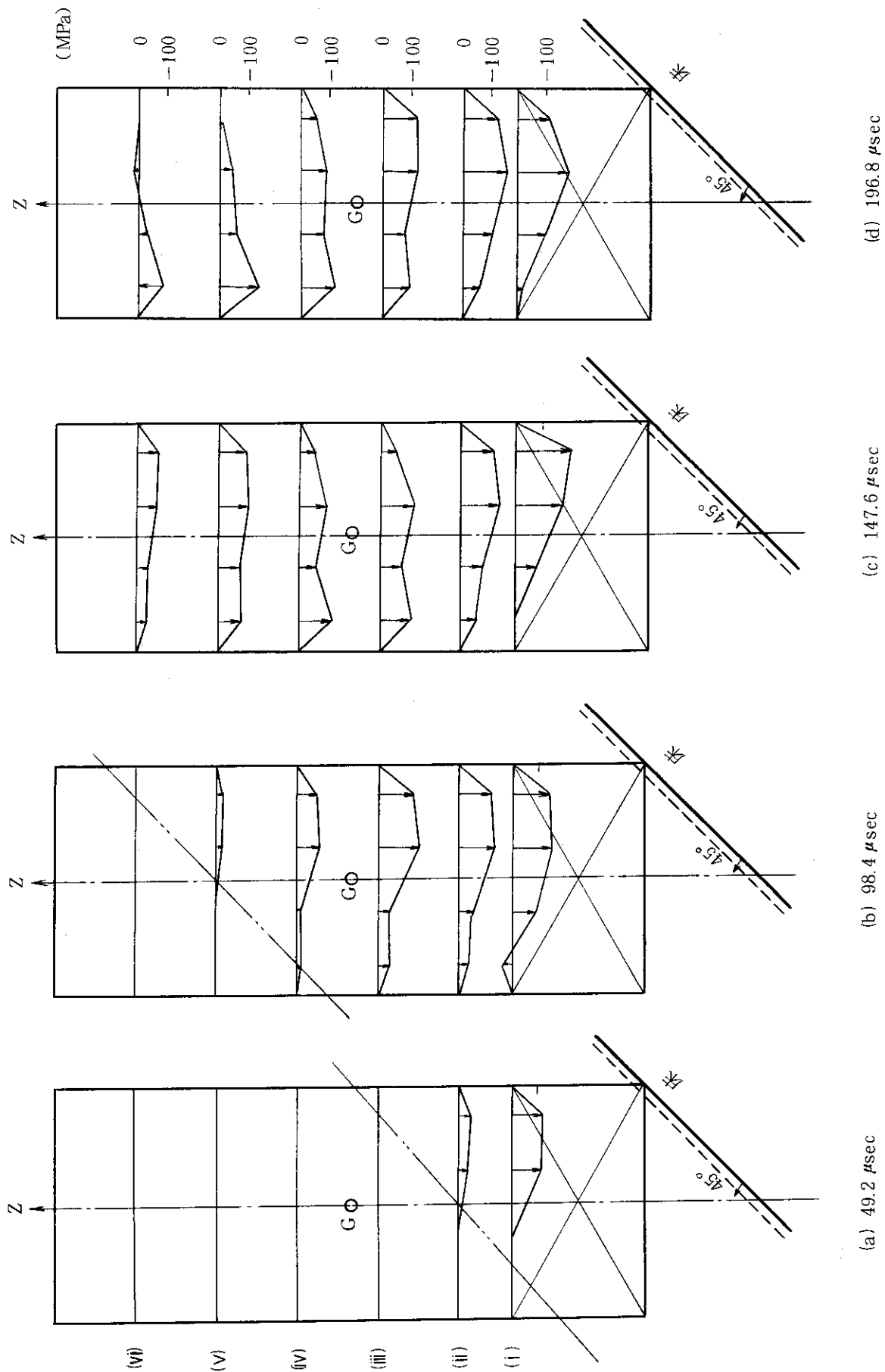


図6.8 Z方向の応力分布の時間変化

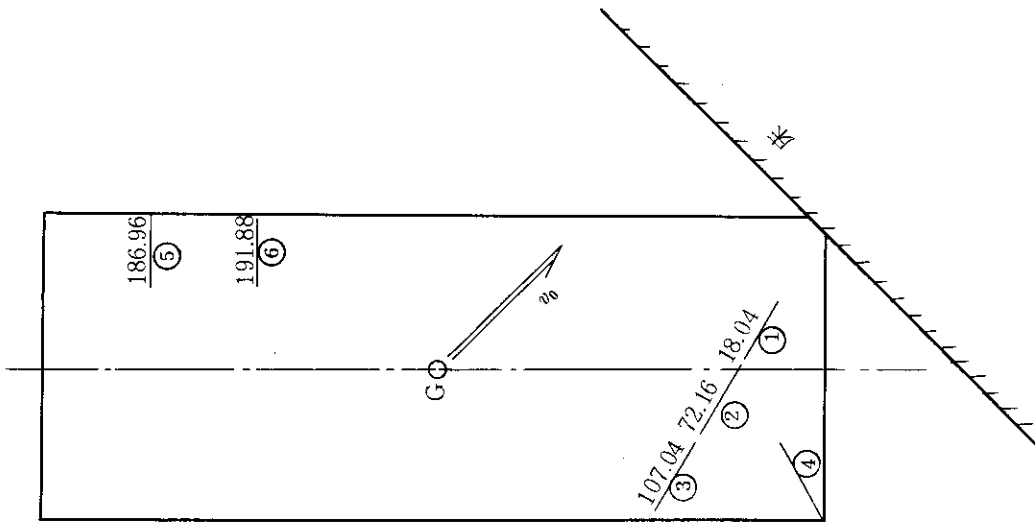


図 6.9 要素重心の変位ベクトル
($t = 196.8 \mu\text{sec}$)

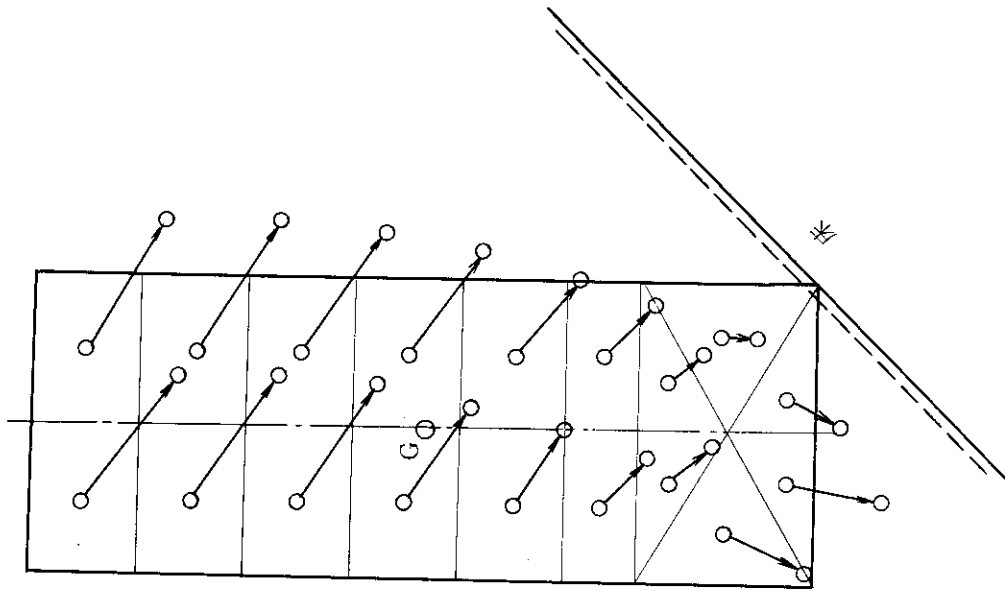


図 6.10 固体内の亀裂位置と発生時刻
(μsec)

○の数字は発生順序

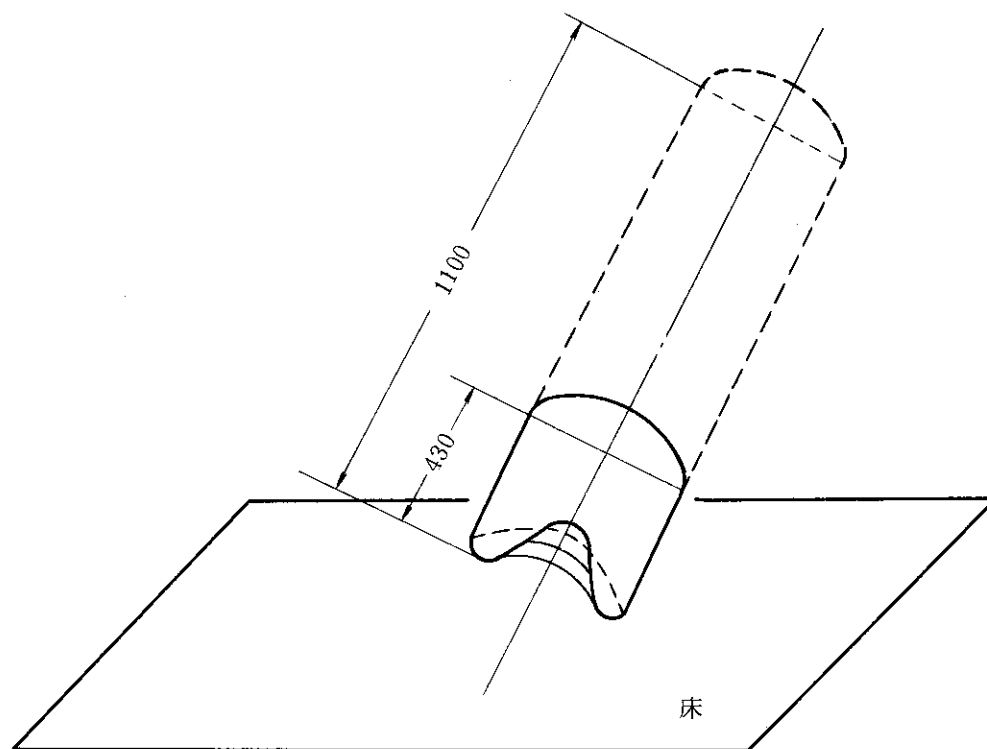


図 6.11 ガラス固化体のコーナー落下用固化体下部
1/2 モデル

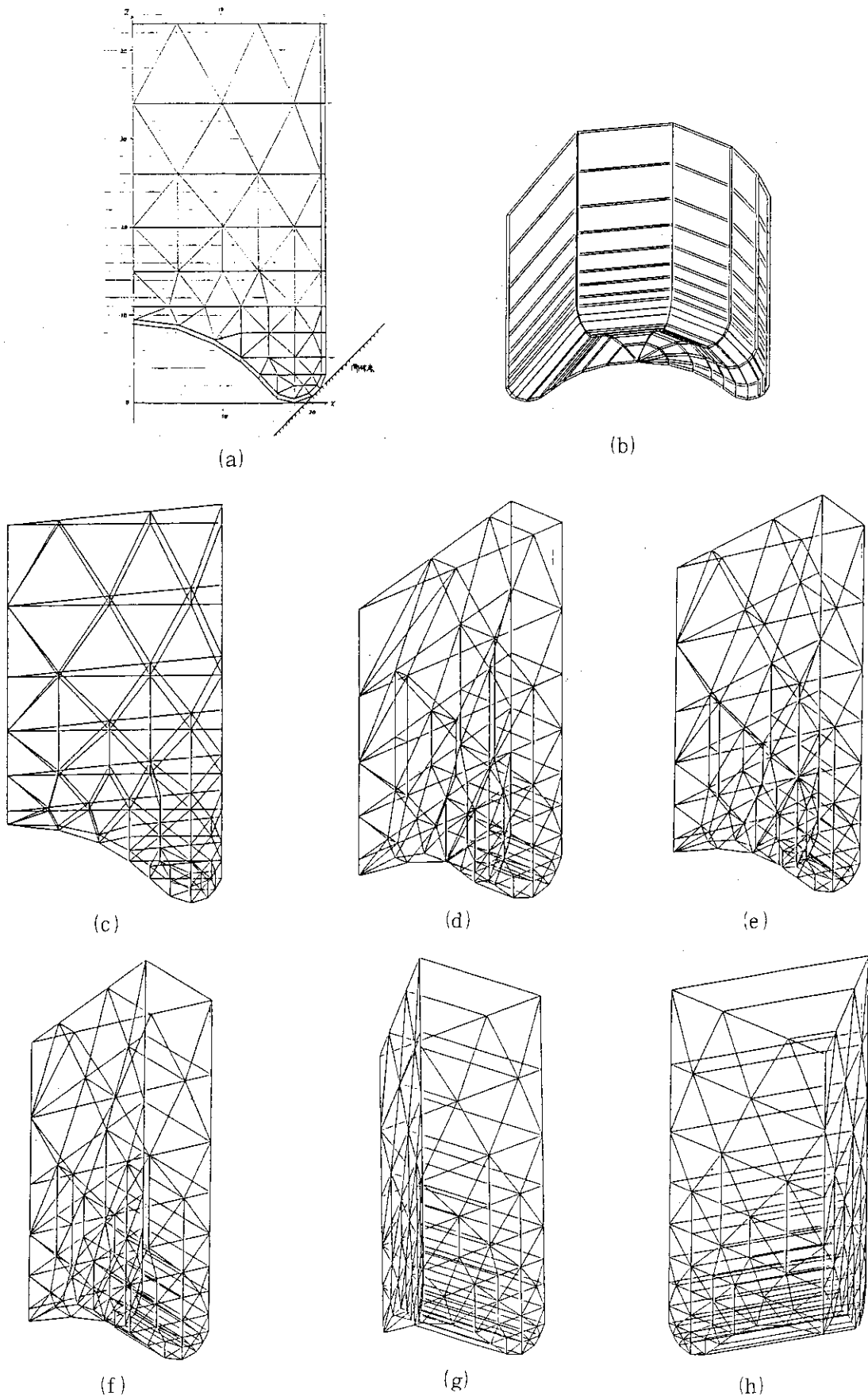


図 6.12 要素分割

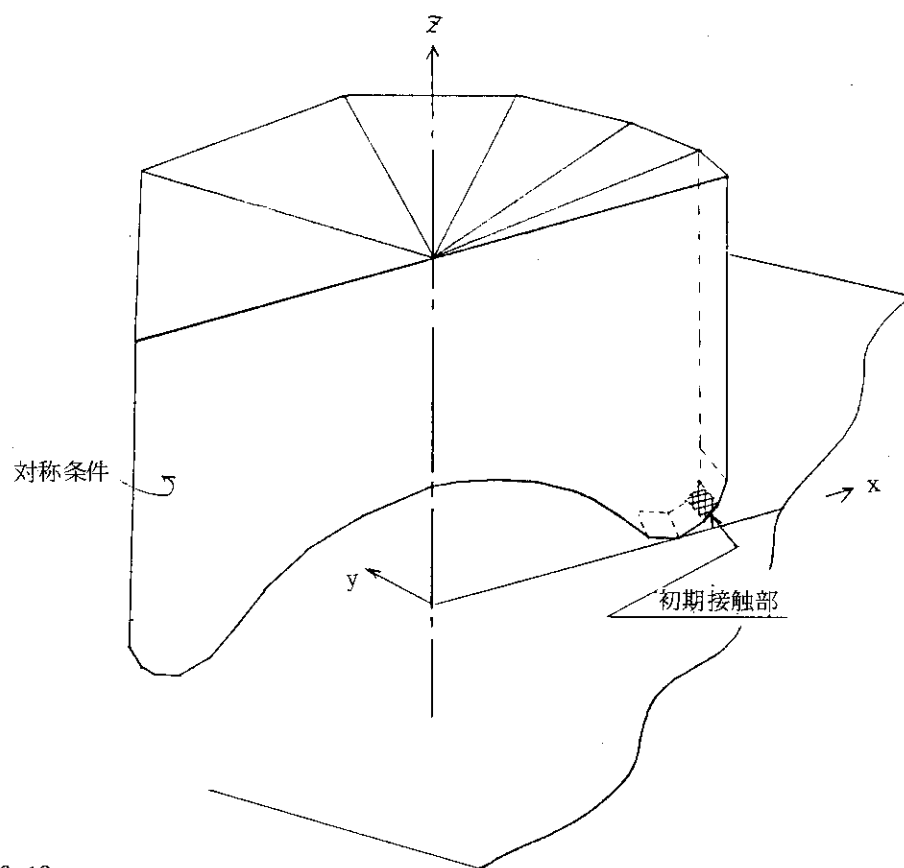
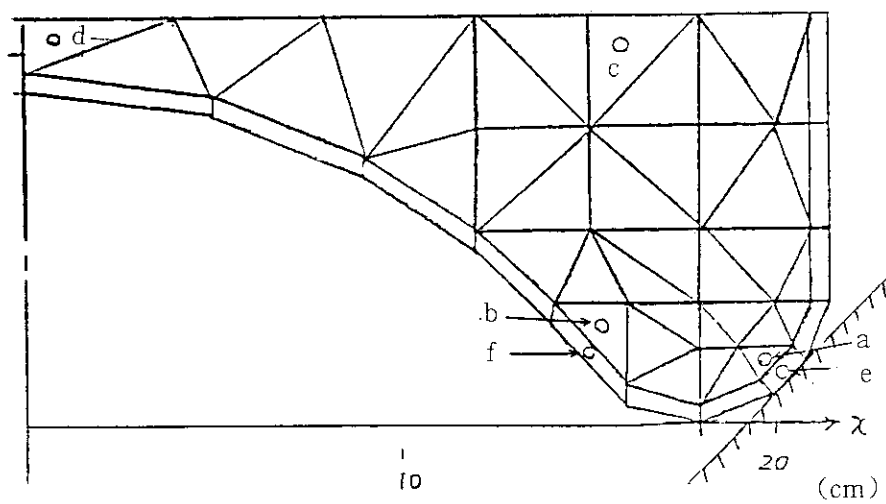
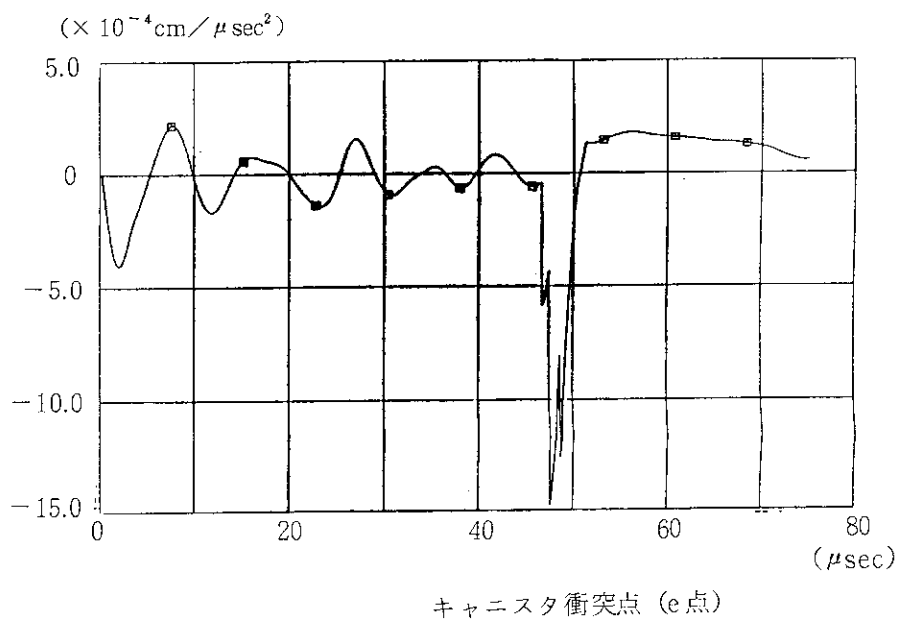
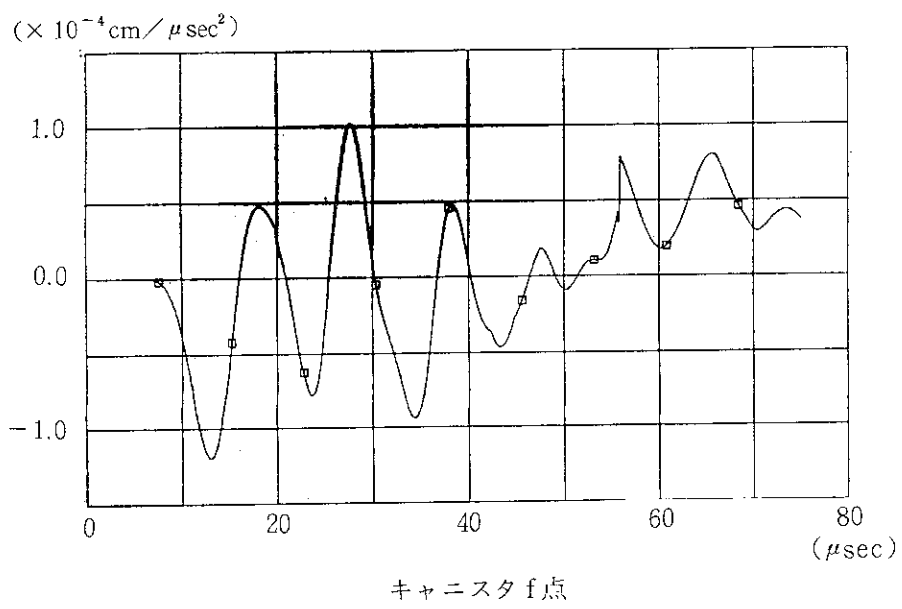
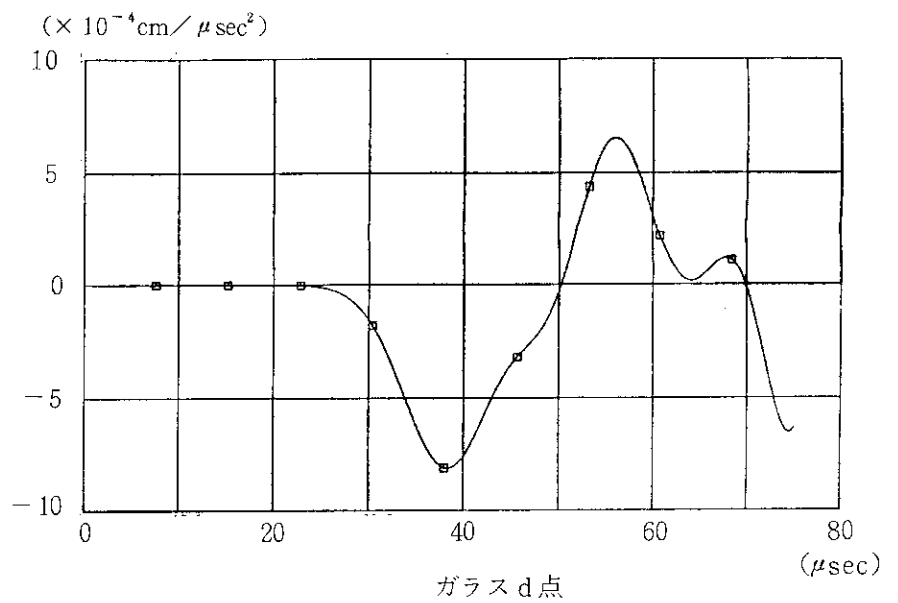
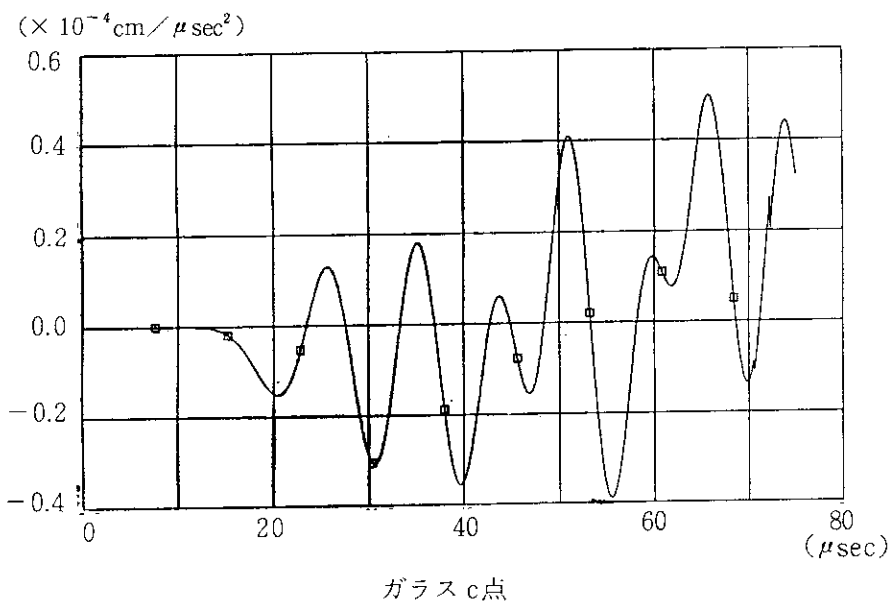
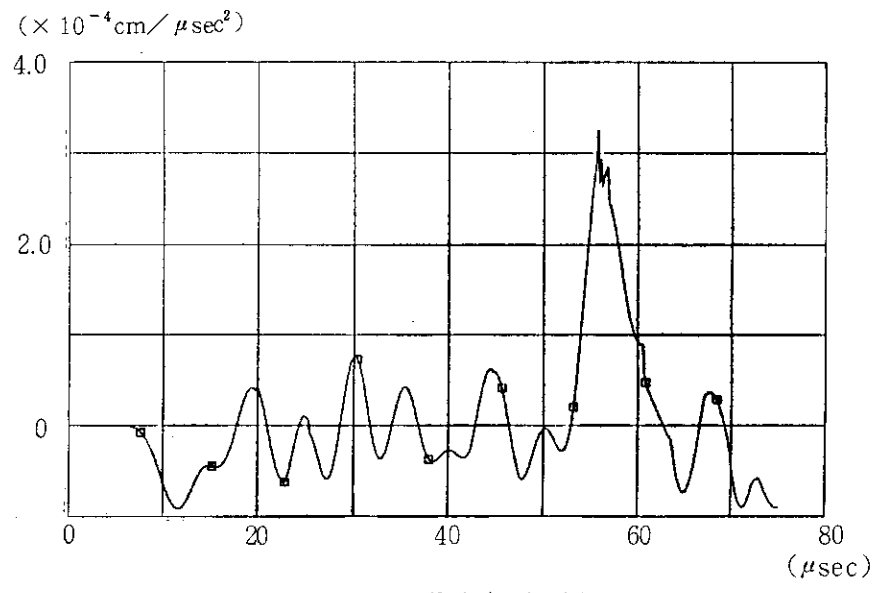
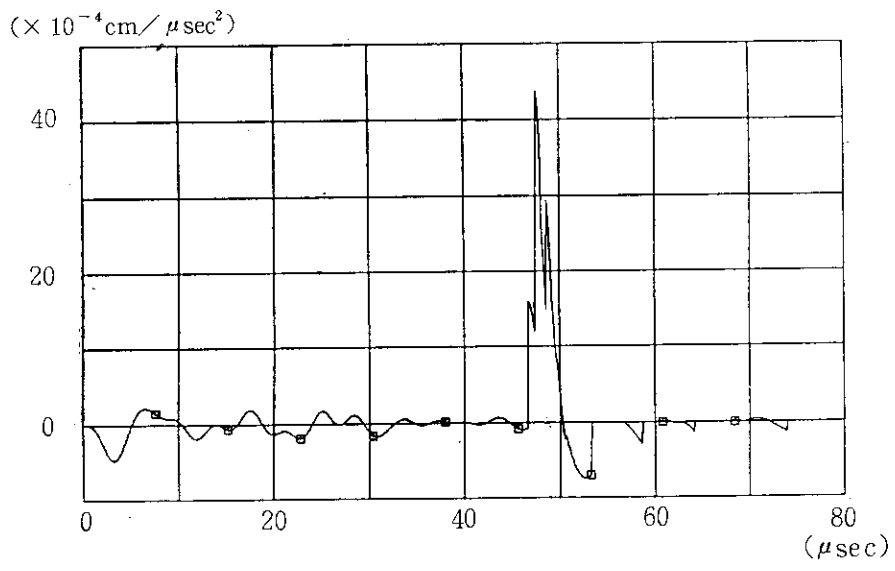


図 6.13 接触要素の設定部位



出力点

図6.14 加速度 (X軸方向) 時刻歴

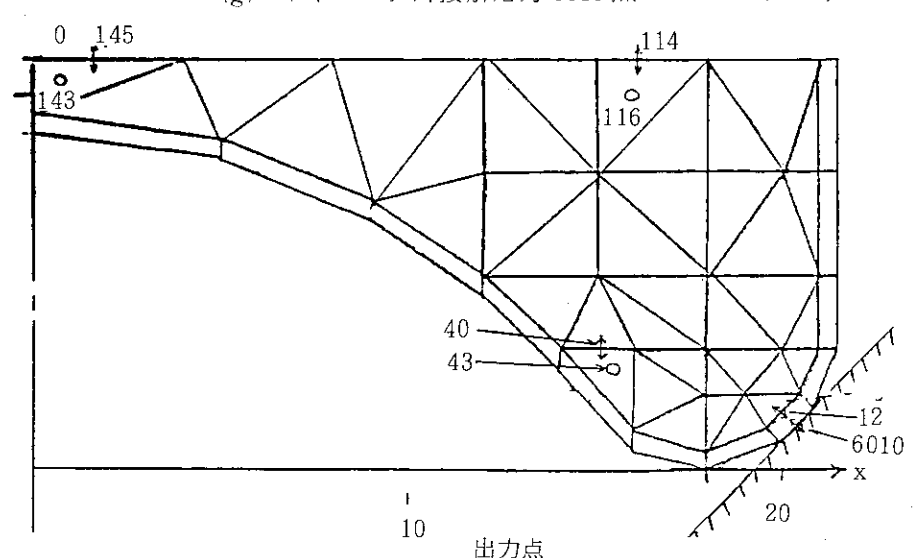
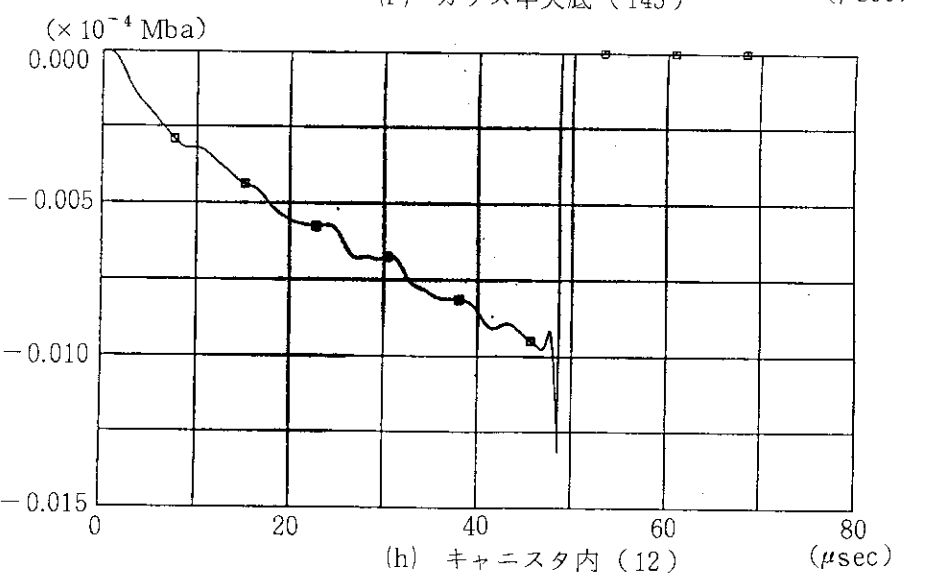
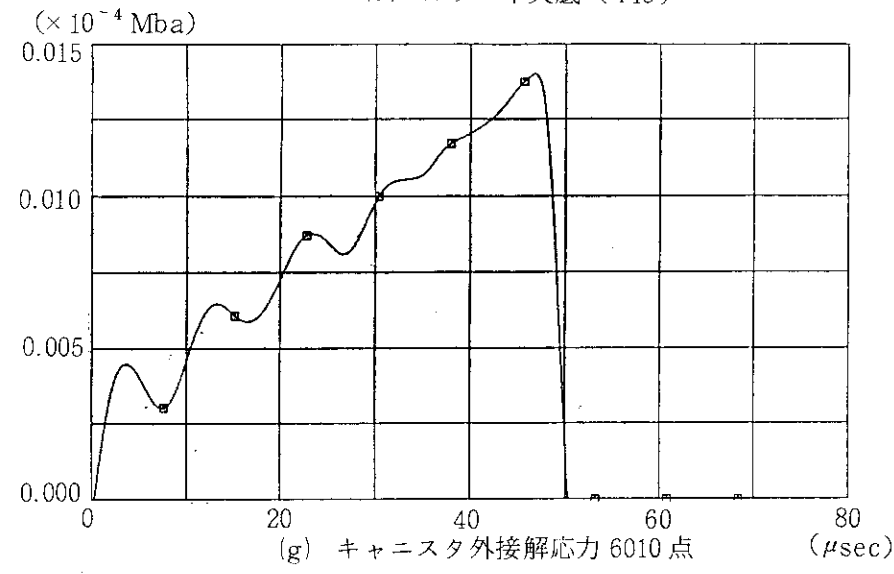
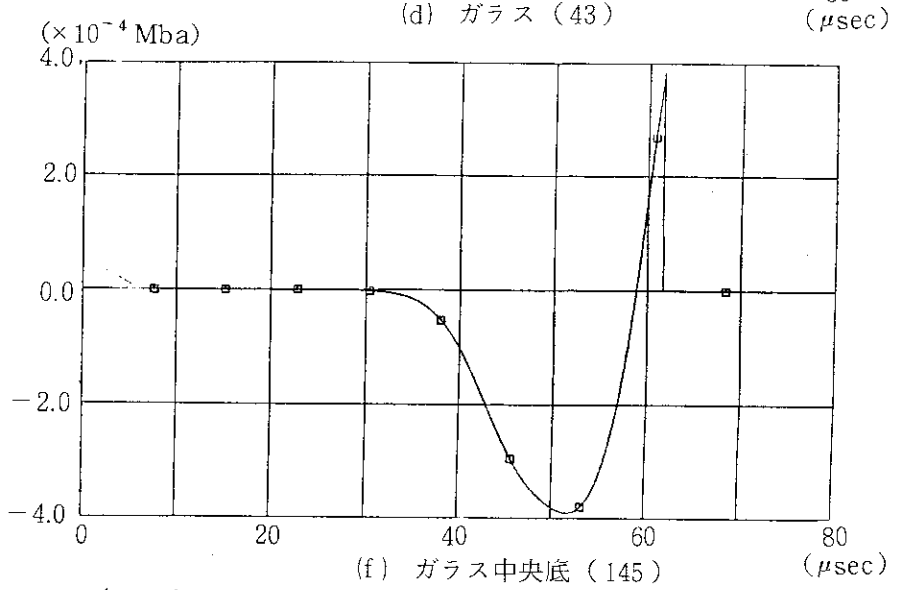
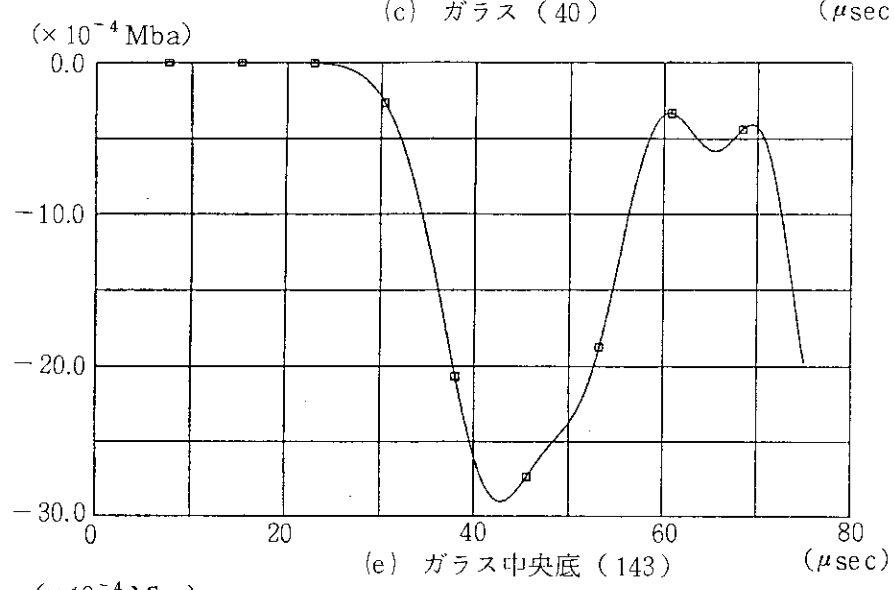
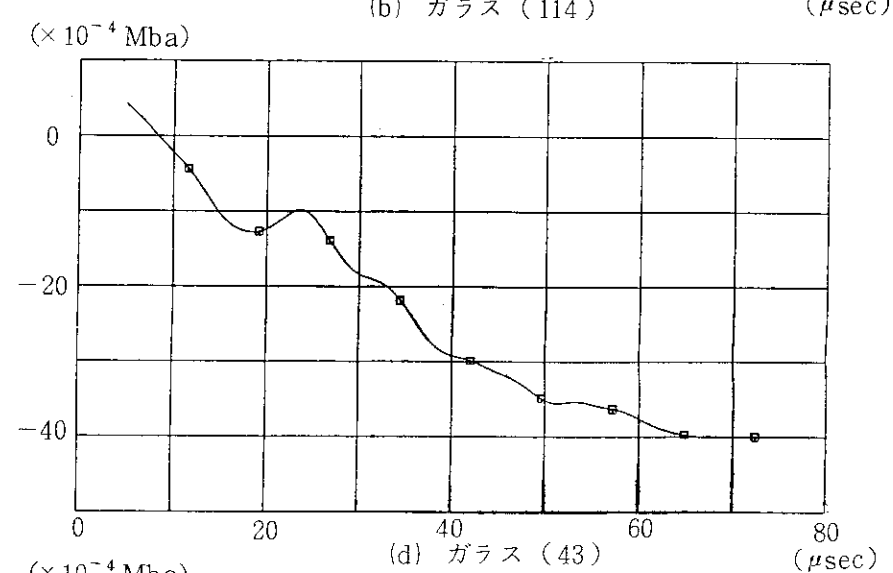
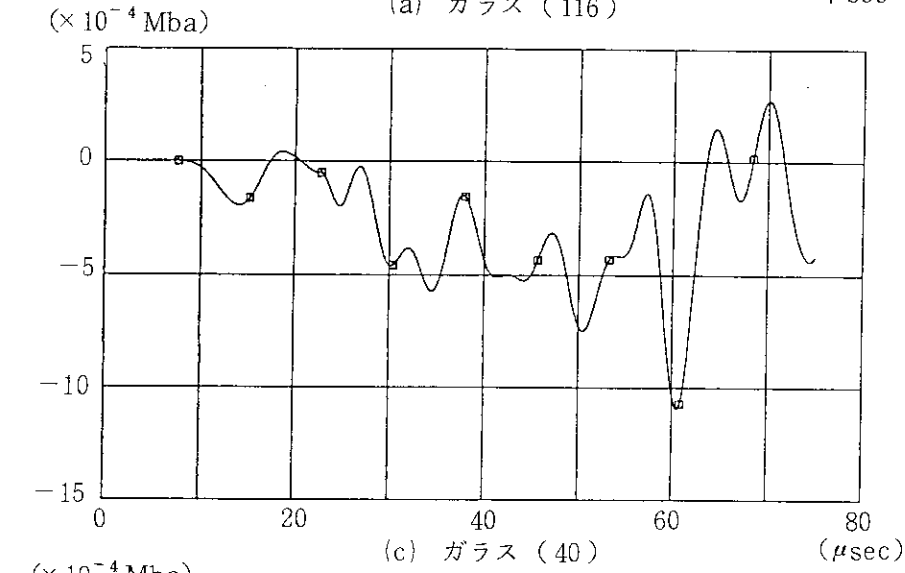
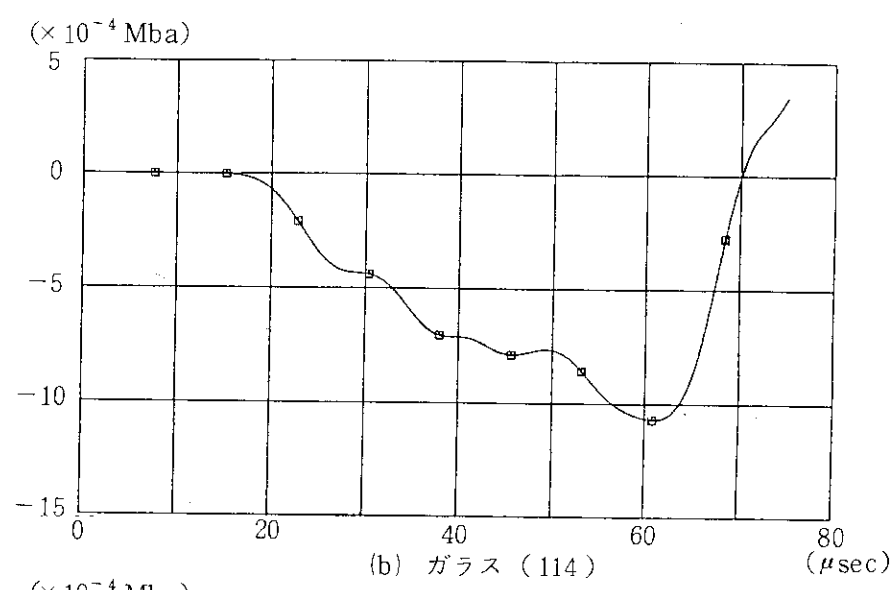
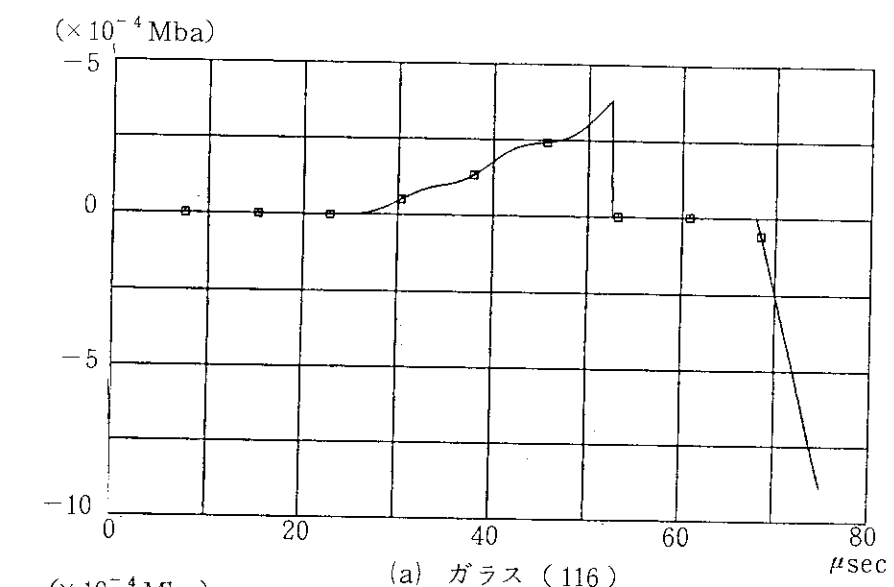


図 6.15 応力 (X軸方向) 時刻歴

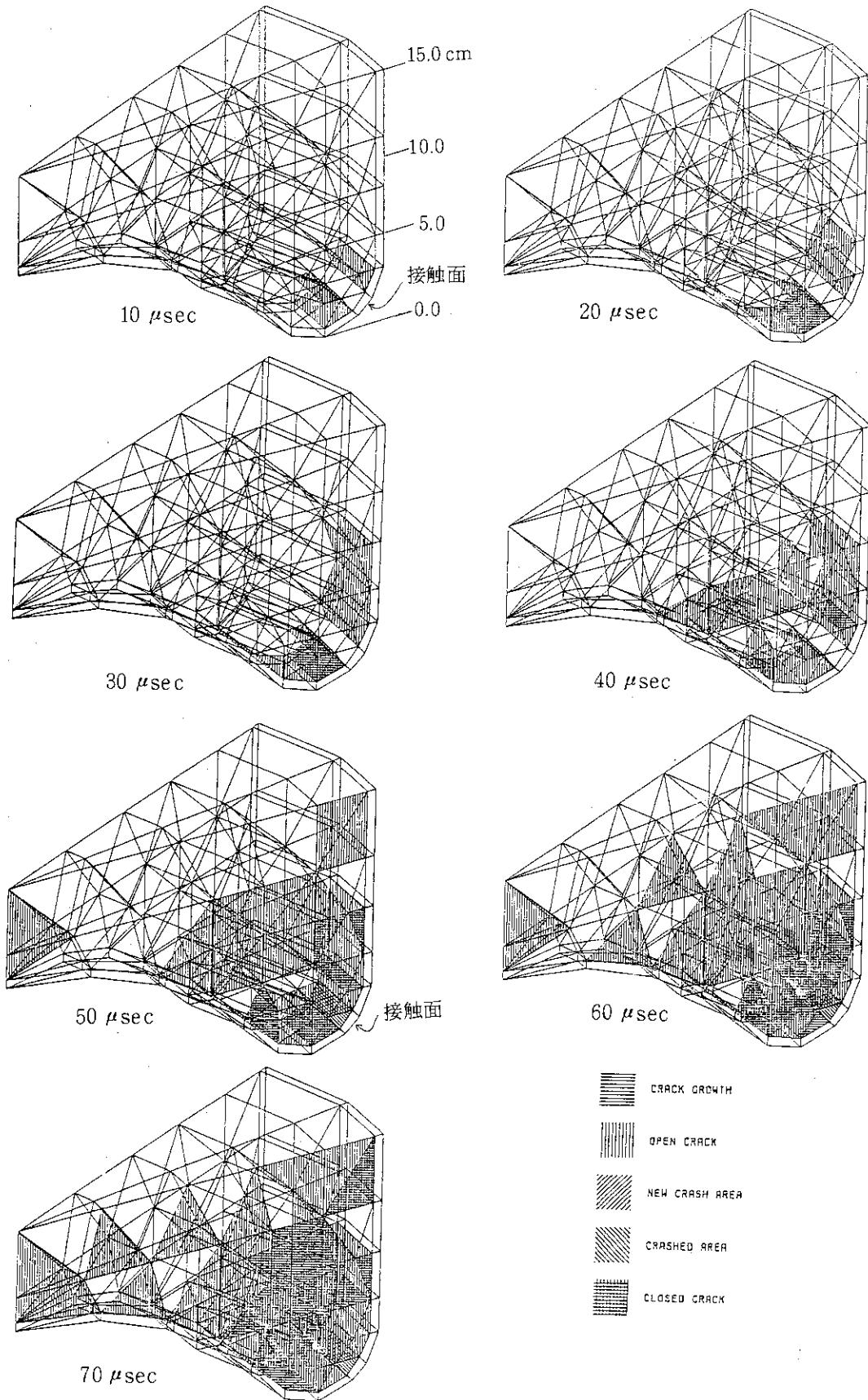


図 6.16 破壊の進展

(6.3-27)

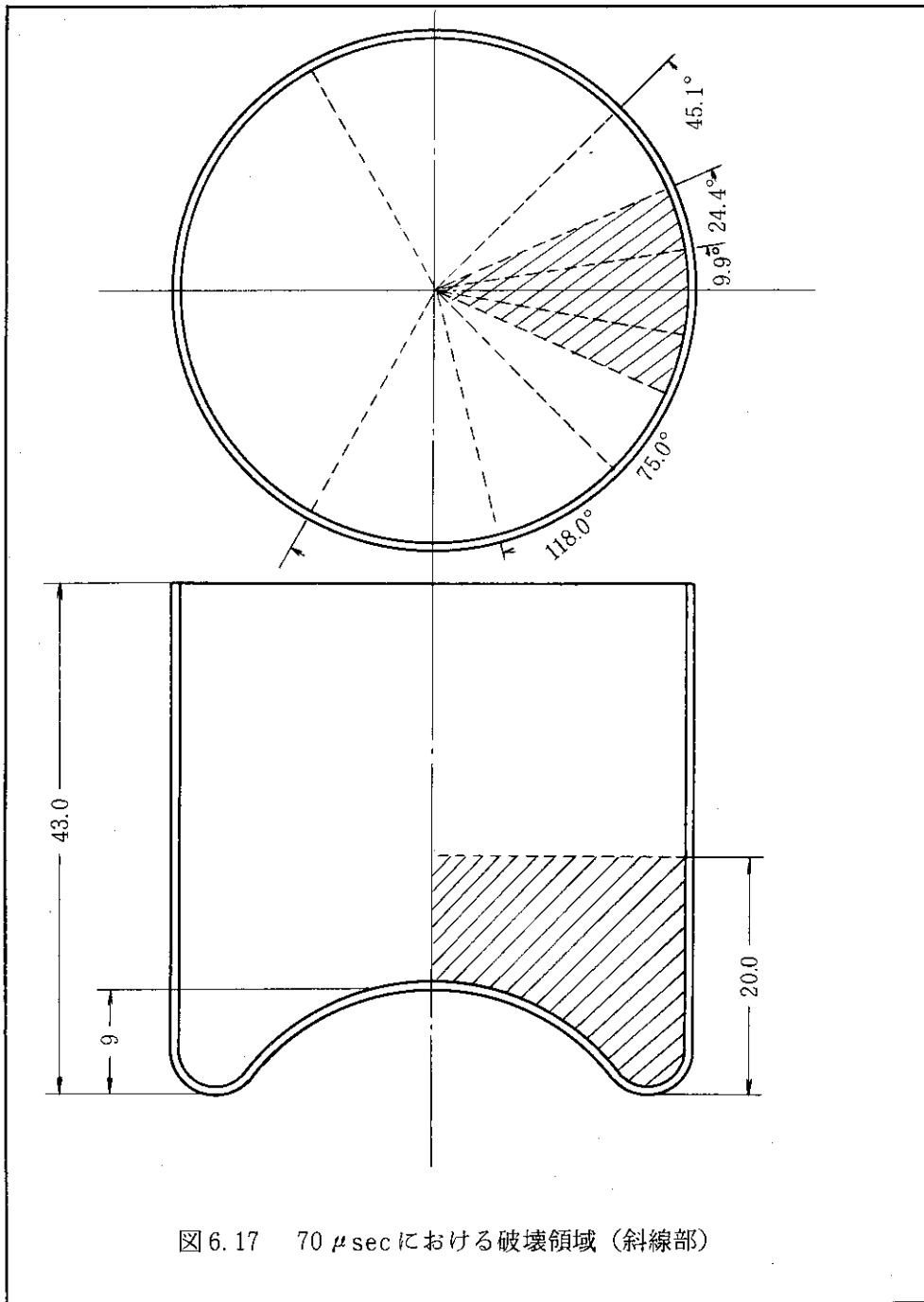


図 6.17 70 μ sec における破壊領域 (斜線部)

7. お わ り に

高レベル廃棄物取扱施設のうち貯蔵施設の安全性に関する検討の一環として、廃棄物ガラス固化体の機械的強度について解析を試みた。

解析には、剛体-バネモデルに基づき新たに開発したADEAT-Gコードを用いた。このADEKAT-Gコードについては、現在マニュアルの整備を進めている段階であり、本報では解析結果について述べている。解析の結果、熱応力や落下衝撃によってガラス固化体に発生する破壊の様子や時間変化（亀裂の伝播）を評価することが可能となったと考えている。

解析作業の中で問題となったことは、入力用の物性値と計算上のモデル化であった。後者については、計算機の資源（メモリー量や実行時間）に制約があるため、結果に与える影響を考慮に入れ慎重に行ったつもりである。現在でも、実行時間や出力については実用的にあってはほぼ限界に近いと考えられる。また、前者の入力用物性値については、できるだけ早い機会に公表され、より現実的なデータで計算を行えることを望みたい。このことは、出力結果の検証用データについても、同様である。

最後に、ADEKAT-Gコードで用いた剛体-バネモデルであるが、これは変形を超えた破壊領域の解析に適した有用な手法の一つである。土砂崩れなどの土木工学、骨折の解明などの医学などの各分野で活用されてきており、原子力の分野では燃料ペレットや燃料棒の破壊にも適用可能な手法と考えられ、今後の進展が期待される。

なお、本解析に当たり、適確な助言と指導を賜った東京大学名誉教授川井忠彦氏に感謝の意を表わしたい。また、解析作業の一部を担当していただいたニュークリア・データ株式会社、日本電子計算株式会社に併せて感謝する。

参 考 文 献

- 1) 川井, 「固体力学諸問題の離散化極限解析, 生研セミナーテキスト(コース76)」, 生産技術研究所奨励会 1982. 1.
- 2) 武田他, (廃棄物ガラス固化体破壊解析コード ADEKAT-G 説明書), 日本原子力研究所 1986. 3.
- 3) 川井, 丹羽, 「3次元連続体の新離散化極限解析」, 日本鋼構造協会第15回大会研究集会, マトリックス解析法研究発表.
- 4) T. Kawai and K. Niwa, "Computer simulation of the Material Testing by means of New Discrete Model, Int. Conf. on Constitutive Law for Engineering Materials; Theory Applications", Arizona Univ., Jan. 1983
- 5) K. Niwa, T. Kawai, M. Ikeda and T. Takeda, "Application of a New Discrete Method to Fracture Analysis of Brittle Materials, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Numerical Method in Fracture Mechanics", A. R. Luxmore and D. R. J. Owen, Pineridge Press, 1984
- 6) 中西他, 「材料力学」岩波全書.
- 7) 佐藤, 「材料の強度と塑性, 森北出版」, 1980.
- 8) K. J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Inc., 1982
- 9) 山田, 「塑性・粘弾性」, 培風館, 132 48.
- 10) R. Hofmann, "STEALTH, A Large Explicit Finite-Difference Code for Solids, Structural and Thermohydraulic Analysis", EPRI NP-176-1, Jun., 1976