

## 個別要素法によるコンクリート供試体の高速破壊挙動解析の試み

A Trial Analysis of Distinct Element Method for High Speed Compressive Failure of Concrete Specimen

原木 大輔\*, 香月 智\*\*

Daisuke HARAKI, Satoshi KATSUKI

\*防衛大学校理工学研究科学生 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

\*\*工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

This paper presents a trial analysis of Distinct Element Method for experimental results of compressive failure of concrete specimen subjected to high speed loading. The concrete specimen is modeled to aggregate of particles by 3-dimensional Distinct Element Method. First, in order to realize the constitutive law's effect on failure behavior fundamentally, the elements are arranged in a vertical plane such as 2-dimensional analysis. Secondary, 3-dimensional model is analyzed and compared with experimental results.

*Key Words: Distinct Element Method, high speed loading, concrete specimen*

キーワード: 個別要素法, 高速載荷, コンクリート供試体

## 1. 緒言

個別要素法は物体を剛体とばねの集合体としてモデル化するもので、土木分野においては土・地盤材料や亀裂性岩盤などの離散集合体の変形や破壊現象の解析に適用されてきた<sup>1)</sup>。また、連続体の力学的挙動の解析に拡張する試み<sup>2~3)</sup>も見られ、コンクリート構造物の解析<sup>4~9)</sup>が行われている。ところで、有限要素法などは構成則の体系化が確立しているのに対し、個別要素法は剛体要素間に設定するばねの構成則を決定する理論的体系化が難しいとされている。すなわち、理論的に設定する試みもある<sup>10,11)</sup>が、連続体解析との整合性を図るには剛体ブロックの配置や材料定数に制限があること<sup>11)</sup>や、コンクリート材料の構成則に対するスケーリング効果が存在するため<sup>12)</sup>、ばねの構成則を決定することが複雑であるなどの問題が残されている。

ところで、衝撃を受けるコンクリート構造物の破壊は、表面破壊、裏面剥離、衝突物の貫入・貫通などがあり、コンクリート片の飛散現象をとまなうことが多い。このような飛散片による室内機器の破壊が問題となる場合には、その挙動解析が必要となる。このため個別要素法が有する個別な要素の飛散問題への適用性は工学的な応用分野が大きいものと考えられる。このような観点から、著者らはコンクリート材料の解析法を研究するため、三次元個別要素法の解析プログラムを作成し、たとえば静的載荷時のモール・クーロンの破壊基準の形状や粘着力と摩擦角が破壊形態に及ぼす影響について検討した<sup>13)</sup>。

本研究はこれらの成果を基に次の段階として、高速載

荷<sup>14,15)</sup>を受けるコンクリート供試体の破壊挙動への個別要素法の適用を試みたものである。

## 2. 解析手法

本解析では、図-1に示すような要素モデルについて、3次元における運動方程式をオイラー法に比べて計算結果が安定して得られる中心差分法<sup>14)</sup>を用いて解く。ただし、速度項は後進差分とした。すなわち、

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t + \Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t - \Delta t))}{\Delta t^2} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t))}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u} = [u_x \ u_y \ u_z \ u_{rx} \ u_{ry} \ u_{rz}]^T$ : 変位ベクトル、 $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ : それぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸の併進方向変位、 $u_{rx}$ ,  $u_{ry}$ ,  $u_{rz}$ : それぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸回りの回転方向変位、 $(\cdot)$ : 時間に関する1次微分。

これを運動方程式と連立して解くと、変位を求める基本式は次式となる。

$$\mathbf{u}(t + \Delta t) = \left( \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right)^{-1} \left\{ \mathbf{F}(t) - \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D} \frac{\Delta \mathbf{u}}{\Delta t} \right\} + \{ 2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t) \} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ : 質量マトリクス、 $\mathbf{D}$ : 減衰マトリクス、 $\mathbf{K}$ : 剛性マトリクス、 $\mathbf{F}$ : 外力ベクトル、 $\Delta \mathbf{u}$ :  $\Delta t$  秒間の  $\mathbf{u}$  の増分。

法線方向のばね力については、図-2(a)に示す Popovics<sup>16,17)</sup>式を用いる。この際、引張力には圧縮強度の1/10程度まで抵抗するモデルを用いた。すなわち、

$$P_N = P_{\max} (\delta_N / \delta_{\max}) \frac{n}{(n-1) + (\delta_N / \delta_{\max})^n} \quad (4)$$

ここで、 $P_N$ :法線方向のばね力、 $\delta_N$ :法線方向バネの任意の変形量、 $P_{\max}$ :法線方向バネの強度(コンクリートの圧縮強度に相当するばね力)、 $\delta_{\max}$ :強度に対応するばねの変形量(最大荷重時の変形量に相当するばねの変形量)、 $n$ :非線形パラメータ。

接線方向ばねについては図-2(b)に示すように、線形モデルとし、モール・クーロンのすべり限界条件を与える。すなわち、

$$P_s = k_s \delta_s \quad (5a)$$

$$\delta_s = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_L^2} \quad (5b)$$

$$|P_s| \leq C + P_N \tan \phi \quad (6)$$

ここで、 $P_s$ :要素に作用するせん断方向の力、 $k_s$ :せん断方向のばね定数、 $\delta_s$ :せん断方向のばねの変形量、 $C$ :粘着力、 $\mu$ :摩擦係数。

よって、法線方向ばね力とせん断ばね力は一連の限界状態を有する。その法線方向、接線方向の限界条件の関係を図-3に示す。

なお、本解析においては、図-4に示すように一端すべり限界に達した後にせん断変形量に応じて粘着力と摩擦角を低減させることで、モール・クーロンのすべり限界条件に達した後の軟化を表現する。すなわち、

$$(\tan \phi)' = \tan \phi_0 \times \alpha \quad (7a)$$

$$C' = C_0 \times \alpha \quad (7b)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (\gamma_s \leq \gamma_{\text{mohr}}) \\ \frac{1}{\gamma_{\text{max}} - \gamma_{\text{mohr}}} \{ (\alpha_{\text{end}} - 1) \gamma_s - (\gamma_{\text{end}} - \gamma_{\text{mohr}} \cdot \alpha_{\text{end}}) \} & (\gamma_{\text{mohr}} < \gamma_s < \gamma_{\text{end}}) \\ \alpha_{\text{end}} & (\gamma_s \geq \gamma_{\text{end}}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\gamma_s = \delta_s / \left( \frac{R_i + R_j}{2} \right) \quad (9)$$

ここで、 $\delta_s$ :要素間*i-j*におけるせん断方向の変形量、 $R$ :要素の半径、 $\gamma_s$ :変形角、 $\alpha$ :低減係数、 $\gamma_{\text{max}}$ :最大変形角、 $\alpha_{\text{end}}$ :最大変形角以上変形した場合の低減率、 $\gamma_{\text{mohr}}$ :モール・クーロンのすべり限界条件に達したときの変形角、 $(\tan \phi)'$ :変形角 $\gamma_s$ のときの摩擦係数、 $\tan \phi_0$ :摩擦係数の初期値、 $C'$ :変形角 $\gamma_s$ のときの粘着力、 $C_0$ :粘着力の初期値。

### 3. 実験の概要

普通強度コンクリートの円柱供試体を用いて静的および高速圧縮載荷実験を行った。実験に用いたコンクリートの配合表を表-1に示す。コンクリート円柱供試体は、直径10cm、高さ20cmである。実験から得られた荷重～変形関係を図-5に示す。本実験では降伏後のコンクリートの軟化領域を計測するために供試体にアクリル棒を埋設し、そのアクリル棒に貼付したひずみゲージによって供試体の変形を計測した<sup>18)</sup>。静的載荷実験では32.18N、2216 $\mu$ で降伏し、その後徐々に軟化している。高速載荷実験は載荷速度 $v = 3.0 \times 10^{-1} (m/s)$ (ひずみ速度 $v_\varepsilon = 1.5 (1/s)$ )で載荷し、静的に比べると初期勾配が約1.5

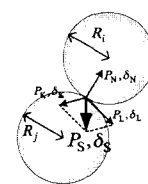
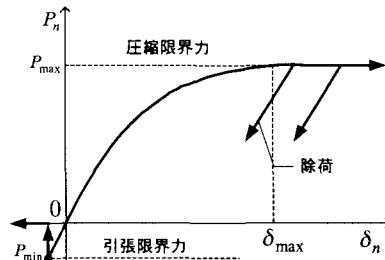
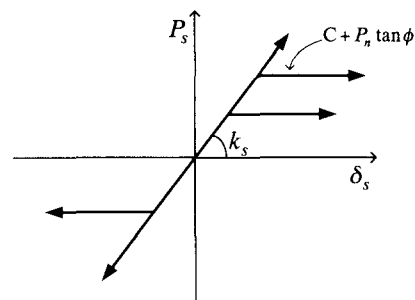


図-1 3次元球体要素



(a) 法線方向ばね



(b) 接線方向ばね

図-2 ばねの構成則

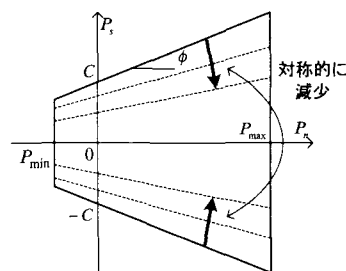


図-3 限界条件

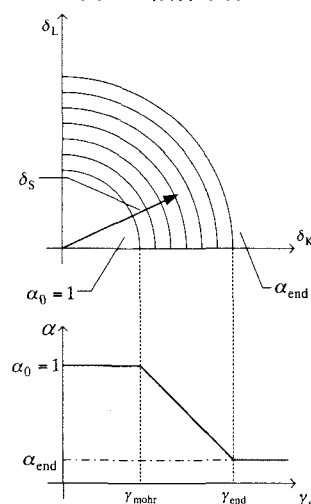


図-4 低減率

表-1 配合表

| 水セメント比 |     | 細骨材率 |      | 単位量(kg/m³) |               | 減水剤    | スランプ | 空気量 |
|--------|-----|------|------|------------|---------------|--------|------|-----|
| (%)    | (%) | 水    | セメント | 細骨材        | 粗骨材(最大粒径15mm) | (l/m³) | (cm) | (%) |
| 60     | 53  | 185  | 308  | 915        | 981           | 1.000  | 4.6  | 4.2 |

倍、強度が約1.8倍と大きくなっており、いわゆるひずみ速度効果が見られる。

写真-1には、実験の破壊状況を示すが、载荷後100msでは供試体本体が破壊し、周辺に飛散している様子が見られ、その飛散方向は写真-1(b)における左側では下方45°と同時に上方にも飛散している。

#### 4. 平面配列モデルによる計算例

3次元配列の解析を行う前に、構成則パラメータの影響を基礎的に調べるため、より単純なモデルによる解析を行いその傾向を検討する。解析に用いたモデルは図-6に示すようにモデルの前後面を平面要素で挟むことにより、垂直な一平面内にそろって配列されるものである。解析に用いたパラメータを表-2に示す。粘着力・摩擦係数の低減率の影響を確認するため、最大変形角を $\gamma_{end} = 0.05 \sim 0.25$ と変化させて解析を行った。解析から得られる荷重～変形関係を図-7に示す。各ケースとも降伏点まではほぼ同様の挙動を示すが、降伏後は最大変形角 $\gamma_{end}$ が大きくなるに従い軟化勾配が緩やかになっている。すなわち、粘着力・摩擦係数を低減させることによって、コンクリートの荷重～変形関係における軟化を表現でき、最大変形角を大きくすると軟化勾配が緩やかになるようにコントロールできることがわかる。

図-8に解析結果として $\gamma_{end} = 0.20$ のときの接触力、変位ベクトルと移動ベクトル分布の推移を示す。接触力は法線方向ばねと接線方向バネの合力を示している。図中の①～⑦の番号は、図-7中の番号と対応している。①に示した弾性域では、モデルにかかる荷重が大きくなると要素間に生じるばね力も大きくなり、②モデルの変形が $7.00 \times 10^{-2} mm$ のとき、いくつかの接触点で、●で示した点でせん断すべりが現れる。さらに③では、変形が大きくなるに従い、せん断すべりの分布はモデル側面からXを描くように中心へ向かって広がり、せん断面を形成している。④では最大耐力に対応しているが、その変位ベクトルを見ると、せん断すべり面に沿って滑っていることがわかる。⑥で中間域の要素が外側に移動しており耐力が失われているが、その速度ベクトルから要素が45°方向に滑り落ちるように速く移動している。

### 5. 3次元配置モデルによるシミュレーション

#### 5.1 解析モデル

解析モデルは、図-9(a)、(b)に示すように直径10cm、高さ20cmのコンクリート円柱供試体を球形要素約2000個を細密配列したものである。図-9(c)に示すような平面上の配列を上下に積み重ねたものである。ただし、線A-A'に対しては対称であるが線B-B'に対しては非対称となっており、円柱供試体の有する対称性を完全にはモデル化できていない。この解析モデルの上下を平面要素ではさみ、下の平面は固定、上の平面を载荷条件に合わせた速度で強制的に下げることにより载荷を表現した。

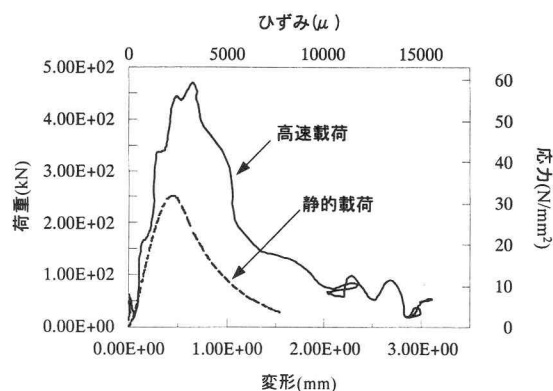


図-5 実験結果(荷重～変形関係)

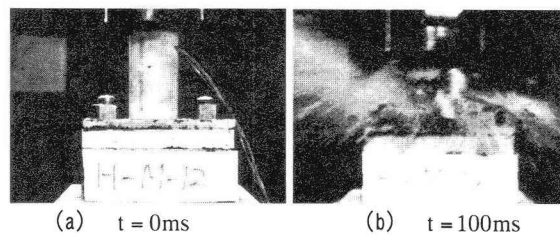


写真-1 高速载荷実験における破砕片の飛散

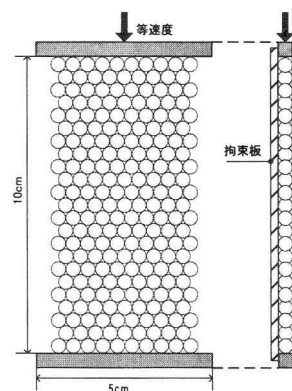


図-6 平面配列の解析モデル

表-2 平面配列モデルの解析パラメータ

| ばね係数                    |                         | 減衰率<br>$h$ | 粘着力<br>$C$<br>(N) | 摩擦角<br>$\phi$<br>(°) | 最大変形角<br>$\gamma_{end}$ | 低減率<br>$\alpha_{end}$ |
|-------------------------|-------------------------|------------|-------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 法線方向<br>$k_N$<br>(N/mm) | 接線方向<br>$k_S$<br>(N/mm) |            |                   |                      |                         |                       |
| $7.874 \times 10^7$     | $1.574 \times 10^7$     | 0.05       | $6.000 \times 10$ | 20                   | $0.05 \sim 0.25$        | 0.0                   |

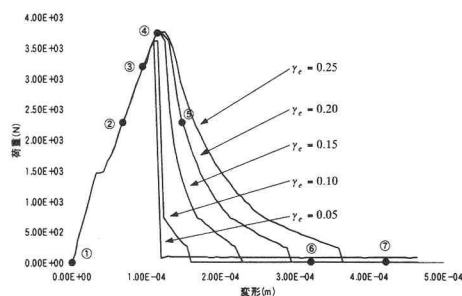


図-7 平面配列モデルの荷重～変形関係

解析モデルに作用する荷重は平面要素が球形要素から受ける力の合計から求め、载荷する平面の変位量をもって解析モデルの全体変形とした。なお、実験における供試体端面と載荷板の摩擦を考慮するために解析モデルの最

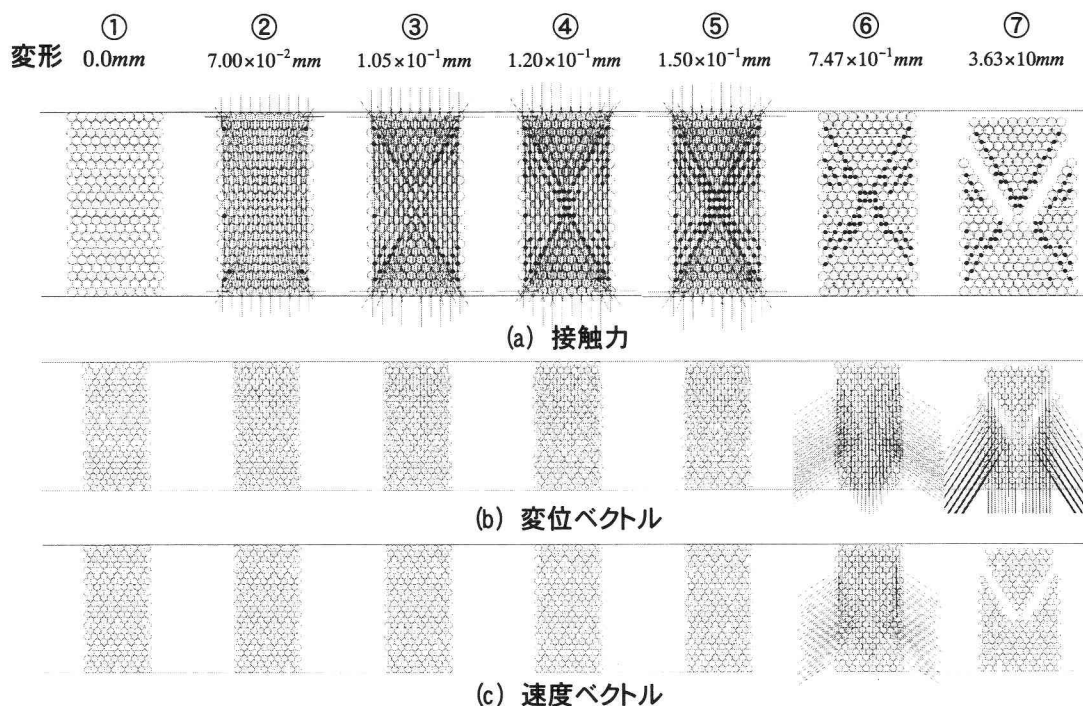


図-8 接触力，変位，速度ベクトル分布の推移（平面配列）

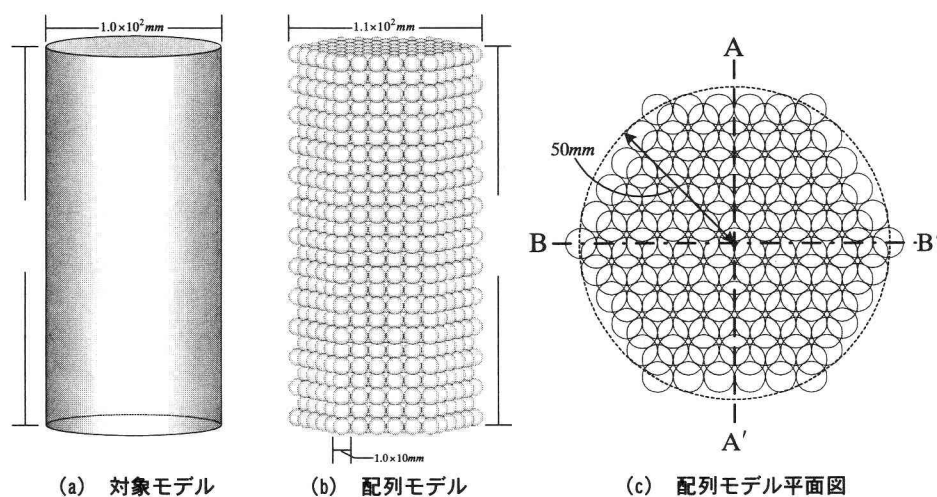


図-9 解析モデル

表-3 解析モデルの諸元

| 全要素数 | 要素の半径 | 比重       | モリルの直径 | モリルの高さ |
|------|-------|----------|--------|--------|
| 個    | mm    | $g/mm^3$ | mm     | mm     |
| 2083 | 5.0   | 2.4      | 110    | 206    |

表-4 3次元配列モデルの解析パラメータ

|      | ばね係数                    |                         | 減衰率<br>$h$ | 粘着力<br>$C$<br>(N)   | 摩擦角<br>$\phi$<br>(°) | 最大変形角<br>$\gamma_{end}$ | 最小低減率<br>$\alpha_{end}$ |
|------|-------------------------|-------------------------|------------|---------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
|      | 法線方向<br>$k_N$<br>(N/mm) | 接線方向<br>$k_S$<br>(N/mm) |            |                     |                      |                         |                         |
| 静的載荷 | $1.402 \times 10^8$     | $3.584 \times 10^7$     | 0.05       | $4.000 \times 10^2$ | 20                   | 0.1                     | 0.0                     |
| 高速載荷 | $1.718 \times 10^8$     | $7.094 \times 10^7$     | 0.05       | $7.280 \times 10^2$ | 20                   | 0.1                     | 0.0                     |

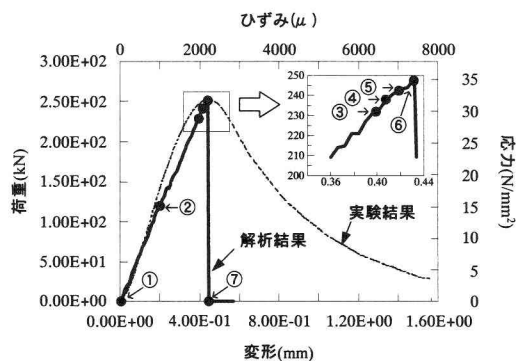


図-10 荷重～変形関係(3次元配列・静的)

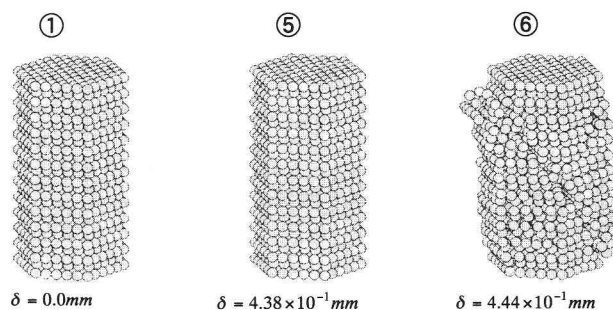


図-11 解析モデル全体の挙動(静的)

上下段水平方向の動きを拘束した。

表-4 に、解析パラメータを示す。ばね係数、減衰率、粘着力については、平面配列解析の結果や他の文献<sup>10,11)</sup>を参考に決定したが、高速载荷におけるばね係数は、実験結果で初期勾配が 1.5 倍に増加していることから、1.5 倍に、粘着力は圧縮強度が 1.8 倍に増加していることから 1.8 倍に増した。また、軟化パラメータである最大変形角と低減係数については、なるべくじん性が高くなるものを設定した場合について述べる。

## 5.2 静的载荷解析

図-10 に荷重～変形関係と実験結果を比較して示す。最大耐力までの荷重増加域はほぼシミュレートできるが、最大耐力後については実験の緩やかな耐力低下とは異なり、瞬時に耐力が失われてしまう。この点について表-4 に示した軟化パラメータを幾分変化させた解析も試みたがあまり改善されなかった。これは、3 次元的に変位自由度が与えられると、式(5)およびそれに伴う式(6)～(9)の軟化制御がうまく働かないためと考えられる。

図-11 には  $\delta = 0$ 、 $4.38 \times 10^{-1}$ 、 $4.44 \times 10^{-1} \text{ mm}$  における全体変形を示す。図-10 の⑥で示した耐力に近づく  $\delta = 4.38 \times 10^{-1} \text{ mm}$  では若干の変形が見られるが、ほとんど変形していない。しかし、図-10 で⑥～⑦に相当する  $\delta = 4.44 \times 10^{-1} \text{ mm}$  では斜めせん断破壊線が形成されて破壊していることがわかる。

以後、破壊に至る供試体内部の挙動を調べるために、図-12 に示す A 方向と B の方向内の要素の挙動を分析する。なお、A 断面では要素配置が左右対称であるが、B 断面では左右は非対称である。また、描画する要素は、図-12 に示す 1.5R の幅の空間に存在するものだけであるので、必ずしも描画要素間で接触していないこともある。

図-13 には図-10 で示した荷重～変形関係の主要な段階①～⑦に対応した接触力分布、要素変位ベクトル、および要素の速度ベクトル分布を示す。なお、接触力分布には要素間の力がせん断限界に達したところに●印を付している。

A 断面において、③の  $3.78 \times 10^{-1} \text{ mm}$  まで変形すると、モデル上下端の側面にせん断滑りが生じる。その後モデル側面に沿ってせん断滑りの分布領域が拡大し、その領域が X 印を作るように進展している。そして⑤の  $\delta = 4.38 \times 10^{-1} \text{ mm}$  では、モデルの中心へ向かって伸びたせん断滑りの領域は X 状にモデルを貫いており破壊面を形成する。このため、図-10 において最大耐力に達している。ここで興味深いのは、X 状のせん断滑り領域の進展に合わせて、X 状の外側にある側面の V 形の内部にもせん断滑り面が形成されていることである。これは平面配置モデルにおいては生じない 3 次元配列による影響である。

B 断面では、③の段階で下部に現れたせん断すべりが上に向かって分布領域を広げている。さらに変形すると⑥において、明瞭な斜め破壊線が現れ供試体はその破壊

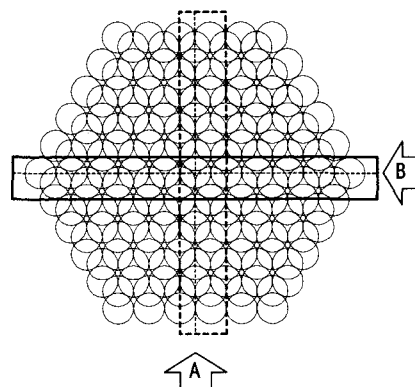


図-12 解析モデルの抽出位置

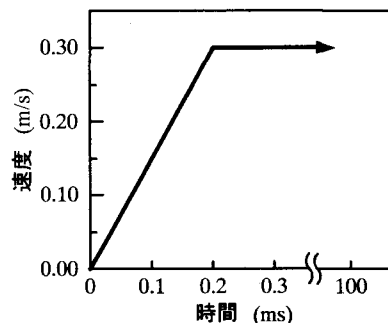


図-14 高速载荷の速度～時間関係  
ひずみ(μ)

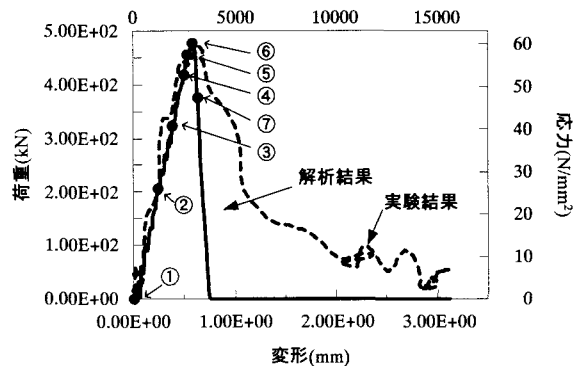


図-15 荷重～変形関係(3次元配列・高速载荷)

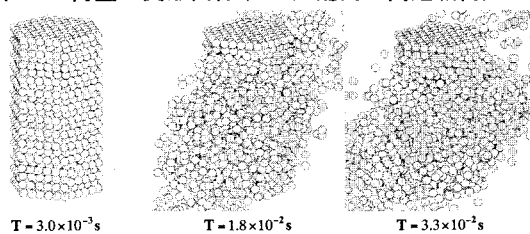


図-16 解析モデル全体の挙動(高速)

線で 2 分されている。このように、破壊直前のせん断滑りらしきものの形成では A 断面の方が明瞭であったのに、実際の破壊面が B 断面で決定されるのは、B 断面の配列が左右非対称であることの影響と思われる。図-13(b)の変位ベクトルや、(c)の速度ベクトルにおいても、A 断面の対称性に比して B 断面の非対称性が顕著である。

## 5.3 高速载荷解析

上板の载荷速度は、実験結果から得られた変位～時間関係を単純化して図-14 に示すように時間と関係づけて与えた。

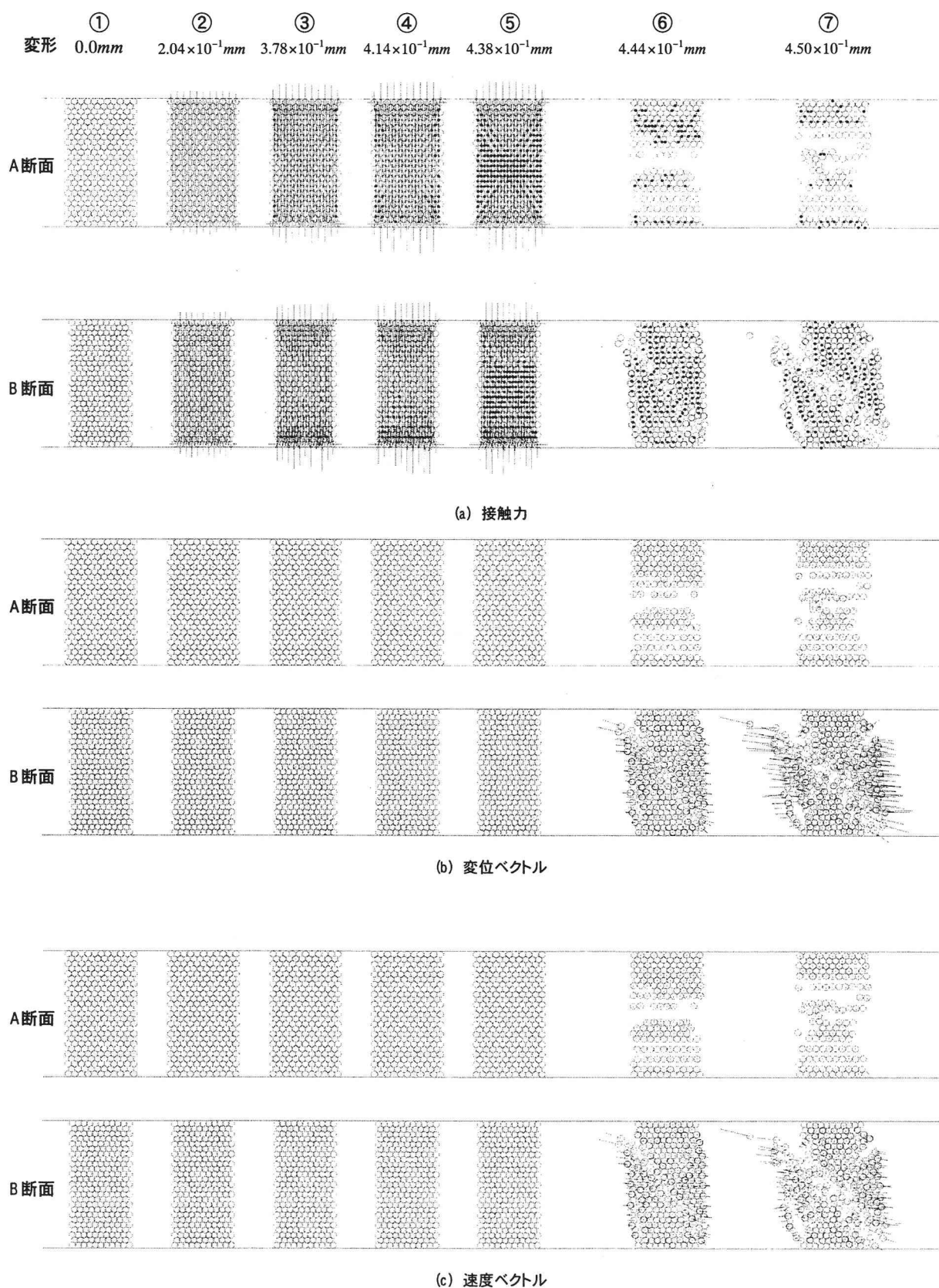


図-13 接触力，変位，速度ベクトル分布の推移  
(3次元配列，静的載荷)

解析で得られた荷重～変形関係を図-15に示す。最大耐力までの荷重～変形関係は，初期勾配，降伏点ともに実験結果とほぼ一致しよくシミュレートできている。しか

し最大耐力後は変形が進行する前に荷重が急激に低下している。静的載荷実験のシミュレートと比較すると軟化の勾配が若干大きい，実験結果に比べると非常に小さ

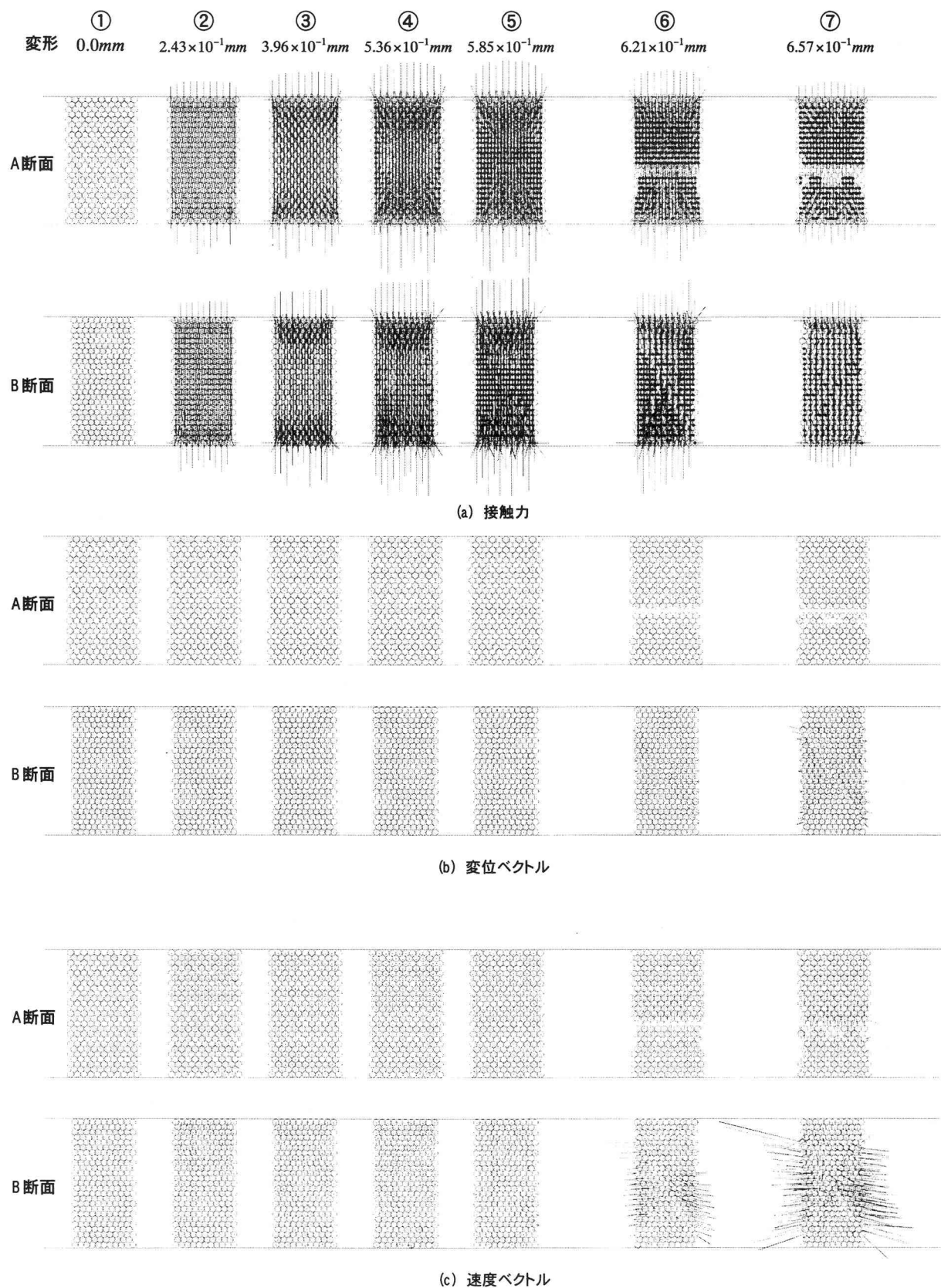


図-17 接触力，変位，速度ベクトル分布の推移  
(3次元配列，高速载荷)

い。すなわち，軟化域の挙動は表現できていない。図-16に計算開始 $3.0 \times 10^{-3}$ 秒後から $1.5 \times 10^{-2}$ 秒毎のモデル全体の要素の挙動を示す。時間が経過するにつれて

モデル中心付近の要素が外側に向かって飛び散っている様子がわかる。また，モデル上下端の要素は塊として残り，上の塊が落下している様子がわかる。これら

は写真-1 に示した高速載荷実験におけるコンクリート供試体の挙動と良く似た特徴を示している。

図-17 には、各変形量に対応した接触力、変位ベクトルおよび速度ベクトルの分布を示す。図-17(a)の接触力分布には、静的載荷解析と同様に●印によってせん断限界に達したばねを示している。①～⑤に至るまで、A断面、B断面とも全体にわたって広く均等にせん断限界の接触点が広がっており、静的載荷時ほど明瞭なX印の限界線は形成されていないことがわかる。しかし耐力がピークを超えた⑥においてはX状に、接触力を失った要素群の線が形成され、内部のせん断滑り面での力の伝達が失われているものの、破壊片内には応力が残るような挙動をしていることがわかる。図-17(b)の変位図では、B断面の最右側の⑦要素が $\delta = 6.57 \times 10^{-1} mm$ において左側面の要素がそろって水平方向に移動していることがわかる。これは、写真-1 に示した側方への破片の飛び出しに対応しているように思われる。この傾向は、図-17(c)の速度ベクトル分布の⑥～⑦段階においてさらに顕著に現れている。また、図-17(c)の⑤ $\delta = 6.57 \times 10^{-1} mm$ では斜め方向のせん断滑り面に沿った要素が明瞭に動きを反対方向にして破壊面を形成しつつあることもうかがえる。

## 6. 結 言

本研究は高速載荷を受けるコンクリート供試体の破壊挙動への個別要素法の適用を試みたものであるが、成果をまとめると以下の通りである。

- ① 平面配列モデルにおいては、モール・クーロンの破壊基準に達した後は、粘着力 $C$ と摩擦係数 $\tan \phi$ をせん断変形量に応じて低減させることによって、荷重～変形関係において降伏後の軟化を表現することができる。
- ② 静的載荷実験および高速載荷実験のシミュレーション解析で、荷重～変形関係において初期勾配、降伏点をおおむねシミュレートできる。しかし、降伏後の軟化挙動についてはうまくシミュレートできなかった。このため、軟化領域の制御について検討する必要がある。
- ③ 破壊に至るまでの供試体内部の接触力分布や、要素移動ベクトルを分析することによって、供試体内部の応力の偏在や、破壊の局所化などを表現できる可能性がある。
- ④ 高速載荷実験のシミュレーション解析において、降伏後の破裂と破砕片が飛散を要素の挙動で表現できることが期待できる。
- ⑤ ただし、定量的に精度の高いシミュレーションにするには、ばね係数などの各パラメータの設定、降伏条件、コンクリート供試体のモデル化など検討すべき事項も多く、今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 個別要素法を用いた不連続性岩盤における亀裂発生・進展のモデル化, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.83-90, 1995.10.
- 2) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション-拡張個別要素法で破壊を追う-, 森北出版, pp.25-38, 1997.
- 3) 目黒公郎: コンクリートの破壊解析への個別要素法の適用, コンクリート工学, Vol.31, No.5, pp.5-17, 1993.5.
- 4) 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男, 森嶋芳大: 個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1761-1771, 1998.3.
- 5) 下田義文, 鈴木真次, 石川信隆, 古川浩平: 個別要素法によるモルタル片持ちばりの衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1467-1476, 1992.3.
- 6) 鈴木真次, 石川信隆, 古川浩平, 水山高久, 石川芳治: 個別要素法による鉄筋で補強した砂防ダム袖部の衝撃破壊解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1555-1566, 1997.3.
- 7) 鈴木真次, 石川信隆, 石川芳治, 水山高久, 古川浩平: 高速載荷を受ける主鉄筋で補強したコンクリート製砂防ダム袖部模型の動的挙動と個別要素法による破壊解析, 土木学会論文集, No.567/VI-35, pp.141-160, 1997.6.
- 8) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英: 個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp.127-135, 1995.7.
- 9) 別府万寿博, 園田佳巨, 大野友則: 静的および動的三軸圧縮載荷を受けるコンクリート供試体の弾塑性解析に対する個別要素法の適用性, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004.3.
- 10) 小国健二, 堀宗朗, 坂口秀: 破壊現象の解析に適した有限要素法の提案, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.203-217, 2004.7.
- 11) 阿部和久: 個別要素法による連続体解析におけるバネ係数の設定, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.83-90, 1996.
- 12) 永井学志: コンクリートのマルチスケールと計算力学の可能性, コンクリート工学, Vol.42, No.1, pp.89-92, 2004.1.
- 13) 原木大輔, 白石博文, 香月智: 個別要素法によるコンクリート圧縮破壊解析におけるモール・クーロン条件の及ぼす影響, 応用力学論文集, Vol7, No2, pp.757-766, 2004.4.
- 14) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, pp.25-33, pp.35-40, 1993.
- 15) 円形リングで横拘束されたコンクリートの動的応力～ひずみ関係: 高橋芳彦, 大野友則, 丸山貴司, 内田孝, 構造工学論文集, pp.1141-1152, 1990.3.
- 16) Popovics, S: Factors affecting the elastic deformations of concrete, Proc. of the Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, pp.172-183, Aug., 1971.
- 17) 香月智, 黒木勇人, 石川信隆, 太田貞次: 高速載荷を受けるコンクリート充填鋼管はりの動的弾塑性挙動に関する一考察, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.61-76, 2002.1.
- 18) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 永野淳, 鈴木敦: 急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.37-54, 1999.8.

(2004年9月17日受付)