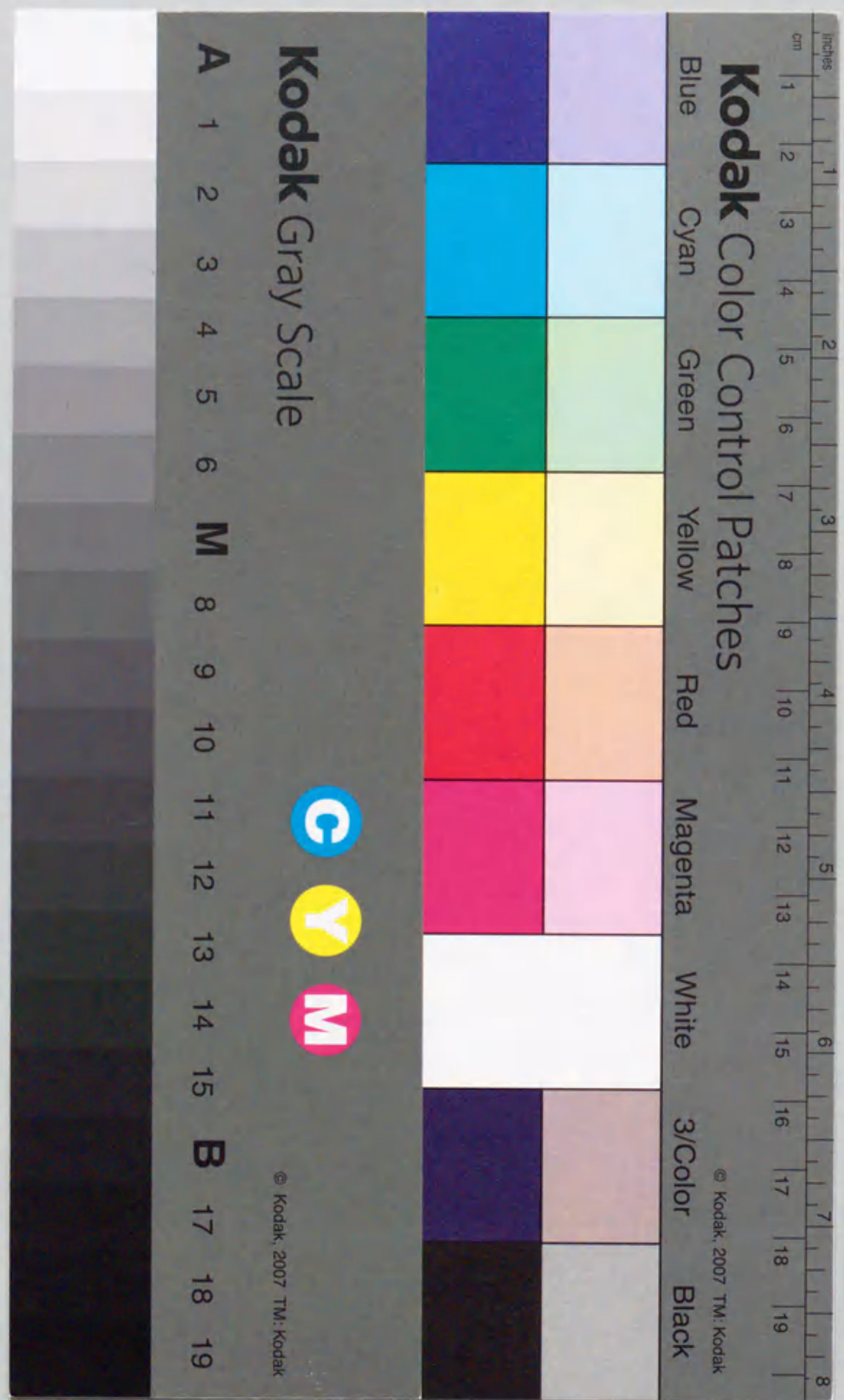


報告番号 甲 第 4011 号

# 砂型造型プロセスにおける充てん機構の解明と 数学的モデルの構築

牧 野 泰 育





砂型造型プロセスにおける充てん機構の解明と  
数学的モデルの構築

牧 野 泰 育



## 目次

第1章 緒論	1
1.1. 研究背景	1
1.2. 従来の研究	6
1.3. 解析手法の選定	8
1.4. 本研究の目的と各章の概要	9
第2章 生型造型モデル	11
2.1. はじめに	11
2.2. 離散要素法	11
2.2.1. 接触力	12
2.2.2. 流体抗力	14
2.3. 空気流解析	15
2.3.1. 準定常解析	15
2.3.2. 非定常解析	17
2.4. 解析のアルゴリズム	18
2.5. 解析要素	19
2.5.1. 圧縮要素	19
2.5.2. ハードコア・ソフトシェル要素	21
2.6. パラメータ同定	23
2.6.1. 圧縮要素	23
(1) 要素の質量	23
(2) 要素の圧縮判定	23
(3) 接触力パラメータ	25



(4) 砂型のヤング率 .....	26
(5) 摩擦係数および付着力 .....	26
2. 6. 2. ハードコア・ソフトシェル .....	28
(1) 要素の質量 .....	28
(2) 接触力パラメータ .....	28
(3) 摩擦係数および付着力 .....	30
2. 7. まとめ .....	30
第3章 流気加圧造型解析 .....	31
3. 1. はじめに .....	31
3. 2. 実験装置および供試砂 .....	32
3. 3. 流気実験 .....	32
3. 4. 充てん砂層内を流れる空気流 .....	36
3. 5. 圧縮要素モデルによる充てん解析 .....	38
3. 5. 1. 充てん挙動 .....	38
3. 5. 2. 流入速度が生型砂移動速度に及ぼす効果 .....	42
3. 6. ハードコア・ソフトシェル要素 .....	45
3. 6. 1. 充てん挙動 .....	45
3. 6. 2. 接触力と流体抗力ベクトルの分布 .....	49
3. 6. 3. 接触力と流体抗力の経時変化 .....	49
3. 6. 4. 粉体圧 .....	53
3. 6. 5. ブリッジ現象 .....	53
3. 7. まとめ .....	56

第4章 ブロー造型解析 .....	58
4. 1. はじめに .....	58
4. 2. 生型造型モデル .....	59
4. 3. 実験および解析条件 .....	59
4. 4. 結果および考察 .....	59
4. 4. 1. 充てん解析 .....	59
4. 4. 2. 生型砂の噴出速度と噴出率 .....	68
4. 4. 3. 空気流の速度場および離散要素の速度 .....	68
4. 4. 4. 離散要素の接触力と流体抗力 .....	74
4. 4. 5. 離散要素の水平方向の移動 .....	78
4. 4. 6. 空隙率分布の経時変化 .....	80
4. 4. 7. 空隙率の空間分布 .....	80
4. 5. まとめ .....	83
第5章 造型プロセスの比較と実プロセスへの適用に関する考察 .....	84
5. 1. 流気加圧造型とブロー造型の充てん特性の比較 .....	84
5. 2. 実プロセスへの適用に関する考察 .....	87
第6章 総括 .....	90
記号表 .....	92



参考文献	94
付録	97
公表論文	98
謝辞	100

## 第1章 緒論

### 1.1. 研究背景

素材に形を与え付加価値を高める鑄造は製品形状の自由度の高さ故に、ものづくりに不可欠な手段である。鑄造に用いる鑄型は種々存在し、特に、砂型は銑鉄鑄物の生産に長年用いられている。とりわけ、生型、すなわち、珪砂に粘結剤（ベントナイト）、石炭粉、でん粉、水などを添加して混練し、造型する砂型は反復利用できるために、量産性、経済性の観点から旧来より幅広く用いられている。

近年、製品のニアネットシェイプ化（near net shape）、生産の高速化、作業環境の改善などの要望が非常に強く、生型造型法においてもこれらの問題解決への取り組みが行われている。旧来から生型造型法に用いられているジョルト・スクィーズ造型法<sup>1)2)</sup>、すなわち、金枠の上下振動と砂層上部からの機械的な加圧による造型法は振動・騒音が大きく、生産性、寸法精度の点からも十分とは言い難い。それ故、近年は圧縮空気を利用した造型法が多く使われるようになり、また、スクィーズを応用した造型法も提案されている。以下、現在主流となっている造型法について概観する。

圧縮空気を利用した造型法は主に流気加圧造型法（流気＋スクィーズ）<sup>3)~9)</sup>とブロー造型法（ブロー＋スクィーズ）<sup>10)~16)</sup>に大別できる。代表的な機構を、それぞれ、Fig.1-1 と Fig.1-2 に示す。また、流気加圧造型法の流気過程に類似し、パターン面にベントホールを有しないエアークラウド造型法<sup>17)~19)</sup>もある。前者の流気過程（air-flow）は Fig.1-1 に示すように金枠内に生型砂を自由落下させ、その後、生型砂上方から圧縮空気を流入させ生型砂を充てんするプロセスである。流気過程後に得られる砂型は一般的にパタ



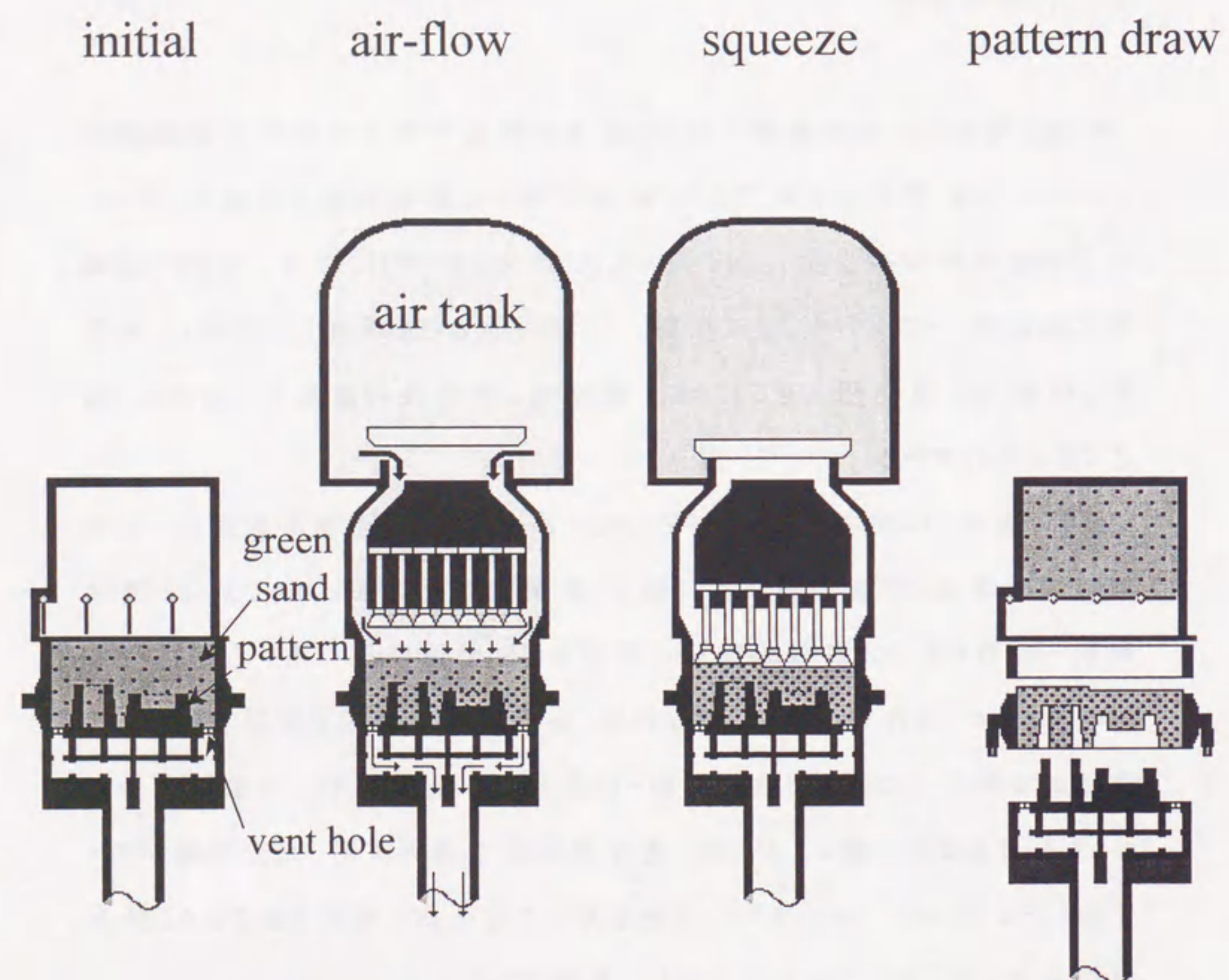


Fig.1-1 Air-flow Press molding process.

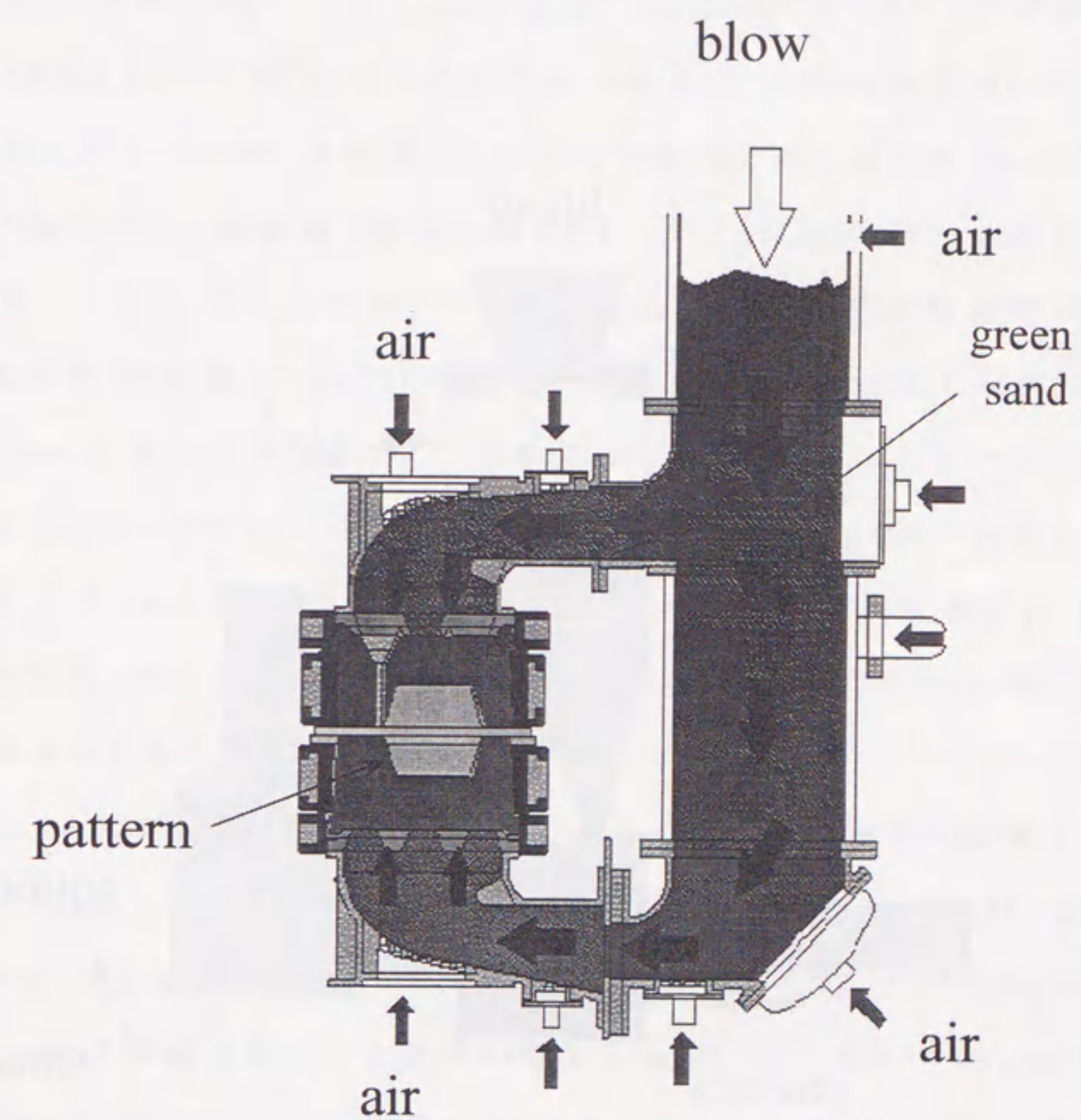


Fig.1-2-a Top under blow molding.



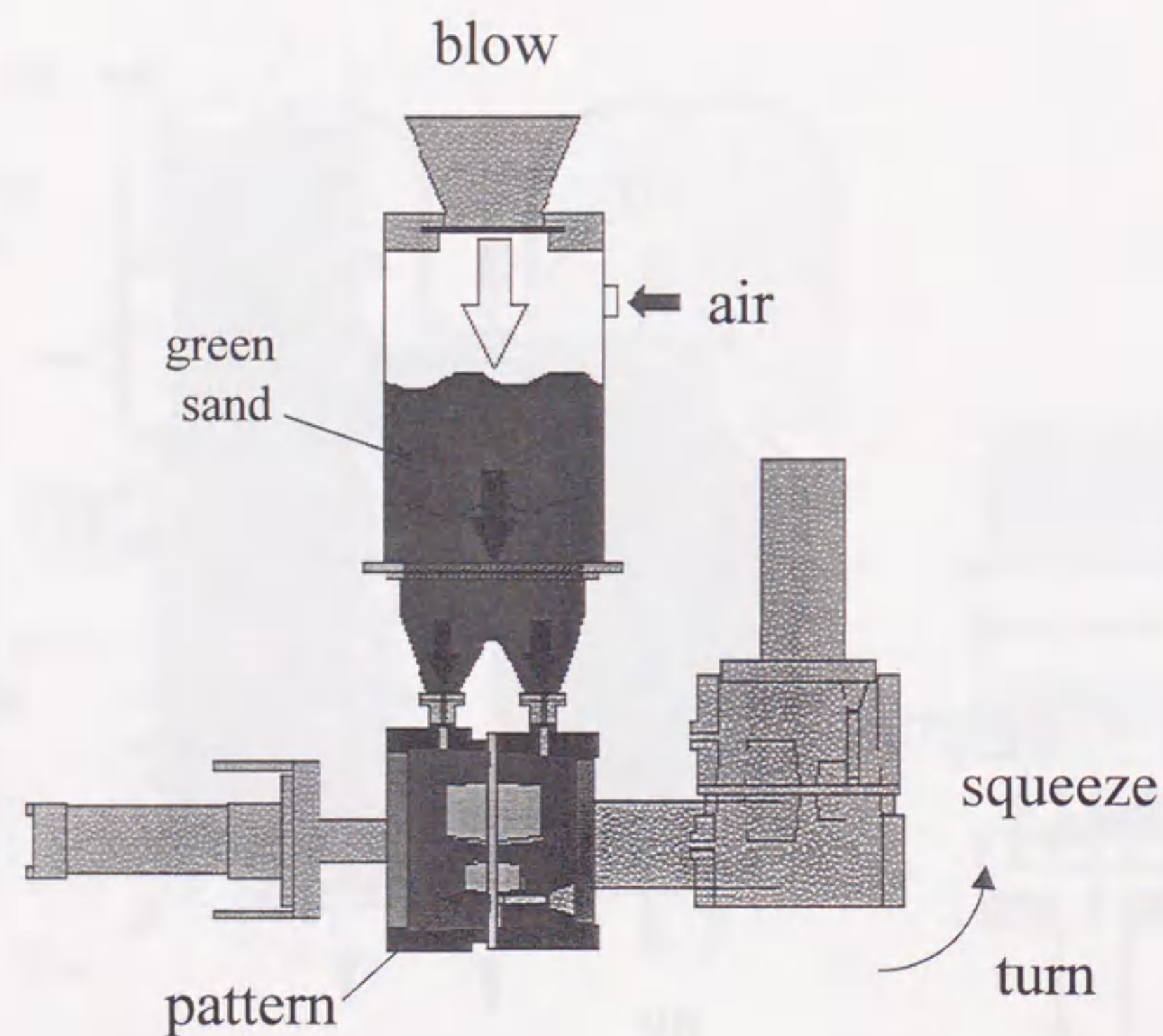


Fig.1-2-b Top blow molding.

ーン近傍の充てん密度が高く、砂型上部の充てん密度が低くなる。そのため、砂層上方からスクィーズを付加して砂型の充てん密度の均一化を行う。特に、最近ではセグメントスクィーズ<sup>6)</sup>により、複雑形状のパターンに対しても柔軟に対応できるようになっている。この流気加圧造型法は一辺1m前後の枠サイズで有枠方式であるため、自動車のエンジンブロックなどの比較的大きく、寸法精度の要求が高い鋳造品の生産に用いられている。後者のブロー過程は圧縮空気の利用により生型砂を金枠内へ吹き込み、この生型砂輸送時に慣性力を利用して予備充てんを行うプロセスであり、Fig.1-2-a に示すトップ・アンダーブロー造型法と、Fig.1-2-b に示すトップブロー造型法がある。ブロー過程の後にスクィーズを行い、充てん密度の向上を図っている。ブロー造型法は抜枠方式であるため、寸法精度は流気加圧造型に比べて若干低い、設備費が安価である。一辺の長さが500mm前後の鋳型が多く、主に中軽量の鋳造品の生産に使用されている。

また、一般的なスクィーズ造型法は、スクィーズ加圧を機械的に砂層上部に加える方法であり、生型砂と金枠壁面との摩擦により加圧力が損失するため、パターン面近傍である型砂下部ほど充てん密度が低くなる<sup>20)21)</sup>。それ故、パターン面近傍の砂型充てん密度の向上を目的として、ダイナパルス造型法<sup>18)</sup>やパターン・スクィーズ造型法<sup>22)</sup>が開発されている。ダイナパルス造型法は砂層上方から直径50mm程度の多数のロッドを、高速で下降させる造型法である。スクィーズヘッドの一般的な速度は0.1m/sであるのに対し、ダイナパルス造型法は数m/sで砂層にロッドを衝突させることで、パターン近傍へ加圧力がより伝播することを期待している。パターン・スクィーズ造型法はパターン自体も上方へ移動させパターン近傍の充てん密度を向上させている。

このように、最近の生型造型プロセスの基本要素は流気、ブロー、スクィーズであり、さらに、これらの組み合わせにより造型が行われている。後述するように、



スクィーズは最終充てん状態が連続体に近いことから、ある程度充てん機構が把握できている。しかし、圧縮空気を利用する流気とブローは移動する型砂と空気流が相互に作用し、非連続的で複雑な現象を呈している。それ故、実験のみで現象を厳密に把握し実作業への指針を得ることは困難であると考えられ、理論解析が強く望まれる。

一方、近年の鋳造業界において、湯流れ凝固シミュレーション<sup>23)~25)</sup>により、従来は経験と感覚で推察していた湯流れが明らかとなりつつあり、湯流れに帰因する不良の予測に多大な効果をもたらしている。また、新しい製品の生産を始める場合にも、シミュレーションによるCAE (Computer Aided Engineering) の活用により鋳造方案の試行回数を軽減させ、検討期間の短縮化とコストの削減が試みられている。今後、あらゆる生産プロセスにおいても、益々CAEの利用により生産技術の向上が進むと考えられ、砂型造型プロセスもCAEを構築するための造型シミュレータの開発が望まれる。

よって、本研究では、特に圧縮空気を利用する造型プロセスを対象に数学的モデルの構築と検証実験により、数学的モデルの検証を行うとともに、造型シミュレータ開発のための知見を得ることを目的とする。

## 1.2. 従来の研究

寸法精度の高い鋳造製品を得るためには、充てん密度が高く均一である生型を造型することが必要であると考えられる。それ故、生型砂の充てん過程における挙動を厳密に把握し、砂型内の力学場を明らかにするための、詳細な理論解析が望まれる。生型造型について実験的に解析した報告はN.Uzakiら<sup>3)</sup>をはじめ多数ある。ここでは、従来行われてきた生型造型プロセスの理論解析について述べる。

スクィーズ造型を対象とした代表的な理論解析として松浦ら<sup>20)21)</sup>の研究が挙げられる。スクィーズ時の最終充てん状態を臨界応力状態として連続体力学に基づき二次元応力場解析を行っている。単純な矩形金枠内の応力場は比較的精度よく推算できているが、金枠内に段差の大きいパターンが存在する場合は砂型内の全領域が臨界応力状態にあるとは推察しがたいため、この解析手法には適用限界があると考察される。

流気加圧造型の流気過程を対象とした理論解析は松浦ら<sup>4)5)</sup>の研究とWuら<sup>19)</sup>の研究が挙げられる。松浦らは静的にバランスしている状態を対象に、軸方向に関する一次元力学収支に砂層による圧力損失を加えて、軸方向の粉体圧を解析的に導出している。さらに、Darcyの法則と連続の式に基づき二次元の空気圧力場と空気流線を数値解析し、空気圧力等高線と充てん密度分布に相関関係があることを指摘している。また、流気速度が速く、動的な充てん過程が問題となる場合に関しても、実験で得られた砂層の加速度の時間変化を2次関数で近似し、軸方向粉体圧分布の理論解を導出している。しかし、砂層の移動加速度を測定しなければならず、また、粉体圧の空間分布を求めてないため、検討の余地がある。一方、Wuらは流気過程と非常に類似し、パターン面にベントホールを有しないエアークラウド造型を対象に砂型を連続体として、有限要素法 (Finite Element Method) で変形応力場解析を行っている。パターン面に作用する応力を定性的には予測できているが、段差の大きいパターンが存在する場合に型砂が不連続に移動し、数値解析が不可能であると推察される。

ブロー造型を対象とした理論解析は前田ら<sup>13)~16)</sup>の研究が挙げられる。前田らはブロー過程を対象に、有限要素法による混相流解析、充てん砂層内流れ解析、および、つき固め解析の連成計算による充てん予測に関して一つの指針を示している。しかしながら、砂型の変形量が大きい場合、この連続体



モデルによる解析の適用は困難であることも指摘している。

以上述べたように、造型過程を対象とした従来の理論解析は、各々のプロセスに対してそれぞれ提案されているため汎用性に欠ける。また、圧縮空気を用いる流気とブローに関しては定量的な予測が非常に困難であると考えられる。また従来の研究は、いずれも砂型を連続体近似のもとで解析しているため、特に、圧縮空気を用いる造型法は空隙率変化が大きく、適用範囲が制限されている。

そこで、本研究では圧縮空気を用いる全ての造型プロセスを対象に汎用性の高い数学的モデルを構築し、充てん過程の把握、砂型の充てん密度分布の予測、さらに、砂型内応力場の解明を行うことを目的とする。

### 1.3. 解析手法の選定

先に述べたように、従来の造型解析はいずれも砂型を連続体近似して、解析するため、適用範囲に限界がある。

近年、粉体工学の分野では非連続体の解析手法である離散要素法 (Distinct Element Method)<sup>26)~41)</sup>により、雪崩<sup>28)</sup>、空気輸送<sup>30)31)</sup>、ホッパからの穀物の排出<sup>36)</sup>、ボールミル<sup>41)</sup>などの数値解析が盛んに行われ、実験では測定が不可能である内部の力学場が明らかになりつつある。離散要素法は粒子1粒1粒に関する力学収支から加速度を算出し、微小時間後の粒子の位置と速度を順次求める手法であり、粉体を扱う全てのプロセスを対象に数値解析が可能であると考えられる。

そこで、本研究においては非連続体である解析手法の離散要素法により汎用性の高い生型造型モデルの構築を行う。すなわち、生型造型の数値解析に適した湿潤粉粒体のモデリングを行うとともに、数種の造型プロセスを対

象として解析と基礎実験による検討を行い、構築モデルの有効性の検討、生型造型メカニズムの追求を行うことにより研究を進める。

### 1.4. 本研究の目的と各章の概要

本研究は圧縮空気を利用した生型造型を対象に生型砂を非連続体として扱う離散要素法により生型造型モデル構築する。さらに、モデルに基づき、砂粒子の軌跡、速度変化、力学場の変化など、充てん過程や、充てん支配要因を明確にし、最終的には造型シミュレータを開発するための基礎的な知見を得るものである。

以下に本論文の各章の概要を示す。

第1章では生型造型法の種類を述べるとともに、従来の研究を概観した。次に、解析手法の選定を行い、本研究の目的について述べた。

第2章では生型砂の挙動解析に離散要素法を適用し、空気流解析と連成することで、汎用性が高く、非連続的な挙動の解析が可能な生型造型モデルを構築する。さらに、計算機の記憶容量の削減と計算速度の向上を図る圧縮要素とハードコア・ソフトシェル要素を提案する。

第3章では第2章で提案した圧縮要素モデルとハードコア・ソフトシェル要素モデルにより、流気加圧造型の数値解析を行う。さらに、モデルに基づき、充てん支配要因の解明、流気過程における圧縮空気流による流体抗力と砂粒子間の接触力の空間分布と経時変化を明確にする。

第4章ではハードコア・ソフトシェル要素を用いた造型モデルに基づき、ブロー造型解析を行う。モデルに基づき、ブロー過程において空気流が生型砂に及ぼす影響、力学場、砂粒子の軌跡を明確にする。

第5章では流気加圧造型とブロー造型の充てん特性の比較を行うとともに、



本研究で提案した生型造型モデルを実プロセスに適用する際の問題点を考察する。

最後に、第6章は総括で、第1章から第5章までの各章のまとめをする。

## 第2章 生型造型モデル

### 2.1. はじめに

生型は銑鉄鋳物を量産するプロセスとして長年用いられているにもかかわらず、設備・操業設計は経験に依存する部分が多い。それ故、近年の *near net shape* への厳しい要求を満たすためには理論的な研究が不可欠であり、CAEの構築を念頭に置いた数学的モデルの開発が必要である。

第1章の緒論で述べたように、圧縮空気を利用している生型造型を対象とした数値解析は非常に少なく汎用性にも欠けている。代表的な造型解析である前田ら<sup>13)~16)</sup>のブロー造型解析とWuら<sup>19)</sup>のエアークラウド造型解析は、いずれも最終充填過程を有限要素法により変形解析しているため、適用範囲に制限があると報告している。すなわち、粉粒体である生型砂を連続体近似しているため、解析精度に限界があると考えられる。

そこで、本研究では生型砂挙動の解析に、非連続体の解析手法である離散要素法を適用し、さらに、空気流解析と連成することで圧縮空気を用いる生型造型の解析モデルを構築する。

### 2.2. 離散要素法

離散要素法は、粒子を等方性弾性体でできた離散要素と仮定し、運動方程式を順次時間積分することで、各々の要素の挙動を解析する手法である。

任意の要素に着目して力学的バランスを考えると次式の運動方程式が得られる。



$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{1}{m_e}(\mathbf{f}_c + \mathbf{f}_d) + \mathbf{g} \quad (2-1)$$

ただし、 $\mathbf{r}$ は位置ベクトル、 $\mathbf{f}_c$ は接触力ベクトル、 $\mathbf{f}_d$ は流体抗力ベクトル、 $m_e$ は粒子の質量、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトル、 $\dot{\phantom{x}}$ は時間微分である。

### 2.2.1. 接触力

接触力はFig.2-1に示すP.A.Cundallら<sup>26)</sup>と同様のモデルにより算出する。すなわち、接触する2粒子間の法線方向と接線方向にばね-ダッシュポットの仮想並列配置をし、粒子 $i$   $j$ 間に作用するばねによる力は相対変位 $\Delta\mathbf{r}_{ij}$ に比例し、ダッシュポットによる力は相対変位速度 $\Delta\dot{\mathbf{r}}_{ij}$ に比例するものとする。微小時間 $\Delta t$ における粒子 $i$   $j$ 間の弾性抗力増分 $\Delta e_{ijm}$ と粘性抗力増分 $\Delta d_{ijm}$ は、それぞれ、次式となる。

$$\Delta e_{ijm} = -k_m \Delta\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{i}_m \quad (2-2)$$

$$\Delta d_{ijm} = -\eta_m \Delta\dot{\mathbf{r}}_{ij} \cdot \mathbf{i}_m \quad (2-3)$$

ここで、 $k_m$ はばね定数、 $\eta_m$ は粘性係数、 $\mathbf{i}_m$ は $m$ 方向の単位ベクトルで、 $m$ はLagrange座標における方向を示し、 $m=n$ :法線方向、 $m=t$ :接線方向である。

任意の時間 $t$ に粒子 $i$   $j$ 間に作用する弾性抗力 $[e_{ijm}]_t$ と粘性抗力 $[d_{ijm}]_t$ は、

それぞれ、次式となり、

$$[e_{ijm}]_t = [e_{ijm}]_{t-\Delta t} + \Delta e_{ijm} \quad (2-4)$$

$$[d_{ijm}]_t = \Delta d_{ijm} \quad (2-5)$$

粒子 $i$   $j$ 間に作用する接触力 $\mathbf{f}_{cijm}$ は次式となる。

$$\mathbf{f}_{cijm} = [e_{ijm}]_t + [d_{ijm}]_t \quad (2-6)$$

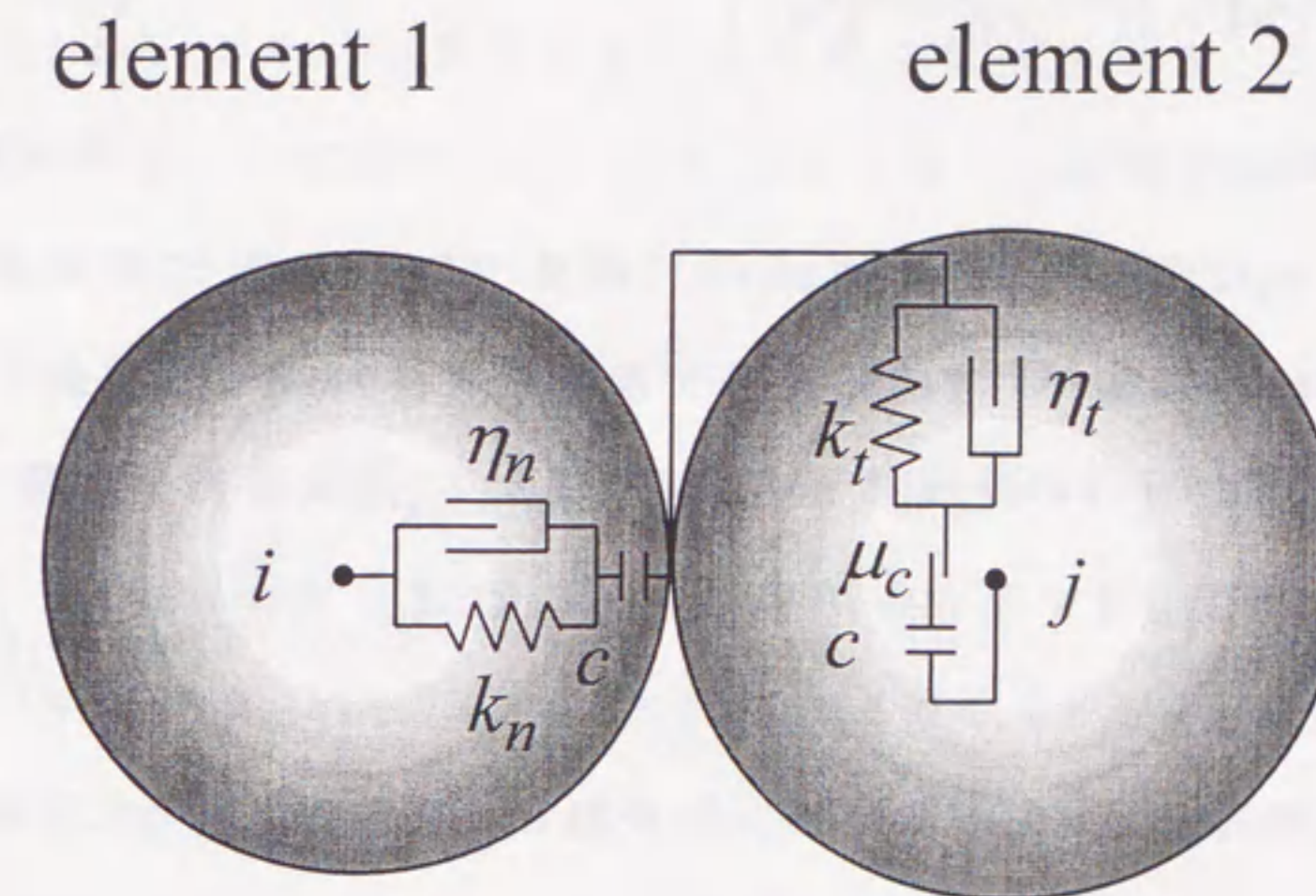


Fig.2-1 Modeling of contact force.



なお、生型砂の特徴である付着力を考慮し、粒子  $i, j$  が離れる際に法線方向の接触力  $f_{cijn}$  が付着力  $f_{coh}$  より小さいときは  $f_{cijn}$  を零とする。

また、すべりは Coulomb の法則に従い考慮する。すなわち、

$$\left[ e_{ijt} \right]_t > \mu_0 \left[ e_{ijn} \right]_t + f_{coh} \quad (2-7)$$

となるとき、

$$\left[ e_{ijt} \right]_t = \left( \mu_0 \left[ e_{ijn} \right]_t + f_{coh} \right) \cdot \text{sign} \left( \left[ e_{ijt} \right]_t \right) \quad (2-8)$$

$$\left[ d_{ijt} \right]_t = 0 \quad (2-9)$$

ここで、 $\mu_0$  は摩擦係数、 $\text{sign}(z)$  は  $z$  の符号である。

以上の仮定に基づいて(2-6)式を付着力とすべりを考慮して修正し、2粒子  $i, j$  間に作用する Euler 座標系における接触力  $f_{cij}$  を次式で表現する。

$$f_{cij} = \sum_m f_{cijm} \cdot i_m \quad (2-10)$$

さらに、粒子  $i$  に作用する接触力は接触する全粒子を考慮して次式となる。

$$f_{ci} = \sum_j^{\text{contacting } i} f_{cij} \quad (2-11)$$

## 2.2.2. 流体抗力

空気流が粒子に及ぼす力は一般的に次式で表すことができる。

$$f_d = \frac{1}{2} \rho_g C_D A_s |u| u \quad (2-12)$$

ここで、 $\rho_g$  は流体の密度、 $C_D$  は抗力係数<sup>42)</sup>、 $A_s$  は投影面積、 $u$  は砂粒子と空気流との相対速度である。空気流の速度は Ergun の式<sup>43)~45)</sup>により充てん砂層の圧力損失を考慮した次節の空気流解析結果から得られる速度

場を用いる。

## 2.3. 空気流解析

空気流を利用する流気過程やブロー過程においては、砂粒子と空気流が互いに影響を及ぼし合うため、空気流解析も非定常で解析を行うことが望ましいと考えられる。このような系を対象に非定常空気流解析をする場合、一般に、砂層を考慮した連続の式と圧力損失を加味した運動方程式の連立方程式を数値解析する。このような解析手法であれば、流気やブローのみならず、全ての造型プロセスを対象に解析が可能である。しかし、計算時間が非常に長くなるため、流気のように解析の対象とするほとんどの領域に砂層が存在する場合、簡便な準定常解析により、短時間の計算である程度の解析精度が確保できると考えられる。そこで、本論文では対象とする系と目的に応じて準定常解析と非定常解析を使い分ける。以下に2つの解析方法を詳細に述べる。

### 2.3.1. 準定常解析

ここでは、計算時間の短い簡便なモデルの構築を目的とする。流気加圧造型など、あらかじめ金枠内に生型砂を配置させ、圧縮空気を作用させる場合、砂粒子の移動が比較的小さいため、準定常解析により計算速度の向上をはかることができると考えられる。以下、準定常解析により空気流速度場と圧力場を求める方法を述べる。

充てん砂層内を流れる空気に対し、連続の式は次式で表される。



$$\frac{\partial \varepsilon \rho_g}{\partial t} = -(\nabla \cdot \mathbf{G}_g) \quad (2-13)$$

ここで、 $\varepsilon$ は空隙率、 $\rho_g$ は空気の密度、 $\mathbf{G}_g$ は質量速度である。解析を簡便にするため、定常を仮定すると次式を得る。

$$\nabla \cdot \mathbf{G}_g = 0 \quad (2-14)$$

運動方程式は次式に示す2次元に拡張した Ergun の式<sup>43)~45)</sup>により表現できる。

$$\nabla p = -(f_1 + f_2 |\mathbf{G}_g|) \mathbf{G}_g \quad (2-15)$$

ただし、

$$f_1 = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu_g}{\rho_g (\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2-16)$$

$$f_2 = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\rho_g \phi d_p \varepsilon^3} \quad (2-17)$$

ここで、 $\mathbf{G}_g$ は(2-18)、(2-19)式で定義される質量速度、 $\mu_g$ は空気の粘性係数、 $\phi$ は砂の形状係数、 $d_p$ は砂粒子の直径である。

ここで、流れ関数  $\psi$  を次式で定義すれば(2-14)式を満たすことができる。

$$G_x = \varepsilon \rho_g v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (2-18)$$

$$G_y = \varepsilon \rho_g v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2-19)$$

(2-18)、(2-19)式を(2-15)式に代入し、各々の成分を交差微分して差を取り圧力項を消去すると、解くべき式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \left[ f_1 \sqrt{\left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2} + f_2 \left\{ 2 \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 \right\} \right]$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \left[ f_1 \sqrt{\left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2} + f_2 \left\{ \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] \\ & + \frac{\partial \psi}{\partial x} \left[ \frac{\partial f_1}{\partial x} \sqrt{\left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2} + \frac{\partial f_2}{\partial x} \left\{ \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] \\ & + \frac{\partial \psi}{\partial y} \left[ \frac{\partial f_1}{\partial y} \sqrt{\left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2} + \frac{\partial f_2}{\partial y} \left\{ \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] \\ & + 2f_2 \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} = 0 \end{aligned} \quad (2-20)$$

(2-20)式を中央差分化し、SOR(逐次加速緩和法)<sup>46)</sup>で数値解析し、流れ関数が求められる。さらに、(2-15)式の発散をとり、圧力に関する Poisson の方程式を数値解析し、圧力場を求める。

この定常解析を解析中に数回実行することにより、すなわち、逐次定常解析を行うことにより非定常挙動の解析を行う。

### 2.3.2. 非定常解析

ブロー造型のように、生型砂と空気流が高速で比較的長い距離移動する場合、前節の方法では不十分であり、また、高精度な解析が要求される場合などは非定常解析を行う必要があると考えられる。

砂層の空隙率ならびに、砂層による圧力損失を考慮した連続の式と運動方程式は、それぞれ、次式で表せる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \rho_g + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_g \mathbf{v}) = 0 \quad (2-21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \mathbf{v} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\frac{\varepsilon}{\rho_g} \nabla p + \frac{\varepsilon \mathbf{f}_v}{\rho_g} \quad (2-22)$$



ここで、 $\varepsilon$ は空隙率、 $v$ は空気流速、 $\rho_g$ は空気の密度、 $f_v$ は砂粒子が空気流に及ぼす圧力損失項で次式で表現できる。

$$f_v = -(f_1 + f_2 |G_g|) G_g \quad (2-23)$$

ただし、 $G_g$ は空気の質量速度であり、

$$G_g = \varepsilon \rho_g v_a \quad (2-24)$$

また、

$$f_1 = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu_g}{\rho_g (\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2-25)$$

$$f_2 = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\rho_g \phi d_p \varepsilon^3} \quad (2-26)$$

ここで、 $v_a$ はそれぞれの空気流解析グリッドにおける要素の平均速度ベクトル、 $\mu_g$ は流体の粘性係数、 $\phi$ は砂の形状係数、 $d_p$ は砂粒子の直径である。本解析ではSOLA法<sup>47)</sup>に基づき、解析領域内における空気の速度場と圧力場を数値計算した。

## 2.4. 解析のアルゴリズム

数値解析の基本手順を以下に示す。

- i) 初期条件、造形条件の入力
- ii) 粒子の接触判定を行い、接触している粒子間の接触力を求める。
- iii) 粒子の位置から空隙率分布を算出する。
- iv) iii)で得られた空隙率分布を用いて空気流解析を行う。
- v) iv)で得られた空気流の速度場を用いて粒子の作用する流体抗力を算出する。
- vi) ii)で計算した接触力、v)で計算した流体抗力と重力を加算し、粒子に

作用する全合力から加速度を算出する。

vii) vi)で得られた加速度から、微小時間  $\Delta t$  後の粒子の位置と速度を求める。

viii) 粒子が停止するまで ii) から vii) の操作を繰り返す。

## 2.5. 解析要素

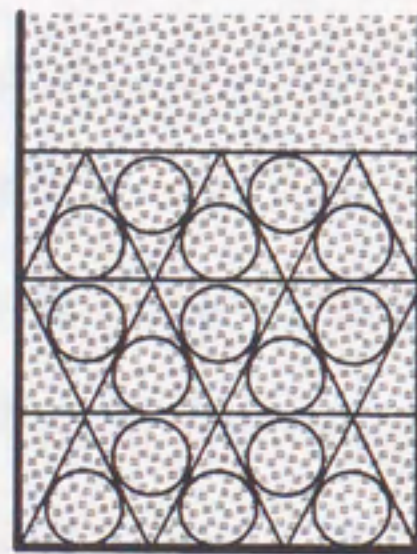
本来、離散要素法は一粒子に一要素を割り当てるべきである。しかし、後述するように本研究で型砂は  $1.1 \times 10^8$  万個/kg 存在することを考えれば、数 kg を扱う実験室規模の造形を対象とした場合においても、全砂粒子の挙動を追従することは計算機の記憶容量上不可能である。特に、要素間の接触判定は要素数の2乗に比例して計算時間が長くなるため、可能な限り少ない要素数で解析することが望まれる。そこで、ある程度の個数の砂粒子を代表する要素により解析する必要がある、ここでは以下に示す圧縮要素と非圧縮であるハードコア・ソフトシェル要素を提案する。

### 2.5.1. 圧縮要素

二次元解析で、Fig.2-2-a に示すように、砂型は三角柱要素で構成されているとし、その三角柱要素内に接する円柱の離散要素に砂粒子群を代表させる。三角柱要素は砂型の質量と空隙率を保存しておく必要があるが、離散要素が中実の場合、空隙率に不一致が生じるため、離散要素自体にも空隙率を与え、三角柱全体で砂粒子の質量保存と空隙率の保存を考慮する。この場合、要素自体が空隙率を有するため、接触の程度に応じて要素を圧縮させる必要がある。そこで、接触力が変形抵抗より大きいときは円筒要



a)



b)



Fig.2-2 Treatment of element.

a) compactable elements

b) hard-core/soft-shell elements

素が圧縮され、直径が小さくなるものとする。また、変形抵抗を算出するための砂型のマクロ的なヤング率は予備実験により、空隙率の関数として求め、個々の生型砂の特性が考慮される。

この方法によりモデリングした要素を以下、圧縮要素という。

## 2.5.2. ハードコア・ソフトシェル要素

Fig.2-2-b に示すように生型砂の質量を保存しつつ、粒径を大きくして個数を減少させた離散要素として解析を行う。この要素を用いて解析をする場合、要素自体は中実であり、任意の空間に要素が占める割合から空隙率を算出し、砂型充填の程度を評価する。さらに、生型砂は珪砂の周囲にベントナイト層が形成されているため、Fig.2-3 に示すようにハードコアの周囲にソフトシェルが形成されている要素を導入し、湿潤粉粒体である生型砂の特性をより厳密に評価する。すなわち、接触深さ $\delta$ がベントナイト層の厚さ $\delta_b$ 以下ではベントナイト-ベントナイト間に作用するばね-ダッシュポットを用い、接触深さがベントナイトの厚さを越えるときは珪砂-ベントナイト間に作用するばね-ダッシュポットを用いる。

以後、この方法によりモデリングした要素をハードコア・ソフトシェル要素という。



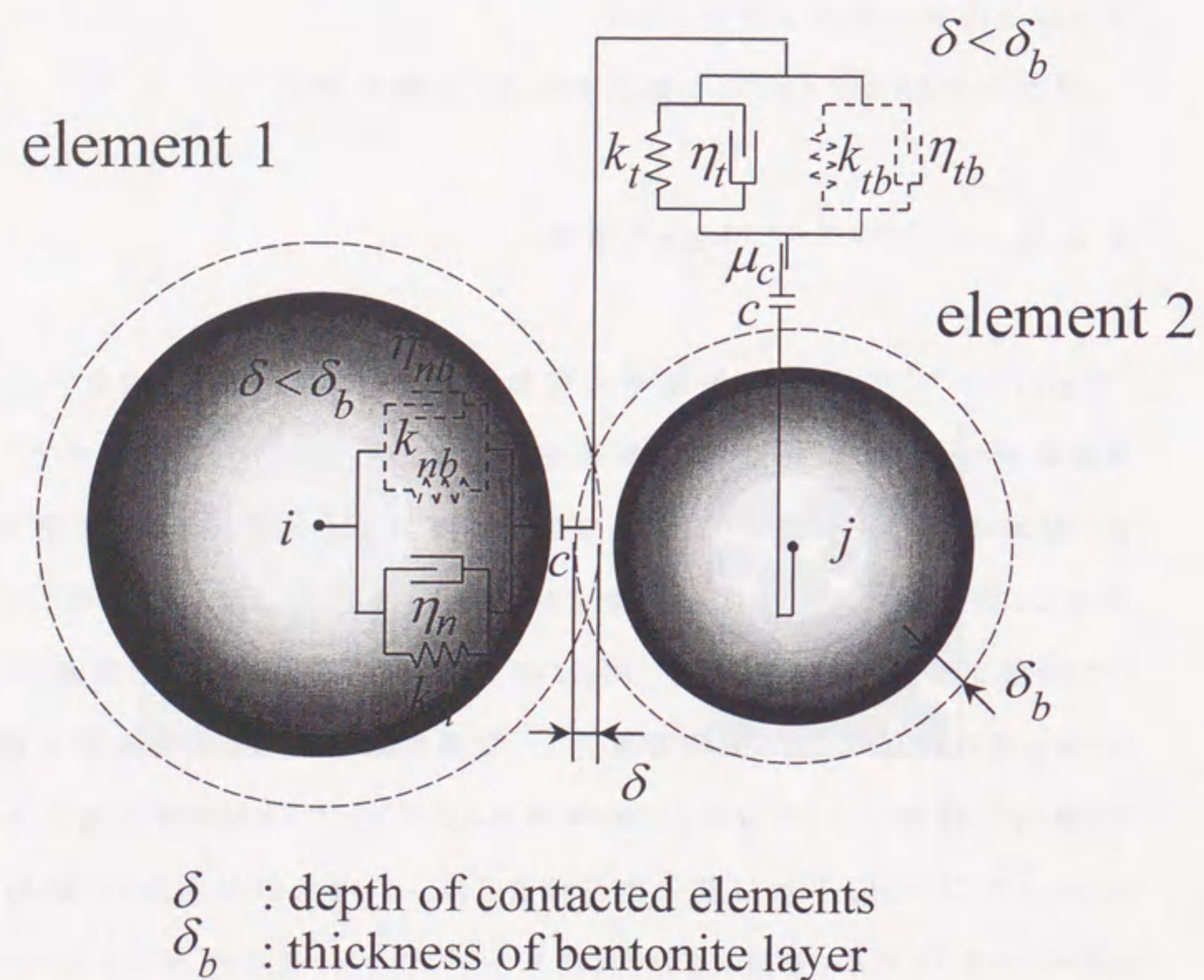


Fig.2-3 Modeling of contact force for green sand.

## 2.6. パラメータ同定

### 2.6.1. 圧縮要素

#### (1) 要素の質量

本論文では解析を二次元で行うため、Fig.2-4 に示すように三角柱要素内に接する円柱の離散要素に砂粒子群を代表させて解析を行う。その三角柱要素内の生型砂の質量保存を考慮すると、一要素の質量  $m_e$  は次式で表現できる。

$$m_e = (1 - \varepsilon) \frac{3}{4} \sqrt{3} d_e^2 l \rho_p \quad (2-27)$$

ここで、 $\varepsilon$  は空隙率、 $l$  は金枠の奥行き、 $\rho_p$  は生型砂の真密度、 $d_e$  は離散要素の直径である。

#### (2) 要素の圧縮判定

空隙率を有した生型砂の集合体である直径  $d_e$  の円柱要素を一要素として扱うと、解析では要素自体を圧縮させる必要がある。そこで、接触力が変形抵抗より大きいときは円筒要素が圧縮され、直径が小さくなるものとする。この直径の減少は(2-27)式によって空隙率を減少させ、充てん状態を評価できる。また、変形抵抗を算出するための砂型のヤング率は後述する予備実験により、空隙率の関数として求めた。



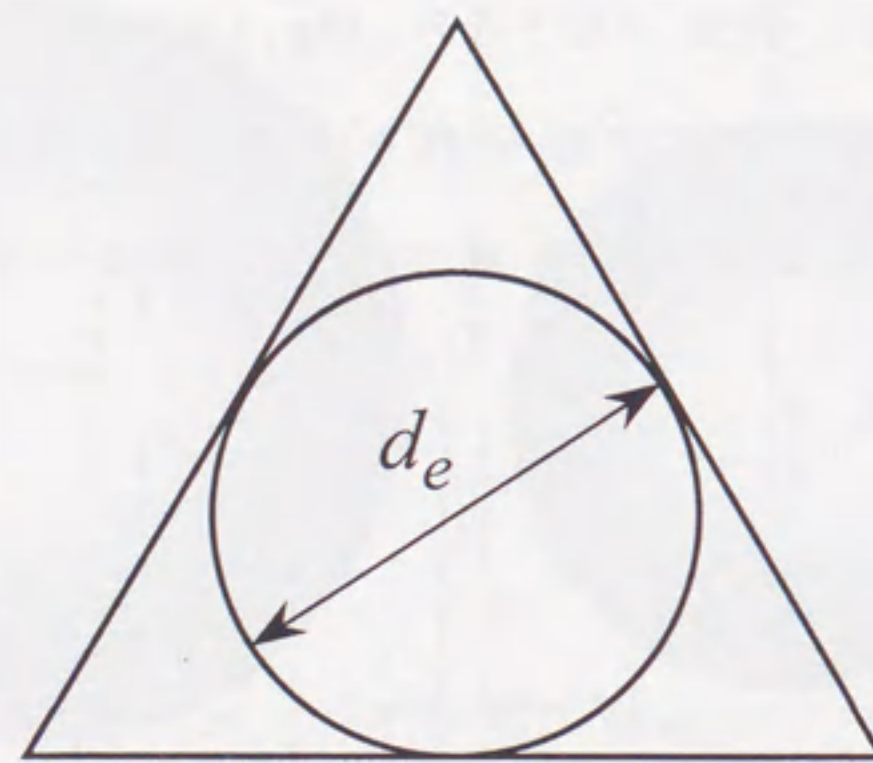


Fig. 2-4 Cylindrical element for calculating.

### (3) 接触力パラメータ

離散要素法の接触力を算出するモデルにおけるばね定数とダッシュボットの粘性係数の評価法を以下に述べる。

#### a) ばね定数

法線方向のばね定数は Hertz の弾性接触理論<sup>48)</sup>により、次式で評価した。

$$k_n = \frac{\pi E}{2(1-\nu^2) \left( \frac{2}{3} + \ln \frac{4r_e}{b} \right)} \quad (2-28)$$

ここで、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比、 $r_e$  は要素の半径であり、接触幅  $b$  は接触圧力  $P$  に比例し次式で与えられる。

$$b^2 = \frac{4r_e}{\pi} \left( \frac{1-\nu^2}{E} \right) P \quad (2-29)$$

#### b) 粘性係数

法線方向のダッシュボットの粘性係数はばね-ダッシュボットの振動系から次式で与えられる。

$$\eta_n = 2\gamma \sqrt{m_e k_n} \quad (2-30)$$

ただし、

$$\gamma = \frac{\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2}} \quad (2-31)$$

$$\alpha = -\frac{\ln \beta}{\pi} \quad (2-32)$$

$\beta$  は反発係数である。



本解析では接線方向のばね定数とダッシュポットの粘性係数も法線方向の値と同一とする。

#### (4) 砂型のヤング率

一方向圧縮試験の応力とひずみの関係から空隙率と砂型のヤング率の関係を求めた。最大 2MPa まで加圧し、実測した圧力と変位から、空隙率とヤング率の関係を算出した。なお、供試砂は後述の実験で用いたものであり、供試砂特性を Table 3-1 に示す。

得られた空隙率とヤング率の関係を Fig.2-5 に示す。なお、図中のCB値(コンパクタビリティ)は生型砂特性の指標の一つであり、試験方法を付録に示す。空隙率の高い領域においてはヤング率が極めて低いため、型砂の変形が容易であり、空隙率が 0.45 程度より低い領域では急激にヤング率が上昇し、変形抵抗が極端に大きくなっていることがわかる。

#### (5) 摩擦係数および付着力

摩擦係数  $\mu_0$  と付着力は注入法<sup>49)</sup>により測定した安息角より求めた。まず、CB(コンパクタビリティ)40%に混練した生型砂の混練直後と、その後乾燥させた生型砂の安息角を測定した。生型砂自身の摩擦係数  $\mu_0$  はベントナイト層による物理的形状のみで与えられるため乾燥させた生型砂の安息角から求め、ここでは 0.731 であった。また、付着力は Coulomb 摩擦の法則を用いれば、質量を  $m_e$ 、混練直後の安息角を  $\alpha$ 、付着力を  $f_{coh}$  とすると、次式で与えられる。

$$m_e g \sin \alpha = \mu_0 m_e \cos \alpha + f_{coh} \quad (2-33)$$

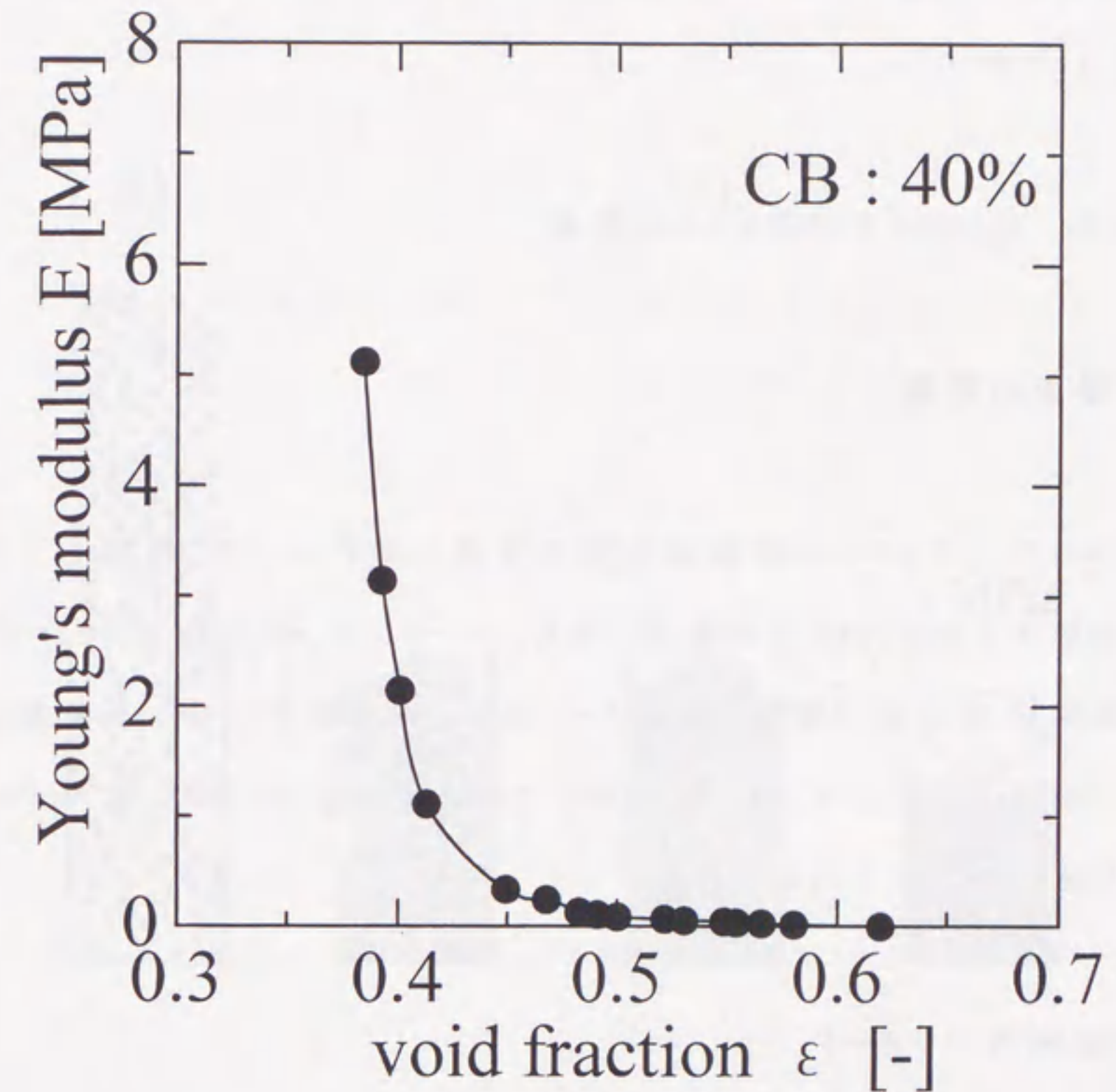


Fig. 2-5 Relationship between void fraction and Young's modulus.



付着力  $f_{coh}$  は生型砂に付着した水分により異なると考えられ、単位質量当たりの付着力  $f_{coh}/m_e$  として評価した。CB40%の場合、 $f_{coh}/m_e$  は  $3.56 \times 10^{-2} \text{m/s}^2$  であった。

## 2.6.2. ハードコア・ソフトシェル要素

### (1) 要素の質量

ハードコア・ソフトシェル要素は生型の質量を保存しつつ、粒径を大きくして個数を減少させた非圧縮の要素である。ハードコア、および、ソフトシェルの質量は単純に生型砂の質量（珪砂とベントナイト）を解析に用いる要素の個数で除したものとなる。また、ソフトシェルについては Fig.2-3 のようにハードコアの周囲を覆うように厚さ  $\delta_b$  を求める。

### (2) 接触力パラメータ

ハードコア・ソフトシェル要素により解析を行う場合、ベントナイトーベントナイト間と珪砂ーベントナイト間に作用するばね定数がそれぞれ存在し、前節で扱った圧縮要素のように Hertz の弾性理論に基づいてばね定数を見積もることが不可能である。そこで、別途行った予備実験を対象とした解析によりばね定数を同定した。具体的には、Fig.2-6-a に示すように幅 50mm の容器に生型砂を自由落下させたときの砂層高さから、平均的な空隙率が 0.63 になるようにベントナイトーベントナイト間に作用するばね定数を決め、Fig.2-6-b に示すように 1MPa で圧縮したときの高さが 50mm になるように珪砂ーベントナイト間に作用するばね定数を決定した。なお、ダッシュポットの粘性係数は前節

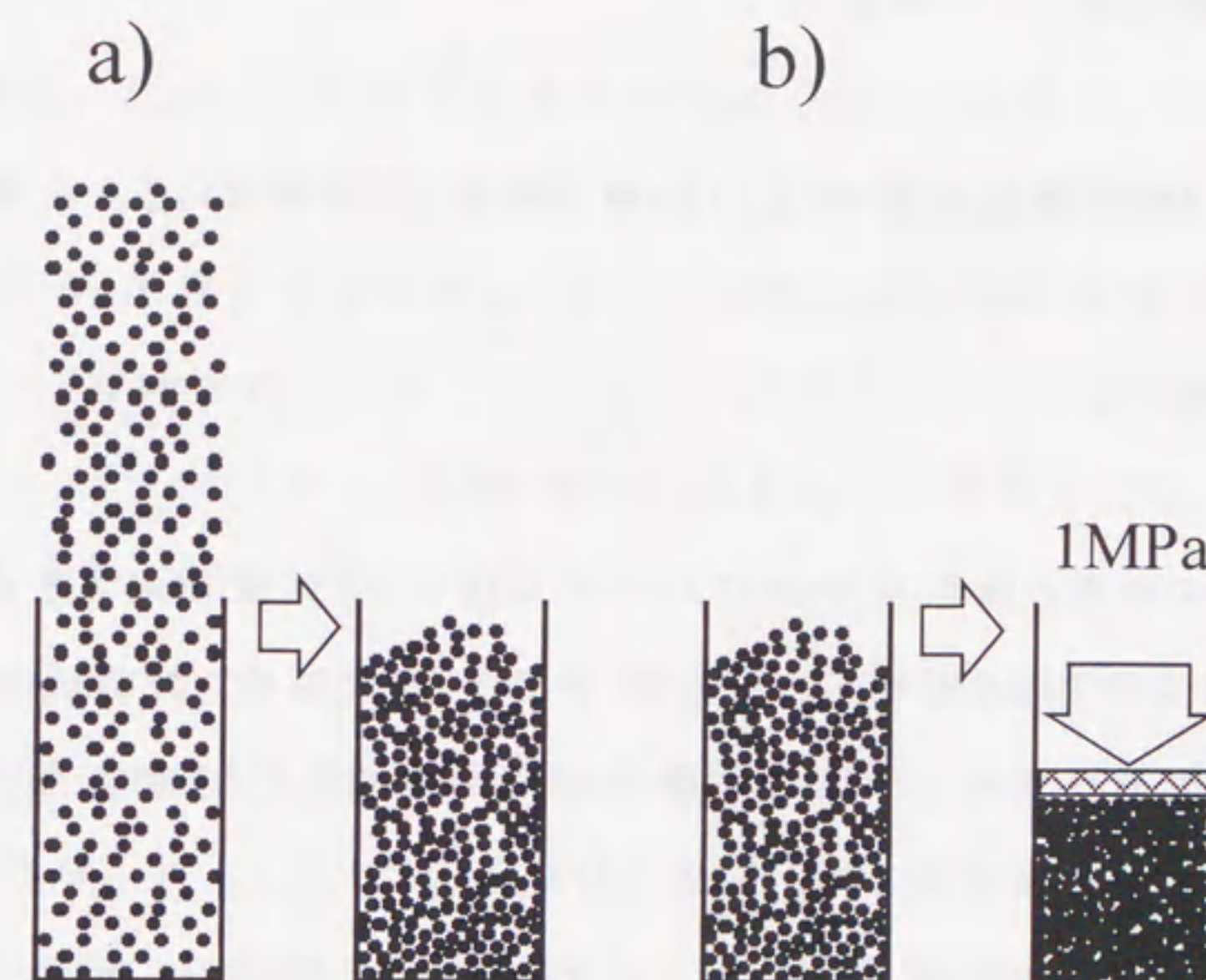


Fig. 2-6 Estimation of stiffness.

a) free fall

b) compaction



の圧縮要素と同様に、(2-30)式で反発係数と要素の質量により、それぞれのばね定数に対して一意的に決まる。

### (3) 摩擦係数および付着力

付着力と摩擦係数は2.6.1.(5)節で同定した値を用いる。

## 2.7. まとめ

生型砂の挙動を離散要素法によりモデル化し、空気流解析と連成することで生型造型モデルを構築した。さらに、計算時間の短縮と計算機記憶容量の削減のための要素として、生型砂の特性を考慮した圧縮要素とハードコア・ソフトシェル要素を提案した。

圧縮要素は要素自体が空隙率を有するため、少ない要素数でもある程度の精度の解析結果が得られ、計算時間も短いと考えられる。

一方、ハードコア・ソフトシェル要素による解析は多くの要素数を必要とし、計算時間が長い。特に生型砂のような湿潤粉粒体に対して、より詳細な解析が可能であると考えられる。

## 第3章 流気加圧造型解析

### 3.1. はじめに

緒論で述べたように、砂型寸法精度の向上、生産の高速化、作業環境の改善の観点から、圧縮空気の利用とスクィーズとの併用による造型法が主流になっている。圧縮空気を利用した造型には主に流気加圧造型法(流気+スクィーズ)(有枠方式)とブロー+スクィーズ(無枠方式)に大別でき、自動車のエンジンブロックなどの100kg程度の鋳造品は寸法精度が比較的高い前者の流気加圧造型プロセスにより生産されている。

複雑形状のパターンに対して均一な充填密度の砂型を造型するためには、充填過程における生型砂の挙動を把握、制御することが必要である。しかし、圧縮空気を利用した充填過程は生型砂と空気流が相互に作用する複雑な現象であり、理論解析が望まれる。そこで、本章では流気加圧造型の流気過程を研究の対象とする。

本章では、前章で構築した離散要素法を応用した造型モデルにより、数値解析を行い、検証実験により妥当性を評価する。まず、計算時間の短縮化を図った圧縮要素を用いて解析を行う。モデルに基づき、充填密度分布の経時変化、圧縮空気の流入速度が生型砂の移動に及ぼす影響を調査し、本プロセスの支配要因を明確にすることを試みる。次に、非圧縮であるハードコア・ソフトシェル要素を適用し、空気流も非定常解析を行い、より詳細な造型解析を行う。モデルに基づき、充填過程のマクロ的な挙動のみならず、ミクロ的な砂粒子間の動的な接触力の変化も明らかにする。



### 3.2. 実験装置および供試砂

実験装置は Fig.3-1 に示す小型造型装置であり、金枠はサイズ  $110 \times 110 \times 250\text{h}$  の直方体形状であり、タンクの圧力は  $0.5\text{MPa}$ 、油圧シリンダーによりスクイズも行える構成となっている。金枠壁面とパターン面に取り付けた圧力センサーにより空気圧を測定し、パターン面に取り付けた土圧力センサーにより全圧力（空気圧力＋生型砂による粉体圧）を測定する。パターン面においては生型砂のみがパターン面に及ぼす圧力である粉体圧（＝全圧力－空気圧力）を算出する。

供試砂は新砂珪砂（フラタリー）に Na タイプのベントナイト（ボルクレイ）を 10%、水分を 2% 添加し、シンブソンタイプの混練機で 20 分間予備混練した後に、適量加水、混練し、コンパクタビリティ（CB）を 40% に調節した。生型砂の特性（付録参照）を Table 3-1 に示す。\* は後述の造型シミュレーションを実行するときのパラメータ、および、パラメータ導出のために測定したデータである。

### 3.3. 流気実験

Fig.3-1 に示す小型実験装置を用い、タンクの圧力を  $0.5\text{MPa}$  に設定して流気実験を行った。実験において得られた圧力曲線の一例を Fig.3-2 に示す。図ではタンク内の圧力、砂層上端での圧力、パターン面での圧力と粉体圧を示してある。図より、パターン面において測定した粉体圧（生型砂がパターン面に及ぼす圧力）は最大値  $1.3\text{MPa}$  の鋭いピークを示しており、砂型上端とパターン面での圧力差  $0.22\text{MPa}$  の数倍の値が得られた。この結果より生型砂の充てん過程には流気エネルギー（圧力差）のみならず、生型砂の運動エネルギーが大きく作用しているものと考えられる。

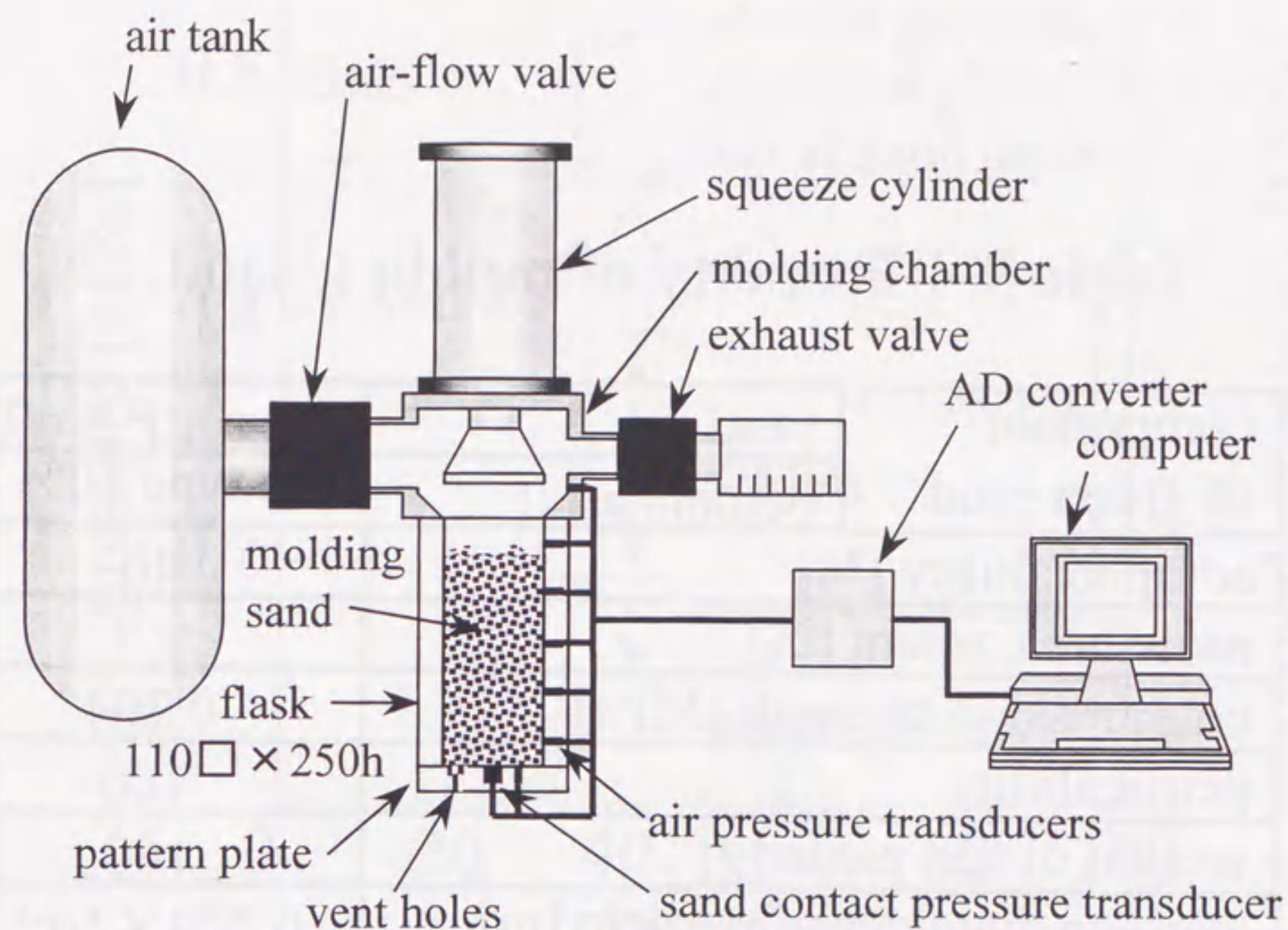


Fig.3-1 Experimental apparatus.



Table 3-1 Property of molding sand.

component of green sand	sand bentonite	silica A.F.S.69 Na type 10%
compactability [%]	40	
moisture content [%]	2.7	
compression strength [MPa]	0.204	
permeability	100	
weight of test piece [g]	160	
average diameter of particle [m]	$0.229 \times 10^{-3}$	
density [kg/m <sup>3</sup> ]	2540	
friction coefficient*	0.731	
cohesion* [m/s <sup>2</sup> ]	$35.6 \times 10^{-3}$	
repulsion coefficient*	0.228	
shape coefficient of particle*	0.861	

\*measured value

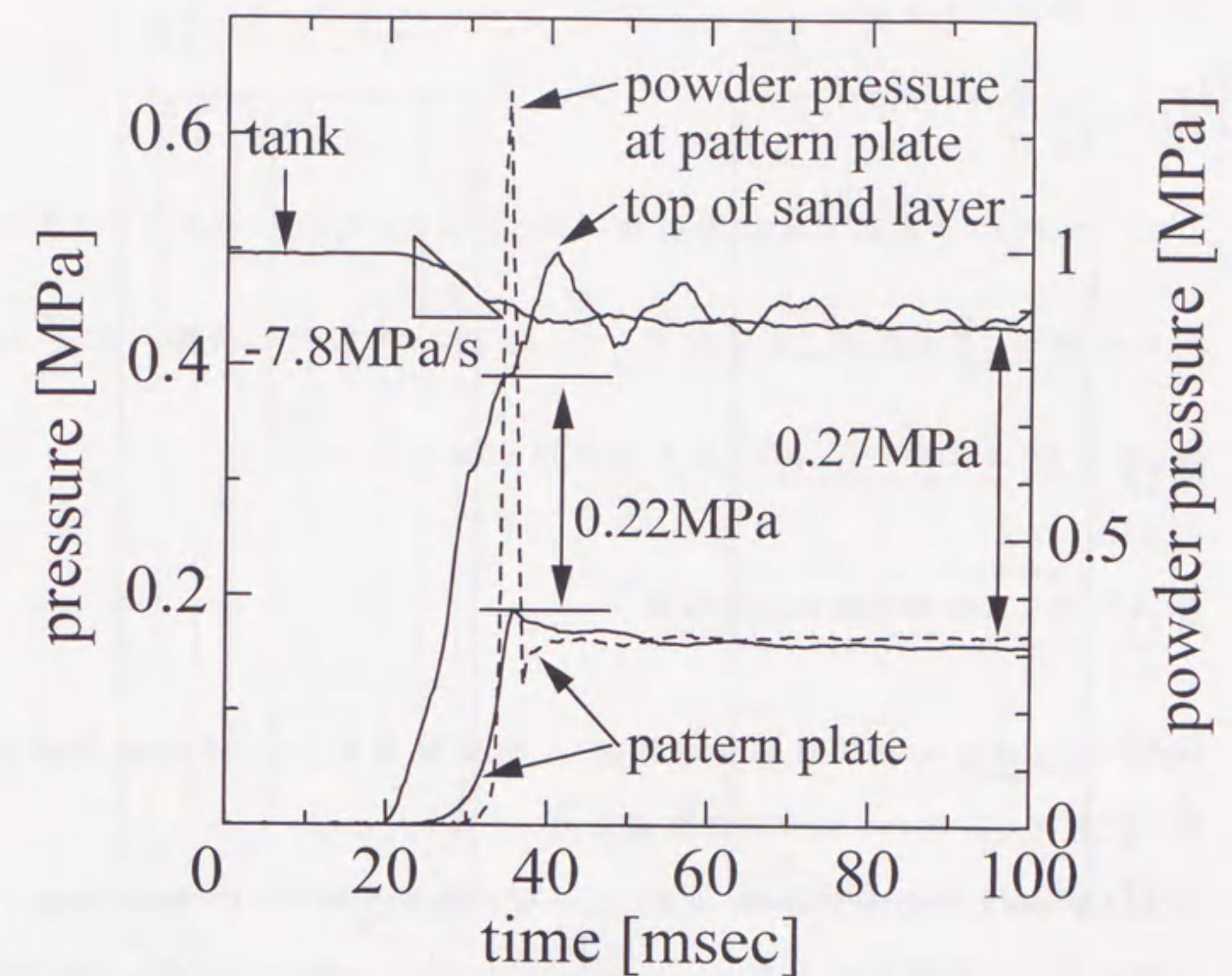


Fig. 3-2 Pressure curve.  
(inlet air velocity : 80m/s)



なお、圧縮空気の流入速度  $v_{in}$  はタンク内の圧力変化を等エンタルピー変化とし、次式で算出した。

$$v_{in} = -\frac{x_0}{P_0 \kappa} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3-16)$$

ここで、 $x_0$  はタンク容積を金枠断面積で除した長さ、 $P_0$  はタンク圧力、 $\kappa$  は空気の比熱比（定圧比熱 / 定容比熱）である。タンクの圧力の時間勾配  $\frac{\partial p}{\partial t}$  は Fig.3-2 より  $-7.8\text{MPa/s}$  であり、流入速度は  $80\text{m/s}$  となった。

#### 3. 4. 充てん砂層を流れる空気流

ここでは、計算時間の短縮化を考慮し、空気流解析として準定常解析を用いて充てん砂層内を流れる空気流について解析した。

CB40%の生型砂が空隙率 0.63 で一様に金枠を満たしているときの充てん開始時の流れ解析結果を Fig.3-3-a、b に示す。なお、ベントホールはパターン面の隅に取り付けてある。計算に採用した標準格子は  $5\text{mm}$  正方の均一格子とし、空気流入速度は  $80\text{m/s}$  とした。なお、Fig.3-3-b はタンクの圧力で無次元化して表示してある。図中の流線 (Fig.3-3-a) は大部分において直線であり、パターン面上  $50\text{mm}$  付近から流れの向きを変えベントホールへ流れ込み、流線の間隔が密になり速度が増している。それ故、圧力 (Fig.3-3-b) も上部においては損失が少なく、ベントホール近傍で、圧力損失が大きく、生型砂に作用する流体抗力が大きいものと考察される。

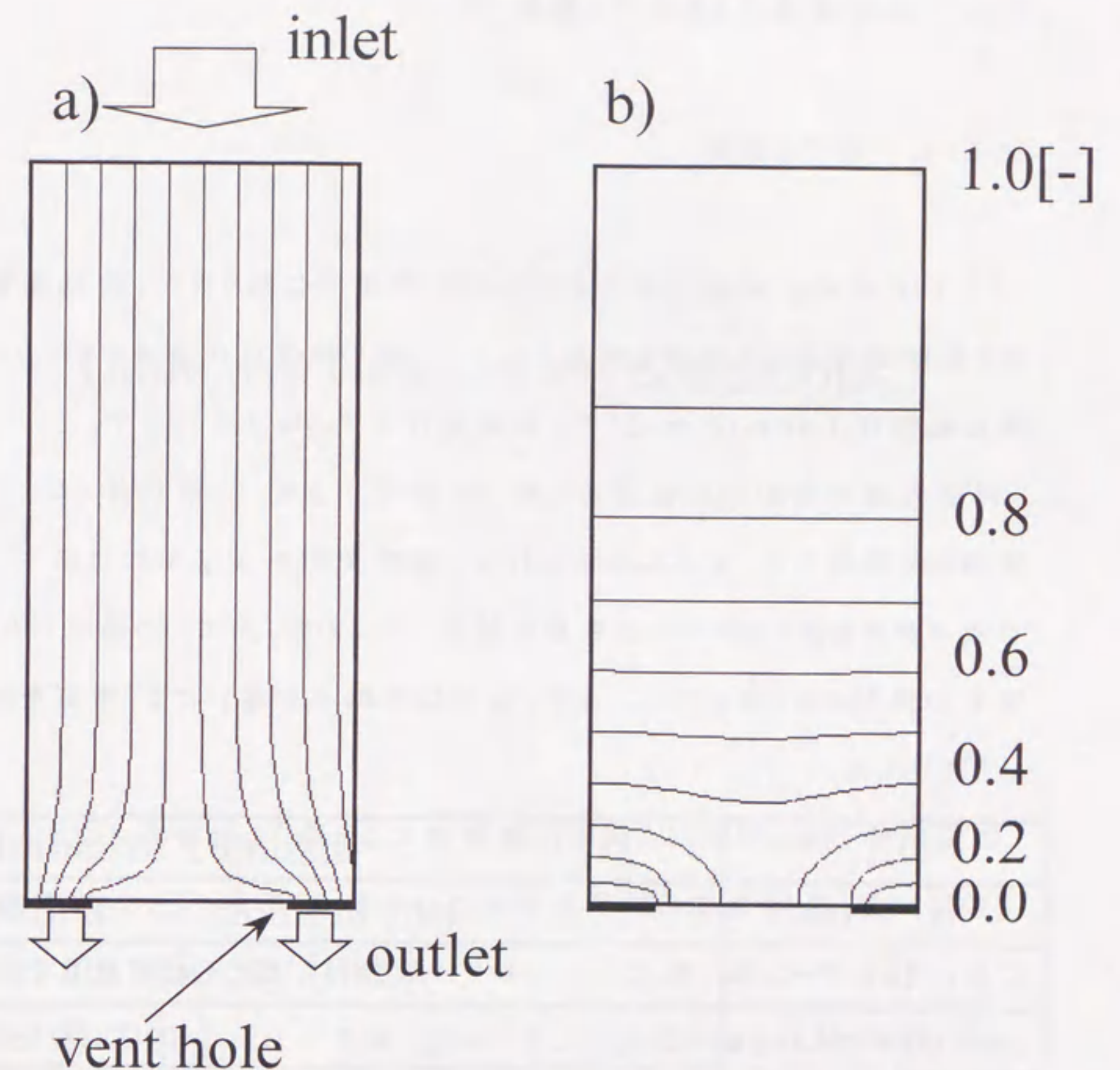


Fig. 3-3 Streamlines and isobars of air-flow through molding sand bed.  
a) streamlines  
b) isobars



### 3.5. 圧縮要素による充てん解析

#### 3.5.1. 充てん挙動

ここでは 2.8kg の生型砂を100個の圧縮要素に割り当て、流気過程における生型砂の充てん挙動を解析した。100個の要素に代表させるため、一要素の直径は  $1.46 \times 10^{-2} \text{m}$  とした。計算条件を Table 3-2 に示す。

円筒要素を規則的に配置した後に自由落下させ、初期状態とした。初期状態から流気させ、充てん解析を行い、経時変化を Fig.3-4 に示す。圧縮要素モデルを用いるため、空隙率の減少、すなわち、充てんの進行にともない要素の径が小さくなっていく。また、同図は空隙率の違いにより要素を色分けして表現した。

初期状態(0ms)では100個の円筒要素による高さ王金棒高さ(250mm)とほぼ等しくなり、円筒要素の評価法が妥当であると判断される。また、数値解析において、パターン面、特に、ベントホール近傍から充てんは開始しており、約 20ms で充てんつき固めが完了した。一方、実験においてパターン面で測定した粉体圧(生型砂がパターン面に及ぼす圧力)は流気開始後、約 20ms で鋭いピークを示しているため(Fig.3-2)、このときに充てんつき固めがほぼ完了しているものと判断され、充てんつき固め終了時間が一致している。また、Fig.3-4 より同一高さにおける充てん密度はほぼ等しく、砂層下部での充てん密度が高く上部で低い傾向が伺われる。これら、流気過程におけるマクロ的な挙動は松浦らの報告<sup>4)5)</sup>と一致するものである。なお、計算時間は約10分(シリコングラフィックス社製のワークステーションO2、SPEC fp95が10の演算速度)であり、後述のハードコア・ソフトシェル要素モデルより短時間であった。

最終充てん後の中心軸上における空隙率分布を実測値とともに Fig.3-5

Table 3-2 Calculation conditions.

number of element	100
diameter of element [m]	$1.46 \times 10^{-2}$
inlet air velocity [m/s]	80
time step [s]	$2.0 \times 10^{-6}$



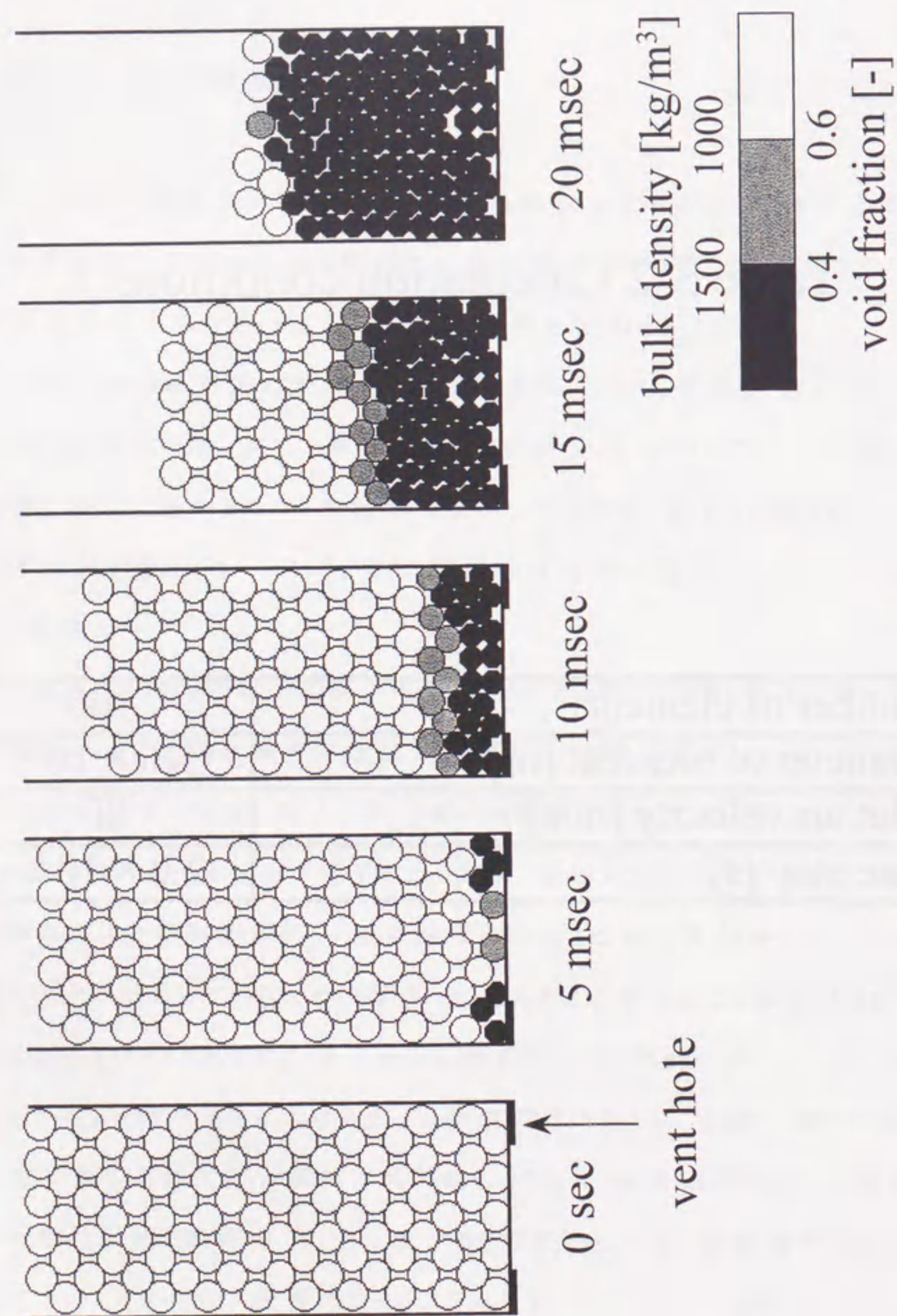


Fig.3-4 Calculated results for sand molding.  
(inlet air velocity : 80 m/sec)

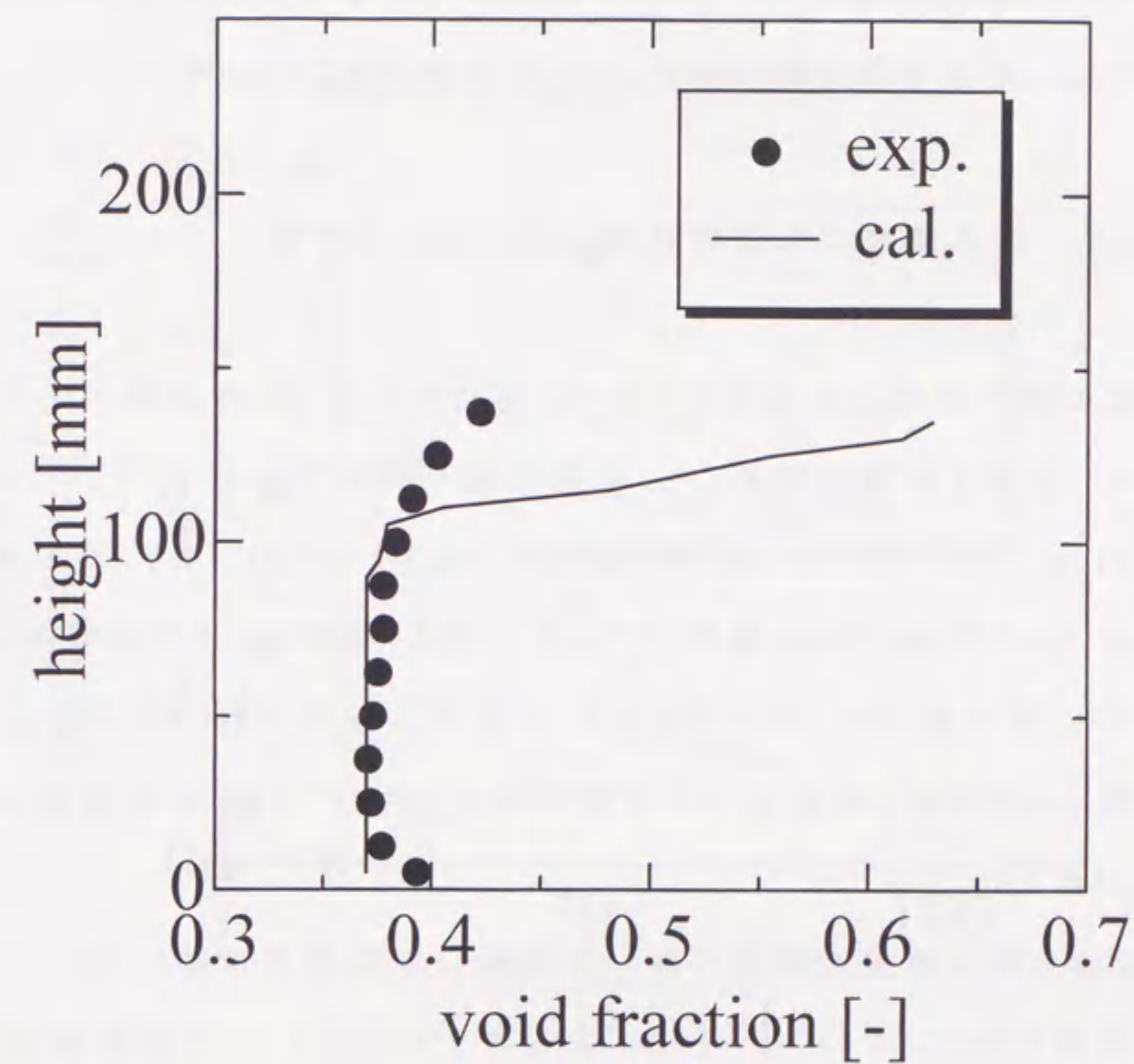


Fig.3-5 Longitudinal distributions of calculated and observed void fraction.  
(inlet air velocity : 80m/s)



に示す。パターン面から 100mm 以下の領域では実測値、計算値ともに低い空隙率となり、同傾向である。しかし、砂型上部においては計算値が急激に上昇し実測値との差が大きくなった。これは初期要素の直径が  $1.46 \times 10^{-2} \text{m}$  と大きいため、砂型最上部での微少な接触力分布を十分に評価できていないためであり、離散要素の数を増すことにより改善できるものと考えられる。

### 3.5.2. 流入速度が生型砂移動速度に及ぼす効果

空気の流入速度を変化させて充てん解析を行い、流気速度が生型砂の充てんに及ぼす影響を調査した。初期位置が砂層中心付近（パターン面から 0.145m の高さ）における要素の速度を Fig.3-6 に示す。また、図中 ● は前節における造型過程を高速ビデオカメラにより撮影し、速度を推算した結果であり、最大値は約 8m/s であった。空気流入速度 80m/s での解析結果は実験から得られた速度変化に比較的良く一致しており、本数値解析の妥当性が伺える。

同図から流入速度の増加に伴い生型砂の移動速度は増し、充てん時間が短時間となることがわかる。それ故、Fig.3-7 に示すように単位体積当たりの運動エネルギーは2次関数的に増加した。また、タンクの圧力を 0.5MPa とした流気時の砂層上端と下端における圧力差は 0.27MPa (Fig.3-2) であるため、この値を Fig.3-7 にあわせて示すと、空気の流入速度が 50m/s 以下では静的に流気するときの流体抗力が充てんに支配的であるが、50m/s 以上では加速した粒子の運動エネルギーが充てんに支配的であると考察される。

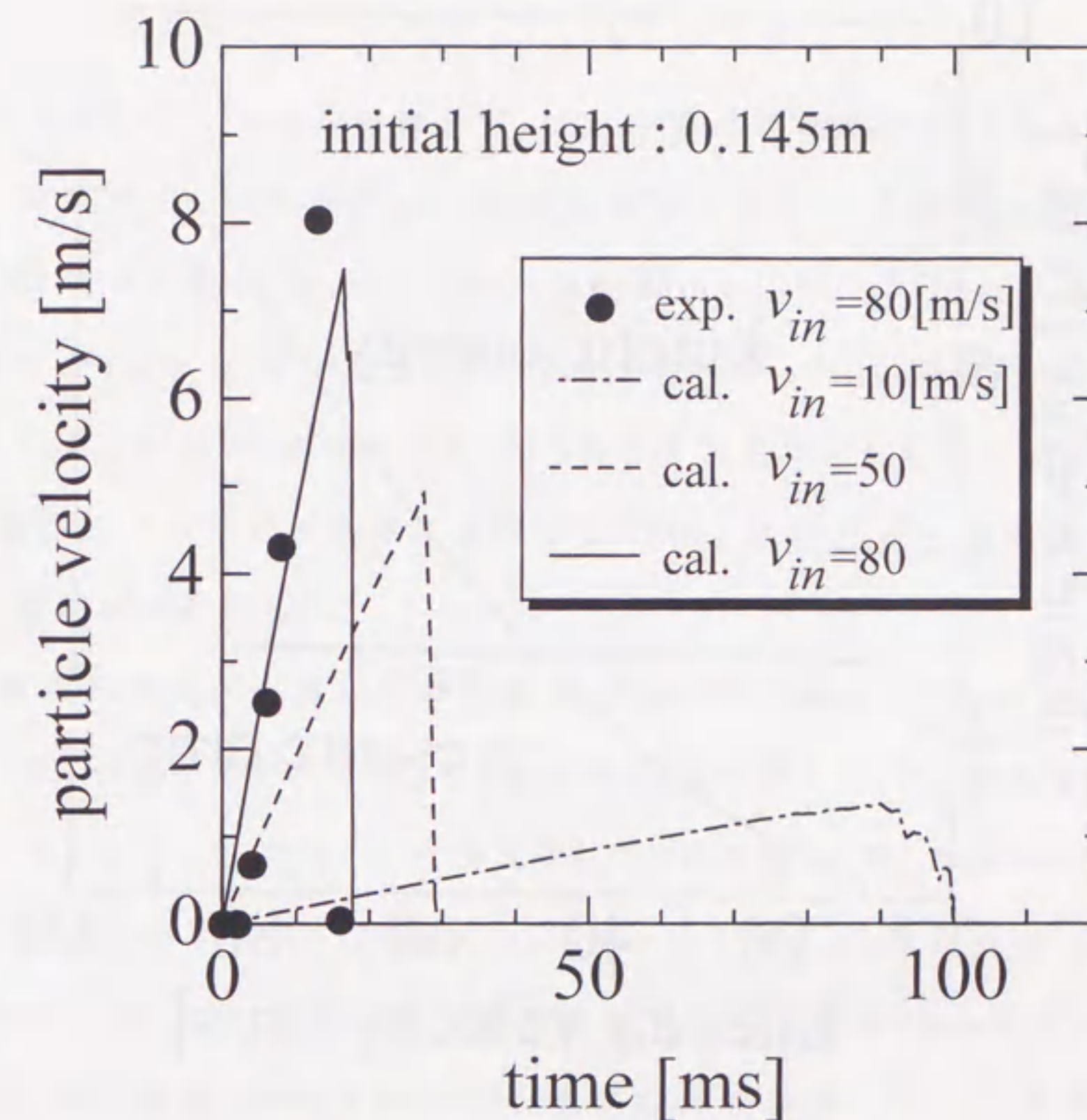


Fig. 3-6 Effects of inlet air velocity  $v_{in}$  on particle velocity.



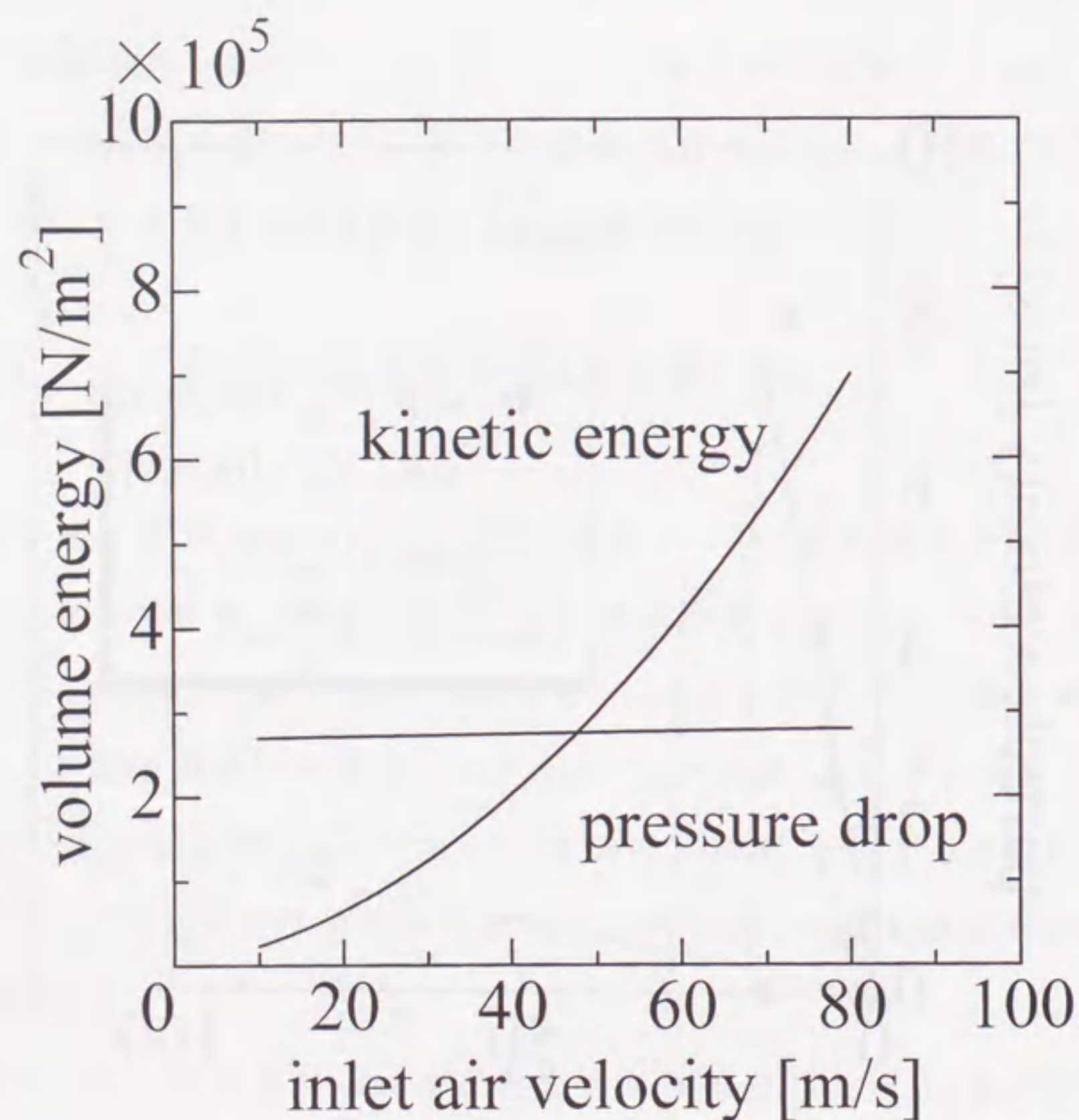


Fig. 3-7 Effects of inlet air velocity on kinetic energy.

### 3. 6. ハードコア・ソフトシェル要素

#### 3. 6. 1. 充てん挙動

ハードコア・ソフトシェル要素を用いて、砂層上端での空気圧力を  $0.5\text{MPa}$  とし、流気充てん解析を行った。二次元解析とするため円筒形の離散要素となり、要素の質量を  $2\text{g}$  とし、要素の直径を  $3.0\text{mm}$  とした。この要素による計算条件を Table 3-3 に示す。ばね定数とダッシュポットの粘性係数は  $2.5.2.$  節の方法で同定した値を用いた。得られた結果を Fig.3-8 に示す。なお、ミクロ的な砂粒子の挙動を詳細に追跡するために、空気流解析は  $2.3.1.$  節の非定常解析を採用した。

圧縮空気の導入速度は初期化過程において  $88\text{m/s}$  となり、 $3.3.$  節で見積もった  $80\text{m/s}$  をやや上回るものの比較的近い値となった。流気とともに、パターン面、特に、ベントホール近傍から充てんは開始し、約  $20\text{msec}$  で充てんが完了した。砂層高さは  $250\text{mm}$  から  $185\text{mm}$  と低下し、実測値の  $180\text{mm}$  とほぼ一致した。なお、充てん完了時の圧縮空気の速度は  $5\text{m/s}$  程度となった。これら、流気過程におけるマクロ的な挙動は実験結果、および、前述の圧縮要素モデルの結果と一致するものである。しかし、計算時間は約  $20$  時間となり、圧縮要素モデルの約  $120$  倍長くなった。

最終充てん後の中心軸上における空隙率分布を実測値とともに Fig.3-9 に示す。パターン面から  $100\text{mm}$  以下の領域では空隙率が低く、充てん密度が高くなり、砂型上部に近づくに従い空隙率が上昇した。計算値は実測値とよく一致し、本解析手法が妥当であると判断される。なお、 $3.5.1.$  節で得られた圧縮要素による解析結果も同図に示すが、砂層上部の空隙率が高い領域に関して、本章で得られたハードコア・ソフトシェル要素による解析結果



Table 3-3 Calculation conditions.

number of element	1400
diameter of element [m]	$3.0 \times 10^{-3}$
thickness of bentonite layer [m]	$0.3 \times 10^{-3}$
stiffness between bentonite and bentonite [N/m]	$20 \times 10^3$
stiffness between bentonite and silica [N/m]	$800 \times 10^3$
air pressure in tank [MPa]	0.5
time step [s]	$2.0 \times 10^{-6}$

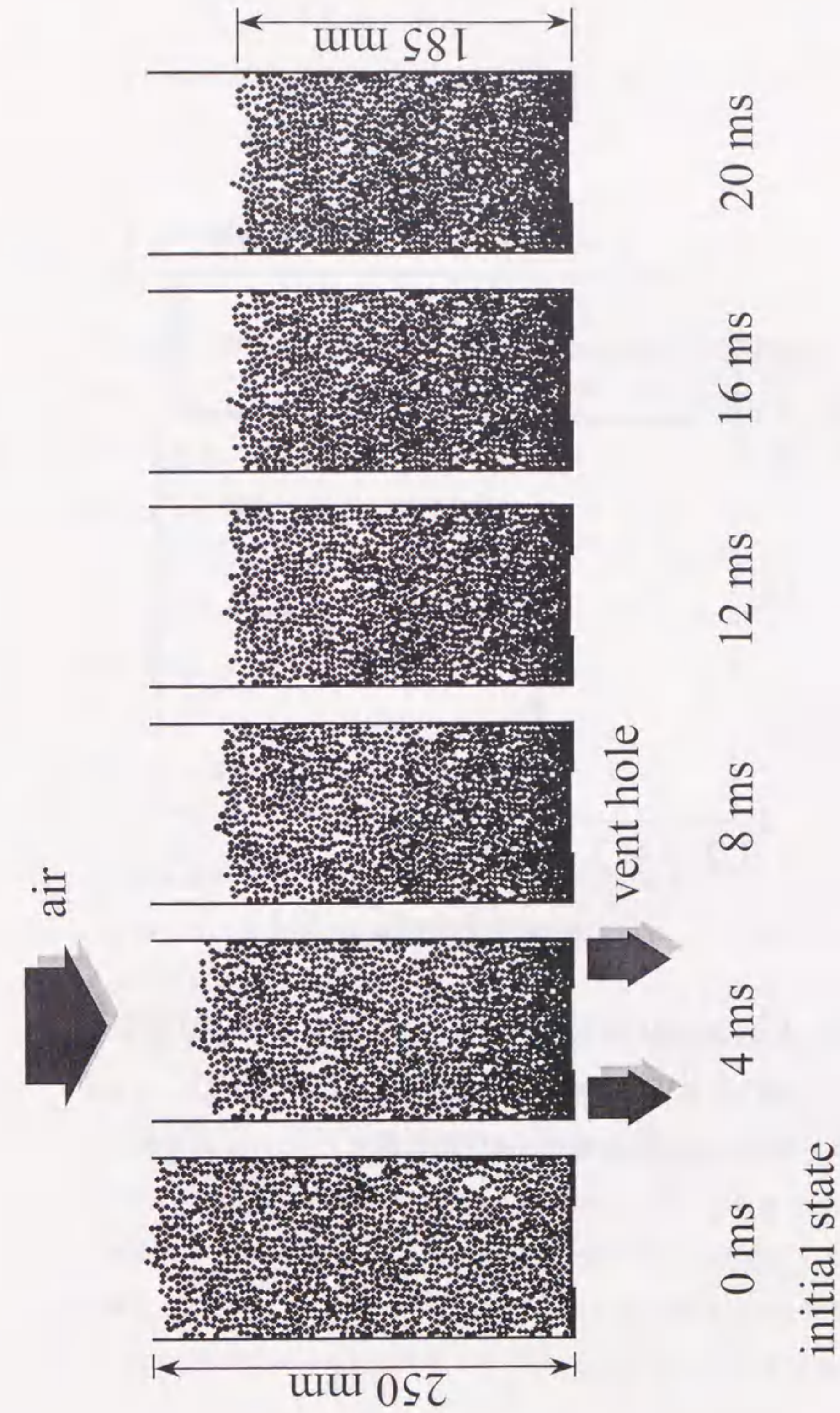


Fig. 3-8 Green sand compaction behavior by air-flow.  
(air-flow pressure : 0.5MPa)



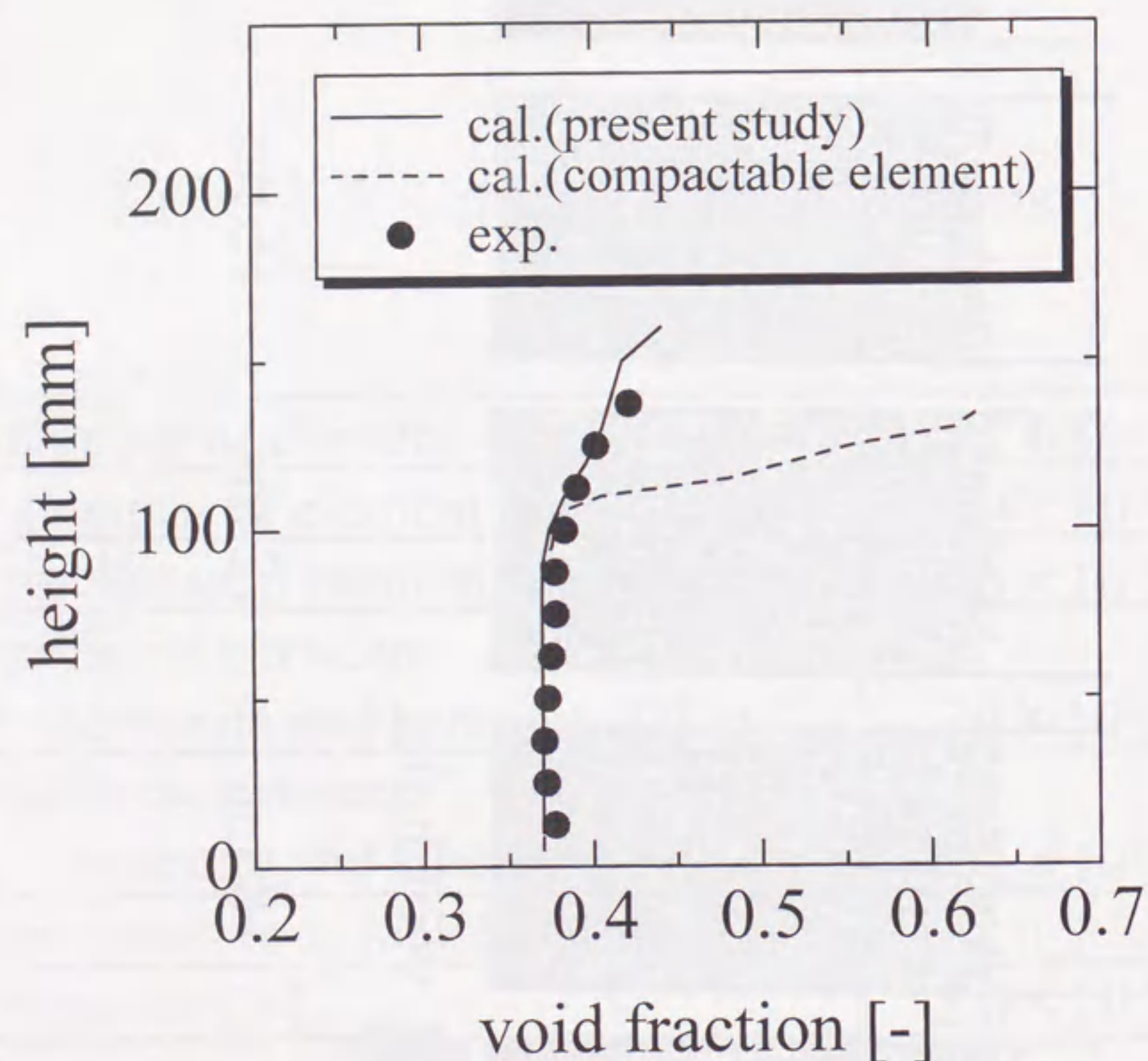


Fig. 3-9 Comparison between the calculated and the observed void fraction along the center axis.

の方が高精度であることが確認された。以後、ハードコア・ソフトシェル要素を用いて生型砂充てんのミクロ的解析を行う。

### 3. 6. 2. 接触力と流体抗力ベクトルの分布

圧縮空気導入時と導入後 4ms 後の全離散要素の流体抗力ベクトルと接触力ベクトルを、それぞれ、Fig.3-10-a, b に示す。圧縮空気導入直後は全体に流体抗力が大きく、接触力は極めて小さい。一方、圧縮空気導入後 4ms では流体抗力は小さくなるが、パターン面、特に、ベントホール近傍において接触力が非常に大きくなる。このことから、砂層下部に停止した生型砂の上部に生型砂が衝突し、下から順に接触力支配のものとして充てんしていると考察される。

### 3. 6. 3. 接触力と流体抗力の経時変化

初期高さがパターン面から 50mm と 200mm の2要素に対して、充てん過程に作用する流体抗力と砂粒子間接触力を Fig.3-11, 12 に示す。Fig.3-11 に示す初期高さが 200mm の要素はまず下方向の流体抗力が最大  $1.8 \times 10^5 \text{ N/m}^3$  作用し、その後も、流体抗力支配でパターン面から 153mm の位置で停止したことが分かる。一方、Fig.3-12 に示す初期高さが 50mm の要素も流気初期段階において同様に下方向へ流体抗力が大きく作用するが、その後、パターン面から 38mm の位置からは上方に位置する砂粒子により下方向に接触力が作用し、最終的にパターン面から 36mm の位置に停止しする。同様に、初期高さが 150mm 以下の生型砂は停止時に大きな接触力を示すことがわかった。それ故、初期高さが 150mm の生型砂が停止する 110mm



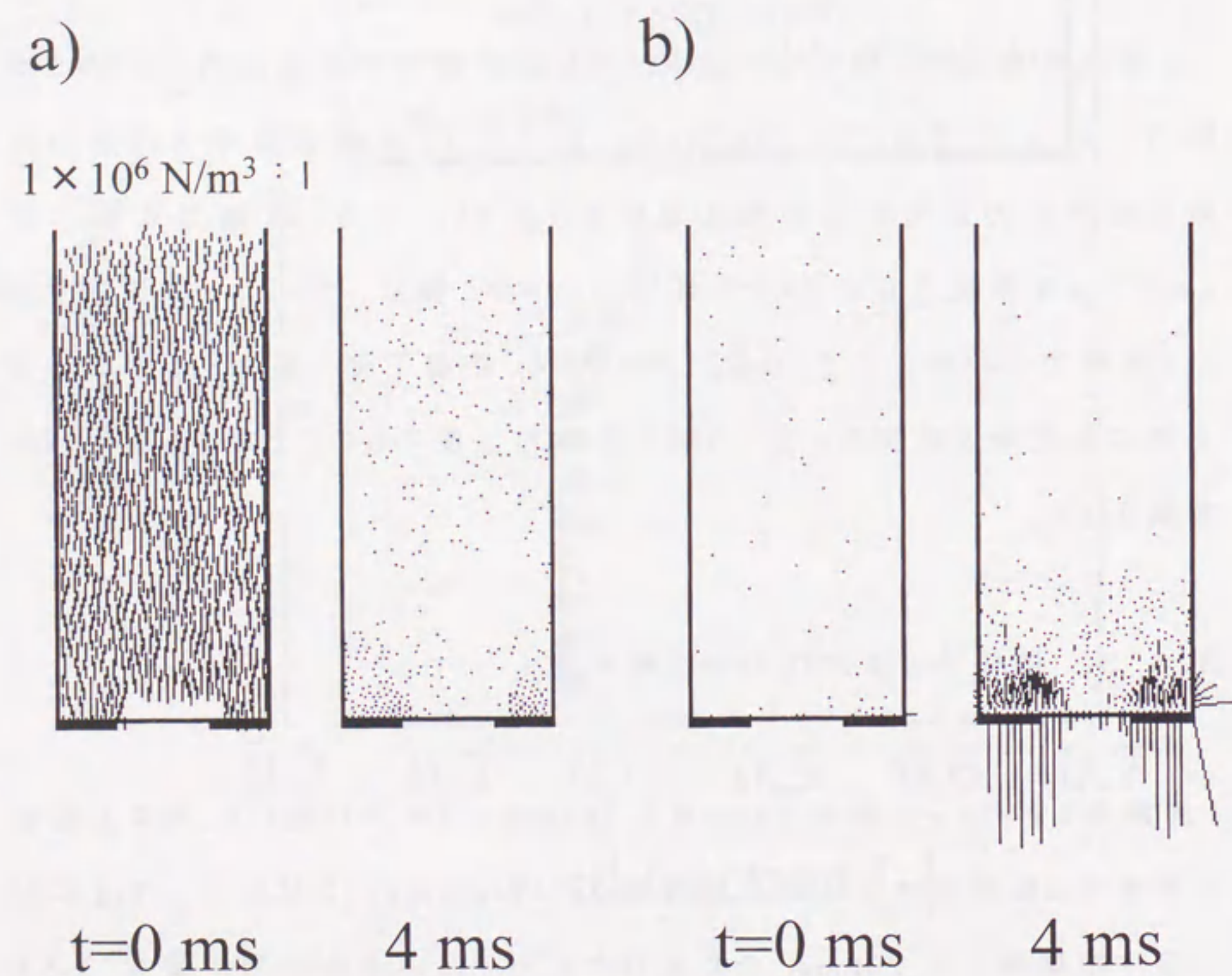


Fig. 3-10 Distribution of force vectors.  
a) drag force  
b) contact force

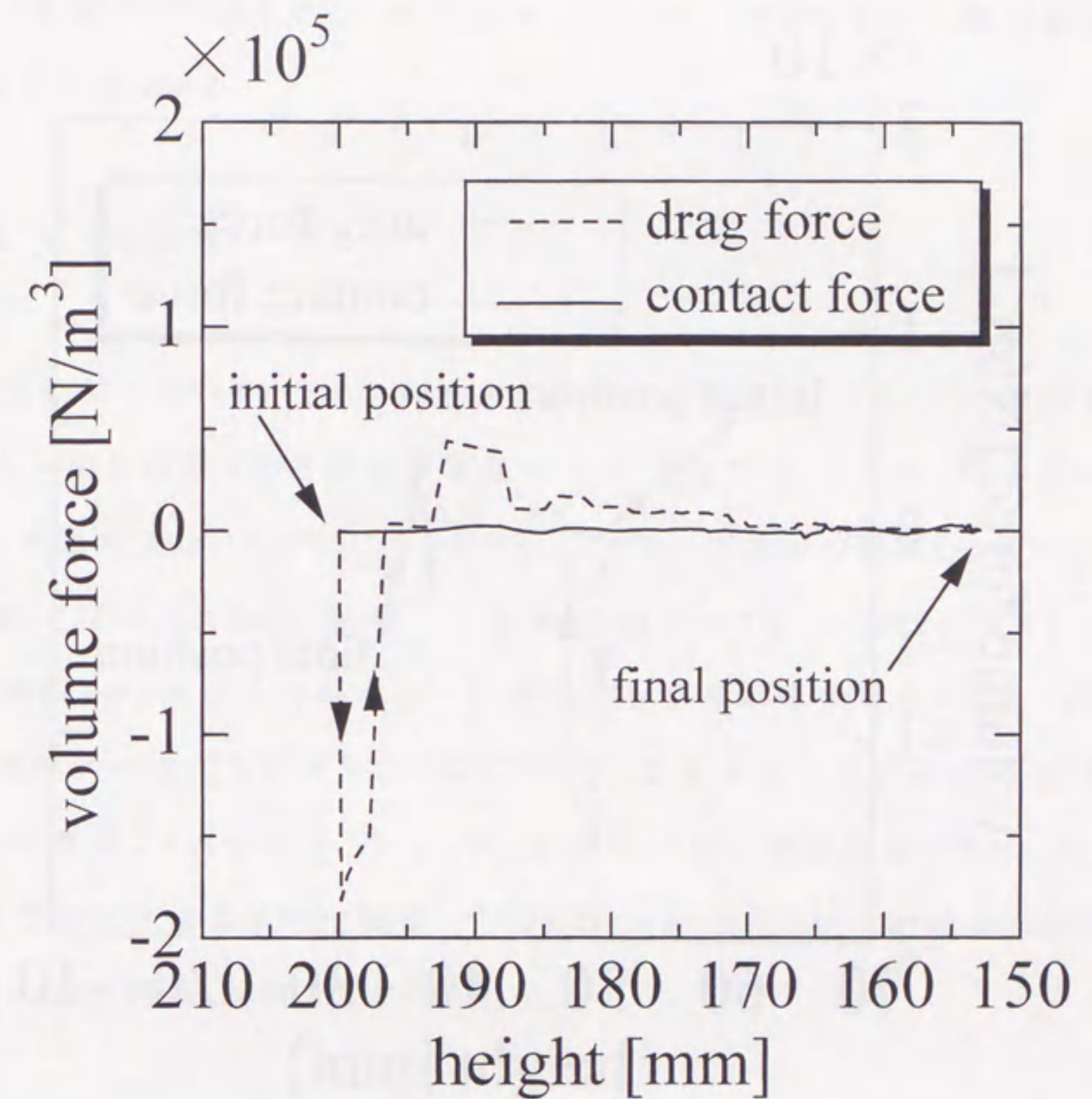


Fig. 3-11 Drag force acting on the two elements which are located initially at 200 mm.



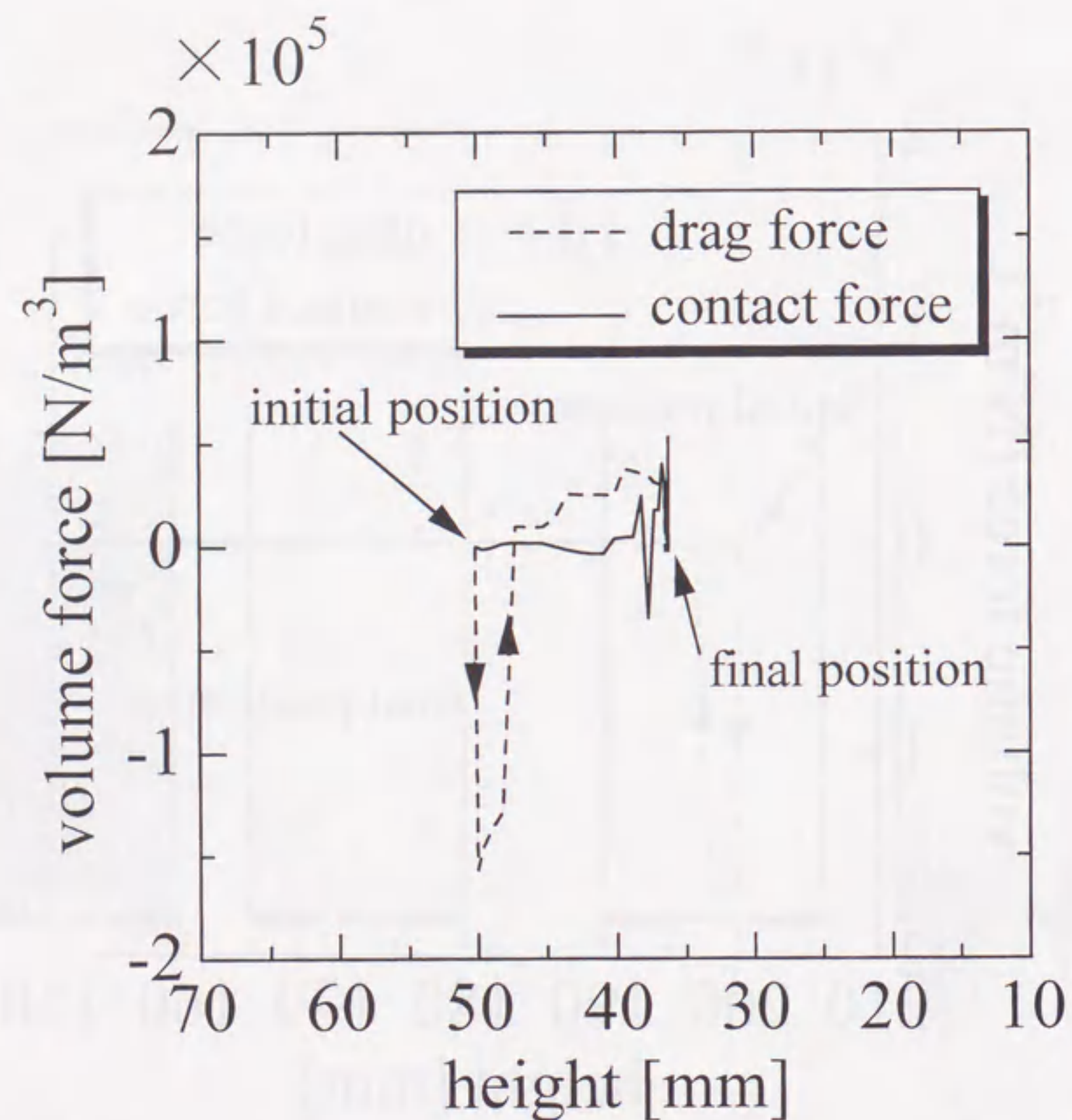


Fig. 3-12 Contact force acting on the two elements which are located initially at 50 mm.

以下の領域には接触力が寄与し、空隙率が低いと推察される。

この結果からわかるように、ハードコア・ソフトシェル要素を用いた本解析手法により実験では測定しにくい粒子個々、あるいは、ミクロ的な応力作用状態の把握が可能である。

#### 3.6.4. 粉体圧

流気過程においてパターン面中央に作用する粉体圧、すなわち、生型砂がパターン面に作用する圧力を実測値とともに Fig.3-13 に示す。粉体圧は流気初期過程において鋭いピークを示し、その後、定常的な値を示している。3.3.節で述べたように、実測した粉体圧のピーク値 1.3MPa はタンク圧 (0.5MPa) の2倍以上であり、充てん過程の生型砂の運動エネルギー、すなわち、慣性力が充てんに大きく作用している。定常状態では数値解析結果の方が実測値より若干大きくなったが、粉体圧の最大値を推算できた。充てん密度は粉体圧の最大値と関係<sup>13)</sup>があるとの報告があり、この結果はその最大値を比較的よく説明できている。

#### 3.6.5. ブリッジ現象

金枠内の左右にブロック(幅 35mm, 高さ 100mm)を配置して流気を行った場合、Fig.3-14-a に見られるようなアーチ型の亀裂、いわゆる、“ブリッジ現象”が観察される。この系を対象に解析を行った結果を Fig.3-14-b に示す。なお、初期位置により離散要素の色を7色に色分けして表示してある。本解析においても同様の亀裂を表現でき、特に、初期位置がブロック上 50mm に位置している砂型内に亀裂が生じることが明らかとなった。これは、連続体とし



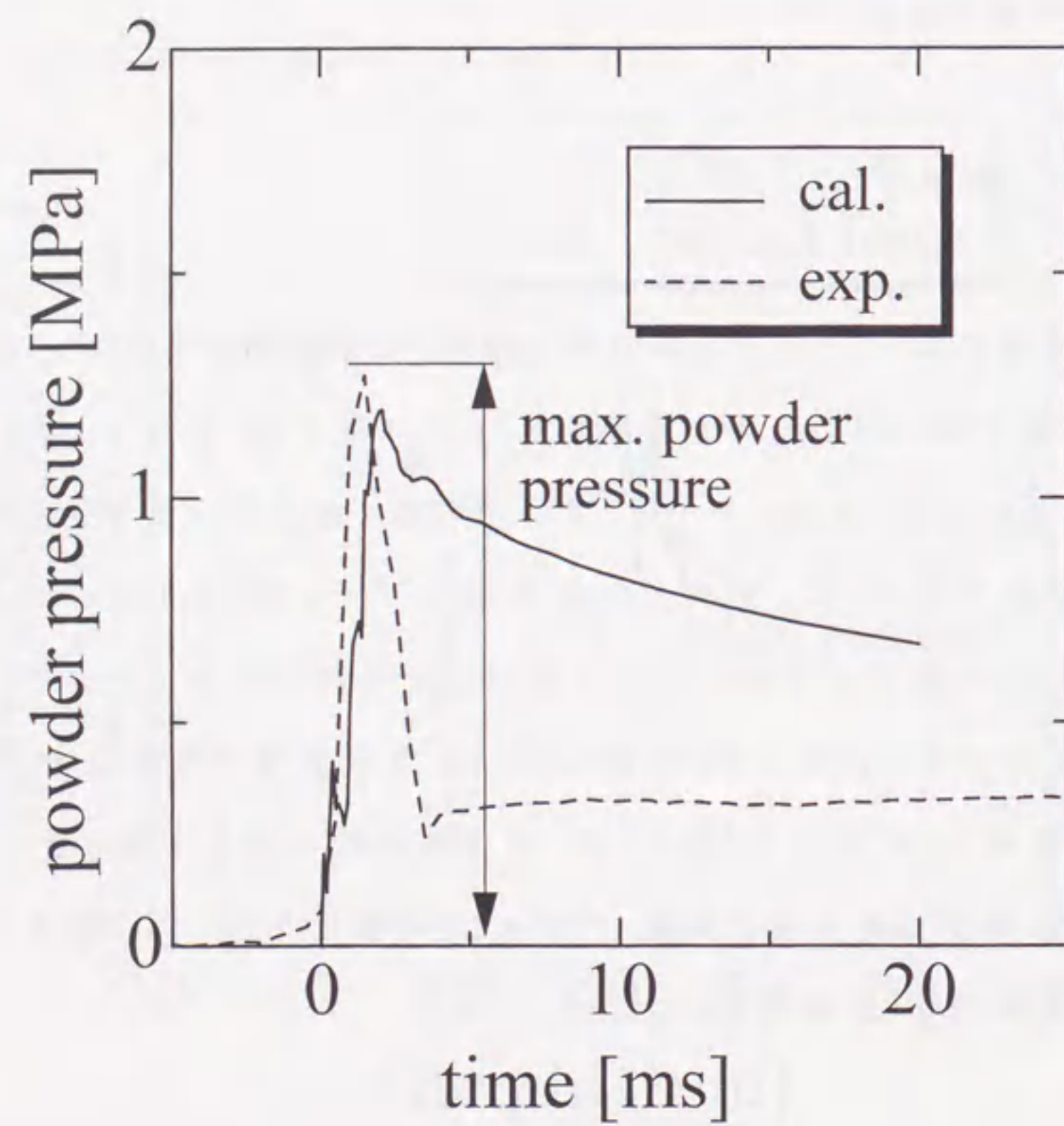


Fig. 3-13 Powder pressure acting on the center of pattern plate.

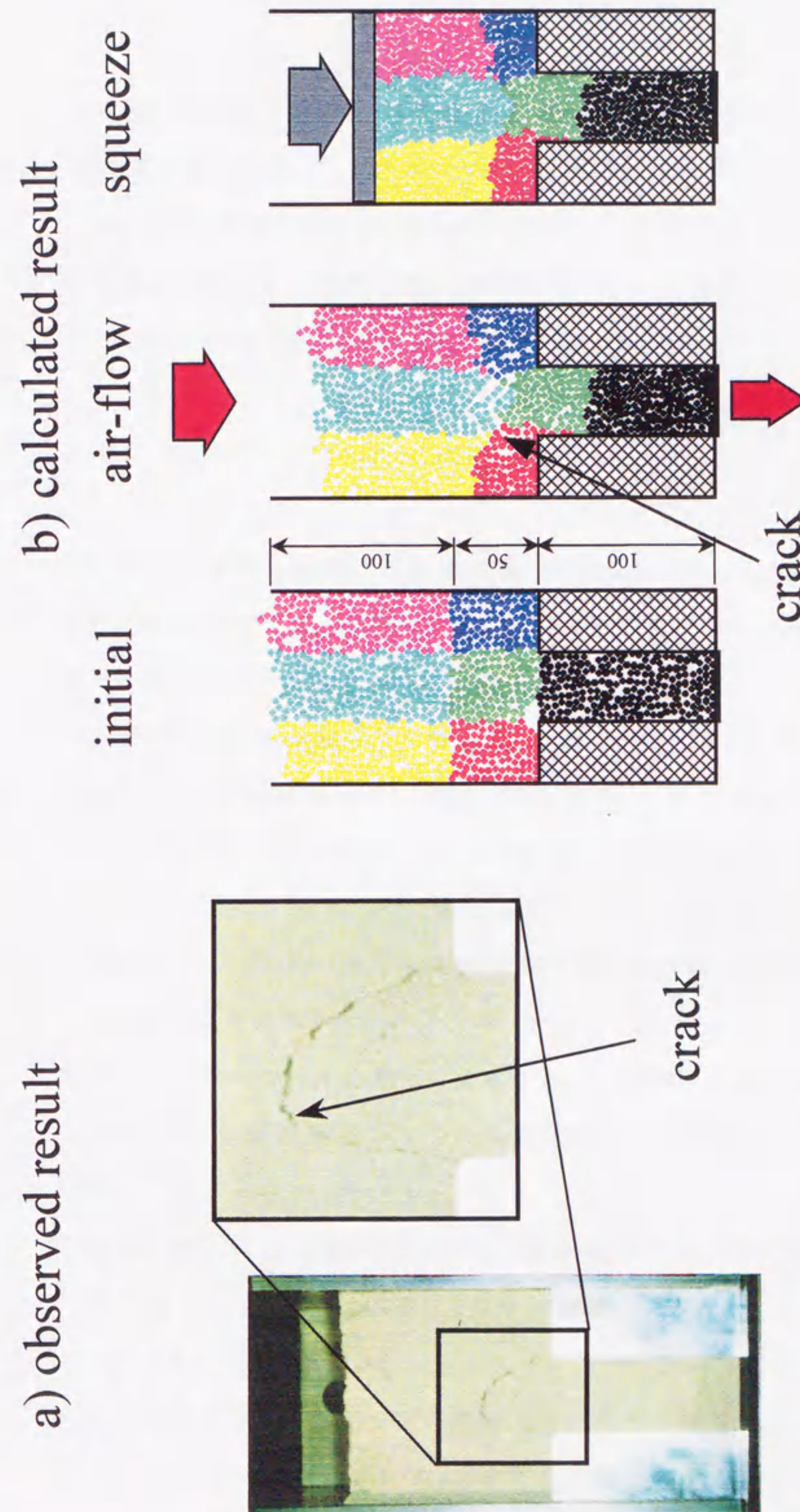


Fig. 3-14 Bridge phenomenon.



て砂層を扱う解析手法では予測不可能な現象の解析であり、本方法の有効性が示唆された。

また、流気過程の後にスクィーズ解析を行い、亀裂が消滅することも本解析で確認し、流気加圧造型の流気過程からスクィーズ過程までの一連のプロセスを解析できることが示された。

### 3.7. まとめ

流気加圧造型を対象に離散要素法 (Distinct Element Method) を改良した圧縮要素モデルとハードコア・ソフトシェル要素モデルを適用し、基礎実験と比較することで、以下の知見を得た。

- 1) 両モデルとも実験結果と比較して、本造型モデルがほぼ妥当であることが示された。圧縮要素モデルは短い計算時間で、砂型内充てん密度のマクロ的な推算が可能であるが、詳細な砂型内力学場を解明するには不十分である。また、ハードコア・ソフトシェル要素モデルは計算時間が長いが高精度かつ、ミクロ的な充てん挙動の解析が可能であり、圧縮要素モデルより詳細な結果が得られる。
- 2) 充てんはベントホール近傍から開始する。すなわち、砂粒子間の接触力が大きくなる空気流速度が大きい領域での充てんが優先することが示された。
- 3) 空気の流入速度が遅いときは静的な流体抗力が充てんに支配的であるが、流入速度が速いときは加速した粒子の運動エネルギーが充てんの支配要因であることを明らかにした。
- 4) 流気過程における砂粒子間の接触力と空気流が砂粒子に及ぼす流体抗力の経時変化を明確に区別し、充てん初期過程において砂粒子の駆動



力は流体抗力であるが、充てん末期の砂層下部においては接触力も作用していることを明らかにした。

5) パターン面に作用する砂粒子の粉体圧の最大値をハードコア・ソフトシェル要素を導入した本モデルにより推算できることを示した。

6) 非連続的な現象であるブリッジ現象の予測ができることを確認した。

## 第4章 ブロー造型解析

### 4.1. はじめに

ブロー造型はマガジン内の生型砂を圧縮空気によりキャビティへ吹き込み、その後、スクィーズをする造型法である。主に無枠方式であるため、中軽量の鑄造品を生産するプロセスとして用いられている。ブロー過程において、生型砂は圧縮空気流により高速に加速されるため、生型砂の輸送のみならず予備充てんも期待できる特徴を有している。

複雑なパターンに対して均一な充てん密度の砂型を得るためにはスクィーズを作用させる前のブロー過程における充てん挙動を厳密に把握し、制御することが非常に重要である。しかし、ブロー過程は移動する生型砂と空気流が相互に作用しているため複雑な現象を呈している。それ故、実験のみで現象を厳密に把握し、制御法を確立することは困難であり、理論的な検討が望まれる。

そこで、本章ではスクィーズを行う前のブロー過程を対象に、第2章で構築したハードコア・ソフトシェル要素を用いた生型造型モデルを適用し数値解析を行う。また、基礎実験を行い、マガジンへの圧縮空気の導入方向とタンク圧力が、マガジンからの生型砂の噴出挙動やキャビティへの充てん挙動に及ぼす影響を調査する。これにより、ブロー過程における充てん支配要因の究明を試みる。



#### 4.2. 生型造型モデル

第2章で述べたように生型砂の挙動はハードコア・ソフトシェル要素による離散要素法でモデル化し、非定常空気流解析と連成することで造型モデルを構築する。

#### 4.3. 実験および解析条件

解析の対象とする小型ブロー造型装置の模式図を Fig.4-1 に示す。キャビティ枠サイズは  $150 \times 80 \times 20\text{mm}$ 、マガジンコーン角は  $60^\circ$  である。実験においては Table 4-1 に示す条件下でマガジンへの圧縮空気の導入位置とタンクの圧力が、生型砂の噴出、充てん挙動に及ぼす影響を高速ビデオカメラを用いた撮影により観察した。なお、供試砂は第3章と同様とする。

本章でも第3章と同様に直径  $3.0\text{mm}$  の離散要素を用い、質量保存を考慮すると900個の要素となる。この要素による計算条件を Table 4-2 に示す。なお、ばね定数とダッシュポットの粘性係数は第2章で同定した値を用いる。

#### 4.4. 結果および考察

##### 4.4.1. 充てん解析

タンク圧力  $0.5\text{MPa}$  でのブロー充てん過程の高速ビデオカメラによる撮影結果を Fig.4-2、4-3、また同条件の数値解析結果を Fig.4-4、4-5 に示す。なお、計算結果においては、砂粒子の挙動を明確に観察するために、全体を5色に色分けして描画してある。

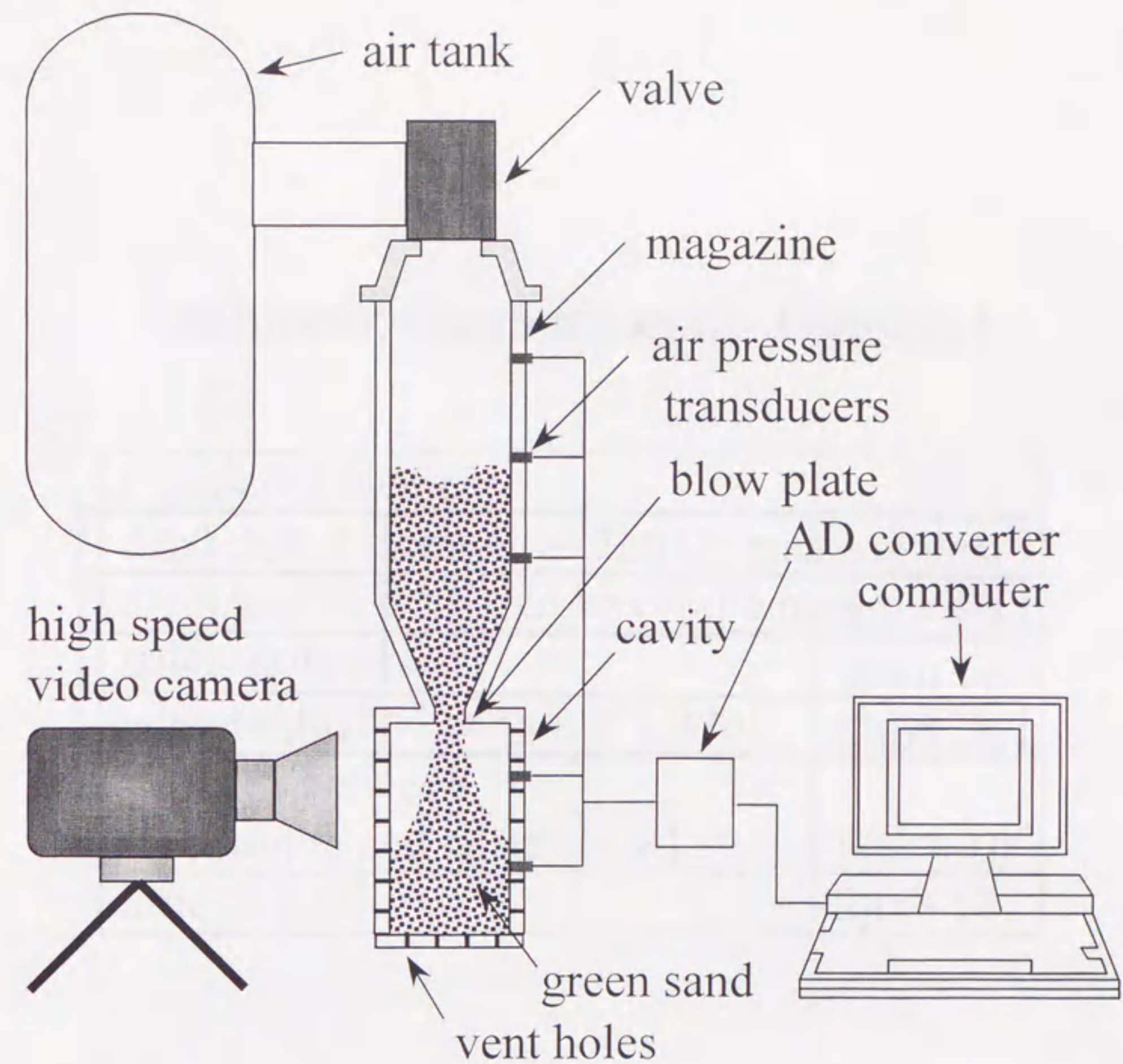


Fig. 4-1 Experimental apparatus.



Table 4-1 Experimental conditions.

tank pressure [MPa]	0.5, 0.3
blowing time [s]	1.0
air inlet	top, side
air outlet	side+bottom

Table 4-2 Calculation conditions.

number of element	900
diameter of element [m]	$3.0 \times 10^{-3}$
thickness of bentonite layer [m]	$0.3 \times 10^{-3}$
stiffness between bentonite and bentonite [N/m]	$20 \times 10^3$
stiffness between bentonite and silica [N/m]	$800 \times 10^3$
time step [s]	$2.0 \times 10^{-6}$



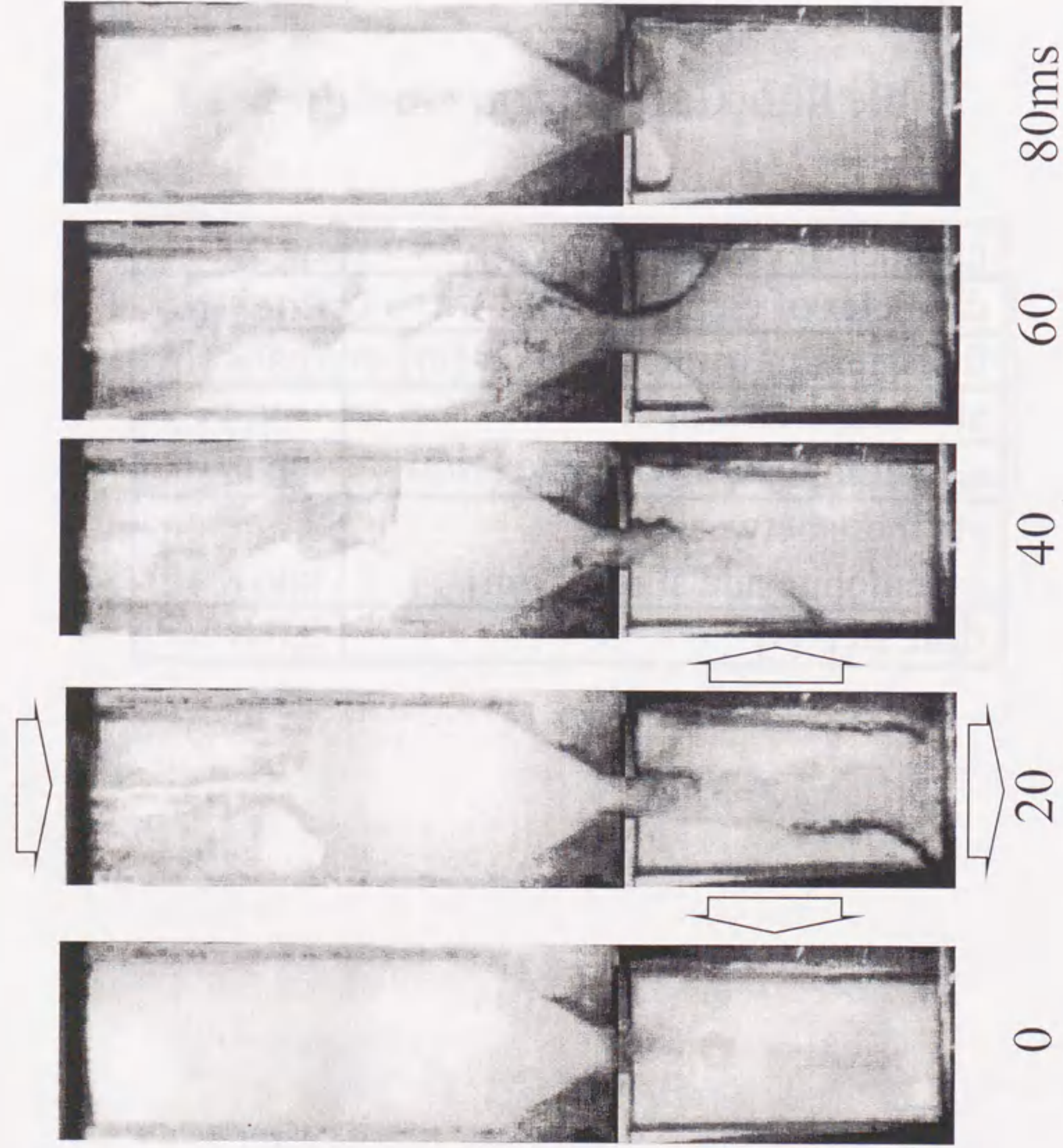


Fig. 4-2 Behavior of green sand blowing. (tank pressure:0.5MPa, air inlet:top)

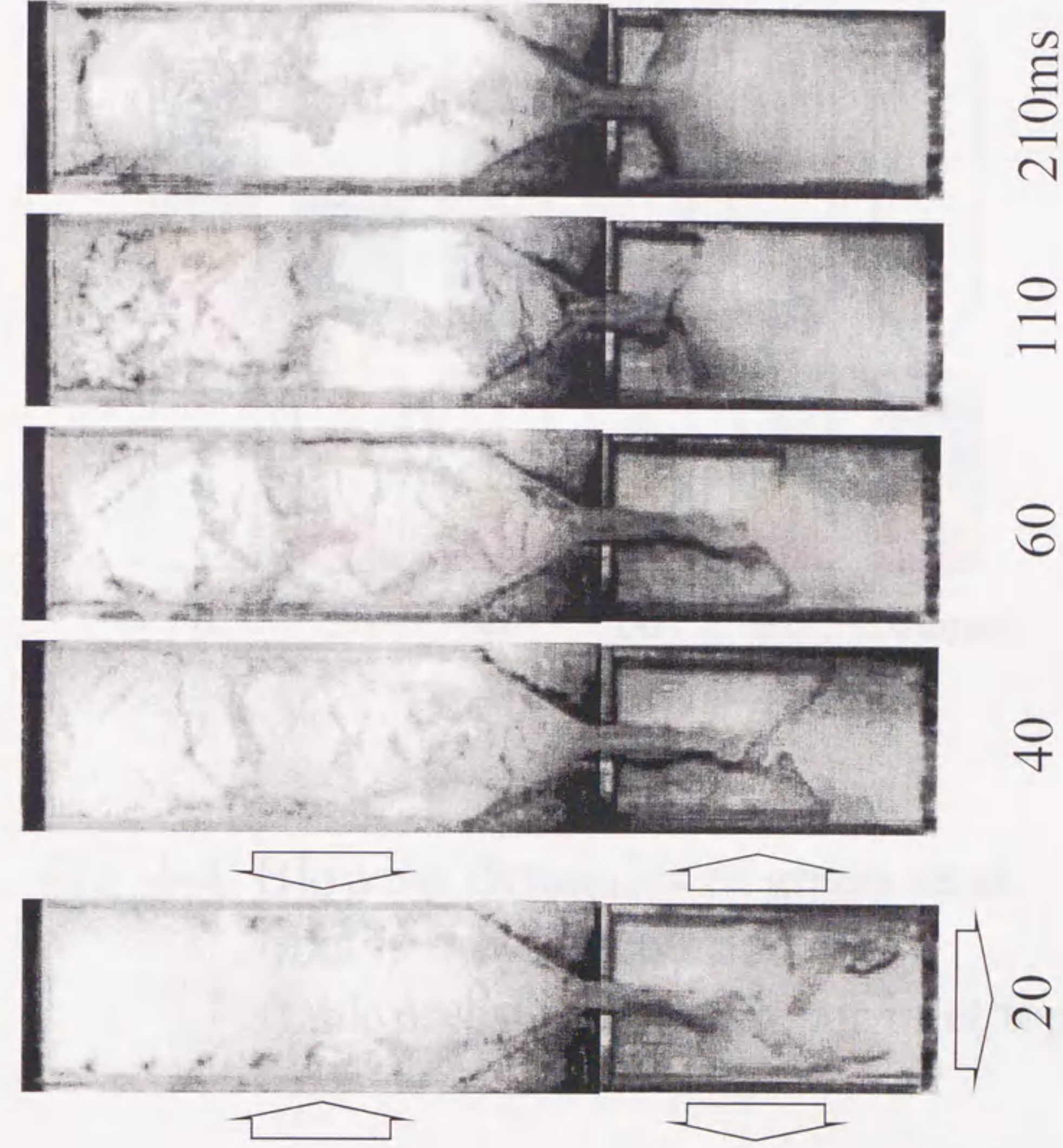


Fig. 4-3 Behavior of green sand blowing. (tank pressure:0.5MPa, air inlet:side)



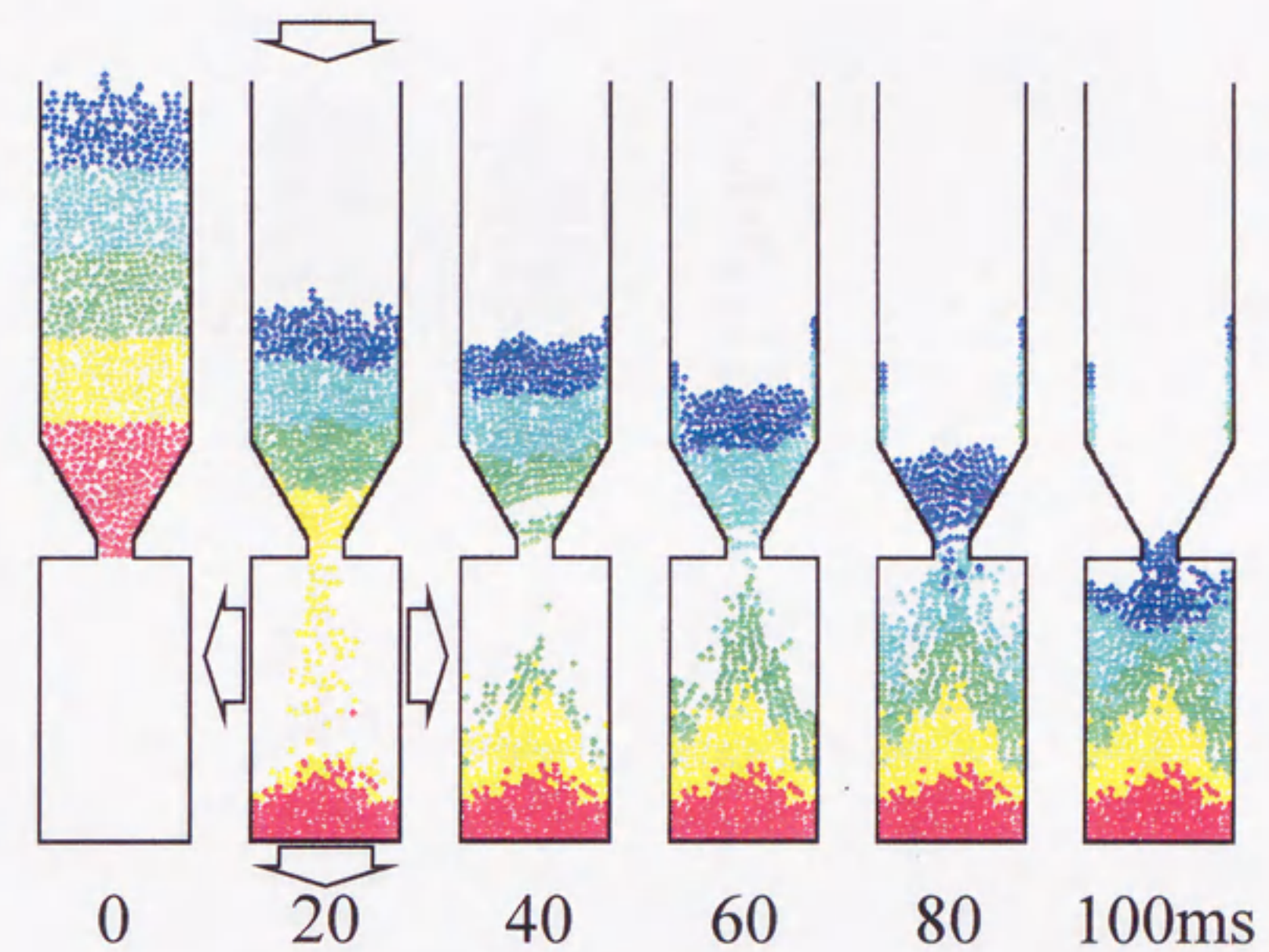


Fig. 4-4 Blowing dynamics of green sand  
obtained by calculation.  
(tank pressure:0.5MPa, air inlet:top)



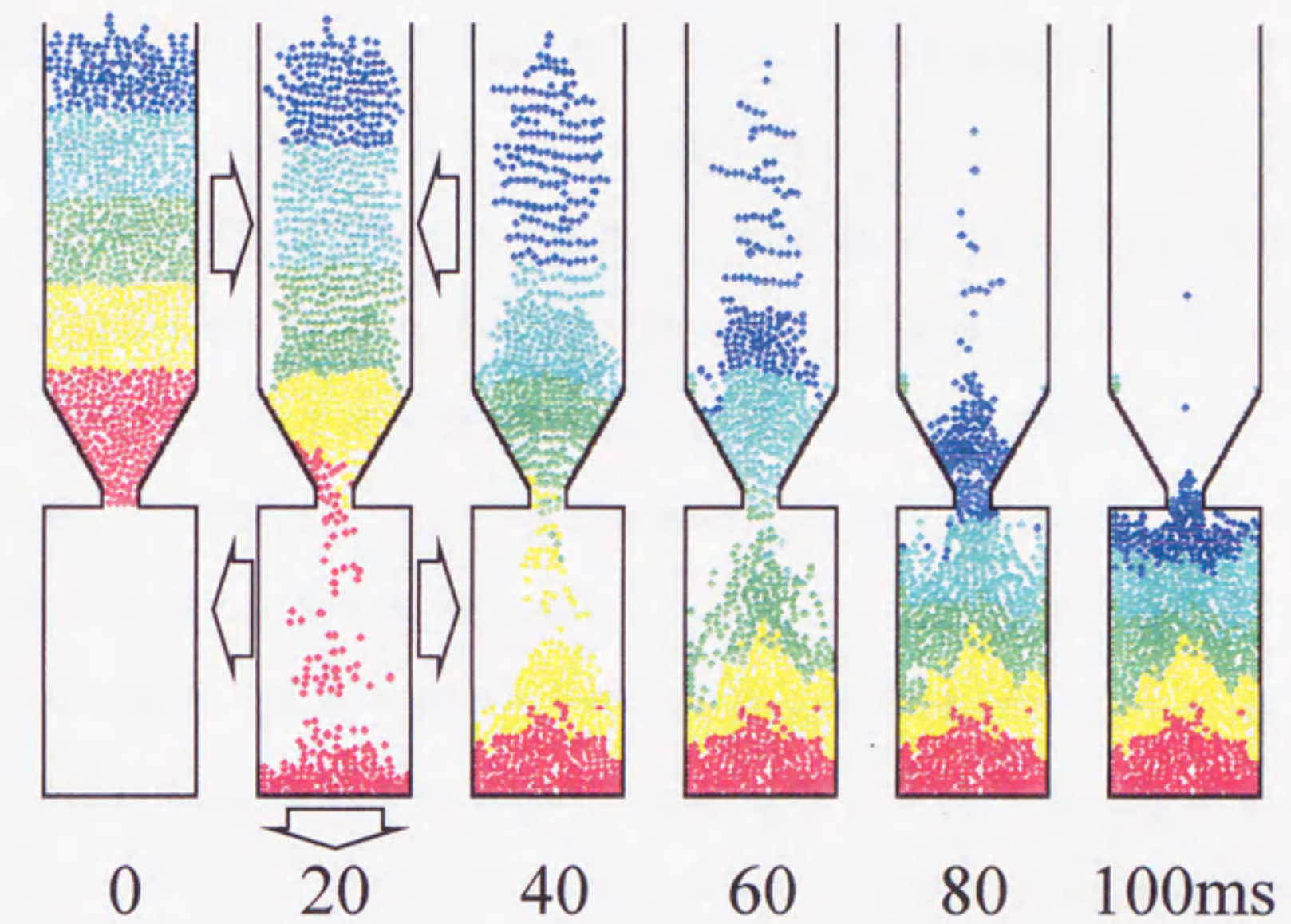


Fig. 4-5 Blowing dynamics of green sand  
obtained by calculation.  
(tank pressure:0.5MPa, air inlet:side)



圧縮空気を上面から導入した場合 (Fig.4-2、4-4)、実験、解析ともに、圧縮空気の導入直後、マガジン内の砂層上端は急激に低下し、その後、生型砂が噴出することがわかる。充てん完了時間は実験が 90ms で、数値解析は 100ms であった。また、数値解析においては充てん完了後もマガジン内側面に離散要素が付着力により残留した。初期高さにより5段階に色分けした要素はキャビティ内においても比較的境界が明確な5層となり、生型砂は順序よく噴出していることが明らかとなった。

圧縮空気をマガジン側面から導入した場合 (Fig.4-3、4-5)、実験においては側面から均一に空気が導入せず、特に、初期過程においてはマガジン側面の下方から集中的に空気が流入した。そのためマガジン内では下部から生型砂が順次噴出しているにもかかわらず、砂層上部は長時間停滞した。中央部に停滞した生型砂は噴出しにくく、充てん完了時間は 290ms と長くなった。その結果、単位時間あたりの生型砂の噴出量は少ない。一方、数値解析においては、実験で観察された圧縮空気の不均一流入を再現することができないため、ここではマガジン側面から均一に流入させて解析した。この場合、マガジン内の離散要素は中央へ近づき、実験と同様に生型砂が中央に停滞する傾向が見られるもののほぼ滑らかに噴出し、95ms で充てんが完了した。

以上の結果より、特に上面から圧縮空気を導入した場合において、離散要素法を用いた数値解析により、ブロー過程でのマクロ的な生型砂挙動の把握が可能であることがわかった。以下、圧縮空気を上面から導入した場合について、詳細な解析を行った。



#### 4.4.2. 生型砂の噴出速度と噴出率

圧縮空気をマガジン上面から導入し、ブロープレートを通じた瞬間の離散要素の軸方向速度成分と噴出率の経時変化を Fig.4-6 に示す。

タンクの圧力が 0.3、0.5MPa とともに、ブロープレートを通じた瞬間の離散要素の軸方向速度は 10～20ms において最も高速であり、タンクの圧力が 0.5MPa の場合には 33m/s にも達することがわかった。また、ブロープレートを通過する離散要素の速度は時間の経過とともに徐々に遅くなる。それ故、噴出率は 20ms までは急激に上昇するが、その後、上昇の程度が緩やかになる。さらに、タンクの圧力が 0.3MPa の場合は 0.5MPa に比べて流体抗力が小さく、噴出速度は 80% 程度に低下する。これより充てん完了時間も 100ms から 120ms と長くなった。これは実験結果の充てん時間 90→116ms と同傾向であり、本解析はタンクの圧力の影響を十分に説明できると考えられる。

#### 4.4.3. 空気流の速度場および離散要素の速度

タンクの圧力を 0.5MPa、圧縮空気をマガジン上面から導入した場合の空気流の速度場と離散要素の速度を、それぞれ、Fig.4-7-a、b に示す。20ms の時点では、空気流はブロープレートを 60m/s 前後で通過し、キャビティ内で左右に大きく広がる流れを示す。この時の離散要素はほぼ鉛直方向に 30m/s 程度でブロープレートを通過し、キャビティ内に輸送され充てんする。すなわち、ブロープレートを通過する以前に砂粒子に付与された流体抗力の影響が大きく、その慣性で輸送されると考えられる。従って、キャビティ内における空気流の水平方向成分が与える効果は比較的小さいと考えられる。

40～80ms の時点においてはキャビティ下方はすでに生型砂が充満している

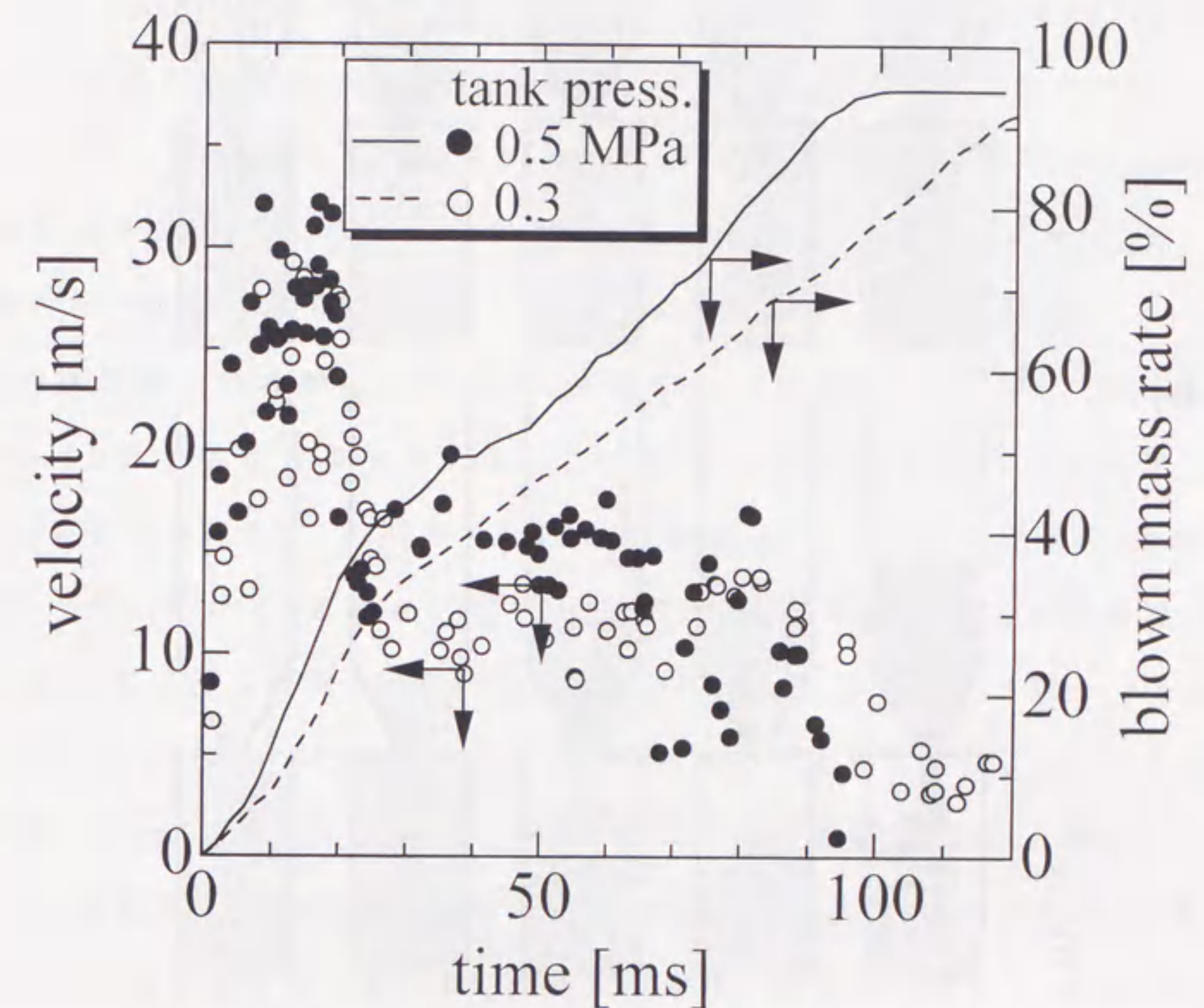


Fig. 4-6 Calculated results of blown mass and particle velocity at the blow plate.  
(tank pressure:0.5,0.3MPa, air inlet:top)



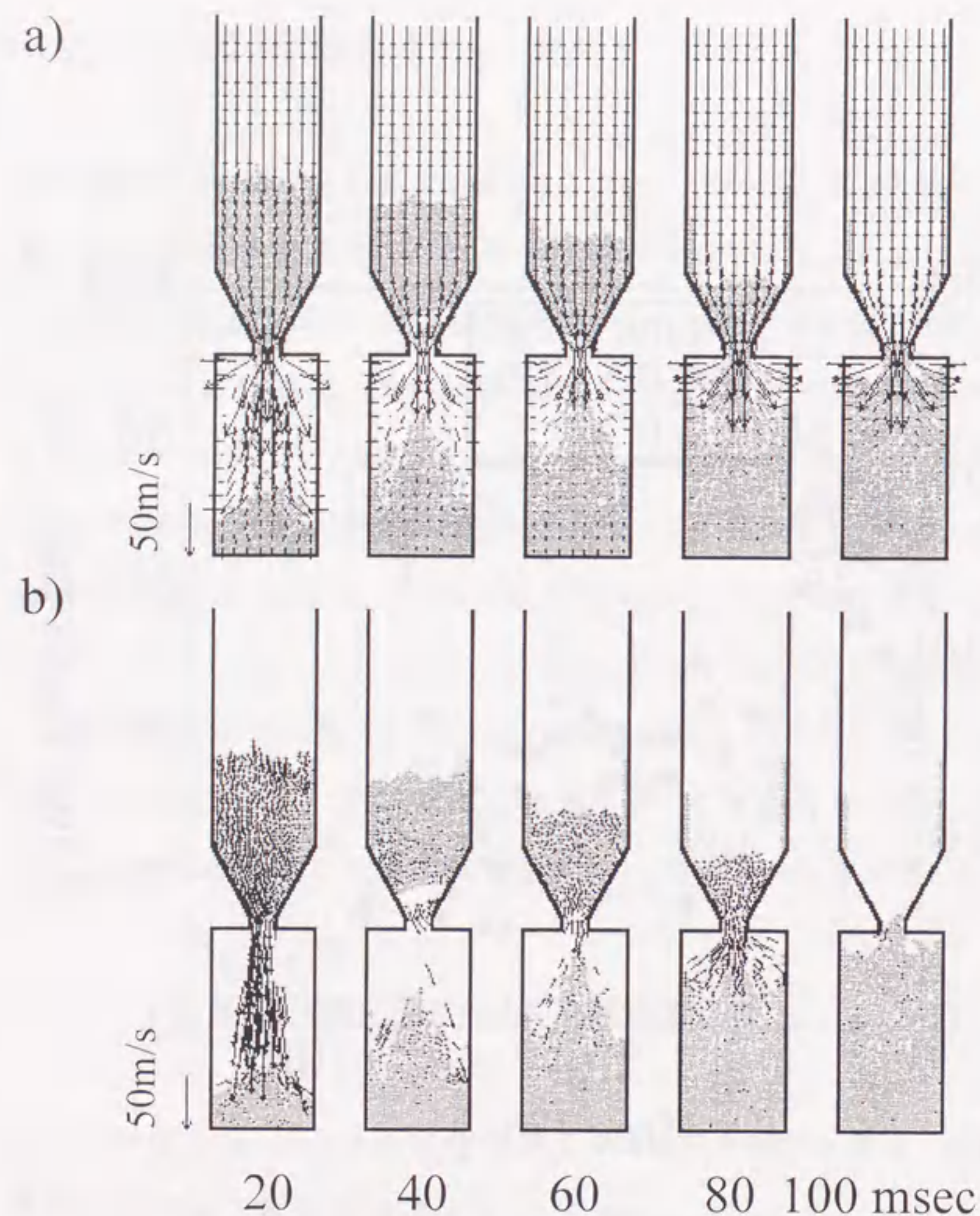


Fig. 4-7 Calculated results of velocity distributions.  
a) air velocity  
b) element velocity

ため、キャビティ底面から圧縮空気はほとんど排気されず、生型砂が未充填であるキャビティ上部の側面から圧縮空気が排気される。それ故、キャビティ下部に堆積している生型砂は流気による圧縮を期待できないと考えられる。

また、80msの時点で生型砂はキャビティ内に堆積した生型砂の表面を滑るように左右に広がりながら充填する(Fig.4-4)。この時点の空気流ベクトルと砂粒子ベクトルをみると、その方向はほぼ一致していることがわかる。これは流入砂粒子とすでに堆積している砂層との衝突により、接触力が大きく寄与し、砂粒子の移動方向を変化させた結果と考えられる。

初期位置が中心軸上でキャビティ底面から、それぞれ、150、250、350mmである3個の離散要素に着目し、それらの軌跡と速度変化を、それぞれ、Fig.4-8、4-9に示す。初期高さ150mmの要素はブロープレート位置であるため、一気にキャビティ底面に到達して停止する。初期高さ250mmの要素は、圧縮空気の導入直後マガジン内で圧縮され、15msまでは下方へ5m/s程度で移動するが、その後、ブロープレート近傍から急激に加速し、キャビティ内約50mmの高さで、31m/sに達した時点で堆積砂層に到達し、停止している。初期高さ350mmの要素も同様にマガジン内で圧縮されるため20msまでは下方に徐々に8m/sまで加速し、その後、生型砂の噴出にともない下方に2m/s以下の速度で移動し、ブロープレート近傍(70ms頃)で急激に加速する。しかし、キャビティ内では生型砂がかなり充填しているため、15m/sまでしか加速せずに高さ約110mmの位置で停止することがわかる。このように、本解析手法を用いれば、実験では測定できない砂粒子個々の軌跡や速度の経時変化を知ることができる。



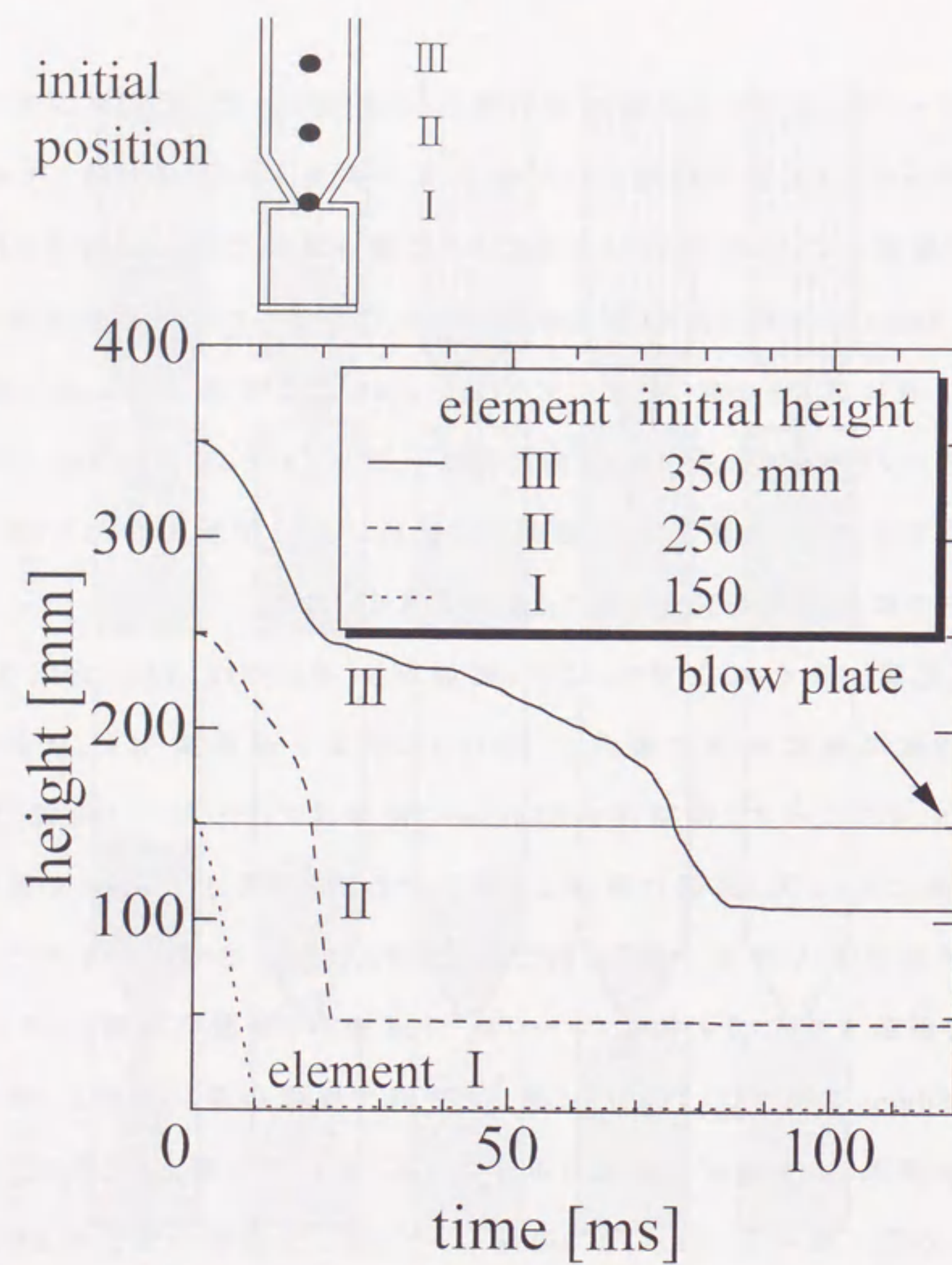


Fig. 4-8 Trajectories of distinct element.

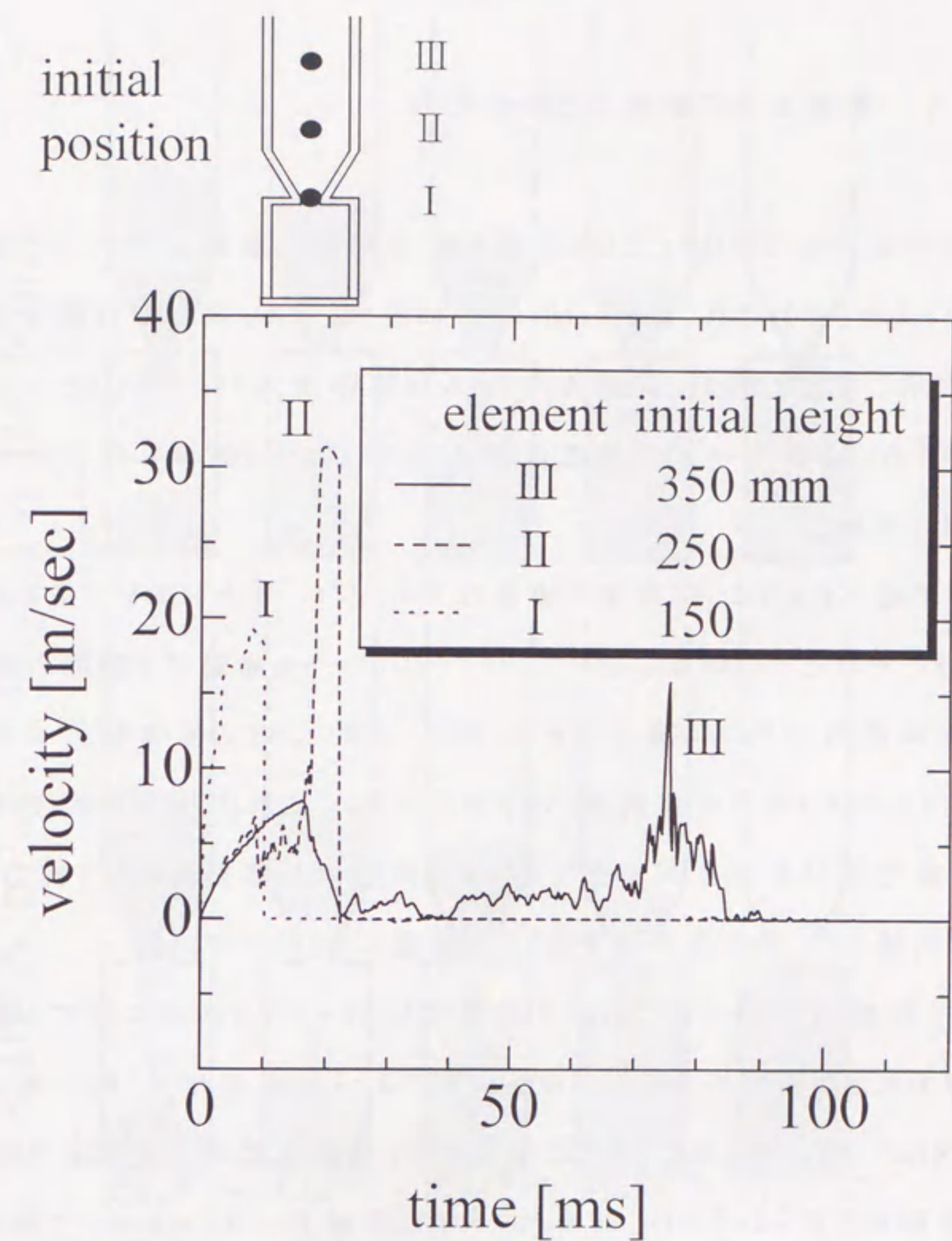


Fig. 4-9 Element velocity as a function of time.



#### 4.4.4. 離散要素の接触力と流体抗力

タンクの圧力を  $0.5\text{MPa}$  とした場合の離散要素の接触力ベクトルと流体抗力ベクトルを、それぞれ、Fig.4-10-a、b に示す。また、同図には離散要素も灰色で示してある。なお、接触力ベクトルは流体抗力ベクトルに比べてかなり大きいので、接触力ベクトルは流体抗力ベクトルの10倍の単位ベクトルで無次元化してある。

前節で述べたように、空気流の速度はブロープレート上において最も高速であるため、それぞれの時点において、ブロープレートを通る瞬間の離散要素の流体抗力ベクトルが最も大きい。また、マガジン内の流体抗力ベクトルに比べてキャビティ内の流体抗力ベクトルは小さい。これは、キャビティ内において、圧縮空気は生型砂が未充填である側面の上部を通過して排気され、すでに充填している生型砂内をほとんど通過しないためである。

一方、接触力ベクトルは  $20\text{ms}$  の時点でも、キャビティ底部に接する離散要素が最も大きなベクトルを示し、 $100\text{ms}$  までほとんど変化せず、最大値は  $3.6 \times 10^8 \text{N/m}^3$  であった。また、すでに堆積している離散要素に衝突した離散要素は運動を妨げられるため、上向きに大きな接触力ベクトルを示して停止している。それ故、充填は接触力が大きく作用していると考えられる。

次に、前節で着目した3つの要素に関して、接触力と流体抗力の軸方向成分の経時変化を、それぞれ、Fig.4-11、4-12 に示す。なお、下向きの力を負として表示してある。接触力ベクトルは流体抗力ベクトルより大きく、流体抗力はブロープレート(高さ  $150\text{mm}$ )を通過する時点で、それぞれ、最大値を示している。初期高さ  $150\text{mm}$  の離散要素は、わずかに流体抗力を受けるのみでキャビティに入り、キャビティ底面に停止している。また、一旦停止した後、上部から高速に加速した生型砂が衝突するために、下方へ  $1.7 \times 10^6 \text{N/m}^3$

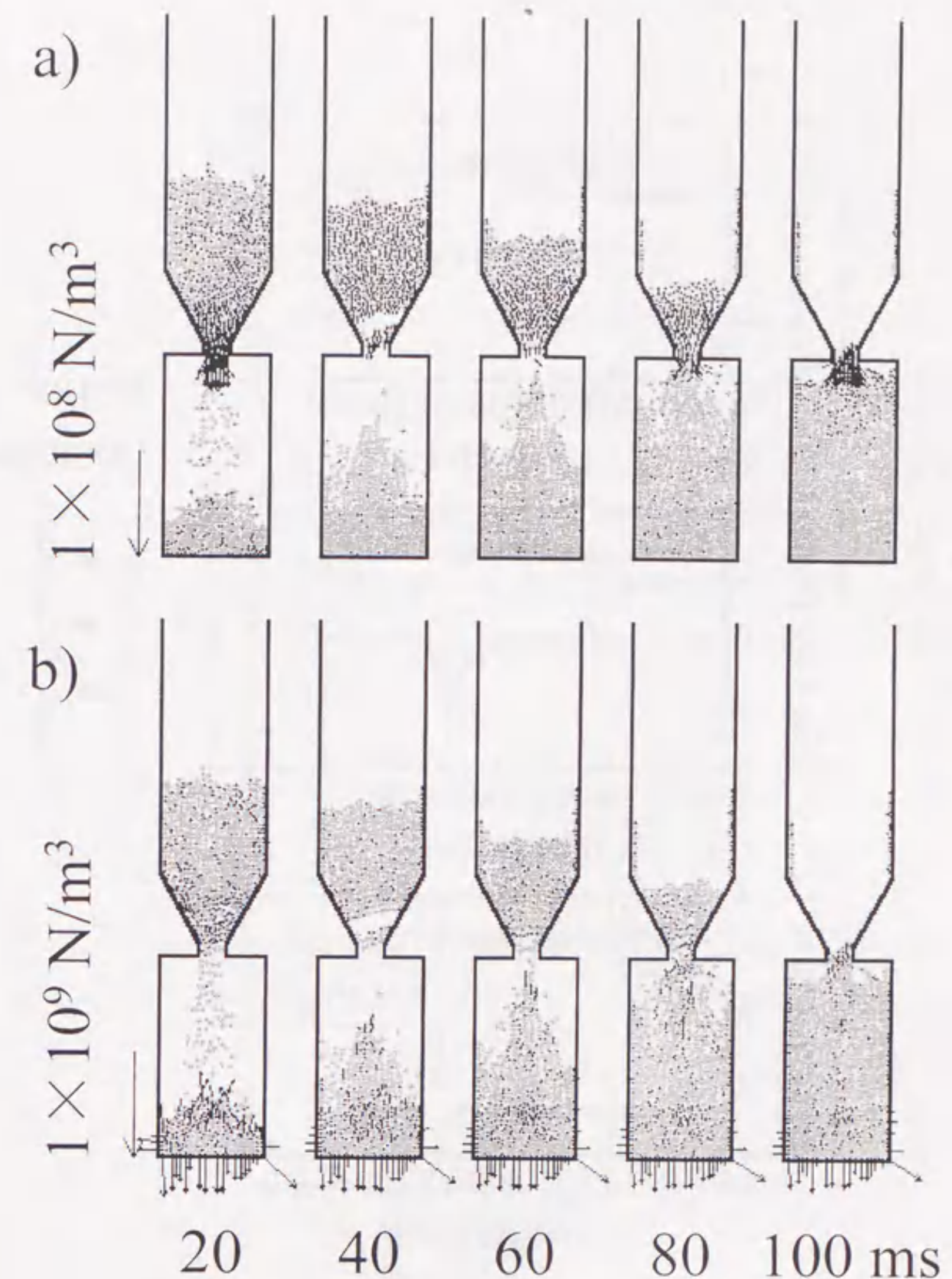


Fig. 4-10 Distributions of force vectors.

a) drag force

b) contact force



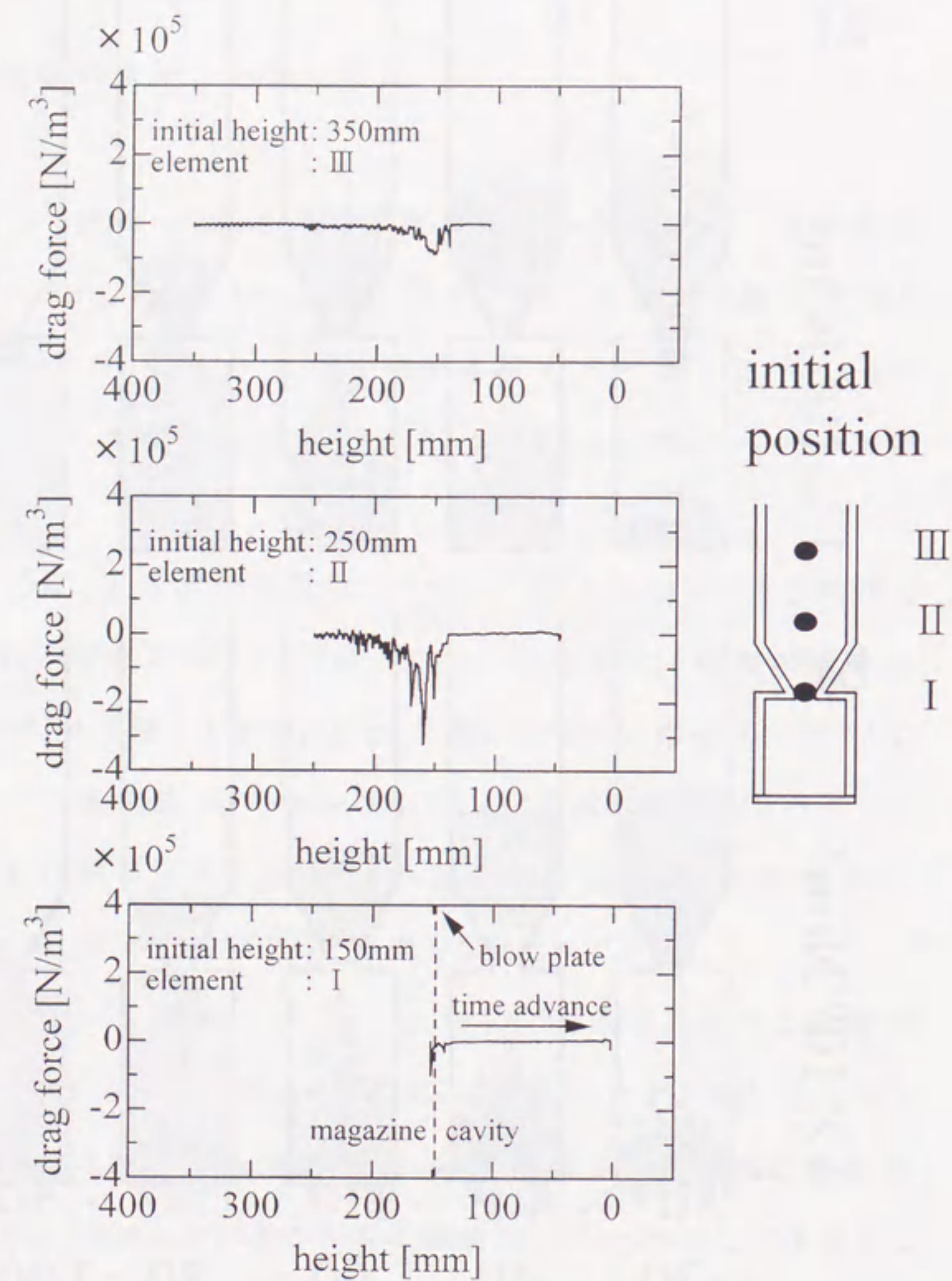


Fig. 4-11 Drag force as a function of time.

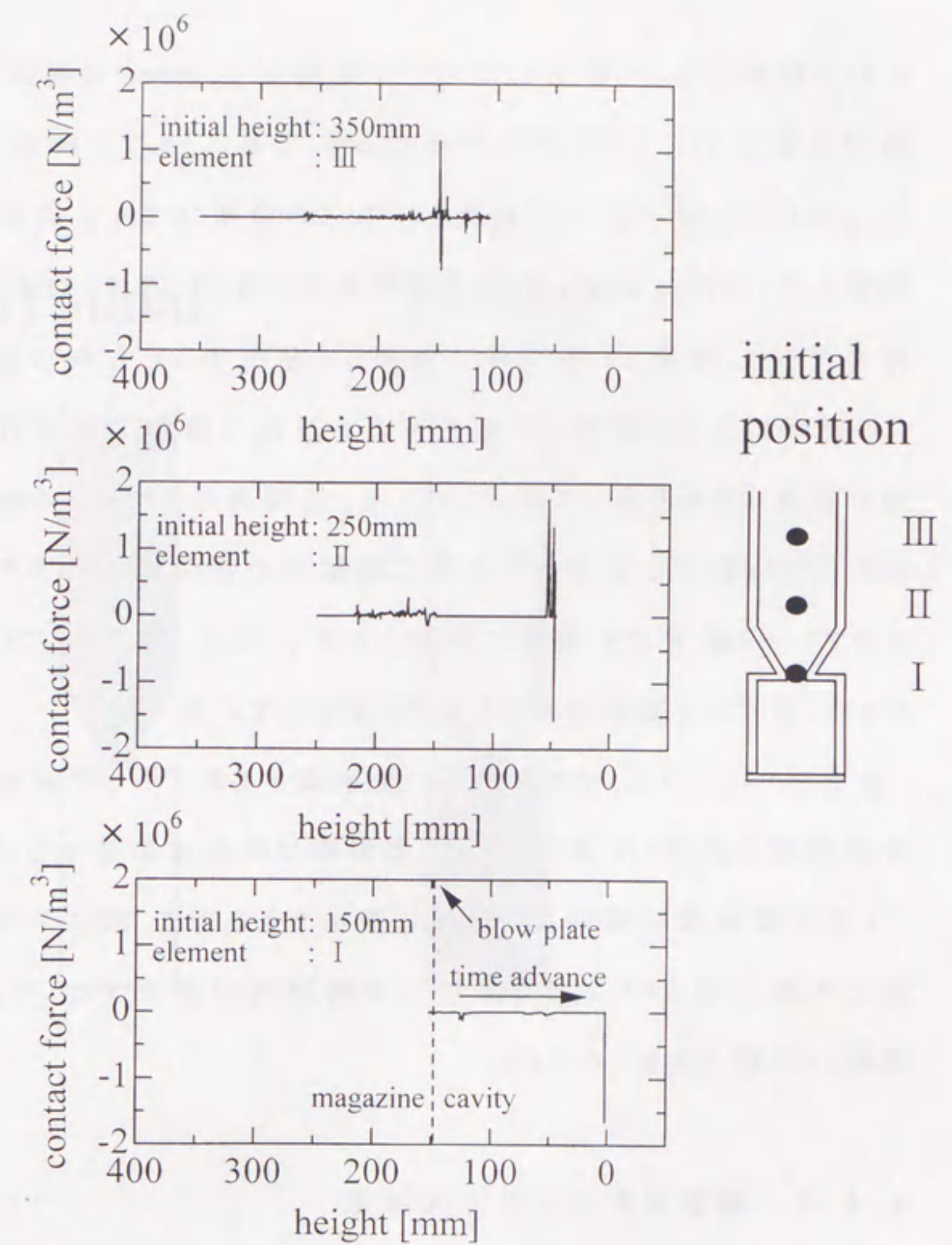


Fig. 4-12 Contact force as a function of time.



の力が接触力として作用している。初期高さ 250mm の離散要素はマガジン内で流体抗力により下方へ移動するが、これにともない接触力も発生している。これらの力学バランスの結果として、この要素は 5m/s 前後でマガジン内を移動している(Fig.4-9)。また、この要素はマガジン内で 31m/s まで加速して停止するが、堆積した生型砂に衝突して発生する上方向の接触力と、さらに、この要素の上から衝突して発生する下方向の接触力が存在し、これらの合力が複雑にからみ合って停止している。初期高さ 350mm の離散要素も同様にキャビティ内で上方向と下方向に接触力が発生している。また、この要素はブロープレート直下で生型砂に衝突した後、さらに、横方向に移動して停止するため、わずかな接触力を示しながら停止している。

以上述べたように、ブロープレートを通過する際、小さな断面積の噴出口で流体抗力が大きく作用するため、生型砂は高速に加速する。その後、堆積している生型砂層に衝突して急激に停止するために、図に示されるように流体抗力の最大値よりも大きな接触力が瞬間的に発生する。それ故、充てんは接触力支配であると考えられる。

#### 4.4.5. 離散要素の水平方向移動

初期状態の水平方向位置により3色に色分けした離散要素の初期位置と充てん後の位置を Fig.4-13 に示す。充てん後は全体に渡り3色が混在し、水平方向の移動に関しては全く予測が困難である。これは Fig.4-4 に示すように、幅 20mm のブローノズルから噴出した砂がキャビティ内で凸状に堆積している生型砂の頂上に衝突するため、その後の移動方向が一定ではないことを示している。

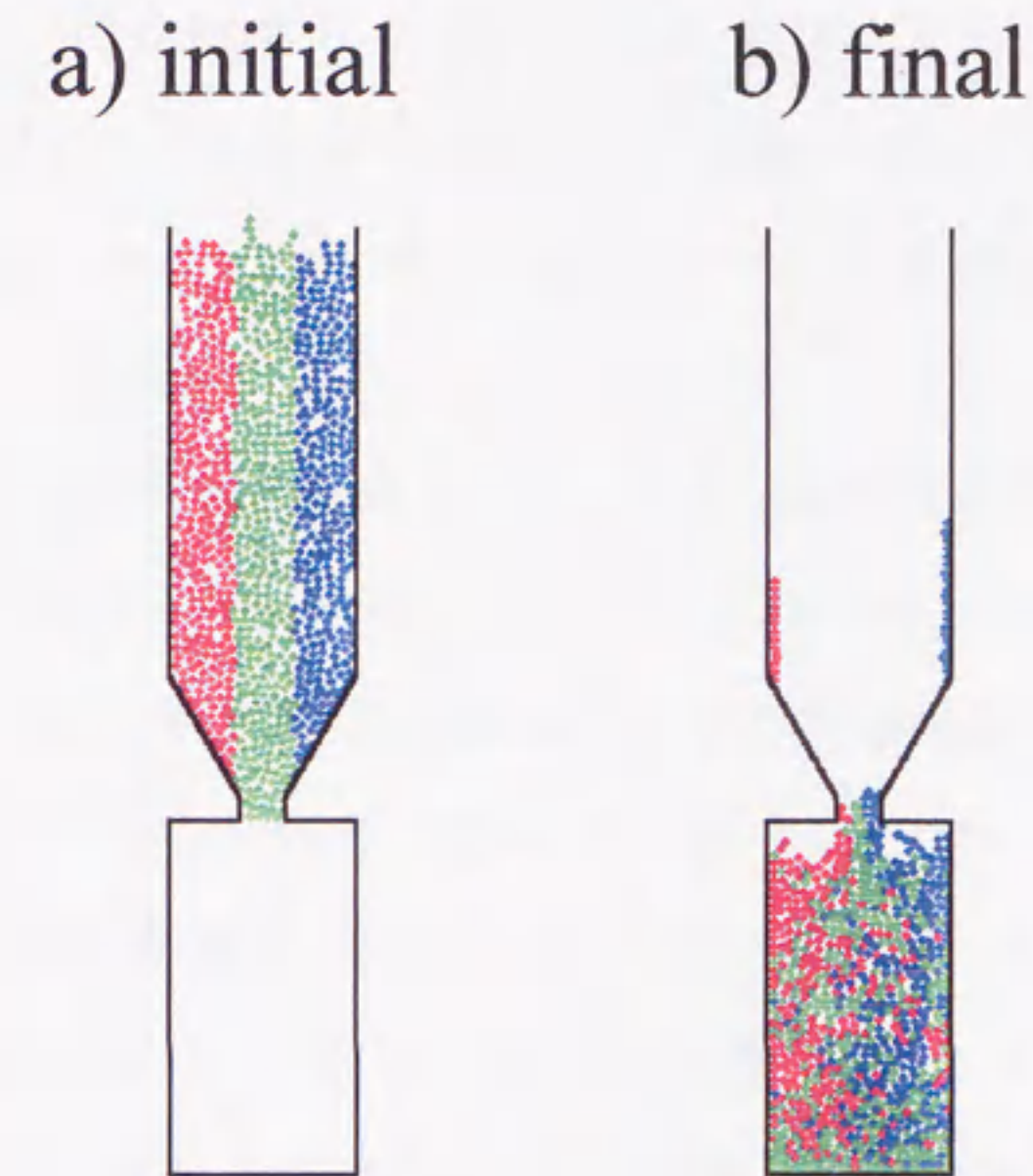


Fig. 4-13 Initial and final position of elements discriminated by 3 colors depending on initial position.



#### 4.4.6. 空隙率分布の経時変化

タンクの圧力を 0.5MPa、マガジン上面から圧縮空気を導入した場合における中心軸上での空隙率分布の経時変化を Fig.4-14 に示す。圧縮空気導入後、マガジン内で生型砂は圧縮され、20ms では空隙率の最小値は 0.46 となり、その後もマガジン内では自由落下での平均空隙率 0.63 をおおむね下回った状態が続いている。一方、キャビティ内においては、40ms までに底部に堆積した砂型の空隙率は 0.4 程度であり、その後も、底部近傍の空隙率はほとんど変化しない。また、キャビティ上部になるほど空隙率は高くなる傾向にある。同図に示す充てん後の空隙率の実測値と比較すると、空隙率はキャビティ下部が低く、上部ほど高くなる傾向は一致している。しかし、100ms での計算値は実測値にかなり近くなったものの、その値は解析結果の方が若干高くなった。これは、二次元の簡便化計算のためと考えられ、モデルを三次元にし、さらに、粒度分布を考慮することで、解析精度の向上を図れるものと考察される。

#### 4.4.7. 空隙率の空間分布

充てん完了後のキャビティ内の空隙率の等高線を、実測結果、解析結果、ともに Fig.4-15 に示す。実測値はキャビティ上部を除いたほとんどの領域において 0.4~0.45 であった。等高線の境界線は凸型となり、中央部は側部より空隙率が低い傾向にある。前節で述べたように解析により得られた空隙率は実測値よりもやや高い傾向にあるが、空隙率分布の全体的な傾向は一致した。



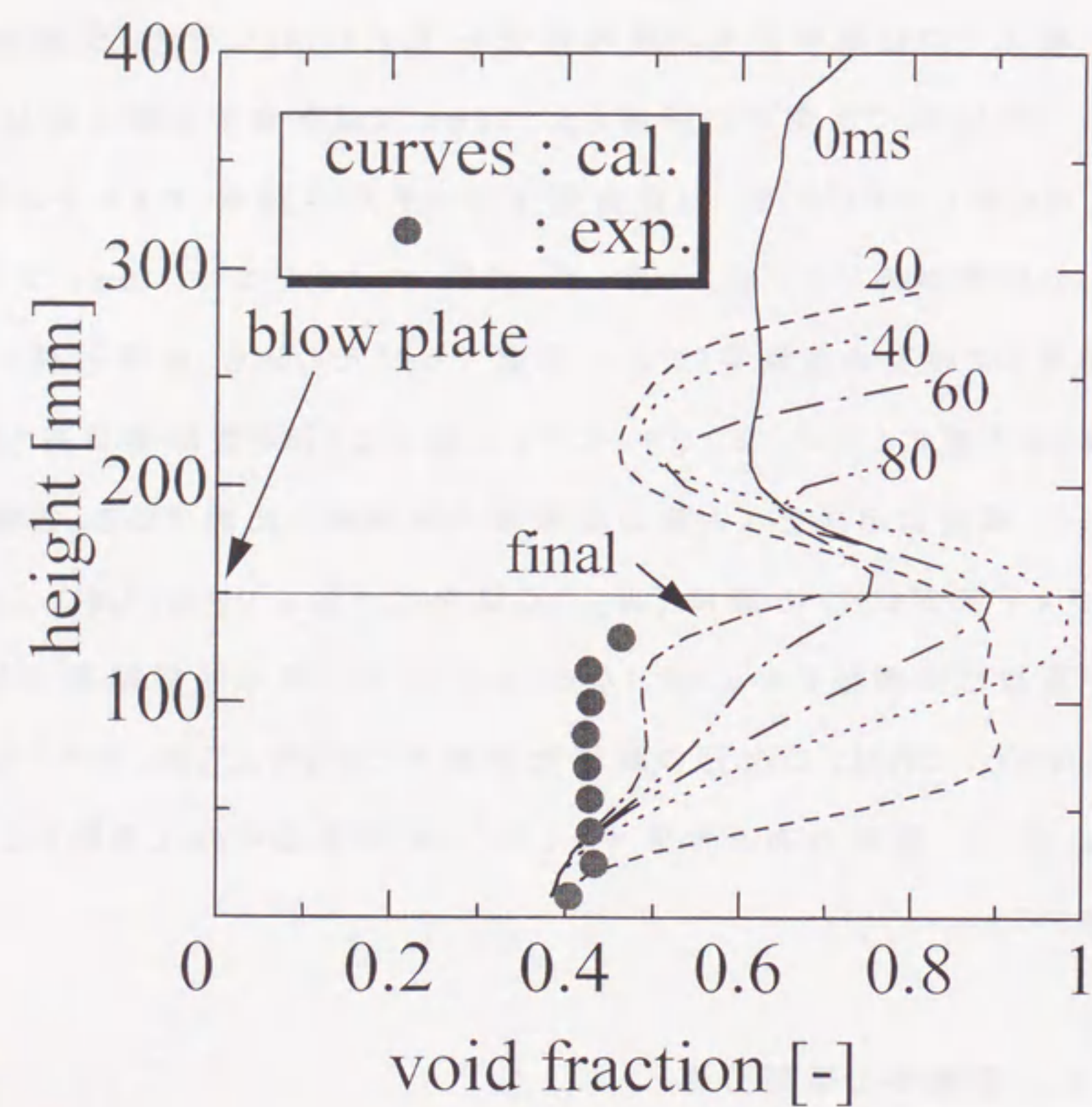


Fig. 4-14 Distributions of void fraction along the center axis.

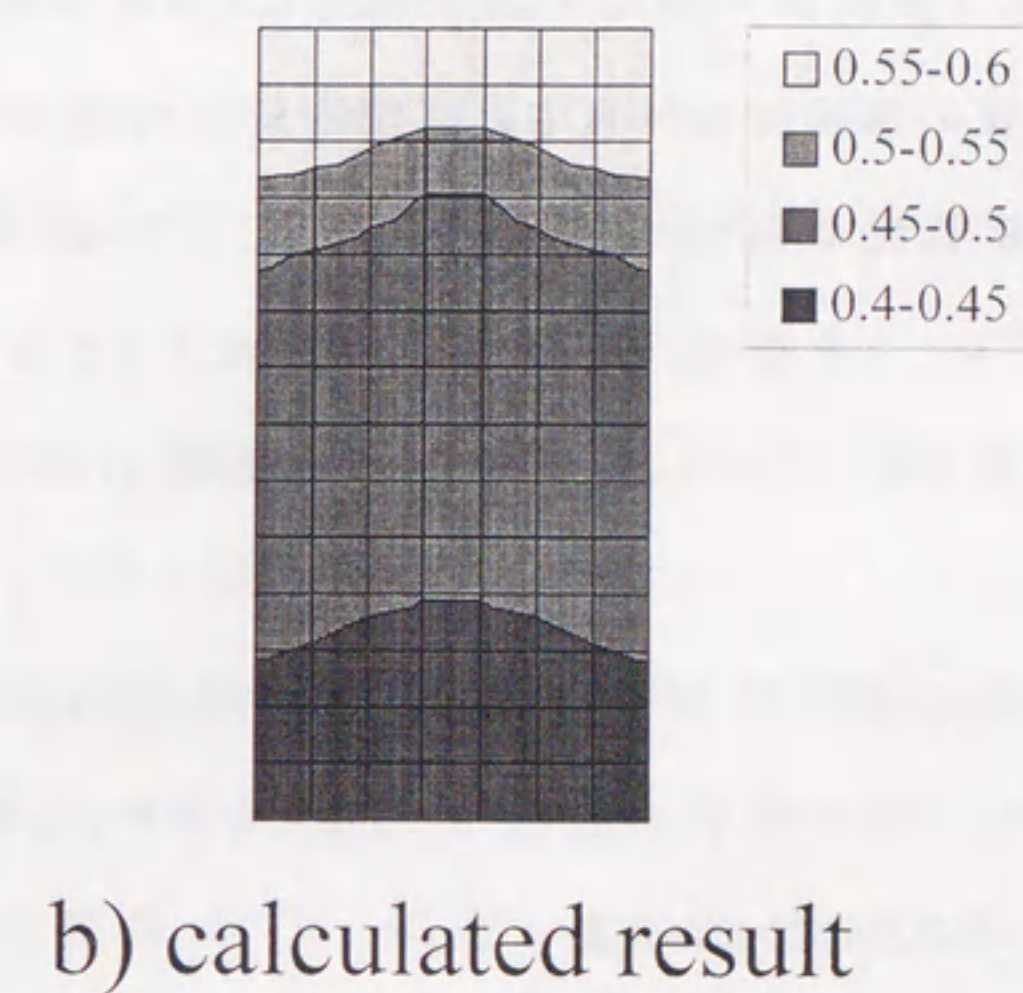
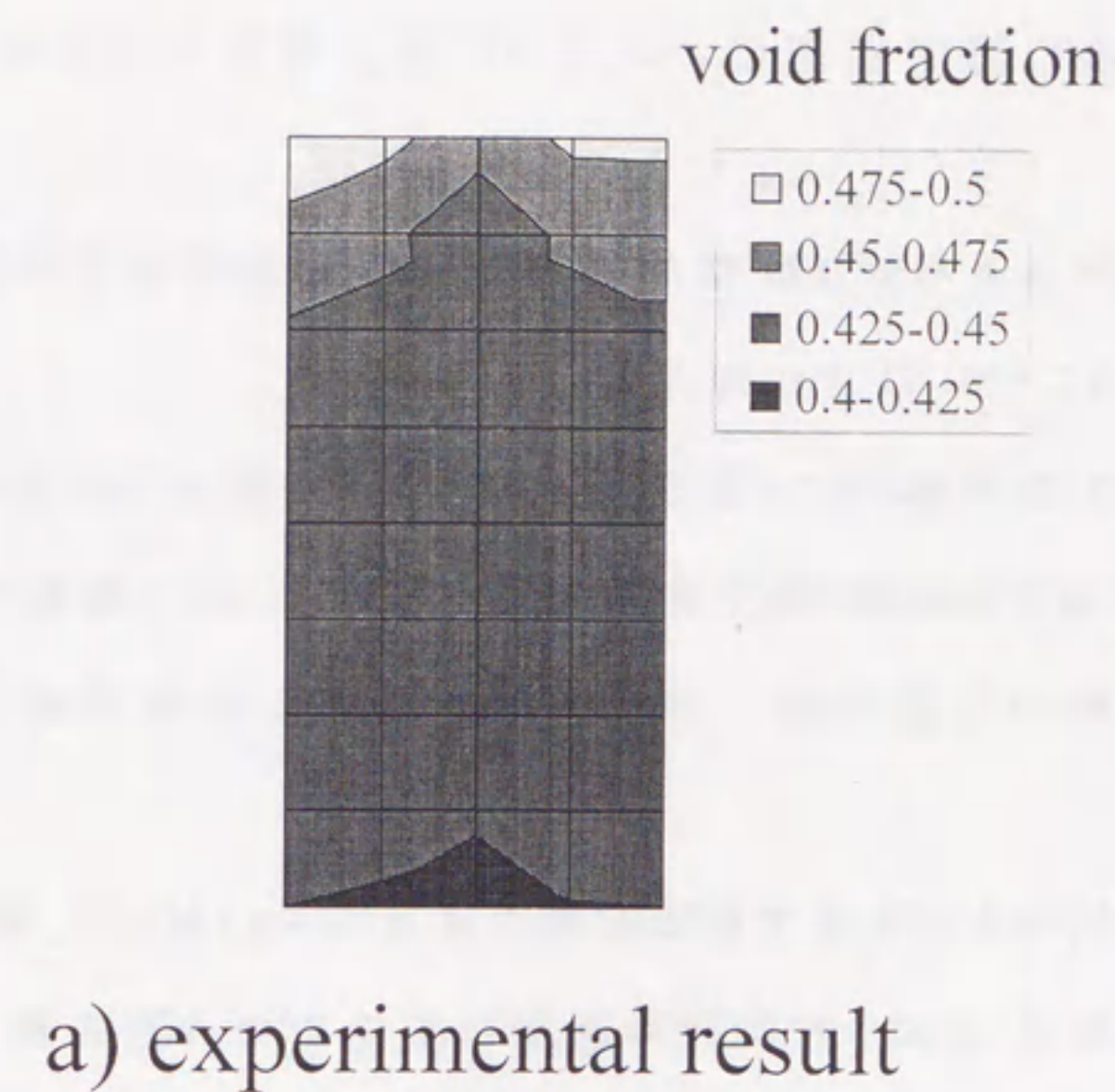


Fig. 4-15 Contour lines of void fraction.



#### 4.5. まとめ

離散要素法を用いた数学的モデルをブロー造型解析に適用し、基礎実験と比較することで、以下の知見を得た。

- 1) 高速度ビデオカメラによるブロー過程の撮影結果と解析結果を比較し、生型砂の充てん形態など、解析結果は実現象をよく説明でき、本モデルはブロー過程の生型砂充てん挙動解析に十分適用可能であることが示された。
- 2) ブロープレートを通過する生型砂の速度分布、および、動的な噴出状況が予測できた。特に、生型砂の速度は圧縮空気の導入直後は高速であるが、その後、徐々に遅くなることを示した。
- 3) 初期にキャビティを充満した砂層を通過する圧縮空気は次第に少なくなり、流気による充てん密度の向上は期待できなくなる。一方、キャビティ上部の未充てん領域の側面から排気される空気量が次第に多くなる。
- 4) 接触力と流体抗力の経時変化を明確にし、生型砂が停止するときの接触力はブロープレートを通過する時点で最大値をとる流体抗力よりも非常に大きいことを示した。これにより造型機構に接触力が支配的であることを示した。
- 5) キャビティ底部近傍の空隙率は充てんの初期過程により定まり、その後の変動は少なく、ブロー時間の経過とともにキャビティ上部に向かって空隙率が低下していくことが明らかになった。

## 第5章 造型プロセスの比較と実プロセスへの適用に関する考察

### 5.1. 流気加圧造型とブロー造型の充てん特性の比較

第3章で流気加圧造型、第4章でブロー造型に対して離散要素法を用いた生型砂充てんの数値シミュレーションを行い、その動的挙動を解析した。両者の充てん特性を比較すると、以下のように要約できる。

- 1) 同一のタンク圧力 0.5MPa において、流気過程における生型砂の代表的な速度は 8m/s 程度であった。一方、ブロー造型における生型砂速度の最大値は 33m/s で、おおむね 10m/s 以上であった。
- 2) 充てん完了後の空隙率分布を Fig.5-1 に示す。流気過程後 (Fig.5-1-a) は全体の 70% の領域における空隙率が 0.4 以下であったのに対し、ブロー過程後 (Fig.5-1-b) はほとんどの領域において空隙率が 0.4 以上であった。すなわち、ブロー過程の方が流気過程よりも充てん密度が小さくなった。

1) からわかるように、同一のタンク圧力においても、ブロー造型の方が生型砂の移動速度が速く、より多くの運動エネルギーを与えていることがわかる。これは、マガジンの幅 80mm からブロープレートのノズル幅 20mm に形状が絞られているため、空気の速度が増し、生型砂の移動速度が速くなったためと考察される。しかし、最終空隙率はブロー過程の方が高く充てん密度が低い。これは、幅 20mm のブローノズルから噴入する生型砂が、キャビティ底部に凸状に堆積している生型砂の頂上に衝突して幅 80mm の横方向にも広がるため、軸方向に加速された速度が徐々に減速して運動エネルギーが効率的に利用されていないためであると考察される。より高い充てん密度が要求される場



a) air-flow

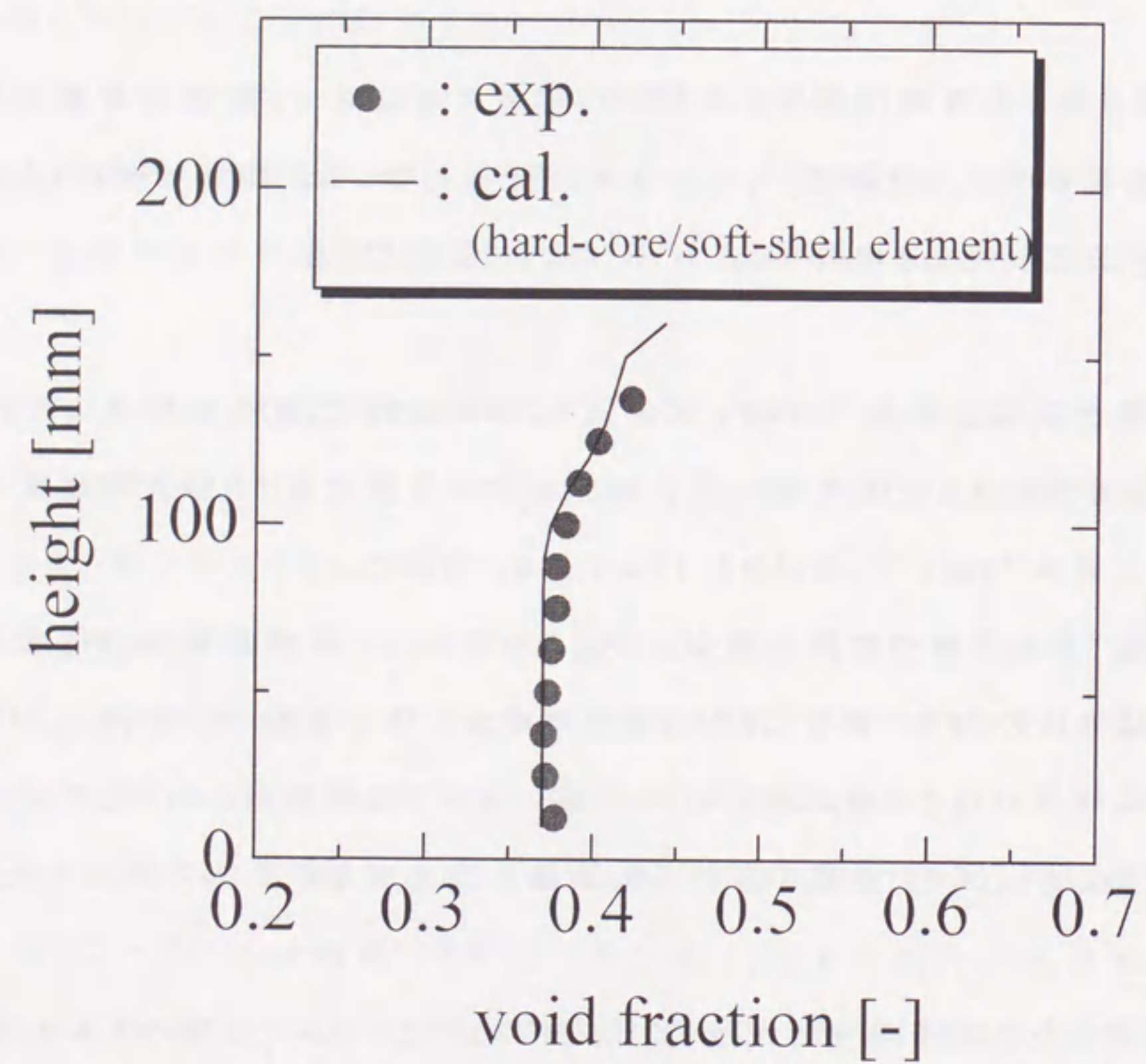


Fig.5-1-a Longitudinal distributions of void fraction at center axis.

b) blow

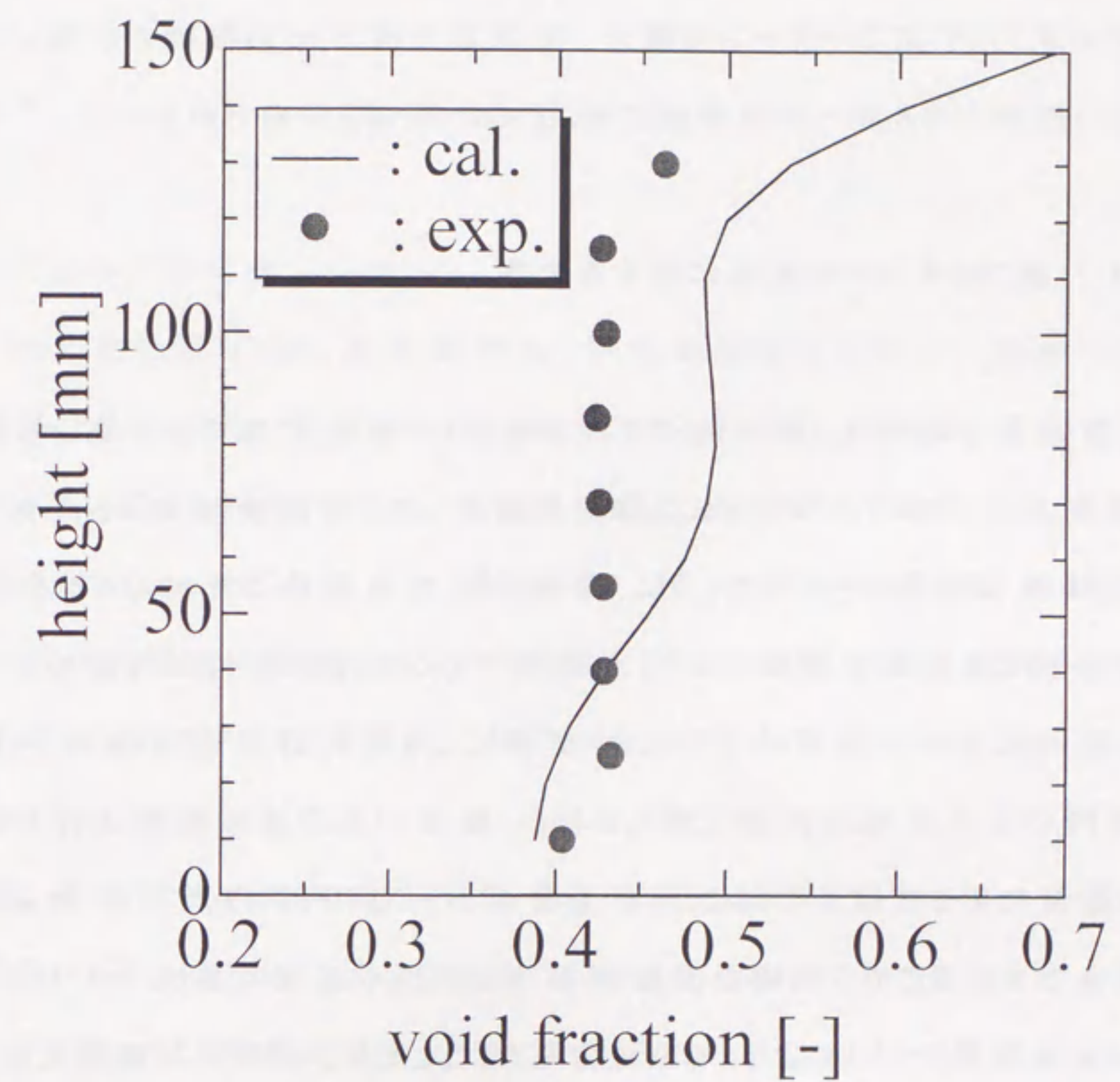


Fig.5-1-b Longitudinal distributions of void fraction at center axis.



合などはブローノズルを複数個用意するなどの対策を施す必要があると考えられる。

一方、流気過程において代表的な生型砂速度は 8m/s 程度であるが、本研究のように平坦なパターンの場合、生型砂の横方向の移動が少ないため、少ない運動エネルギーが効率的に利用されていると考察される。

## 5.2. 実プロセスへの適用に関する考察

生型造型を対象に、数学的モデルを構築し、離散要素の扱い方として、圧縮要素とハードコア・ソフトシェル要素を提案した。圧縮要素による流気加圧造型解析の結果からわかるように、単純形状で生型砂が充てんされるのみの条件下ではこの圧縮要素により、短時間である程度の定量的な解析が可能である。また、ハードコア・ソフトシェル要素により流気加圧造型解析を行い、砂型内の応力状態を詳細に明らかにし、精度の高い造型解析を行った。ブロー造型においては、マガジン内で生型砂が一旦圧縮されてから、キャビティへ吹き込まれるため、単純な圧縮要素モデルは不適切であり、ハードコア・ソフトシェル要素モデルにより、解析を行った。ここでは、本研究で構築した生型造型モデルを実プロセスへ適用する際の問題点について考察する。

まず、生型砂モデルであるが、第3章、第4章に示した流気加圧造型とブロー造型の解析結果から考察すると、汎用性が高く解析精度の優れている要素はハードコア・ソフトシェル要素であると考えられる。

次に実プロセスを対象に解析を精度良く行うためには、本解析方法に以下の点を考慮する必要があると考えられる。

- 1)モデルの三次元化
- 2)粒度分布の考慮
- 3)砂性状と解析パラメータの関係

以下、それぞれについて説明する。

### 1)モデルの三次元化

三次元化に関しては、離散要素法も空気流解析も三次元へ拡張することは容易である。また、実際の砂型を対象とすると、例えば、流気加圧造型で枠サイズ 1000×800×400mm では約 500kg の生型砂が使われる。一要素の直径を 10mm とすると、1.3g/要素となり、約 37 万個の離散要素が必要となる。近年の湯流れ凝固シミュレーションにおいて 200 万個程度の要素数で解析が行われていることを考慮すれば、この 37 万個要素数は非現実的な数値ではないと考察される。

また、複雑形状や薄肉部など、数 mm 程度の隙間を有する場合の解析が要求される場合は、まず、大きな要素でマクロ的な解析をした後に、部分的に小さな要素により解析をすることで、複雑形状にも対応できると考察される。実際の適用において、要素数の選定は計算時間との関係を考慮して行われるべきであると考えられる。

### 2)粒度分布の考慮

本研究では大きさが均一の要素を用いて解析したが、実際の生型砂は粒度分布をもつためこれらを考慮する必要がある。離散要素法では実際の砂粒子径と大きさが異なる代表要素を用いて解析する。粒度分布の考慮は平均砂粒子径により無次元化した分布形態と、平均離散要素径により無次



元化した分布形態を合致させることで考慮できるものと考えられる。

### 3) 砂性状と解析パラメータの関係

本研究では実験誤差を極力抑えるために、新砂にベントナイトを添加して生型砂を混練、造型した。しかし、実生産の生型砂(システムサンド)は、注湯後の砂型の熱間強度を上げるために石炭粉や澱粉が添加されていることが多い。また、溶湯の熱によりベントナイトが焼結層を形成し、その後の混練を経て、さらにベントナイトが被覆する。この現象の繰り返しによりオーリティックス層を形成している。本研究で適用したハードコア・ソフトシェル要素は、ばねとダッシュポットを単純に2段配置するのみであり、実生産の生型砂の構造をモデル化していない。しかし、例えば、ばね定数を接触深さの関数とするなど、解析パラメータの若干の変更で対応できるものと考えられる。現場の生型砂(システムサンド)特性と解析パラメータとの関係については、今後研究を行い順次解明していく必要がある。

以上、実プロセスを対象に解析をする場合に生じるであろうと考えられる主な問題を列挙し、その解決方法について考察した。実用化に関してはまだ検討項目が多くあるものの、今後の進展により、造型条件決定時のシミュレータとして、また、砂型欠陥の解明の支援として実用化できると考えられる。

## 第6章 総括

本研究は、鑄造業界に長年幅広く用いられている砂型、特に、近年量産プロセスに用いられている圧縮空気を利用した生型造型プロセスを対象に数学的モデルを構築するとともに検証実験を行ったものである。本研究により、従来、経験と感覚により推察していた生型砂の充てん過程を解明し、充てん支配要因を明確にした。本論文の各章の内容は以下のように要約できる。

第1章では旧来から鑄鉄の量産プロセスとして用いられている生型の造型法の種類を述べるとともに、従来の研究を概観し、問題点を挙げた。次に、これらの問題点を回避するための解析手法の選定を行い、本研究の目的について述べた。

第2章では生型砂の挙動解析に離散要素法を適用し、空気流解析と連成することで、汎用性が高く、非連続的な挙動の解析が可能な生型造型モデルを構築した。さらに、計算機の記憶容量の削減と計算速度の向上を図る圧縮要素とハードコア・ソフトシェル要素を提案した。

第3章では第2章で提案した圧縮要素を適用した生型造型モデルとハードコア・ソフトシェル要素を適用した造型モデルにより、流気加圧造型の解析を行い、検証実験により妥当性を評価した。圧縮要素モデルにより充てんのマクロ的な挙動が明らかとなり、パターン面、とりわけ、空気流の速度が速いベントホール近傍から充てんは開始すること、空気流入速度を増すことで充てん支配要因が静的な圧力差から砂粒子の運動エネルギーへ遷移することを示した。また、ハードコア・ソフトシェル要素により高精度な解析が可能となり、さらに、ミクロ的な充てん挙動、すなわち、圧縮空気流による流体抗力と砂粒子間の接触力の空間分布と経時変化を明確にし、圧縮空気導入直後は流体抗力支配で生型砂は移動するが、パターン面から順次生型砂が停止し、



接触力も充てんに大きく作用していることを示した。また、生型砂がパターン面に及ぼす粉体圧の最大値を推算できることを示し、高いブロックを配置した場合に生じるアーチ形の亀裂、いわゆる“ブリッジ現象”の予測が可能であることを示した。

第4章ではハードコア・ソフトシェル要素を用いた造型モデルにより、ブロー造型解析を行い、基礎実験により妥当性を評価した。また、モデルに基づき、ブロー過程において空気流が生型砂に及ぼす影響、力学場、砂粒子の軌跡を明確にし、ブロープレートを通る生型砂の速度は圧縮空気の導入直後は高速であるが、その後、徐々に遅くなること、砂粒子はブロープレートを通過するときに流体抗力の最大値を示すが、キャビティ内で停止するときはより大きな接触力を示すことを明らかにした。これらにより、本研究条件下ではブロー過程の充てん機構は接触力により支配されていることを明らかにした。

第5章では第3章で解析の対象とした流気加圧造型と第4章で解析したブロー造型を比較し、2つの造型法の充てん特性を明確にした。ブロー造型の方が生型砂は高速に加速し運動エネルギーを得るが、キャビティ内で斜め方向を変えて移動しながら徐々に停止するため、運動エネルギーが充てんに有効に利用されていないことを述べた。また、本研究で提案した生型造型モデルを実プロセスに適用する際の問題点を列挙して解決策を述べ、本解析手法は実プロセスを対象に十分応用していくことが可能であることを述べた。

以上、本研究では圧縮空気を利用した生型の造型プロセスである流気加圧造型とブロー造型を対象に数値解析を行うとともに、検証実験により妥当性を評価し、充てん特性を明確にした。本研究の成果は他の造型プロセスのみならず、粉粒体を扱う全てのプロセスの最適化に大きく寄与しうるものと考えられる。

## 記号

$A_s$	: 投影面積 ( $\text{m}^2$ )
$a$	: 安息角 (rad)
$b$	: 接触要素の接触幅 (m)
$C_D$	: 抗力係数 (-)
$d_e$	: 離散要素の直径 (m)
$d_p$	: 砂粒子の直径 (m)
$d_{ijm}$	: 粒子 $i$ $j$ 間の $m$ 方向の粘性抗力 (N)
$e_{ijm}$	: 粒子 $i$ $j$ 間の $m$ 方向の弾性抗力 (N)
$E$	: ヤング率 (Pa)
$f_c$	: 接触力ベクトル (N)
$f_{coh}$	: 付着力 (N)
$f_d$	: 流体抗力ベクトル (N)
$f_v$	: 砂粒子が空気流に及ぼす圧力損失ベクトル
$f_1$	: Ergun の式 (2-23) における係数
$f_2$	: Ergun の式 (2-23) における係数
$g$	: 重力加速度ベクトル ( $\text{m/s}^2$ )
$G_g$	: 空気の質量速度ベクトル ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )
$i_m$	: $m$ 方向の単位ベクトル
$k_m$	: $m$ 方向のばね定数 (N/m)
$l$	: 金枠の奥行き (m)
$m_e$	: 粒子の質量 (kg)
$P$	: 接触要素の圧力 (Pa)
$P_0$	: タンクの圧力 (Pa)
$p$	: 空気圧力 (Pa)
$r$	: 位置ベクトル
$r_e$	: 要素の半径 (m)
$t$	: 時間 (s)
$u$	: 砂粒子と空気流との相対速度ベクトル ( $\text{m/s}$ )
$v$	: 空気流速ベクトル ( $\text{m/s}$ )
$v_{in}$	: 空気流入速度 ( $\text{m/s}$ )
$\beta$	: 反発係数 (-)
$\delta$	: 接触深さ (m)
$\delta_b$	: ベントナイト層の厚さ (m)
$\varepsilon$	: 空隙率 (-)
$\eta_m$	: $m$ 方向の粘性係数 ( $\text{kg/s}$ )
$\kappa$	: 比熱比 (-)
$\mu_g$	: 空気の粘性係数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )



$\mu_0$	: 摩擦係数 (-)
$\nu$	: ポアソン比
$\rho_p$	: 生型砂の真密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_g$	: 空気の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$\phi$	: 砂の形状係数 (-)
$\psi$	: 流れ関数 ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )
$\cdot$	: 時間微分

#### 添え字

$i$	: 任意の粒子、要素
$j$	: 任意の粒子、要素
$m$	: Lagrange 座標における任意の方向
$n$	: 法線方向
$t$	: 接線方向
$x$	: $x$ 方向
$y$	: $y$ 方向

#### 参考文献

- 1) T.J.Bosworth et al.: AFS Transactions 67(1959) 47
- 2) 松浦誠, 片島三郎: 鋳物 54(1982) 675
- 3) N.Uzaki: AFS Transactions 88(1980) 529
- 4) 松浦誠, 片島三郎: 鋳物 56(1984) 163
- 5) 松浦誠, 片島三郎: 鋳物 57(1985) 174
- 6) T.Sugiura, K.Hashimoto and M.Naito: AFS Transactions 104(1996) 699
- 7) H.Makino, Y.Maeda, H.Nomura and K.Hashimoto: Proc. of Modeling of Casting and Solidification Processes 1996, Edited by L. Baicheng and J. Tao, 3rd Pacific Rim International Conference, Dec(1996), Beijing, 34
- 8) 牧野泰育, 前田安郭, 野村宏之, 橋本邦弘: 鋳造工学 69(1997) 147
- 9) H.Makino, Y.Maeda and H.Nomura: International Journal of Cast Metals Research, 掲載決定
- 10) R.L.Geller and V.I.Poplavskii: Russian Casting Production 9(1965) 393
- 11) S.M.Pelczarski and J.S.Danko: The British Foundrymen (1971), 1, 2
- 12) K.Srinagesh, J.S.Schumacher and R.W.Heime: AFS Transactions 80(1972) 369
- 13) 前田安郭, 寺嶋一彦, 野村宏之: 鋳物 63(1991) 889
- 14) 前田安郭, 寺嶋一彦, 野村宏之: 鋳物 63(1991) 896
- 15) Y.Maeda, K.Terashima and H.Nomura: Proc. of the 1992 Technical



- Program, Powder & Bulk Solids Conference May(1992), Chicago, 889
- 16) 前田安郭, 寺嶋一彦, 野村宏之: 鑄物 64(1992) 556
- 17) H.Sindermann: AFS Transactions 93(1985) 241
- 18) H.Sindermann: AFS Transactions 102(1994) 321
- 19) J.Wu, J.Jiang, G.Yang and B.Xie: AFS Transactions 104(1996) 491
- 20) 松浦誠, 片島三郎: 鑄物 49(1977) 665
- 21) 松浦誠, 片島三郎: 鑄物 53(1981) 704
- 22) 金森敬, 坂田逸男, 井川克也: 鑄造工学 68(1996) 105
- 23) 安斎浩一, 新山英輔: 鑄物 62(1990) 174
- 24) R.Kanatani, I.Ohnaka and J.Zhu: Proc. of Modeling of Casting and Solidification Processes 1996, Edited by L. Baicheng and J. Tao, 3rd Pacific Rim International Conference, Dec(1996), Beijing, 124
- 25) 三中西信治, 藤田和美, 土井章男, 小山田耕二: 鑄造工学 69(1997) 323
- 26) P.A.Cundall and O.D.L.Strack: Geotechnique 29-1(1979) 47
- 27) 木山英郎, 藤村尚: 土木学会論文集 333(1983) 137
- 28) 中西宏: R&D神戸製鋼技報 37(1987) 33
- 29) 岸野佑次: 土木学会論文集 406/Ⅲ-11(1989) 97
- 30) 田中敏嗣, 石田俊哉, 辻裕: 機械工学会論文集 57-534B(1991) 456
- 31) Y.Tsuji, T.Tanaka and T.Ishida: Powder Technology 71(1992) 239
- 32) 吉田順: 粉体工学会誌 29(1992) 86
- 33) 吉田順: 粉体工学会誌 29(1992) 261
- 34) T.Iwai, T.Aizawa, J.Kihara: J. Materials Processing 42(1994) 175

- 35) 吉田順: 粉体工学会誌 32(1995) 16
- 36) P.A.Langston, U.Tuzun and D.M.Heyes: Powder Technology, 85(1995) 153
- 37) 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻裕: 機械工学会論文集 61-589B(1995) 3169
- 38) 前田安郭, 寺嶋一彦, 野村宏之: 鑄物 67(1995) 318
- 39) 吉田順: 粉体工学会誌 33(1996) 279
- 40) S.Kuraoka: AFS Transactions 104(1996) 619
- 41) 井上義之, 横山豊和, 山根賢治, 田中敏嗣, 辻裕: 機械工学会論文集 63-606C(1997) 356
- 42) R.Byron Bird et al.: TRANSPORT PHENOMENA(JOHN WILEY & SONS, Inc.)(1960) 192
- 43) S.Ergun: Chemical Engineering Progress 48(1952) 89
- 44) 桑原守, 鞭巖: 鉄と鋼 62(1976) 463
- 45) M.Kuwabara and I.Muchi: Transactions ISIJ, 17(1977) 6, 330
- 46) 斎藤武雄: 数値伝熱学(養賢堂)(1986) 80
- 47) 数値流体力学編集委員会編: 非圧縮性流体解析(東京大学出版会)(1995) 94
- 48) 金多潔監訳: 弾性論(コロナ社)(1973) 423
- 49) 狩野武: 粉体輸送技術(日刊工業新聞社)(1991) 32



## 付 録

### 生型砂特性の試験方法

#### 1)コンパクタビリティ(CB)

水分と密接な関係を持ち、造型性と共通性がある。

生型砂を 6mesh のふるいを通して直径 50mm、高さ 100mm の試験筒に入れる。次にサンドランマーにより3回 つき固めをするか、0.98MPa の圧力で加圧する。この沈み深さをもとの高さで割り、百分率で表示した値がコンパクタビリティである。

#### 2)水分量

生型砂 100g を赤外線水分計で 20 分以上乾燥させる。すなわち、JIS Z 2601 の鑄物砂の試験法で定義されている、378～383K の加熱で取り除かれる水分量を意味する。

#### 3)圧縮強度

JIS Z 2603 に従って作成したテストピース、すなわち、所定重量の生型砂を直径 50mm の試験筒に入れ、サンドランマーにより3回 つき固めをするか、0.98MPa の圧力で加圧し、高さ 50mm とした試験片を、圧縮して耐えうる最大の圧力を意味する。

## 公 表 論 文

番号	論文題目	発表雑誌等の名称	著者	関係する章
I	学会誌等			
1	離散要素法による流気加圧造型の数値解析	鑄造工学,69 (1997),147	牧野泰育 前田安郭 野村宏之 橋本邦弘	第2章 第3章
2	Force Analysis of Air-flow Press Molding Using Distinct Element Method	International Journal of Cast Metals Research 掲載決定	H. Makino Y. Maeda H. Nomura	第2章 第3章
3	ブロー造型における生砂充填の数値解析	鑄造工学 投稿中	牧野泰育 前田安郭 野村宏之	第2章 第4章
II	国際会議			
1	Process Analysis of Sand Molding Using Distinct Element Method	Proc. of Modeling of Casting and Solidification Processes 1996, 3rd Pacific Rim International Conference, Beijing, Dec(1996), 34	H. Makino Y. Maeda H. Nomura K. Hashimoto	第2章 第3章
2	Numerical Analysis of Blow Molding Using Distinct Element Method	63rd World Foundry Congress 投稿中	H. Makino Y. Maeda H. Nomura	第4章
III	その他			
1	離散要素法による造型解析	鑄造工学会講演概要集, 127(1995), 104	牧野泰育 前田安郭 野村宏之 橋本邦弘	第2章 第3章
2	流気加圧造型におけるブリッジ現象の数値シミュレーション	鑄造工学会講演概要集, 128(1996), 31	牧野泰育 前田安郭 野村宏之 橋本邦弘	第2章 第3章
3	ブロー造型におけるホッパからの生型砂噴出挙動の解明	鑄造工学会講演概要集, 129(1996), 53	牧野泰育 前田安郭 野村宏之 橋本邦弘	第2章 第4章



4	鋳型造型のネットシェイ プ成形とCAE	シンポジウム「ネットシ ェイプ成形のニューウ ェーブ」, 名古屋(名 古屋大学工学部), (1997), 37	牧野泰育 橋本邦弘 増野修 前田安郭 野村宏之	第2章 第3章
5	離散要素法による造型 時の砂型内応力場解 析	鋳造工学会講演概 要集, 130(1997), 112	牧野泰育 前田安郭 野村宏之	第2章 第3章
6	砂型造型の数値解析	夏期シンポジウム, 神奈川(粉体工学 会), 33(1997), 23	牧野泰育 前田安郭 野村宏之	第2章 第3章
7	ブロー造型における生 型砂充てん特性の数 値解析	鋳造工学会講演概 要集, 131(1997), 45	牧野泰育 前田安郭 野村宏之	第4章

## 謝 辞

本研究は、平成7年4月より平成10年3月にわたって名古屋大学大学院工学研究科材料プロセス工学専攻相変工学講座と新東工業株式会社に  
おいて行ったものである。

その間、終始、適切な御指導と御鞭撻を賜りました名古屋大学大学院工  
学研究科教授、野村宏之先生に深甚なる謝意を表します。また、本論文の  
作成にあたり、有益な御助言と御鞭撻を賜りました名古屋大学大学院工学  
研究科教授、浅井滋生先生、石川孝司先生に深く感謝申し上げます。

本研究を行う機会を与えていただきました新東工業株式会社永井譲会長、  
矢野武社長、久保田保取締役相談役、伊藤嘉紹常務取締役、土方理勝  
監査役、西部新東工業株式会社杉浦肇常務取締役(元新東工業株式  
会社鋳造技術グループマネージャー)に感謝の意を表します。

本研究に関連する解析の実施にあたっては、名古屋大学大学院工学研  
究科助手、前田安郭先生の惜しめない御助力があったことをここに記して厚  
く御礼申し上げます。また、実験の遂行から鋳造業界全般の動向に関して、  
適切な御指導と助言をいただきました新東工業株式会社技術部鋳造技術  
グループ橋本邦弘マネージャーをはじめ同グループの皆様に、改めて感謝の  
意を表します。

この論文をまとめるにあたり、常に有益な御助言と御激励をいただきました新  
東工業株式会社研究所増野修所長ならびに同所員の皆様に深く感謝い  
たします。

さらに長期間にわたって研究全般を御援助下さいました名古屋大学大学  
院工学研究科材料プロセス工学専攻相変工学講座の職員および学生の  
方々に深く感謝いたします。



また、大学院に在籍するにあたり、格別なご配慮をいただきました新東工業株式会社人事部の皆様に深く御礼申し上げます。

最後に、私をここまで育てて下さった父・想二、母・(故)富美子、そして結婚して間もないのにいつも帰りが遅くて寂しい思いをさせた妻・佳代をはじめ、応援してくれた全ての家族・親族に心から感謝いたします。



