岡山大学環境理工学部研究報告
第11巻，第1号，pp.19-26，2006年3月

粒子的アプローチによる構造・流体シミュレーション

守田 利昌* 梶原 毅**

Hydrodynamic and structural simulation by a particle approach

Toshimasa MORITA* Tsuyoshi KAJIWARA**

(Received December 26, 2005)

This paper is a research report concerning the hydrodynamic simulation and the structural simulation by a particle approach. The proposal particle method model is introduced in this report, and the calculation example by the calculation code which uses the proposal model is shown. The high possibility of the particle method is shown by the calculation example which is difficult to solve by FDM and FEM. It is shown by calculation examples of both the hydrodynamic and the structure analysis problems that the proposal model enables us to treat the fluid and the structure in a unified way.

Keywords: Particle, Simulation, Hydrodynamic analysis, Structural analysis

1. はじめに

流体解析、構造解析においては、有限要素法、有限差分法、有限体積法が主な解析手法として用いられている。これら3つの計算手法は格子法と呼ばれ空間を格子状に分割し計算を行なう方法である。格子法は、従来から多く用いられ構造解析や流体解析およびその他多くの解析分野において大きな成果をあげてきた手法である。しかし格子法には問題も存在している。それは、境界の大変形を取り扱えない、飛散現象の解析が困難、メッシュ生成が煩雑であるなどの難点である。これら格子法での難点が存在しない手法に粒子的アプローチがある。

粒子的アプローチとは格子を用いない方法であり仮想的な粒子を用いる方法である (図-1)。流体現象においては、流体を複数の粒子の集まりとして表し、それら粒子間の相互作用を計算することにより流れの数値解析をしようとするものである。同様に、構造問題においては、構成要素を粒子でモデル化して数値解析を実施しようとするものである。流体分野では越塚[1]、構造分野では伯野[2]で紹介されている研究がある。粒子法では格子を用いないため格子法での難点が問題となってこない。粒子の移動で界面の大変形が容易に扱えるし、粒子が飛び散ることで飛散現象の解析が可能である。メッシュを用いないのでメッシュ生成の煩雑さもない。一方、粒子的アプローチの短所と考えられる点としては、微分方程式や積分方程式を解くための解法としての妥当性には検証が難しい点、部分的に細かく領域分割することができない点があげられる。

このように格子法と粒子法にはそれぞれに長所と短所がある。これは、格子法と粒子法でどちらが優れているということではなく、それぞれの手法に適した解析対象があるということである。ここでは粒子法の長所に着目し、その有用性と可能性に重点を置いて行なった粒子的アプローチについての研究の報告を行なう。

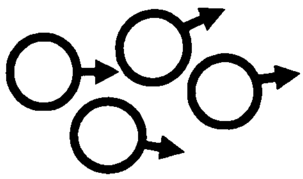


図-1 粒子的アプローチでのモデル

本研究報告では提案粒子法モデルの紹介を行ないそのモデルによる計算例を示す。この粒子法モデル構築の目的は、流体と構造を統一的に扱える手法の構築を視野に入れた粒子的アプローチモデルの提案を行なうことである。ここで流体と構造を統一的に扱うという

* ㈱日本総合研究所
550-0013 大阪市西区新町 1-5-8
** 岡山大学大学院環境学研究科
700-8530 岡山市津島中 3-1-1

ことは、流体と構造が同じ一つのモデルで扱えるということである。計算結果を示すことにより提案粒子法モデルでは流体と構造を統一的に扱うことが可能であること、流体と構造の複合問題に対して容易に対応可能であること、構造と流体の中間的な性質を持つ物質の解析が可能であることが示されている。

本研究報告の内容は次のとおりである。2 において提案モデルについて述べ、3 で提案モデルによる計算例を示し、最後に 4 でまとめが述べられている。

2．提案粒子法モデル

まず、流体の基礎方程式から粒子法の基礎方程式を導く方法を簡単に述べる。非圧縮性流体の運動方程式は次のナビエ・ストークス方程式で表される。

$$\rho\left\{\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}\right\}=-\mathrm{grad}p+\mu\nabla^2\boldsymbol{u}+\rho f$$

ここで、上式右辺は圧力差、粘性力、外力の各作用力を表しており、右辺は質量×加速度である。粒子的アプローチによる変換により上式は

$$ma=f_p+f_\mu+f_l$$

となる。ここで m は質量、a は加速度、f_p, f_μ, f_l はナビエ・ストークス方程式の右辺の各作用力である。

次に、提案粒子法モデルの概要を述べる。本モデルの最小単位は 1 つの球である。その球を要素と呼ぶこととする。要素 1 個は単純なルールに従う極力シンプルなモデルとし細かい要素を多数用いることにより全体として複雑な現象を表すモデルとしている。本モデルの要素を図-2 に示す。

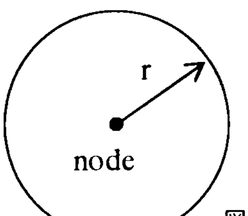


図-2 要素

要素が力または強制変位を受けた場合半径が変化する。また、このとき要素は球形を保つこととする。半径 r_0 の要素に力 f が作用した場合、球の半径が変化し半径 r_1 の球になる（図-3)。

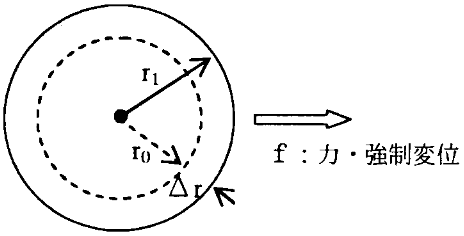


図-3 作用外力と要素の変形

要素のひずみ ε は、要素の体積変化割合で定義する。要素の体積が V、体積変化が ΔV であったとき
ひずみ ε を

$$\varepsilon=\frac{\Delta V}{V}$$

と定義する。

粒子間の接触、接合力、粘性は粒子的アプローチにより粒子間の相互作用力で表わされる。図-4 は粒子が接触しているときの粒子間の相互作用力の例である。ある時刻において粒子 i と粒子 j に重なりが生じた場合は、その重なり長さに応じた力を節点力と要素外力として粒子に生じさせる。

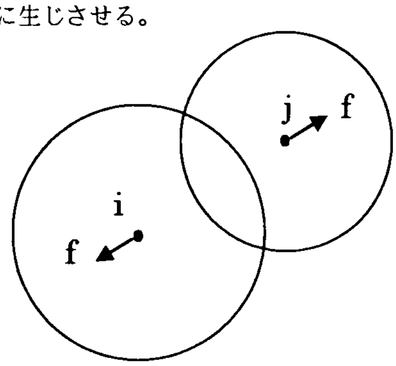


図-4 粒子間力

作成した計算コードでは、壁（剛体壁）を数値的に表現して用いている。この壁は 3 次元空間ではひとつのベクトル **n** により定義される面である。それはベクトル **n** の始点を含み、ベクトル **n** に垂直な平面とされる。質量は、節点に各要素の全質量が質点として存在すると考える集中質量とする。時間方向の計算は、時間刻み Δt を用い粒子の加速度から速度を計算し速度から変位を計算する。

3．構築粒子法モデルによる計算例

ここでは、提案粒子法モデルによる計算例を示す。ここで示す計算例は、流体解析、構造解析、流体と構造の複合問題、および流体と構造の中間的物質に対する結果である。ここで示されている計算例は
計算例-1 水柱の崩壊（流体解析）
計算例-2 構造物の爆破解析（構造解析）
計算例-3 崩壊する水柱と壁（流体と構造の複合問題）
計算例-4 流体と構造の中間的性質を示す物質
計算例-5 水柱の崩壊（3 次元）
の計 5 つである。

3.1 計算例-1 水柱の崩壊

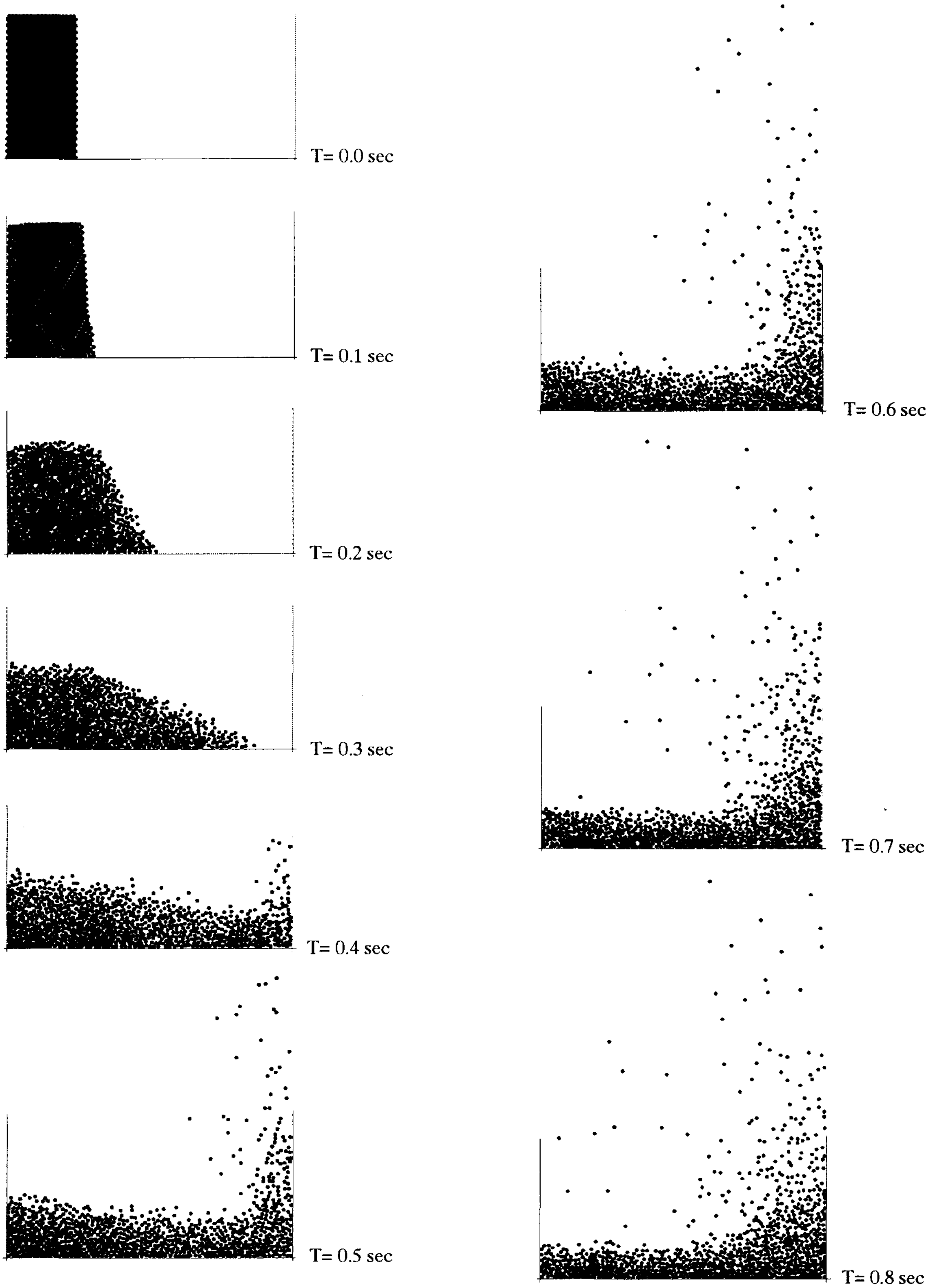
概要：流体解析の計算例を示す。水柱の崩壊の計算

結果である。水柱の大きさは幅 40cm、高さ 80cm であり、時刻 0sec において水柱は崩壊を開始する。水槽右側の壁の位置は、水柱の幅の 4 倍(160cm)の位置である。

データ：1 つの粒子の半径は 0.5cm であり、合計 897 個の粒子を用いて水柱のモデル化を行なっている。水槽は、3 つの剛体壁で定義されている。

結果：各時刻における計算結果を図-5 に示す。水が水槽右側の壁で大きく跳ね上がっている現象が再現されている。このように水のしぶきが飛び散るような解析は格子法では解析が非常に困難な部類の問題である。

図-5 水柱の崩壊



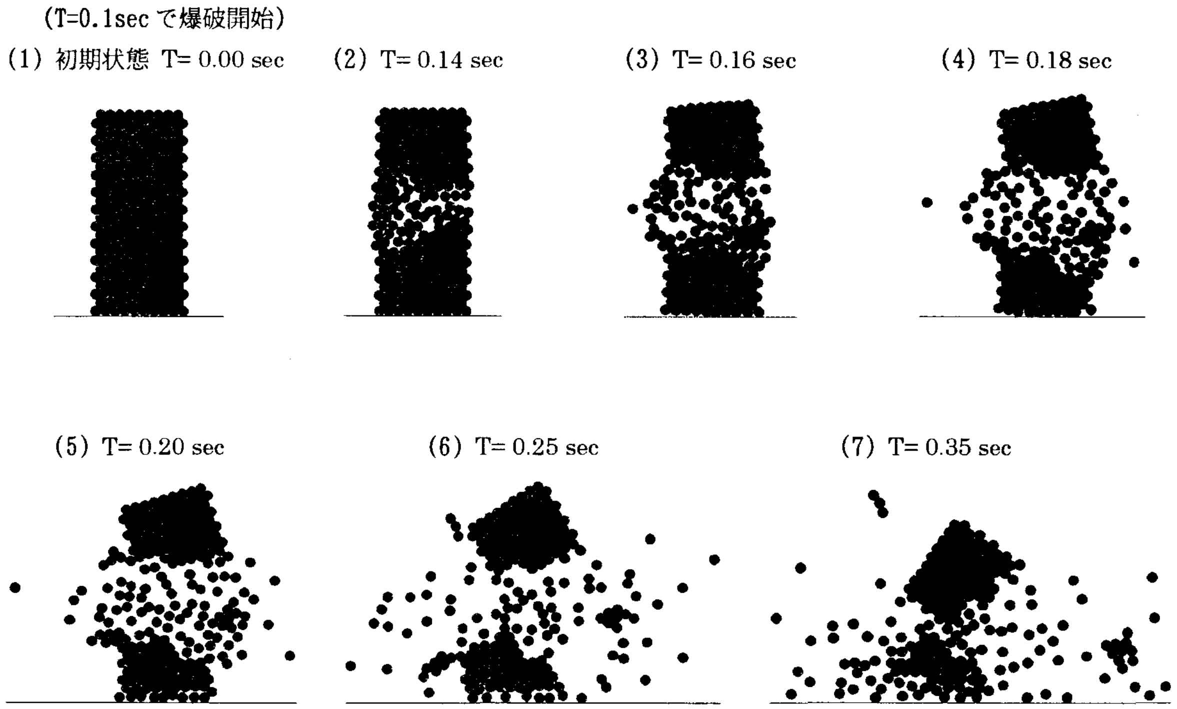
3.2 計算例-2 構造物の爆破解析

概要：構造解析の計算例として構造物の爆破の解析を示す。40cm×80cm の構造物の中心で爆発が生じる。

データ：時刻 0.1sec において爆破が開始される。1つの粒子の半径は 1.0cm であり、合計 228 個の粒子を用いてモデル化をしている。爆発物は構造物の中心に位置する 1 つの粒子であり、非常に短時間の間にこの粒子の体積を急増させることにより爆発を模擬している。

結果：各時刻における計算結果を図-6 に示す。中心部が爆破によって破壊され、破片が飛散していく様子が計算されている。爆発物が存在する構造物の中心部は粉々に砕け散っている。一方、上側及び下側は爆発による破壊は生じていない。本計算例をビルの柱とした場合、ビルの爆破破壊のシミュレーションが行なえる。爆薬の位置と爆破タイミングに対するビルの崩壊過程をシミュレーションすることが可能である。

図-6 爆破解析



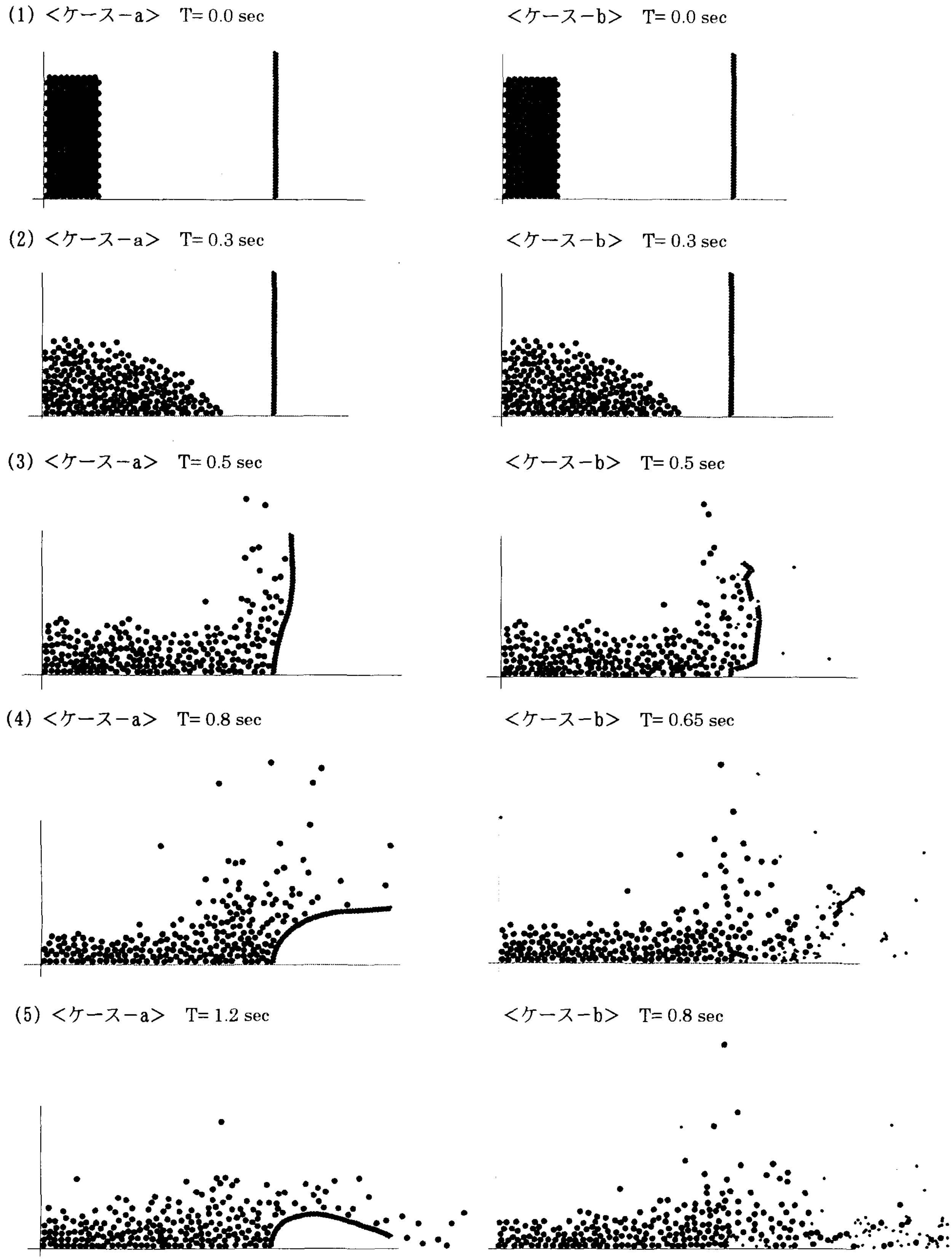
3.3 計算例-3 崩壊する水柱と壁

概要：流体と構造の複合問題の計算例として水柱の崩壊と壁の変形の解析結果を示す。計算例-1 の水柱の崩壊と同様の問題であるが、本例では水槽右側の壁も構造物としてモデル化されており、水の衝撃で壁に変形が生じている。同一形状のケース-a,b の計 2 ケースの計算を実施している。ケース-a は、壁の強度（構造的ねばり）が強く、水流の衝撃を受けても壁が破壊しないケースであり、ケース-b は、ケース-a に比べ壁の強度が弱く、水流の衝撃で壁が破壊するケースである。両ケースにおけるデータの違いは、要素間破断力上限値の違いだけであり他のデータはまったく同一である。

データ：水柱部分の粒子の半径は 1.0cm であり、合計 228 個の粒子を用いてモデル化をしている。壁の粒子の半径は 0.5cm であり、合計 98 個の粒子を用いてモデル化をしている。

結果：各時刻における計算結果を図-7 に示す。ケース-a では、水槽右側の壁が水流の衝撃で大きくたわみ、その上を水が流れ出ている現象が計算されている。一方、ケース-b では、壁が水流の衝撃で破壊され、水の流れと共に壁の破片が流し去られている現象が計算されている。本計算例では、本粒子法モデルで流体と構造の複合問題の解析が可能であることを示した。水柱（流体）と壁（構造）は同一の粒子モデルであるが、水柱は流体の、壁は構造のそれぞれの挙動をよく示していることがわかる。

図-7 崩壊する水柱と壁


(1) ＜ケース－a＞ T= 0.0 sec
＜ケース－b＞ T= 0.0 sec
(2) ＜ケース－a＞ T= 0.3 sec
＜ケース－b＞ T= 0.3 sec
(3) ＜ケース－a＞ T= 0.5 sec
＜ケース－b＞ T= 0.5 sec
(4) ＜ケース－a＞ T= 0.8 sec
＜ケース－b＞ T= 0.65 sec
(5) ＜ケース－a＞ T= 1.2 sec
＜ケース－b＞ T= 0.8 sec

3.4 計算例-4 流体と構造の中間的性質を示す物質

概要:流体とも構造ともどちらとも言い切れないような両方の中間的な性質を持った物質の計算例を示す。粘りの強い物質が床へ落下する解析である。粘りのある物質が、傾いた板に一旦ぶつかった後、さらに下方の床へ落下する。同一形状のケース-a,b,cの計3ケースの計算を実施している。ケース-aはbより粘りが弱く、ケース-bはケース-aに比べ強い粘りが定義されている。ケース-cは粘りを表わすパラメータ値がケースa,b と異なっている。各ケースは、粘りの強さを表わすパラメータ値が異なるだけであり、他のデータはまったく同一である。

データ:落下物質部分の粒子の半径は1.0cmであり、合計228個の粒子を用いてモデル化をしている。傾いた板も同様に半径1.0cmであり、18個の粒子でモデル化されている。大きさ40cm×80cmの物体が時刻0secにおいて自由落下を開始し、約6cm下の傾いた板にぶつかった後に、50cm下の床に落下する。

結果:各時刻における計算結果を図-8に示す。落下物質が傾いた板に衝突し形を変えた後に、さらに下の床に落下する様子が計算されている。

比較的に粘りの弱いケース-aでは、傾いた板の左端からも物質の一部が落下しているなど、より液体的であり物体としてのまとまりが弱い結果となっている。一方、粘りの強いケース-bでは、衝突落下過程においてつねに一体的であり、糸を引きながらちぎれ落ちていく様子が計算されている。パラメータ値の異なるケース-cは、他の2ケースと異なり豆腐のような感じの物質の落下破壊過程を示している。流体解析と構造解析では一般的にそのアプローチが異なっている。それは流体と構造の中間的な物質の解析はどちらの手法でも解くことが困難であることを示していると言える。粒子法では新たな困難を生じることなく中間的物質の解析が可能であることが本計算例で示されている。

図-8 流体と構造の中間的性質を示す物質の落下（1/2）

（ケース-a）粘りが比較的に弱い物質

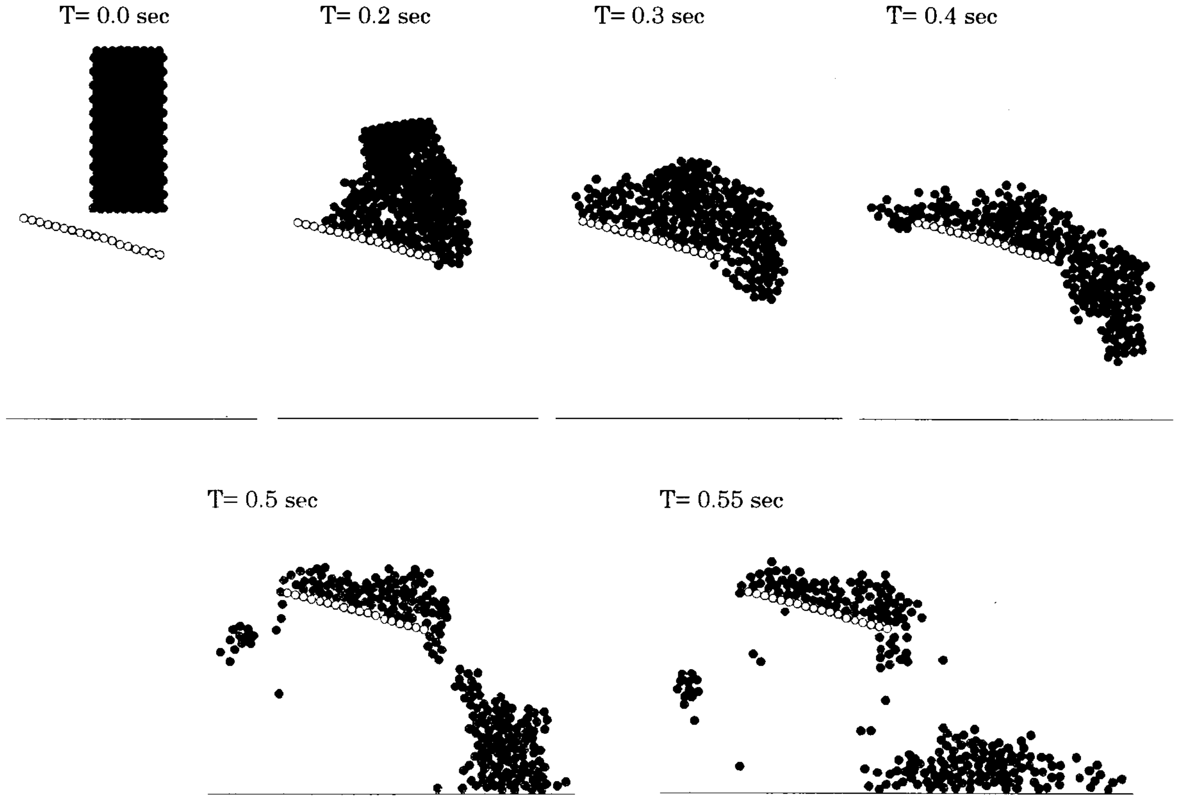
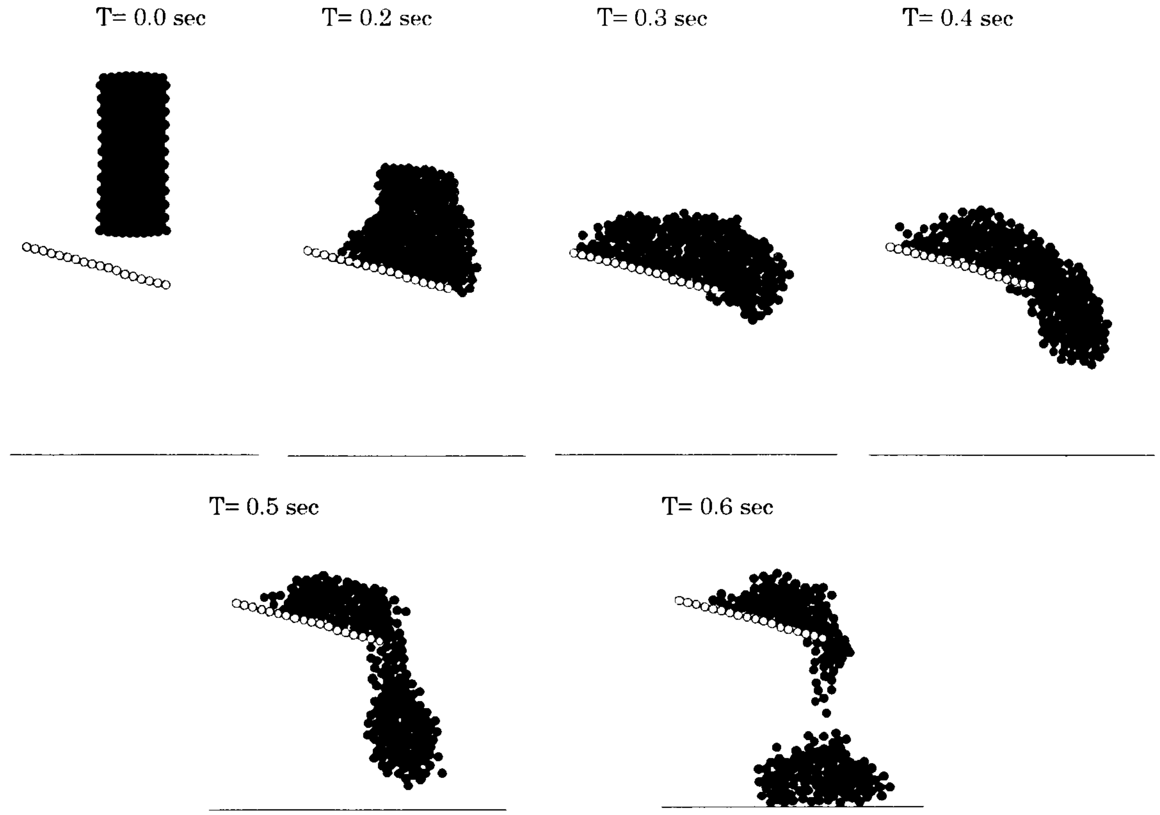
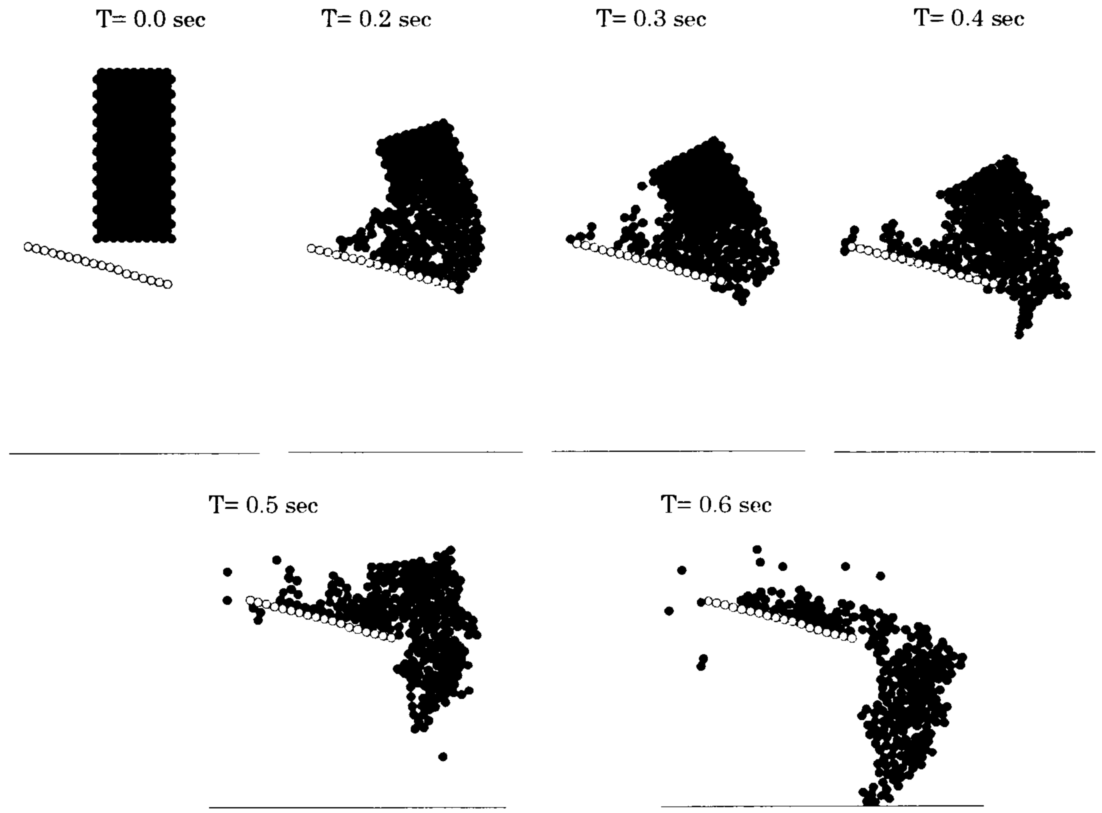


図-8 流体と構造の中間的性質を示す物質の落下（2/2）

（ケース-b）粘りが強い物質



（ケース-c）粘りの種類が異なる物質



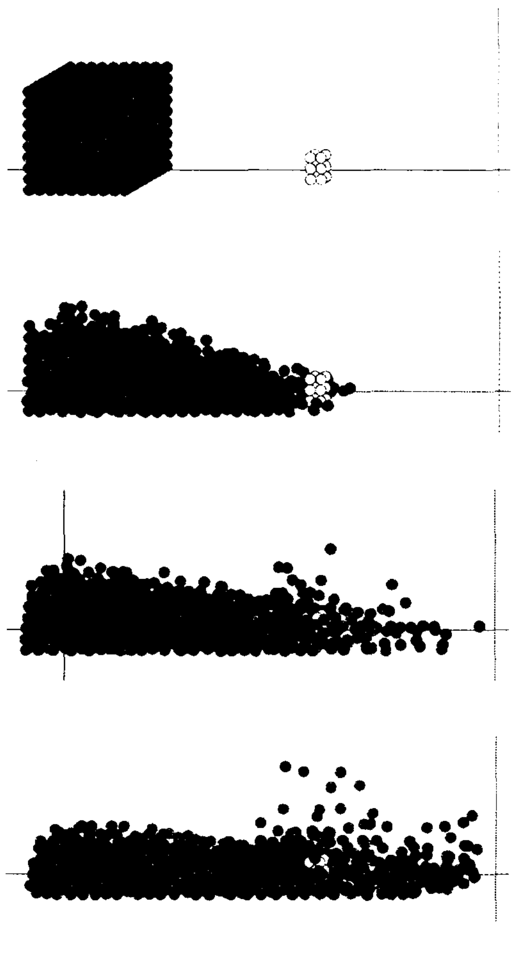
3.5 計算例-5 水柱の崩壊（３次元解析）

概要：３次元の解析例を示す。計算例-1 と同様の水柱の崩壊の解析である。水柱と水槽の間に小さな突起物が存在している。

データ：水柱部分の粒子の半径は 1.0cm であり 10×10×10 個の合計 1000 個の粒子を用いてモデル化をしている。突起物は半径 1.0cm の粒子 12 個で表わされている。水柱の大きさは、幅・高さ・奥域ともに 20cm であり、突起物は水槽左側の壁から約 50cm の位置にあり高さは 6cm である。また、水槽右側の壁は左側壁から 80cm の位置にある。

結果：各時刻における計算結果を図-9 に示す。崩壊した水柱は、水槽にぶつかる前に一部が突起物にぶつかり、その位置で上方へ跳ね上がっている。

図-9 水柱の崩壊（３次元解析）



4．おわりに

本研究報告においては、粒子的アプローチによる流体と構造のシミュレーションについての研究報告を行なった。流体と構造を統一的扱いに扱うことが可能な提案粒子法モデルの紹介を行ない、そのモデルによる流体解析と構造解析の計算例を示した。計算例で示したように、提案粒子法モデルでは流体と構造を同じ１つのモデルで扱うことが可能である。また、構造と流体の複合問題に対しても容易に対応出来る。

本研究報告で紹介した５つの計算例は、格子法では解析が困難な問題である。しかし、このような問題は決して特殊な問題ではなく身の回りに存在するありふれた現象と言える。このようなありふれた現象であり、かつシミュレーションの重要性が非常に高い現象であるにもかかわらず格子法では解析が困難な現象も多く存在する。一方、粒子的アプローチは格子を用いないので、現時点においてシミュレーション困難な現象に対してシミュレーションを実行できる可能性が高いと言える。

格子法は、多くの分野で広く用いられ実績を重ねてきた手法であり、その重要性は今後もしばらくは変わることはないと思われる。しかし、格子法では解析出来ない現象があるもの事実であり、格子法が万能という訳ではない。粒子法を用いることにより、今までシミュレーションが非常に困難であった現象のシミュレーションを可能とすることができると考える。また、粒子法を用いることにより、流体と構造を統一的に扱うことも可能であると考える。ここで、流体と構造を統一的に扱うということは、流体と構造を同じ１つのモデルで扱うということである。そしてそれはまた、流体あるいは構造という二分的な考えではなく、さらりとした流体、ドロリとした流体、ねっとりした物質、形を変えやすい柔らかな構造、がっちりした構造物、と連続的に性質が変化していく一連の物質としてとらえるということである。

粒子法の長所として上げられる点に、その計算手法の自由度の高さがある。それは、たとえば体積を急激に変化させる粒子に示されるような、特徴を持った粒子を作成することが容易であることと、粒子間の相互作用に望む仕組みを組み込むことが容易であることに起因する長所である。その自由度の高さがシミュレーション対象とする現象の複雑さへの対応の容易さとなっている。また粒子法では、３次元解析コードとすることが容易であり、２次元解析コードを作成するのと同程度の労力で作成が可能である。一方、基礎方程式に対する数値解法としての妥当性に関しては、現時点においては格子法の方が高いと言えその点が今後の粒子法に対する研究課題であると考える。

文献

[1] 越塚誠一：数値流体力学、倍風館
[2] 伯野元彦：破壊のシミュレーション、森北出版
[3] 守田利昌：粒子的視点による力学シミュレーションの研究、放送大学修士論文