

## 並列粒子要素法によるバンカーショット解析

堀井宏祐<sup>†</sup> 小泉孝之<sup>††</sup> 辻内伸好<sup>††</sup>  
三木光範<sup>††</sup> 日高重助<sup>††</sup> 折戸啓太<sup>†</sup>

本論文では、並列粒子要素法によるバンカーショット解析モデルを提案する。粒子要素法は、粉体粒子群の挙動を粒子間の相互作用力を計算することによって解析を行う手法である。バンカーショット解析モデルは、クラブヘッド、ボール、バンカー砂によって構成され、それらの相互作用力を計算することによって挙動が解析される。サンドウェッジ形状やショット位置といった様々な条件が、バンカーショットにおけるボールの挙動に与える影響を解析することにより、提案モデルの有効性を示す。また、アルゴリズムを並列化し、並列計算機上に実装することによって処理速度向上を図る。

## Analysis of Bunker Shot Using Parallel Particle Element Method

HIROSUKE HORII,<sup>†</sup> TAKAYUKI KOIZUMI,<sup>††</sup> NOBUTAKA TSUJIUCHI,<sup>††</sup>  
MITSUNORI MIKI,<sup>††</sup> JUSUKE HIDAKA<sup>††</sup> and KEITA ORITO<sup>†</sup>

In this paper, a computational simulation model of the bunker shot is constructed by the Particle Element Method (PEM). The PEM simulates particles' behavior by computing the interaction of the force among particles. The simulation model is composed of a club head, a golf ball and a large number of particles of sand. Analyzing the bunker shot on various conditions, such as shape of the club head and position of the shot, indicates the utility of this simulation model. Furthermore parallelization of the PEM algorithm and implementation on a parallel computer improve the computing speed.

### 1. はじめに

従来、スポーツ用具は設計者、競技者の経験的な勘によって設計されていたが、計算機の発達につれ、数値解析による設計がなされるようになってきている。近年の形状加工精度の向上や、様々な複合材料の開発は、スポーツ用具の設計開発、製造に多くの選択肢を与えているが、様々な条件の相互の組合せが性能に及ぼす影響を直観的に理解することは容易ではなく、また、多くの組合せによって用具を実際に製造し、評価することは困難である。数値解析の利点として、条件変更による試行錯誤が容易であることや、再現性が高いことがあげられ、その重要性はますます高まってきている。

ゴルフ用具においても数値解析を用いた設計開発が注目されてきている。有限要素法は、クラブヘッドの反発特性を解析する手法として多く用いられている。

例として、クラブヘッドを弾性体、ボールを弾性円盤として解析した中井らの研究<sup>8)</sup>、クラブヘッドを弾性体、ボールを粘弾性体として解析した宇治橋らの研究<sup>7)</sup>や、クラブヘッドとボールの超弾性解析を行った Hocknell らの研究<sup>3)</sup>があげられる。しかしながら、サンドウェッジによるバンカーショットを解析した例はない。通常のショットにおいては、クラブヘッドからの力はボールに直接伝達される。一方、バンカーショットにおいては、クラブヘッドとボールは直接接触せず、砂を介して間接的に力が伝達されるため、クラブヘッドとボールの 2 要素では解析できず、さらにクラブヘッドは砂から抵抗を受ける。これがバンカーショットを通常のショットと同様に扱うことができない理由である。

本研究では、粒子要素法を用いてバンカーショット解析モデルを構築することを提案する。粒子要素法は粉体を構成する 1 つ 1 つの粒子の運動を、運動方程式に基づいて追跡することによって、粉体現象を解析する手法である<sup>9)</sup>。バンカーショット解析モデルは、クラブヘッド、ボール、バンカー砂を運動要素として構成され、それらの相互作用力を計算することによって

<sup>†</sup> 同志社大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Doshisha University

<sup>††</sup> 同志社大学工学部

Faculty of Engineering, Doshisha University

各要素の挙動を追跡する．構築した解析モデルによって，サンドウェッジ形状やショット位置といった，様々な条件の組合せの相互作用がボール挙動に与える影響を解析し，提案モデルの有効性を検証する．また，アルゴリズムの並列化と並列計算機上への実装によって，処理速度向上を図る．

## 2. 並列粒子要素法

本論文において，バンカーショットの解析を行うために必要となるバンカーの砂要素は，粒子要素法によってモデル化される．しかしバンカーショットにおいて解析対象となる砂粒子は径が小さく，さらに多数の粒子が必要とされるため，膨大な計算時間が必要とされる．そこで，計算アルゴリズムの並列化によって処理速度向上を図り，この問題を解決する．

### 2.1 粒子要素法の概要

粉体の流動挙動に関する数値解析を行う場合，その流動挙動は個々の粒子の運動に基づいていることを十分に考慮しなければならない．すなわち，粉体挙動を数値解析によって正確に追跡するには，各粒子間の接触時に作用する接触力を厳密に考慮しなければならない．そこで，粉体の持つ離散的な性質を離散粒子要素を用いて表現し，粉体層内の着目粒子とその粒子に接触している粒子の相互作用を考慮した粒子要素法 (Particle Element Method, PEM) が提案された．粒子要素法は，離散要素法 (Discrete Element Method, DEM)，個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) とも呼ばれ，Mishra らによる粉碎機内の粒子挙動の解析<sup>4)</sup> や，Yuu らによるホッパーからの粒子の排出挙動の解析<sup>6)</sup> 等，様々な現象の解析に適用されている．

粒子要素法は各粒子の接触力を推算し，各粒子の運動を追跡することによって，粒子群としての流動挙動を表現している．すなわち，接触点での相互作用力を推算することが最も重要な問題である．各接触点での相互作用力は，図 1 に示される，弾性スプリングと粘性ダッシュポットが並列に接続された，フォークトモデル (Voigt model) に基づいて計算される．また，相互作用力は様々な方向に作用するため，接触 2 粒子の中心方向 (法線方向) 成分と，それに垂直な方向 (接線方向) 成分に分け，それぞれの成分にフォークトモデルを適用し，さらに接線方向成分に摩擦スライダを挿入することにより，粒子間の摩擦相互作用を考慮している．したがって，各粒子の接触力を算出することによって，Newton の第 2 法則に基づく運動方程式で各粒子の運動を追跡することができる．すなわち，接触 2 粒子間に働く力による並進変位  $u$  および回転変

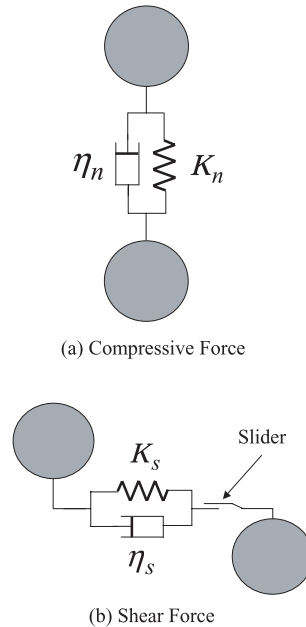


図 1 フォークトモデルによる粒子間相互作用力の表現  
Fig. 1 Description of inter-particle forces by the Voigt model.

位  $\phi$  に関する方程式を次式のように与えることができる．

$$m\ddot{u} + \eta\dot{u} + Ku = 0 \quad (1)$$

$$I\ddot{\phi} + \eta r^2\dot{\phi} + Kr^2\phi = 0 \quad (2)$$

ここで  $m$  は質量， $I$  は慣性モーメント， $r$  は半径である．しかし，通常 1 つの粒子は数個の粒子と接触しているため，式 (1) の  $\eta$  や  $K$  はそれら数個の接点に挿入されたものとなり，未知変位  $u$  と  $\phi$  を陰に含む式 (1)，(2) の形式の連立方程式で解を得ることは困難である．そこで Cundall らは式 (1)，(2) を時間増分  $\Delta t$  によって差分近似し，次式のように変形した<sup>2)</sup>．

$$m[\ddot{u}]_t = -\eta[\dot{u}]_{t-\Delta t} - K[u]_{t-\Delta t} \quad (3)$$

$$I[\ddot{\phi}]_t = -\eta r^2[\dot{\phi}]_{t-\Delta t} - Kr^2[\phi]_{t-\Delta t} \quad (4)$$

このように，時刻  $t - \Delta t$  における速度と変位から新しい時刻  $t$  の加速度が得られ，さらにこれを数値積分することによって，時刻  $t$  における速度と変位を得ることができる．この計算を全粒子について行うことで全粒子の挙動を解析することができる．

粒子要素法では解析対象である粒子群の各粒子に対して，他の粒子との接触判定を行い，接触している場合，2 粒子間の距離から接触力が計算されるが，接触判定をすべての粒子に対して行うと，粒子数を  $N$  としたとき， $N^2$  のオーダーで接触判定を行うことになる．この問題を解決するために，図 2 に示すように，計算領域をセルで区切り，すべての粒子をセルに格納する．セ

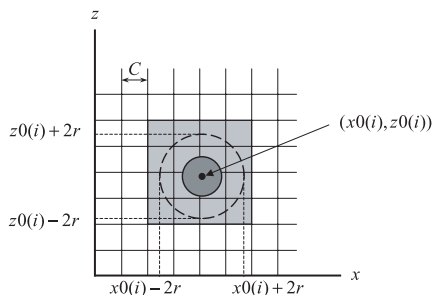


図 2 計算領域のセル分割と粒子の接触判定範囲

Fig. 2 Partitioning the calculation domain into cells and the range of the contact detection of a particle.

ルの幅  $C$  は、1 つのセルに粒子の中心  $(x_0(i), z_0(i))$  が 1 つだけ入るように、次の条件に基づいて設定される。

$$C < \sqrt{2}r \tag{5}$$

このように設定すると、ある粒子  $i$  と接触する可能性のある粒子が存在する範囲は、粒子の中心から半径  $2r$  の円周内となる。図 2 に示した灰色の部分のセルを探索し、そこにある粒子との接触判定を行えばよい。そのため、接触判定の回数を大幅に低減することができる。

### 2.2 粒子要素法の並列化

前節において、粒子要素法は粉体粒子群を形成する個々の粒子に対して、それらに働く力を運動方程式に基づいて計算する方法であることを述べた。しかし、そのために粒子数が多くなると膨大な計算時間を要することが問題となる。そこで、計算アルゴリズムの並列化に関する研究がなされており、並列計算機の大規模化と単体 CPU の処理性能向上とともに、より大規模な粉体現象の解析が行われてきている<sup>1),5)</sup>。

本研究では領域分割法によって並列化を行う。領域分割法は計算領域を、並列計算機の持つ計算要素 (Processing Element, PE) 数で分割して、各 PE に計算領域を割り当てる並列化手法である。バンカーショット解析モデルは 2 次元の計算領域で表現され、計算領域は 1 次元の領域分割法によって横方向に分割される。これは解析モデルが粒子が堆積した状態であることから、計算領域の下部に粒子が集中しているので、横方向の分割により適切に計算負荷が分散されるためである。各 PE は担当する計算領域に存在する粒子に対して接触力の計算を行うが、隣接する計算領域との境界付近に存在する粒子の接触力計算を行うには、隣接計算領域を担当する PE と粒子情報の交換を行う必要がある。図 2 に示すように、接触判定、接触力計算には最大で周囲のセル 2 個分の粒子情報が必要

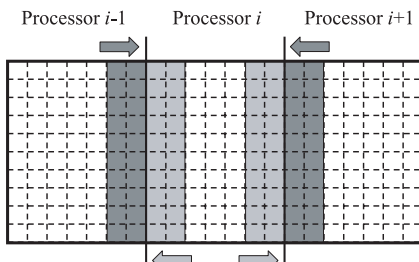


図 3 領域分割法による計算領域分割と PE 間通信範囲

Fig. 3 Partitioning the calculation domain by the domain decomposition method and the region of the inter-PE communication.

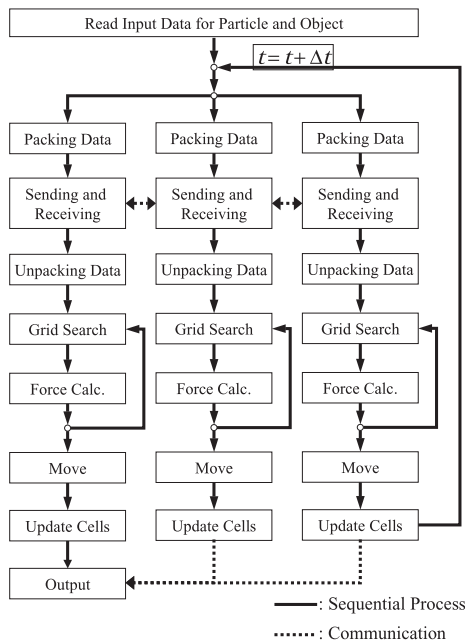


図 4 並列粒子要素法のフローチャート

Fig. 4 Flowchart of the parallel PEM algorithm.

であるため、図 3 に示すように、境界計算領域のセル 2 列分の粒子情報を、タイムステップごとに隣接 PE と交換する。PE 間通信は各ステップの最初に行われる。境界計算領域の粒子情報はまず通信データ配列に格納され、隣接 PE との間で送受信される。次に受信された粒子情報が対応するセルに配置される。こうして必要な粒子情報を得た後に、セルを順に探索し、セル内に粒子が存在する場合に接触判定と粒子間力が計算される。図 4 に並列粒子要素法のフローチャートを示す。

### 3. バンカーショット解析モデルの構築

ゴルフにおけるショットは通常、プレイヤーの体、クラブシャフト、クラブヘッド、ボール等の系が複雑に

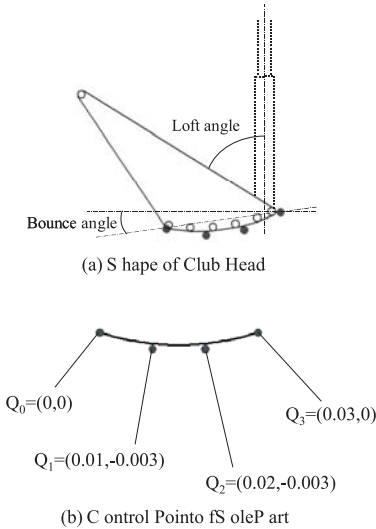


図5 クラブヘッドの形状設定  
Fig. 5 Design of the club head.

関連する総合的な現象であると考えられる。しかしそれらをすべて考慮した現象の解明は困難であり、またそのようなアプローチでは1つ1つの現象が分かりにくくなるため、いくつかの関連しあう系に注目して現象を追うことが必要である。バンカーショットは、クラブヘッド、ボール、砂粒子の3つの系が相互作用しあう現象であり、本研究では粒子要素法によって、解析領域を幅 320 mm × 高さ 150 mm の2次元領域として、上述の3種類の要素によりバンカーショット解析モデルを構築する。

3.1 クラブヘッド要素

クラブヘッドはバンカーショットで通常用いられるサンドウェッジを想定し、図5(a)に示す形状で表現する。サンドウェッジは他のアイアンクラブとは異なり、クラブヘッドのソール部分がリーディングエッジよりも下に突き出した形状をしている。この形状はバウンスと呼ばれ、クラブを垂直に立てたときにソール部分が水平線となす角度をバウンス角という。また、フェイス面が垂直線となす角度をロフト角という。そして、ソール部分の曲線形状を表現するためにベジェ曲線を用いる。ベジェ曲線は制御点と呼ばれる4つの位置ベクトル  $Q_i$  とパラメータ  $t$  ( $0 \leq t \leq 1$ ) によって表現される曲線であり、次式で定義される。

$$P(t) = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & X_2 & X_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{cases} X_0(t) = (1-t)^3 \\ X_1(t) = 3(1-t)^2t \\ X_2(t) = 3(1-t)t^2 \\ X_3(t) = t^3 \end{cases} \quad (7)$$

ソール部分の表現に用いた制御点を図5(b)に示す。ただし、粒子とクラブヘッドとの接触判定の際に粒子とクラブヘッド間の距離を計算しなければならず、点と曲線間の距離計算は計算負荷が大きくなるため、パラメータ  $t$  の定義域を 0.2 間隔に5分割して得られる、ベジェ曲線上の6点を直線で結ぶことによって、ソール部分を表現する。また、フェイス面長さとしてロフト角を決定することによって、フェイス面上端部の1点を決定し、この点とソール両端部を直線で結ぶことによってクラブヘッド形状を定義する。クラブヘッドのフェイス面長さを 65 mm として、バウンス角とロフト角を解析における設計変数としている。

バンカーショットは、クラブヘッドにある回転軸を中心とした円運動をさせることで行う。その際のクラブヘッドの運動方程式は、回転軸に  $M_o$  のモーメントを加えることによってスイングの力とし、クラブヘッドの重力によって回転軸に加わるモーメントを  $M_g$ 、粒子とクラブヘッドの接触力によって回転軸に加わるモーメントを  $M_p$  とすると、次式で記述される。

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{M_o + M_g + M_p}{I_h} \quad (8)$$

ここで  $I_h$  はクラブヘッドの回転軸回りの慣性モーメントである。また  $\theta$  は、反時計回りを正として、クラブヘッドが下端にある状態を 0 としたときの位相である。

3.2 ボール要素

ボールと粒子との相互作用には、フォークトモデルを適用する。ボールの直径は実際のゴルフボールと同様の 43 mm、奥行き方向は粒子の直径と等しい円盤要素として、質量と慣性モーメントを決定している。ボールは堆積した砂粒子上に重力により自由落下させて、静止した状態を初期状態とする。バンカーショットにおけるボールの配置状態には通常、ゴルフ用語でいわゆる目玉と呼ばれるボールが砂に埋まった状態と、埋まらずに砂の上に置かれた状態があるが、今回のボールの配置は目玉の状態になった。

3.3 砂粒子要素

解析領域の境界は固定境界を用いて、バンカーの砂粒子間の相互作用はフォークトモデルを適用する。砂粒子を解析領域内に不規則に配置し、重力により自

表 1 解析モデル中の各要素の物性値  
Table 1 Physical properties of the elements.

	Club Head	Ball	Sand	Wall
Diameter [mm]	-	43.0	0.6	-
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	-	1000	2480	-
Young's modulus [Pa]	$2.06 \times 10^{11}$	$3.0 \times 10^8$	$4.9 \times 10^{10}$	$3.9 \times 10^9$
Poisson's ratio	0.3	0.4	0.23	0.25
Coefficient of friction with Sand	0.2	0.2	0.25	0.17

表 2 クラブヘッド形状と入射位置の設定  
Table 2 Design of the club head and position of the shot.

Shaft length [mm]	700
Initial angular velocity [rad/sec]	50
Bounce angle [deg.]	7, 10, 13
Loft angle [deg.]	56, 58, 60, 65
Distance from initial position [mm]	0.0, -2.5, -5.0, -7.5, -10.0

由落下させて、堆積して静止した状態を初期状態とする。これにより堆積した状態で粒子群に空隙が存在するようにしている。砂粒子数は約 100,000 粒子であり、バンカーの砂として使用されているケイ砂 4 号を想定した物性値を設定し、直径 0.6 mm の砂粒子を幅 320 mm の解析領域内に深さ約 100 mm となるように充填した。また、処理速度の比較のために用いた約 10,000 粒子のモデルにおいては、解析領域が等しくなるように砂粒子の直径を 1.9 mm としている。

#### 4. 数値実験

前章で示した条件でボール要素、砂粒子要素を配置した状態を初期状態として、クラブヘッドによって外力を加えることでバンカーショット解析を行った。解析モデル中のクラブヘッド、ボール、砂粒子、境界面の物性値を表 1 に示す。解析モデルを並列計算機 IBM RS/6000 SP に実装、数値実験を行い、現象の再現性と並列計算効率の 2 つの側面から検証した。

##### 4.1 バンカーショット解析

クラブヘッドのバウンス角、ロフト角、入射位置を設計変数として、それらを変化させたときのバンカーショットの挙動を検証した。クラブヘッド形状と入射位置の設定を表 2 に示す。クラブヘッドの入射位置は、スイングの回転中心をボールの中心の鉛直線上として、スイングの最下点においてクラブヘッドのリーディングエッジが、配置されたボールの最下点を通る位置を基準とした。基準位置から鉛直下方に入射位置を移動させて、入射位置の変化がバンカーショットに及ぼす影響を検証した。シミュレーションの実行時間は  $1.0 \times 10^{-2}$  秒、タイムステップは  $1.0 \times 10^{-8}$  秒としている。

##### 4.1.1 固定境界の影響の検証

本研究で構築した解析モデルの解析領域は幅 320 mm × 高さ 150 mm の 2 次元領域である。クラブヘッドによって砂粒子群に外力を加えたとき、境界には通常より大きな力が加わり、境界から砂粒子群に反発力が加わるため、固定境界が解析に及ぼす影響を検証し、設定した解析領域の妥当性を確認する。

図 6 にインパクト中の解析モデルの挙動を示す。ボールの速度ベクトルをボール中心からの直線で示し、クラブヘッドの軌道の周囲にある砂粒子の挙動を観察するために、幅 20 mm × 高さ 10 mm の領域を 3 カ所選び、その領域の砂粒子の速度ベクトルを表示している。また、その際のボールの速度変化を図 7 に示す。

図 7 を見ると、0.0025 秒以降に急激にボールの速度が上昇している。ここで図 6 を見ると、0.0025 秒以降にクラブヘッドがボールに十分に接近し、砂を介してボールが力を受けていることが確認できる。したがって、0.0025 秒までのボールの速度の増加は、境界からの反発力の影響を受けいている可能性があるが、0.0025 秒以降と比べると極小であり、ボールの挙動には大きな影響を及ぼしていないと考えられる。また、砂粒子群の速度ベクトルを見ると、境界からの反発力の影響が見受けられるが、クラブヘッドが通過する時間においてはクラブヘッドの力の影響が十分に大きく、ボールの挙動にも影響を及ぼしていないことが確認できる。したがって、設定した解析領域において、固定境界はボールの挙動に影響を及ぼさず、適切に解析が行えることが確認できた。

##### 4.1.2 バウンス角がクラブヘッドに及ぼす影響

サンドウェッジのバウンス角を 7, 10, 13 度としたときの、バウンス角がクラブヘッドに及ぼす影響を検証した。図 8 にクラブを振り抜くまでの間にクラブ

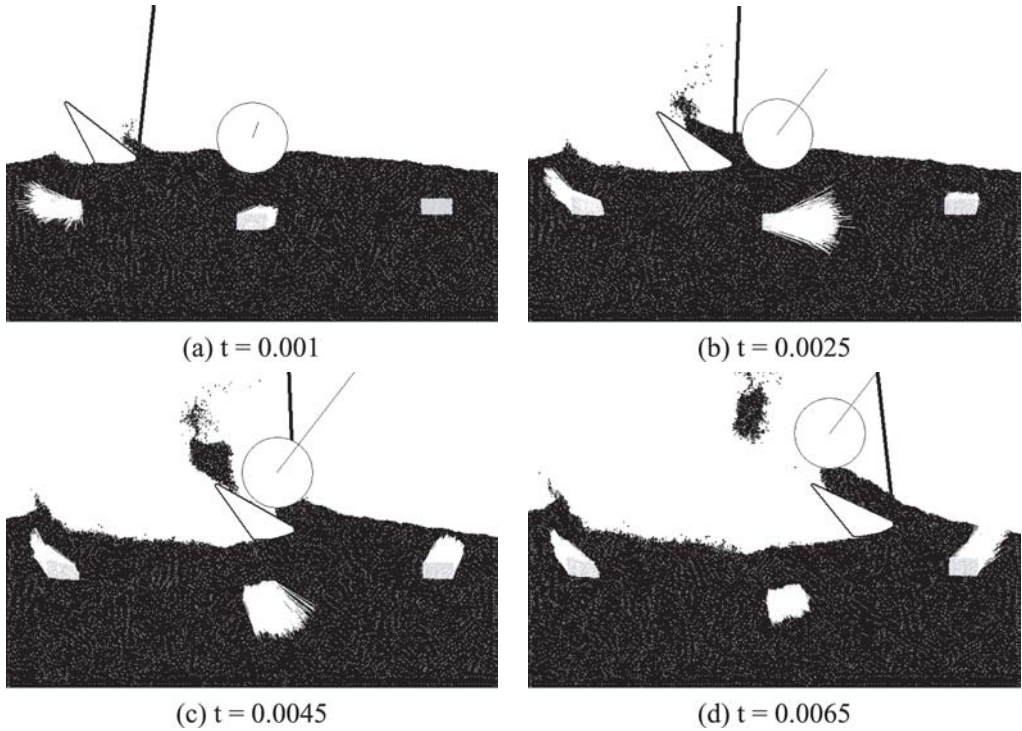


図 6 解析に対する固定境界面の影響の検証

Fig. 6 Verification of the influence of the fixed boundary on the analysis.

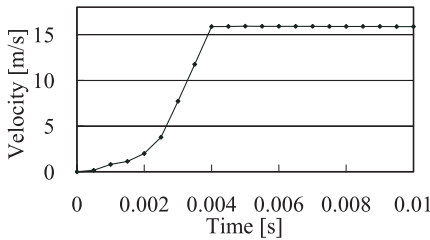


図 7 インパクト中のボールの速度変化  
Fig. 7 Velocity of a ball at an impact.

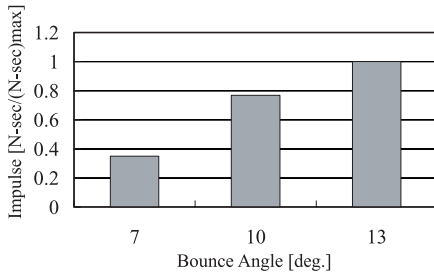


図 8 クラブヘッドに働く上方向の力積  
Fig. 8 Upward impluse for a club head.

ヘッドに働く上方向の力積を示す。ただし、解析は 2 次元であるため無次元化している。

バウンス角はクラブヘッドが砂に潜り込まないように、砂からの反発力を得るためにあるもので、一般に

バウンス角が大きいくほどクラブヘッドの抜けが良いといわれている。解析モデルにおいても、バウンス角が大きくなるほど、クラブヘッドを上へ押し返す力が大きく働いていることが確認できる。

#### 4.1.3 ロフト角と入射位置がボール挙動に及ぼす影響

サンドウェッジのロフト角を 56, 58, 60, 65 度とし、入射位置を基準位置から下方に 0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mm 移動させたときのボールの飛び出し角度と飛び出し速度の数値を表 3 に示す。また、飛び出し角度、飛び出し速度を図 9 に等高線図で示す。

ゴルフはバンカーショットの際には状況に応じて打ち方を変化させる。前方に高い土手があり、これを越えるためにボールの軌道を高く上げたい場合は、砂を厚く削るように打ち、飛距離を稼いで遠くに飛ばしたい場合は砂を薄く削るように打つ。このような砂の削り方によるボール挙動の違いを解析モデルにより検証する。クラブヘッドの入射位置を基準位置から下へ移動させることによって、ショットにおいて削り取る砂の量を変化させている。クラブヘッドが深く入り、削り取る砂の量が増加するにつれてボールの飛び出し角度は大きくなり、飛び出し速度は低下しており、通説どおりの挙動を再現できていることが確認された。

表 3 ロフト角と入射位置がボール挙動に及ぼす影響

Table 3 Influence of the loft angle and the position of the shot on the movement of the ball.

		Release angle [deg.]				
		Loft angle [deg.]				
		56	58	60	65	
Distance from initial position [mm]	0.0	51.6	52.5	54.1	57.8	
	2.5	56.1	57.1	58.4	60.8	
	5.0	58.3	59.0	60.3	63.2	
	7.5	60.2	60.1	61.5	63.9	
	10.0	59.7	61.6	61.9	64.4	

		Release velocity [m/sec]				
		Loft angle [deg.]				
		56	58	60	65	
Distance from initial position [mm]	0.0	16.0	15.9	13.8	13.6	
	2.5	12.4	11.9	11.5	9.8	
	5.0	11.2	10.7	10.1	8.6	
	7.5	10.4	10.1	9.7	8.4	
	10.0	10.1	9.5	9.3	8.2	

表 4 IBM RS/6000 SP のシステム構成

Table 4 System of IBM RS/6000 SP.

CPU	Power3 375 MHz
Number of PEs	16 (4 Node × 4 PE)
Memory	4 GB/Node
Network Bandwidth	150 MB/sec
OS	AIX 4.3.3
Compiler	XL Fortran V7.0

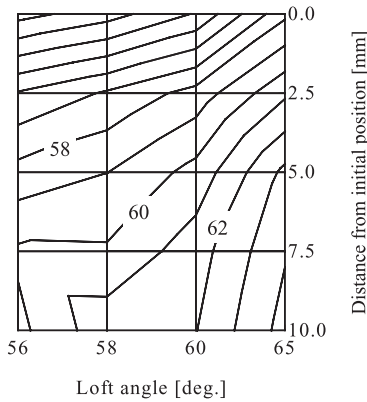
次にロフト角と入射位置の相互作用がボールの挙動に及ぼす影響を検証する。ロフト角が大きくなるにつれてボールの飛び出し角度が大きくなり、飛び出し速度が低下している。これは通説どおりの挙動であるが、ロフト角が 60 度から 65 度に変化した場合を比較すると、クラブヘッドが砂を深く削る場合には飛び出し速度の大幅な減少が見られる。一方で、薄く削る場合には飛び出し速度は変化が見られなかった。また、その際の飛び出し角度は、図 9 の等高線図を見ると、深く削る場合よりも薄く削る場合の方がロフト角の影響を大きく受けていることが分かる。この例が示すように、各設計変数、ショット条件がボールの挙動に与える影響の度合いはそれらの組合せによって大きく異なる。数値解析によって設計変数、ショット条件を様々に組み合わせたときの挙動特性を把握できれば、より適切な設計やショットが可能となる。

4.2 並列計算効率の検証

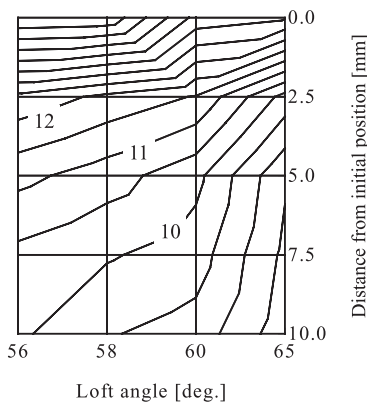
構築した解析モデルを並列計算機 IBM RS/6000 SP に実装し、並列計算効率を検証した。IBM RS/6000 SP は 4 ノード、16 PE で構成される、ピーク性能 24 GFLOPS のクラスタシステムである。各ノードは 4 PE と 4 GB の共有メモリで構成され、ノード間は SP スイッチと呼ばれる高速ネットワークにより接続されている。システムの概要を表 4 に示す。

図 10 に総計算時間 (Total Time)、通信時間 (Communication)、粒子計算 (Calculation)、セルの探索 (Grid Search) に要した計算時間を示す。時間計測は 1, 2, 4, 8, 16 PE で実行中の 10,000 ステップに対して行った。また並列計算 PE 中の 1 番時間がかかった PE における時間を計測している。使用 PE 数が増えるに従って、粒子計算、セルの探索に要する時間は減少しているが、通信時間に関しては大きな違いは見られない。これは使用 PE 数に関係なく、2 セル分の境界領域情報を隣接 PE と通信しているためである。その結果、使用 PE 数が増えるに従って、通信時間が総計算時間中に占める割合が増加し、速度向上比の低下の原因となっている。

次に速度向上比について検証を行った。比較のため



(a) Release angle [deg.]



(b) Release velocity [m/s]

図 9 ロフト角と入射位置のボール挙動に及ぼす影響

Fig. 9 Influence of the loft angle and the position of the shot on the movement of the ball.

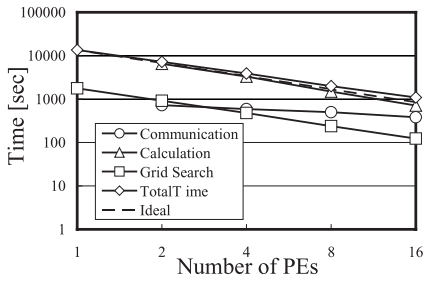


図 10 並列粒子要素法の各処理に要する計算時間

Fig. 10 Computational time for the individual tasks of the parallel PEM.

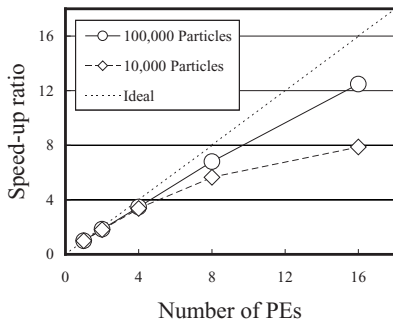


図 11 並列計算による速度向上比

Fig. 11 Speed-up ratio by parallel computation.

に、通常の 100,000 粒子の場合に加えて、10,000 粒子における計算時間を計測した。図 11 に並列化による速度向上比を示す。どちらの粒子数においても 4 PE まではほぼ理想的な速度向上を得ているが、4 PE を超えると特に 10,000 粒子において速度向上比が大きく低下している。これは、粒子数が少ない場合、粒子計算の総計算時間中に占める割合が少ない一方、相対的に通信時間の割合が増加するためである。しかし、100,000 粒子においては 16 PE で 12 倍以上の速度向上比を示しており、並列計算機への実装で十分な処理速度向上が得られている。

### 5. おわりに

本論文では並列粒子要素法によってパンカーショット解析モデルを構築した。構築した解析モデルにおいて、サンドウェッジ形状やショット条件を変化させたときに通説と同様の挙動が再現されていることを確認した。また、サンドウェッジ形状やショット条件がボール挙動に及ぼす影響の度合は、それらの組合せによって大きく異なることが確認された。これは数値解析によって様々な条件の相互作用を把握することが、設計やショットに有用であることを示し、パンカーショット解析モデルの有用性を示している。また、並列アル

ゴリズムを並列計算機上に実装し、並列化効率について検証を行い、十分な処理速度向上を得ていることを確認した。

謝辞 なお本研究は文部科学省からの補助を受けた同志社大学の学術フロンティア研究プロジェクト「知能情報科学とその応用」における研究の一環として行った。ここに謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Ferrez, J.A., Müller, D. and Liebling, T.M.: Parallel Implementation of a Distinct Element Method for Granular Media Simulation on the Cray T3D, *EPFL Supercomputing Review*, No.8, pp.4-7 (1996).
- 2) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, pp.47-65 (1979).
- 3) Hocknell, A., Jones, R. and Rothberg, S.J.: Computational and Experimental Analysis of the Golf Impact, *Science and Golf III*, pp.526-534, Human Kinetics (1998).
- 4) Mishra, B.K. and Murty, C.V.R.: On the Determination of Contact Parameters for Realistic DEM simulations of Ball Mills, *Powder Technology*, Vol.115, pp.290-297 (2001).
- 5) Sawley, M.L. and Cleary, P.W.: A Parallel Discrete Element Method for Industrial Granular Flow Simulations, *EPFL Supercomputing Review*, No.11, pp.23-29 (1999).
- 6) Yuu, S., Abe, T., Saitoh, T. and Umekage, T.: Three-Dimensional Numerical Simulation of the Motion of Particles Discharging from a Rectangular Hopper Using Distinct Element Method and Comparison with Experimental Data (Effects of Time Steps and Material Properties), *Advanced Powder Technology*, Vol.6, No.4, pp.259-269 (1995).
- 7) 宇治橋貞幸, 伊能教夫, 田中克昌, 田中貴規, 佐藤文宣, 金子靖仙: 薄板に衝突するゴルフ・ボールの反発特性の解析, 日本機械学会論文誌(C編), Vol.68, No.666, 207-213 (2002).
- 8) 中井賢治, 曾我部雄次, 有光 隆, 吳 志強: 弾性体と弾性円板の衝突解析(ゴルフクラブの形状最適設計へ向けて), 日本機械学会シンポジウム講演論文集, No.00-38 (2000).
- 9) 粉体工学会(編): 粉体シミュレーション入門, 産業図書 (1998).

(平成 15 年 4 月 12 日受付)

(平成 15 年 5 月 28 日採録)





堀井 宏祐 (正会員)

2002年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在、同志社大学大学院工学研究科博士研究員。並列計算、数値シミュレーション、進化的計算に関する研究に従事。博士(情報科学)。

る研究に従事。博士(情報科学)。



三木 光範 (正会員)

1974年大阪市立大学大学院博士課程修了。現在、同志社大学工学部知識工学科教授。進化的計算とその並列化および知的なシステムの設計に関する研究に従事。工学博士。IEEE, 日本機械学会等各会員。超並列計算研究会代表。

日本機械学会等各会員。超並列計算研究会代表。



小泉 孝之

1969年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、同志社大学工学部エネルギー機械工学科教授。モード解析、振動・騒音制御に関する研究に従事。工学博士。日本機械学会、自動車技術会等各会員。

学会、自動車技術会等各会員。



日高 重助

1972年同志社大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、同志社大学工学部物質化学工学科教授。粉体材料ならびにその生産プロセスの設計に関する研究に従事。工学博士。粉体工学会、化学工学会等各会員。

粉体工学会、化学工学会等各会員。



辻内 伸好

1982年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、同志社大学工学部機械システム工学科教授。振動制御、構造物の動特性同定に関する研究に従事。博士(工学)。日本機械学会、自動車技術会等各会員。

日本機械学会、自動車技術会等各会員。



折戸 啓太

2003年同志社大学大学院工学研究科修士課程修了。在学中、並列計算、数値シミュレーションに関する研究に従事。