

並列粒子要素法によるバンカーショット解析

堀井 宏祐[†], 小泉 孝之^{††}, 辻内 伸好^{††}
三木 光範^{††}, 日高 重助^{††}, 折戸 啓太[†]

[†] 同志社大学大学院工学研究科 ^{††} 同志社大学工学部

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。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[†], Takayuki KOIZUMI^{††}, Nobutaka TSUJIUCHI^{††}

Mitsunori MIKI^{††}, Jusuke HIDAKA^{††} and Keita ORITO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Doshisha University

^{††} Faculty of Engineering, Doshisha University

In this paper, a computational simulation model of the bunker shot is constructed by the Particle Element Method (PEM). The simulation model is composed of a club head, a golf ball and a large number of particles of sand. Analysing 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。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挙げられ、その重要性はますます高まってきているといえる。

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。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³⁾や、クラブヘッドとボールの超弾性解析をおこなった Hocknell らの研究¹⁾が挙げられる。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無い。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 (Particle Element Method, PEM) 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。PEM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。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

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なう場合、その流動挙動は個々の粒子の運動に基づいている

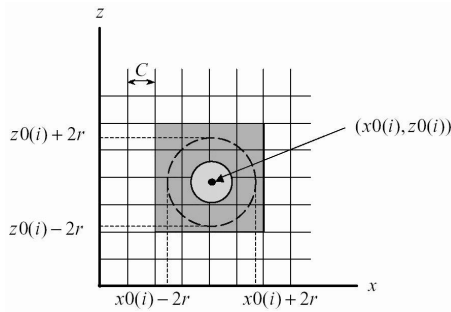


図 1: 計算領域のセル分割と接触判定範囲

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。各粒子の接触力を算出することによって、Newton の第二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。

粒子要素法では計算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ない、接触している場合、2 粒子間の距離から接触力が求められるが、接触判定を全ての粒子に対して行なうと、粒子数を N としたとき、 N^2 のオーダーで接触判定を行なうことになる。この問題を解決するために、図 1 に示すように、計算領域をセルで区切り、全ての粒子をセルに格納する。セルの幅 C は、1 つのセルに粒子の中心 $(x0(i), z0(i))$ が 1 つだけ入るように、次の条件に基づいて設定される。

$$C < \sqrt{2}r \quad (1)$$

このように設定すると、ある粒子 i に対して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。

2.2 粒子要素法の並列化

粒子要素法は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、単体 CPU の処理性能向上とともに、より大規模なモデルの計算が行なわれてきている²⁾。

本研究では 2 次元の計算領域を 1 次元の領域分割法によって分割し、並列化を行なう。領域分割

法は計算領域を 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。各 PE は担当する領域に存在する粒子に対して接触力の計算を行なうが、隣接する領域との境界付近に存在する粒子においては、隣接領域を担当する PE と粒子情報の通信を行なう必要がある。図 1 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であるため、隣接 PE と隣接計算領域のセル 2 列分の粒子情報をタイムステップ毎に交換する。セルを順に探索し、セル内に粒子が存在する場合に粒子間力が計算される。力の計算を行なう前に隣接 PE と境界における粒子の情報の通信を行なう。

3 バンカーショット解析モデルの構築

解析領域を幅 320mm × 高さ 150mm の 2 次元領域として、クラブヘッド、ボール、砂粒子によって、バンカーショット解析モデルを構築する。

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 2 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、4 つの制御点により定義されたベジェ曲線上の 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 65mm とし、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なう。

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 43mm、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。

バンカーの砂粒子間の相互作用には、フォークトモデルを適用する。直径 0.6mm の砂粒子を幅 320mm の解析領域内に深さ約 100mm となるように充填した。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ている。また、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

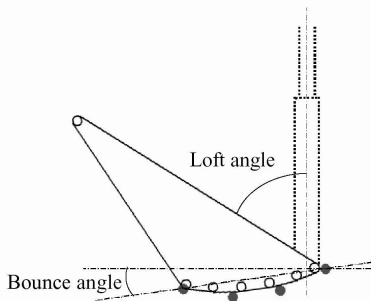


図 2: クラブヘッドの形状

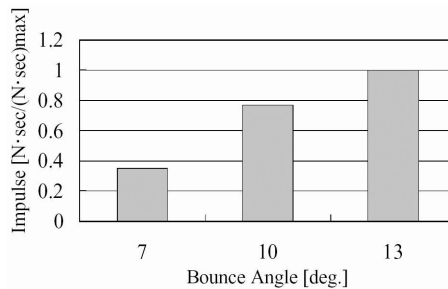


図 3: クラブヘッドに働く上方向の力積

領域が等しくなるように、砂粒子の直径を 1.9mm としている。

4 数値実験

解析モデルを並列計算機 IBM RS/6000 SP に実装、数値実験を行ない、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時のバンカーショットの挙動を検証した。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過す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 1.0×10^{-2} 秒、タイムステップは 1.0×10^{-8} 秒としている。

4.1.1 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 3 にクラブを振り抜くまでの間にクラブ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、一般的にバウンス角が大きい程クラブヘッドの抜けが良いと言われている。解析モデルにおいても、バウンス角が大きくなる程、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。

4.1.2 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,

表 1: ロフト角と入射位置がボール挙動に及ぼす影響

		Release angle [deg.]			
		Loft angle [deg.]			
		56	58	60	65
Distance	0.0	51.6	52.5	54.1	57.8
from	2.5	56.1	57.1	58.4	60.8
initial	5.0	58.3	59.0	60.3	63.2
position	7.5	60.2	60.1	61.5	63.9
[mm]	10.0	59.7	61.6	61.9	64.4
		Release velocity [m/s]			
		Loft angle [deg.]			
		56	58	60	65
Distance	0.0	16.0	15.9	13.8	13.6
from	2.5	12.4	11.9	11.5	9.8
initial	5.0	11.2	10.7	10.1	8.6
position	7.5	10.4	10.1	9.7	8.4
[mm]	10.0	10.1	9.5	9.3	8.2

7.5, 10.0mm 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 1 に示す。

ゴルファー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、通説通り

の挙動を再現できていることが確認された。

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。これは通説通りの挙動であるが、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、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わかる。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と言える。

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結果を。図4に示す。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なった。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なった。比較のために、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5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4PEまではほぼ理想的な速度向上を得ているが、4PEを越えると特に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、16PEで12倍以上の速度向上比が得られており、十分な性能であると言える。

5 おわりに

本論文では並列粒子要素法によってバ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

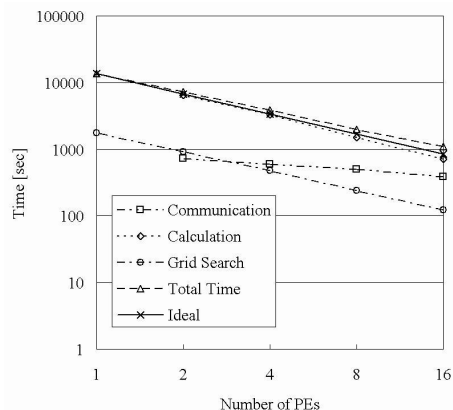


図4: 並列計算による処理時間の内訳

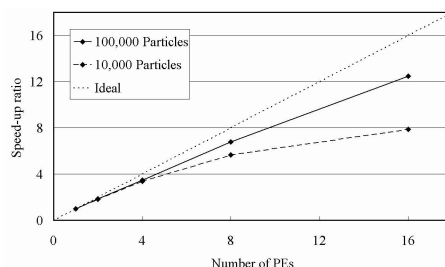


図5: 並列計算による速度向上比

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、バンカーショット解析モデルの有用性を示している。また、並列化効率について検証を行ない、十分な速度向上比を得ていることを確認した。

参考文献

- 1) Hocknell, A., Jones, R. and Rothberg, S.J., Computational and Experimental Analysis of the Golf Impact, *Science and Golf III*, Human Kinetics, 526-534 (1998).
- 2) Sawley, M. L. and Cleary, P. W., A Parallel Discrete Element Method for Industrial Granular Flow Simulations, *EPFL Supercomputing Review*, **11**, 23-29 (1999).
- 3) 中井, 曾我部, 有光, 呉, 弾性体と弾性円盤の衝突解析(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, **00-38** (2000).