

《小特集》

ゴルフ・ボールの衝突シミュレーション

宇治橋 貞 幸*・佐 藤 房 子*

ABSTRACT This article describes about recent topics with their backgrounds on the impact problem between club-heads and balls, and also about that the technique of computer simulation is thought as a powerful method to solve outstanding problems. It is shown what researches have been conducted in the past and what problems have been left unsolved. In the future the technique on computer simulations will be more and more important in order to create high-performance golf clubs by harmonising their specifications with the rules of sport.

1. まえがき

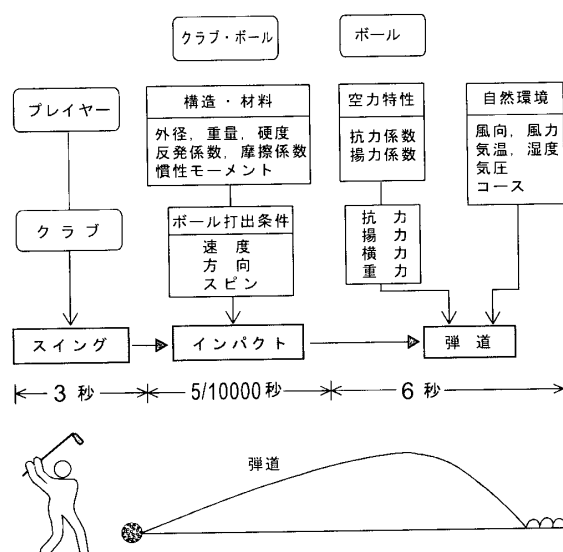
ゴルフのワンショットは、他の球技と同様にスイング・インパクト・フライトの3フェーズに分解でき、それぞれに寄与する因子が異なる(図1)。スイングのフェーズではプレイヤーとクラブ、インパクトのフェーズではクラブ・ヘッドとボール、フライトのフェーズではボールと空気がそれぞれ主に関わっている。すなわちプレイヤーの役割は、いかに正確なスイングをしてインパクトを迎えるかが全てであり、インパクトを迎えた時点ではもはや成すべき事は無いと言われている。後は、クラブの主にはヘッドとボールの性能が全てを支配し、フライト(弾道)に繋がる速度・スピン・角度の打ち出し条件を決定する。そこで、ゴルフにおけるインパクトのシミュレーションでは、クラブ・ヘッドとボールの相対衝突問題として扱われ、一般にはシャフトの存在は無視されている。なぜならば、インパクト時のボールがクラブ・ヘッドに接触している時間は1万分の5秒程度であり、この時間はクラブ・シャフトの力学特性やプレイヤーのグリップの具合がインパクトのパフォーマンスに関与するには、あまりに短過ぎるからである。ゴルフのボールは、他の球技と同様にその大きさ・質量・反発特性などの仕様が競技規則により厳格に規定されている。したがって、インパクトのシミュレーションは、主にクラブ・ヘッドの性能予測のために行われ、その結果はクラブの設計に生かされる機械工学的な問題である。特に全米ゴルフ

協会(USGA: United States Golf Association)が、クラブ・ヘッドの反発係数に上限を設ける規則改正を行った頃からヘッドの反発特性に関するシミュレーションが用具メーカーにとって重要な設計手法となり、また研究者の間でもホットな課題となってきた。

本稿では、ゴルフ・インパクトに関するシミュレーションの現状について解説し、ゴルフ・クラブの設計においてもシミュレーション技術の精度向上が重要な課題となっていることを述べる。

2. ボールとヘッドの衝突メカニズム

ゴルフにおけるインパクトとは、クラブをスイングしヘッドで静止しているボールを打撃する瞬間のことをいう。図2のとおり、クラブ・ヘッドにはロフト角

図1 飛びの支配要因²⁴⁾

Simulation of the Impact of Golf Balls with Club Heads. By
Sadayuki Ujihashi and Fusako Satoh (Graduate School of Information
Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology).

*東京工業大学大学院情報理工学研究科

がありボールは斜めに打撃されるため、斜め上方(仰角)に並進の運動が与えられるとともに、回転運動(バックスピン)が与えられる。ボールの速度は、打撃速度だけでなく、クラブとボールの反発特性にも大きく影響される。仰角とスピンは共にロフト角に大きく依存し、スピンは衝突面の性状にも大きく影響される。フェイス面がクラブ・ヘッドの進行方向と垂直でない場合は、ボールにはバックスピンに加えてサイド・スピンが生じる。これには、クラブ・シャフトのねじり特性およびクラブ・ヘッドの重心位置や慣性モーメント等と深いつながりがある。つまり、クラブとボールの材料と構造が打ち出し条件である仰角・速度・スピンを決定する。

インパクト終了後は、インパクトで与えられた打ち出し条件を初期条件とした弾道の問題となる。これに関与してくるのはボールの空力特性と風等の自然条件である。

クラブは、ドライバー・アイアン・パターの3種類に大きく分けられる。そのうち特にドライバーは、パーシモンという木材から軽くて強いチタン合金へと材料が変化することによって、中空構造へと変更される等、その形状や特性が大きく変化してきた。

ヘッドの中空構造化によってヘッドの体積と慣性モーメントが大幅に増大し、その結果としてスイートエリアが拡大するとともにヘッドの回転を抑制する効果が得られた。さらに、ヘッドの中空構造化すなわち薄肉構造化は、いわゆるフェイスのランポリン効果を生みだし、反発係数の増大にも繋がった。アイアンのヘッドに対してもドライバーで実現した「飛びの効果」を持たせるべく改良が行われている。

このような中で、「クラブの高性能化は、最近のツアー選手の身体能力向上と相まって、ゴルフをゴルフ

固有のプレー技術以外の要素によってその勝敗が決まるスポーツにし、ゴルフ本来の姿を奪ってしまう」との声が出るようになり、何らかの対策が必要であるとの空気が醸成されてきた。この傾向を危惧するUSGAは、クラブ・ヘッドの反発係数に上限を設ける規則改定(1999年)を行い、日本に直接影響を及ぼす組織であるR&A(Royal & Ancient Golf Club of St Andrews)も追隨の動きを示している。

ボールの反発特性には厳格な規格があるが、クラブに関しては、反発特性の具体的な制限はなく、「インパクト時のランポリン効果が無いもの」というあいまいな表現でしか記述されていなかった。最近の発表によると、USGAとR&Aは共同歩調をとり、2008年から「クラブ・ヘッドの反発係数を0.83以下とする」規則を設け、高反発なクラブ・ヘッドを認めないとしている。

このようにクラブ・ヘッドの反発係数に具体的な上限値が設定された結果、クラブの開発には、反発係数の見積を含めた精密な設計が求められるようになり、そのための手法としてコンピュータや実験によるシミュレーションの重要性がますます高まり、その高精度化が課題となっている。また、規則の範囲内でのクラブの高性能化も課題となっており、衝突メカニズム解明の試みも盛んに行われている。

3. ゴルフ・インパクトのシミュレーション

ここでは、ボールとクラブのインパクトのシミュレーションに関して行われてきた研究について紹介する。手法としては、実験による方法とコンピュータによる方法があり、コンピュータによる方法では、バネ・質点系力学モデルを用いる方法^{1)~13)}と有限要素法(FEM)を用いる方法^{14)~20)}とに大別される。

シミュレーションでは、第1にボールやクラブのモデル化が重要であり、第2にそのモデルを用いたシミュレーション手法が必要になる。モデル化技術では、さらにモデルの構築と材料特性の表現とに大別される技術が求められる。シミュレーション技術では、実験やコンピュータによる方法でそれぞれ固有の技術が必要となる。ボールは高分子材料やゴム等で作られた球体であり、ヘッドに対して斜めに衝突する。力学モデルでは、自由度・線形性等が問題となり、FEMでは要素サイズと対称性のバランスが問題となる。材料特性は、材料減衰やひずみ速度依存性等が問題となり、金属に比べると複雑であり簡単ではない。一方クラブでは、シャフトの材料が金属と繊維強化プラスチック

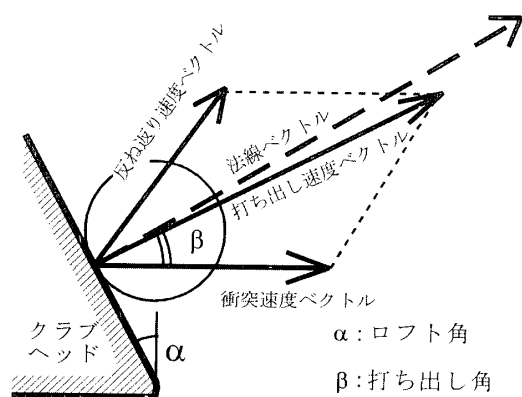


図2 打ち出し条件の発生メカニズム

(FRP)とで扱い方が大きく異なる。ヘッドに関しては、力学モデルではボールの場合と同様な扱いとなるが、FEMでは複雑な形状の実現度が大きな課題である。しかし、研究目的にあわせた様々な近似モデルの提案も行われ、シミュレーションに利用されている。たとえば、スピンについて触れない場合、垂直衝突に置き換えたモデル化が行われている。

垂直衝突でのボールの挙動については *Lieberman* らが非線形バネとダンパを含んだ3要素粘弾性モデルで表現した¹⁾。このボールモデルを用いて *Johnson* らは、衝突面であるフェイスの薄肉化が高反発をもたらしすを確認するために垂直衝突における衝突系全体のモデル化を行った²⁾。ボールが衝突する標的については、USGAで使用されている薄肉構造のクラブ・ヘッドを模擬したCavity-Back Targetの特性を線形バネでモデル化し、ボールモデルと標的モデルとを組み合わせることで衝突系全体をモデル化している。

同様に *Cochran* は垂直衝突における衝突系全体のモデル化を行っているが、図3のようにボールモデルをヘルツバネとそれと同じ性質を持った粘性要素との並列モデルで表現し、標的は線形バネとダンパの並列モデルで表現している³⁾。そして *Johnson* らの研究結果と同じようにフェイス面の薄肉化による反発係数の増加を確認している。さらに *Cochran* はバネとダンパの非線形特性を実験と比較することにより求め、ボールとヘッド間のインパクトにおける実際の反発係数とよく一致するようなモデルを考案している⁴⁾。

さらにボールとクラブ・ヘッドのインパクトは、岩壺ら⁵⁾や伊藤ら⁶⁾によって多自由度連成振動モデルでも表現されている。これに基づき岩壺らは、ボールとヘッドのメカニカル・インピーダンスの最小値が一致したとき(固有振動数の値が一致した場合に)、反発係数が最大になると報告している。さらにボールとヘッドをそれぞれm個およびn個のバネと質点で表したモデルを作成し、ボールとヘッドの固有振動数が反発係数に及ぼす影響を詳しく調査している。また伊藤らは、図4のように反発係数が衝突時のエネルギー散逸状況

を反映した値であることを指摘し、インパクト時のエネルギー散逸についての検討を行っている。

またスピンのような原理で発生するのかを調べるために、*Gobush* はボールを‘ten shell model’で構築している。これはタマネギのような構造をしていて、中心にある小さなコアと9つの層から成っている。そしてこれらをバネで連結することにより、ボールのねじり変形を表現することを試みている⁷⁾。

一方、有限要素法を用いたコンピュータ・シミュレーションでは、まずボールとクラブ・ヘッドとの衝突を扱った *Chou* らの研究が挙げられる。この研究では、図5のようにボールとヘッド間の斜め衝突を、粘性を有する2次元ボールと剛体との衝突とし、接触をクーロン摩擦で表現している。そして、ここから接線力・反発係数・スピン量などを調べ、インパクト時のエネルギー損失は主に弾性振動と粘性が原因であるとした¹⁴⁾。

ボール中心の研究としては、*Tavares* らのボールの構造についての研究や角田らのスピン発現機構についての研究が挙げられる。ゴルフ・ボールには、ブタジエン系ラバーの1ピースボールやそれをアイオノマー樹脂でカバーした2ピースボール、さらに3層以上で構成されているマルチピースボールなどいろいろなボールがある。*Tavares* らの研究では、2ピース構造とマルチピース構造の緩和せん断弾性率を考慮した粘弾性ボールモデルを構築し、様々なクラブによるショットをシミュレーションしている。そして、内側の層が固く外側の層が柔らかい構造とするとスピン性能が良くなるとし、マルチピースボールの利点を示した¹⁵⁾。一

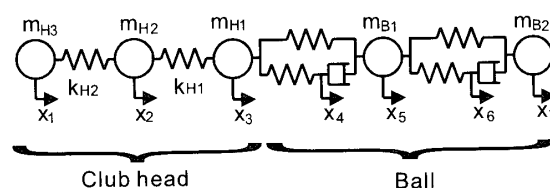


図4 ボールの2自由度非線形モデルとヘッドの2自由度線形モデル⁶⁾

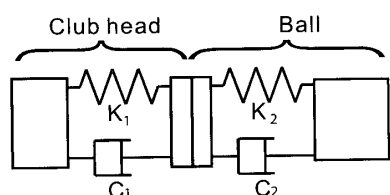


図3 クラブ・ヘッドとボールの衝突モデル³⁾

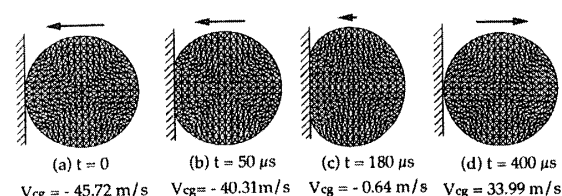


図5 ボールと剛体との衝突(2次元)¹⁴⁾

方、角田らのスピン発現機構の研究では、図6のように弾性体のボールモデルと剛体のヘッドモデルを用いてクーロン摩擦を仮定した斜め衝突のシミュレーションを行っている。そして、ボールに生じるスピン量と接触力の関係からインパクト中のボールの挙動について考察を行っている¹⁶⁾。

クラブ中心の研究としては、図7のように岩壺らによる慣性モーメントや固有振動数あるいは重心深度を様々に変化した線形弾性ヘッドモデルと線形弾性体のボールモデルとの衝突による解析があり、打ち出し条件に及ぼす影響について調べている¹⁷⁾。また宇治橋らは、図8のように薄肉構造のクラブ・ヘッドを模擬した線形弾性体の板状標的と3要素線形粘弾性体のボールモデルを構築し、斜め衝突シミュレーションを行っている。そして標的の衝突面厚さと反発係数の関係について調査し、標的の衝突面が薄くなるほど反発係数が大きくなるメカニズムを示している¹⁸⁾。

実験による方法では、ボールを様々な標的に衝突させ、その時の衝突荷重と変形の計測からボールあるいは標的の材料特性を求めたり、力学モデルを提案する研究やコンピュータ・シミュレーションによる結果の精度を検証する試みなどが行われている^{22,23)}。

これらの様々な研究成果の積み重ねによりシミュレーションの精度向上が期待される。

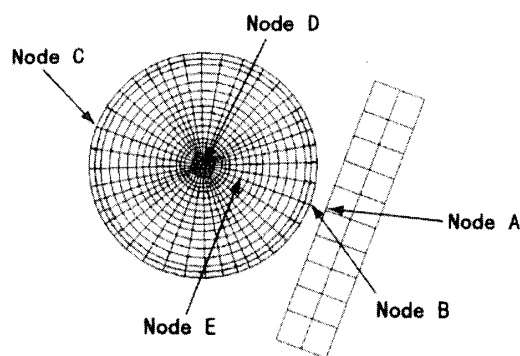


図6 ボールとヘッドの衝突¹⁶⁾

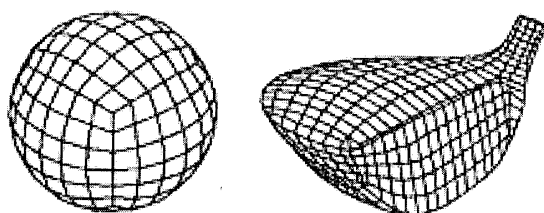


図7 2ピースボールとヘッドのFEモデル¹⁷⁾

4. 今後の展望

ゴルフ・インパクトにおけるシミュレーションの目的は、工業的には一般の物作りと同様に新しい製品の開発設計におけるコスト削減にあり、学術的には現実に見ることの出来ない現象を提示して見せることにあり、手法としては、コンピュータの今後の益々の進歩を考えれば、FEMに基づいたコンピュータ・シミュレーションがより支配的になると考えられる。メーカーとしては、性能に上限が設定されることは、「飛び」を売り物にしてきたスタンスの変更を余儀なくされる訳で大問題である。そこで、上限値のぎりぎりを狙いながら規則には記述されていないその他の性能向上を目指すことになるであろう。薄肉構造クラブ・ヘッドが高反発を生み出すメカニズムがより明確になれば、材料強度を度外視して反発係数がどこまで高められるのかといった学術的な興味も加わってくる。本来、FEM等によるコンピュータ・シミュレーションでは、相対的比較は得意とする所であるが、絶対値を追求するのは非常に困難である。ここに、最近のゴルフ・インパクトへのコンピュータ・シミュレーションの適用に大きな困難が付きまとっている。

シミュレーションの精度向上を目指すと、まずボールや標的の有限要素の要素分割から問題が出てくる。たとえば、ボールという球体の扱い難さが挙げられる。対称性の確保と要素形状やサイズの均一化とは両立不可能とも思われる。また、クラブ・ヘッドの薄肉構造にしても忠実にモデル化することは、要素のタイプと形状や大きさのマッチング等により多くの問題が伴う。何れにせよ、どこかで妥協しなければ結果は得られない。要素分割よりさらに重要な問題は、材料特性の同定である。特にボールの材料は、高分子材料であるため粘弾性的性質やひずみ速度依存性を有するなど外力環境に影響される性質を強く持っており、その詳細を記述することは著しく困難である。

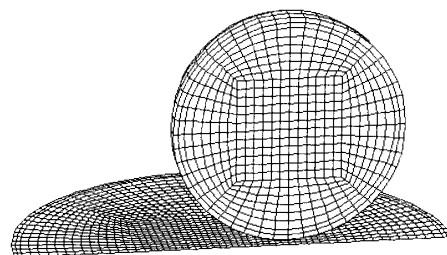


図8 薄板標的とボールとの斜め衝突

コンピュータ・シミュレーションによるゴルフ・インパクトの解析には、多くの期待が寄せられているが、結果の精度を上げようとすると、容易に乗り越えられない壁が次々と現れてくる。学術的には、後味の良くない結果でも、工業的にはコンピュータ・シミュレーション技術はCAEの中心として無くてはならない手法である。今後の方向としては、解析精度の向上という一直線な追求ではなく、FEMにおける要素の選択から大きさや形状など総合的なパフォーマンスを向上させる技術が必要と思われる。それには、高度なエンジニアリング・センスが要求されるが、それを養うにはコンピュータ・シミュレーション技術に精通するだけでなく、地味で基礎的な理論力学をしっかりと身に付ける事が必要であることを痛感している。

参 考 文 献

- 1) Lieberman,B.B.: An Analytical Model for Ball-Barrier Impact, Science and Golf II, 309/314 (1994)
- 2) Johnson,S.H. and Hubbell,J.E.: Golf Ball Rebound Enhancement, Science and Golf III, 493/499 (1998)
- 3) Cochran,A.J.: Club Face Flexibility and Coefficient of Restitution, Science and Golf III, 486/492 (1998)
- 4) Cochran,A.J.: Development and Use of One Dimensional Model of a Golf Ball, Science and Golf IV, 461/473 (2002)
- 5) 岩壺卓三, 河村庄造, 古市一志, 山口哲男, 大貫正秀: 高反発特性を有するゴルフ・クラブ・ヘッドの設計に関する研究, 日本機械学会講演論文集 No00-38, 100/104 (2000)
- 6) 伊藤幸司, 佐藤文宣, 金子靖仙: ゴルフ・ボールの反発特性に及ぼすクラブ・ヘッドの動特性の影響, 日本機械学会講演論文集 No00-38, 76/80 (2000)
- 7) Gobush,W.: Spin and the Inner Workings of a Golf Ball, GOLF The Scientific Way, 141/145 (1994)
- 8) Johnson,S.H., Lieberman, B.B.: An Analytical Model for Ball-Barrier Impact, Science and Golf II, 315/320 (1994)
- 9) Pringle,M.M.: Characteristic Spring Constants for Golf Club Heads, Science and Golf IV, 402/409 (2002)
- 10) Ekstrom,E.A.: Experimental Determination of Golf Ball Coefficient of Sliding Friction, Science and Golf III, 510/518 (1998)
- 11) Johnson,S.H. and Ekstrom,E.A.: Experimental Study of Golf Ball Oblique Impact, Science and Golf III, 519/525 (1998)
- 12) 武茂樹, 土井雅博, 木村真人: ゴルフクラブの打球面素材の評価, 日本機械学会講演論文集 No930-69, 8/11 (1993)
- 13) 本江哲行, 佐藤秀紀, 岩田佳雄, 小松崎俊彦: 滑りと回転を考慮したゴルフボールの衝突シミュレーション, 日本機械学会講演論文集 No02-9, (2002)
- 14) Chou,P.C., Liang,D., Yang,J. and Gobush,W.: Contact forces, coefficient of restitution, and spin rate of golf ball impact, Science and Golf II, 296/301 (1994)
- 15) Tavares,G., Sullivan,M., and Nesbitt,D.: Use of Finite Element Analysis in Design of Multilayer Golf Balls, Science and Golf III, 473/480 (1998)
- 16) 角田昌也, 山口哲男, 垣内久嗣, 杉沢利文: ゴルフのインパクトにおけるスピン発現機構の解析, 日本機械学会講演論文集 No98-8 I, 125/128 (1998)
- 17) Iwatubo,T., Kawamura,S., Furuichi,K and Yamaguchi,T.: Influence of Characteristics of Golf Club Head on Release Velocity and Spin Velocity of Golf Ball after Impact, Science and Golf IV, 410/425 (2002)
- 18) Ujihashi,S., Konishi,T. and Sato,F.: Computer Simulations of the Oblique Impact of Golf Balls with Circular Plates of Various Thickness, The Engineering of Sport 4, 136/143 (2002)
- 19) Hocknell,A., Jones,R. and Rothberg,S.J.: Computational and Experimental Analysis of the Golf Impact, Science and Golf III, 526/534 (1998)
- 20) Naruo,T., Fujikawa,Y., Oomori,K. and F. Sato,F.: Optimization of Golf Club Face for Enhancement of Coefficient of Restitution, Science and Golf IV, 426/437 (2002)
- 21) Nakai,K., Wu,Z., Sogabe,Y. and Arimitsu,Y.: Shape optimization of golf club heads, The Engineering of Sport 4, edited by S. Ujihashi & S. Haake, Blackwell Science, 369/375 (2002)
- 22) 黒川知明, 浦部大介: ゴルフ・ボールのインパクト特性(第2報)ーボールの動的荷重-変位関係ー, 日本機械学会講演論文集 No00-38, 86/90 (2000)
- 23) Ujihashi,S.: Measurement of Dynamic Characteristics of Golf Balls and Identification of Their Mechanical Models, Science and Golf II, 302/308 (1994)
- 24) Cochran,A.J.: Science, Equipment Development and Standards, Science and Golf, 177/186 (1990)