HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Numerical Investigation of the Aerodynamics of a Golf Ball [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	李, 景
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12376号
Issue Date	2016-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/62486
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Jing_Li_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　李 景

審査担当者　主　査　教　授　大島 伸行
副　査　教　授　渡部 正夫
副　査　教　授　村井 祐一
副　査　准教授　寺島 洋史
副　査　教　授　坪倉 誠 （神戸大学システム情報学研究科）

学位論文題名

Numerical Investigation of the Aerodynamics of a Golf Ball
(ゴルフボール周り流れの数値解析)

ゴルフボールの空気力学は、我々の身近なスポーツに潜む科学、特に基礎流体力学的な観点から注目されてきた。ゴルフボールの空力を左右する重要な要因としては、ディンプルによるボール表面の粗度効果と、ボールの自転効果が挙げられる。前者の粗面効果については、レイノルズ数の増加に伴い急激に空気抵抗が減少するドラッグクライシス現象の促進について議論され、これはボールの飛距離と大きな関係がある。一方、後者の回転効果についてはマグヌス効果とよばれるボールに作用する揚力が議論され、これはボールの飛翔軌跡に大きな影響を与えると考えられる。しかしながら、ゴルフボール固有のディンプル形状による空気抵抗の低減や、特定のレイノルズ数で発生すると言われている理論と異なる方向に揚力が発生する負のマグヌス効果、さらには回転・非回転時の揚力の時間変動については物理的に未知の部分が多々あり、ゴルフボール空力については十分理解されているとは言えない。従って本研究では、このような流体力学的に未知の現象に対して、スパコンを活用した大規模数値解析を実現することでそのメカニズム解明を行い、ゴルフボールの空力について包括的な理解を進めることを目的とする。

第 1 章では、ゴルフボールや滑面球の空力に関する過去に得られた知見や研究背景を総括し、本研究の動機と目的を述べている。

第 2 章では、本研究で用いたラージ・エディー・シミュレーション (LES) と数値解析手法について述べている。本研究で対象とするゴルフボールと滑面球の幾何学的特徴を示した後、球表面に作成した非構造格子の詳細、さらには計算領域とその境界条件の設定やゴルフボール回転運動の再現方法について示している。

第 3 章では、非回転時の滑面球とゴルフボール空力について、解析で得られた結果を示し、議論している。まず、滑面球に対してより低いレイノルズ数で発生するドラッグクライシス現象を数値解析で再現し、その結果を過去の実験データ等と比較することで、本研究で用いた数値解析手法の妥当性を示している。その後、ゴルフボール表面のディンプル内部で発生する流体力学的不安定性現象を調べることで、ディンプルによる空気抵抗低減効果のメカニズムを議論している。また、球の飛翔軌跡に影響を与える主流直交方向に作用する空気力 (横力) とその時間変化に着目し、球後流の流れ構造との関係を議論している。空気抵抗低減前の亜臨界状態では、ゴルフボールと滑面球に大きな違いは見られず、球表面から大規模な剥離と、それに伴い横力は大きさと方向共に大きく

時間変動することや、その無次元周波数は両者でほぼ同じとなることを明らかにしている。臨界状態では、亜臨界状態に対して、両モデルとも横力の変動振幅はさらに増加する。これに対して超臨界状態では、主流に対してより強い非対称性をもった後流構造が生じ、上記の渦放出周波数に対してより長い周期で横力がゼロとならない状態が観察された。また、この時の後流は大規模ならせん構造となっており、横力方向は長周期で回転することがわかった。一方、横力の変動振幅については、ゴルフボールは滑面球に対してより小さくなっていることが明らかとなった。

第 4 章では、回転時の滑面球とゴルフボール空力について、解析で得られた結果を示し、議論している。まず両モデルに対して、超臨界・亜臨界状態でマグヌス効果による揚力が発生すると共に、臨界レイノルズ数近傍で負のマグヌス効果が発生することを定量的に示し、両モデルの違いについて議論している。超臨界・亜臨界状態では、球回転と主流が同じ上面側と逆になる下面側に対して、両モデルでそれぞれ類似の物理現象が発生していることを示している。これに対して臨界状態では、主流に対する回転速度を考慮した球表面の局所レイノルズ数の効果として、主流と回転方向が一致する上面では局所レイノルズ数が減少することから境界層は層流状態となる一方、主流と回転方向が逆となる下面ではレイノルズ数が増加する結果、層流から乱流状態への遷移が促進される。この結果、上面に対して下面では境界層剥離点がより下流側となり、上面から下面に向かう負のマグヌス力が発生するとしている。横力の時間変動と後流構造の関係については、両モデルとも亜臨界状態の横力は、非回転時に対して回転時はより規則的となり、揚力方向の変動が直交する方向に対してより支配的となる。臨界状態では両モデルに差異が観察され、回転ゴルフボールの横力変動は非回転時と比較してより小さくなる一方、滑面球は特に揚力方向に大きな変動が発生することを示している。これに対して超臨界状態では両モデル共、非回転時と比較して横力変動は小さく抑えられるとしている。

第 5 章では、以上の結果を総括している。

以上のように本論文では、ブラフボディ形状の代表である球の空力について、流体力学的な表面粗度効果と物体回転効果が複合的に作用するゴルフボール空力特性を、非定常乱流シミュレーション技術を用いて詳細に解析し、その流れメカニズムとの関係を明らかにしている。この結果は、ゴルフボールに代表される飛翔ブラフボディの空力設計のみならず基礎流体力学にも重要な知見を与えており、基礎・応用の両面から機械工学の発展に寄与するところ大である。よって著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。