

# スキージャンプ・テイクオフ動作の空気力学的解析

## 学位論文内容の要旨

スキージャンプ（以下、ジャンプ）はスキー滑降から踏み切って滑空飛行し、飛距離と飛型を競うスポーツである。試技の中で踏み切り時の姿勢変化（以下、テイクオフ動作）は飛距離に寄与する重要な要素と考えられており、ジャンパーは速度 20m/s を超える移動中に、かがみ込みの助走姿勢から瞬間的に身体を前方に伸展させて、飛行姿勢へ移行する。動作中はその空気力学的効果が大きく変化することから、この動作の空気力学的解析は重要課題である。しかし、動作が離床時の瞬間的な姿勢変化であることから解析には困難を伴い、未だ最適動作とその根拠は報告されていない。従って、動作の成否の判断は多く選手・指導者の主観的な感覚に依る。そのため最適動作に諸説が生まれ、動作の評価基準も未統一である。

本研究では、テイクオフ動作の客観的評価指標の必要性から、ジャンパー周辺の気流解析および空気力計測を行い、テイクオフ動作の空気力学的特徴を明らかにすることを目的とした。解析では、特に体幹迎角（体幹の長軸と気流方向とのなす角）に着目し、動作に伴う体幹迎角の増加と気流状態の変化およびその空気力学的効果を検討した。その結果、体幹迎角増大時に周辺気流に剥離や偏向および渦流れが観察され、空気力学的に不利になることを明らかにした。また気流解析結果から、テイクオフ動作の新たな評価指標を提案した。更に気流解析の実ジャンプ応用より、提案指標と飛距離の相関関係を示し、その有効性を実証した。これらの結果、飛距離増加に寄与する空気力学的特徴が明らかとなり、テイクオフ動作の客観的評価指標が得られた。

本論文、全 8 章の章別の概要を以下に述べる。

第 1 章は、ジャンプ・テイクオフ動作の空気力学的解析の重要性について概説し、本研究の目的と本論文の構成について記した。

第 2 章では、ジャンプ競技の概要について述べた。また、ジャンパーの競技技術の変遷およびジャンプに関するこれまでの研究を整理した。そして、これらを踏まえ、本研究の位置付けを明確にした。

第 3 章では、テイクオフ動作について、飛距離に寄与する運動学的特徴の抽出を試み、数値解析、統計解析および画像解析を行った。ここでは、助走速度と姿勢変化を解析対象とした。まず、助走速度については、ジャンパーの運動方程式をもとに飛行軌跡を数値解析し、飛距離に影響を及ぼすことを示した。しかし、過去の公式競技記録の統計解析から

助走速度と飛距離の相関関係は認められず、助走速度の他に飛距離に寄与するジャンプ技術の存在を示唆した。次に、姿勢変化の解析では、競技中のテイクオフ動作について画像解析を行い、高成績選手群の動作の特徴を抽出した。この解析から2つの特徴、つまり、速い身体伸展速度と低い体幹迎角を見出した。このうち、本論文では空気力学的効果に着目し、体幹迎角について解析することとした。

第4章では、風洞実験で人体模型（1/10スケール）を用い、注入流脈法によって気流可視化を試みた。模型の体幹迎角を変化させ、後方流に及ぼす影響を検討した。また、気流可視化実験に加えて、模型が受ける空気力（揚力・抗力）を計測し、気流状態と空気力の関係を評価した。

第5章では、等身大人体模型を用いた風洞実験で、身体近傍および周辺気流の定量的解析を行った。身体近傍の気流解析には表面タフト法を適用し、タフトの挙動から気流方向や乱れの程度を解析した。また、体幹背面上方の風速分布計測を行い、更に第4章と同様の空気力計測を加えて、抗力増大や揚力低下（失速）の原因となる気流状態を探った。

第4、5章では人体模型を用い、固定姿勢について気流解析を行った。その結果、体幹迎角の増大は身体近傍の気流状態を変化させ（剥離、気流偏向）、同時に渦（剥離渦、後ひき渦）を形成させることを示した。更に、空気力計測からこれらの渦流れがジャンパーにとって空気力学的に不利であることが示された。以上から、体幹迎角、気流状態および空気力の3者の相互関係を明らかにした。本論文では、体幹背面部近傍の気流偏向の程度を示す指標値として、アウトフロー偏向角を新たに提案した。アウトフロー偏向角と空気力の対応関係を示し、この指標によるテイクオフ動作の評価を提案した。

第6章では、風洞内で実ジャンパーにテイクオフ模擬動作を課し、動作中における気流状態の変化過程を解析した。気流解析には表面タフト法を適用した。また床反力計測からジャンパーが受ける空気力を算出した。この結果から、動作中においても体幹迎角の増加が体幹背面の気流状態およびジャンパーが受ける空気力に大きく影響を及ぼすことを示した。

第7章では、気流解析の実ジャンプ応用を試みた。解析には第6章と同様に表面タフト法を適用し、テイクオフ動作中の気流状態の変化過程を解析した。その結果、体幹背面部の近傍気流に気流偏向（アウトフロー）が観察された。更に、第5章で提案したアウトフロー偏向角と飛距離との間に相関関係を認め、気流解析によって実ジャンプ・テイクオフ動作を評価できることを示した。

第8章は本論文のまとめである。本研究で新しく得られた知見を総括した。

以上、気流解析をとおり、体幹迎角の重要性、特に迎角約30deg.超において気流状態が大きく変化し空気力学的に不利になることを示した。またテイクオフ動作の評価指標として、実ジャンプ計測可能なアウトフロー偏向角を新たに提案し、その有効性を実証した。ここで得られた知見は今後、テイクオフ動作の最適化および指導に有用と考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 清 水 孝 一  
副 査 教 授 狩 野 猛  
副 査 教 授 三田村 好 矩  
副 査 助 教 授 川 初 清 典

## 学 位 論 文 題 名

### スキージャンプ・テイクオフ動作の空気力学的解析

スキージャンプ（以下、ジャンプ）・テイクオフ動作は助走のかがみ込み姿勢からフライト姿勢へ移行する動作であり、選手は速度 20m/s を超える移動中に身体を前方へ瞬間的に伸展させる。動作に伴いジャンパーが受ける空気力とその変化は、飛距離に多大な影響を及ぼす要素として、選手、指導者および研究者によって注目されている。しかし高速移動中における離床を伴う瞬間的な姿勢変化の故に、この動作の空気力学的特性の解析には困難が伴い、客観的解析は進んでいない。従って、動作の成否の判断は選手と指導者の主観や経験によることが多く、最適動作について諸説が交錯し、評価基準も未統一である。

これに対し、著者はテイクオフ動作の空気力学的解析を競技力向上のための重要課題と考え、テイクオフ動作中におけるジャンパー周辺の気流状態を解析し、その空気力学的効果を明らかにした。またその結果から、テイクオフ動作を評価できる空気力学的な指標値を提示した。

本論文ではまず、飛距離に寄与する因子の抽出を行った。助走速度と姿勢変化に着目し、数値解析、統計解析および動作解析から成績に有利な条件を絞り込んだ。その中で重要因子として体幹迎角（体幹の長軸と気流方向との成す角）に着目し、風洞実験により体幹迎角の増加に伴うジャンパー周辺の気流状態の変化を解析した。実験では、身体近傍および周辺の気流可視化に加え、ジャンパーが受ける空気力（揚力・抗力）の計測を行い、体幹迎角、気流状態および空気力の3者の関係を明らかにした。更に、気流解析の実ジャンプ応用を試み、気流状態と飛距離の相関関係を示した。

本論文の主要な成果は以下の3項に要約される。

- (1) 助走速度と姿勢変化を解析対象として、飛距離に寄与するテイクオフ動作の運動学的特徴を抽出した。助走速度に関しては、ジャンパー運動方程式の数値解析と公式記録の統計解析を行い、数値解析においては助走速度が飛距離に寄与することを示した。しかし、公式記録からは助走速度と飛距離に相関関係は認められ

なかった。これらの結果から、助走速度以外に飛距離に大きく寄与するジャンプの技術力が存在し、それによって飛距離が変動すると考えられた。次に、競技中のテイクオフ動作を画像解析し、高成績選手の動作特徴として、伸展動作が速いことと体幹迎角が低いことの2点を抽出した。抽出因子から、テイクオフ動作では空気力学的に有利な飛行姿勢を短時間に形作ることが望ましいと判断された。

- (2) 人体模型を用いた風洞実験において、体幹迎角をパラメータとして気流可視化および空気力計測を行い、気流状態と空気力学的効果の相互関係を明らかにした。気流可視化法には注入流脈法と表面タフト法を用い、これに風速分布計測を加えて、身体周辺気流を解析した。その結果、体幹迎角増大時に体幹背面部の近傍気流に剥離と偏向を観察し、模型後方では渦流れ（剥離渦、後ひき渦）が形成されることを見出した。空気力計測から、これらの気流現象が揚力低下や抗力増加と対応関係にあることを示し、上記渦流れが圧力抗力・誘導抗力を誘起させ、空気力学的に不利になることを明らかにした。
- (3) 実ジャンパーを被験者として風洞実験および実ジャンプ計測を行い、テイクオフ動作中の気流状態の変化過程を解析した。その結果に基づきテイクオフ動作の評価指標を新たに提示した。風洞実験より、動作中のジャンパー周辺の気流状態に対し、体幹迎角の影響が大きいことが示された。実ジャンプ計測では空気力と対応関係が認められた体幹背面部の気流偏向を定量化し、動作評価の指標値とした。この指標値と飛距離の間には比較的高い負の相関関係が認められ、ジャンパー近傍の気流状態の変化が飛距離に不利になることを明らかにした。この解析結果より気流解析がジャンプ動作の評価に有効であることが実証された。

これを要するに、著者は従来困難とされてきたスキージャンプ・テイクオフ動作の客観的解析に対して、工学的手法を適用しその空気力学的特性を解明した。さらに動作の客観的評価に関して、従来の主観的で曖昧な基準に代わる空気力学的な指標値を提示し、動作最適化および競技力向上に貢献する成果を得た。これはスキージャンプの運動計測に新たな方法論を提供するものであり、スポーツ科学およびスポーツバイオメカニクスの進歩に寄与するところ大なるものがある。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あるものと認める。