

# スキージャンプ テイクオフ動作の空力解析フレームワークの構築と

## 実競技への適用

### Aerodynamics simulation framework for Ski-jumping take-off and its application to various jumpers

- 梶本 裕雅,神戸大,〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1,Email:h-kajimoto@stu.kobe-u.ac.jp
- 小山 峻平,神戸大,〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1,Email:koyama\_snpi@stu.kobe-u.ac.jp
- Rahul Bale,理研,〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26, Email:rahul.bale@riken.jp
- 山本 敬三,北翔大,〒069-0833 北海道江別市文京台 23 番地, Email:kyamamoto@hokusho-u.ac.jp
- 坪倉 誠,神戸大・理研,〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, Email:tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp
- Hiromasa Kajimoto, Kobe Univ., 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501
- Shunpei Koyama, Kobe Univ., 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501
- Rahul Bale, RIKEN, 7-1-26 Minatojima-minami-machi, Chuo-ku, Kobe, Hyogo, 650-0047
- Keizo Yamamoto, Hokusho Univ., 23, Bunkyo-dai, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501
- Makoto Tsubokura Kobe Univ.・RIKEN, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501

In this study focuses on the development of a simulation framework for predicting aerodynamic characteristics of competitive ski-jump. This framework satisfies the following requirements: be quick enough to evaluate between trials, be able to consider the jumper's specific body shape, avoid the psychological/physical burden on the jumper, and be available at any time regardless of practice or games. Aerodynamic simulations of multiple athletes were carried out using this framework. Based on the study of relationship between the trunk angle-of-attack and lift-drag ratio, different trends were found between well-performing athletes and poorly-performing athletes. The numerical simulations were carried out using CUBE, a hierarchical Cartesian mesh based finite-volume fluid flow solver. The geometry of the athlete were modeled using a constraint based immersed boundary method.

#### 1. 序論

スキージャンプ競技は飛距離・飛型を競う、ノルディックスキー競技の1つである。スキージャンプ競技では、一連の動作を助走、テイクオフ、飛行、着地の4つに大きく分類することができる(Fig. 1)。これらの動作のうち、テイクオフ動作は助走で得たスピードを飛行時の揚力へと変換するための重要な動作である。しかし、テイクオフ動作は0.2-0.3sという短い時間に、しゃがみこんだ助走姿勢から直立前傾姿勢の飛行姿勢へと大きく姿勢を変化させ、適切な飛行姿勢を形づくる必要があるため技術的に難しい動作と考えられている。(1)

テイクオフ動作はコーチングにおいても非常に重要な動作であるが、その良否の判定は指導者の主観に頼る部分が多く、指導者の経験によって指導内容が左右されてしまう。そのため、客観的な指導材料が必要である。そこで、本研究の目的は数値流体解析(Computational Fluid Dynamics, CFD)を用いて、科学的な観点からテイクオフ動作を空気力学的に評価するためのフレームワークを構築し、その後、構築したフレームワークを実際の競技環境に適用し、複数の選手のテイクオフ動作から成績と空気力の関係性を調べることにした。

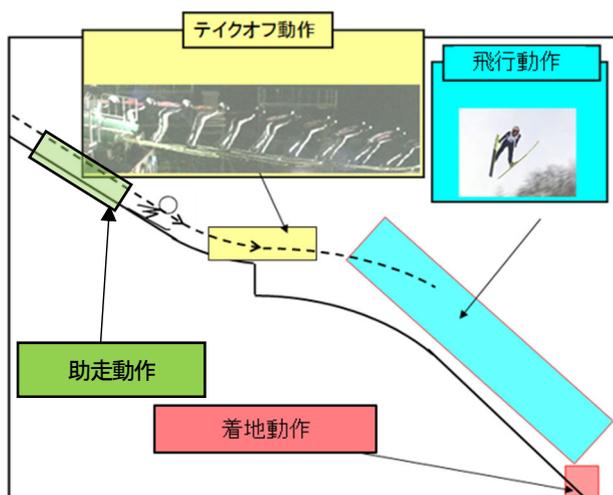


Fig. 1 Ski-jumping motion

#### 2. 流体解析フレームワーク概要

本章では、構築したフレームワークの概要について述べる。このフレームワークでは以下の点に留意する。

- ① 迅速な解析を行えること
- ② 選手個人の体型を考慮した解析を行えること
- ③ 心理的・身体的な負担を回避していること
- ④ 練習・試合を問わず利用可能であること

上記の点に留意して構築したフレームワークを次に示す(Fig. 2)。



Fig. 2 Overview of Framework

このフレームワークでは、ジャンパーの身体表面形状を事前にレーザスキャンしておくことで上記②を、モーションキャプチャにセンサではなくビデオカメラを用いることで上記③、④を、流体シミュレーションの手法を工夫することで上記①を満たすことができるように構築されている。

### 3. 解析対象及びテイクオフモーションの取得方法

#### 3.1. 解析対象

本研究では被験者として2018年8月5日に行われた「宮の森チャレンジカップ2018 サマージャンプ大会」に参加し、2本目の試技を行った選手のうち、ランダムに15人の選手を抽出した。各選手の飛行距離を以下のTable 1に示す。また、本研究では飛行距離と空気力の関係を調べるために、15人の選手を飛行距離が長い選手から順に5人ずつLONG, MIDDLE, SHORTの3つのグループに分けた。グループ分けもTable 1に合わせて示す。

Table 1 The results by analysis target

Sub. No.	Flying distance[m]	Group
1	94.5	LONG
2	92	LONG
3	91	LONG
4	91	LONG
5	88.5	LONG
6	86.5	MIDDLE
7	86	MIDDLE
8	84.5	MIDDLE
9	84	MIDDLE
10	83.5	MIDDLE
11	81	SHORT
12	79	SHORT
13	68.5	SHORT
14	66.0	SHORT
15	63.5	SHORT
Average	82.63	

これらの選手に対し、以下のFig. 3に示すように、カンテ(踏切台)の進行方向の右側から、ビデオカメラを用いて動作の撮影を行った。Fig. 4に撮影した例を示す。なお、この撮影時のサンプリング周波数は200Hzである。

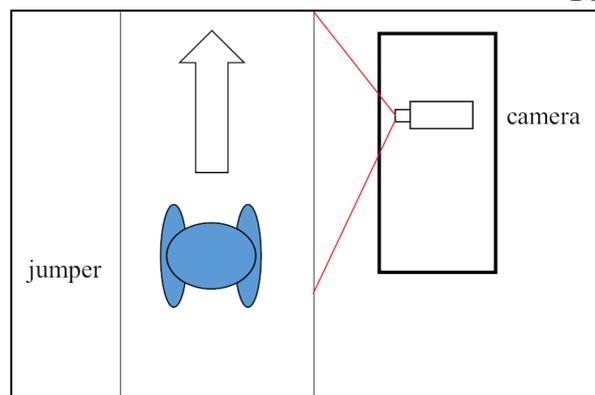


Fig. 3 The location of recording



Fig. 4 The example of video

#### 3.2. テイクオフモーションの動作パラメータ抽出

本節では前節で記したビデオ映像を元に、テイクオフモーションの動作パラメータを抽出する手法について述べる。

まず、選手に頭頂部、頸部、肩関節、肘関節、手関節、股関節、膝関節、足関節、前足部の9つの節点を設け、Fig. 5に示すように節点間に体節を設ける。その後、各節点の座標を映像より時系列ごとに算出する。

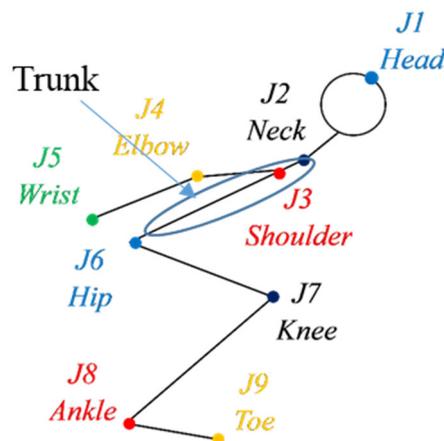


Fig. 5 Captured joint

ここで、以降の議論に用いる体幹迎角(t-AOA)について述べる。一般的に迎角は、流体中の物体が流れに対してどれだけ傾いているかという角度を表す。本研究では、頸部(J2)と股関節(J6)との間の体節を体幹(Trunk)と定義し、体幹と流れが成す角を体幹迎角と

する。本研究では、テイクオフ動作の間、ジャンパーの進行方向がスキー板の向きと並行であることに着目し、体幹とスキー板とが成す角を体幹迎角と定義する。次の Fig.6 に例として、テイクオフ動作中の Jumper1 の体幹迎角の時系列変化図を示す。

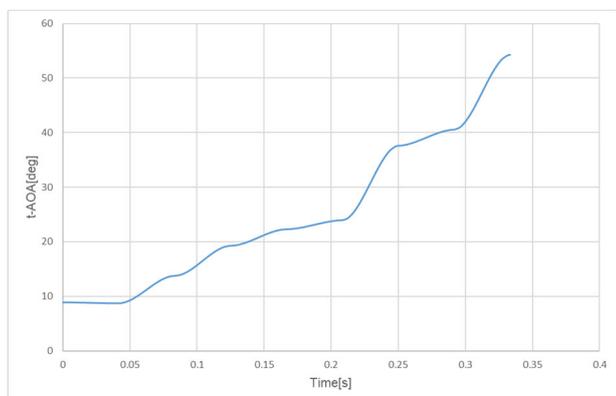


Fig. 6 Time history of t-AOA

### 3.3. 解析モデル(人体形状)の作成

前節で取得したデータを用いて CFD に用いる解析モデルを作成した。解析モデルの作成に用いた基本の表面データ(以下、基本モデル)を Fig. 7 に示す。また、基本モデルに節点の時系列データをあてはめ、作成した解析モデルの一例を Fig. 8 に示す。

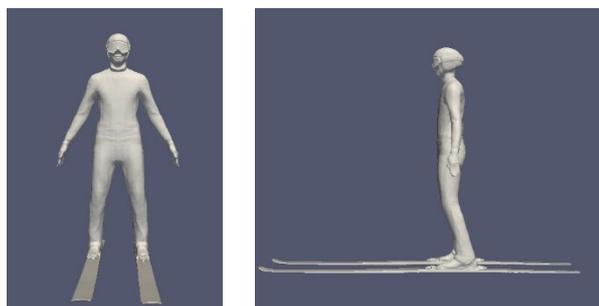


Fig. 7 Basic model

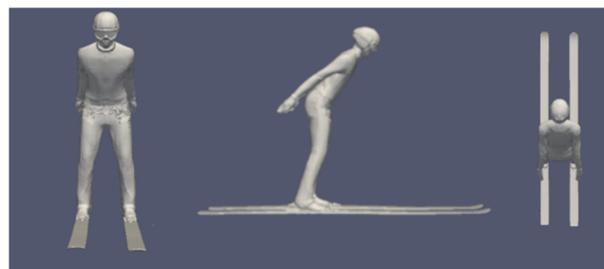


Fig. 8 Postures of jumper (0s, 0.24s, 0.33s)

## 4. 計算手法

### 4.1. 基礎方程式

本研究で行った CFD で用いた基礎方程式を以下に示す。3次元空間における連続の式(1)と Navier-Stokes 方程式(2)である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u}(x, t) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}(x, t)}{\partial t} + \mathbf{u}(x, t) \cdot \nabla \mathbf{u}(x, t) \right) = -\nabla p(x, t) + \nabla \cdot [2\mu \mathbf{D}(\mathbf{u}(x, t))] + f_{IB}(x, t) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$  はセルを中心として定義された速度ベクトル、 $t$  は時間、 $p$  は圧力、 $\rho$  は密度 (一定)、 $\mu$  は粘性係数 (一定)、 $f_{IB}$  は埋め込み境界法<sup>2)</sup>による外力項を表し、次の式(3)で算出される。

$$f_{IB}(\mathbf{x}, t) = \int_U \mathbf{F}(\mathbf{s}, t) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{X}(\mathbf{s}, t)) d\mathbf{x} \quad (3)$$

### 4.2. 計算格子と離散化手法

本研究では計算格子として階層型直交格子を用いる。

まず、階層型直交格子は Building CUBE Method (BCM)<sup>3)</sup>で用いられる格子である。BCM とは、流れ場を階層型の等間隔直交格子で離散化して解く計算アルゴリズムの総称である。階層型直交格子では、計算領域を Cube と呼ばれる立方体領域に分割し、更に各 Cube を等間隔に Cell と呼ばれる領域に分割する。Fig. 9 に分割例を示す。

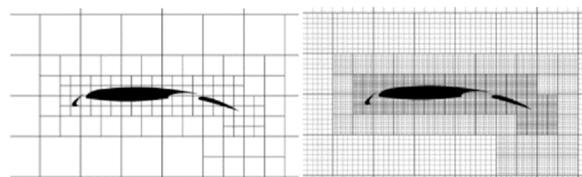


Fig. 9 The example of cubic division (Left : cube, Right : cell)

この手法では、格子の生成が容易であるため、CFD において必要なメッシュの生成時間を大幅に削減することができる。また、等間隔に格子を配置するためデータ構造が簡易である。そのため、並列計算において高い計算効率を得ることができ、計算時間も短縮することができる。

また、本研究では流体解析ソフトウェアとして神戸大学と理化学研究所が共同開発した CUBE<sup>4)</sup>を用いた。基礎方程式の離散化として、有限体積法を用いた。対流項の離散化には QUICK スキーム、粘性項の離散化には 2 次精度中心差分を用いた。

#### 4.3. 計算条件

本研究で用いた計算領域, 境界条件を Fig. 10 に示す. 入り口には 23.23 m/s の一様流を与えた.

流体は 20°C の大気を想定し, 密度を 1.204 kg/m<sup>3</sup>, 粘性係数を 1.82 × 10<sup>-5</sup> Pa·s とした.

Fig. 11 に使用した計算格子の例を示す. 上は外観図, 下は選手の正中線断面図である.

また, 計算に用いた格子数 Table 2 に示す. 最小格子幅は共通で 6mm である.

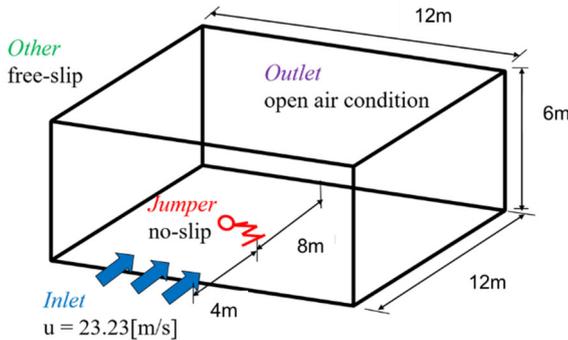


Fig. 10 Calculation domain and boundary condition

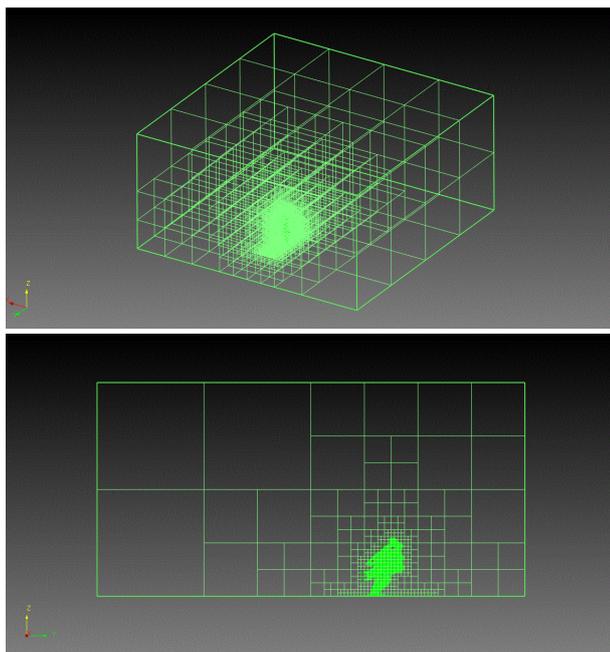


Fig. 11 Computational domain

Table 2 The number of cube and cell

	Cube	Cell
Jumper 1	4,484	13,922,304
Jumper 2	4,356	13,320,192
Jumper 3	4,046	12,374,016
Jumper 4	4,308	13,062,144
Jumper 5	4,235	12,804,096
Jumper 6	4,403	13,578,240
Jumper 7	4,361	13,090,816
Jumper 8	4,386	13,046,208
Jumper 9	4,298	12,832,768
Jumper 10	3,957	11,943,936

Jumper 11	4,153	12,976,128
Jumper 12	3,936	12,201,984
Jumper 13	4,076	12,460,032
Jumper 14	4,629	14,237,696
Jumper 15	3,927	12,144,640

計算の時間刻みは 2.0 × 10<sup>-5</sup> s, 解析の対象時間は 0.51 s とした. このうち, 初期の 0.167 s 間は流れを発達させるため, 姿勢変化を行っていない.

上記の計算条件で, 全 15 ケースのシミュレーションを行い, 576 並列で平均約 2.5GB のメモリを使用し, 平均計算時間は 2 時間 20 分であった.

## 5. 結果

### 5.1. 揚抗比について

本研究では空気力の代表として揚抗比(L/D)を用いて議論を行う.

揚抗比は抗力係数(C<sub>D</sub>)と揚力係数(C<sub>L</sub>)を用いて以下のように表される(式 4).

$$L/D = \frac{C_L}{C_D} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{2D}{\rho U^2 S} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{2L}{\rho U^2 S} \quad (6)$$

ただし,  $\rho$  は密度,  $U$  は代表速度,  $S$  は代表面積を表す. 本研究では, 抗力, 揚力は次のように算出した. 先述した通り, 本研究ではスキー板の向きと流れの方向が一致するとみなしているため, スキー板の向きと同方向に生じる力を抗力(Drag), スキー板の向きと鉛直上向きに生じる力を揚力(Lift)と定義した(Fig. 12).

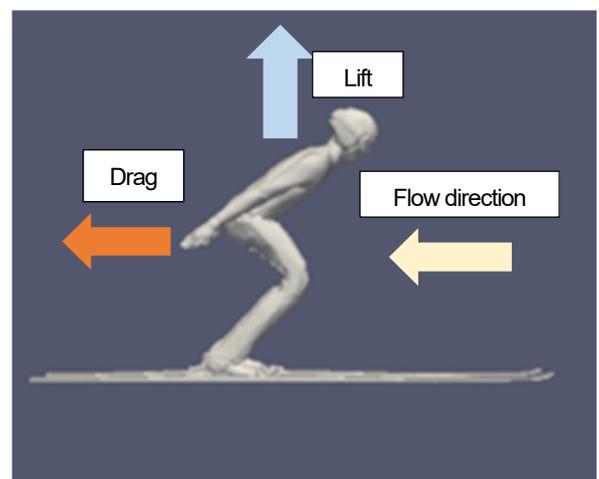


Fig. 12 Lift and drag

### 5.2. 体幹迎角と揚抗比の時系列変化

解析を行った結果から揚抗比に着目し, 比較を行う. 3 章で述べた 3 グループから 1 人ずつ選出し, 体幹迎角と揚抗比の時系列変化を見る. グラフを Fig. 13 に示す. 上から LONG の Jumper 2 (92.0m), MIDDLE の Jumper 9 (84.0m), SHORT の Jumper 13 (68.5m) のグラフである. なお, 0.51s 間の計算のうち, 流れを発達させるための 0.167s 以前のデータはグラフでは除き, 0.167s 時

点を 0s と表記する。

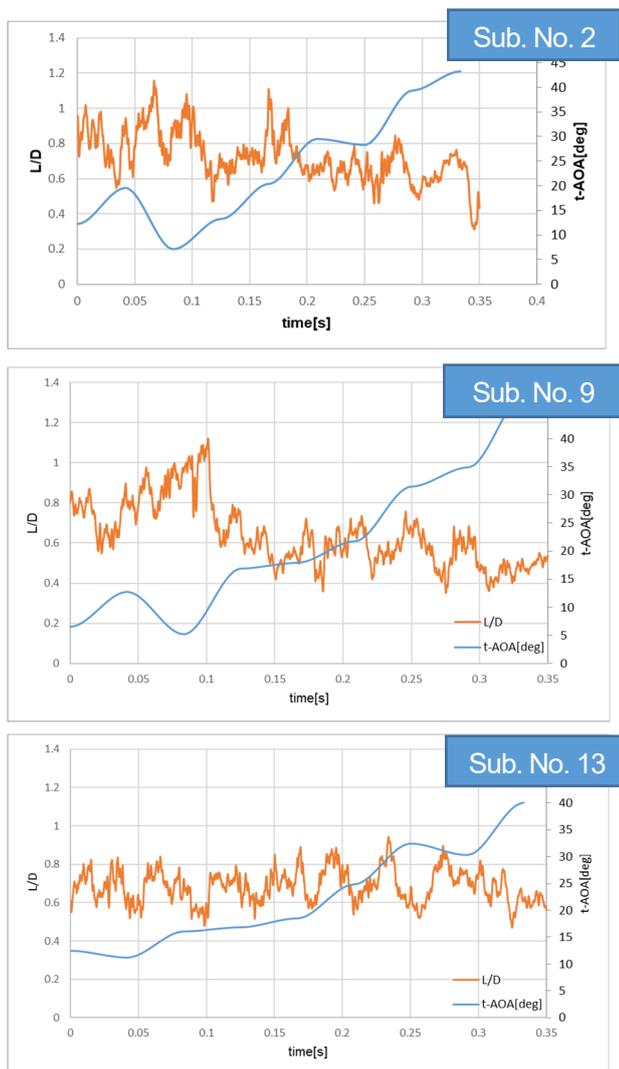


Fig. 13 Time history of t-AOA and L/D

各グラフについて、まずは揚抗比に着目する。0.2s 以降の時間では、各グループで大きな差は見られない。しかし、0.15s 以前ではグループ間で大きな差が見られる。まず LONG では平均して 1.0 前後の揚抗比を得ているが、SHORT では 0.4-1.0 を推移しており、明らかに LONG に比べて値が小さい。MIDDLE は SHORT よりは大きい LONG よりは小さい値をとっている。

次に体幹迎角に着目すると、LONG, MIDDLE では 10°前後からテイクオフ動作が始動しているのに対し、SHORT では 20°前後からテイクオフ動作が始動している。

これらから、次節ではテイクオフ動作初期の体幹迎角と揚抗比の関係に更に着目する。

### 5.3. 体幹迎角と揚抗比との関係

本節では全ジャンパーの体幹迎角と揚抗比の関係を調べるため、横軸に体幹迎角、縦軸に揚抗比をとったグラフを作成した。このグラフには、体幹迎角と揚抗比の時系列データをもとに、0.004s 毎に点をプロットしていく。作成したグラフを Fig. 14 に示す。

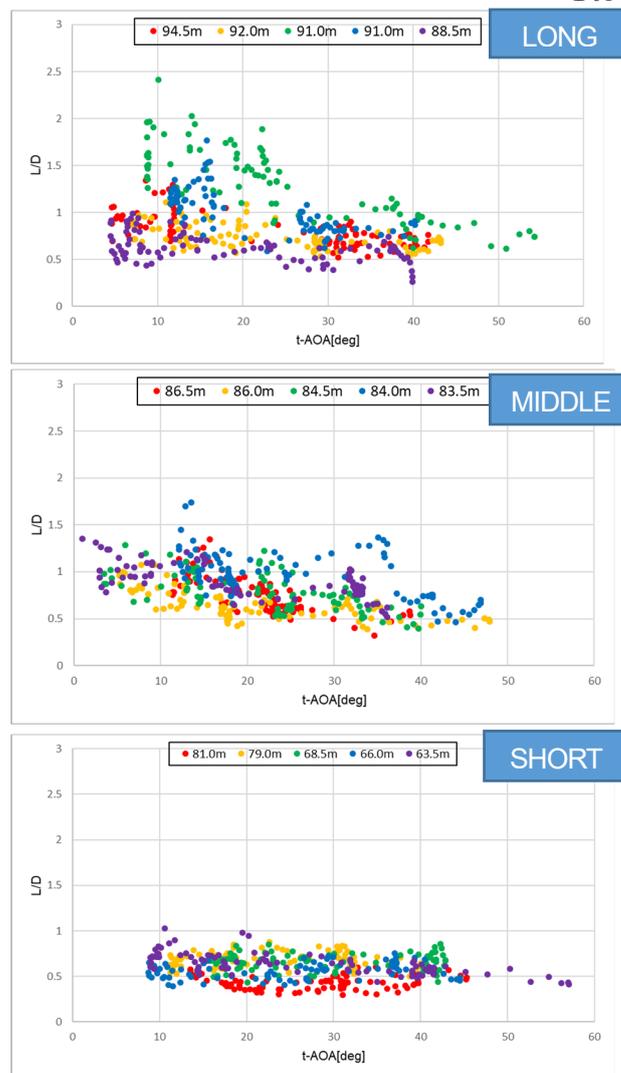


Fig. 14 Correlation between L/D and t-AOA

本研究では Fig. 14 の 2 つの点に着目する。まず、体幹迎角が小さい、15°以下するとき、SHORT では 1 を下回る揚抗比のジャンパーが多いのに対し、LONG, MIDDLE では 1 を上回っているジャンパーが多いことがわかる。

また、前節でも述べたが、初期姿勢の体幹迎角にも着目する。LONG, MIDDLE は 7°を下回る体幹迎角からテイクオフ動作を開始するジャンパーが多いのに対し、SHORT では初期姿勢の体幹迎角が 7°より大きいジャンパーが多いことがわかる。

## 6. 考察

前章から、ジャンパーがテイクオフ動作初期の体幹迎角と、そのときに得られる揚抗比の大きさの間に関係が見られた。この要因を調べるために、各グループから 1 人ずつ選出し、テイクオフ動作初期の頭部付近の流線を可視化した。Fig. 15 に示す。

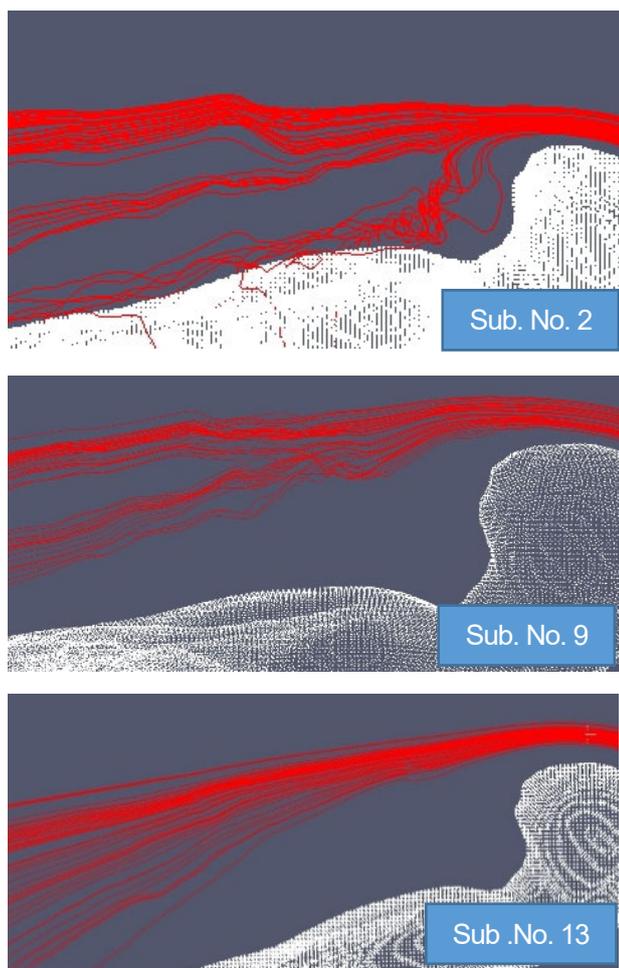


Fig. 15 Stream line near the top of the head

Fig. 15 より、LONG のジャンパーは流線が頭部付近を通ったあと、流れが背面に沿って流れており、MIDDLE、SHORT となるにつれて流れの剥離具合が大きくなっていることが確認できる。流れが剥離することで負圧領域が生まれ、負圧領域によってジャンパーが受ける抗力が増加する。抗力が増加することで式から揚抗比が減少することになる。

これにより、初期姿勢の体幹迎角と揚抗比との間に関係が生じたと考えられる。

## 7. 結論

以上の解析から、以下の知見を得た。

- ・ スキージャンプのテイクオフモーションについて数値流体解析を行うフレームワークを構築することができた。
- ・ テイクオフ動作初期の揚抗比と、飛距離の間に相関があった。

本研究では 15 人のジャンパーの空力特性を、CFD を利用して解析し、一定の成果を得られたが、更に多くのジャンパーを解析することで更に詳細なデータ、相関を見ることができるようになると考えられる。

そこで今後の展望としては、更に解析対象を増やし、より詳細な相関を見つけることが挙げられる。

## 参考文献

- (1) H. Schwameder, “Biomechanics research in ski jumping, 1991–2006”, *Sports Biomech.*, Vol.7, No.1(2008), pp. 114–136.

- (2) Rahul Bale et al., “HPC-BASED SIMULATIONS FOR THE ENGINEERING REALM AND INDUSTRIAL APPLICATIONS,” *In: ECCOMAS Congress 2016. Crete Greece, 2016*
- (3) 大西 慶治: “任意複雑形状を扱う修正埋め込み境界型仮想セル法を用いた直交格子法の研究”, 東北大学大学院工学研究科博士学位論文, p.14. (2003)
- (4) Jansson, N., Bale, R., Onishi, K., & Tsubokura, M. (2019). CUBE: A scalable framework for large-scale industrial simulations. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 33(4), 678–698.