

スキージャンプに関する数値流体解析

山形大学 浅井 武
(共同研究者) 日本エムエスシー 村上 広高

Computational Fluid Dynamics Analysis of the V Style Ski Jumping

by

Takeshi Asai

Fac. of Edc., Yamagata University

Hiroataka Murakami

MSC Japan Ltd.

ABSTRACT

The V style (skis together or crossing in back and spread in front) technique in flight phase is one of the most important and fundamental technique in the ski jumping. However, there are a few studies about flowfield around the athlete and ski surfaces. Then, the purpose of this study is to clarify the characteristic of flowfield about the V style technique in flight phase using Computational Fluid Dynamics. Two triangular surface meshes were produced on the 3D simplified human models and skis in the Case 1 (attacking angle of the skis = 0 deg.) and Case 2 (attacking angle of the skis = 20 deg.). Moreover, ten triangular surface meshes were produced on the 3D dummy models and skis from Case1 (attacking angle of the skis = 0 deg.) to Case 10 (attacking angle of the skis = 45 deg.).

The calculations was made by the Renormalization-Group (RNG)-based $k-\epsilon$ turbulent flow model. The calculations by Fluent/uns (Fluent Inc.) required 120 iterations to arrive at these solutions with run times on a EWS (O₂ ; SGI | Cray Inc.) at about six hours for each calculation. The high intensity dragging force on the athlete and ski surfaces were observed at

the head, shoulder, and feet in both the 3D simple model and the 3D dummy model. The good agreement is observed between the experiment data by wind tunnel with the simulation data in 3D dummy model. The Lift-Drag ratio increases from 0 deg. to 20 deg. in attacking-angle sharply, and that decreases from 20 deg. to 45 deg. gradually. The maximum Lift-Drag ratio is 1.523 which attacking-angle is 20 deg.

要 旨

本研究では、CFDを用いた数値流体解析手法をV字スキージャンプ技術に適用し、抗力面積、揚力面積、揚抗比等について風洞実験値と比較する事により、スキージャンプ技術の分析や新しいスキルの開発に関する数値流体解析手法の適用の可能性について検討した。また、同様の数値流体解析手法を用い、迎え角の違いがジャンパーやスキー周りの流体特性に与える影響を分析した。

その結果、3Dダミーモデルを用いたコンピュータシミュレーションにおける抗力面積は、迎え角が増加するにしたがって指数関数的に増大する傾向がみられたが、揚力面積は直線的に増加する傾向にあった。そして、3Dダミーモデルを用いたコンピュータシミュレーションにおける揚抗比は、迎え角0度から15度付近まで急激に上昇し、20度付近でピークとなり、その後45度までなだらかに減少していた。また、本解析結果における揚抗比のピーク値は、迎え角20度のケースの1.523であった。

緒 言

近年、スキーのジャンプ競技では、V字ジャンプ技術が導入され、記録の向上に大きく貢献しているとされている。スキージャンプ技術の研究では、幾つかの報告^{1,3)}がなされているが、空力特性に関する研究では、谷ら^{5,6)}の先駆的な研究や、渡部ら⁷⁾や渡部ら⁸⁾、あるいは神ら⁴⁾の風洞実験による研究が報告されている。それらの研究では、ジャンパーの姿勢やスキーの角度等と抗力面

積、揚力面積、あるいは揚抗比等の関係について比較検討されているが、ジャンパー周りの流れの特性そのものに関しては、いまだ十分に把握されているとは言えない。また、村上ら²⁾、吉田ら⁹⁾は最適制御理論を用いた数値解析手法により、揚抗比が最大という条件が必ずしも飛距離が最大という結果にならない事を指摘している。したがって、今後スキージャンプ技術を研究していく場合、実験的手法、理論的手法の他、計算科学的手法を考慮し総合的に検討していく必要があると考えられる。

そこで本研究では、CFDを用いた数値流体解析手法をV字スキージャンプ技術に適用し、抗力面積、揚力面積、揚抗比等について風洞実験値と比較する事により、スキージャンプ技術の分析や新しいスキルの開発に関する数値流体解析手法の適用の可能性について検討した。また、同様の数値流体解析手法を用い、迎え角の違いがジャンパーやスキー周りの流体特性に与える影響を分析した。

1. 方 法

1. 1 3D単純モデル

図1は本シミュレーションで用いたジャンパーモデルを示したものである。まず、最初のプロトタイプモデルとして極めてシンプルな形状の3Dジャンパーモデル（以下3D単純モデルとする）を作成し、迎え角0度（Case 1）の場合と迎え角20度（Case 2）の場合の2ケースについて解析モデルを作成した。

姿勢条件を、図2に示す渡部ら⁷⁾の例にならって表わすと、本解析モデルの脚とスキーの角度

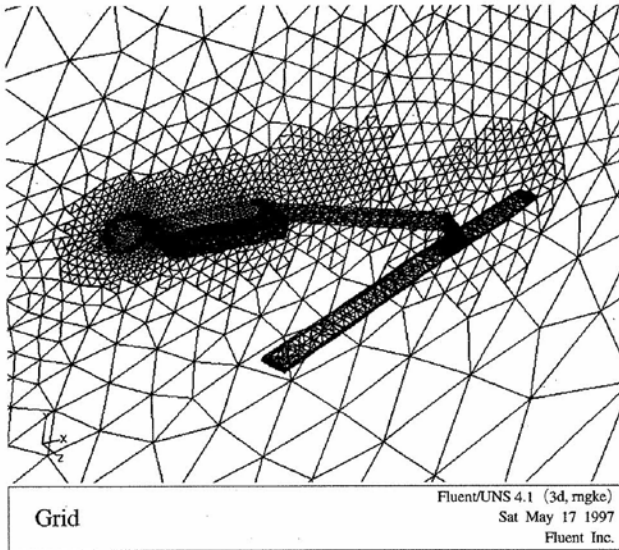


図1 The 3D-Grid of Simple Jumper-skis model

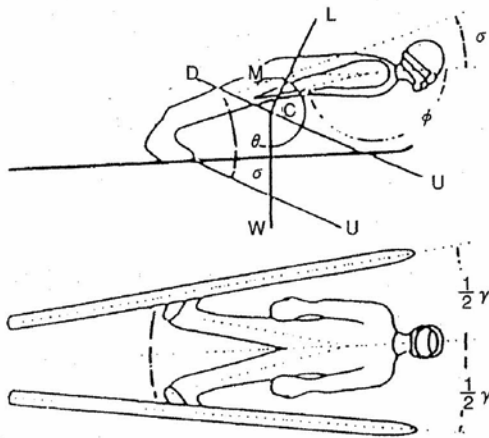


図2 Condition of characteristic parameters in Jumper-skis model (Quotation from Watanabe [7])

(θ) は0度, つまり平行とし, スキー回転角は (γ) は40度とした. また, 腰関節前屈角 (σ) は0度とした. モデリングはGEOMESH (Fluent Inc.), およびMSC/PATRAN (MSC Inc.) を使用して行った.

1. 2 3D ダミーモデル

図3は, 3D単純モデルをもとに, 形状をより詳細に実際のジャンパーに近似した改良型モデル (以下3Dダミーモデル) を示したものである. 本モデルの姿勢条件は, 脚とスキーの角度 (θ) は0度, つまり平行とし, スキー回転角 (γ) は20度とした. また, 腰関節前屈角 (σ) は0度とした. 解析ケースは迎え角0度 (Case 1) の場合から, 5度ずつ迎え角45度 (Case 10) まで変化さ

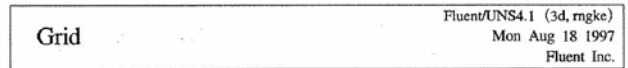
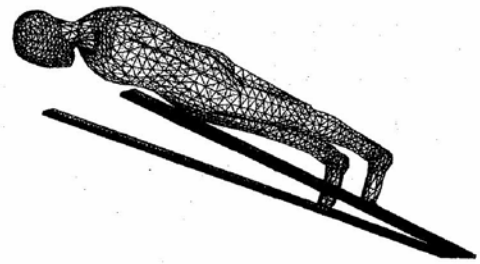


図3 The 3D Dummy Jumper-skis model

せた, 計10ケースとした.

モデリングは3D単純モデル同様GEOMESH (Fluent Inc.), およびMSC/PATRAN (MSC Inc.) を使用して行った.

1. 3 解析方法

解析メッシュは三角要素 (テトラヒドラ) を用いた非構造メッシュとし, 基本構造は3D単純モデルが約80000メッシュ, 3Dダミーモデルが約150000メッシュとした. 初期流速は25 m/sec.とし, 非圧縮性粘性流体のNavier-Stokes方程式を有限体積法により離散化して計算を行った. 乱流モデルはRNG k- ϵ モデルを用い, ソルバーにはFLUENT/UNS (Fluent Inc.) を使用した.

ジャンパーモデルの揚力と抗力はFLUENT/UNS (Fluent Inc.) に付属する表面積分サブルーチンにより求めた. 揚力 (L) と抗力 (D), 揚力面積 (S_L) と抗力面積 (S_D), および揚抗比 (L/D) は式 (1) から式 (3) の関係より算出した.

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 S_D \dots \dots \dots (1)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 S_L \dots \dots \dots (2)$$

$$L/D = S_L / S_D \dots \dots \dots (3)$$

D : Drag Force L : Lift Force

ρ : Dencity U : Velocity

S_D : Drag Area S_L : Lift Area

表1 Comparison of Drag Area, Lift Area, and Lift-Drag Ratio by the 3D simple model

	S_D (m ²)	S_L (m ²)	L/D
Case 1 (0 deg.)	0.054	0.0005	0.009
Case 2 (20 deg.)	0.166	0.300	1.807

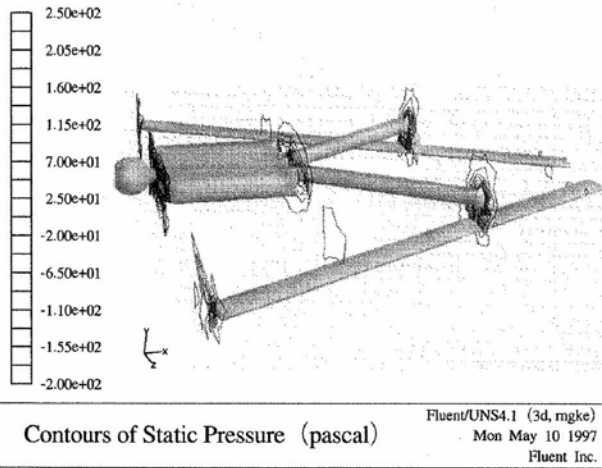


図4 Contours of static pressure in Case 1

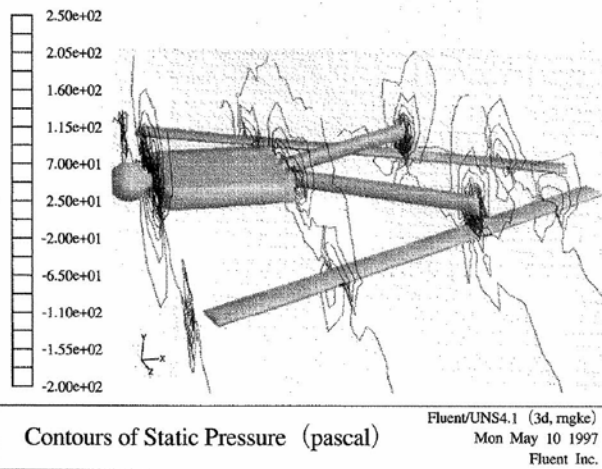


図5 Contours of static pressure in Case 2

2. 結果および考察

2.1 3D単純モデル

図4は3D単純モデルにおけるCase 1（迎え角0度）の、また図5はCase 2（迎え角20度）の圧力コンターを示したものである。全体的に比較すると、Case 2の方がCase 1より迎え角が大きいため、自明の事ながらジャンパーモデル周りの圧力変化が大きく、かつ広範囲に変化している傾向がみられる。そしてジャンパー周りの圧力を表面積分する事により、各ケースの抗力面積 (S_D)、揚力面積

(S_L)、および揚抗比 (L/D) を求めたのが表1である。Case 1の揚抗比が0.009であるのに対してCase 2は1.807となっており、Case 2の方がCase 1より大きな値を示している。しかし、このシミュレーション結果の妥当性がどの程度のものなのかは、計算結果からのみでは判断不能である。そこで、渡部ら⁷⁾が行ったV字スキー飛行に関する風洞実験の測定値とシミュレーション結果を比較したのが図6である。図6は、脚とスキーの角度 (θ) が3度の場合における迎え角（体幹に対する迎え角）と揚抗比の関係を示したものであり、迎え角20度の揚抗比の場合、風洞実験値が1.545であるのに対してシミュレーション結果は1.807

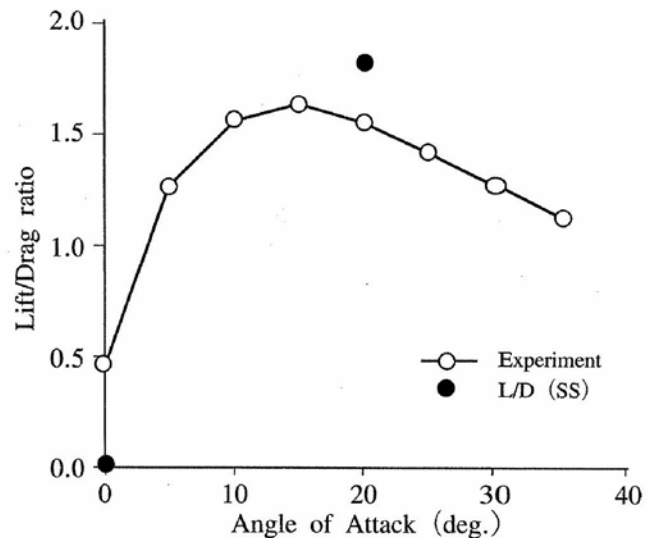


図6 Comparison of experiment and simulation in Lift-Drage ratio (Quotation from Watanabe [7])

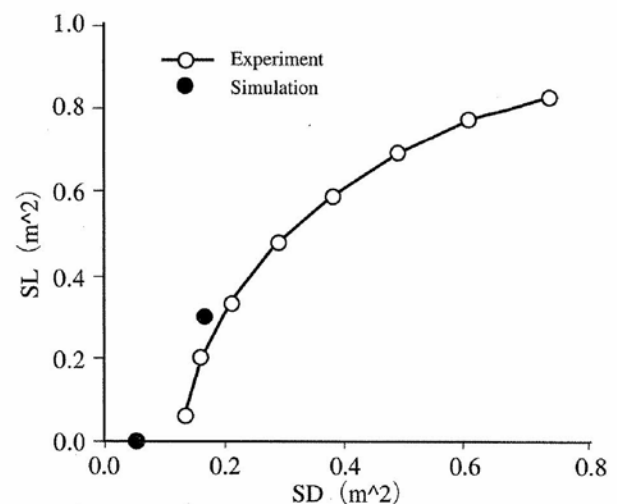


図7 Comparison of experiment and simulation in Liftarea-Drage area (Quotation from Watanabe [7])

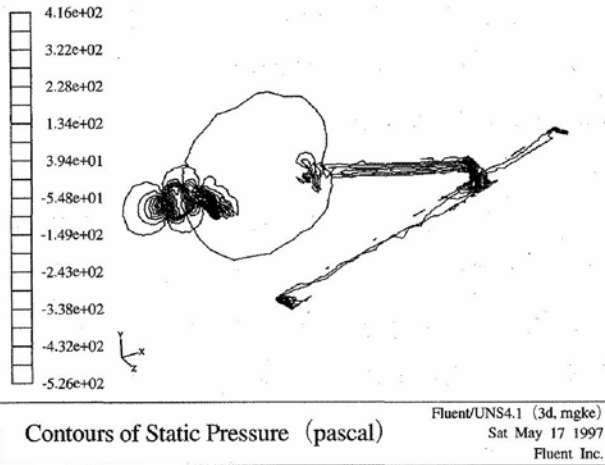


図8 Contours of static pressure on symmetry plane in Case 1

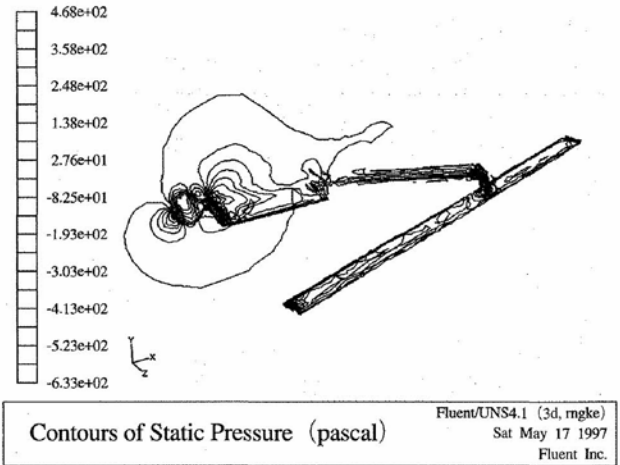


図9 Contours of static pressure on symmetry plane in Case 2

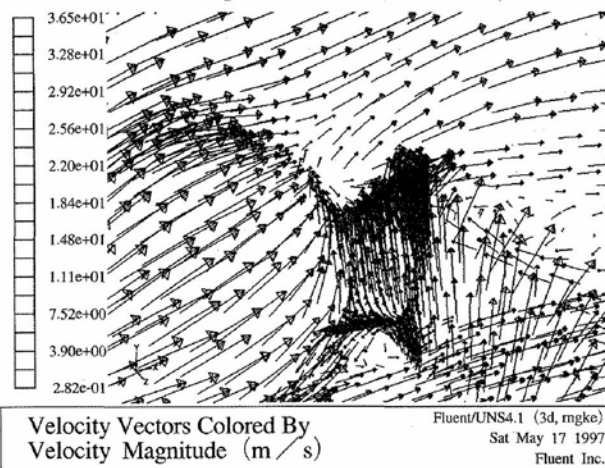


図10 Velocity vectors by velocity magnitude around neck of 3D simple model

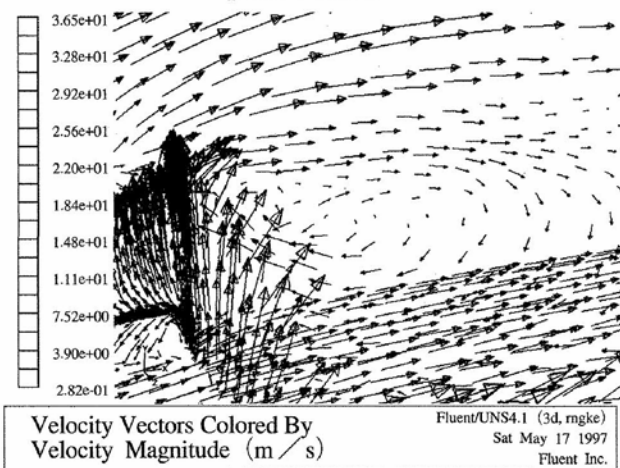


図11 Velocity vectors by velocity magnitude around back of 3D simple model

となっている(表1)。また、図7は風洞実験における抗力面積-揚力面積ポーラカーブ上にシミュレーション結果をプロットしたものである。実験の抗力面積が0.381 m²であるのに対して、シミュレーションは0.166 m²と小さな値となっている。これは、シミュレーションにおける脚とスキーの角度(0 deg.)と実験の角度(3 deg.)とが異なっている事や、3D単純モデルが滑らかで細い形状をしている事が原因の一つになっていると思われる。また、そのため揚抗比もシミュレーション値(1.807)のほうが実験値(1.545)より大きくなっていると考えられる。

以上の事より、風洞実験と本解析とは、モデルの形状や境界条件に若干の違いがあり、また、解析例数も少なく、今後より詳細な検討が必要であ

るが、コンピュータシミュレーションが風洞実験と比較して極端に異なった結果にはなっていないと考えられた。

図8はCase1の、また図9はCase2のシンメトリミラープレーンとジャンパーモデル上の圧力コンターを示したものである。Case1の体幹周りは比較的上下対称的な圧力分布を示しているのに対して、Case2の体幹周りは偏りがみられ、広範囲に分布が広がっている。

図10は首部周りの流速ベクトルを示したものであり、全体的な後方流とは異なる方向の流れが観察される。また、図11は背部周りの流速ベクトルを示したものであり、全体的な後方流とは反対方向の環流がみられる。したがって、これらの流れの乱れを制御することにより、抗力面積をよ

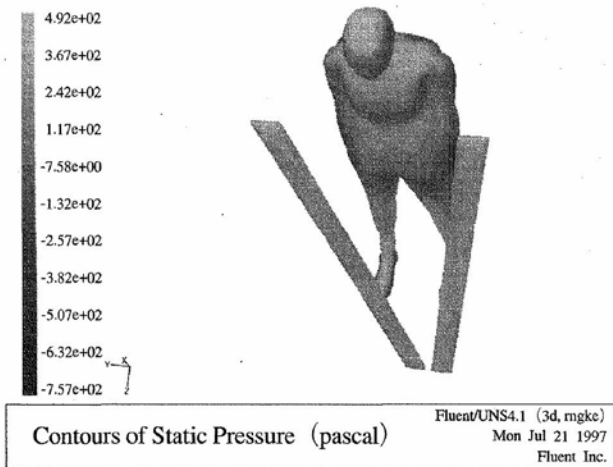


図 12 Contours of static pressure on surface of 3D dummy model in Case 5

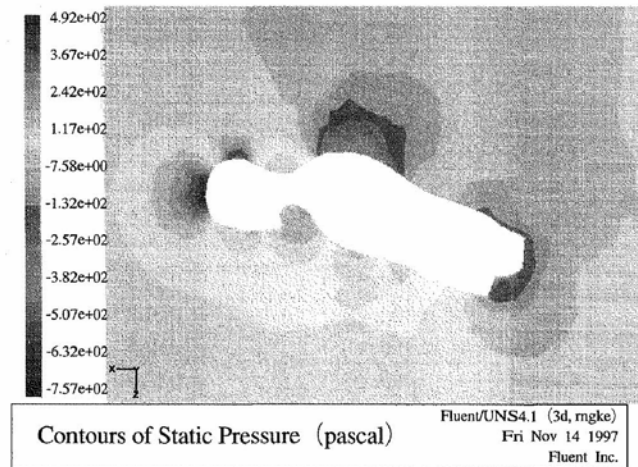


図 13 Contours of static pressure on symmetry plane of 3D dummy model in Case 5

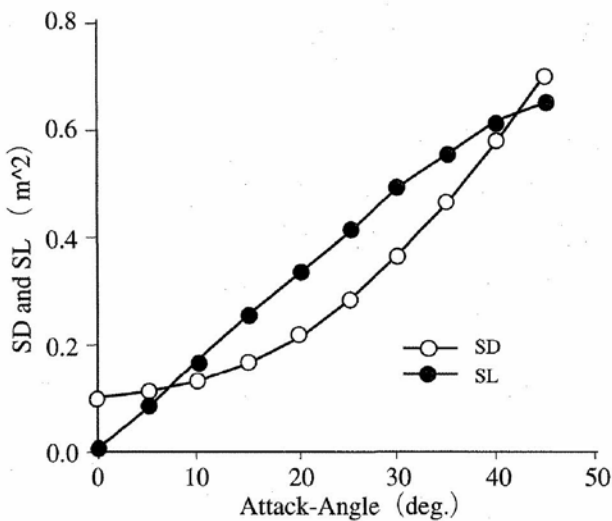


図 14 The relation of drag area, lift area, and attacking-angle by the 3D dummy model

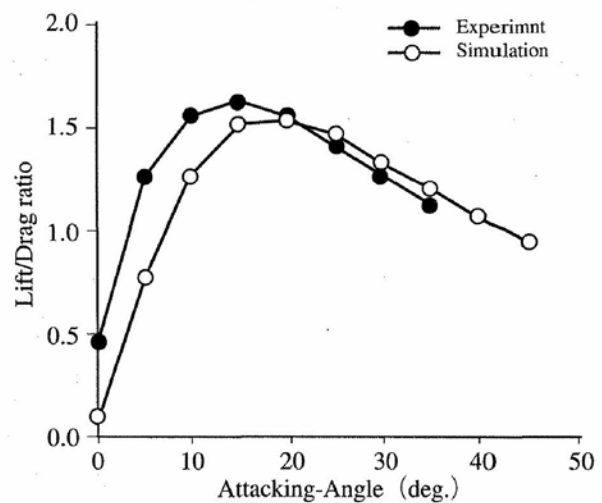


図 15 Comparison of the lift-drag ratio in experiment with that in computer simulation

り小さくできると推定され、その結果、揚抗比を増大させる事が可能であると考えられる。

2. 2 3D ダミーモデル

上記 2. 1 の結果を踏まえ、より実形状に近い 3D ダミーモデルを作成し、迎え角に対する揚力、抗力、揚抗比の変化等について検討した。図 12 は、迎え角 20 度のケースにおけるジャンパー表面の圧力コンター図を示したものである。頭部、肩部、足部に高い圧力がみられ、3D 単純モデルの場合と同様な傾向が観察される。ジャンパー周りの圧力コンター図 (図 13) をみても、ジャンパー背部に高い陰圧が認められ、3D 単純モデルと同様の傾向の圧力分布がみられた。この事から、ジャンパー後背部が揚力効果の中心的部位の一つにな

っていると考えられる。また、このケースの揚抗比は、1.523 となっており、3D 単純モデルの 1.807 よりも実験値の 1.545 に近い値となっている (表 2)。これらの事から 3D ダミーモデルの方が、3D 単純モデルより精度が高いと判断し、迎え角 0 度から 45 度の 10 ケースについて解析モデルを作成し、コンピュータシミュレーションによって抗力面積と揚力面積を求めたのが図 14 である。抗力面積が指数関数的に増大しているのに対して、揚力面積はほぼ直線的に増加し 30 度付近からそれがゆるやかになる傾向がみられた。また、その際の揚抗比を求めたのが図 15 である。図中のソリッドサークルは渡部ら⁷⁾の類似した条件における風洞実験値を示したものであり、かなり良い

表2 Comparison of Drag Area, Lift Area, and Lift-Drag Ratio by the 3D dummy model

		S_D (m ²)	S_L (m ²)	L/D
Case 1	(0deg.)	0.101	0.010	0.094
Case 2	(5deg.)	0.112	0.085	0.764
Case 3	(10deg.)	0.132	0.166	1.258
Case 4	(15deg.)	0.166	0.250	1.505
Case 5	(20deg.)	0.217	0.331	1.523
Case 6	(25deg.)	0.283	0.413	1.461
Case 7	(30deg.)	0.363	0.488	1.329
Case 8	(35deg.)	0.465	0.553	1.190
Case 9	(40deg.)	0.577	0.610	1.056
Case 10	(45deg.)	0.696	0.649	0.932

近似が得られていると考えられる。そして本解析結果より、揚抗比は迎え角0度から15度付近まで急激に上昇し、20度付近でピークとなり、その後45度までなだらかに減少していくと考えられた。また、本解析結果における揚抗比のピーク値は、迎え角20度のケースの1.523であった。

今回の解析では、ジャンパー全体をモデル化し分析したが、部分や細部に関してより精密なモデルを作成して解析していく事も重要であると考えられる。そしてスキージャンプ科学分野においても、CFDによるコンピュータシミュレーションは、全体モデルや細部モデルの解析や分析を総合的に検討していく事により、要素技術の一つとして理論解析や実験解析と同様の重要な解析方法になる可能性が示唆された。

3. まとめ

本研究では、CFDを用いた数値流体解析手法をV字スキージャンプ技術に適用し、迎え角の違いがジャンパーやスキー周りの流体特性に与える影響を分析した。また、抗力面積、揚力面積、揚抗比等について風洞実験値と比較する事により、スキージャンプ技術の分析や新しいスキルの開発に関する数値流体解析手法の適用の可能性について検討した。

結果を以下に要約する。

1) 実験における迎え角20度の揚抗比は1.545であったのに対して、3D単純モデルを用いたシミ

ュレーション（脚とスキーの角度（ θ ）は0度）における迎え角20度の揚抗比は1.807であり、3Dダミーモデルによる迎え角20度の揚抗比は1.523であった。

2) 風洞実験値とコンピュータシミュレーション値を比較すると、モデルの形状や境界条件に若干の違いがあるが、3D単純モデルより、実形状により近い3Dダミーモデルの方が良い近似が得られた。

3) 3D単純モデル、および3Dダミーモデル共にジャンパーの頭部、肩部、足部に高い圧力がみられ、後背部に高い陰圧が認められた。

4) 3Dダミーモデルを用いたコンピュータシミュレーションにおける抗力面積は、迎え角が増加するにしたがって指数関数的に増大する傾向がみられたが、揚力面積は直線的に増加する傾向にあった。

5) 3Dダミーモデルを用いたコンピュータシミュレーションにおける揚抗比は、迎え角0度から15度付近まで急激に上昇し、20度付近でピークとなり、その後45度までなだらかに減少していた。また、本解析結果における揚抗比のピーク値は、迎え角20度のケースの1.523であった。

6) スキージャンプ科学においてCFDによるコンピュータシミュレーションは、全体モデルや細部モデルの解析や分析を総合的に検討していく事により、要素技術の一つとして理論解析や実験解析と同様の重要な解析方法になる可能性が示唆さ

れた。

文 献

- 1) Arndt A., et al ; The Biomechanics of the Transition From Take-off to Early Flight in Ski-Jumping, *Abstract of XVth Congress of the ISB*, 68-69 (1995)
- 2) 村上正秀他；スキージャンプの飛翔特性, 日本航空宇宙学会第28期年会講演論文集, 110-115 (1997)
- 3) Muller W., Platzer D. and Schmolzer B. ; Dynamics of human flight on skis, *Improvements in safety and fairness in ski jumping*, J. Biomech., 29-8, 1061-1068 (1996)
- 4) 神ら；スキージャンプにおける空中フォームの相違と飛距離に関する研究, 日本航空宇宙学会第23期年会講演論文集, 208-209 (1992)
- 5) 谷一郎, 井内松三郎, 渡部勲；スキー飛躍の空気力学II, 日本のスキー科学, 日立, 64-78 (1971)
- 6) 谷一郎, 三石 智；スキー飛躍の空気力学, 科学, 21-13, 117-122 (1951)
- 7) 渡部勲, 渡部和彦, 谷田好通；スキー飛躍の空気力学(開脚姿勢の効果), 日本航空宇宙学会第23期年会講演論文集, 206-207 (1992)
- 8) 渡部和彦；ジャンプ；V字飛行の研究と競技への応用, 体育の科学, 42-5, 375-379 (1992)
- 9) 吉田和代他；スキージャンプにおける空力特性に基づいた飛行曲線の最適化, スポーツ工学シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, 96-20, 126-130 (1996)