Journal of High Performance Sport 12（2024）1−11

報告・資料

Fiber Bragg Grating 法を用いたスキー板のたわみ計測
Measurement of Ski Deflection Using the Fiber Bragg Grating Method

中島大貴 [1)], 吉岡伸輔 [2)], 原田将寛 [2)], 袴田智子 [1)],
稲葉優希 [1)], 村山英晶 [2)], 木村新 [1)], 石毛勇介 [1)]
Hirotaka Nakashima[1)], Shinsuke Yoshioka[2)], Masahiro Harada[2)], Noriko Hakamada[1)],
Yuki Inaba[1)], Hideaki Murayama[2)], Arata Kimura[1)], Yusuke Ishige[1)]

Abstract : Ski deflection plays a vital role in determining the quality of the carving turn and overall skiing performance. Therefore, it is essential to quantify the ski deflection accurately. Prior research has utilized strain gauges to investigate ski deflection, but this method posed challenges, including difficulties in measuring the multiple points of the ski. To address these limitations, we focused on utilizing Fiber Bragg Grating（FBG）, a technology that can effectively resolve these issues, and developed new techniques to investigate ski deflection. Furthermore, we employed this method to quantify the ski deflection during the carving turn for sit-skier, identifying their areas of improvement to enhance the skiing performance. This paper presents the verification tests of ski deflection using FBG, as well as the technical issues encountered by sit-skiers. Firstly, we conducted a laboratory test to confirm if the FBG strain sensor could detect ski deflection when weights were suspended. Secondly, we conducted an on-snow test to determine if the FBG strain sensor could detect the ski deflection during a straight downhill ski run, with forward and backward loads. The results of these verification tests validated FBG's ability to measure ski deflection. Subsequently, we compared the ski deflection of a sit-skier with that of a standing skier during a carving turn. We found that the sit-skier had difficulty deflecting the forebody of the ski, which limited the range of carving turn techniques sit-skier could perform compared with the standing skier. For instance, fine adjustments in turn radius during carving turns are restricted. In summary, our study demonstrates the potential of FBG to measure ski deflection at multiple points accurately, providing detailed insights for skiers, unlike the strain gauge. Thus, we anticipate that FBG will become a common technique for measuring ski deflection in the future.

Key words : Paralympic, alpine ski, sit-ski, carving turn, strain
キーワード：パラリンピック, アルペンスキー, シットスキー, カービングターン, ひずみ

[1)]国立スポーツ科学センター, [2)]東京大学
[1)]Japan Institute of Sports Sciences, [2)]The University of Tokyo
E-mail : hirotaka.nakashima@jpnsport.go.jp

受付日：2023 年 5 月 15 日
受理日：2023 年 12 月 26 日

Ⅰ．はじめに

アルペンスキーは、旗門が立てられた雪上のコースを滑走し、スタートからゴールまでのタイムを競う競技である。パラリンピックのアルペンスキー（以下、「パラアルペンスキー」という）では、このタイムに障がいのクラスごとに設定された係数を乗じた計算タイムを競い合う。パラアルペンスキーの座位のカテゴリーにおいて、日本チームは1988年のインスブルック冬季パラリンピックから2022年の北京冬季パラリンピックまで10大会連続してメダルを獲得してきた。このように継続してメダルを獲得できた要因の一つに、日本製のシットスキーがかつて圧倒的なシェアを有して、世界をリードしてきたという背景がある。国産のシットスキーであれば、選手個人の身体的特徴に応じたカスタムをしやすいなど日本チームにとっての優位性がある。しかしながら、近年、欧州各国は日本製の機能を凌ぐシットスキーを開発しており、日本製のシットスキーのシェアは縮小し、日本チームの優位性はない。2026年に開催されるミラノ・コルティナダンペッツォ冬季パラリンピック以降も日本チームが継続してメダルを獲得するためには、科学的な手法を用いて選手の課題を抽出すること、課題をもとに選手の競技力強化を図ること、課題を解決できる新たなシットスキーを開発することが求められる。

アルペンスキーでは、旗門を通過するためにターンを繰り返す。そのため、ターンの質が競技成績を左右する。ターンはカービングターンとスキッディングターンに大別することができ、スキー板のサイドエッジで雪面を削るように滑るカービングターンは、スキー板を進行方向に対して横にずらしながら滑るスキッディングターンに比べて滑走中の減速が小さいことが明らかにされている（ただし、実際には完全に分類できるわけではなく、カービングターンでもわずかにスキー板が横にずれることもある）[1]。また、実際のレースを分析した研究において、スタートからゴールまで減速の小さいカービングターンを連続させることが、より良いタイムを記録するために重要であることも報告されている[3),5)]。このことから、アルペンスキー選手にとって、カービングターンの質を向上させること、すなわち、ターン中の減速要素を低減させることは喫緊の課題であると言える。

アルペンスキーの中でも回転（Slalom: SL）や大回転（Giant Slalom: GS）といった技術系の種目では、旗門間が狭いため、弧の小さいターンを行う必要がある。進行方向に対してスキー板が全く横にずれない理想的なカービングターンを仮定した場合、カービングターン中のターン弧の大きさは、スキー板の先端から末端にかけての側面のカーブの回転半径（以下、「サイドカーブ」という）とスキー板に荷重することで生じるスキー板の曲がり（以下、「たわみ」という）によって定まる[2)]。滑走中の選手は旗門に応じて適切なターン弧を実現させるために、スキー板のたわみ量を調整している。そのため、ターンの質を評価する上で、スキー板のたわみを定量化することは極めて重要である。先行研究では、健常（立位）のスキー選手を対象にスキー板のたわみ計測が行われてきた[8)]。しかしながら、座位のカテゴリーの選手（以下、「シットスキー選手」という）を対象に滑走中のスキー板のたわみを定量化した研究は見当たらない。そのため、まずはシットスキー選手がスキー板をどのようにたわませながら滑走をしているのかを調べ、シットスキー選手の課題を抽出する必要がある。

これまでのスキー板のたわみ計測では一般にひずみゲージが用いられており[8)]、ひずみの値からたわみ量が定量化されてきた。しかしながら、ひずみゲージのセンサーは、スキー板に取り付けられる数が限られており、スキー板のどの部分がたわんでいたのかを評価することが難しいという課題があった。滑走中のスキー板は一様にたわむわけではなく、荷重やスキー板の角付けの仕方に応じてたわみ方が異なる。この課題を解決し、より良いスキー板のたわみ計測手法を確立するため、我々はセンサーの多重化が容易で、連続的なデー

タを取得することができる Fiber Bragg Grating（以下､「FBG」という）に着目した。FBG とは光ファイバー内に構築された回折格子のことを指し、FBG が埋設された光ファイバー内にインテロゲータから光を入射させ、その反射光の波長を調べることによりひずみを求めることができる。FBG は、他のひずみ計測手法と比べて耐久性、耐熱性が高く、電磁界ノイズの影響を受けづらいなどの優位性があり、土木構造物や船舶などのモニタリングなどでも既に活用されている。この FBG を用いることで、雪上の厳しい環境下においても、より正確に、且つ、スキー板の全体のたわみを計測することが可能になると考えられる。FBG を用いたスキー板のたわみの評価方法が確立できれば、選手のパフォーマンス評価やシットスキーのより良い開発に繋がることが期待できる。

これらの背景から､我々は FBG を用いたスキー板のたわみ計測手法の確立のための検証実験を行ってきた。また、確立した手法を用いてシットスキー選手の滑走中のスキー板のたわみを定量化し、シットスキー選手の課題を抽出することができた。本研究資料では、これまで行ってきた検証実験の結果とシットスキー選手の課題について報告する。なお、本稿で報告する検証実験は、これまでの課題であったスキー板のたわみ部位の差異を抽出することに特に焦点を当て行ったものである。加えて、これらの検証を行っている間に、市販されている FBG も大幅に改良されたため、今後改良されたシステムを利用していく上での留意点や今後の展望についても述べる。

なお、本稿では、荷重によってスキー板が曲がることを、スキー界で一般的に使用されている用語に倣い「たわみ」と表現し、FBG から得られる値については「ひずみ」と表現する。

Ⅱ．実験室での FBG センサーを用いたスキー板のたわみ計測

これまでスポーツ分野で FBG を用いた競技用具等の変形やたわみに関する計測は、我々の知る限りほとんど行われていない。我々も FBG を用いた計測の経験がなかったため、雪上という厳しい環境下での計測を開始する前に、実験室内で FBG のひずみセンサーを用いてスキー板のたわみを検知できるかどうかの確認を行った。我々は過去に、スキー板にひずみゲージを取り付け、荷重を加えた際のひずみを計測した結果、その値は荷重の大きさに比例したことを確認している。そこで、FBG を使用した際にも荷重に応じたひずみの値が得られるかどうかを確認した。さらに、スキー板のたわみ部位の差異を抽出するための多点計測の可能性を確認するため、異なる箇所に荷重をかけた際に、荷重箇所に応じたひずみ値を検出できるかどうかを調べた。これら 2 つが確認できた場合に、スキー板のたわみの部位差を検出できると判断することとした。

本検証では、Figure 1 に示す通り、スキー板（VOLKL 社製、RACETIGER GS、長さ：188 cm、サイドカーブ：30 m）の長軸に沿った中心線上に光ファイバー（8 連 FBG アレイ、Lazoc 社製）を装着した。以下に、スキー板にセンサーを貼付した具体的な手順を示す（Figure 2、Figure 2 における写真は同様の手順で行った後述する実験時のものである）。まず、スキー板の上面をやすりで滑らかにし、センサーを貼付する位置を決めた。センサーの貼付位置はスキー板の長軸の中心線上で、スキー板のセンター印（以下､「スキーセンター」という）を中心に 8 箇所とした。そのうち、7 つがひずみセンサーであり、スキーセンターに 1 つ（Figure 1, (4)）、標準的な長さのビンディングプレートの前後に 1 つずつ(Figure 1, (3)と(5))、前方および後方にそれぞれ距離が均等になるように 2 つずつ（Figure 1, (1) と (2) と (6) と (7)）配置した。加えて、温度を感知するための温度センサーを、たわみがないと考えられるスキー板の先端に配置した。続いて、ファイバーを配線し、瞬間接着剤で固定した。その後、融着接続器を用いて光ファイバーを融着した。

スキー板の両端を台上に固定し、10 kg と 20 kg の 2 つの異なる重りをスキー板の前方（スキーセ

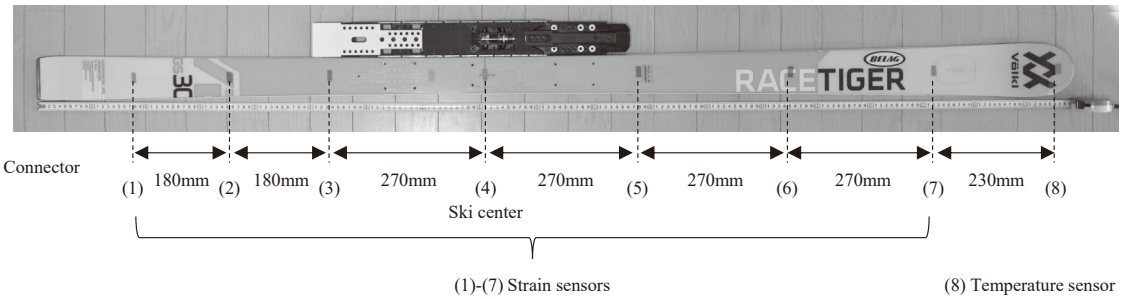
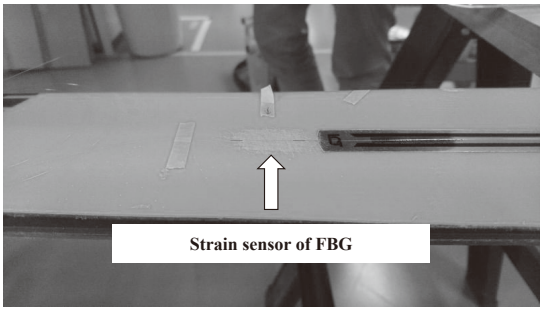


Figure 1. Positions of FBG sensors affixed.

1. Sanding the ski



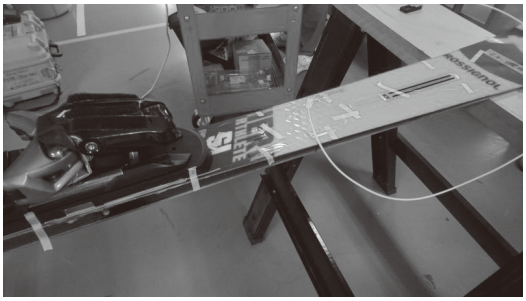
2. Deciding the position of sensor



3. Fixing and fusion bonding the fiber



Instantaneous adhesive **Fusion splicer**



4. Completing the preparation.

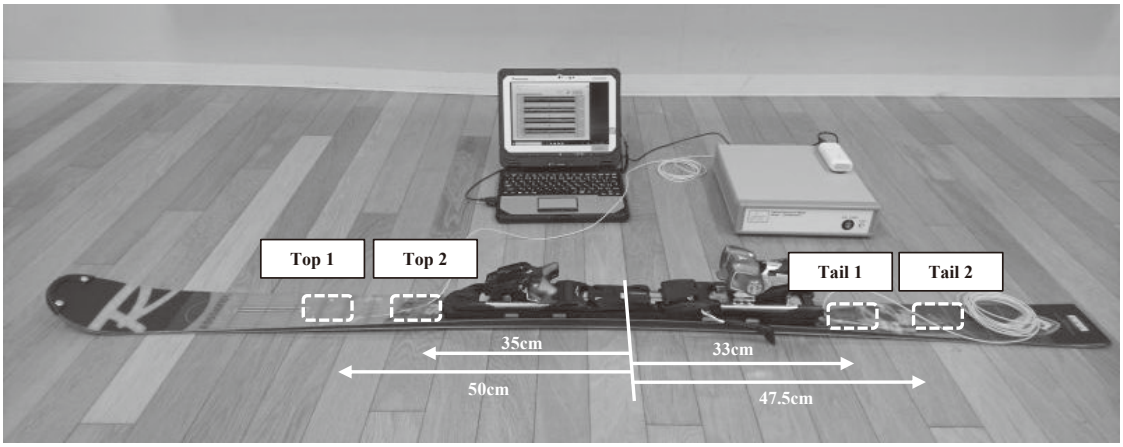


Figure 2. Procedure of fixing the FBG sensors.

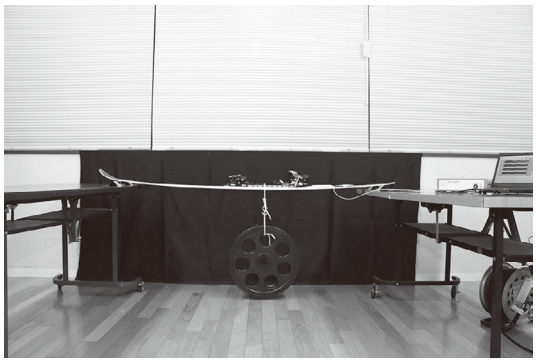


Figure 3. Verification test of FBG strain sensors in the laboratory.

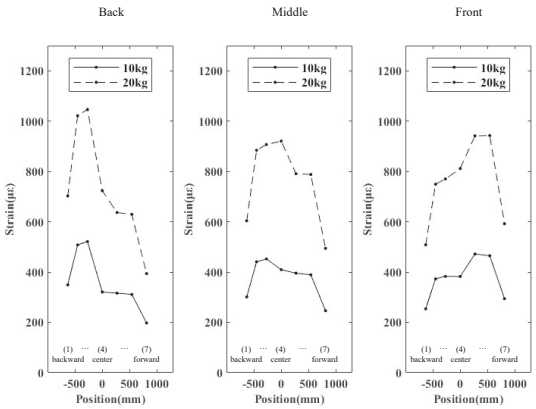


Figure 4. Strain of each sensor when weights were suspended at the back, middle, and front.

ンターから前方に 140 mm の位置）、中央（スキーセンター）、後方（スキーセンターから後方に 140 mm の位置）に吊り下げて（Figure 3）、それぞれの条件下での各センサーのひずみを計測した。

Figure 4 にその結果を示した。いずれの条件においても、20 kg の重りを吊り下げた場合では、10 kg の重りを吊り下げた場合に比べ、同一箇所のひずみの値がおおよそ 2 倍になっていたことが読み取れる。今回の計測ではこれまでスキー板のたわみ計測のスタンダードとされてきたひずみゲージと同時に検証することはできなかったが、過去のひずみゲージを用いた研究と同様の結果を FBG のひずみセンサーからも得ることができた。加えて、前方に吊り下げた場合には前方の、中央に吊り下げた場合には中央付近の、後方に吊り下げた場合には後方のひずみの値が大きくなっていた。このように荷重した重量ならびに箇所に応じたひずみの値を検出することができた。以上のように、実験室内において、静的な環境下であれば、FBG を用いてスキー板のたわみの部位差を検出できることが明らかになった。

Ⅲ．雪上での直滑降時のスキー板のたわみ計測

次に、FBG を用いたスキー板のたわみ計測が、雪上において、動的な環境下でも可能かどうかを検証した。実験室において、静的な環境下ではスキー板のたわみの部位差を検出することができたが、雪上での滑走時には、雪面の凹凸によるスキー板の振動や雪がセンサーに触れるなどの外乱が生じることが予想される。この検証では、選手に滑走中に意図的にスキー板の特定の部分をたわませてもらい、雪上での滑走中という外乱が多い環境下であっても、そのたわみを検知することが可能か否かを確認することとした。

実験に先立ち、雪上での実験に使用するスキー板（Rossignol 社製、HERO ATHLETE FIS SL、長さ：165 cm、サイドカーブ：22 m）の長軸に沿った中心線上に光ファイバー（4 連アレイ、Lazoc 社製）を装着した。上述した実験室内での研究と同様の手順でセンサーを貼付したが（Figure 2）、スキー板の長さが異なるため、上述した研究よりもセンサーの数を減らし、異なる箇所に貼付した。本検証でのセンサーの貼付位置はスキーセンターから前方に 50 cm、35 cm の箇所（それぞれ Top1、Top2）と後方に 33 cm、47.5 cm の箇所（それぞれ Tail1、Tail2）の計 4 箇所とした（Figure 2）。また、この検証では温度の影響を受けないセンサーを利用したため、気温による影響はなかったものと考えられる。

実験は菅平高原パインビークスキー場 GO の原コース（最大斜度 23°）にて実施した。アルペンスキー経験のある健常な男性 1 名に、上述したスキー板を履かせ直滑降を行わせた。このとき、1 本目はスキー板の前方（Top1、Top2）をたわま

せるために前傾してスキー板の前方に荷重をするように、2 本目はスキー板の後方（Tail1、Tail2）をたわませるために後傾してスキー板の後方に荷重をするように指示を与えた。それぞれの直滑降中の 12 秒間におけるスキー板の 4 箇所のひずみを 1000 Hz で収集し、バターワースローパスデジタルフィルタを用いて 2 Hz で平滑化した。平滑化の際の遮断周波数は、後述するターン中のスキー板のひずみのデータを参考に決定した。なお、研究の対象となった男性には本検証の概要、目的、検証に伴う危険性について詳細に説明し、書面による同意を得た。

その結果を Figure 5 に示した。前傾してスキー板の前方に荷重をした試技ではスキー板の前方のひずみの値が大きくなっており（Figure 5、左）、後傾してスキー板の後方に荷重した試技ではスキー板の後方のひずみの値が大きくなっていた（Figure 5、右）ことが読み取れる。Figure 5 の時系列データを見ると、選手が実際に滑走していることや（平らな斜面であったが）雪面のわずかな凹凸などの影響からひずみの値に変動がみられるものの、前方と後方に荷重した際のスキー板のたわみの特徴を十分に捉えられていると考えられる。このことから、雪上において動的な環境下で

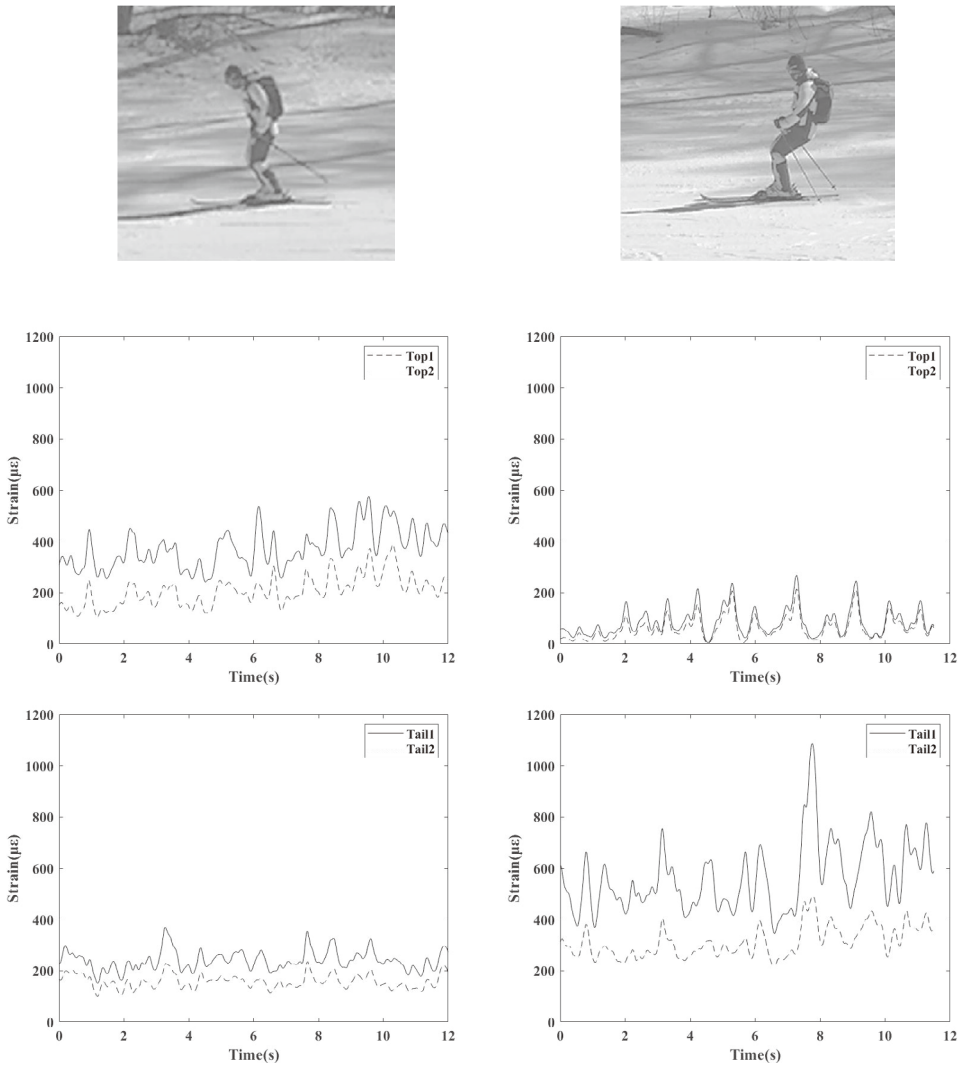


Figure 5. Strain of each sensor during the straight downhill ski run with forward and backward loads.

あっても、スキー板のたわみ計測が可能であることが明らかになった。

Ⅳ．シットスキー選手のターン中のスキー板のたわみとデータ収集に必要なサンプリング周波数

実験室内での検証ならびに雪上での直滑降の計測から、シットスキー選手を対象に FBG を用いたスキー板のたわみの計測を行う準備が整った。そこで、以下の 2 つの目的を設定して、シットスキー選手のターン中のスキー板のひずみの計測を行った。1 つ目の目的は、先行研究において報告がされてこなかったシットスキー選手のターン時のスキー板のひずみを定量化し、シットスキー選手の課題を抽出することであった。2 つ目の目的は、ターン中のスキー板のひずみの周波数を分析し、実際の滑走時のスキー板のたわみを計測するために必要な最小限のサンプリング周波数を明らかにすることであった。立位での滑走に比べ、シットスキーでの滑走では、用具による影響もあり、異なった周波数成分を持っている可能性も考えられる。今後、シットスキー選手の滑走時のスキー板のひずみ計測をより簡便なシステムで実施する際に、必要な最小限のサンプリング周波数を理解しておくことは重要であると考えられる。

実験は菅平高原パインビークスキー場 GO の原コース（最大斜度 23°）にて行った。ナショナルチームに所属する男子シットスキー選手 1 名（以下、「トップシットスキーヤー」という）とアルペンスキー経験のある健常な男性 1 名（以下、「スタンディングスキーヤー」という）に、旗門を設定せずフリーで中回りターンを行わせた。なお、トップシットスキーヤーには座位での滑走を、スタンディングスキーヤーには立位での滑走を行わせた。両名共、上述した直滑降の研究と同じスラローム用のスキー板（Rossignol 社製、HERO ATHLETE FIS SL、長さ：165 cm、サイドカーブ：22 m）を使用した。直滑降計測時と同様に、スキー板の長軸の中心線上で、スキーセンターから前方

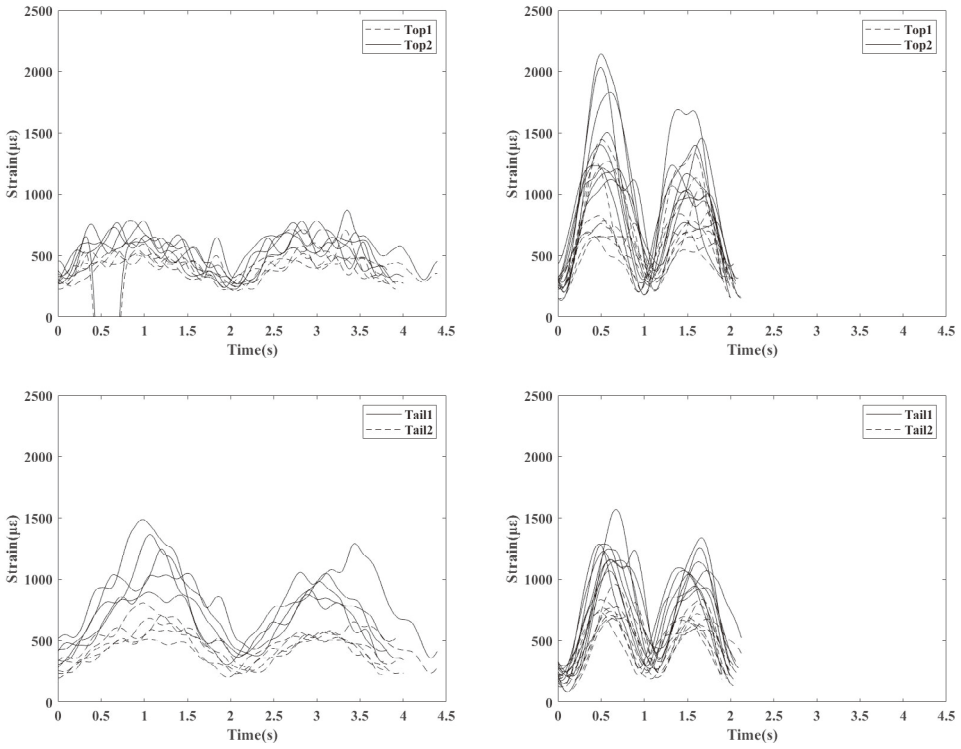


Figure 6. Strain of each sensor during the carving turn of a sit-skier and a standing skier.

に 50 cm、35 cm の箇所（それぞれ Top1、Top2）と後方に 33 cm、47.5 cm の箇所（それぞれ Tail1、Tail2）の計 4 箇所に FBG のひずみセンサーを取り付けた。ターン中のスキー板の 4 箇所のひずみを 1000 Hz で収集し、バターワースローパスデジタルフィルタを用いて 2 Hz で平滑化した。このとき、遮断周波数はスキー板のひずみの生データと平滑化後の波形を見比べることにより決定した。加えて、トップシットスキーヤーのターン中の 4 箇所のひずみの周波数分析を行った。なお、研究の対象となった両名には本研究の概要、目的、実験に伴う危険性ならびに得られる効果（利益）について詳細に説明し、書面による同意を得た。

2 名の選手の複数回のターン中のスキー板のひずみを Figure 6 に重ねて示した。スタンディングスキーヤーは片脚のみを計測したため、外側の足、内側の足の順にスキー板のひずみを示している。スタンディングスキーヤーは、スキー板全体をたわませながらターンをしていたのに対し（Figure 6、右）、トップシットスキーヤーのスキー板の前方はほとんどたわんでおらず、後方のみをたわませてターンを行っていた（Figure 6、左）ことが読み取れる。これは、トップシットスキーヤーが、スタンディングスキーヤーに比べてスキー板の後方に荷重していたことを示唆している。先行研究において、スキー板の前方がたわむほどスキー板の迎え角が小さくなることが示されている [4]。これは、スキー板の前方をたわませることにより減速の少ないカービングターンを実現させることが可能になることを意味している。特に SL や GS のように細かいターンが求められる種目においては、スタンディングスキーヤーのようにスキー板の前方をたわませて弧の小さいターンを行う技術が求められる。そのため、今後、トップシットスキーヤーはスキー板の前方を含めた全体をたわませる技術の習得が求められる。加えて、その技術が獲得しやすいシットスキーを開発する必要があるだろう。

トップシットスキーヤーのターン中のスキー板のひずみの周波数分析を行った結果を Figure 7 に示した。信号の周波数成分は 100 Hz 以下を主とするものであり、ナイキスト周波数を考慮すると

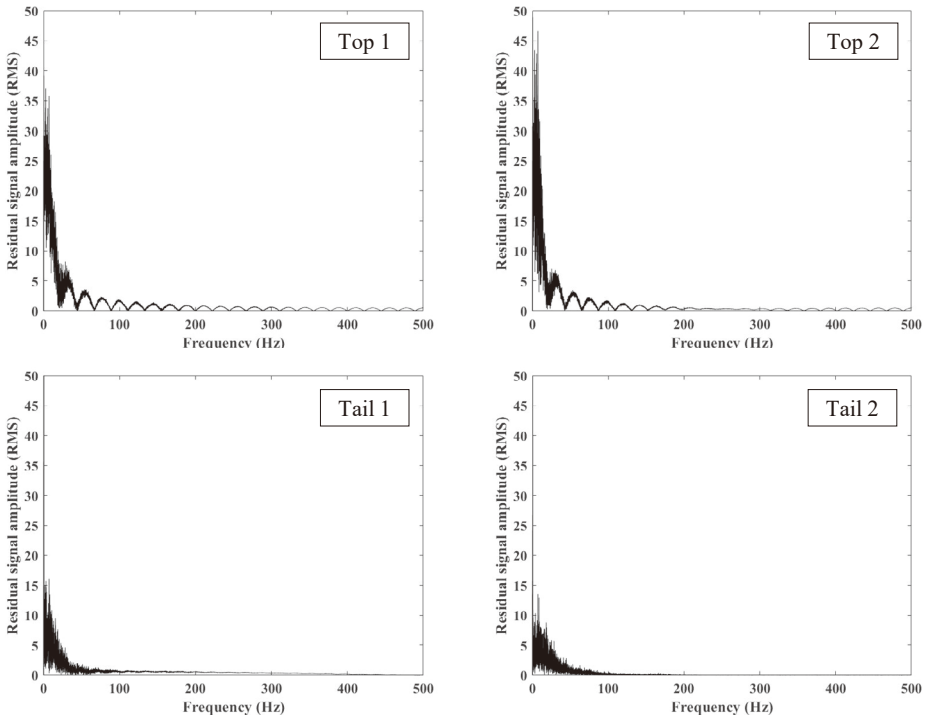


Figure 7. FFT analysis of strain during a carving turn of a sit-skier.

200 Hz を超えるサンプリング周波数を有する機器であれば問題なく計測できることが示唆された。

Ⅴ．小型・軽量化された FBG システムの活用の可能性

これまでの計測で使用してきた FBG は、インテロゲータやデータ収集のためのパソコンのサイズや重量が大きく（インテロゲータ：重量 3.0 kg、横幅 25.9 cm、高さ 7.0 cm、奥行 28.0 cm、パソコン：重量 1.7 kg、横幅 26.8 cm、高さ 3.1 cm、奥行 22.8 cm）、実験機材を入れたリュックを選手が背負って滑走する必要があった（Figure 8）。本研究の計測結果に影響を与えるほどのサイズや重量ではないと考えられるものの、今後実際のレースと同様の環境下で、選手の様々な滑走技術を調べていくためには、より小型で軽量なシステムを用いるのが理想的である。我々が上述した検証を行っている間に、より小型・軽量化された FBG システムが販売されるようになった。現在、製品化されている FBG システムの中で最も小型・軽量な機器（FiSens 社製）であれば、インテロゲータとパソコンはポシェット型の入れ物に収めることができ、総重量も約 0.6kgまで軽量化された（インテロゲータ：重量 0.1 kg、横幅 9.9 cm、高さ 1.5 cm、奥行：6.8 cm、パソコン：重量 0.5 kg、横幅 20.2 cm、高さ 1.8 cm、奥行：13.0 cm）。そのため、今後は、選手への負担を大幅に軽減することができ、よりレースに近い条件下での計測が可能になると考えられる。

しかし、FiSens 社はこの FBG の小型・軽量化に伴って、インテロゲータで反射光を測定するための部品数を減らしたことを発表している。そのため、従来のシステムと同等の精度で計測ができるか否かを事前に検証する必要があった。そこで、これまでの計測で使用してきた Lazoc 社製の FBG と小型・軽量化された FiSens 社製の FBG から得られるひずみの値が一致するかどうかを実験室内で検証した。

FiSens 社製および Lazoc 社製の FBG センサーをアルミ部材（厚さ：3 mm、幅：50 mm、長さ：1000 mm）の中央に貼付し、両端（中央から左右にそれぞれ 300 mm の位置）を台上に固定した（Figure 9）。固定したアルミ部材の中央に質量の異なる重りを吊り下げて、2 つの FBG センサーで測定されるひずみの相関関係を調べた。なお、



Figure 8. Conventional FBG system.

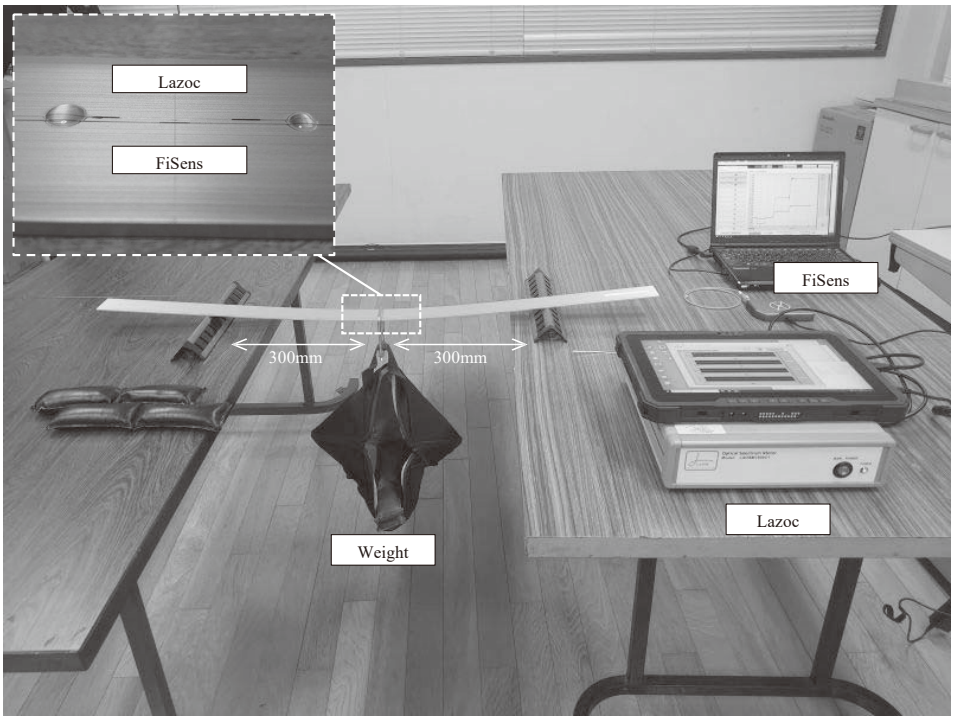


Figure 9. Accuracy verification of the Fisens FBG.

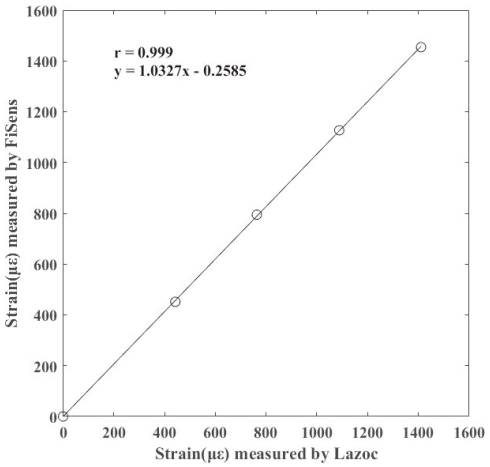


Figure 10. Comparison between strain measured by Lazoc and FiSens.

重りは 0 kg を含めた 5 つの質量に設定し、1 kg ずつ質量を変化させた。FiSens 社製のシステムにおいては Gauß Peak Detection モードにてスペクトルのピーク値を計測した。

その結果、FiSens 社製および Lazoc 社製のシステムで計測されたひずみ量には強い正の相関関係があり（r＝0.999、Figure 10）、両者の値は概ね一致していたことが確認できた。本検証では、スキー板を用いた確認は行っていないものの、両システムでひずみ値が同程度であったことから、スキー板を用いた場合にも同様の結果が得られると考えられる。従って、今後の雪上でのスキー板のたわみ計測において、小型・軽量化された FiSens 社製のシステムは、信号成分がインテロゲータのサンプリング周波数のナイキスト周波数以下であることを前提に Lazoc 社製の FBG と同等精度にて使用できることが確認された。

Ⅵ. 本研究のまとめと今後の展望

本研究資料では、我々がこれまで行ってきた FBG を用いたスキー板のたわみ計測に関する検証実験の結果と、その手法を用いた計測によって明らかになったシットスキー選手の課題について報告した。様々な検証を行った結果、FBG を用いた雪上でのスキー板のたわみ計測が可能であることが明らかになった。これまで一般に用いられてきたひずみゲージと比べ、FBG では一本の信号線において多点での計測が可能であり、選手に

対して、より負担の少ない計測が可能なことが利点である。そのため、今後のスキーやスノーボードの板のたわみ計測で FBG を用いた手法が一般的に用いられていくと期待される。一方で、我々が FBG を用いたスキー板のたわみ計測手法を開発したのとほとんど同時期に、欧州においても異なる手法を用いたたわみ計測の開発も行われている[6),7)]。欧州で開発された手法を用いた研究で得られた結果と我々が提案した手法から得られた結果との比較を可能にするため、今後は両手法間に系統的な差がないかなどを調べることも必要だろう。加えて、本研究資料では、これまで報告がされてこなかったシットスキー選手の滑走中のスキー板のたわみを定量化した。その結果、健常スキー選手（本研究におけるスタンディングスキーヤー）に比べて、シットスキー選手（本研究におけるトップシットスキーヤー）はスキー板の前方をたわませられておらず、スキー板の後方のみが大きくたわんでいたことが明らかになった。今後も日本チームがパラリンピックにおいて継続的にメダルを獲得していくためには、スキー全体をたわませられるようなシットスキーを開発し、シットスキー選手の技術の幅を広げていく必要があると考えられる。

文献

1）Hébert-Losier K, Supej M, Holmberg HC. Biomechanical factors influencing the performance of elite alpine ski racers. Sports Med, 44（4）：519−533, 2014.
2）Howe J. Skiing Mechanics. Poudre Press, 1983.
3）近藤雄一郎，竹田唯史．アルペンスキー回転競技におけるタイム分析―2016 Far East Cup（Jisan）を対象として―．スキー研究, 13（1）：49−57, 2016.
4）Lieu DK, Mote CD. Mechanics of the turning snow ski. Skiing trauma and safety: Fifth international symposium, 117−140, 1985.
5）中里浩介，桜井義久，石毛勇介．アルペンスキー男子回転競技におけるタイム分析―2016 年ワールドカップ湯沢苗場大会を対象として―．Journal of High Performance Sport, 8: 1−18, 2021.
6）Thorwartl C, Kröll J, Tschepp A, Holzer H, Teufl W, Stöggl T. Validation of a sensor-based dynamic ski deflection measurement in the lab and proof-of-concept field investigation. Sensors（Basel）, 22（15）：5768, 2022.
7）Thorwartl C, Kröll J, Tschepp A, Schäffner P, Holzer H, Stöggl T. A novel sensor foil to measure ski deflections: Development and validation of a curvature model. Sensors（Basel）, 21（14）：4848, 2021.
8）Yoneyama T, Scott N, Kagawa H, Osada K. Ski deflection measurement during skiing and estimation of ski direction and edge angle. Sports Eng, 11: 3−13, 2008.