原著論文

スキー板のダンピング特性とその改善†

坂田 敏行* 松前 秀穂** 細川 健治*

Damping Property of Skis and Its Improvement

Toshiyuki SAKATA*, Hideho MATSUMAE** and Kenji HOSOKAWA*

Abstract

Various new models of skis have been sold on the market every year. Some of them feature a superior damping property. However, it is not clear whether the damping property of the ski is important or not. It has not been explained dynamically how the damping of the ski works while skiing, and what function the damping property performs. On the other hand, various damping materials are used for many skis and special considerations are paid to some skis. Nevertheless, the damping property of the skis has hardly been published. In the present study, to make clear the damping property of the skis, an experimental study was carried out on 40 skis which were sold on the market in 1998. The damping properties of the skis were measured by using an experimental modal analysis technique. Next, the effects of a steel ball damper on the damping property of the ski are studied.

Key words : Ski, Damping of Ski, Loss Factor, Steel Ball Damper, Free Vibration of Ski, Experimental Modal Analysis

1. 緒 言

約10年ほど前より、スキー滑走やスキー操作に関する力学的研究が進歩し、スキー板の曲げ剛性や形状がスキー滑走に及ぼす影響が急速に解明されつつある^{1)~5)}。一方、スキー滑走中のスキー板の振動は「スキー板のバタツキ」等の言葉で表現され、しばしばスキー板の性能の一つとして話題にはなっている。例えば、スキー板

の滑走性能に影響する振動を低周波数大振幅の振動、中周波数中振幅の振動、高周波数小振幅の振動に分類し、この中でも中周波数中振幅の振動が滑走性能に特に影響するという説明も行われている。一時期発売された動吸振器付きのスキー板の減衰性能に関する研究⁶⁾では、動吸振器は中周波数の振動に対して効果を発揮するように設計されていることが報告されている。また、スキー滑走の場合には振動を抑え過ぎると

†原稿受付 1999年3月15日

1999年3月 日本機械学会東海支部第48期総会・講演会にて発表

*中部大学

〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200

**中部大学大学院

〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200

*Chubu University, 1200, Matsumoto, Kasugai, Aichi, Japan (487-8501)

**Graduate School of Engineering, Chubu University, 1200, Matsumoto, Kasugai, Aichi, Japan (487-8501)

雪面とスキー板の間の摩擦が増大し、その結果滑走速度が遅くなるので、最適制御が必要であるともいわれている。実際に市販されている最近のスキー板には、動吸振器ではなく減衰材や減衰板が用いられ、特定周波数ではなく幅広い周波数帯の振動を減衰させる工夫がされている。上記のように、スキー板の振動はしばしば話題となり、かつ、実用上でも対策が講じられている。しかしながら、参考文献(6)および著者らの研究報告^{7),8)}以外に、スキー板の減衰性能に関する研究は公表されていない。当然のことながら、スキー滑走に及ぼす振動の影響を力学的に解析した研究も報告されていない。

一般にスキー板の振動を減少させる方法としては(1)スキー板の剛性を大きくする、(2)スキー板の減衰をよくする、(3)スキー板を小さくする、(4)作用荷重を小さくする、(5)共振を避ける、等の方法が考えられるが、スキー滑走においては滑走中の衝撃荷重がランダムに作用するので(5)の方法は不可能に近い。また、滑走ゲレンデを整備し衝撃力を小さくする方法はある程度可能であるが、(4)も現実的ではない。最近では短かいスキー板も販売されているが、一般用ではないので(3)も除外する。(1)のスキー板の剛性を大きくする方法は、滑走性能との関連から曲げ剛性を自由に設計できない制約もあり、現時点では現実的ではない。しかしながら、機能材料の発達や斬新な構造設計法の確立および滑走理論の発達等により、将来的には、スキー滑走の最適制御との観点からスキー板の剛性を変化させることが行われる可能性がある。従って、スキー板の振動を減少させるためには、(2)のスキー板の減衰特性を向上させるのが実用的な方法である。

スキー板の減衰特性に関する研究では、スキー板の減衰特性がスキー滑走にどのように影響するかを力学的に解明することが重要である。その第一歩として、本研究ではスキー板の減衰特性の現状を把握するとともに、スキー板の減衰特性を向上させる方策を試みる。まず最初に、1998年度用に市販されたスキー板40本の減衰特

性を実験的モデル解析法を用いて測定する。次に、スキー板に鋼球ダンパーを取り付けた場合のスキー板の減衰性能を測定し、減衰性能を向上させ得るか否かを実験的に検討する。

2. スキー板の減衰特性の現状

2. 1 実験方法

スキー板に拘束を加えない(すなわち自由境界)状態での曲げ振動モードと減衰特性を測定するため、図1に示すようにスキー板を細い紐で天井より吊り下げた(図は表1の6番のスキー板の場合)。減衰特性の測定は実験的モデル解析法を用いた。テールから75 (cm) のところ(図中の●印)に加速度センサーを接着し、図に示す加振点(○印)をインパルス・ハンマーで加振した。その時の衝撃力と加速度より、伝達関数の一種であるアクセラランスを求めた。実験ではそれぞれの加振点を各5回加振し、アクセラランスの平均化処理をした。求められた平均値に対して多項式カーブ・フィット操作によりアクセラランスの波形修正を行った。アクセラランスより、固有振動数 f とその固有モー

図1 スキー板の自由振動実験例(吊り下げ状態)

ドにおけるQファクターを求めた。測定されたQファクターを、 $\eta=1/Q$ の関係式に代入し、損失係数 η に変換した。なお、図1に示すように、加振点から加振点間の距離を一定(20 (cm))としているため、加振点の数はスキー板の長さに応じて若干変化する。

2. 2 実験用スキー板

測定に用いたスキー板40本の全長、質量、曲げ剛性値およびモデル名を表1に示す。曲げ剛性の値はスキー板の長手方向に変化するが、均質な梁と仮定して実験により曲げ剛性を求めた。

表1 スキー板の全長、質量および曲げ剛性

Number of ski	Length L_n (cm)	Mass M_s (kg)	Flexural rigidity ($\times 10^2 \text{N} \cdot \text{m}^2$)			Ski model
			Forebody	Afterbody	Whole body	
1	198	1.79	2.49	2.39	4.25	GS
2	200	2.08	1.97	1.97	4.02	
3	195	1.63	2.03	2.23	3.69	
4	197	1.90	2.26	1.95	3.99	
5	184	1.65	1.94	1.46	3.07	
6	200	2.02	2.61	3.03	5.32	
7	198	1.81	2.37	2.27	4.26	SL
8	198	1.75	2.28	2.04	3.63	
9	198	1.78	2.68	2.39	4.07	
10	195	1.99	2.13	2.03	3.96	
11	191	1.57	2.74	1.71	3.58	
12	200	1.82	2.19	2.31	4.25	
13	197	1.96	2.90	2.44	4.21	
14	197	1.87	2.43	2.10	4.27	
15	189	1.60	2.10	1.70	3.37	DEMO
16	195	1.76	2.48	1.77	3.88	
17	198	1.81	2.73	1.88	3.98	
18	200	1.79	2.04	1.90	3.83	
19	198	1.99	2.53	2.31	4.15	
20	200	1.52	2.71	1.81	3.86	
21	195	1.79	2.66	2.14	3.94	
22	193	1.76	2.09	1.80	3.63	
23	194	1.91	2.53	1.60	3.71	
24	200	1.96	2.47	1.56	4.78	
25	190	1.60	2.02	1.90	3.52	MOGUL
26	190	1.62	1.72	1.70	2.89	
27	190	1.62	1.82	1.73	3.45	
28	188	1.46	1.71	1.37	2.72	
29	192	1.76	2.35	1.99	4.16	
30	190	1.68	2.09	2.31	3.41	
31	180	1.35	1.38	1.16	2.41	LADIES'
32	180	1.52	1.74	1.64	2.41	
33	160	1.25	1.01	1.05	1.85	
34	178	1.63	1.72	1.49	3.18	
35	185	1.26	2.04	1.79	3.12	
36	170	1.31	1.58	1.24	2.41	
37	188	1.48	1.69	1.66	2.89	
38	178	1.57	1.59	1.37	2.72	
39	173	1.39	1.37	1.16	2.25	
40	185	1.61	1.64	1.57	3.01	

スキー板のテールから5cmの位置をA点, ティップ(トップとも呼ぶ)から23cmの位置をB点, ABの中点をC点とする。スキー板の前半部(BC部分), 後半部(CA部分)および全体(BA部分)をそれぞれ均質な梁と仮定し, 両端単純支持された梁の中央に集中荷重を作用させる曲げ試験を行った(実験の詳細は参考文献(9)参照)。

本研究で実験したスキー板の中にも減衰特性を変化させるための様々な工夫がされている場合もある。その工夫により, 減衰特性がどの程度変化しているかは非常に興味のあるところで

はあるが, その工夫の詳細, 設計者の意図, 工夫しない場合のスキー板の減衰特性等は不明である。また, 本研究, 特に本章, の主旨は個々のスキー板の減衰特性の比較ではなく, 一般に市販されているスキー板の減衰特性の現状把握であり, スキー板に施されている減衰の工夫は省略する。

2.3 測定結果

測定したスキー板の減衰特性を図2に示す。縦軸は損失係数を, 横軸はスキー番号を示す。

図2 '98年度用の市販スキー板40本の減衰特性

表2 実験に用いた鋼球ダンパー

Damper	Radius of steel ball (inch)	Total Mass (g)	Mass of steel ball (g)	Mass of case (g)
Damper 1	6 / 32	27.7	22.2	5.5
Damper 2	6 / 32	49.9	44.4	5.5
Damper 3	6 / 32	94.3	88.8	5.5
Damper 4	5 / 32	49.9	44.4	5.5
Damper 5	4 / 32	49.9	44.4	5.5

スキー板により異なるが、1次～5次までの固有振動数は概略20, 40, 70, 110および160(Hz)であり、振動モードは帯域幅200(Hz)で測定した。それより高周波数の場合は帯域幅500(Hz)で測定した。多くのスキー板の場合、基本振動モードにおける損失係数はほぼ 0.5×10^{-2} 以下であった。また、それぞれのスキー板について、振動数を横軸に、減衰特性を縦軸にとり実験結果を整理する¹⁰⁾と、減衰特性と振動数との関係の概略の傾向としては、

1. 振動数が大きくなるにつれて、損失係数も明らかに大きくなる、
 2. 200(Hz)～300(Hz)での損失係数が大きくなる、
 3. 損失係数がわずかしき大きくなる、
 4. その他、
- の4種類に大別できることが明らかになった。

3. スキー板における減衰特性の改善

スキー板の振動がスキー滑走に有益か否か定かではないのが現状である。しかしながら、スキー板の減衰特性は比較的頻繁に話題にされるとともに、スキー滑走に最適となるように減衰特性を調整していると思われる様々な工夫が施されたスキー板も販売されている。古くから現在まで一貫して用いられている対策としては減衰特性の良い材料を使用することが挙げられる。また、動吸振器をスキー板に接着することも行われている⁹⁾。さらに、最近では新しい材料、新しい機構を用いた減衰特性の改善策も行われている。例えば、スキー板販売用のPR記事には(詳

細な構造は不明であるが)、ピエゾスマートストラクチャー、デュアルVAS、Traction Power System, MAGNETIC、アクセラレーター、CCSインタラクティブ等と名付けられた工夫が説明されている。

本研究では、表2に示す5種類の鋼球ダンパーを用いて実験を行った。鋼球ダンパーとは、表2に示す説明図より明らかなように、直径31mm、高さ53mmのプラスチック円筒に小さい鋼球を多数詰め込んだものである。Damper 3の場合には約30mmの高さまで鋼球が詰まっている(すなわち、上部の隙間は約20mm)。Damper 2では約15mmの高さまで鋼球が詰まっている。Damper 4およびDamper 5の場合には、用いられている鋼球の全質量はDamper 3と同じであるが、鋼球の大きさが小さいので、鋼球の詰まっている高さは多少低く(上部の隙間は大きく)なっている。

3. 1 実験方法

表1に示したスキー板の曲げ試験の結果より、全体の曲げ剛性が一番小さいスキー板(スキー番号26, スキーAとする)、全体の曲げ剛性が一番大きいスキー板(スキー番号6, スキーBとする)、そして、スキーAと同一メーカー製で、全長がスキーBと等しく曲げ剛性がスキーAに比較的近いスキー板(スキー番号18, スキーCとする)を実験に用いた。表2に示す鋼球ダンパーの底部をスキー板に接着して実験を行う場合、図1に示すように、天井より細い紐でスキー板を吊り下げて実験を行うと、鋼球の水平運

写真1 スキー板の減衰振動実験（片持ち状態）

図3 鋼球ダンパーに使用する鋼球の大きさの影響（スキーA）

動により減衰効果が得られる。一方、実際のスキー板の使用状態では写真1に示すように、鋼球の垂直運動により減衰効果が得られると考えられる。鋼球の水平運動と垂直運動では摩擦等の影響により、減衰機構が異なってくると考えられる。本研究では写真1に示すように、曲げ剛性実験で用いたC点（2.2節参照）でスキー板を強固な治具を用いて固定し、スキー板の前半部について鋼球ダンパーの効果を検討した。鋼球ダンパーの位置は固定端からの距離 a で示す。損失係数の測定は2章で説明した実験のモーダル解析法を用いて行った。また、スキー板の振動モードを考慮して鋼球ダンパーの接着位置を決定した。

3.2 鋼球ダンパーに使用する鋼球の大きさの影響

鋼球の大きさが損失係数 η に及ぼす影響を比較検討するために、スキーAの固定端から80(cm)の位置(すなわち $a=80(\text{cm})$)に全質量が49.9(g)で鋼球の直径が異なる3種類のダンパー(Damper 2, Damper 4およびDamper 5)を取り付け加振実験を行った。その結果を図3に示す。3種類のダンパーの効果についての有意差は認められないが、Damper 2(鋼球の直径は6/32(inch))が多少効果的な数値を示したので、スキーB、スキーCについても鋼球の直径が6/32(inch)のダンパー, Damper 1~Damper 3, を用いて実験を行った。

3. 3 鋼球ダンパーの質量の影響

固有振動数 f ならびに損失係数 η に及ぼすダンパー質量の影響を検討するために、表 2 に示す 3 種類のダンパー (Damper 1 ~ Damper 3) を固定端から 80 (cm) の位置 (スキー A の場合) または固定端から 88 (cm) の位置 (スキー B およびスキー C の場合) に接着し、実験を行った。その結果を図 4 ~ 図 6 に示す。実験結果より、

基本および 2 次の振動における損失係数は鋼球ダンパーの影響をほとんど受けない。しかしながら、3 次以上の振動の場合には、鋼球ダンパーの影響が顕著に現れる場合もあることが明らかになった。上記の結果より、減衰特性には振動モード、スキー板の曲げ剛性および鋼球ダンパーの取り付け位置と質量等が複雑に影響していると考えられる。

図 4 鋼球ダンパーの質量の影響 (スキー A)

図 5 鋼球ダンパーの質量の影響 (スキー B)

図 6 鋼球ダンパーの質量の影響 (スキー C)

3. 4 鋼球ダンパーの位置の影響

損失係数に及ぼすダンパーの取り付け位置の影響を検討するため Damper 3 (全質量 94.3 (g), 直径 6/32 (inch)) を, スキー A, スキー B および スキー C に取り付けした。また, スキー B については図 5 の 3 次モードにおいて Damper 2 が最も効果があったので, Damper 2 および Damper 3 の両方で実験を行った。鋼球ダンパーの取り付け位置は各スキー板の振動モードの腹の位置に取り付けた。すなわち, スキー A の場合には $a=56$ (cm) (2 次モードの腹), $a=40$ (cm) (3 次モードの腹) または $a=80$ (cm) (3 次モードの腹), $a=88$ (cm) (4 次および

5 次モードの腹) とした。スキー B の場合には, $a=64$ (cm) (2 次および 4 次モードの腹), $a=40$ (cm) (3 次モードの腹), $a=80$ (cm) (3 次および 5 次モードの腹), $a=88$ (cm) (4 次モードの腹) とした。スキー C の場合にはスキー B と同じ位置にダンパーを取り付けた。実験結果を図 7 ~ 図 10 に示す。図 7 ~ 図 9 より明らかのように, スキー A, B, C とともに 2 次以上の振動モードでは, ダンパーの効果が大いことが明らかになった。しかしながら, スキー B の 2 次モードのように, ダンパーの効果がほとんど認められない場合も見受けられた。そのような場合にも, スキー B については, ダンパーの接着位置は変えずにダンパーを Damper 3 から

図 7 鋼球ダンパーの位置の影響 (スキー A, Damper 3)

図 8 鋼球ダンパーの位置の影響 (スキー B, Damper 3)

Damper 2に変更することにより2次モードの損失係数は多少改善された(図10)。

3. 5 複数の鋼球ダンパーを使用した場合の効果

スキーAの場合に効果のあった位置, $a = 56, 80$ および $88(\text{cm})$, に同時に Damper 3を接着し加振実験を行った。その結果を図11に示す。また, スキーB, Cについても同様の実験を行った。実験結果を図12~図13に示す。図より明らかなように, 基本および2次振動モードを除い

て, 減衰特性を著しく改善することができた。

4. 結 論

1998年度に市販されたスキー板40本の減衰特性を実験的モーダル解析法を用いて測定した結果, 損失係数と振動数との関係に関して, 以下の4種類の傾向が見受けられた。

- 1) 振動数が大きくなるにつれて単調に損失係数も大きくなる。
- 2) 200 (Hz) ~300 (Hz) での振動数で極大値を示す。

図9 鋼球ダンパーの位置の影響 (スキーC, Damper 3)

図10 鋼球ダンパーの位置の影響 (スキーB, Damper 2)

図11 3個の鋼球ダンパーを使用した場合の減衰効果（スキーA）

図12 3個の鋼球ダンパーを使用した場合の減衰効果（スキーB）

図13 3個の鋼球ダンパーを使用した場合の減衰効果 (スキーC)

3) 振動数に関わらず損失係数がほとんど大きくならない。

4) その他。

次に、鋼球ダンパーを用いて、スキー板の減衰特性の改善を試みた。その結果、鋼球ダンパーに関しては以下のことが明らかになった。

- 1) 質量が大きい程損失係数も大きくなり効果的である。
- 2) 接着位置によって効果的に損失係数を大きくできる。
- 3) 複数の鋼球ダンパーを用いれば、基本と2次振動モードを除く多くのモードで著しく減衰効果をあげることができる。

参 考 文 献

- 1) Sakata T., Simulation of a ski turn, The engineering of Sport (Proceeding of The 2nd International Conference on The Engineering of Sport), pp.361-368, 1998.
- 2) 坂田敏行, 古居 健, スキー板の形状および機械特性に関する考察—スキーターンに及ぼす影響—, 日本スキー学会誌, Vol.5, No.1, pp.187-196, 1995.
- 3) 坂田敏行・谷徳之, スキーターンに及ぼすスキー滑走系の影響—板曲げ理論による解析—, 日本スキー学会誌, Vol.7, No.1, pp.193-204, 1997.
- 4) 坂田敏行・谷徳之・鳴崎竜也, スキーターンに及ぼすスキー板の幅, 長さおよび曲げ剛性の影響, 日本機械学会論文集(C), Vol.64, No.625, pp.3294-3299, 1998.
- 5) 坂田敏行・月山雅晴, スキーターンに及ぼすシェーセント位置の影響, 日本機械学会論文集(C), Vol.64, No.628, pp.4611-4617, 1998.
- 6) 祖父江清恭・坂田敏行, スキー用減衰器の減衰効果, 中部大学工学部紀要, Vol.24, pp.11-15, 1988.
- 7) 松前秀穂・坂田敏行・細川健治, スキー板のダンピング特性の現状について, 日本機械学会講演論文集,

- No.97-10-1, pp.241-244, 1997.
- 8) 松前秀穂・坂田敏行・細川健治, スキー板の減衰特性に関する研究, 中部大学工学部紀要, Vol.34, pp. 69-73, 1998.
- 9) Sakata T., Considerations on Mechanical Properties of Skis, SKIING TRAUMA AND SAFETY (Proceedings of Sixth International Symposium), STP938 (ASTM), pp.86-99, 1987.
- 10) 松前秀穂・細川健治・坂田敏行, スキー板の曲げ振動の考察と減衰比の改善, 日本機械学会講演論文集, No.993-1, pp.401-402, 1999.