

三菱ターボスノーマシンの開発

Development of Mitsubishi Turbo Snow-Making Machine

横浜製作所 近藤時生*¹ 菊池重光*²
技術本部 松尾栄人*³ 大久保精二*⁴

最近の暖冬化の影響で、従来の人工降雪設備では造雪できない状況が生じている。このために、気温10℃においても自然の雪質の人工雪を得ることができ、雪質調整が可能であるとともに、従来の人工降雪設備との設備の共用ができる装置の開発が要望されてきた。そこで今回、高膨張比の膨張タービンと加圧空気と水の二流体ノズルを使用した自走式の小形造雪機を開発した。この造雪機では、7 kgf/cm²の加圧空気を断熱膨張させ、約-90℃の冷風を得ることができた。さらに、この冷風中で加圧水を噴霧することにより、+10℃の外気温で、雪密度0.4の良質の人工雪を得ることができた。

Because of global warming, the atmospheric temperature may be more than 0℃ in winter, and existing snow-making systems will not be able to make artificial snow. So, it was necessary to develop a new type of snow-making machine which could make artificial snow having the natural quality fall on the surface ground of ski piste directly, vary the kind of snow which means from dry snow to wet snow, and be able to be fitted to existing snow-making systems. We have developed a compact snow-making machine which makes use of a turbo expander with a high expansion ratio. This snow-making machine can make cold air with a temperature of -90℃ using adiabatic expansion with compressed air at a pressure of 7 kgf/cm², and make artificial snow at an atmospheric temperature of 10℃, using the cold air mentioned above.

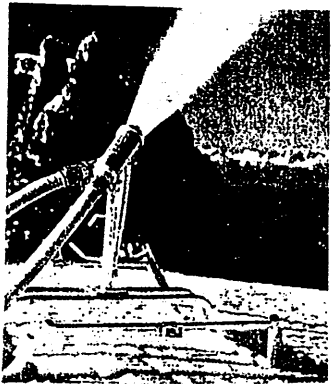
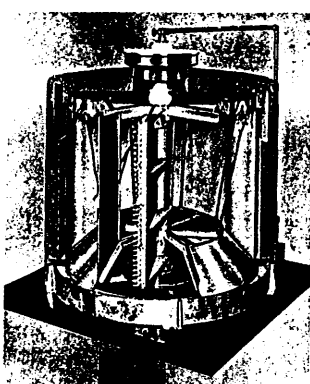
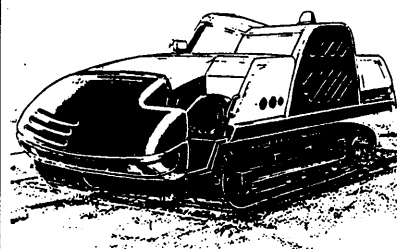
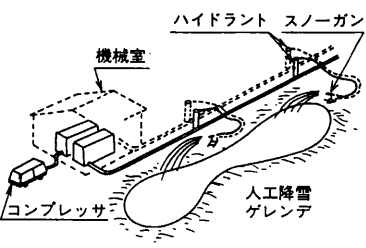
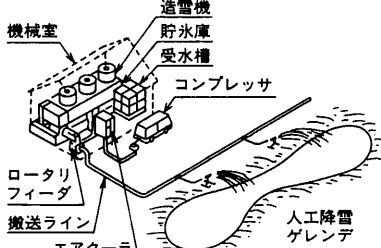
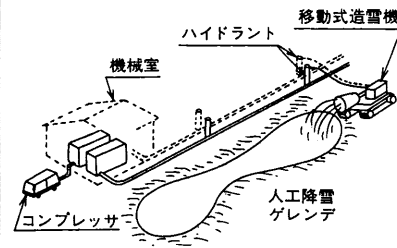
1. ま え が き

天然スキー場における従来の人工降雪設備⁽¹⁾は、スノーガンやファンを用いた方式によるものであった。これらの方式の造雪原理は、加圧水を噴霧し、自然の冷気を利用して噴霧水滴を凍結させ、ゲレンデに人工雪を積雪させるものであった。このために、ゲレンデにおいて、気温が0℃以下でなければ造雪できないという制約があった。

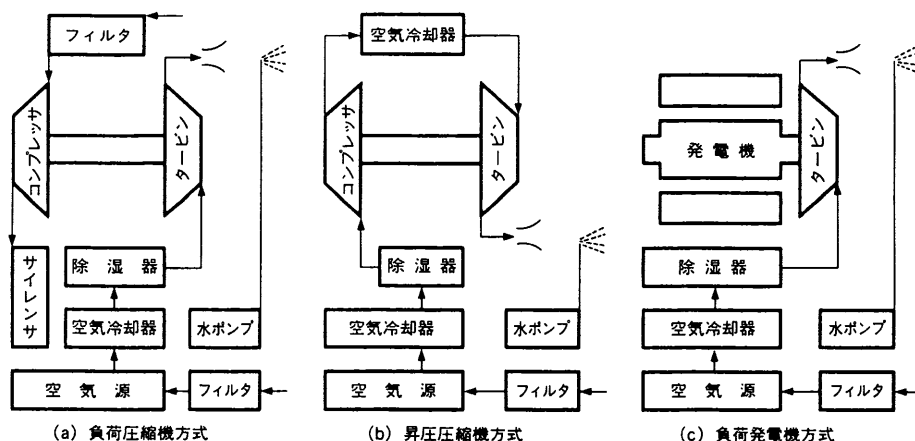
しかし、最近の暖冬の状況は、気温が0℃以下にならないという場合も生じている。このため、気温が0℃以上でも造雪を行う方式として、氷を雪状に加工する方式⁽²⁾が採用されている。しかし、この場合には、氷の確保、購入、搬送、砕氷などの課題がある。また、氷を加工した人工雪であるため、滑走性や天然雪との混和などの違和感が指摘されている。そこで、

- (1) 自然雪と同じ雪質を得る造雪、
- (2) 0℃以上での造雪、

表1 各種人工降雪設備システム
General view of snow-making machines

	スノーガン方式	製氷方式	ターボスノーマシン方式
造雪機			
設備システム			

*1 鉄構技術部開発設計課主務 *3 長崎研究所ターボ機械研究室主査
*2 鉄構技術部プラント設計課 *4 横浜研究所熱・化学研究室



(3) 乾雪から湿雪までの任意の雪質で造雪、
(4) スノーガン方式の人工降雪設備との共用、
などの点を目標として、膨張タービンを使用した“三菱ターボスノーマシン”を開発した。表1に、スノーガン方式、製氷方式、及びターボスノーマシン方式の人工降雪設備システムを示す。

本報では、このターボスノーマシンの概要と性能検証結果について紹介する。

2. 膨張タービン

2.1 膨張タービンの基本計画

人工降雪機用膨張タービンの計画条件として、

- (1) 自走台車への搭載 振動・衝撃 (2 G)・傾斜 (30°),
 - (2) 温度降下 100 ℃,
 - (3) 無公害・低騒音,
 - (4) 小型軽量・低コスト,
 - (5) 従来の人工降雪設備の空気源使用,
- を設定した。

膨張タービンは、加圧空気をタービンホイール内にて膨張させ、発生する動力を吸収することで、低温空気を効率良く得ることができる。この発生動力の吸収方式は、下記に示す3基本形式に分類できる（図1参照）。

- (1) 負荷壓縮機方式
- (2) 昇圧壓縮機方式
- (3) 負荷發電機方式

さらに、この3基本形式の組合わせにより多くの方式が考えられる。これらの方式にはそれぞれの特長を有しているが、今回は(1)の負荷圧縮機方式を採用した。

2.2 膨張タービンの基本設計

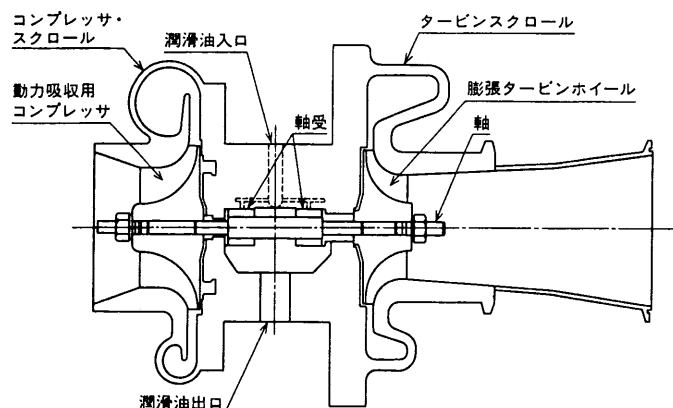
人工降雪用膨張タービンの設計条件は、従来の人工降雪設備の空気圧が一般に $7 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ であることから、配管等の圧力損失分として 1 kgf/cm^2 を差し引いた値にタービン入口圧力を設定した。

- 膨張圧力比 7.0
- 空気流量 60 Nm³/min

この設計条件に対応する膨張タービンの動翼外径 D と回転数 N の関係は、比速度 N_s と理論速度比 U/C_0 を設定することにより式(1)にて決定される。

$$D=f(N_s, U/C_0) \cdot N \quad (1)$$

回転数はタービンの発生した動力を吸収する同軸上に設けられたコンプレッサの最適回転数範囲から制約される。これらの条件から膨張タービンの設計回転数と動翼外径は、



- 設計回転数 43 500 rpm
 - 動翼外径 150 mm
- が決定された。

2.3 膨張タービンシステムの構造

今回開発した膨張タービンシステムの構造を図2に示す。当社で量産し、高い信頼性と高性能を有する小型過給機の構造⁽³⁾を踏襲するとともに、人工降雪機用として次のような設計を行った。

- (1) 高圧力比設計のタービン流路形状⁽⁴⁾
- (2) 低温で高強度の高力アルミニウムの採用
- (3) 負荷圧縮機羽根車背面に吐出空気圧力をかけたスラストバランス機構
- (4) 潤滑油のタービン及び圧縮機内部への侵入を防止する排出スペースの二重化構造

2.4 機能試験結果

機能試験では、10℃の低温空気を使い、-100℃の空気温度降下を実証した。試験結果を、図3に示す。計画回転数43500rpm、タービン空気流量60Nm³/minにて、計画どおりのタービン出口温度-90℃、タービン効率85%を得ることができ、高性能タービンであることが実証できた。

また軸系振動は、低回転域で $20\text{ }\mu\text{m}$ 、定格回転数で $10\text{ }\mu\text{m}$ であった。さらに、潤滑油の温度上昇は最大で $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、機械的にも十分な安定性を有し、損失が小さいタービンであることが確認された。

3. 造雪システム

3. 1 造雪システム構成要素

ターボスノーマシンにおける造雪は、膨張タービンから放出さ

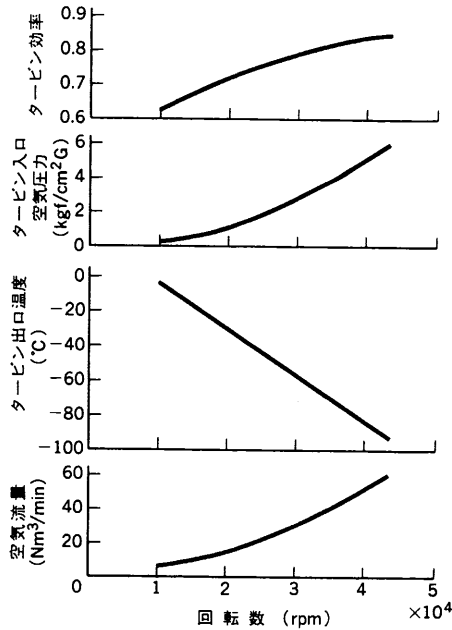


図3 膨張タービン試験結果 膨張タービンの空気流量、出口温度、空気圧力、効率に関する試験結果を示す。
Results of expander turbine test

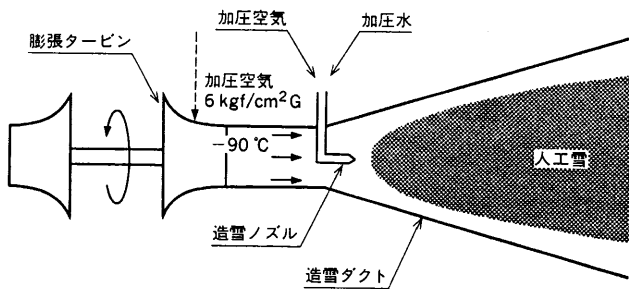


図4 造雪システム ノズルからの噴霧に膨張タービンからの冷気を同伴させ造雪する。
System of snow-making nozzle and duct

れる冷気で造雪用ノズルから噴霧される水粒子を凍結させ、冷気とともに人工雪を放出するシステムである。このシステムには、外部からの常温空気の流入を防止し、効率良く冷気を利用するための造雪ダクトを用いている。この造雪システムの構成を図4に示す。

3.1.1 造雪ノズル

造雪ノズルには、加圧空気と水をノズル内にて混合後、均一な空気と水のジェットとして吹出す二流体ノズルを使用している。

今回採用のノズルは以下の特徴を持つ。

- (1) 水量と水滴径の調節範囲が大きく安定した噴霧が得られる。
- (2) 従来の二流体ノズルに比べ空気消費量が少ない。
- (3) 気液混合部が冷気の外に出ており、凍結の恐れがない。

噴霧角度と粒径の異なる3タイプの吐出形状を有するノズルに関し、供給される空気と水の体積比である気水比と粒径の関係を図5に示す。粒径は細かいほど凍結しやすいが、風による飛散が考えられるため、粒径平均(ザウター平均)で100 μm 以上の大きさが得られる気水比とノズル形状を選定した。

3.1.2 造雪ダクト

膨張タービンからの冷気をそのまま放出すると、常温の外気を巻き込み、急激に温度が上昇し、液滴を凍結させることが困難とな

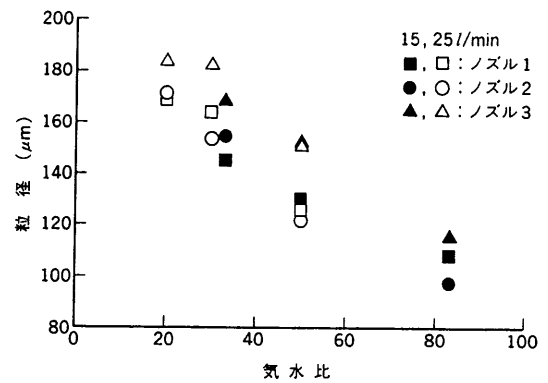


図5 気水比と噴霧粒径 気水比を大きくすると噴霧粒径は小さくなる。
Influence of air/water ratio on spray diameter

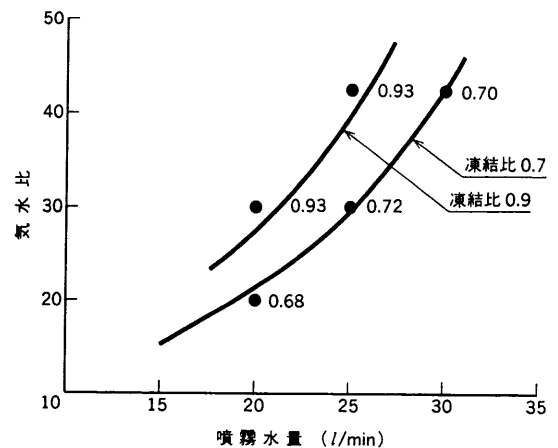


図6 気水比-噴霧水量と凍結比の関係 凍結比0.7ラインより上の領域で良質の雪が得られる。
Effect of air/water ratio and volume of water to freezing ratio

る。そこで、噴霧内に冷気が取込まれるまでは、外気を遮断した方が効率的である。

具体的には、供給空気量と同量の噴霧ジェットに対する同伴流が発生する領域を Ricou と Spalding の同伴方程式により予想し、この領域をダクトによりカバーすることとした。不等密度系に対する同伴質量は式(2)で与えられ、 m_e を膨張タービンからの供給空気量と等しく置くことにより、全量が同伴されるノズルからの距離 X を求めることができる⁽⁵⁾。

$$\frac{m_e}{m_o} = 0.32 \left(\frac{\rho_a}{\rho_o} \right)^{1/2} \frac{X}{d_o} - 1 \quad (2)$$

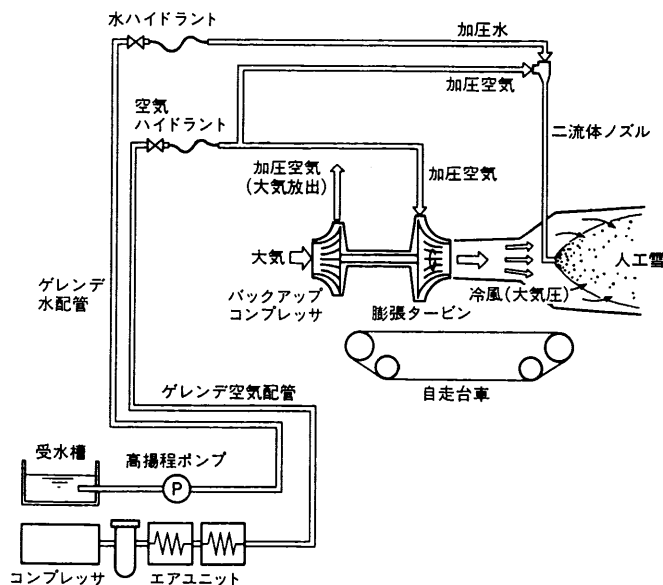
ここで、

- m_e : 同伴質量流量
- m_o : ノズル出口質量流量
- ρ_a : 周囲流体密度
- ρ_o : ノズル出口流体密度
- X : ノズル出口からの距離
- d_o : ノズル出口口径

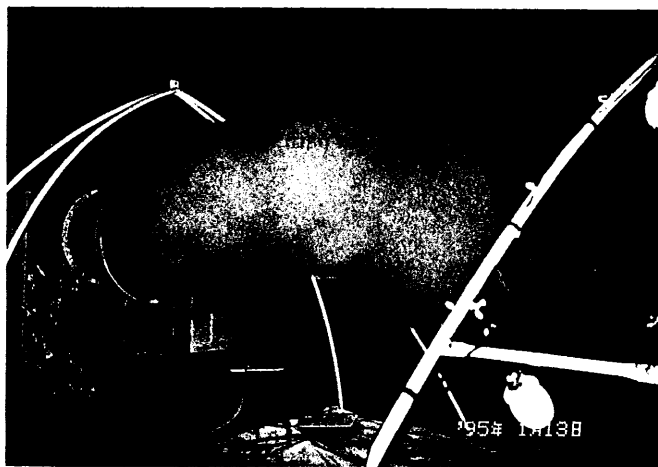
ただし、噴霧液滴がダクト壁面に接触すると瞬時に凍結し、これが成長し閉そくの危険がある。よって、別途流動解析による液滴軌跡の予測及び実際の造雪実験により、噴霧水粒子がダクト壁面に接触しないようなダクト長さや径を定めた。

3.2 造雪試験

造雪試験では、想定造雪量の20 l/minに対応する試作機を製



(a) ターボスノーマシン人工降雪システム



(b) 造雪状況

図7 ターボスノーマシン人工降雪システム及び造雪状況 ターボスノーマシンを使用した人工降雪システムの全体(a)及びその造雪状況(b)を示す。

System and working condition of turbo snow machine

作り、防風テント内への造雪を行った。

造雪時の雪質は、雪中の凍結水分重量と、未凍結水分を含む雪全体重量との比である凍結比により評価される。図6にノズル気水比と噴霧水量及び凍結比との関係を示す。図6には、湿雪である凍結比0.7と、乾雪である0.9ラインを示している。計画水量(造雪量)で凍結比0.9以上の極めて良質の雪を得ることができた。

また、計画水量より多い30 l/minの場合でもノズル気水比を上げることで凍結比0.7以上の雪を得ることができた。このことは、気水比を大きくすると、空気の噴出速度が速くなるとともに、噴霧水粒径が小さくなるため、伝熱効率が良くなり、凍結が促進されるためである。

4. ターボスノーマシンシステム

膨張タービンが小型であるという特長を利用し、造雪機を自走台車に搭載し可搬式とすることができた。

ターボスノーマシンによる人工降雪システムを、図7(a)に示す。自走台車上に搭載された膨張タービンで使用する空気は、造雪ゲレンデ外に設置されるコンプレッサにより加圧され、エア

表2 ターボスノーマシン試験システム要目
Particulars of turbo snow machine test system

項目	内容
膨張タービン部 使用空気量 入口空気圧	60 Nm ³ /min 6 kgf/cm ² G
造雪部 造雪量 二流体ノズル	30~45 t/d 1式
自走台車 全長 全幅 全高 総重量 走行用エンジン	3 600 mm 2 100 mm 2 000 mm 3 100 kg 水冷4気筒4サイクルディーゼル 3 300 cc×82 PS
人工降雪プラント エンジンコンプレッサ エアフィルタ エアクーラユニット 高揚程ポンプ	15 Nm ³ /min×7 kgf/cm ² G×4台 (別途予備機1台) 30 Nm ³ /min×2台 30 Nm ³ /min×12 kW×2台 100 l/min×7.5 kW×1台

フィルタ及びエアクーラユニットを経由して、ゲレンデ配管及び空気ハイドラントを通じて、自走台車に供給される。

また、膨張タービンから得られた約-90℃の冷風の下で、加圧水及び空気を使用する二流体ノズルにより噴霧された水滴を凍結させて造雪し、この人工雪をゲレンデに直接に散布し積雪させる[図7(b)参照]。造雪検証試験に使用したターボスノーマシンシステムの要目を表2に示す。

5. む す び

膨張タービンを用いたターボスノーマシンの造雪性能の検証結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 単段で膨張比7、空気流量60 Nm³/minの膨張タービンを開発し、タービン出口空気温度約-90℃を得ることができた。
- (2) 外気温10℃程度の場合に30~45 t/dの造雪能力を有する小型造雪機を開発した。
- (3) (2)の造雪機を自走台車に搭載したターボスノーマシンを、実際の人工降雪プラントにて運転し、造雪性能を検証した。

今後のターボスノーマシンの技術テーマとしては、客先のニーズに合わせた空気量や圧力比の膨張タービンを開発するとともに、人工降雪自動化システム⁽⁶⁾への組み込みや、屋内人工スキー場⁽⁷⁾などの各種スノーアミューズメント設備への採用が考えられる。

参 考 文 献

- (1) 近藤時生ほか、三菱人工降雪システムの開発、三菱重工技報 Vol. 28 No. 5 (1991) p.468
- (2) 狭山スキー場向け人工降雪設備、三菱重工技報 Vol. 25 No. 1 (1988) p.101
- (3) Akita, H. et al., An engine performance improvement with a new developed turbocharger, 18th CIMAC Tianjin (1986) p.1 461
- (4) 松尾栄人ほか、高圧力比ラジアルタービンの基礎研究、日本ガスタービン学会第10回定期講演会論文集(1982) p.115
- (5) Beer, J. M., Chigier, N. A., Combustion Aero Dynamics [日本語訳、燃焼の空気力学、(財)省エネルギーセンタ]
- (6) 近藤時生ほか、三菱人工降雪自動制御システムの開発、三菱重工技報 Vol. 30 No. 6 (1993) p.515
- (7) 近藤時生、レジャー施設における冷熱利用、電熱(日本電熱協会) No. 69 (1993) p.38