

雪冷房によるアンモニアガスの吸収効果*

飯嶋和明^{*1}, 媚山政良^{*2}, 王愛栄^{*3}
小関多賀美^{*4}, 近藤昌人^{*5}

Absorbability of Ammonia Gas from Room Air by Snow Cooling System

Kazuaki IJIMA, Masayoshi KOBIYAMA, Ai-rong WANG,
Takami KOSEKI and Masahito KONDOU

Snow has been already used effectively as the coolant for refrigerator in some heavy snowfall area in Japan. As the surface of snow is covered with cold melting water, we can expect the gas absorption on the surface. By this mechanism, the snow is able to remove some contaminants from air such as dust or harmful gases. As in the snow cooling system, air is cooled directly by the surface of vertical snow hole drilled through snow pile, some contaminants are removed automatically and simultaneously with heat transfer process. The heat and mass transfer process are very complicated because the surface area of snow decreases and the shape of snow changes in accordance with its melting process. In this study, the authors measured the absorbability of ammonia gas as the example of contaminant of room air with a pilot plant of the snow cooling system. Experimental results show that the mass transfer rate of ammonia through the melting snow surface is dependent on air flow rate and ammonia concentration, but is not dependent on the volume of snow remaining. And it is cleared that this filter effect of the snow surface can be applied to actual use of contamination control of air conditioning.

Key Words: Snow, Air conditioning, Contamination control, Filter, Absorbability, Ammonia, Mass transfer

1. 緒言

天然の冷熱源である雪を夏期まで保存して、室内または倉庫内の冷房に利用する技術が最近実用化されつつある⁽¹⁾。豪雪地帯でありながら夏は暑く冷房を必要とするような地域にとって厄介者の雪が夏期有効に利用できるようになり今後の普及が期待されている。ここで検討する雪-空気直接熱交換方式による雪冷房システムは空気を雪面に直接接触させて熱交換を行う方法である⁽²⁾。この方法の利点は、雪を溶かして冷水として用いる方法に比べてポンプや熱交換器などの機器が不要になるためにシステムの構成が簡単になることにある。また運転期間中の残雪量の変化に対して、雪と空気との交換熱量が大きく変化しないような工夫がなされ、安定した冷房を手軽に利用できることを可能にしている⁽³⁾。

この雪-空気直接熱交換方式のもう一つの大きな利

点は雪面に直接空気が触れることにより、空気中の汚染物質であるじんあいや各種有害ガスなどが雪面で吸収除去されることにある。オフィスビルや一般住宅などで最近注目されている室内空気汚染の問題の解決につながる一つの技術としてその除去効果が期待できる。しかし、吸収面が凹凸の多い雪面であり、しかも融雪とともにその表面が複雑に変化すること、これに従って空気の流れの状態も変化すること、空気の入口条件により融雪量すなわちガスを吸収する液量に変化することなど、複雑な現象を考慮する必要があり、吸収効果を定量的に把握することは容易ではない。ここではその吸収効果を定量、整理するために実用的な大きさの貯雪槽の模型を作り実験を行い検討した。空気中の汚染物質としては、じんあい、窒素酸化物、硫黄酸化物およびアンモニアなどいくつか考えられるが、本報告では、冷房期間中でもその存在が問題となりやすいアンモニアを実験の対象とした。実験結果から物質移動係数を算出し、ぬれ壁塔における物質移動の代表的な研究である Gilliland-Sherwood の結果⁽⁴⁾ との比較も行った。

2. おもな記号

A : 雪の表面積 m^2

* 原稿受付 1997年3月19日。

^{*1} 正員、三機工業(株)技術研究所 (〒242 大和市下鶴間1742-7)。

^{*2} 正員、室蘭工業大学工学部 (〒050 室蘭市水元町27-1)。

^{*3} 正員、室蘭工業大学大学院。

^{*4} 三機工業(株)技術研究所。

^{*5} 学生員、室蘭工業大学大学院。

C : アンモニアの濃度 mol/m^3
 c_{pa} : 空気の定圧比熱 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 D : アンモニアの拡散係数 m^2/s
 d : 雪の孔の直径 m
 H : 雪高さ m
 J : 物質移動量, 流束 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 k : 物質移動係数 m/s
 L_o : 雪の融解熱 kJ/kg
 m : アンモニアの気液平衡定数
 Re : レイノルズ数 $\equiv u\cdot d/\nu$
 Sh : シャーウッド数 $\equiv k\cdot d/D$
 t : 温度 $^{\circ}\text{C}$
 u : 雪の孔通過時の空気の平均速度 m/s
 V : 流量 m^3/s
 Z : 残雪率(雪の容積の初期容積との比)
 ρ : 空気の密度 kg/m^3
 ν : 空気の動粘性係数 m^2/s

添字

g : 気体
 i : 気液界面
 in : 入口
 l : 液体
 out : 出口

3. 雪-空気直接熱交換方式 雪冷房システム

実用化されている雪冷房のシステムの一例を図1に示す⁽⁵⁾。システムは貯雪槽とダクト、給気ファンおよび流量制御機器とで構成されており簡単である。冬期、雪を貯雪槽内に蓄え、夏期この雪を用いて室内の冷房を行う。冷房運転時には室内の空気をダクトを通して貯雪槽に送る。貯雪槽内の雪には必要な数の孔があけられ、空気はこの雪の孔を通過する過程で冷やされる。

貯雪槽で冷やされた空気と貯雪槽をバイパスした空

気および外気とを給気ファンの手前で混合し、適当な温度に調整して室内に供給する⁽⁶⁾。雪のぬれ表面には空気を冷やすほかに空気中の水分を取り除く除湿効果や、ここで検討する空気中の汚染物質を除去するフィルタ効果が期待できる。アンモニアガスはこの雪のぬれ表面の融雪水とアンモニアとが接触することによって吸収される。本研究では雪の孔一つ分を切り取った大きさの模型を作成して実験を行った。

4. 実験装置および方法

4.1 実験装置 雪冷房実験装置のフローを図2に示す。インバータ付き送風機によって空気を設定流量で貯雪槽内に送り込む。空気温度は夏の冷房時を想定して、自動調節器を取付けたヒータを用いて調整する。試験ガスであるアンモニアガスはポンベからマスフローコントローラを用いて設定濃度になるように一定流量供給する。空気の流量はオリフィス式流量計によって測定する。また、ガス濃度を測定するためのサンプリング口は貯雪槽入口と貯雪槽出口とに設け、サンプリングチューブにはアンモニアの吸着の影響を考慮してテフロンチューブを用いた。アンモニアの分析には化学発光方式の分析計を用い、サンプリングラインと切換器を介して接続し、一定時間間隔で入口と出口との濃度を切換えて測定できるようにした。

貯雪槽の断面図を図3に示す。貯雪部の寸法は、上部1000 mm×1000 mm、下部900 mm×900 mmであり、実験時には雪を高さ2000 mmまで詰め、密度を約630 kg/m³とした。貯雪槽壁面は厚さ100 mmのポリスチレンフォーム(B類第2種)で断熱した。貯雪槽の入口は内径100 mmの丸ダクトとし、槽上部に整流板を2枚設けて風速分布を整えている。槽下部はエキスパンドメタルを設け雪と融雪水の分離および空気の流路の確保をしている。

4.2 実験方法 雪は重さを計測した後に貯雪槽内に運び込み、十分に踏み固めてできるだけ充てん密

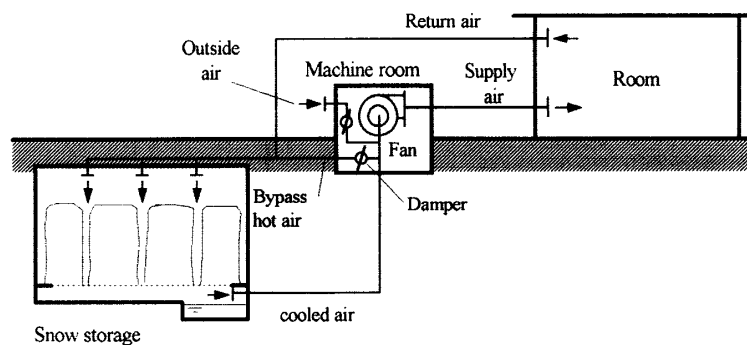


Fig. 1 Schematic diagram of snow cooling system

度にばらつきがないように配慮した。雪の中央に直径約 50 mm の孔を水道水を用いて上から下に貫通させて空気の通路を作った。実験は、入口空気温度 30°C、流量 0.0255 m³/s 一定とし、アンモニア濃度をそれぞれ 0.42×10⁻⁴, 1.33×10⁻⁴, 2.24×10⁻⁴ mol/m³ に設定した条件と、アンモニア濃度を 1.33×10⁻⁴ mol/m³ 一定とし、空気流量を 0.0085, 0.0170, 0.0255, 0.0300 m³/s に設定した条件で行った。実験中はアンモニアガス濃度と温度とを貯雪槽入口、出口において連続測定した。また 12 h 間隔で貯雪槽の上部を開放して雪の高さと孔の直径を測定した。なお、

冬期の露点 5°C 以下の乾いた空気を調湿せずに用いることにより、空気中の水分の結露による移動の影響は無視できる条件で実験を行った。アンモニアガスは各種表面に吸着しやすいガスであるため、サンプリングから測定までの時間遅れと、貯雪槽および配管への吸着の影響を考慮して十分定常になった時点で測定を行った。

5. 結果および考察

5・1 雪の形状変化 ガス吸収が行われる雪表面積を求めるために雪の高さと孔の直径を測定した。結果を図 4 に示す。残雪率の減少に従って雪の高さは低くなり、雪の孔の直径は大きくなる。雪の表面には凹凸があるが、ここでは雪の孔を図 4 に示した直径の円筒であるとみなし、雪の下部には整流板が取り付けられているのでこの面における物質移動はないとして、雪の表面積を上部表面と円筒内表面の和から算出し、図 4 に示す。この表面積は次の式で近似できる。

$$A = 3.79 + 1.77Z - 2.93Z^2 - 1.11Z^3 \dots \dots \dots (1)$$

表面積は始め 1.5 m² から残雪率の減少とともに大きくなり、残雪率が約 0.26 で最大となりその後徐々に

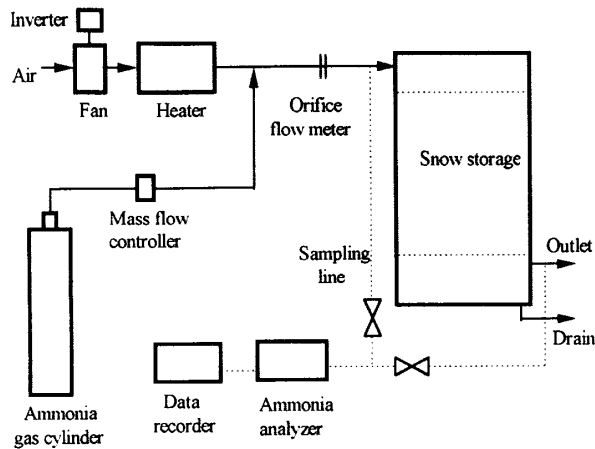


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

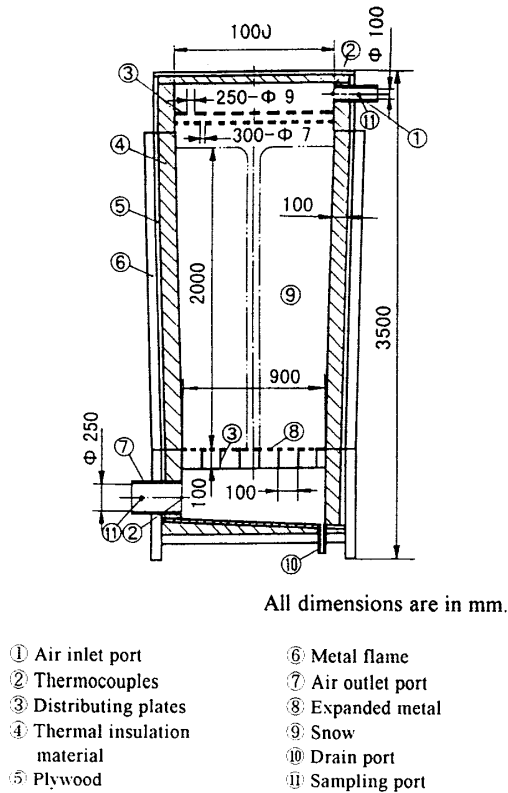


Fig. 3 Section of snow storage

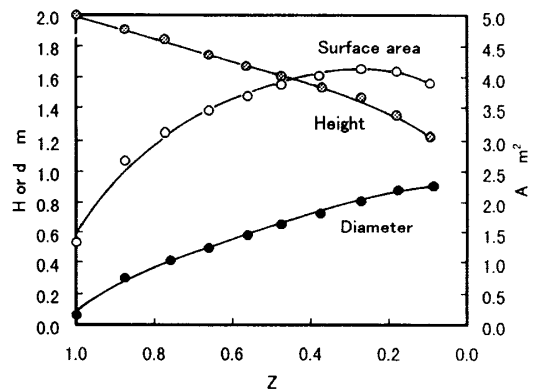


Fig. 4 Height, diameter and surface area of snow

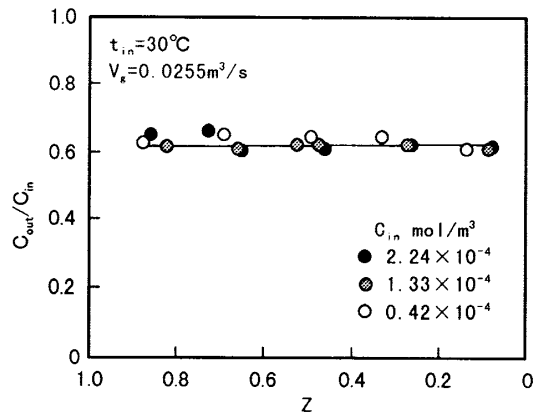


Fig. 5 Concentration of ammonia at outlet port for various inlet concentration

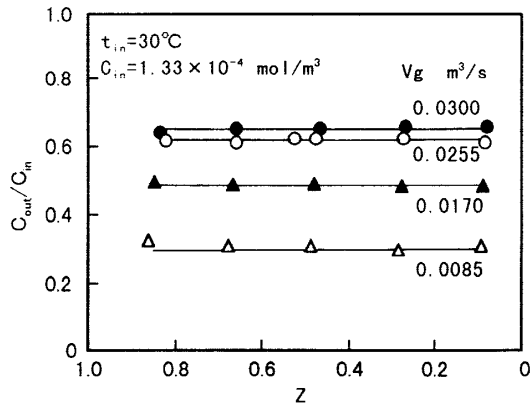


Fig. 6 Concentration of ammonia at outlet port for various air flow rate

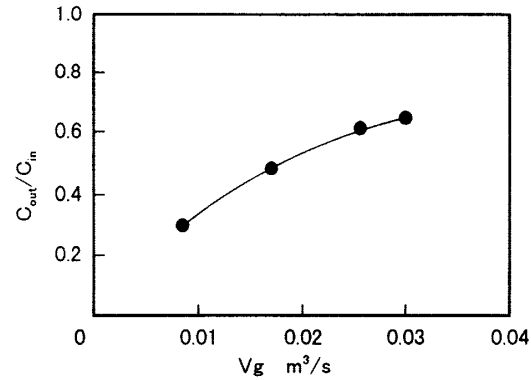


Fig. 7 Relation between concentration of ammonia in outlet air and air flow rate

減少する。このように雪表面積はなだらかな上に凸の変化をする。

5・2 アンモニアガス濃度 貯雪槽出口アンモニア濃度の測定結果を図5に示す。縦軸に示した出口濃度はいずれも入口濃度で除して無次元化した。出口アンモニア濃度は残雪率が変化してもあまり大きな変化がみられずほぼ一定の値を示した。また、いずれの入口濃度条件においてもこの無次元化した出口濃度は約0.61となりほぼ等しい値を示した。

空気流量をパラメータとした場合の出口濃度を図6に示す。いずれの空気流量においても残雪率の変化に対して出口濃度はほぼ一定の値を示している。このように装置出口のアンモニア濃度は残雪率の影響を受けずにほぼ一定の値を示し、実用上扱いやすい性質をもつことがわかる。

残雪率が0.85~0.1の間の出口濃度の平均値を縦軸にし、横軸に流量をとって整理した結果を図7に示す。出口濃度は空気の流量の増加につれて高くなる。図7より、居住空間を冷房する場合を想定した本実験条件範囲において、残雪率によらない装置入口の流量とアンモニアの出口濃度との関係が得られた。

6. 物質移動係数の検討

6・1 物質移動係数の算出方法 雪表面で吸収されるアンモニアガスの移動量を、ガス相液相それぞれ次の式で表す。

$$J_g = k_g(C_g - C_{gi}) \dots\dots\dots (2)$$

$$J_l = k_l(C_{li} - C_l) \dots\dots\dots (3)$$

ここで気液界面におけるガス相濃度 C_{gi} と液相濃度 C_{li} との関係は平衡定数 m を用いて次式で表す。

$$C_{gi} = mC_{li} \dots\dots\dots (4)$$

またガス相と液相との物質移動量は等しいことから、物質移動量を J とし、上の3式を整理すると次式が得

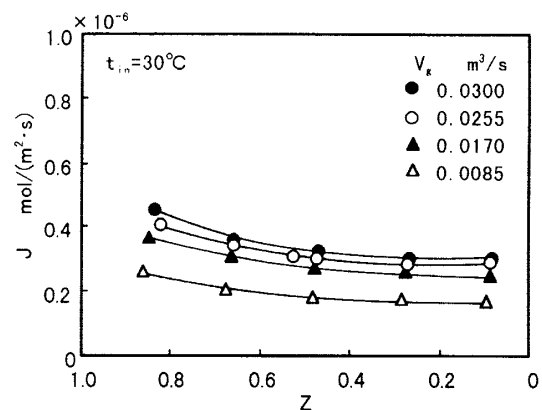


Fig. 8 Mass flux of ammonia

られる。

$$J = (C_g - mC_l) / (1/k_g + m/k_l) \dots\dots\dots (5)$$

ここで物質移動係数 k を次式で定義しこの k について調べる。

$$k = 1 / (1/k_g + m/k_l) \dots\dots\dots (6)$$

この k は式(5)から次式となる。

$$k = J / (C_g - mC_l) \dots\dots\dots (7)$$

ここで物質移動量 J はガス相側の物質収支から貯雪槽入口濃度 C_{in} と出口濃度 C_{out} との差、空気の流量 V_g および雪表面積 A によって次式で算出する。

$$J = (C_{in} - C_{out}) V_g / A \dots\dots\dots (8)$$

ガス相の濃度 C_g は C_{in} と C_{out} の平均値とする。

液中アンモニア濃度 C_l は空気側の熱収支から求めた雪解け水の量 V_l で物質収支から求めたアンモニアの吸収量 $J \cdot A$ を割ることによって求める。

$$V_l = c_{pa} \cdot V_g \cdot \rho_g (t_{in} - t_{out}) / L_o \dots\dots\dots (9)$$

$$C_l = J \cdot A / V_l \dots\dots\dots (10)$$

平衡定数 m はヘンリー定数として与えられる場合があるが、本実験ではアンモニアのほかに空気中に含まれている二酸化炭素が共存することや、雪解け水中に含まれる各種イオンの影響を考慮して平衡定数 m

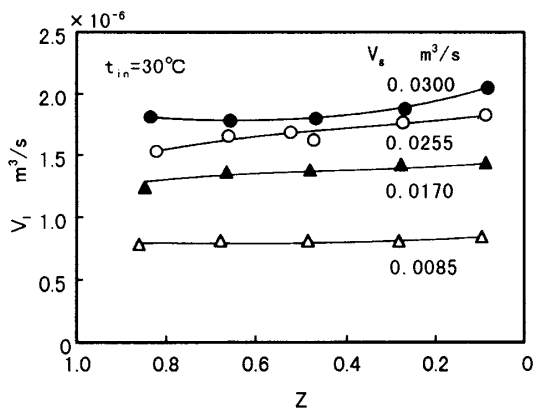


Fig. 9 Flow rate of snow melted water

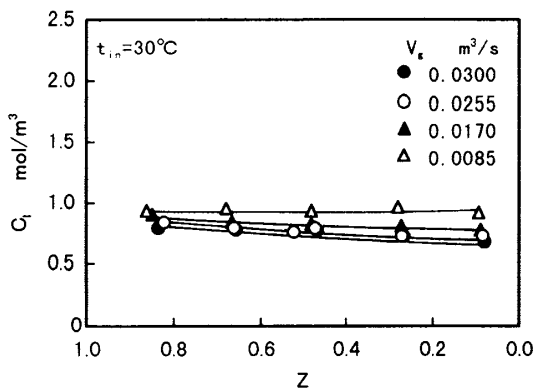


Fig. 10 Concentration of ammonia in snow melted water

を定めることは困難である。したがって、雪解け水を用いてアンモニアの平衡定数を実測し用いる。

6・2 物質移動量 物質移動量の算出結果を図8に示す。物質移動量は残雪率の減少とともに小さくなり、最小値を示した後、若干増加する。流量が多いほうが物質移動量が多いが、残雪率の減少とともにその影響は若干小さくなる。

6・3 液中アンモニア濃度 雪解け水の量を式(9)より算出し、その結果を図9に示す。水量は残雪率の減少に対して若干増加する傾向がある。また空気の流量の増加に従って水量が増加する。この水量でアンモニアの吸収量を割ることによって求めた液側アンモニア濃度を図10に示す。ただし、雪がもともと含んでいるアンモニア濃度 0.07 mol/m^3 を加えてある。雪解け水の濃度は残雪率が減少するのに従って若干減少する傾向を示す。また、液中のアンモニア濃度は空気の流量を変えてもあまり影響を受けずほぼ等しい値を示す。これは、空気流量が増加するとアンモニアの吸収量が増加するが、同時に雪解け水の量も増加し、液中の濃度変化を抑えるためと考えられる。このことは雪表面における熱移動と物質移動との間にある相関

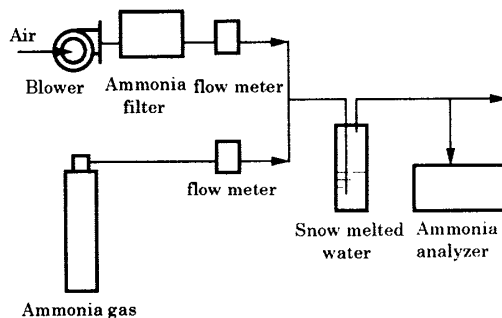


Fig. 11 Experimental apparatus of absorption of ammonia by snow melted water

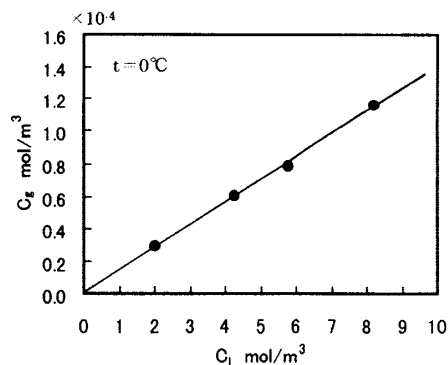


Fig. 12 Relation between C_g and C_l

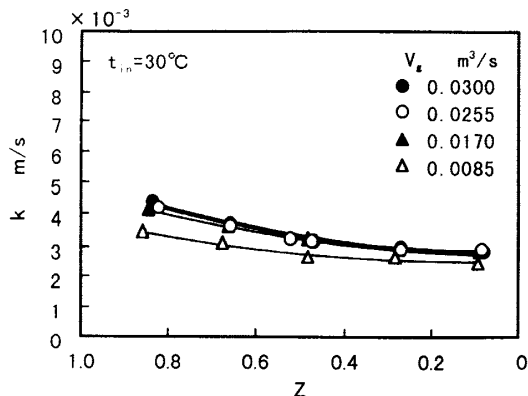
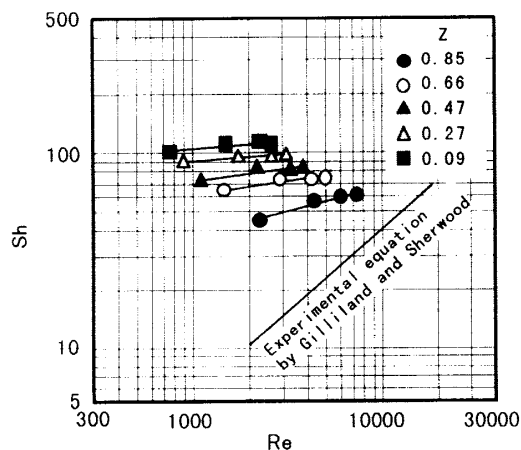


Fig. 13 Mass transfer coefficient

が存在することを示している。

6・4 平衡定数の実測 平衡定数の実測は図11に示す装置を用いて行った。ガラスの容器に雪解け水を入れ、空気で所定の濃度に希釈したアンモニアガスを吹込み出口濃度が入口濃度に等しくなった時点で平衡に達したとして液中の濃度を測定する。温度は液ガスともに 0°C に調整した。測定結果を図12に示す。この傾きから平衡定数 m の値を 1.4×10^{-5} とした。

6・5 物質移動係数 物質移動係数 k を式(7)を用いて算出した結果を図13に示す。残雪率の減少に従って物質移動係数は小さくなる。また流量の増加に伴って k の値は大きくなる傾向を示すが、残雪率の減

Fig. 14 Relation between Re and Sh

少に従ってその傾向はほとんど現れなくなる。残雪率の減少は図4に示すように、雪の孔の直径の増加を意味し、雪の孔を通過する風速が遅くなり物質移動係数が小さくなるものと考えられる。

物質移動係数は液側とガス側双方の影響を受けるが、本実験では、ガス平衡定数が十分小さいこと、雪の表面は雪解け水によりつねに更新されていることからガス側の物質移動が支配的であると考えられる。したがって、 k をアンモニアの空気中の拡散係数 D で割り、代表長さとして雪の孔の直径をかけてシャーウッド数 Sh を求め、雪の孔内のレイノルズ数 Re との関係を図14に示す。図14では残雪率をパラメータとしている。残雪率が0.85と高い場合には Sh は Re の増加に従って増加するが、残雪率が低くなるにつれて傾きは小さくなる。図14中に速度境界層発達後の円筒内の流れについて求めたGilliland-Sherwoodの実験式を併記した。この式は液側の抵抗を無視できる条件で実験を行い、ガス側の物質移動についてまとめたものである。実験データはいずれもこの式が示す値よりも大きな値を示している。これは雪表面が凸凹であるにもかかわらずこれを平滑面として近似したために実際の面積よりもだいぶ小さく面積を見積もっているためと、雪表面の凹凸が物質移動を促進しているためと考えられる。また、残雪率が小さくなるのに従って Sh が大きくなるのは雪の孔の入口部分の助走区間の影響と考えられる。

残雪率の変化に対して図5, 6に示したように出口

濃度が安定していることから、本実験条件範囲内においては、例えば残雪率0.85における Sh が予測できればガス吸収能力が推測できることとなる。残雪率0.85の場合の実験式は次式で近似できる。

$$Sh = 7.03 Re^{0.25} \quad (Z = 0.85) \dots \dots \dots (11)$$

7. 結 論

雪の有効利用はもっぱらその冷熱に注目されてきたが、本研究で取り上げたように空気と直接熱交換することにより空気の清浄化に利用できることが明らかになった。ガス吸収や吸着などはその対象となる物質個々の性質により異なった効果が予測されるが、実用化に向けて本研究ではアンモニアガスについて実験し調べた。実験結果から効果の定量と実設備の設計に必要なデータの整理を試みて次の結果を得た。

(1) アンモニアガス吸収効果は設備の運転期間中の残雪率の変化に対して安定した効果が得られ、出口濃度は一定の値を示す。

(2) 出口濃度は入口濃度、風量の増加につれて高くなる。

(3) 物質移動係数 k をアンモニアガスの空気中の拡散係数と雪の孔の径で無次元化した Sh と雪の孔を通る空気のリノルズ数 Re との関係式が得られ、本実験条件範囲内においては実際の性能予測に利用できる。

本研究を行うに当たり、実験にご協力を賜った室蘭工業大学の合田典夫氏、数井崇弘氏、川村昌彦氏、長尾和宏氏、論文作成に当たってご助言をいただいた三機工業(株)松藤久良氏に謝意を表す次第である。

文 献

- (1) 媚山政良, 第8回寒地技術シンポジウム講論集, (1992), 35-42.
- (2) 媚山政良・ほか5名, 第9回寒地技術シンポジウム講論集, (1993), 64-67.
- (3) Wang, A., *Proc. 3rd Int. Symp. Snow Eng., Japan*, (1996), 201-202.
- (4) Gilliland, E. G. and Sherwood, T. K., *Ind. Eng. Chem.*, (1934), 516.
- (5) 媚山政良・ほか7名, 第5回環境工学総合シンポジウム, '96 講演論文集, (1995), 280-282.
- (6) Kobiyama, M., ほか5名, *Proc. 3rd Int. Symp. Snow Eng., Japan*, (1996), 199-200.