

ドライアイスブラストの洗浄力向上を目指した 固体二酸化炭素冷却システム

藤中潤也* 増山新二** 榎谷守洋*** 田村亮祐**** 西村隼人****

Solid carbon dioxide cooling system aiming at improving
the detergency of dry ice blast cleaning

FUJINAKA Junya* MASUYAMA Shinji** MASUTANI Morihiko***
TAMURA Ryosuke**** NISHIMURA Hayato****

Abstract

Dry ice blast cleaning has some advantages over conventional cleaning methods such as sand blast cleaning. However, the detergency is not sufficient for particular users because a hardness of dry ice is approximately 2 Mohs. To increase the detergency, a solid carbon dioxide (CO₂) is required as a blasting material. From the point of view, a new cooling system to produce the solid CO₂ using a single stage Gifford-McMahon (G-M) cryocooler (SUZUKISHOKAN, RF90S) with a compressor (SUZUKISHOKAN, C300G) was constructed and tested. The G-M cryocooler directly cools a cold box containing the ethanol solution. A CO₂ vessel is immersed in the ethanol solution, and a solid CO₂ is produced in the CO₂ vessel. Experimental result showed that the temperature of ethanol solution achieved temperatures below -56.6 that is the triple point of CO₂. This result indicates that it would be possible to produce the solid CO₂ using this cooling system. This paper describes the configuration of new cooling system, experimental results of cooling characteristics, and numerical analysis.

Key words: G-M cryocooler, dry ice blast cleaning, solid carbon dioxide

1. はじめに

近年、グリーンハウスガスの一つである二酸化炭素 (CO₂) の排出量を減少させる取り組みが各方面から実施されている。つまり二酸化炭素は、厄介者扱いされることが多いが、応用方法によっては、利用価値の高い分野が存在する。その一つがドライアイスブラスト洗浄であり、様々な産業・工業分野でドライアイスブラスト洗浄が注目されてきている。ドライアイスブラスト洗浄とは従来のブラスト材である水や洗剤、研磨剤等を使用せず、ドライアイスペレットをブラスト材とする次世代型洗浄システムである。

従来のブラスト材であった水や洗剤は、材料と汚染の関係で高い廃棄処理や修理コストが伴い、

サンドブラストやガラスなどの研磨剤では、部品に損傷を与えるなどのリスクを引き起こしていた。一方でドライアイスは燃性および導電性を持たないため、電氣的または機械的な部位の損傷や火災の恐れなく洗浄を行うことが可能である。また、処理は乾燥状態であり、二次廃棄物が発生しないため、大幅なコストダウンが見込まれている。

このような優れた性能を持つドライアイスブラスト洗浄の洗浄能力を更に向上させるため、ドライアイスが洗浄対象物に衝突した際の威力を上げること注目した。これには従来のブラスト材である結晶粒の小さなドライアイスではなく、結晶粒の大きな固体二酸化炭素を製作することが必要であると考えた。本研究では、これを実現させる

ための新しい冷却システムを構築[1]し、性能試験を行った。

2. 二酸化炭素の状態特性

二酸化炭素の状態特性図を図1に示す。二酸化炭素は無色無臭の気体であり、常温・大気圧下では液体にならず、二酸化炭素が液体になる条件は、三重点(Triple point)である -56.6 @ 5.13atm 以下の温度と高圧条件下で液体化する。大気圧においては、 -78.5 以下で固体となる。これを室温で使用すると昇華して気体となる。まさにドライの状態である。通常のドライアイスの製法は、二酸化炭素を常温で約 130atm で圧力を加え液化させ、大気中に放出させる。このとき気化熱が奪われることにより、温度が二酸化炭素の凝固点を下回り、粉末状になる。それに数%の水を添加して固め、ブロック状に成形したものが通常のドライアイスである。

本研究で対象としている固体二酸化炭素とは、結晶粒の小さなドライアイスではなく、結晶粒の大きなプレート状の固体二酸化炭素である。固体二酸化炭素を製作するためには、図1から温度と圧力が関係することが分かる。われわれは製作効率の観点から 5.11atm 以上に加圧した二酸化炭素を三重点である -56.6 以下に冷却する方式を採用する。なお、通常のドライアイスの硬度は約 2Mohs であり、予備実験により、通常のドライアイスよりも高い硬度が得られている。

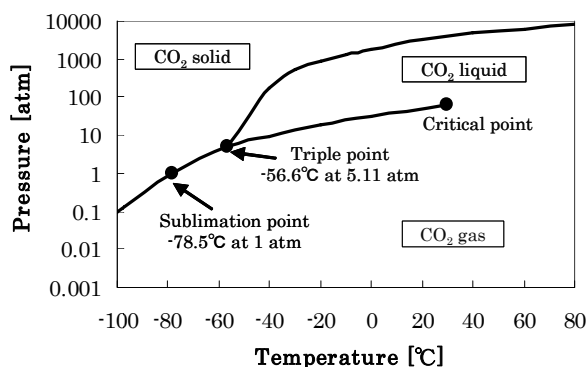


図1 二酸化炭素の状態特性図

3. 冷却システム

本研究で使用する1段型 Gifford-McMahon(以下 G-M とする)冷凍機(RF90S)とコンプレッサー(C300G)の外観写真を図2に示す。いずれも(株)鈴木商館社製である。冷凍能力は $220\text{W}@80\text{K}$ 、コンプレッサーの消費電力は $7.3\text{kW}@60\text{Hz}$ である。この冷凍機の特徴はハイパワーな冷凍能力を持ち、

低振動である。

図3に冷却システムの概略図を図4に外観写真を示す。G-M 冷凍機のコールドヘッドは真空容器(Vacuum chamber)内に設置されており、熱伝導で、冷却室(Cold box)(横: 37cm , 縦: 18cm , 深さ: 35cm)を冷却する。冷却室は、冷凍機のコールドヘッドと熱接触している底面部は銅製で、コールドヘッドからの固体伝導で冷却される。側面部は厚さ 10mm のステンレス製である。これは外部へ熱が逃げにくいようにステンレスを使用している。この冷却室にエタノール溶液を注入し、その中に二酸化炭素を入れたステンレス容器(CO_2 vessel)を挿入する。このステンレス容器は二酸化炭素を注入する内部が縦 10mm 、横 261mm 、高さ 350mm で厚さは側面が 6mm 、底部が 4mm となっている。なおステンレス容器の内部に熱を効率よく伝えるために側面に放熱板が取り付けられている。製作される固体二酸化炭素の厚さはおよそ 10mm である。



冷凍機 RF90S コンプレッサー C300G

図2 1段型 G-M

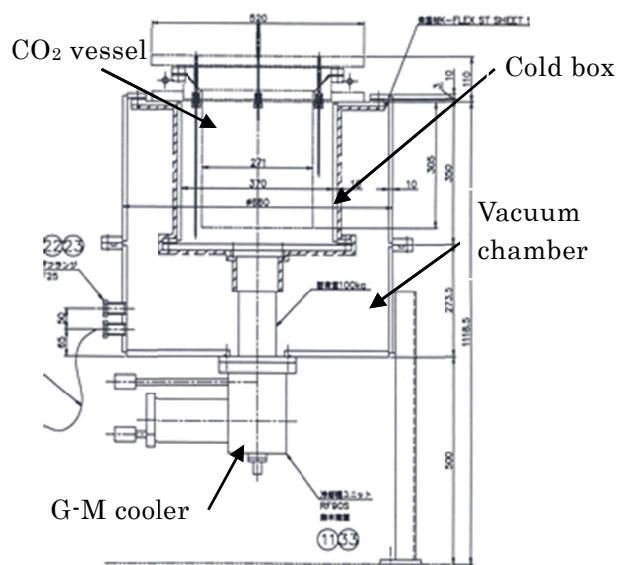


図3 冷却システム概略図

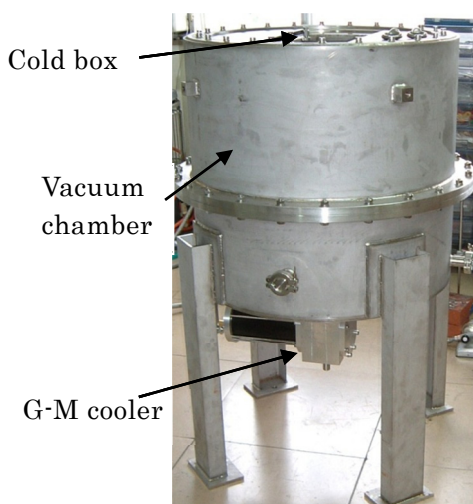


図 4 冷却システム外観写真

4. 冷却試験方法

温度を計測するため、白金(Pt)温度計 A, B, C を使用し、図 5 に示されるように冷却ボックス内部にそれぞれを底面から 24cm, 15cm, 1cm に設置した。実際に固体二酸化炭素を製作する際にはエタノール溶液を注入した後に、冷却室の内部に二酸化炭素を注入できるステンレス容器を入れるため、その体積分を考慮して、エタノール溶液を底面から 27.4cm, 18.5L まで注入しての冷却試験 1 と冷却試験 1 の約半分の量で底面から 15.6cm, 10L(温度計 A は溶液に浸っていない)を注入しての冷却試験 2 を行った。

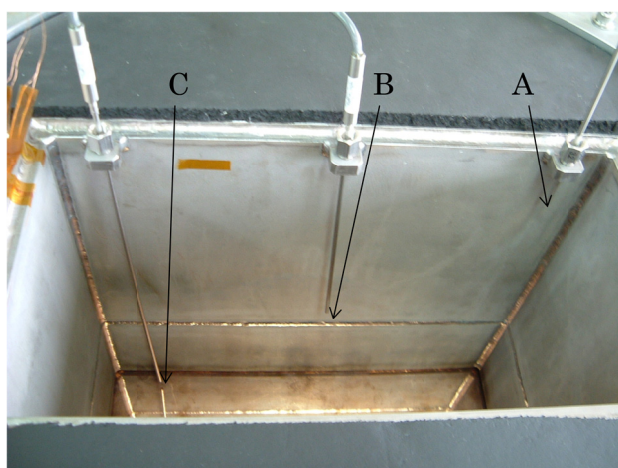


図 5 冷却室

図 6 にエタノール、二酸化炭素(飽和状態), ステンレスの熱伝導率の温度依存性を示す。縦軸が熱伝導率、横軸が温度で表されている。このグラフの特性より、エタノールは二酸化炭素と同様

な熱伝導率を持ち、ステンレスの値より約 1/100 倍である。この特性よりエタノール溶液の効率の良い冷却には攪拌が重要であることが予想され、試験中は定期的な攪拌を実施する。

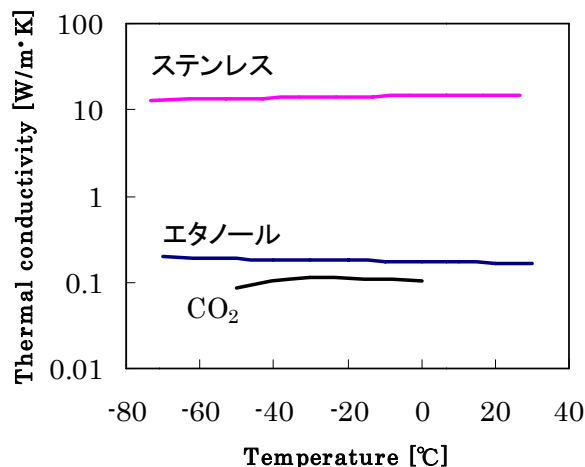


図 6 熱伝導率比較

5. 実験結果

5.1. 冷却試験 1

冷却試験 1 の冷却特性を縦軸を温度、横軸を時間として図 7 に示す。およそ 30 分ごとに定期的な攪拌を行いながら試験をした。攪拌することで、溶液全体の温度が均一になっていることが分かる。室温から冷却開始後、約 9 時間で全体が三重点以下の温度に達している。9 時間以降では定期的な攪拌から連続的な攪拌を行ったため、温度差が生じずに均一に冷却されている。

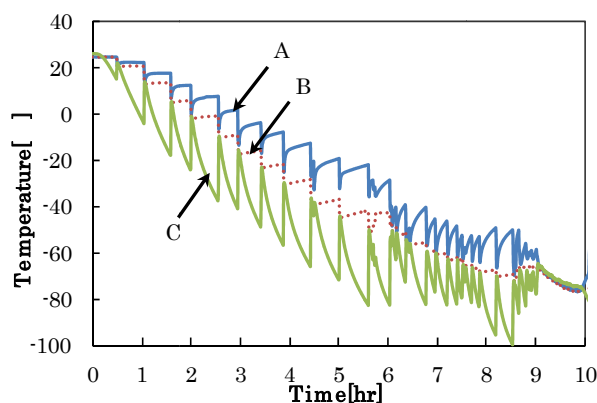


図 7 冷却試験 1 の冷却特性

5.2. 冷却試験 2

冷却試験 2 の冷却特性を図 8 に示す。本試験では温度計 A は溶液に浸っていないため、外部に逃げる熱のみを計測している。溶液が約半分の量で

は、室温から冷却を開始して、溶液全体の温度が三重点まで約5時間で到達している。

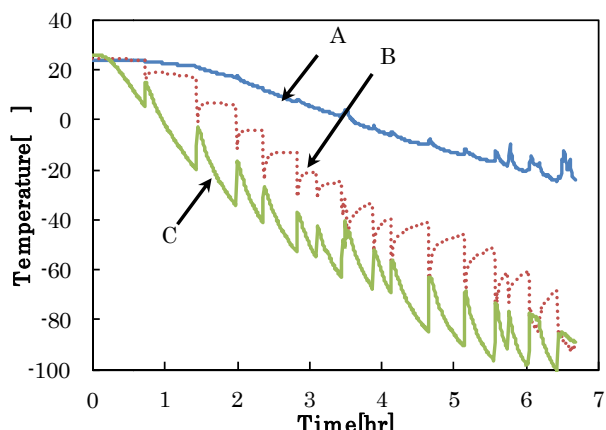


図8 冷却試験2の冷却特性

5.3. 冷却試験結果の考察

冷却試験1, 2の冷却特性より、この冷却システムでエタノールを三重点まで冷却が可能であることがわかった。エタノールの熱伝導率の値から予想された通り、エタノール溶液の上部と底部で温度差がみられた。このため冷却時間短縮のためには、今後攪拌方法の検討が必要であることが確認できた。

冷却試験1, 2の結果でエタノールは三重点まで18.5Lで9時間, 10Lでは5時間で冷却された。これらの結果とエタノールのエンタルピーから、本システムの冷却能力は 2.8×10^2 J/hrと求められた。

次に、本システムの損失を求めるために、試験1, 2の関係を縦軸をエタノールの量、横軸を三重点までの到達時間として図9に示した。これらの2点を結ぶ直線を延長すると、原点を通らない。これが本冷却システムの熱損失を示しており、その値は81Jであることが見積もられた。これは、室温部から冷却室の上部開口面へ侵入する熱が大部分を占めているものと考えており、この熱浸入を低減する方法が、今後の課題の一つとして挙げられる。

6. 数値解析

固体二酸化炭素製作にあたって、本冷却システムでの二酸化炭素が固化されるまでの時間を見積もるために、式(1)で表される一次元熱伝導方程式を使用し、数値解析を行った。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

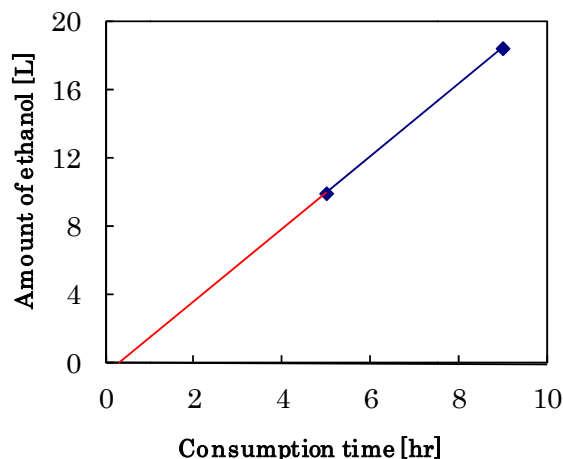


図9 エタノールの量と三重点までの冷却時間

ここで、 T は時間、 x は距離、 t は温度、 $\alpha (= \lambda / \rho c)$ は熱拡散率を表す。また、 λ は熱伝導率であり、 ρ は密度、 c は比熱を表しており、これらの値は一定とした。初期条件を $t = 0$ sにおいて $T = 20 + 273.15$ K、境界条件は固体二酸化炭素を製作する際には、ステンレス容器の両端から冷却されるため、 $x = 0$ mmにおいて $T_L = -56.6$ 、 $x = 10$ mmにおいて $T_L = -56.6$ とした。

図10に数値解析結果を示す。縦軸が時間、横軸がステンレス容器の横幅であり、100sごとの二酸化炭素の温度分布を示してある。結果から、温度分布は凸型となっており、徐々に中心部が冷却されていくことが分かる。また、二酸化炭素全体を三重点まで冷却するためには、約1500sの時間が必要であることが判明した。

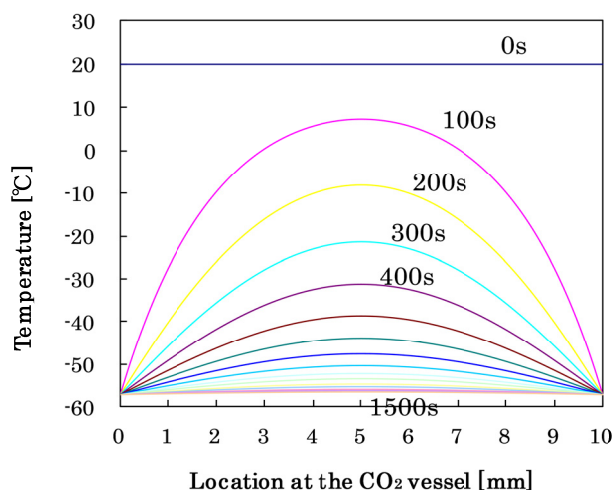


図10 二酸化炭素の温度分布

7. まとめ

ドライアイスプラスト洗浄の洗浄能力向上を目指して、固体二酸化炭素を製作するための新しい冷却システムを構築した。本システムの特徴は、1段 G-M 冷凍機を使用し冷却室を固体伝導冷却することである。

エタノール溶液を冷却室に入れて行った冷却試験の結果から、エタノール溶液を CO₂ の三重点以下まで冷却することが十分可能であることが実証できた。

今後はエタノール溶液を効率よく冷却するため、攪拌方法、熱損失の低減を検討しながら、実際に固体二酸化炭素の製作を行う予定である。

謝辞：本研究は(株)M&E と(株)竹和工業の 2 社との共同研究です。本研究に協力していただき誠に感謝いたします

参考文献

- [1] 増山新二, 藤中潤也, 榎谷守洋, 田村亮介, 西村隼人: 冷凍機伝導冷却型二酸化炭素固体プレート製作装置の構築, Abstracts of CSJ Conference, Vol.83 (2010) p.17

