

形状記憶合金を用いた超小型ガスタンク開放機構の開発

Development of Small Gas Tank Opening Mechanism with Shape Memory Alloy

指導教授 宮崎康行

M9001 池田雅央

1. 序論

1.1. インフレータブル構造物

近年、宇宙構造物の大型化に伴い、宇宙構造物の軽量化・収納性・展開安定性が要求されている。その要求に応えることができる構造物の一つとして、インフレータブル構造物が注目されている。

インフレータブル構造物とは、袋状の薄膜内部にガスを注入し、その圧力によって膜面に張力を与えることで所望の形状を成形する構造物を指す。インフレータブル構造物は、圧力を計測するセンサや高圧ガスを組み合わせたシステムとなっており、従来のように多くの機械部品を組み合わせた複雑な展開機構と比較するとシンプルな展開機構にすることができる。そのため、部品点数の大幅な削減が期待でき、軽量性・収納性、さらには信頼性・製造コスト・開発期間の短縮など多くの点で優れている。しかし、その一方で、宇宙でのインフレータブル構造物の展開には実施例が少なく、要素技術の実証、設計・製作・運用ノウハウの蓄積等が重要課題となっている。

インフレータブル構造物には従来の展開構造物にはないガスを使用するという特徴があり、それに伴い、ガスのリークが懸念される。宇宙空間は高真空環境であるため、ガスタンクを開放した状態で打上げる場合は、完全にガスのリークを抑えることが困難であり、インフレータブル構造物の展開時に必要なガス圧を得ることができなくなる可能性がある。また、ガスタンクを開放した状態で衛星に搭載する場合、地上での衛星のメンテナンス中にガスがリークする可能性がある。

そこで、インフレータブル構造物を使用する場合は、ガスタンクを開放しない状態で打上げ、展開直前にガスタンクを開放することができる機構が必要となる。

1.2. インフレータブル構造物の宇宙実証

近年、低コスト・短期開発を理由に宇宙実証実験や宇宙工学教育を目的とした数 kg～数十 kg 級の超小型衛星の開発が盛んである。超小型衛星は従来の大型衛星と比較して打上げ時の重量や容積に制限を受けるため、超小型衛星のミッションの幅を広げていくためには、軽量性及び収納性に優れたインフレータブル構造物が今後必要になる。

そこで、本研究室ではインフレータブル構造物の宇宙実証を目的として超小型衛星 SPROUT (SPace Research On Unique Technology) の開発を行っている。(Fig.1) SPROUT では、インフレータブルチューブを用いて正三角形膜の展開実証を行うが、それに合わせて、今後必要となる超小型のインフレーションシステムの宇宙実証を行う。

1.3. 目的

軌道上でのガスの使用に伴うインフレータブル構造物の実証を目的として開発している SPROUT には、展開を行う

前のリークを抑えるため、未開封のガスタンクを軌道上で開放できる機構が必要となる。

また、一般的に超小型衛星は大型衛星と比較するとリソースが小さいために、可能な限り小型かつ低消費電力であるガスタンク開放機構が要求される。

以上のことより、本研究の目的は以下の3点とする。

1. 超小型衛星に搭載できる小型・低消費電力のガスタンク開放機構を提案する。
2. 提案したガスタンク開放機構の実現性を検証する。
3. 提案したガスタンク開放機構を試作し、課題を整理することで実機開発への目処を付ける。

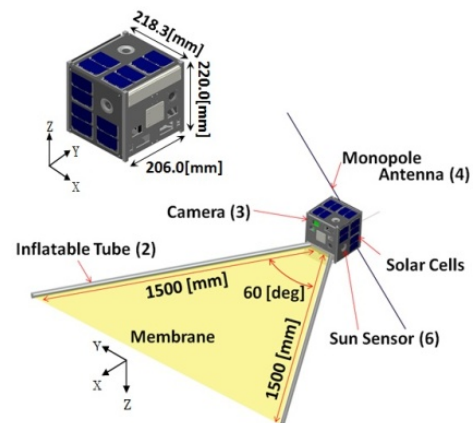


Fig.1 SPROUT の外観

2. ガスタンク開放機構

2.1. 既存のガスタンク開放機構

インフレータブル構造物のためのガスタンク開放機構は形状記憶合金を用いた SMA Valve (開発: 株式会社ウエルリサーチ) がある[1]。

形状記憶合金は、常温で変形させることができ、ある一定の温度になるまで加熱することによって変形前の状態に戻る性質を持つ金属である。例えば、Fig.2 に示すように棒状の形状記憶合金を考えると、長さ δ だけ圧縮した長さ L の形状記憶合金を一定の温度になるまで加熱すると $L + \delta$ の長さに戻る。この加熱することによって変形前の状態に戻るといふ特性を活かして δ 分だけの直線変位を得る。

(株)ウエルリサーチの SMA Valve は、圧縮させた中空棒の形状記憶合金に先端が鋭くなっているニードルが取り付けられている。形状記憶合金を加熱すると、形状記憶合金が元の形状に戻ろうと変位し、それに伴いニードルがガスタンクの口を貫通・開放するという機構である。

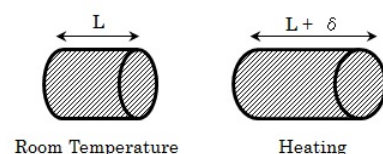


Fig.2 形状記憶効果

2.2. フランジボルト

形状記憶合金を用いたアプリケーションの一つとして、TiNi Aerospace 社が開発したフランジボルトがある。

この装置は、Fig.3 に示すように一部分だけ直径が小さくなっているボルト（ノッチボルト）に、常温で圧縮した形状記憶合金を挟んで固定する。形状記憶合金を加熱することによって形状記憶合金が変位し、ノッチボルトを破断させるという機構である。

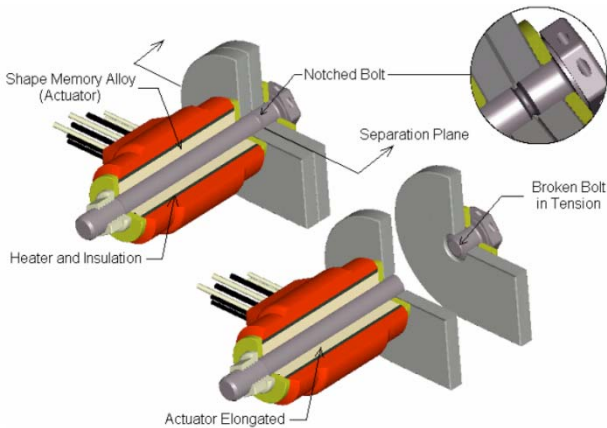


Fig.3 フランジボルトの概念図^[2]

2.3. 提案するガスタンク開放機構

形状記憶合金の変位量は自然長に依存するため、SMA Valve をそのまま小型化すると、変位量が足りなくなりガスタンクを開放できなくなる可能性がある。そこで、本研究では、(株)ウェルリサーチの SMA Valve と TiNi Aerospace 社のフランジボルトのコンセプトを組み合わせたガスタンク開放機構を提案する。

提案するガスタンク開放機構は、Fig.4 (a) に示すように、2枚の固定した板、ガスタンク、先端が鋭くなっているニードル、圧縮した形状記憶合金、一部分だけ直径が小さくなっているノッチボルトから成る。形状記憶合金は中空棒状のものを、ノッチボルトを形状記憶合金と固定した板に挿入する。ノッチボルトにはネジを切っておき、Fig.4 (b) のようにニードル及びノッチボルトによって形状記憶合金を挟み込むようにして固定する。

形状記憶合金を加熱することによって、形状記憶合金が自然長に戻ろうとすると、内側に挿入されているノッチボルトが形状記憶合金の復元力によって伸び始める。最終的に Fig.4 (c) に示すようにノッチボルトの直径が小さくなっている部分（ノッチ）が破断し、ニードルが飛び出す。この飛び出したニードルがガスタンクの口を貫通・開放する。

この機構を採用することにより、ノッチボルトを切断できる程度の変位が得られればよいので、ノッチ部分の長さを短くすることによって、形状記憶合金そのものの長さも短くすることができる。さらに、形状記憶合金の長さが短くなることによって、加熱する際の熱エネルギーも小さく済み、それに伴い消費電力も抑えることができる。つまり、Fig.4 に示す機構であれば、小型・低消費電力のガスタンク開放機構を実現することができると思われる。しかし、提案した機構において、飛び出したニードルによってガスタンクの口を貫通・開放できるという実現性が示されていない。そこで、実験により、提案したガスタンク開放機構の実現性を検証した。

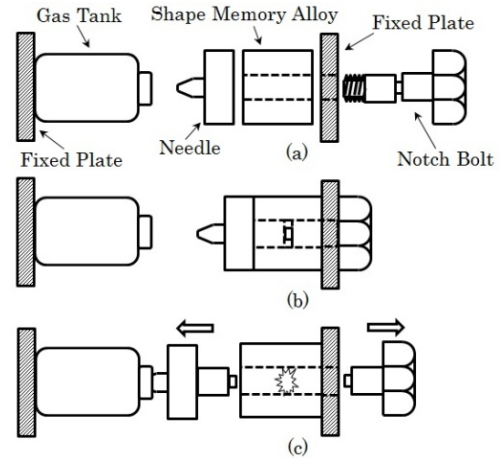


Fig.4 提案するガスタンク開放機構の概念図

3. 検証実験

3.1. 形状記憶合金の復元力測定実験

提案したガスタンク開放機構の実現性を検証するために、まず、形状記憶合金を加熱した際の復元力を測定した。

今回、形状記憶合金は中空棒（外径 6.5mm、内径 4mm、全長 20mm）を使用した。また、形状記憶合金を加熱するためにヒーターをつける必要があるが、今回は、カプトンテープにより形状記憶合金を覆い、その上から電熱線を巻き付け、さらにその上から熱収縮チューブにて電熱線を固定する方法をとった。形状記憶合金の外観を Fig.5 に示す。また、電熱線への通電条件を Table1 に示す。

実験装置は Fig.6 (a) に示すように、2枚の金属板、バネ、圧縮した形状記憶合金から成る。2枚の金属板の一方にバネ定数 k が既知のバネを自然長のまま固定し、もう一方の金属板に自然長から縮めた長さ L の形状記憶合金を固定する。それぞれバネと形状記憶合金が固定された2枚の金属板をバネと形状記憶合金が接触するように向い合せて固定する。

Fig.6(b) に示すように、形状記憶合金を加熱することにより、形状記憶合金が自然長に戻ろうと δ だけ変位し、バネを押す。この変位量 δ を計測し、バネ定数 k と積算することによって形状記憶合金の復元力 $F = k\delta$ を算出した。

今回、バネは単体でのバネ定数が 588N/mm のものを4つ並列にして使用した。実験装置の外観を Fig.7 に示す。形状記憶合金の復元力測定実験を5回行ったところ、復元力は 1kN 以上であることを確認した。実験結果を Table2 に示す。



Fig.5 形状記憶合金の外観

Table1 電熱線の通電条件

Voltage	5	[V]
Current	4	[A]
Time	20	[sec]

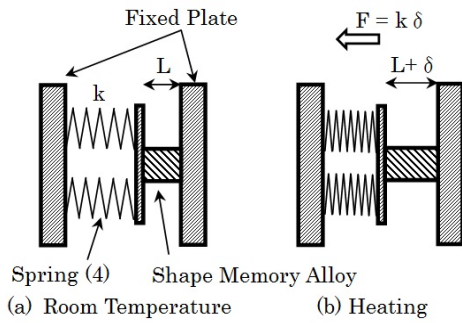


Fig.6 形状記憶合金の復元力測定実験の概念図

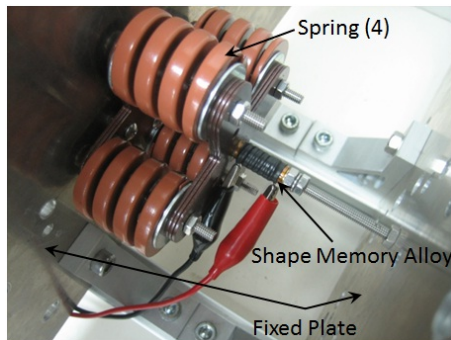


Fig.7 形状記憶合金の復元力測定実験装置の外観

Table2 形状記憶合金の復元力実験結果

	δ [mm]	F[N]
No.1	0.45	1058
No.2	0.44	1035
No.3	0.47	1105
No.4	0.45	1058
No.5	0.46	1082

3.2. ガスタンク開放実験

形状記憶合金の復元力によりノッチボルトを切断し、飛び出したニードルによってガスタンクに穴を開けることができるかを実験により検証した。

ノッチボルトの材質は、形状記憶合金の変位量が少なく済むように伸びが小さいものが望ましい。また、形状記憶合金を加熱する際に接触しているノッチボルトに熱を多く奪われないために、熱伝導率の低い材質が望ましい。以上のことからノッチボルトの材質は金属材料の中でも比較的伸びが小さく、熱伝導率の低いチタンとした。チタンの引張り強さを 1170MPa とした場合^[3]、ノッチの直径と破断に必要な力の関係 (理論値) は Fig.8 のようになる。Fig.8 より形状記憶合金が切断することができるノッチ外径は約 ϕ 1.05mm 以下であるので、M4×40mm のチタン製ボルトを削ることによって外径 1mm、長さ 1.5mm のノッチを作った。Fig.9 にノッチボルトの外観を示す。また、実験に使用したガスタンクの緒元を Table3 に、寸法を Fig.10 に示す。

実験装置は Fig.4(a) に示すように、2枚の金属板、ガスタンク、ニードル、圧縮した形状記憶合金、ノッチボルトから成る。2枚の金属板の一方にガスタンクを固定し、さらに、もう一方の金属板と形状記憶合金にノッチボルトを通し、

Fig.4(b) のようにニードルとノッチボルトによって形状記憶合金を固定する。加熱した形状記憶合金の変位によって Fig.4(c) のように、ノッチボルトが切断され、飛び出したニードルによってガスタンクを開放できるかを検証した。実験装置の外観を Fig.11 に示す。なお、形状記憶合金は復元力測定実験と同様のものを使用し、電熱線への通電条件も Table1 と同様にした。

実験を 5 回行ったところ、飛び出したニードルによってガスタンクを開放できることが確認できた。

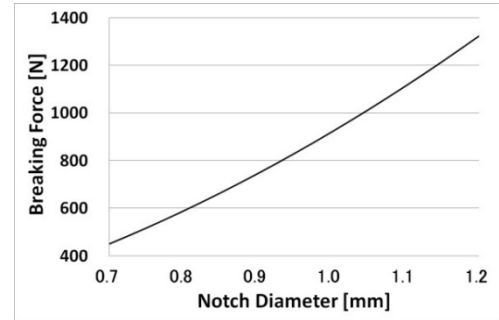


Fig.8 ノッチの直径と破断に必要な力の関係

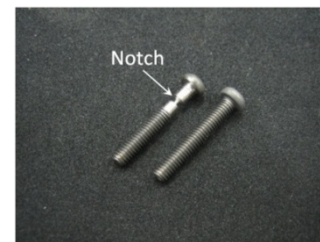


Fig.9 ノッチボルトの外観

Table3 ガスタンクの仕様

Gas	N2
Material	JIS G3141 SPCE
Capacity	20 [m]
Pressure	17.7 [MPa]
Mass	41 [g]

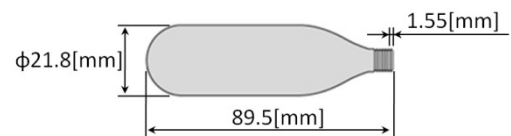


Fig.10 ガスタンクの寸法

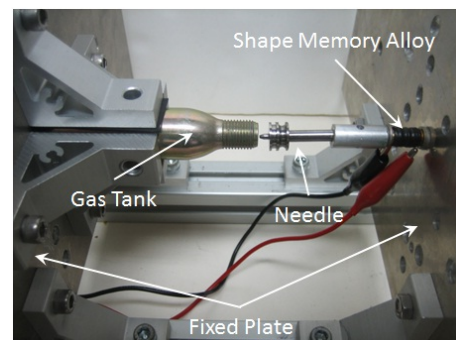


Fig.11 ガスタンク開放実験装置の外観

4. ガスタンク開放機構の試作

4.1. 試作モデルの仕様

試作したガスタンク開放機構の外観を Fig.12 に示す。また、仕様を Table4 に示す。この試作モデルは SPROUT に搭載可能なサイズとなっている。

試作したガスタンク開放機構の構成は、(株)ウェルリサーチの SMA Valve を参考にした。試作モデルは、ボディの内部にあるニードル・形状記憶合金・ノッチボルトを固定するためのバックキャップ、形状記憶合金に電力を供給するためのコネクタ、コネクタをボディに取り付けるためのフランジ、内部の様子を観察するためのサイドキャップ、さらにガスを放出するためのガスポートから成る。

試作モデルの内部構成図を Fig.13 に示す。設置時は、サイドキャップ・ニードル・ノッチボルトによって形状記憶合金を挟み込むようにして固定する。作動時は形状記憶合金を加熱することによってノッチボルトが破断し、飛び出したニードルがガスタンクの口を貫通・開放する。

ノッチボルトの材質はチタンであり、ノッチ外径及び長さと共に 1[mm]である。また、形状記憶合金は Fig.5 と同様のものを使用しているが、Table1 と Table4 を比較すると試作機の通電時間が非常に長い。これは、電熱線を収納する際に電熱線とボディが接触しているため、ボディに熱が奪われてしまうことが原因と考えている。

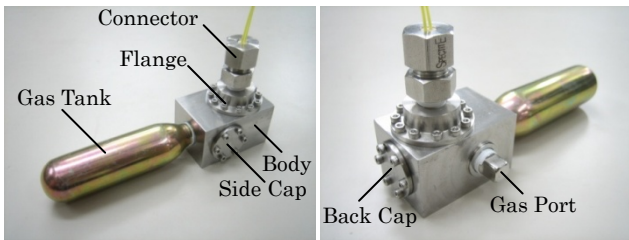


Fig.12 試作モデルの外観

Table4 試作モデルの仕様(ガスタンクは含まない)

Size	48.1 × 35 × 61	[mm]
Voltage	5	[V]
Current	4	[A]
Time	50	[sec]
Mass	348	[g]

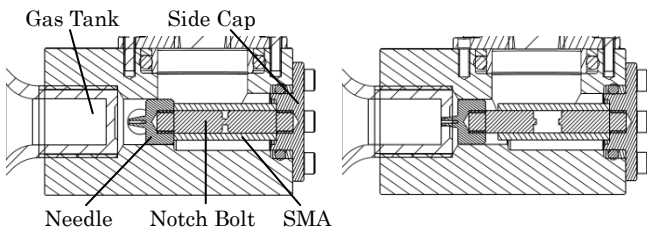


Fig.13 試作モデルの内部構成図 (左:作動前右:作動後)

4.2. 試作モデルでのガスタンク開放実験

試作モデルがガスタンクを開放できるか、開放後にリークが発生しないかを地上環境下で検証した。リークはリーク検知液を各 부품の隙間に塗布し、泡の発生の有無により検証した。また、ガスタンクは Table3 と同様のものを使用した。

実験を 2 回行ったところ、ガスタンクを開放できることは確認できた。ただし、ガスタンクとボディの接続部に若干のリークが認められたため、今後、シールを強化する予定である。

今回、試作モデルでの地上環境下におけるガスタンク貫通実験によって、形状記憶合金の復元力を用いてノッチボルトを切断し、飛び出したニードルによってガスタンクを開放できることを示すことができた。

5. 結論

本研究の結論は以下の通りである。

- 超小型衛星に搭載可能な小型・低消費電力のガスタンク開放機構を提案した。
- 提案したガスタンク開放機構の実現性の検証実験い、実現性を示した。
- 提案したガスタンク開放機構の試作を行い、ガスタンク開放実験により、通電時間が長いこと及びガスのリークが認められたことの 2 点以外は問題がないことが確認できた。

試作モデルの課題として、通電時間が長いこととガスのリークが挙げられるが、通電時間に関しては、衛星の運用を工夫することで電力を確保できるため問題とはならず、ガスのリークについてはガスケットや O リングなどのシール処理を強化することで解決できると考えている。また、本研究では地上環境のみで実現性を検証したため、今後は、宇宙環境についても実現性を検証するために、温度試験や振動試験などの環境試験を行い、実機開発に向けてさらに改良を重ねる予定である。

6. 参考文献

- [1] 青木他, 「SIMPLE 膜構造宇宙実験の概要」, 第 26 回宇宙構造・材料シンポジウム, ISAS/JAXA 相模原, 神奈川
- [2] TiNi Aerospace Web Site
<http://www.tiniaerospace.com>
- [3] 金子他, 基礎機械材料科学, 朝倉書店, 2006
- [4] 舟久保, 形状記憶合金, 産業図書, 1984