



## マイクロカプセルを用いたインフレータブル構造の 構造硬化に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本航空宇宙学会 公開日: 2020-03-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山田, 祐揮, 五島, 聖也, 勝又, 暢久, 樋口, 健 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00010170">http://hdl.handle.net/10258/00010170</a>

## P61 マイクロカプセルを用いたインフレータブル構造の 構造硬化に関する研究

○山田祐揮, 五島聖也, 勝又暢久, 樋口健 (室蘭工業大学)

Research on Rigidizing Inflatable Structures using Micro-Capsules  
Yuuki Yamada, Takaya Gotou, Nobuhisa Katumata, Ken Higuchi (Muroran Institute of Technology)

Key Words: Structural rigidization, Inflatable structure, Micro-capsules, Pressure difference

### Abstract

Since the inflatable structure consists of membranes, when the gas inside the structure leaks, it is impossible to keep the shape of the inflatable structure. Therefore, in order to form a structural member, even if the gas leaks, rigidization of the membrane is important. A method using foam rigidization as a method for curing the membrane materials is focused in this research. This research proposes a curing method combining micro-capsules and a foam curing agent. In this method, micro-capsules containing water and foaming rigidization agent are attached to the membrane of the inflatable structure, and the capsule is destructed using a pressure difference to rigidize the membrane. In this study, we focus on the rigidization process of this method, and investigated whether the micro-capsule was destructed and polyurethane was formed by applying a pressure difference.

### 1. 研究背景と目的

近年の高度化する宇宙開発ミッションにおいて、大型展開構造物の要求が高まっている。輸送時の空間的制約を満足しながらさらに大型化するためには、軽量、高収納性、展開確実性が必要になる。そこで、機構や部品点数が少なく、軽量・高収納性に優れたインフレータブル構造に着目した。インフレータブル構造は、薄膜で気密層を構成した、いわゆる風船構造であり、内部にガスなどを注入し、内圧を保持することで設計した形成が得られる構造物である。このインフレータブル構造は風船構造であるため、スペースデブリやマイクロメテオロイドなどが衝突した場合には、膜面に傷または穴が生じ、内圧が保持できず構造として機能できないところが欠点である。その欠点を補うため、伸展後のインフレータブル構造の様々な硬化手法に関する検討が行われている<sup>1)</sup>。これにより内部のガスがリークしたとしても形状の維持が可能となるほか、圧縮部材としての利用も可能となる。

膜面硬化の先行研究は大きく分けて 2 種類あり、インフレータブル構造展開後に膜材にラミネートされた樹脂を硬化させることで、膜材だけを硬化させる手法<sup>2)</sup>と、内部の空間を発泡硬化剤で充填することで伸展と硬化を行う手法<sup>3)</sup>が存在する。本研究で

は、これらの手法のうち発泡硬化剤を用いた硬化手法に着目した。

この手法のデメリットとして質量増加が挙げられるが、その要因は発泡硬化剤そのもの、また発泡硬化剤の攪拌装置である。例えば、インフレータブル構造伸展時に発泡硬化剤を反応させ内部を満たすことにより伸展、硬化するが、直径が大きいインフレータブル構造内部に発泡硬化剤を充填する場合、充填する体積が大きい分、質量が大きくなる。また発泡硬化剤を発泡・硬化させるためには水と攪拌することで化学反応を生じさせる必要があり、これら二液の攪拌を行う装置が必要となる。

これらの質量増加の課題に対し、本研究では発泡硬化剤とマイクロカプセルの組み合わせに着目し、インフレータブル構造膜面に水と発泡硬化剤を内包したマイクロカプセルを担持し、インフレータブル構造の伸展とマイクロカプセルの破裂を高真空の宇宙空間とインフレータブル構造内部の圧力との圧力差によって行うことで膜面硬化を行う手法を提案する。具体的には、硬化フェーズに着目し、マイクロカプセルが減圧により破裂し、水とカプセルに内包された発泡硬化剤が反応することで発泡ウレタンが形成されるか調査した。

## 2. 発泡硬化剤を用いた硬化手法のメリット

膜構造であるインフレータブル構造は膜面を硬化しなければ引張り力以外を受け持つことができず、内圧を受けてはじめて剛性を持つ構造物である (図 1). そのため、曲げ荷重に対する膜の応力状態が引張りから圧縮に変化した時点で座屈が生じる. 曲げ荷重を受ける内圧  $p$  を付与した円筒膜の臨界モーメント  $M$  を式(1)に示す<sup>4)</sup>. 式(1)から分かるように、臨界モーメント  $M$  は付与された内圧  $p$  の大きさに比例することが分かる. つまり、インフレータブル構造のガスがリークするとこの臨界モーメント  $M$  が極めて低くなり、構造部材として成立しなくなることが分かる. よって、膜面を硬化することで圧縮力に対しても荷重を負担できるようにする必要がある.

発泡硬化剤を用いた硬化手法は、膜面構造であるインフレータブルチューブの膜厚を上昇させ、かつ硬化することで構造剛性を高める. 硬化後のインフレータブル構造を薄肉円筒構造とみなせた場合、構造剛性、最大曲げモーメントはそれぞれ式(2), (3)で表すことができる<sup>5)</sup>. 式(3)より、内部のガスがリークしたとしても構造部材として成立することが分かる. また、円筒の座屈モーメントは膜厚  $t$  の二乗で増加する. そのため、膜厚  $t$  を変化させず膜材を硬化させる手法の場合、座屈モーメントは縦弾性係数に依存する. しかし膜厚  $t$  を増加させつつ硬化を行う発泡硬化剤を用いた硬化手法では、膜材を硬化させるだけの手法より、座屈モーメント、構造剛性の面で有利となる.

$$M = \frac{\pi}{2} pr^3 \quad (1)$$

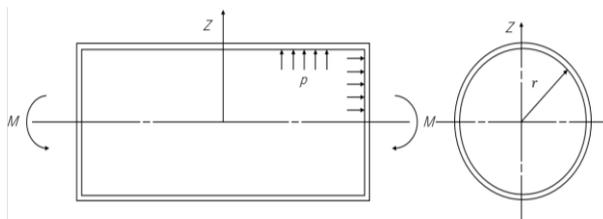


図 1 曲げモーメントを受ける円筒膜<sup>4)</sup>

$$EI_z = E \frac{\pi}{64} (D_1^4 - D_2^4) = E\pi r^3 t \left( 1 + \frac{t^2}{4r^2} \right) \quad (2)$$

$$M_{max} = \frac{2\sqrt{2}}{9} \frac{\pi}{1-\nu^2} Ert^2 \quad (3)$$

## 3. マイクロカプセルを用いた膜面の硬化手法

本研究で提案したマイクロカプセルを用いたインフレータブル構造の硬化手法について説明する.

マイクロカプセルとは、その名の通りマイクロメートルオーダーのカプセルであり (図 2), カプセルの構造は、カプセル壁材と内包物である芯物質から構成される.

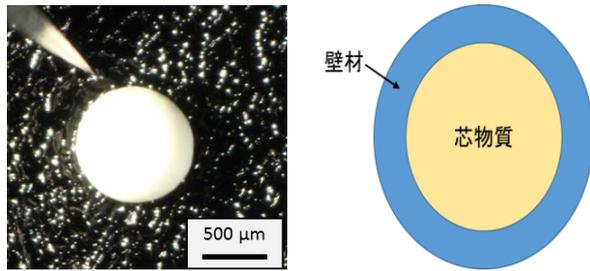
マイクロカプセルは、カプセル壁材により外部から芯物質を隔離することができる. 本研究では、発泡硬化剤と水を芯物質として内包した 2 種類のマイクロカプセルをインフレータブル構造膜面に接着した SMP フォーム形成時に担持し、圧力変化を用いてカプセルを破壊することで膜材を発泡・硬化することを想定している. 図 3 に示す硬化までの過程を以下に述べる.

- ① 発泡硬化剤と水を内包したマイクロカプセルを担持したインフレータブルチューブを製作し、気密容器内に折りたたんだ状態で収納する.
- ② 打上げ後、宇宙空間で気密容器を開封する. インフレータブルチューブが真空環境にさらされ、インフレータブルチューブ内の内圧により伸展する.
- ③ インフレータブルチューブの展開による体積変化によって、インフレータブルチューブ内の内圧が低下する. これに伴いマイクロカプセルの内外に圧力差が生じ、マイクロカプセルが破壊される. カプセルの破壊によって内包物が混合し、発泡硬化剤と水の反応によって発砲ウレタン層がインフレータブル膜内部に生成される.

この硬化手法のメリットは、従来の発泡硬化剤を充填する手法に比べて軽量であることが挙げられる. この手法では、図 3 のように水が芯物質として内包されたマイクロカプセルと発泡硬化剤が芯物質として内包されたマイクロカプセルを混合させた状態でインフレータブルチューブ膜面に担持する. これによりカプセルが破裂した際に二液を攪拌した状態を再現できるため、発泡硬化剤を反応させるために必要な攪拌装置が不要となる. また、インフレータブルチューブ内を全て発泡硬化剤で満たすわけではないので、発泡硬化剤の使用量を削減できる. これらのことから、この手法は従来の発泡硬化剤を用いた硬化手法と比較して軽量化が期待される.

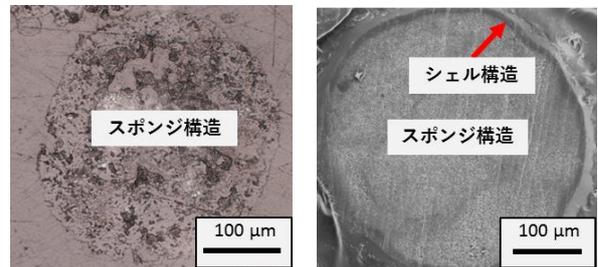
そのほか、この手法ではインフレータブル構造の伸展から硬化までのプロセスが、打ち上げ時の収納に用いる気密容器の開封のみで行われるというメリ

ットがある。インフレータブル構造の展開から効果までのプロセスが少ないことから、信頼性向上にも繋がる。



(a) マイクロカプセル (b) マイクロカプセル構造  
図 2 マイクロカプセルの概要

マイクロカプセル A は、カプセル壁にあたる密度が濃いシェル構造と多孔質であるスポンジ構造から構成されており、マイクロカプセル B は、全体がスポンジ構造で構成されていることが確認された。



(a) マイクロカプセル A (b) マイクロカプセル B  
図 4 生成されたマイクロカプセルの断面図

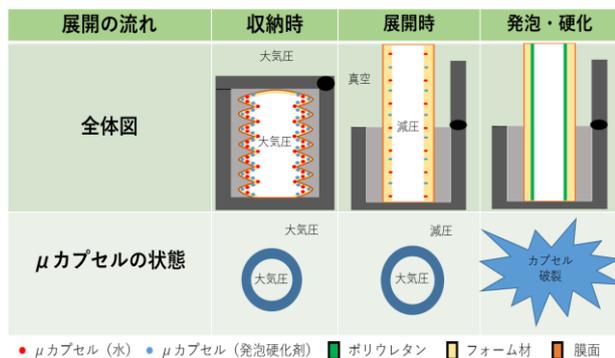


図 3 マイクロカプセルを用いた硬化手法の概念

#### 4. 圧力変化を用いたマイクロカプセルの破壊

##### 4.1. マイクロカプセルの生成例

圧力変化によってマイクロカプセルを破壊できるかを確認するため、発泡硬化剤を内包した 2 種類のマイクロカプセルを用いて破壊実験を行った。

マイクロカプセルは、旭川工業専門学校千葉誠研究室に生成を依頼した。マイクロカプセルは、グリセロールが溶解された 3 wt%-SDS 水溶液を攪拌したものに、キシレン、発泡硬化剤である IPDI を混合させたプレポリマー溶液を滴下後、反応させることで作成する。作成に使用したプレポリマー溶液はシクロヘキサノンに溶解された TDI とグリセロールより合成し、140 °C で 8 min 加熱し濃度を上昇させたものである<sup>6)</sup>。生成されたマイクロカプセルの壁材はポリウレタン、芯物質は IPDI とシクロヘキサノンで構成されている。

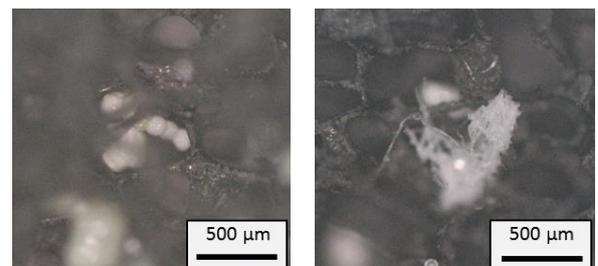
反応時間 5 min で作成したマイクロカプセル A と、プレポリマー濃度をマイクロカプセル A より減少させ、反応時間 5 min で作成したマイクロカプセル B の断面構造を図 4 に示す。

##### 4.2. カプセル破壊と発泡ウレタン生成実験

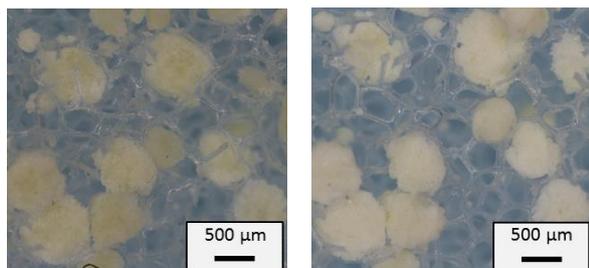
発砲ウレタン生成に必要な IPDI は、マイクロカプセル壁材によって外環境と隔離されているが、空気中の水分がカプセル壁を透過できてしまう。そのため、IPDI が空気中の水分と反応した場合には、カプセル内部で硬化してしまう。未反応 IPDI がカプセル内部に存在しない場合、インフレータブルチューブ伸展後の膜面硬化フェーズでマイクロカプセルが破裂できたとしても膜面硬化が達成されない。

そこで、生成後のマイクロカプセル内に未反応 IPDI が存在するかを確認するため、マイクロカプセル A, B それぞれに対して、まずは力によって破壊することで内包物の状況を確認した。具体的には、各マイクロカプセルを万力で挟み、押しつぶすことで破壊した。また破壊後のカプセルに水を滴下し、発泡ウレタンが生成されるかを観察した。

発泡ウレタンの生成状況を光学顕微鏡で観察した結果を図 5 に示す。観察結果から、マイクロカプセル A ではカプセル周辺にスポンジ状の物質が観察されたことから、発泡ウレタンの生成が確認されたと判断した。一方マイクロカプセル B では、破壊前後に変化が見られなかったことから、発泡ウレタンの生成が確認されなかった。



(a) 破壊前 (b) 破壊+水滴下後  
マイクロカプセル A



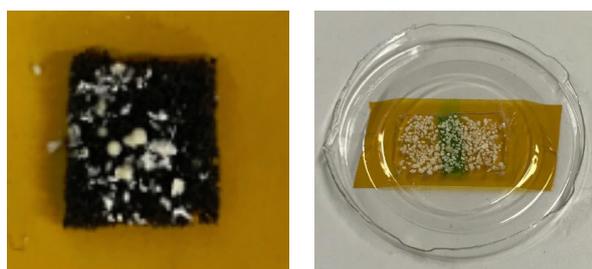
(a) 破壊後 (b) 水滴下後  
マイクロカプセル B

図 5 発泡ウレタン生成状況の観察結果

### 4.3. 圧力変化によるマイクロカプセルの破壊実験

4.2 では各マイクロカプセルに直接的に力を加えることで破壊したが、本節では圧力差によりマイクロカプセルを破壊できるかについて実験を行った。

マイクロカプセルの担持状態を図 6 に、また圧力差による破壊実験に用いた実験装置の概要を図 7 に示す。



(a) マイクロカプセル A (b) マイクロカプセル B

図 6 減圧実験に用いたマイクロカプセル

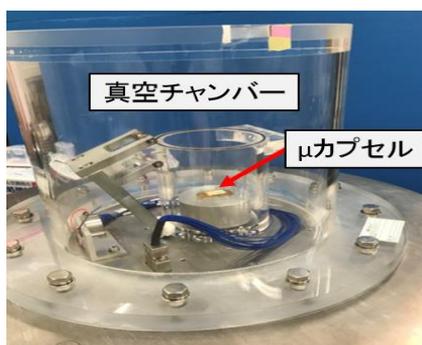
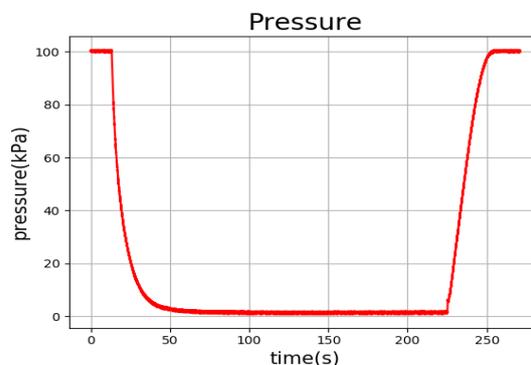


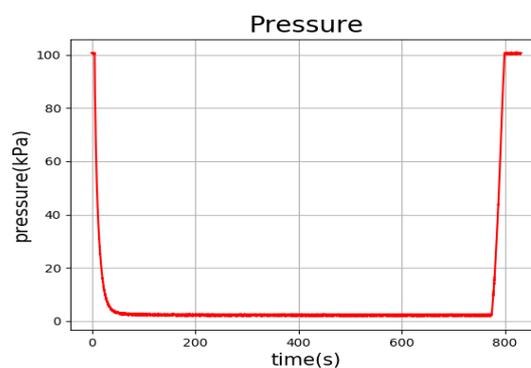
図 7 実験装置の概要

破壊実験は、図 6 のように担持されたマイクロカプセルを真空チャンバー内にセットし、チャンバー内の圧力を下げることでマイクロカプセルが破壊するかを観察した。真空チャンバー内は、約 2 kPa まで減圧した。マイクロカプセル A においては、減圧状態を約 2.5 分間維持した。マイクロカプセル B においては、減圧状態を約 10 分間維持した。減圧後は、各マイクロカプセルを大気圧環境に戻し、水を滴下

した。マイクロカプセルが圧力差により破壊されていた場合、水と IPDI の反応によって発泡ウレタンが生成されることから、発泡ウレタンの生成状態を光学顕微鏡で観察した。真空チャンバー内の圧力履歴を図 8 に、破壊実験前後での各マイクロカプセルの観察結果を図 9 に示す。



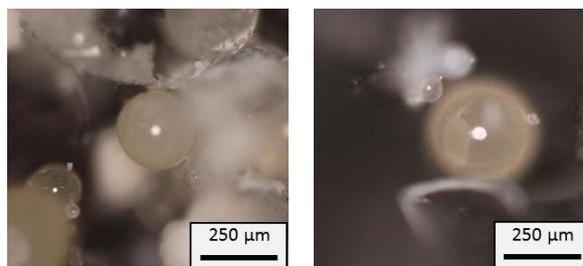
マイクロカプセル A



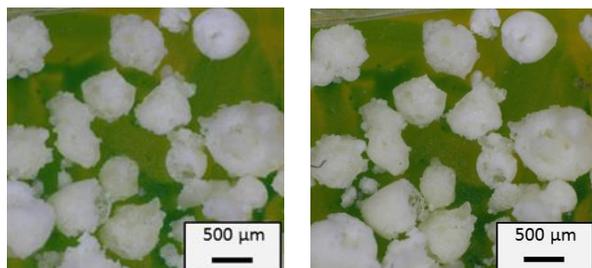
マイクロカプセル B

図 8 減圧実験時の圧力履歴

図 9 より、実験前後で 2 種類のマイクロカプセルの形状に変化はなく、発泡ウレタンの形成も確認できなかった。このことから、今回用いた各マイクロカプセルを圧力変化で破裂できていないことが確認された。



(a) 真空引き前 (b) 真空引き+水滴下後  
マイクロカプセル A



(a) 真空引き前 (b)真空引き+水滴下後  
マイクロカプセル B

図 9 減圧による発泡ウレタンの形成の観察

#### 4.4. 考察

シェル構造とスポンジ構造で構成されるマイクロカプセル A と、スポンジ構造のみで構成されるマイクロカプセル B を用いて、力による破壊と圧力差による破壊実験を行い、破壊後の発泡ウレタン生成について観察した。

力による破裂時の発泡ウレタン形成実験では、マイクロカプセル A で発泡ウレタンが生成されたのに対し、マイクロカプセル B で発泡ウレタンが生成されなかったことから、マイクロカプセル A 内部には未反応状態の IPDI が存在していたことが確認できた。これは、マイクロカプセルを構成するシェル構造の有無が関係していると考えられ、マイクロカプセル A に存在するシェル構造が IPDI と反応しようとする空気中の水分の透過速度を遅らせたためと考える。

次に圧力差を用いたマイクロカプセルの破壊実験では、どちらのカプセルも破裂されなかった。その原因を考察するため、まず単純化のためにマイクロカプセル A の構造を、図 10 のような IPDI とシクロヘキサノンが芯材として内包された球殻として置き換える。

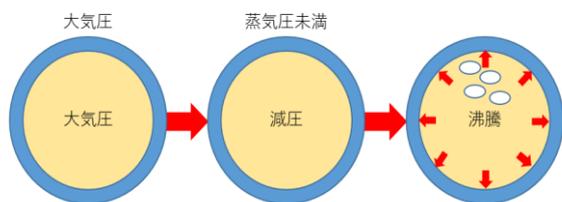


図 10 マイクロカプセルの簡易化概要

マイクロカプセルの破壊においては、マイクロカプセルを大気圧環境から減圧環境に変化させた際、カプセル内部に含まれるシクロヘキサノンの圧力が蒸気圧未満まで低下することでシクロヘキサノンが沸騰し、蒸気圧によりマイクロカプセルに内外圧差が生じ割れると想定していた。しかし、実験では外気

圧力を 2 kPa 程度までしか減圧できず、シクロヘキサノンの蒸気圧まで減圧できていなかったと考えられる。そのためカプセル内部の圧力上昇が起きず、カプセル壁を破壊させるまでの応力が生じなかったと考える。

そこで、外気が高真空状態で、シクロヘキサノンの蒸気圧に達した場合を仮定し、その状態でカプセル壁に生じる応力を計算する。図 11 のように、マイクロカプセル A のシェル構造をカプセル壁、スポンジ構造を全て溶液とみなした球殻を考える。球殻の場合、カプセル壁に生じる周方向応力は式(4)<sup>7)</sup>、カプセル内圧  $P_a$  は、常温時 (22 °C) のシクロヘキサノンの蒸気圧であり、式(5)として表すことができる<sup>8),9)</sup>。  $a$  はカプセル壁の内半径、  $b$  は外半径である。  $P_b$  は外圧であり、高真空であるため無視できるとした場合、表 1 の各パラメータを式(4)に代入することで計算される最大周方向応力は、0.67 kPa となった。

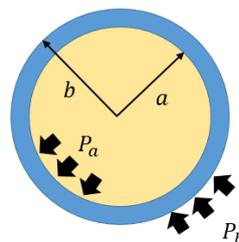


図 11 マイクロカプセルに作用する力もモデル化

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_a a^3}{b^3 - a^3} \left( 1 + \frac{b^3}{2r^3} \right) - \frac{P_b b^3}{b^3 - a^3} \left( 1 + \frac{a^3}{2r^3} \right) \quad (4)$$

$$P_2 = e^{-\frac{r}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} P_1 \quad (5)$$

$P_2$  : 任意温度の蒸気圧,  $r$  : 蒸発熱,  $R$  : 気体定数,  
 $T_1$  : 大気圧時の沸点,  $P_1$  : 大気圧,  $T_2$  : 任意温度

表 1 式(4)に用いる値

内圧 : $P_a$ kPa	0.5
外圧 : $P_b$ kPa	0
内半径 : $a$ $\mu\text{m}$	42
外半径 : $b$ $\mu\text{m}$	60

マイクロカプセル A のシェル構造の材料であるポリウレタンの引張強度は、98 kPa ~ 8336 kPa<sup>10)</sup> であり、カプセル壁のシェル構造に生じる応力が、この引張強度を上回らなければカプセル壁の破裂に至らない。先の計算結果から、常温においてはカプセル壁に生じる周方向応力は破壊応力の 1% にも満たないため、破裂しなかったと考えられる。

## 5. おわりに

発泡硬化剤を用いたより軽量のインフレータブル構造の硬化手法として、新たに発泡硬化剤とマイクロカプセルを用いた手法を提案した。

この手法において、マイクロカプセルの破裂と内包物の反応による発砲ウレタン生成過程が重要であることから、本手法で想定されるマイクロカプセルを実際に生成し、力と圧力差のそれぞれにおいてマイクロカプセルを破壊できるかについて破壊実験により確認した。また破壊後のカプセルと水を反応させることで、発砲ウレタンの生成状況を光学顕微鏡で観察した。

マイクロカプセルを圧力差により破壊する実験では、シクロヘキサノンがカプセル内部で沸騰する蒸気圧まで圧力差を与えられなかったことから、破壊に至らなかったと考察した。そのため、シクロヘキサノンの蒸気圧とカプセル壁に生じる応力を計算し、カプセル破壊の有無について確認した。その結果、常温のシクロヘキサノンの蒸気圧では、マイクロカプセルが破壊にいたるために必要な応力をカプセル壁に与えることができない事が分かった。

今後は、小さな応力でも破裂できるマイクロカプセルの検討、または、日照時にインフレータブル構造を伸展させることで太陽光の熱によりシクロヘキサノンの温度を上昇させた場合のマイクロカプセルの破裂について検討する予定である。

## 謝辞

本研究において、旭川工業高等専門学校の千葉誠先生と星敬仁さんに、マイクロカプセル生成条件の検

討とカプセル生成をして頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 角田博明, 他: 宇宙インフレータブル構造の硬化方法に関する検討, 第16回宇宙構造・材料シンポジウム, 2000年
- 2) 角田博明, 他: 低織密度三軸織物を硬化層に用いた宇宙インフレータブル構造の検討, 航空宇宙技術, 第2巻, pp.9-16, 2003年
- 3) 知念克典: 日本大学生産工学研究科修士論文, 発泡材料を用いた宇宙膨張硬化構造の力学特性, 1996年
- 4) 林毅, 他: 軽量構造の理論とその応用(下), pp.177-178, 1968年
- 5) 倉西正嗣, 他: 弾性安定要覧, pp.527-528, 1961年
- 6) 星敬仁, 他: 宇宙構造材料への応用に向けたインフレータブル構造を有するジイソシアネート内包カプセルの形成, 化学系学協会北海道支部, 2019年冬季
- 7) 矢部彰: 機械工学便覧基礎編 α3, p67, 2013年
- 8) 三協化学株式会社: シクロヘキサノン安全データシート
- 9) 石井一洋, 他: 工業熱力学基礎編, pp169-170, 2013年
- 10) 伊藤公正: プラスチックデータハンドブック, p133, 1980年