

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：16201
 研究種目：基盤研究(C)（一般）
 研究期間：2018～2021
 課題番号：18K04554
 研究課題名（和文）柔軟宇宙構造物にマイクロカプセルを応用した材質的かつ幾何学的構造剛性の向上
 研究課題名（英文）Material and Geometrical Improvement on Structural Rigidity for Inflatable structures by using Micro-Capsule
 研究代表者
 勝又 暢久（Katsumata, Nobuhisa）
 香川大学・創造工学部・准教授
 研究者番号：60534948
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙インフレータブル構造は、大型宇宙構造物への応用が期待されている構造である。膜材などで気密構造を構成するため軽量であり、気体などの充填のみで展開できることから機械的なアクチュエータを必要としないためである。しかし、いわゆる風船と同じ構造なので、内圧が保持できなくなると機能しない。その課題解決に向け、本研究ではインフレータブル構造の展開後の硬化に着目した。ただし、膜材のみを硬化するのではなく、発砲ウレタンなどで硬化層を生成できる材料をマイクロカプセルに内包させ、展開後に軌道上で生成することを考えた。そのため、材質的硬化のみでなく発砲硬化層による幾何学的な構造剛性・強度の向上に着目して研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

紫外線などを用いた膜材の硬化手法については、先行研究として提案されている。しかし、膜材が硬化したとしても厚さは同じなので、構造剛性に対するメリットはそこまで得られていなかった。一方、発砲硬化層を生成して硬化できた場合には、膜厚の数～数十倍の厚さの構造を打ち上げ後の軌道上で生成できることになる。曲げ変形を例にとれば、構造物の厚さの3乗に比例して剛性が変化するので、発砲硬化層による硬化手法は幾何学的にも性能を向上させることができる点でメリットがある。また剛性が向上すれば変形しにくくなるため、構造物の大型化が達成しやすくなる。

研究成果の概要（英文）：The space inflatable structure is a structure that is expected to be applied to large space structures. This is because it is lightweight due to an airtight structure made of a membrane materials, and it does not require a mechanical actuator because it can be deployed only by filling it with gas. However, since it has the same structure as a so-called balloon, it will not function if the internal pressure cannot be maintained. In order to solve this problem, this study focused on rigidization after the deployment of the inflatable structure. However, instead of rigidizing only the membrane material, we considered creating a foamed cured layer in orbit by encapsulating the urethane foam material in the microcapsules and destroying the microcapsules after deployment. Therefore, the research focused not only on the material rigidization but also on the improvement of the geometrical structural rigidity and strength by creating the the hard foam layer.

研究分野：宇宙構造物工学

キーワード：宇宙インフレータブル構造 マイクロカプセル 発砲硬化 構造硬化 発砲ウレタン

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1 . 研究開始当初の背景

宇宙インフレーター構造は、いわゆる風船と同じ構造である。そのため、コンパクトに折りたたんだ状態で宇宙空間まで運び、軌道上で気体（場合によっては水風船のように液体も可能）を注入して展開すれば、展開構造物として宇宙で機能させることが可能である。機械的な伸展機構やアクチュエータを用いることなく展開できるメリットを有するため、次世代の数十～数百メートル規模の大型宇宙構造物が実現できる構造として期待されていた。

一方、風船と同様に内圧が保持されることで形状が維持されるため、スペースデブリやマイクロメテオロイドなどによって構造のどこかに穴が開いた場合には、風船のように萎み、構造として機能しないデメリットも有している。そのため、紫外線などで硬化する膜材を用いてインフレーター構造を構成し、展開後に硬化させる研究が先行研究として行われていた。膜材を硬化することで構造剛性・強度ともに向上はするが、材料物性の変化の範囲を超えることはない。そのため、硬化のメリットがより得られる手法は？という問いが本研究の着想を得たきっかけである。

そこで本研究では、ウレタンフォームのような発砲硬化に着目した。インフレーター構造の展開後、膜構造内部に発砲硬化層を生成できた場合には、先行研究のような材質的な硬化に加えて、構造の厚さを数倍～数十倍に増加させることができる。曲げ剛性を例にとれば、剛性が同じであれば厚さの3乗に比例して剛性は向上するため、厚さを増加させることができた場合には、構造剛性を幾何学的にも向上させることが可能になる。また、インフレーター構造のメリットであるシンプルな展開方式を阻害しないために、発砲硬化層を生成する反応液をマイクロカプセル内に内包することも考案した。

マイクロカプセルにおいては、ジイソシアネートの有機溶媒溶液、もしくはポリオール水溶液を内包する2種のカプセルを生成することを目的とした。これらのカプセルが攪拌された状態でインフレーター構造の膜構造に担持されれば、カプセルの破壊のみによってカプセル内のジイソシアネートとポリオールが流出し、これらが反応する。反応によってポリウレアならびにポリウレタンがインフレーター構造内部に形成され、エイジングすることで発砲硬化が達成されると考えた。

2 . 研究の目的

発砲硬化層を有するインフレーター構造の軌道上での構築を目標とした上で、発砲硬化層の生成方法と発砲硬化層を生成するために必要なマイクロカプセルの分量など、まずは実現可能条件を明らかにすることを目的とした。

次に、従来の内圧保持のみによるインフレーター構造と発砲硬化層を有するインフレーター構造を有限要素解析によって比較し、構造剛性・強度がどの程度向上するかについて、定量的な指標を得ることを目的とした。

また発砲ウレタン反応液のマイクロカプセル化については、合成されるカプセルの反応条件によりカプセル内部構造および形状が変化することが予想される。特にカプセルの内部構造はカプセルに内包される硬化剤であるジイソシアネート量と大きく関連することから、カプセル合成において非常に重要なパラメータになる。そこで合成したジイソシアネート内包カプセルの形態と内部構造を観察することで、これらがポリウレタンシェル合成時間によりどのように変化するかを評価することを目的とした。

3 . 研究の方法

発砲硬化層を有するインフレーター構造の構造面については、構造概念の検討から始め、打ち上げまでの収納方法、軌道上での展開方法、展開後の発砲硬化層生成方法について検討した。またこれらの検討内容の実現可能性について、定量的な評価を行った。

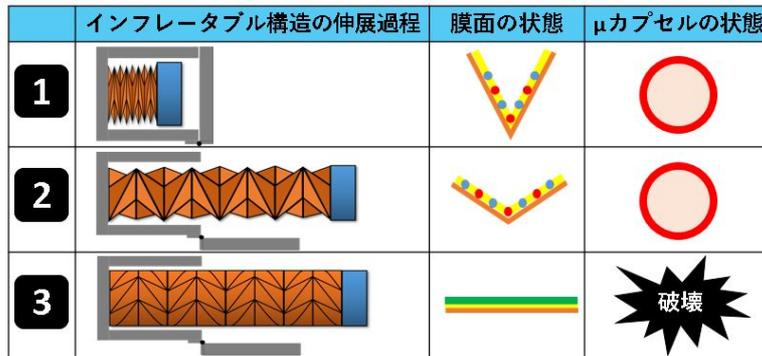
構造剛性・強度については、実験室規模での実験が可能なサイズのインフレーター構造を仮定した上で、従来の内圧のみが作用する場合、発砲硬化層を有する場合、発砲硬化層がありかつ内圧がない場合、などの条件を仮定した上で有限要素解析モデルを作成した。それぞれのモデルに対して弧長法による非線形座屈解析を行い、荷重と変位の関係や座屈発生時の荷重を比較することで、発砲硬化層を有するインフレーター構造のメリットを評価した。

マイクロカプセルについては、反応時間と生成されたカプセルの内部観察から、発砲ウレタン反応液を内包するマイクロカプセルの生成条件について検討した。具体的には、プレポリマー溶液にカプセル内包硬化剤であるイソホロンジイソシアネート (IPDI) とカプセルの内部固化阻害剤であるキシレン、およびシクロヘキサノン溶媒を添加し、プレポリマー濃度 10 wt% となるよう調整した。これをグリセロールノドシル硫酸ナトリウム (SDS) 水溶液を 300 rpm で攪拌しながら少しずつ滴下して、反応時間 10～40 min 保持し、IPDI と有機溶媒を内包するカプセルを合成した。合成後にろ別、乾燥後、カプセル表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。またカプセルを樹脂に埋設して切断・研磨後、その断面を SEM 観察することで、内部構造を確認した。

4 . 研究成果

(1) 発砲硬化型インフレーターブル構造の概念検討

インフレーターブル構造のメリットを保ちつつ、発砲硬化層を展開後に生成する手法の概念検討として、図1に示す方法を考案した。1は打ち上げ前の状態であり、インフレーターブル構造は気密容器に収納されている。収納状態でもインフレーターブルチューブ内に空間があり、残存気体が存在するが、密閉容器内は大気圧であるため宇宙空間でインフレーターブル構造が誤展開することはない。軌道上では2のように密閉容器を開放する。大気圧に保たれていた容器がそれより低い圧力の環境にさらされるため、残存気体を用いてインフレーターブル構造は展開する。つまり残存気体を展開のアクチュエータとして利用する。急な圧力差によりインフレーターブルチューブも急激に展開する可能性があるため、インフレーターブルチューブ内にワイヤーを通しておき、図中青色の先端キャップの伸展速度をコントロールすることも検討した。次に3のようにインフレーターブルチューブの展開が安定した状態でマイクロカプセルを破壊し、内包物が反応してチューブ内部に発砲硬化層が形成されて完了する。マイクロカプセルの破壊においては、インフレーターブルチューブ内とマイクロカプセル内の圧力差や周囲からの加熱によって、内包物の気化によるカプセル内圧の上昇による破壊が現実的だと考えた。また、カプセル内包物の反応によってCO₂などの反応気体が発生するが、インフレーターブルチューブの内圧を高めることに利用する。



● IPDI内包カプセル ● 水内包カプセル ● SMPフォーム ● ウレタン ● 膜面
 図1 発砲硬化型インフレーターブル構造の収納から展開までの状態変化

次に、発砲硬化層を生成するために必要なマイクロカプセルの分量と生成される発砲硬化層の関係について概算した。まずは、IPDIを内包するマイクロカプセルを物理的に破壊し、そこに水を加えて反応させることで、発砲倍率や反応後の体積を実験により計測した。そのデータをもとに、長さ1m、直径が30, 60, 90mmの3つのケースのインフレーターブルチューブを想定し、その内部にある厚さの発砲硬化層を生成するために必要なカプセルの分量について計算した。その結果を図2, 3に示す。計算されたカプセルの総数による表面積は、インフレーターブルチューブの表面積を超えることはなかったため、インフレーターブルチューブ内部に担持可能であることが示された。

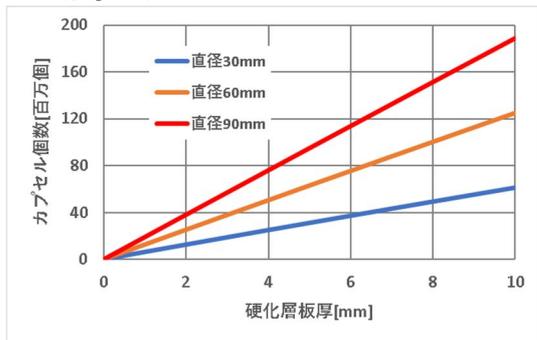


図2 IPDI内包カプセルの必要個数

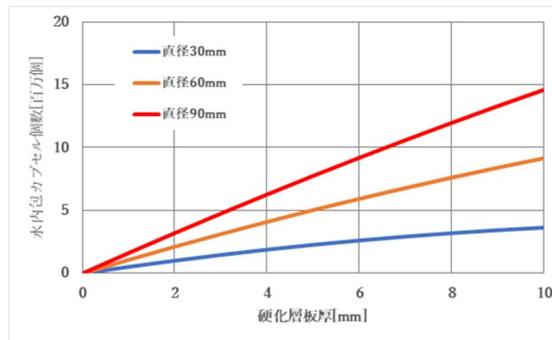


図3 水内包マイクロカプセルの必要個数

(2) 曲げ座屈解析による発砲硬化型インフレーターブル構造の曲げ剛性・強度解析

図4に示す解析モデルを構築し、市販の非線形有限要素解析ソフトウェア MSC Marc で解析した。実験室規模で実験できる大きさを想定し、長さ400mm、直径60mmとした。通常のインフレーターブル構造で内圧がある場合、発砲硬化層があり内圧がない場合、発砲硬化層があり内圧もある場合について弧長法により荷重と変位の関係を解析し、曲げ剛性と曲げ強度について計算した。一般的に、インフレーターブル構造では曲げ変形による圧縮側のしわ発生(リンクリング)が座屈に対応するため、強度についてはリンクリングまでの荷重を基準に比較した。

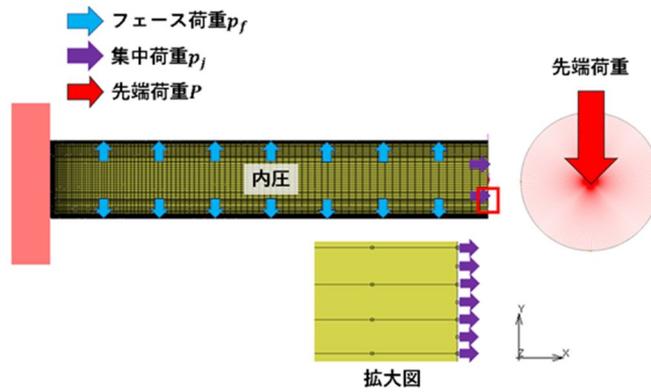


図4 インフレーター構造の解析モデル

発砲硬化層があり内圧もある場合の発砲硬化型インフレーター構造において、先端荷重と先端たわみの関係を図5に、発砲硬化層厚さが1mmの場合の座屈状態図を図6に、硬化層厚さをパラメータに座屈状態が異なる場合の曲げモーメントの比較を図7に示す。

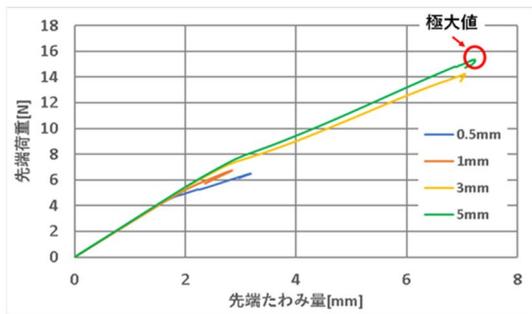


図5 発砲硬化型インフレーター構造の先端荷重とたわみの関係

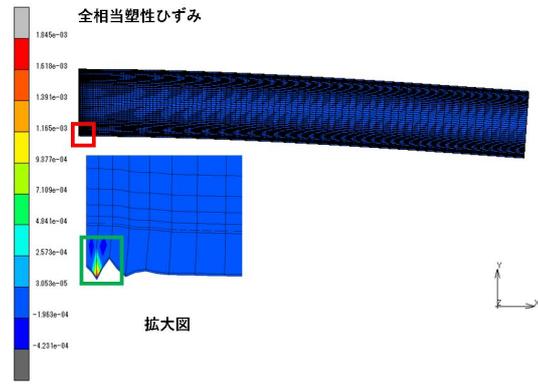


図6 発砲硬化層厚さ1mmの場合の解析結果

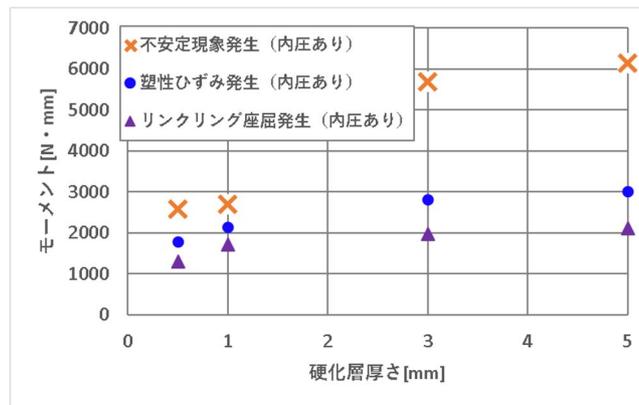


図7 各座屈状態と曲げモーメントの関係

最後に、通常のインフレーター構造で内圧がある場合、発砲硬化層があり内圧がない場合、発砲硬化層があり内圧もある場合に対して上記の解析を行い、曲げ剛性を比較した図を図8に、リンクリング座屈時の曲げ強度を比較した図を図9に示す。

膜材のヤング率に比べて発砲硬化層のヤング率を1/4倍に設定して解析を行ったため、曲げ剛性の向上はみられたが、厚さ増加による影響は少なかった。しかし、発砲硬化型インフレーター構造において内圧がない場合においても、内圧がある場合と比較して曲げ剛性に大きな差がなかった。つまり、内圧が保持できなくなっても構造として十分機能できることが示された。

強度に関しては、通常の内圧保持によるインフレーター構造に比べて2倍以上の強度向上が得られる結果となった。また、インフレーターチューブの膜厚と発砲硬化層厚さの比率も関係するが、発砲硬化層厚さが3mmまでは発砲硬化層厚さの増加に伴い強度も向上したが、5mmまで増やしても強度向上の効果が低いことが示された。発砲硬化層厚さの上限値が得られたことは構造全体重量の削減にもつながるため、有用な結果が得られたと考えられる。

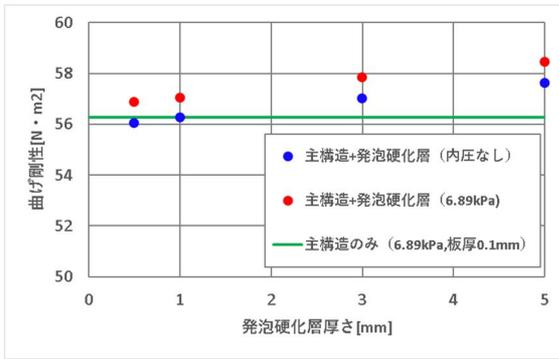


図 8 発泡硬化層厚さの違いによる剛性比較

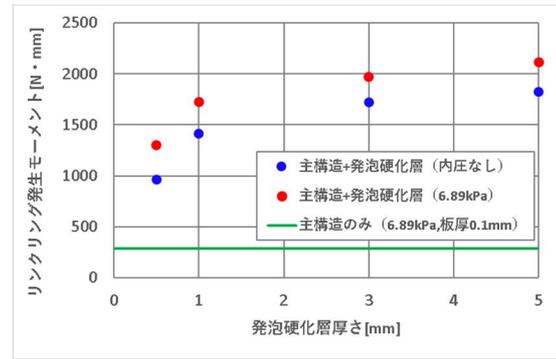


図 9 発泡硬化層厚さの違いによる剛強度比較

(3) 発泡ウレタン反応液を内包するマイクロカプセルの生成

図 10 (a)は、反応時間 10 min、図 10 (b)は 40 min で合成したカプセルの表面 SEM 画像である。図 10 (a)より、反応時間 10 min で合成すると、ポリウレタンの破片もいくつか観察されたが、50 ~ 400 μm 程度、平均径 120 μm 程度のほぼ真球状のカプセルが複数観察された。また、図 10 (b)より、反応時間を 40 min と増大させてもこの傾向はほとんど変わらずサイズに大きな分布を有する平均 120 μm 球形カプセルとポリウレタンの破片が多数形成していることが分かる。

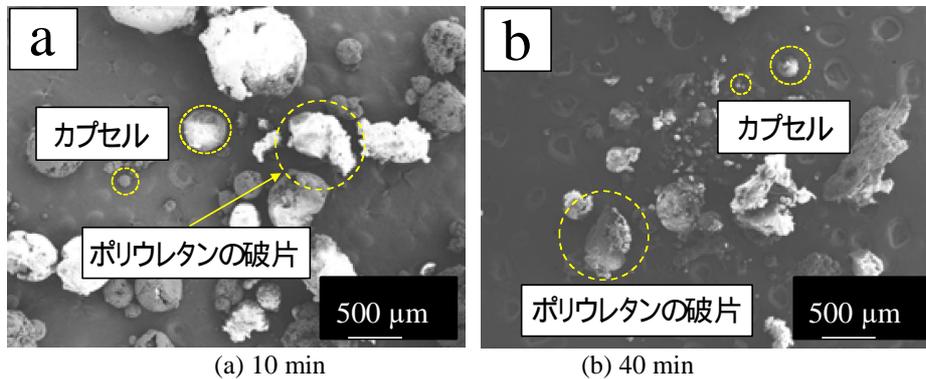


図 10 生成したマイクロカプセルの表面 SEM 画像

一方で、その内部構造は反応時間により大きく変化した。図 11 (a)に示すカプセル断面 SEM 像を見ると反応時間 10 min で合成したカプセルは外層付近に見られる高密度の構造体(シェル構造)と内部に見られる多孔質状構造体(スポンジ構造)から構成されていることがわかる。反応時間 40 min で合成したカプセルの内部構造も Fig. 2-b に示す通り、反応時間 10 min で合成したカプセルと同様にカプセル外層付近に見られる高密度のシェル構造、ならびにカプセル内部にスポンジ構造が観察された。しかし、カプセル中に観察されるスポンジ構造の割合は反応時間 10 min で合成したカプセルに比べ 40 min で合成したものが小さくなっており、また、シェル構造は 40 min のものが大きくなることが確認された。画像解析より投影面積の割合を求めると、反応時間 10 min で合成したカプセルはおよそ 70 % のスポンジ構造と 30 % のシェル構造より構成される。反応時間を 40 min と増大すると約 60 % のスポンジ構造と 40 % のシェル構造により構成されていることが明らかとなった。

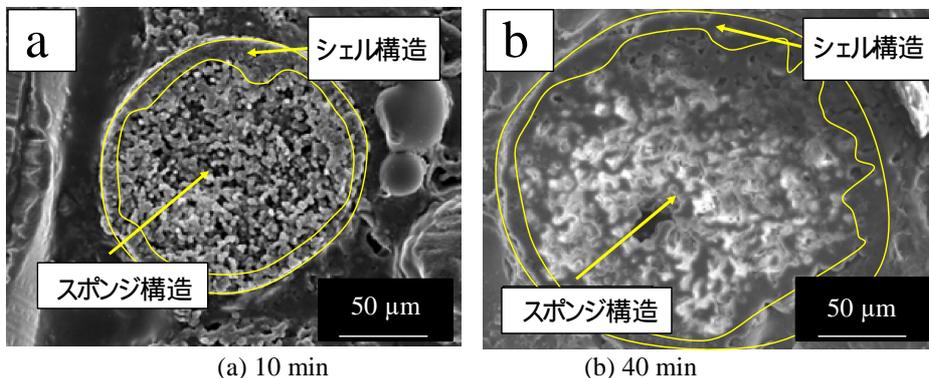


図 11 生成したマイクロカプセルの切断面 SEM 画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahito Hoshi, Haruka Okuyama, Koichiro Matsuo, Yuki Yamada, Nobuhisa Katsumata, Masahiro Sakai, Atsushi Hyono, Makoto Chiba, Ken Higuchi, Hideaki Takahashi	4. 巻 p-9
2. 論文標題 Structure of the capsule containing the solution of precursor of polyurethane for space inflatable structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Chitose International Forum on Photonics Science & Technology 19th	6. 最初と最後の頁 p-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 星敬仁, 山田祐揮, 松尾浩一郎, 兵野篤, 勝又暢久, 境昌宏, 樋口健, 千葉誠, 高橋英明
2. 発表標題 宇宙インフレーターブル構造構築に向けたジイソシアネート内包カプセルの形成とその構造解析
3. 学会等名 第71回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 星敬仁, 山田祐揮, 松尾浩一郎, 兵野篤, 勝又暢久, 境昌宏, 樋口健, 千葉誠, 高橋英明
2. 発表標題 新規宇宙構造材としてのインフレーターブル構造物開発に向けた硬化剤内包カプセル合成とその構造
3. 学会等名 第26回高専シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星敬仁, 山田祐揮, 松尾浩一郎, 兵野篤, 勝又暢久, 境昌宏, 樋口健, 千葉誠, 高橋英明
2. 発表標題 宇宙インフレーターブル構造構築に向けたジイソシアネート内包カプセル内部構造の観察とカプセル内包量の調査
3. 学会等名 化学系学協会北海道支部2021年冬季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 祐揮, 勝又 暢久, 五島 聖也, 樋口 健
2. 発表標題 μ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
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星敬仁, 柳本はるの, 山田祐揮, 松尾浩一郎, 兵野篤, 勝又暢久, 境昌宏, 樋口健, 千葉誠, 高橋英明
2. 発表標題 宇宙インフレータブル構造体への応用を目指した硬化剤内包カプセルの合成とその形態
3. 学会等名 日本化学会北海道支部 2019年 夏季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahito Hoshi, Haruno Yanagimoto, Yuki Yamada, Koichiro Matsuo, Atsushi Hyono, Nobuhisa Katsumata, Masahiro Sakai, Ken Higuchi, Makoto Chiba, Hideaki Takahashi
2. 発表標題 Structure and shape of capsules containing fixing agent for space inflatable structure
3. 学会等名 International Conference on Colloid & Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星敬仁, 柳本はるの, 山田祐揮, 松尾浩一郎, 兵野篤, 勝又暢久, 境昌宏, 樋口健, 千葉誠, 高橋英明
2. 発表標題 宇宙インフレータブル構造開発に向けた硬化剤内包カプセル形態と合成条件の関係
3. 学会等名 化学系学協会北海道支部2020年冬季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 星敬仁、奥山遥、松尾浩一朗、山田祐揮、兵野篤、勝又暢久、境昌宏、樋口健、千葉誠、高橋英明
2. 発表標題 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
3. 学会等名 化学系学協会北海道支部2019年冬季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahito Hoshi, Haruka Okuyama, Koichiro Matsuo, Yuki Yamada, Nobuhisa Katsumata, Masahiro Sakai, Atsushi Hyono, Makoto Chiba, Ken Higuchi, Hideaki Takahashi
2. 発表標題 Structure of the capsule containing the solution of precursor of polyurethane for space inflatable structure
3. 学会等名 Chitose International Forum on Photonics Science & Technology 19th (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	千葉 誠 (Chiba Makoto) (80390384)	旭川工業高等専門学校・物質化学工学科・准教授 (50104)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------