

# インフレーターブル構造用の光硬化膜の硬化特性<sup>\*1</sup>

## Characterization of Rigidization Process by a Photoinitiated Rigidizable Membrane for Inflatable Structures

角田 博明<sup>\*2</sup>・仙北谷 由美<sup>\*2</sup>

Hiroaki TSUNODA and Yumi SENBOKUYA

**Key Words:** Inflatable Structure, Large Space Structure, Rigidization, Composite Material, Photoinitiated Composites

**Abstract:** This paper describes the rigidization characteristics of a rigidizable membrane used for the inflatable structures with photoinitiated composites. The test pieces are obtained from the photoinitiated rigidizing prepreg irradiated by the xenon lamp. The DSC (differential scanning calorimetry) test, the residual styrene measuring, the sectional view and tensile modulus measuring are conducted to evaluate the rigidization characteristics. The acceptable rigidization is confirmed from these measurements. Feasibility of the rigidizing membrane used for the inflatable structures is also clarified.

### 1. はじめに

宇宙インフレーターブル構造の硬化については、様々な方法が研究されている。加熱硬化型では硬化時に、また熱可塑樹脂を用いた冷却硬化型では樹脂熔融時に加熱する必要があるため、電力などのエネルギーが必要である。したがって、構造物が大形化するのに伴い、硬化に必要なエネルギーの確保が問題になる。これに対して、紫外線硬化型の膜材料<sup>1)</sup>は、太陽光の照射による硬化が可能なので、大形な宇宙インフレーターブル構造を電力等のエネルギーを使わずに硬化させることができる。しかし、紫外線硬化型では太陽光のスペクトラムのうち250～380 nmの波長を利用しているに過ぎず、紫外線以外の波長領域を利用できれば、硬化を効率良く行うことができる。本稿では、太陽光スペクトラムの中で、紫外線より放射照度が大きな波長域（380 nm以上の可視光線）を使って硬化させる光硬化型の膜材料について、試験片による硬化実験から硬化特性を明らかにする。

### 2. 硬化実験

2.1 プリプレグ 硬化実験を行うにあたり、光硬化型プリプレグ用ビニルエステル樹脂（エポキシアクリレート樹脂）とFRP用ガラス繊維織物を使用してプリプレグを製作した。使用した材料の特性値を第1表に示す。表中の樹脂の物性値は、メタルハライドランプで照射して硬化させた時のものである。この樹脂は、土木・建築の分野で使われているが、宇宙用のインフレーターブル構造に使う場合には、耐熱温度が低いことが問題となる場合がある。しかし、ここでは光硬化による硬化特性を評価するために入手性を考慮して選定した。本樹脂は、常温の暗室で6カ月以上安定性を保っている。また、プリプレグにした状態で容易に折り

第1表 試験片で使用した樹脂と繊維の物性値

項目		特性値
樹脂	引張強度	81 MPa
	引張弾性率	3.5 GPa
	引張伸び率	2.8 %
脂	曲げ強度	116 MPa
	曲げ弾性率	3.7 GPa
織	面密度	203 g/m <sup>2</sup>
	厚さ	0.22 mm
維	糸密度	経糸19本/25 mm, 緯糸18本/25 mm (平織)
	引張強度	経823 N/25 mm以上, 緯784 N/25 mm以上

曲げが可能であり、また十分な柔軟性を有しているため、インフレーターブル構造の膜材に適している。プリプレグの寸法は、幅460 mm、長さ1000 mmである。供試体の厚さは0.3 mm、ガラス繊維質量含有率は47%、揮発分の質量割合は12%であった。本樹脂の硬化に寄与する波長域は380～450 nmである。メタルハライドランプ（波長域380～450 nm）で100 W/m<sup>2</sup>の放射強度で照射して硬化させた結果、10分以内で硬化し、バコール硬さ48、曲げ応力350 MPaの測定結果を得た。これより、光硬化用の膜材の試験片に使えると判断した。

2.2 試験片 通常の複合材料は積層構成にするが、軽量であることを特徴としたインフレーターブル構造では、低繊維密度の三軸織物を1層で構成した疑似等方性を有する膜材料の見通しが得られている<sup>2)</sup>。このため、ここでは1層での硬化特性について評価するため、単層板で試験片を製作した。本樹脂は、モノマーとしてスチレンが使用されているため、プリプレグの両側はポリエステル製のスチレン揮散防止フィルムで挟み、さらにその上から遮光フィルムで覆っている。硬化実験の後で引張試験用として、65 mm × 280 mmの試験片を作製した。

2.3 実験方法 硬化実験における光源には、太陽光のスペクトラムに近いキセノンランプを使用した。照射照度は

<sup>\*1</sup> ©2003 日本航空宇宙学会

平成15年2月18日原稿受理

<sup>\*2</sup> 日本電信電話（株）NTT未来ねっと研究所

300～700 nmの波長域で345 W/m<sup>2</sup>である。また雰囲気温度は63℃、照射時間は5, 10, 30分間である。照射の前にスチレン揮散防止フィルムと遮光フィルムを剥がし、FEP製の離型フィルムでプリプレグを挟み、石英ガラス(照射面)とアルミニウム板(背面)ではさんで固定した。

### 3. 実験結果

3種類の照射時間のうち最も短い5分間の場合でも、外観上は硬化していた。硬化実験で使用したキセノンランプの分光放射照度から、波長が380～450 nmの範囲で放射照度を積分して求めると57 W/m<sup>2</sup>である。一方、太陽光の380～450 nmの範囲の放射照度は100.8 W/m<sup>2</sup>であり、宇宙で太陽光を照射した場合には、約2倍の放射照度が得られる。したがって、この硬化膜を宇宙で硬化させると、約1/2の時間で硬化が行えると考えられる。

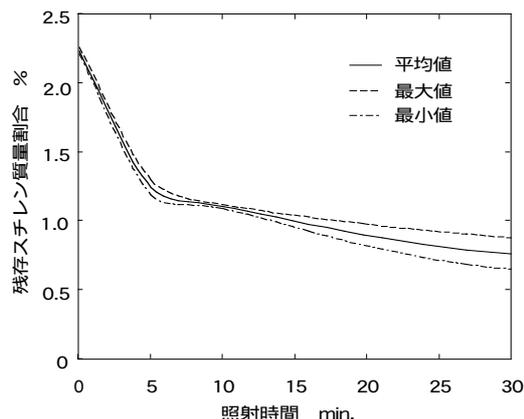
### 4. 硬化度の評価

4.1 DSCによる評価 光硬化樹脂の光重合開始剤は、光照射に反応して減少する。そこで、試験片の硬化度を求めるために、未硬化分の発熱量を示差走査熱量計(DSC)により測定した。測定用のサンプルは、試験片の照射面(石英ガラス側)と背面(アルミニウム板側)からそれぞれサンプルを切り出した。なお、サンプルは約10 mg、昇温速度は10℃/min.で窒素雰囲気中で行った。測定の結果、未照射の試験片では照射面で39.0 mJ/mg、裏面で29.7 mJ/mgの発熱量であったが、5分、10分、30分照射のいずれの試験片でも発熱量は0であった。これより、照射面・背面ともに完全に硬化していることがわかる。

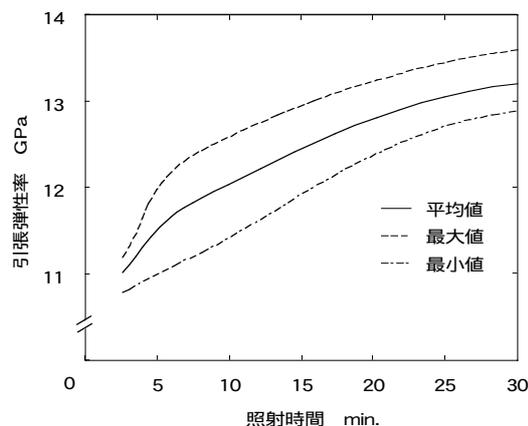
4.2 残存スチレン量による評価 ビニルエステル樹脂はスチレンに溶解されているので、硬化が進展すると残存スチレン量が低下する。この性質を利用して硬化後の試験片の残存スチレン量をガスクロマトグラフィーによる分析で求めた。なお、サンプルの質量は約50 mg、加熱条件は150℃、30分間である。測定の結果を第1図に示す。これより、5分間以上の照射で残存スチレン量は大きく低下し、硬化が進展していることがわかる。なお、スチレンは硬化後も完全になくなるとは限らず(本結果では0.8%程度を残した状態となっている)、30分照射でほぼ収束しているため、光重合剤の反応は終了していると考えられる。

4.3 断面観察による評価 キセノンランプ照射後のサンプルについて、ポイド・剥離・割れ等を評価するために断面観察を行った。その結果、僅かにポイドが認められたものの、剥離・割れなどの損傷は見られなかった。インフレーター構造では、硬化時に十分な加圧ができないので、本実験においても硬化時に圧力を与えていない。このため一部でポイドが発生したと思われる。

4.4 機械特性による評価 室温で引張弾性率の測定を行った結果を第2図に示す。本試験片と同一の強化繊維を使用し、樹脂に一般のエポキシ樹脂を使用した場合に想定される弾性率と比較すると、5分照射の場合で80%以上、30分照射でほぼ100%の弾性率が得られている。この結果よ



第1図 照射時間と残存スチレン量の関係



第2図 照射時間と引張弾性率の関係

り、弾性率の観点からも十分な硬化状態が達成できていると考えられる。

### 5. まとめ

光硬化型のインフレーター構造の基礎検討として、光硬化型プリプレグ用ビニルエステル樹脂とFRP用ガラス繊維織物(平織)を用いてプリプレグを製作し、硬化特性を評価した。DSC・残存スチレン量・断面観察・機械特性による評価を行った結果、良好な硬化が確認できた。これより、インフレーター構造の硬化膜に光硬化樹脂が使える見通しが得られた。

測定でご協力を頂いた富士重工業株式会社の松岡誠一氏・山本光紀氏に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) Ronald, A., Larry, H., Andrea, H., Raul, M., Robert, W. and Lou, M.: Inflatable Spacecraft Using Rigidization-on-Command Concept, 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2000-1637, 2000.
- 2) 角田博明, 仙北谷由美: インフレーター円環で支持した平面アンテナ膜構造の検討, 第45回宇宙科学技術連合講演会講演集, 01-2B14, 2001-10, pp. 373-378.