

2E15 30K 以下の極低温領域における宇宙機用 低熱伝導 3 重管トラスの開発

○高井茂希, 辻英俊, 岡林明伸, 恒松正二, 檜崎勝弘 (住友重機械工業株式会社),
水谷忠均, 神谷友裕, 篠崎慶亮, (宇宙航空研究開発機構),

Development of low heat conductive triple pipe truss for spacecraft under 30K

Shigeki Takai, Hidetoshi Tsuji, Akinobu Okabayashi, Shoji Tsunematsu, Katsuhiro, Narasaki (SHI),
Tadahito Mizutani, Tomohiro Kamiya, Keisuke Shinozaki, (JAXA),

Key Words: Truss, Insulation, Supporting system, Cryogenics,

Abstract

It is important to reduce parasitic heat load in designing cryogenic systems. Conductive heat load is dominant below 30K. One of major paths is support structure. A truss structure is often used to support instruments from a spacecraft. We developed a low thermal conductance tube for truss structure below 30K. It has three tubes with different diameter and tube in tube type layout to extend thermal isolation length. Each tube is connected at one end each other. Due to this layout it is about 3 times longer in thermal isolation length than conventional tube. In this paper, design, manufacture and test results of the low thermal conductance tube are described.

1. 概要

人工衛星に搭載される X 線、赤外線等の検出器は極低温まで冷却されるため、外部から検出器に侵入する熱量を可能な限り低減しなければならない。また、打上げ時の振動環境に耐える支持構造も同時に必要となる。

支持構造を強くするには部材の板厚を増やす等の対策が取られるが、それに伴い支持構造からの侵入熱量が増加し、検出器の冷却温度に影響をもたらすため、検出器を支持する構造体は断熱性能と耐振性能を満足する必要がある。

本稿では、極低温環境における断熱支持構造の部品として開発している CFRP 製 3 重管トラスの構造および熱性能の評価試験結果を述べる。

2. 設計概念

従来の断熱サポート(単管トラス)に比べ 2 点の支持端を折り返して 3 重管の構造とすることで、熱伝導に対する有効長さを長くし、折り返し部には打上げ時の耐振性を向上させるために振れ止めを設置する。

振れ止めとパイプとの間には、熱接触を避けるため、0.01~0.05mm の隙間を設けて設置しており、打上げ時の振動によりトラスに横荷重が負荷された時

には、振れ止めがパイプに接触し横荷重に対する剛性を高める。

3 重管トラスにすることにより、伝導による侵入熱量は、同じ支持間距離で単管と比べ 1/2.5 程度に抑えることが可能となる。

また、CFRP 外表面にアルミ蒸着フィルムを施工することにより、3 重管内部の各パイプ間の輻射による侵入熱量を CFRP 素地の場合と比べて 1/10 以下に抑えることが出来る。

3 重管トラスの諸元を表 1 に、外観と構成を図 1 に形状図を図 2 に示す。

表 1 3 重管トラスの諸元

項目	諸元
最大外径	φ 86 mm × L455 mm
パイプ外径×肉厚×長さ	外管 : OD56 mm×t2 mm×L427 mm 中管 : OD48 mm×t2 mm×L421 mm 内管 : OD40 mm×t2 mm×L419 mm
質量	886.9 g

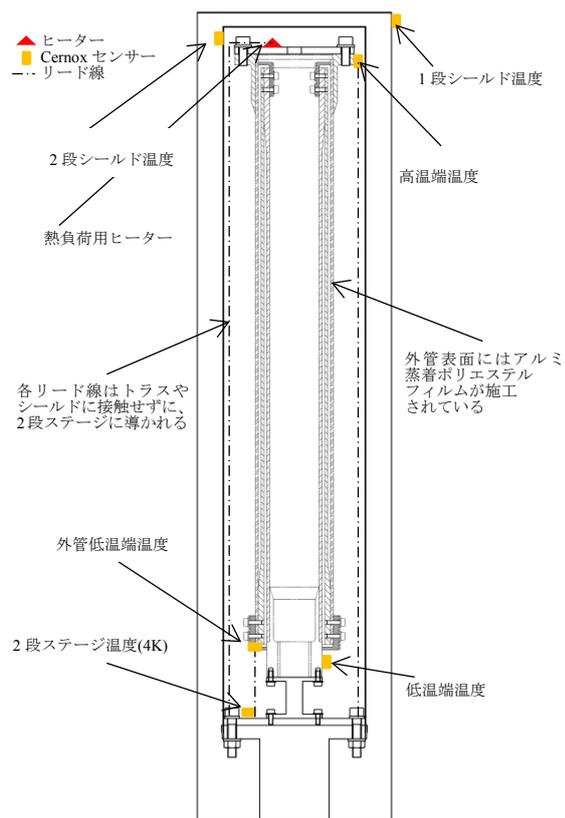


図 4 熱特性試験コンフィギュレーション (3重管)

上記コンフィギュレーションで、単管、3重管にそれぞれ 0.1mW、1.0mW の熱負荷を高温端にかけて、その温度差を測定した結果が、表 2 である。

表 2 における温度差とは、低温端と高温端の温度差である。流熱量とは、実際に単管もしくは 3重管に流れる熱量である。ヒーターにより熱負荷をかけても、実際にはリード線の熱伝導による熱流出、トラス外表面からの輻射による熱流出などがある。これらは単管や 3重管には流れていない熱量なので、これを省いた熱量が実際の流熱量となる。積分値とは、単管及び 3重管に流れる実際の熱量を、断面積と長さの比 (A/L) で割った値であり、ある構造物に熱量を負荷した時、どの程度の温度差がつくかを示す値である。つまり、この値が大きいほど断熱性能が高くなる。表 2 で単管と 3重管の積分値を比較すると、同じ熱負荷でも 2.1~2.3 倍程度大きく、それだけ断熱性能が高い事がわかった。

表 2 試験結果

供試体	熱負荷 [mW]	温度差 [K]	流熱量 [mW]	積分値 [W/m]
単管	0.1	4.332	0.0999	0.147
	1.0	21.079	0.989	1.457
3重管	0.1	8.433	0.0937	0.346
	1.0	30.091	0.850	3.139

図 5 は、表 2 の結果のプロットと、設計での想定をプロットしたものである。設計値よりも断熱性能が良くなっているのは、設計で利用していた物性値が古いデータであり、製作に使用した部材とは物性値が異なるためである。

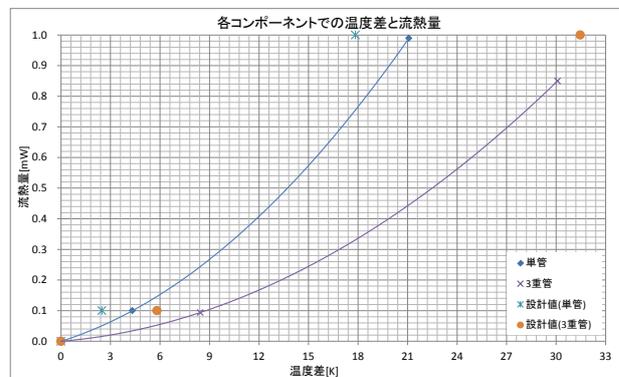


図 5 試験結果のプロットと設計との比較

また、実際に使用した部材の物性値(熱伝導率)を測定し、実測値を用いて熱数学モデルを作成し、解析を行った。計算ソフトウェア FEMAP THERMAL で試験を再現したところ、温度差の観点で試験と 5%以下の差の結果が得られた。この事から、試験は正しく行われたと考えられる。

5. 機械特性試験

3重管トラスの機械特性を確認するため、引張・圧縮および曲げ試験を行った。

引張試験は、B 端を定盤に固定し、A 端を試験機で引張って荷重を負荷した。試験の結果、設計荷重 35kN の約 1/16 の 2.1kN 負荷時にフィッティング A と内管との接着部が剥離した。

接着部の剥離の原因として、接着界面の強度不足、接着方法の不備などが考えられる。

試験状況を図 6 に、破損部の写真を図 7 に示す。



図 6 引張試験の状況

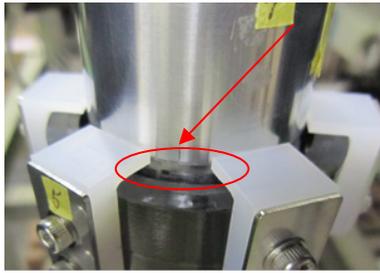


図 7 引張試験での破損部

圧縮試験は、引張試験と同様に B 端を定盤に固定し、A 端を試験機で押し、3 重管トラスの破壊するまで荷重を負荷した。

試験の結果、61kN 負荷時に破壊し、破壊した箇所は内管と中管との接着であり、破壊荷重と破壊箇所は、ほぼ設計通りの結果であった。

破損部の写真を図 8 に示す。

引張荷重では、設計値の 1/16 程度で破壊したのに対し、圧縮荷重で設計値の約 1.7 倍の荷重に耐えた要因は、エンドフィッティング部の構造にあると考えられる。フィッティング金具と CRRP パイプとの接着部にかかる荷重は、引張荷重については、接着部が全て受持つことになるが、圧縮荷重については、フィッティング金具のストッパーに CFRP パイプが接触しているため、接着部とストッパーの両方で受持つ。更にストッパーがあるため、接着部が破損しても引張試験のようにフィッティング金具が抜けにくい構造となっている。

このため、引張荷重で破損したフィッティング金具と CFRP パイプとの接着部では破損せず、次に弱い部分である CFRP パイプどうしの接着部で破損したと考えられる。

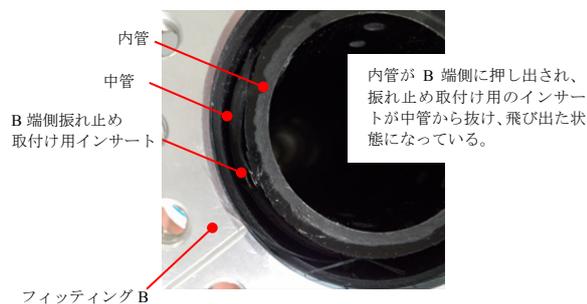


図 8 圧縮試験での破損部

曲げ試験は、B 端を定盤に固定し、A 端に錘を吊下げて荷重を負荷し、A 端部の変位量を測定した。また、振れ止めの効果を確認するため、振れ止めの「有」、「無」で試験を行った。

振れ止めが有る場合の 3 重管トラスの変位量は、振れ止めが無い場合の変位量の約 1/3 となり、振れ止めの効果が確認できた。

試験状況を図 9 に A 端部の変位量を図 10 に示す。



図 9 曲げ試験の状況

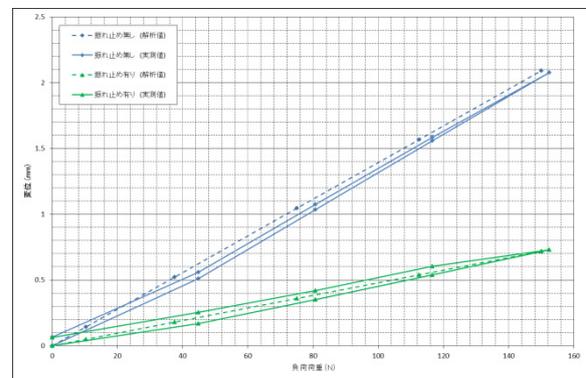


図 10 A 端部の変位量比較

6. まとめ

3 重管トラスの設計、試作および試験を行い、熱特性、機械特性のデータを取得した。

熱特性試験から下記の結果が得られた。

- 4K～30K における断熱性能を確認するための試験手法を確立した。
- 4K～30K においては、3 重管の構造を取ることで、単管の構造に比べて 2 倍以上の断熱性能をもたせられる。
- 試験による設計検証の結果、設計と同等以上の断熱性能を持った低熱伝導 3 重管トラスを製作できることを確認した。
- また、構造特性試験から下記の結果が得られた。
- フィッティング金具と CFRP パイプと結合について、接着方法および構造の再考が必要である。
- 3 重管トラスは、設計値と同等の剛性が得られた。
- また、圧縮強度については、設計値以上の強度を持つことを確認できた。
- 曲げ剛性に対する振れ止めの有効性が確認できた。