

A12 熱サイクルによる CFRP の熱膨張係数の変化

加藤彰文（東京理科大学院），後藤健（JAXA），向後保雄（東京理科大学），

Akifumi Kato (tokyo university of science), Ken Goto (JAXA),

Yasuo Kogo (tokyo university of science),

1 緒言

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は軽量であり，大きなヤング率と小さな熱膨張係数（以下 CTE）を有する事から人工衛星の高精度構造部材として使用されている．一般に CFRP の CTE は，繊維方向に負の値を示す．また，繊維方向の異なるプリプレグを積層することによって，CTE を 10^{-7} /K オーダに小さくする事が可能である．現在，長期間の放射線，紫外線放射，日照，日陰の差によって生じる熱サイクル等の宇宙環境因子によってヤング率や CTE が変化することが知られている^[1]．特に，熱サイクルが支配的であることもわかっている．これは熱サイクル負荷によって，層間はく離とトランスバースクラックが派生する為である^[2]．既存の研究では，サイクル数の増加に伴いこの 2 つの損傷は増加するものの，一定のサイクル数で以上では変化しないことが報告されている^[3]．また，ヤング率の変化はこの損傷の増加傾向と密接な関係を持っており，層間はく離が主な原因である事も明らかにされている^[3]．一方で，CTE の変動については支配因子が明らかにされていない．熱サイクルによる損傷の導入との相関関係を理解することでヤング率同様に CTE の変化を小さくする手法を見いだす事が可能である．近年のアンテナの巨大化傾向により，構造部材に求められる寸法精度が以前より厳しくなっており，宇宙環境暴露による微小な物性変化でも変形の要因として無視が出来なくなっている．そこで本研究では熱サイクルによる CTE の変動を支配する要因を明らかとする事とした．損傷をモデル化し，有限要素法解析を用いて損傷による CTE の変化について調べた．

2 実験方法

本研究では，熱サイクル負荷による影響を見積もる実験と，有限要素法解析による CTE の算出を行なった．熱サイクル負荷は $[0/30/90/-30/0]_{4\text{sym}}$ 積層板と 1 方向材(UD 材)の CFRP について行なった．CFRP の繊維に PAN 系繊維である M46JB(東レ)を，母材にポリシアネート系の樹脂である NM31(JX 日鉱日石エネルギー)を使用した．試験寸法は繊維方向に 10.mm, 積層方向に 4.5mm, 横方向に 5.0mm とした．本実験では熱サイクル負荷前後での比較を行った．そのため最初に熱サイクル負荷前の試験片の CTE を測定した．その後一定の熱サイクル負荷をかけて，同様の試験片で CTE を測定した．特定サイクルの間に損傷観察を行った．熱サイクル前後で同じ試験片を用いる理由としては，試験片間での結果の偏りが大きいためである．これを一定サイクルに到達するまで繰り返す．宇宙空間での日影と日向を模擬する為に高温乾燥機と液体窒素を使用した．これらの温度はそれぞれ 120℃から-196℃の試験である．負荷時間は 10 分間ずつとした．高温負荷と低温負荷の間に 5 分間の空冷を行った．高

温 1 回，低温 1 回，その合間に空冷 2 回の 30 分を 1 サイクルとした．恒温乾燥機にはヤマト科学株式会社の DX602 を使用した．CFRP の CTE をレーザ干渉法にて測定した．

有限要素法解析は ABAQUS Ver. 6.2 を用いて，CFRP 積層板の CTE の変化を調べた．試験片の寸法は長手方向，積層方向，横方向の順に 10mm：2.25mm：5mm の比率となるようモデリングを行なった．積層構成は $[0/30/90/-30/0]_{4\text{sym}}$ ， $[0/120/240]_{4\text{sym}}$ ， $[0/90]_{4\text{sym}}$ とした．対称性を考慮し積層方向が半分となるように，対称面を拘束した．トランスバースクラックは Figure. 1 に模式図を示すような最大幅 $2\mu\text{m}$ の楕円状のスリットにより導入した．トランスバースクラックの密度は，長さあたりの損傷数 (/mm) とした．温度負荷の条件は初期温度を 20°C とし， 10°C 負荷させた．Table 1 に解析で使用した 1 層（以降 UD）の物性を示す．CTE は熱サイクル負荷実験にて測定した 0° 方向と 90° 方向の UD 材の値を用いた．この UD 材の角度調整し積層することで積層板のモデルとした．本発表では UD に入れる物性値を変えた場合の CTE の変化量についても検討を行った．さらに UD の積層方向の寸法を倍や半分に変更したモデルについても CTE の変化量の検討をおこなった．CTE は以下の式(1)のように FEM で求められた変形量と負荷した温度より求めた．

Table 1 Elastic constants of UD CFRP

Material properties	Young's modulus (GPa)		Poisson's ratio ^[4]		Fiber content V_f
	E_L	E_T	γ_{LT}	γ_{TT}	
CFRP laminate	260	7.6	0.3	0.5	60%

$$\text{CTE} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (1)$$

ここで、L は試験片寸法値で 10mm である．また dL/dT は単位温度あたりの寸法の変化率である．寸法の変化の計測は最も底面の 0 層の中心の接点の移動距離から測定した．表面近傍ではモデルの分割の程度の影響を比較して多く受けるため、このような測位を行なった．

3 結果および考察

1 方向材の CFRP の CTE をレーザ干渉法にて測定した． 0° と 90° の方向での結果 Figure. 2 を UD の CTE 値として使用した． $[0/30/90/-30/0]_{4\text{sym}}$ 積層板は Figure. 3 に示すように熱サイクル負荷によって 90° 層のトランスバースクラックが発生し，Figure. 4 に示すように室温付近でクラックの増加とともに CTE が低下した．損傷はトランスバースクラックと層間剥離の 2 種類が発生した．解析によって損傷が CFRP 積層板に及ぼす影響を見積もりために， $[0/30/90/-30/0]_{4\text{sym}}$ の積層板では 90° 層と，その層間に損傷を入れた．その場合，層間剥離が入ることで，CTE は $0.01 \times 10^{-6}/\text{K}$ 増加した．一方トランスバースクラックは Figure. 4 に示すように CTE を低下させた．クラック密度が 5/mm になった時に $0.07 \times 10^{-6}/\text{K}$ 減少した．この減少量は熱サイクルを 100 回かけた時の CTE の変動量に相当する．

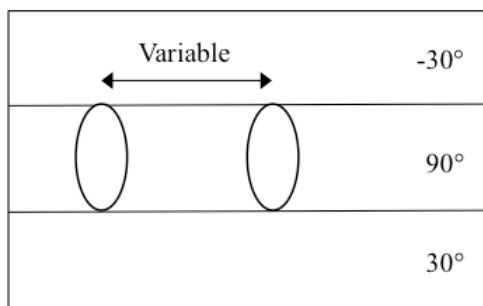


Figure. 1 Transverse crack of model

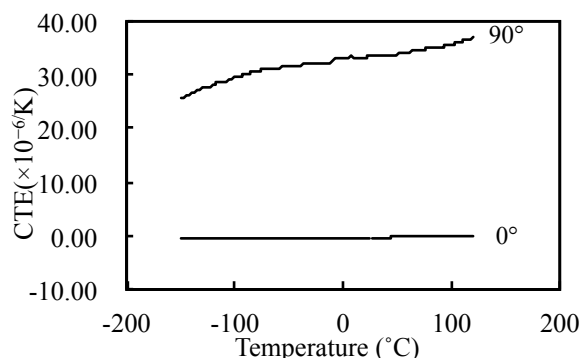


Figure. 2 CTE of UD CFRP

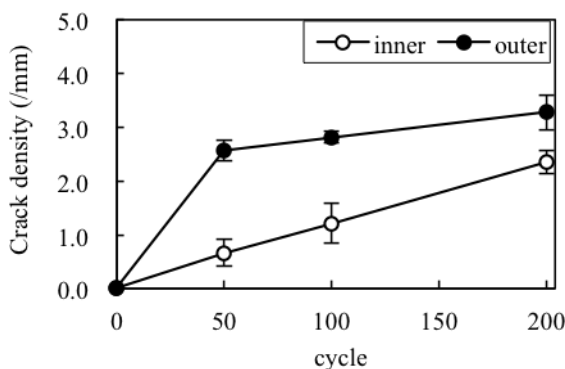


Figure. 3 Change transverse cracks for PCY

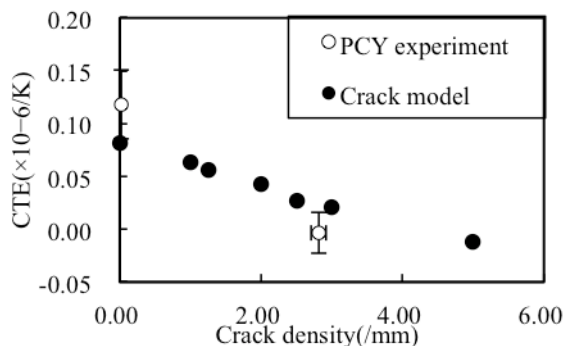


Figure. 4 Reduction in CTE by transverse cracks

プリプレグの繊維を変更することで、UD の物性を変えることが可能である。UD 材のヤング率変化による CTE 変化への影響を見積もるために、UD のヤング率を増加させた場合、Figur5 に示すように積層板の CTE が負に増加した。またヤング率の増加により損傷による CTE の変化量は減少した。これは 0°層が担う荷重がヤング率の上昇に伴い多くなる為と考えられる。多くの場合、ヤング率が高い繊維は熱膨張係数が負に大きい傾向にある。そのため損傷による CTE の変動が小さくならうとも積層板がもともと負の CTE を持っていた場合、負の CTE に固定されてしまう危険性が高い。そのため、初期の CTE の設計と損傷による CTE の変動の設計の両方を考える必要がある。

UD の層厚を半分や倍にした場合に損傷による CTE の変化がどのように変わるかについて検討を行った。層厚の変更による積層板全体の高さの違いをなくす為に、それぞれの層の個数を制御した。積層構成[0/30/90/-30/0]4sym の 4sym=40Ply を基準とし、厚さが厚い順から 20 Ply, 40 Ply, 80 Ply, 160Ply の検討を行った。FEM モデルはハーフモデルとなっているため、この半分の 5, 10, 20, 40 の積層のものを解析した。積層方向の高さの条件を合わせるために層の厚さを調整し、10Ply が最も層が厚く 80Ply が最も薄い層となった。具体的な比率は 20ply を 1 とした場合、厚い順から 2 : 1 : 0.5 : 0.25 となった。CTE の変動は、Fig.36 に示すように層が薄くなるにつれて、CTE の変化量が小さくなった。これは層の厚さが薄くなることで見かけの損傷量が減るためだと思われる。一方で初期の積層板の CTE がそれぞれの積層で異なっている。

以上より積層板の損傷による CTE の変化を減らすには層の厚さを薄くすることが重要である。しかし初期の積層板の CTE は積層寸法である層の厚さによって変わることを留意する必要がある。

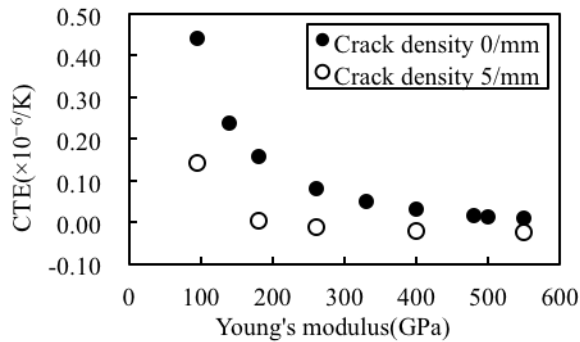


Figure. 5 Change reduction in CTE by Young's modulus

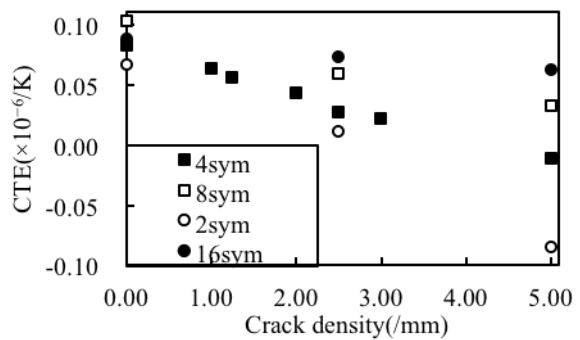


Figure. 6 Reduction of the CTE due to the layer thickness

【まとめ】

本研究では熱サイクルによる CFRP 積層板の CTE の変化とその支配因子を明らかにした。有限要素法解析により、トランスバースクラックの発生が CTE の変化をもたらしている事が明らかとなった。また、解析結果より本研究で使用した CFRP 積層板では、繊維をヤング率の高いものに変えることで、CTE の変化量が下がることがわかった。また層厚を薄くすることでも CTE の変化量が下がることがわかった。よってあらかじめ熱サイクルを付与するなどの手法により、CFRP 積層板の CTE の変化をより小さくできることが分かった。

【参考文献】

- [1]Ken GOTO et al., "Long Term Durability of a Rib and Cable Tensioned Structure for High Accuracy Large Deployable Antenna Reflector," 28th International symposium on space technology and science, c-12(2011).
- [2]Satomi ASAI et al., "熱サイクルが CFRP の熱的および機械特性に与える影響の評価", 30th Symposium on Aerospace Structure and Materials , B-07 (2014).
- [3] Satoshi KOBAYASHI et al, "Damage-mechanics analysis of matrix cracking in cross-ply CFRP laminates under thermal fatigue", Composites Science and Technology 61 pp1735-1742, 2(2001)
- [4] Arao, Y., Koyanagi, J., Utsunomiya, S., Kawada, H., "Effect of ply angle misalignment on out-of-plane deformation of symmetrical CFRP laminates: Accuracy of ply angle alignment" Composite Structures, Vol. 93 pp.1225-1230(2011).