

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03851

研究課題名(和文)航空宇宙機用発泡コアサンドイッチパネルに適用するき裂進展抑制構造要素の実用化研究

研究課題名(英文) Applied research on the structural element of the interfacial crack suppression of foam core sandwich panel for aircraft and spacecraft

研究代表者

廣瀬 康夫 (Hirose, Yasuo)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：80600163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：レジン製アレスターは良好な成形性を有する反面、CFRP製アレスターと比較して剛性が低いことと線膨張係数の差に起因する熱硬化収縮が課題であった。本研究では、解析と実験により、当該アレスターは、十分なき裂進展抑制効果を持つが、充填材のレジンによる収縮を考慮した成形法が必要であるとの知見を得た。また、本研究で提案する改良型クラックアレスターにおいては、熱降下収縮の影響を受けにくく、また、アレスター端部の面板に浸透したレジンによるモードⅠ型負荷形態におけるき裂進展抑制効果向上が期待できる。さらに、周囲のCFRP面板が応力を分担しており、面板とアレスター間のき裂の貫通も抑制可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、クラックアレスターを有する発泡コアサンドイッチパネル構造を、3次元複雑形状を有する航空機構造に適用する際の成形性が改善された。BWB等の3次元複雑形状を有する将来航空機は画期的な軽量化、低抵抗が実現可能である反面、従来のセミモノコック構造をベースにした積層板複合材構造では一体成形が困難なので、一体成型に適したレジン製クラックアレスターを有する発泡コアサンドイッチ構造の適用が可能になれば重量軽減・部品点数低減に大きな効果がある。このことは、航空機の二酸化炭素排出量低減にも寄与できるものである。また、本構造様式は、軽量化の要求が厳しい宇宙機器の構造としても有望であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The crack arrester made of resin material has problem caused by its low stiffness and thermal shrinkage derived from the large difference of the thermal coefficient despite of its good formability. The analytical and experimental estimation in this study indicated that the arrester made of resin had enough crack progress suppression effects, but the molding method in consideration of the shrinkage with resin as the arrester material was necessary. On the other hand, the bending stiffness of the face sheet increased owing to the resin soaking to the inter laminar of the face sheet at the arrester edge for the improved type crack arrester which 2 plies of the face sheet placed around the arrester. That led to the interfacial crack suppression effect enhancement in the mode I type loading. This part of the face sheet also shared the load in the mode I type loading and prevented the crack penetration between face sheet and the arrester.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：複合材料 航空機構造 発泡コアサンドイッチ構造 き裂進展抑制 クラックアレスター レジン材料  
DCB試験 成形性向上

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

発泡コアサンドイッチパネルにおいて、面板の衝撃損傷を起点とする面板とコア間の界面き裂の進展を抑制するため、界面き裂の進展経路上に剛性の高い物質(クラックアレスターと称する)を配することにより、き裂先端周辺の発泡コアとクラックアレスター間で応力の再配分を生じさせて、き裂先端のエネルギー解放率を低減させ、き裂の進展を抑制するアイデアを考案し特許を取得した。<sup>1)</sup>一方で、発泡コアサンドイッチパネルの適用範囲拡大のためには、クラックアレスターの材料として CFRP 一方向材からより安価で三次元曲面の成形にも対応可能なレジン材を使用する必要がある。しかしながら、レジン材料は CFRP と比較して線膨張係数が数倍から数十倍大きいので成形時に面板との間で大きな熱残留応力が発生するため、き裂進展抑制効果に与える影響を正確に評価することが実用化へ向けての課題である。なお、本構造要素が実用化されれば、航空機構造のみならずメンテナンスが原則不可能な宇宙機器構造の耐久性向上に大きく寄与すると考える。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、レジン製クラックアレスターを有する発泡コアサンドイッチパネルについて熱残留応力下でのき裂進展挙動を明確にし、レジン材料を適用したより実用性が高いクラックアレスターの最適形状を設定して従来の CFRP 製アレスターと遜色のないき裂進展抑制効果を得ることである。

## 3. 研究の方法

### (1) 供試体の材料および構成

本試験で評価した供試体は 5 種類、各 3 本の計 15 本である。各供試体の公称寸法は、長さ 300[mm]、幅 50[mm]、厚さ 38[mm]である。面板に CFRP 平織り材の Teijin UT500 の 4ply 疑似等方積層材、コア材として PMI (Plymetacryimid)発泡体の Evonik Industries Rohacell®WF51 を使用した発泡コアサンドイッチパネルである。CFRP 面板の積層構成は [(+45, -45), (0, 90), (0, 90), (+45, -45)] であり、成形後の平均板厚は 1.52[mm]であった。コア材の厚さは 35[mm]である。面板とコアを接着する接着剤としてニットキャリアのエポキシ系フィルム接着剤の Cytec FM300K film を使用しており、面板に隣接するコア材に含侵した樹脂含侵層の厚さは 0.34mm である。オートクレーブ法により大板を成形し、所定の寸法に切断した。初期き裂は、供試体端部より 80[mm]の位置まで厚さ 12.5[ $\mu$ m]の DuPont Kapton® film を挿入することで導入し、カッターナイフで 5[mm]を目安に予き裂を導入した。

1 種類目はクラックアレスターを設けていない供試体であり、その他 4 種類は供試体端部から 120 [mm]の位置に半径 10 [mm]の半円形断面クラックアレスターを設けた供試体である。なお、半円形断面クラックアレスターを面板に直接取り付け付けた形態を基本型 (Basic type) と称する。また、レジン材の熱硬化収縮の影響を緩和するために半円形断面クラックアレスターを面板のプリプレグ 2 プライで包み込んだ形態を改良型 (Improved type) と称する。ここで、1 回目の成形は、レジン材の硬化収縮の影響を評するために従来の成形法 (Standard molding と称する) で成形したもので以下、成形法改善前供試体と称する。従来成形法により成形した供試体では、基本型クラックアレスターと改良型クラックアレスターは充填材のレジンの硬化収縮の影響を受け、アレスター上面がそれぞれ約 1 [mm]及び 1.5 [mm]のへこみが生じた。このレジンの硬化収縮によるアレスター上面のへこみを解消するため成型法を改善して再度成形を行うこととした。

レジン材の硬化収縮の影響を反映した成形法 (Improved molding と称する) で 2 回目の成形を行った供試体を成形法改善後供試体と称する。本供試体の成形では、充填するレジンの量を増やし、上面にカールプレートを設置することでアレスター上面の平滑度を確保した。成形前の状態で基本型クラックアレスターはアレスター上面が約 1.5 [mm]、改良型クラックアレスターはアレスター上面が約 3.0 [mm]盛り上がるようにレジンを充填した。その結果アレスター上面の平滑度を保つことが可能になった。

### (2) 破壊じん性試験

本研究の破壊じん性試験では開口変位を与えるモード 型負荷形態で行った。発泡コアサンドイッチパネルの破壊じん性評価においては、標準的な試験仕様書が存在しないため、JIS K 7086<sup>2)</sup> に準拠して実施した。試験速度は JIS K 7086 で規定されている 0.5[mm/min]に対して供試体の剛性を考慮して、2.0[mm/min]に変更して実施した。試験は、万能試験機 (Shimadzu AGS-X) に容量 5[kN]のロードセルを用い、試験荷重とクロスヘッド変位を記録した。試験中のき裂長さ  $a$  の測定には、読み取り顕微鏡 (島津理化 NRM-2XZ) を用いて測定した。き裂進展抑制効果は、破壊力学パラメーターとしてエネルギー解放率  $G$  を用いて評価した。破壊じん性値  $G_c$  の算出には、K. Shivakumar at al. によって提案されているき裂長さに補正係数  $\beta$  を考慮した修正曲げ理論 (Modified Beam Theory; MBT 法) を用いた<sup>3)</sup>。MBT 法によって求められる  $G_c$  は式(1)のように表され、 $P_c$  は臨界荷重、 $b$  は供試体幅、 $a$  はき裂長さ、 $C$  は荷重-変位線図の傾きの

逆数であらわされるコンプライアンスである。補正係数は  $C^{1/3}-a$  線図より、 $C^{1/3} = 0$  のときのき裂長さをとしている。なおクラックアレスターが存在する場合  $C^{1/3}-a$  は線形とならないため、はクラックアレスターが存在しない供試体で3本試験を行い、その平均値を使用した。

$$G_c = \frac{3P_c^2 C}{2(a + \Delta)b} \quad (1)$$

### (3) 有限要素解析

熱降下収縮がき裂進展抑制効果に与える影響を数値解析と実験結果で比較検証するために有限要素解析を行った。解析に用いたプリポスト及びソルバーはMSC社 Marc/Mentant2017.0.0を使用した。計算対象とするFEモデルは、成形法改善前における改良型クラックアレスターのモデルであり、要素数約10万、節点数約30万の規模である。

材料定数は先行研究<sup>1)</sup>と同様に線形で定義した。境界条件は成形時の温度降下による影響について検討するために、状態変数を用いてモデル全体に-165の温度変化を設定した。

### (4) DIC(Digital image correlation)法によるアレスターのひずみ計測

DIC法によるひずみの計算は、J.Blaber et.alによって開発されたMATLABベースのDICプログラムであるNcorr<sup>4)</sup>を用いた。参照画像は、アレスター端部が破壊する直前の画像とした。相関値計算のためのサブセットは円形を用いており、計算に使用する円形範囲は半径  $r = 50$  pixelsとした。Subset spacing sizeは1 pixelに設定した。Ncorrでは、任意の円形範囲に対して最小二乗近似による平滑化法を用いて変形勾配とグリーン・ラグランジュひずみを算出している。したがって、円形範囲を指定する必要があり、半径  $r_c = 50$  pixelsとし、MATLAB 2020a (Mathworks)を用いて計算を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 破壊じん性試験の結果

#### 成形法改善前における試験結果

図1に成形法改善前における基本型クラックアレスターと改良型クラックアレスターの見かけの破壊じん性値を比較したグラフを示す。横軸がき裂先端とアレスター端部の距離、縦軸がMBT法で算出した見かけの破壊じん性値を示している。白抜きマークが成形法改善前の基本型クラックアレスターの見かけの破壊じん性値、中実のマークが成形法改善前の改良型クラックアレスターの見かけの破壊じん性値である。図1より、成形法改善前における基本型クラックアレスターと改良型クラックアレスターの差異は小さく、見かけの破壊じん性値の最大値の平均における比較では、基本型クラックアレスターがやや高い値を示しており、基本型クラックアレスターが  $598.14 \text{ [J/m}^2\text{]}$ 、改良型クラックアレスターが  $533.93 \text{ [J/m}^2\text{]}$  となり約10.7%の差異であった。しかしながら、基本型クラックアレスターはアレスター端部の応力集中により面板とアレスターの接着層間をき裂が貫通し、最終的にクラックアレスターとしての役割を果たせなくなった。一方で、CFRP製クラックアレスターの場合は、改良型の形態で  $659.3 \text{ [J/m}^2\text{]}$  となり、アレスターなし供試体の破壊じん性値は  $81.0 \text{ [J/m}^2\text{]}$  であった。<sup>5)</sup>

見かけの破壊じん性値の向上は、レジン製アレスターで6.6倍、CFRP製アレスターで8.1倍であった。この結果から、レジン製アレスターは、CFRP製アレスターよりも小さいものの、十分なき裂進展抑制効果を持つと評価される。

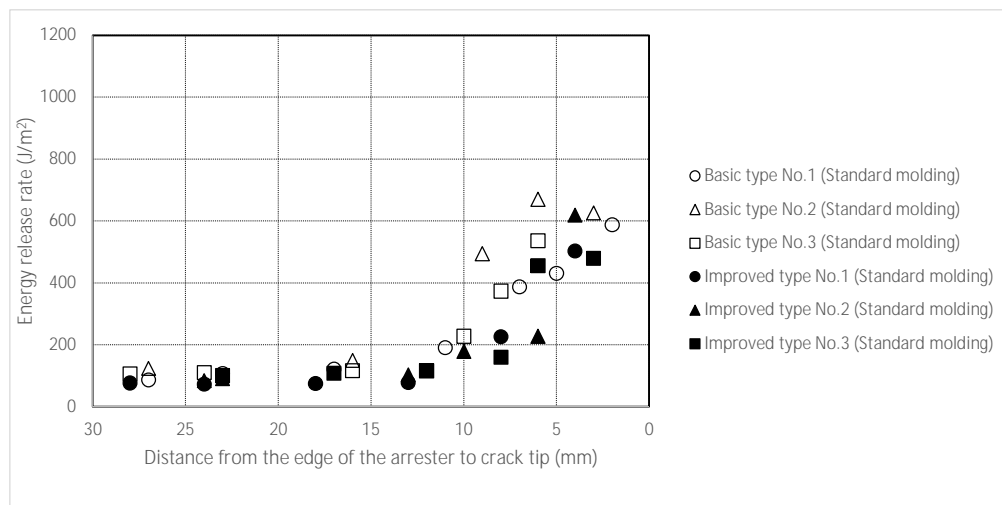


図1 Relationship between energy release rates and crack length. (Standard molding)

### 成形法改善後における試験結果

図2に成形法改善後における基本型クラックアレスターと改良型クラックアレスターの見かけの破壊じん性値を比較したグラフを示す。白抜きのマーカーが成形法改善後の基本型クラックアレスターの見かけの破壊じん性値，中実のマーカーが成形法改善後の改良型クラックアレスターの見かけの破壊じん性値である。図2より，成形法改善後における基本型クラックアレスターと改良型クラックアレスターの差異は大きく，エネルギー解放率の最大値平均における比較では，改良型クラックアレスターが高い値を示しており，基本型クラックアレスターが627.03 [J/m<sup>2</sup>]，改良型クラックアレスターが973.82 [J/m<sup>2</sup>] となり約55.3%の差異であった。一方，前述のように，CFRP製クラックアレスターの場合は，改良型の形態で659.3 [J/m<sup>2</sup>]となり，アレスターなし供試体の破壊じん性値は81.0 [J/m<sup>2</sup>]であった。見かけの破壊じん性値の向上は，レジン製アレスターで12.0倍，CFRP製アレスターで8.1倍であった。この結果から，レジン製アレスターは，CFRP製アレスターよりもかなり大きなき裂進展抑制効果を持つと評価される。この理由について以下に考察する。

成形法改善後の改良型クラックアレスターは成形法改善前の改良型クラックアレスターと比較して最大82%高いエネルギー解放率を示した。しかしながら，基本型クラックアレスターにおいては成形法改善前，改善後において約5%程度の向上であった。このことから成形法改善前におけるアレスター上面のくぼみが改善前後の差異の大きな原因ではないことが考えられる。また，成形法改善後の改良型クラックアレスターにおける一本目の供試体は，他の二本の供試体と比較して見かけの破壊じん性値の最大値が低い値を示しており，成形法改善前の供試体の見かけの破壊じん性値に対して約33%の向上であった。

上記の原因を解明するために，成形法改善後の改良型クラックアレスターの端部をデジタルマイクロスコープで観察した。図3にデジタルマイクロスコープで観察した成形法改善後の改良型クラックアレスターの端部写真を示す。デジタルマイクロスコープで撮影した写真の倍率は統一している。図3より，改良型クラックアレスターの端部の面板層間に充填材のレジンが浸透して成形されていることが確認できた。しかしながら，一本目の供試体においてはレジンの浸透が少なく，浸透したレジン層がほとんど確認できなかった。このことから，改良型クラックアレスターの端部層間にレジンが浸透して，アレスター端部周辺の面板厚が増加することで曲げ剛性が向上し，き裂進展抑制効果向上に寄与したと考えられる。従って，アレスター端部からのレジンの含侵がない場合には，成型法の改善前後で改良型アレスターのき裂進展抑制効果は前述のように約33%の向上と推定され，この値はCFRPアレスターより約8%向上している。より剛性が低いレジン製のアレスターがCFRP製アレスターより高いき裂進展抑制効果を示したのは，成型方法の改善によりレジン材の熱降下収縮がき裂進展を生じさせる面板の開口変位を抑制する方向に作用したためと考えられる。

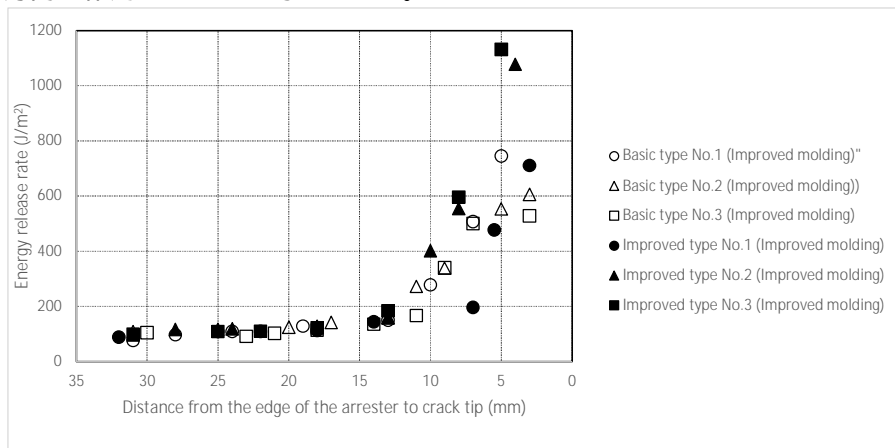


図2 Relationship between energy release rates and crack length. (Improved molding)

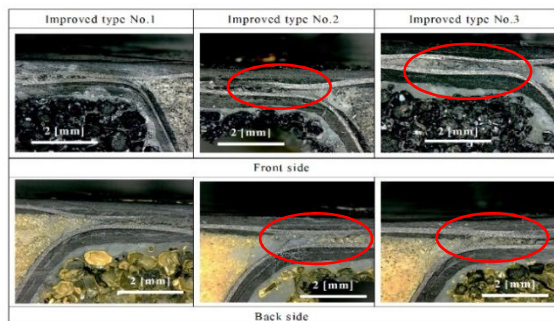


図3 Enlarged view of the end of the arrester.

## (2) DICによる供試体の側面観察の結果

DIC法によって得られた基本型クラックアレスター及び改良型クラックアレスターの側面におけるy方向ひずみ分布( $\epsilon_{yy}$ )により、き裂の接近に伴ってアレスター端部に比較的大きなひずみが生じていることがわかった。このひずみから生じる応力集中により、基本型クラックアレスターの端部と面板の接着面にき裂の貫通が発生した。しかしながら、改良型クラックアレスターは基本型と比較してアレスター外周のCFRP層にもy方向ひずみ( $\epsilon_{yy}$ )が分布している。これは、改良型の特徴である面板下部2plyのCFRP層が荷重の再配分による応力を分担しているためである。アレスターと面板との接着層とき裂先端の間に高応力を分担するCFRP層が存在しているため、アレスター内部へのき裂の貫通が抑制されていると考えられる。

## (3) 有限要素解析による検証

成型法改善前の改良型クラックアレスターのき裂進展抑制効果が基本型と比較してやや劣る結果となった。有限要素法によりこの結果を検証した。

成形条件を考慮した温度降下を付与した改良型アレスター付き発泡コアサンドイッチパネル供試体のモデルのせん断応力分布より、充填材のレジンによる熱収縮により、熱残留応力が生じ、改良型アレスター端部にせん断応力が分布している。これは、レジンの熱収縮によってアレスター上の面板2plyの収縮することによって生じた応力である。

また、開口変位を与えた場合においても、同様にアレスター端部にせん断応力が生じる。開口変位のみを与えた改良型アレスター付き発泡コアサンドイッチパネル供試体のモデルのせん断応力分布では、温度降下を付与した場合と同様に改良型クラックアレスター端部にせん断応力が生じている。以上より、成型法改善前の改良型クラックアレスターにおける、充填材のレジンによる熱収縮は、面板の開口を助長させ、モードⅡ型におけるき裂進展抑制効果の低下を招くと考えられる。

なお、この改良型レジン製アレスターの熱収縮による上部のくぼみは、成型法の改善により解消し、その結果、モードⅡ型におけるき裂進展抑制効果の低下も改善された。

## 5. 結言

本研究で得られた結言を以下に示す。

- ・レジン製アレスターは十分なき裂進展抑制効果を持つ。
- ・充填材のレジンによる収縮は、クラックアレスター上面を変形させ、改良型クラックアレスターにおいては熱残留応力が、き裂進展抑制効果に悪影響を与える。この現象は、成型法を改善することにより回避可能である。
- ・改良型クラックアレスターにおいて、アレスター端部の面板にレジンが含侵することで、面板の曲げ剛性が増加し、モードⅡ型におけるき裂進展抑制効果向上が期待できる。このレジンの含侵が無い場合でも、改良型アレスターは基本型アレスターより高いき裂進展抑制効果を持ち、アレスターと面板間のき裂の貫通も抑止可能である。
- ・DIC法により算出されたひずみ分布より、改良型の特徴である面板下部2plyのCFRP層が荷重の再配分による応力を分担していることが分かった。アレスターと面板との接着層とき裂先端の間に高応力を分担するCFRP層が存在しているため、アレスター内部へのき裂の貫通が抑制されていると考えられる。

## 参考文献

Hirose Y, Hojo M, Fujiyoshi A and Matsubara G. „Suppression of interfacial crack for foam core sandwich panel with crack arrester, Adv Compos Mater, 16(1),2007, 11-30.

JIS K 7086, Testing methods for interlaminar fracture toughness of carbon fiber reinforced plastics.

K. Shivakumar et al., An Evaluation of Data Reduction Methods for Opening Mode Fracture Toughness of Sandwich Panels, J J Sandw Struct Mater, 7, 2005, 77-90.

M. A. Sutton et al., “Digital Image Correlation (DIC),” in Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Boston, MA: Springer, 2009, 81–118.

K.Nishioka, Y.Hirose, K.Yoshida, Detail evaluation of modified crack arrester for foam core sandwich panel, Material systems, 37,2020, 21-27.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉岡晃輔、廣瀬康夫
2. 発表標題 レジン製クラックアレスターの研究
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉岡晃輔、廣瀬康夫
2. 発表標題 クラックアレスターにおけるレジンの適用研究
3. 学会等名 第62回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉岡晃輔、廣瀬康夫
2. 発表標題 レジン製クラックアレスターにおける形状検討
3. 学会等名 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------