

令和元年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05673

研究課題名(和文) Tri-Functional自己センシングCFRP構造キャパシタの開発研究

研究課題名(英文) Development of trifunctional self-sensing structural capacitor

研究代表者

轟章 (Todoroki, Akira)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：50211397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高価な炭素繊維強化複合材料を一般構造に適用するため、構造以外の蓄電機能を持たせる構造キャパシタを開発する。本研究ではサンドイッチ構造のコア部分にキャパシタを内蔵するサンドイッチ構造キャパシタを提案した。フォームコアでは電解液の漏洩が発生するため、3Dプリンタで作成したスナップイン構造を用いることにした。スナップイン構造のコア内部に防水処理をしたキャパシタを設置することで蓄電機能目標を達成した。3点曲げ試験を実施し、剛性も十分であることを確認した。スキン材の炭素繊維の電気抵抗を測定することで破断直前に破断を検知可能であり、放電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

軽量で高い剛性を持つ高価な炭素繊維複合材を一般構造に適用するため、構造以外の機能として蓄電機能を有する機能複合材料構造を作成した。本研究では、サンドイッチ構造の中央部分に蓄電機能を設置して構造の剛性と強度を持たせる。3Dプリンタを用いて雄雌型の嵌め込み形式を表皮材に同時成形し、簡単に組み立て可能なスナップイン構造とした。炭素繊維の電気抵抗変化を測定して事前に破壊を検知できる。このような構造と蓄電と破壊検知の多機能を有している構造は電気自動車などに利用可能であり、今後の省エネに寄与すると判断される。

研究成果の概要(英文)：Application of expensive carbon fiber reinforced composites to general structures requires an additional function such as structural capacitor. In this study, we proposed a sandwich structure capacitor that incorporates a capacitor in the core part of the sandwich structure. Since foam core brings leakage of electrolyte, we decided to use a snap-in structure created with a 3D printer. The capacitance target was achieved by installing a waterproofed capacitor inside the snap-in core. 3-point bending tests were conducted to confirm that the stiffness was sufficient. By measuring the electric resistance of the carbon fiber of the skin material, it was possible to detect the breakage just before the breakage and confirmed that it was possible to discharge.

研究分野：機械工学

キーワード：複合材料 構造キャパシタ 3Dプリンタ 自己センシング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料 (CFRP) は軽量・高強度・高剛性であることから輸送機器構造材料に多用されつつある。しかし、その欠点として高価格であることがあげられる。これを補う方法として、構造以外の機能を取り込んだ多機能複合材料が提案されている。例えば、バッテリーやキャパシタなどの蓄電機能をCFRP 構造に付与することで高価な蓄電装置の代用だけでなく、蓄電装置を搭載する重量増加や搭載スペースの軽減などの効果がある。このため、無人飛行機や自動車などへの適用が期待されている。構造キャパシタは繰り返し充放電での劣化がほぼないために回生エネルギーの蓄電用として期待されている。イオン導電性樹脂を母材として炭素繊維を電極とした電気二重層の構造キャパシタが研究されている。

しかしながら、現状では母材樹脂中のイオン電導の電気抵抗が大きく、キャパシタ内部抵抗が大きくなるためにさらなる研究開発が必要である。また、CFRP 構造は脆性的破壊を生じる。CFRP 構造への損傷発生時に構造形状を維持できない。このため、自動車や無人航空機などの実機適用を考えた場合、衝撃損傷発生時には直ちに放電することが蓄電機能を有するCFRP 構造の安全上望ましい。しかし、現状ではCFRP 構造キャパシタの蓄電機能の研究成果があげられているだけである。CFRP 構造の損傷時の安全性を考慮した真の多機能 (蓄電、センシング、放電) の複合材料は全く検討されていない。

2. 研究の目的

本研究は、過去の申請者の自己センシングの技術と新規に実施している CFRP 構造キャパシタの研究成果を単に個別発展させるのではない。これらを有機的にインテグレートし、CFRP 構造キャパシタの安全性も含めた蓄電・センシング・放電の3つの機能をインテグレートした Tri-functional CFRP キャパシタを開発するものである。

従来のイオン導電性樹脂を用いた CFRP 構造キャパシタの大きな内部抵抗の問題は、発泡コアに電解液を含浸させる電解液利用の電気二重層キャパシタで問題を解決する。図 1.1 に示す様に外表面 CFRP 板に塗装の一部として電極を設置し、電極間の電気抵抗変化から損傷を検知する。ここでは致命的な繊維破断を検知するために検出精度は小さくても、大きな出力変化が得られる。この閾値を用いて上下 CFRP 電極をショートさせる自動回路を作成し、安全装置とする。開発期間中に必要なことは、内部抵抗の少ない電解液利用の電気二重層キャパシタの作成 (キャパシタ能力、強度の確保) 破壊時の電気抵抗変化法の閾値の決定である。

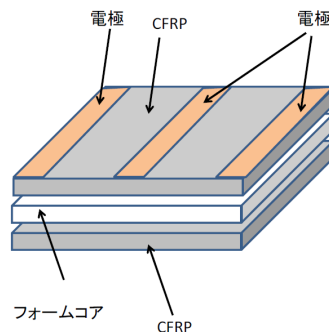


図 1.1 Tri-functional CFRP 構造キャパシタの概念図

電解質液体をサンドイッチコアに封閉した上で強度低下をもたらさないように接着を最適化する必要がある。この研究課題は実験的なものとなる。充放電に必要な電極の設置はそのまま自己センシングに利用できるため、自己抵抗減少とセンシング性能を考慮した最適な電極設置が重要なポイントとなる。

3. 研究の方法

始めにキーテクノロジーとなる電解液をフォームコアに密閉した構造キャパシタの開発を実施する。フォームコアとスキン材の接着や密閉性に問題が生じることがわかっている。充電部分の面積増大のために充電部分にカーボンナノチューブやカーボンナノチューブを用いて電極面積を増大させることで、充電性能を低下させずに接着面積を増大させることを検討する。

電解液の密閉性に問題が生じる可能性がある場合、電解液を保持するために複合材を成形可能な 3D プリントを用いてスナップイン構造を作成し、そのコア部分を容器として電解液を保存する。

サンドイッチ構造に電極を設置して破壊前の損傷を電気抵抗変化で検知する手法をセンシング手法として採用する。試験は 3 点曲げ試験を行い、その破断直前の電気抵抗変化を測定する。破壊が圧縮側と引張側のどちらが起点となっているかを観察し、その電気抵抗変化から損傷モニタリングの閾値を求める。その閾値を超えると放電することにする。

4. 研究成果

4.1 フォームコアサンドイッチ構造の検討

4.1.1 はじめに

フォームコアサンドイッチ構造キャパシタの概念図を 4.1.1 に示す。予備研究では、時間経過後にキャパシタンスが低下する問題点が明らかになっていた。その原因は、電解液の漏えいであった。ここでは、電解液の漏えい防止を考慮した新たなフォームコアキャパシタ構造を考案し、時間経過後の充電性能を評価した。

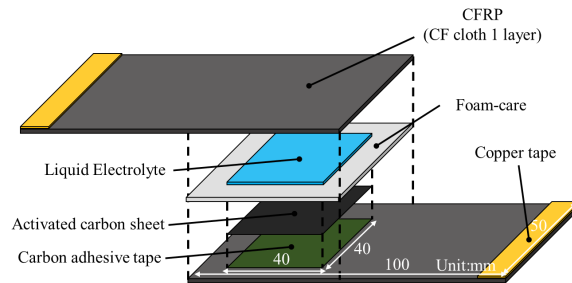


図 4.1.1 フォームコアサンドイッチ構造キャパシタ概念図

4.1.2 実験手法

活性炭シートをカーボンテープで導電性を確保して接着した場合、電解液の影響で接着性が悪化し、劣化したため、ここでは活性炭シートは縫い付けることで固定した。

ここでは、電解液がフォームコア内部から漏えいすることを防止するために、電極と電解液を吸水性のないフォームコア内部に閉じ込めることにした。提案手法の概念図を図 4.1.2 に示す。電極には、活性炭シートを CFRP 電極に直接縫い付けたものを用いる。この電極で吸水性のあるフォームコアをサンドイッチした、

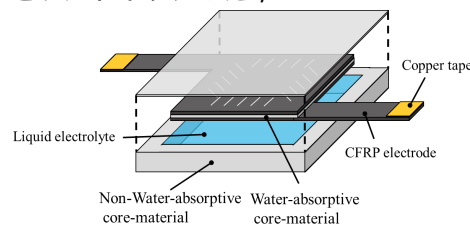


図 4.1.2 電解液漏洩防止フォームコアサンドイッチ構造キャパシタ

キャパシタンス能力の測定にはサイクリックボルタンメトリ (CV) を用いた。予備研究と比較するため、図 4.1.1 で示した CFRP サンドイッチ構造キャパシタの試験片 (以下、旧キャパシタ) も作製し、充電性能の比較測定を行った。電解液 (10[wt%]硫酸銅水溶液) はフォームコア・電極間の一部分に意図的に空けた隙間から注射器を用いて注入する。提案手法・従来手法とも縫い付けによる活性炭電極を用いている。

充電性能は、試験片作製直後のものと、約 24 時間後のものを比較することで、キャパシタンスの大きさだけでなく、キャパシタの信頼性も評価する。

4.1.3 結果と考察

図 4.1.6 に新しく提案した手法の結果を示す。図の横軸は負荷した電圧であり、縦軸はキャパシタである。実測された平行試験片の面積が実際のキャパシタ能力となる。電解液封入直後と 24 時間後の測定結果を示している。

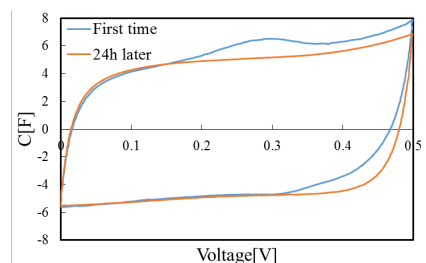


図 4.1.3 密閉型のフォームコアサンドイッチ構造キャパシタ測定結果

24 時間後には旧サンドイッチ構造キャパシタは蓄電性能が消滅していたのに比較して、密閉型は 24 時間後にも蓄電性能を有していることがわかる。ただし、電解液封入直後に比較してやはり性能低下は発生しており、電解液が接着剤などに吸湿されているためであると思われる。

また、衝突などで面外力を受けると、フォームコアサンドイッチでは面外方向に強度を持たないために電極の接触と電解液の漏洩が発生してしまう恐れがある。

4.2 スナップインサンドイッチ構造の検討

4.2.1 はじめに

面外方向にも剛性と強度を有し、かつ接着剤を使用しないで密閉が可能な構造として連続繊維 CFRP 作成可能な 3D プリントを用いて、スナップイン CFRP サンドイッチ構造を開発した。上下のハニカム形状をした雄雌型のコア構造を有する CFRP をはめ込むことができる形状を、スナップイン形状と呼ぶ。

4.2.2 実験方法

前節では CFRP 部材とコア構造と別々に作成していた。しかし複合材が成形可能な 3D プリントにより、コア構造と CFRP を合わせた一体化コア構造を有する CFRP の作成が可能となった。これにより部品数の削減、加工手順の低減が見込める。現時点では 3D プリント複合材はナイロン樹脂に限定されている。ナイロンは吸湿してしまうため、防水手順が必要不可欠である。将来的には疎水性の熱可塑性プラスチックを母材とする 3D プリント複合材で防水加工は不要となるが、現時点での実現可能性のために防水手法について考察する。また、活性炭電極に加えてカーボンナノチューブ電極も検討する。図 4.2.1 にスナップインサンドイッチ構造キャパシタの概念図を示す。

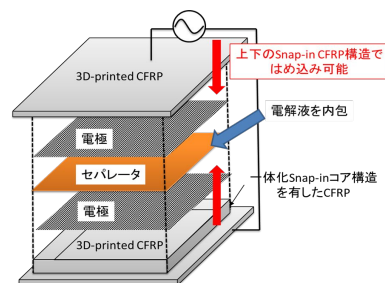


図 4.2.1 スナップインサンドイッチ構造キャパシタ概念図

具体的にはポリエチレン袋 (UA40, ウルマックスジャパン) に電解液と電極をパッケージ化してサンドイッチ構造のコア内部に設置することにした。

4.2.3 実験結果と考察

20 mm 四方の活性炭電極の場合と CNT 電極のキャパシタンス測定を実施した。電極に気泡の付着が認められたので、超音波洗浄を実施することで気泡を取り除いた。その結果、活性炭が CNT の 16 倍の電気容量となった。CNT 電極では、CNT を束ねるために用いられている接着剤によって表面積が著しく減少している。CNT 自体の表面積は大きいですが、電極として使用するためには別途加工作業を考慮する必要がある。

4.3 スナップインサンドイッチ構造の曲げ試験

4.3.1 はじめに

スナップインサンドイッチ構造で密閉型の構造キャパシタが製作可能であることが明らかにされた。ここでは剛性と強度について実験的検討を行う。スナップイン構造はサンドイッチコア部分を自由な形状に設計可能である。そこで、まずコア形状の検討を行い、その後曲げ試験を実施する。

4.3.2 試験方法

コア形状の試験片 A は一辺 38mm の正方格子構造、試験片 B は一辺 18mm の正方格子構造を有している。また、試験片 C は一辺 23mm のハニカム構造、試験片 D は一辺 9.96mm のハニカム構造を有している。

三点曲げの支点間距離は 100mm とし、試験速度は 2.78mm/min としておこなった。曲げ剛性は直線部分の傾きから求めた。曲げ試験は破断まで 3 点曲げ試験を実施した。

4.3.3 結果と考察

曲げ試験の結果、長方形形状が最も優れていることがわかった。これは、3 点曲げという一方向の曲げ応力とせん断応力のみがコア部分に伝わる負荷形式であるためであり、多軸負荷の場合には異なる結果となることが予想される。

曲げ試験に用いたコア構造は内部で 38mm の長さを持つ正方形で、幅 2mm で高さ 4mm のフランジからなる。

試験結果を図 4.3.1 に示す。縦軸は荷重であり、横軸は試験時間である。1 分間に 2.78mm の速度であるので、横軸は負荷点変位と見なすことができる。図からわかるように、最初は線形弾性であるが、0.25kN の負荷付近から非線形になり、大きく変形して破断に至る(図 4.3.2 参照)。

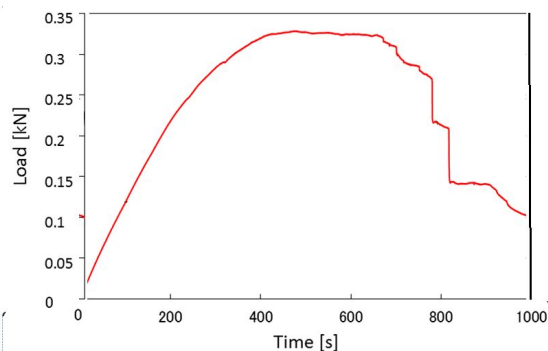


図 4.3.1 3 点曲げの荷重-試験時間関係



図 4.3.2 引張側破断部分

4.4 スナップインサンドイッチ構造の損傷モニタリング

4.4.1 はじめに

スナップインサンドイッチ構造の破断前損傷検知を目的として、スキン材に使用されている連続炭素繊維を利用し、電流を流すことで破断直前のモニタリングを行う。

4.4.2 実験手法

スナップインサンドイッチ構造は破断の前にコア部分のフランジ樹脂が圧縮塑性変形して大きな塑性変形的挙動を示す。そこで、破断検知を目的として、ここではフランジの塑性変形の影響を取り除くため、コア部分をナイロン樹脂で充填したサンドイッチ構造を用いることにする。試験片寸法や 3 点曲げのスパンなどは既出の方法と同じである。

また、曲げ試験時にコアの凹凸がはずれてしまうため、四隅にピンを差し込んで抜け防止対策を施した。電極は上下のスキン材表面の一部をレーザー彫刻機で除去して銀ペーストで作成した。電気抵抗の測定は LCR メーターを用いて 2 電極法で測定した。

4.4.3 結果と考察

図 4.4.2 に曲げ試験時の電気抵抗変化を示す。左縦軸が荷重であり横軸が試験時間である。負荷速度が一定であるために横軸は荷重点変位とみなすことができる。左縦軸が電気抵抗変化である。試験片によってバラツキが大きい。初期には電気抵抗は 1 ~ 数 の程度である。

図からわかるように、破断直前に R/R_0 が 0.2% 程度変化している。圧縮側よりも引張側で先に電気抵抗変化が発生している。これは、3D プリント複合材の繊維体積含有率が低い(30%) ため、圧縮側での繊維座屈がただちに繊維破断に至らないことが原因と思われる。

航空機などに用いられる 50% 以上の繊維体積含有率では、圧縮強度が引張強度よりも低い。ため、曲げ破壊では圧縮側で電気抵抗変化が生じる。自動車の車体外板の複合材は板構造であるため、高い繊維体積含有率となることが予想される。したがって、実際には圧縮破壊が先に検知されると推察される。

3D プリント複合材の負荷に伴う電気抵抗変化(ピエゾ抵抗変化)はプリプレグを積層して作成する複合材と異なる可能性があるため、今後の課題である。

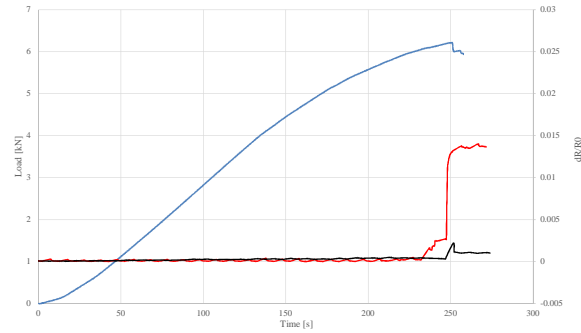


図 4.4.2 3点曲げ負荷時の電気抵抗変化

4.5 結論

- (1) フォームコアよりもスナップインサンドイッチ構造の方が完全密閉型のキャパシタを作成可能であり，充電性能も優れている．
- (2) 現時点では活性炭電極が高い信頼性を得られる．CNT 電極は電極形状に加工する影響で表面積が激減している．
- (3) スナップインサンドイッチ構造によって高い剛性が得られた．
- (4) 電気抵抗変化を 0.2% とすることで破断前検知が可能であることが明らかになった．

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) 勝俣凌, 轟章, 水谷義弘, 鈴木良郎, CFRP サンドイッチ構造キャパシタのコア構造の検討, 第 8 回日本複合材料学会 (JCCM 8), 東京大学, 2017, #42811 .
- (2) Ryo. Katsumata, Akira Todoroki, Yoshihiro Mizutani, Yoshiro Suzuki, Snap-in CFRP sandwich structural supercapacitor, 3rd Joint Turkey-Japan Workshop on Polymeric Composite Materials, 京都工芸繊維大学, 2017, #42922.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6 . 研究組織

(1) 研究分担者
(なし)

(2) 研究協力者
(なし)

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、研究者個人に帰属されます。