

氏 名 廣嶋 登

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大乙第264号

学位授与の日付 2020年9月28日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 三次元繊維強化複合材料を用いた回転円盤の高速化に関する研究

論文審査委員 主 査 准教授 小林 弘明

准教授 竹内 伸介

准教授 高木 亮治

准教授 後藤 健

JAXA 宇宙科学研究所

博士論文の要旨

氏 名 廣嶋 登

論文題目 三次元繊維強化複合材料を用いた回転円盤の高速化に関する研究

本研究の背景は、地球温暖化をもたらす環境問題にある。世界全体がこのまま化石燃料を消費し続けると発生した CO₂ は今世紀末までに地球の平均気温を 5℃以上上昇させると予想されている。化石燃料の使用を抑えるため、風力や太陽光などの再生可能エネルギーが検討されている。しかしながら、再生可能エネルギーは天候など自然現象の影響を受けやすく、品質高い電力を供給することが難しくなる。この状況を克服するために、解決策の一つとして電力を一時的に貯蔵し、安定的に供給するバッテリーとしてフライホイール電力貯蔵システム (FES: Flywheel Energy Storage system) が考えられる。

FES は、多くの電気エネルギーを回転体に回転エネルギーとして蓄えるため、軽量かつ高速まで破壊しないローター (回転体) を必要とする。フライホイールローターは金属製シャフト、回転する円盤、そして回転円盤とシャフトを接合するハブで構成されている。回転円盤は炭素繊維強化複合材料 (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) が使用される。その理由は、円盤に蓄えられるエネルギーは円盤材料の比強度に依存するためであり、CFRP は理論的に高い比強度を有する材料として知られている。

本論文は CFRP の一つの形態である三次元炭素繊維強化複合材料 (3DCF: 3-Dimensionally Carbon Fiber reinforced plastic) 製円盤を FES への適用を目的として高速回転体の検討を行ったものである。これまでに三次元繊維強化複合材料の回転体としての設計手法は確立されていない。本研究では、設計手法の確立、試作による実証、信頼性の向上を目標に検討を行った。

これまでのフライホイール回転体では、円周方向に強化繊維を巻き付けた円盤が多く、円盤の内外径比 ($\lambda=r_1/r_2$, r_2 :外半径, r_1 :内半径) を小さくしようとすると径方向の引張応力が大きくなり周方向に沿うクラックが発生するという問題があった。また金属製ハブは、内外径比が大きい複合材料製円盤に接合される場合には、ハブの外径が大きくなり回転時に大きな遠心力を受け、複合材料円盤より先に破壊を生じさせる。このため金属ハブの早期破壊という制約により複合材料のメリットである高比強度を発現させることが困難であった。これらの課題は径方向を繊維強化しクラックの発生を抑えるとともに、内外径比を小さくし接合されるハブの外径を小さくすることでハブの早期破壊を抑えることが可能である。本研究の三次元炭素繊維強化複合材料 (3DCF) は、円筒座標系で $r-\theta-z$ に沿う方向で強化繊維が配向されている。この強化形態を用いて、回転円盤の数値計算による高速化と設計手法の確立を検討した。

設計において、円盤形状の最適化は実験計画法に基づくサンプリング点の有限要素解析 (FEA: Finite Element Analysis) の結果から応答局面を作成することで最適値を求めた。設計変数は、円盤の外周での厚みと円盤の軸方向の厚みを関数で表現した。また、目的関数はエネルギー密度とした。結果として、内外径比 $\lambda=0.1$ 、 $r_2=150\text{mm}$ 、外径での厚み

3.2mm とし、円盤の軸方向の厚みを半径に反比例させて薄くする円盤でエネルギー密度の最大値が得られた。

材料の最適化は、FEA を用いて、径方向と円周方向の繊維体積含有率を最適に配分する直接探索法に基づくアルゴリズムを開発して行った。モデル形状は上述の最適化で得られた円盤の軸方向の厚みが半径に反比例して外側にかけて薄くなるものと従来が使用されることの多い平円盤で行った。また、半径方向の強化繊維を径の途中で追加または削除する場合としない場合を考慮した。計算の結果、径方向と周方向の繊維体積含有率の和が 0.55 の場合において、平盤では 1376m/s、上述の厚みを薄くする場合には 1797m/s の破壊周速が得られた。また小さい内外径比は回転体に占める低い比強度の金属製ハブの体積を減少させたことで、ハブを含む高いエネルギー密度を可能にすることを示した。

一方、内外径比を小さくすると円盤への大きな遠心力により内径の膨らみは大きくなり、ハブとの接合が困難となる。このため、ハブを介して接合される回転軸と円盤の接合方法について、形状、機構、材料の視点から新規な接合方法を提案した。また高速回転体の実証を目的に、成形プロセスの検討を含めた試作、回転試験、機械的評価試験を行った。

3 つの接合方法のうち、円盤と回転軸との間に樹脂製リングを挿入する方法が高速回転まで接合が維持される可能性を見出した。樹脂は一般的に金属材料に比べて強度は低いですが、内外径比の小さい円盤に接合させる場合には、外径が小さいため回転遠心力によって円盤より先に破壊することはない。また、線膨張係数が大きいため、冷やしばめでの締め代を大きくすることが出来るので、ハブと円盤の接合を高速回転まで維持させることが想定された。一方、樹脂製リングは、クリープ特性を有することから必要な材料試験を行って、長期的な信頼を確認し、クリープ特性を考慮して最大接合維持周速 1210m/s の見積もりで試作を行った。

回転試験を行い、周速 905m/s で 150 μ m の軸振動を生じたため試験を中断した。原因を究明するため材料試験、ひずみ計測、FFT (Fast Fourier Transfer) 変換などの評価を行った。その結果、原因として、繊維のうねりが円盤の剛性を低下させたことが円盤とハブとの接合に緩みを生じさせ、軸振動の増加を生じさせたことを示した。

これまでに、三次元強化複合材料を用いた回転円盤の最高周速は 825m/s であったことから、本研究では樹脂製リングをハブとして用いることで、これまでにない最高周速を得ることに成功した。

本研究の高速回転体の設計および製作手法は、電力貯蔵用フライホイールシステムだけでなく多くの回転体構造に適用することが可能である。

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 廣嶋 登

Title
論文題目 三次元繊維強化複合材料を用いた回転円盤の高速化に関する研究

廣嶋登さんは、蓄電用フライホイールの回転円盤の高速化に関する一連の研究を行い、所定の研究成果をまとめている。高速回転する回転円盤については、炭素繊維強化複合材料の適用が最適であり、これまでも周巻き円盤や複数の周巻き円盤からなるマルチリングの円盤の研究例は多い。しかし、周巻き円盤は半径方向の強度が低いため内外径比を小さくしてハブを小型化することができず、円盤全体でのエネルギー密度の向上には限界がある。本研究は、半径方向にも炭素繊維を配置した3次元繊維強化複合材料を用いて高速回転可能な円盤の実現を提案している。周巻き円盤の欠点を補うばかりではなく、円盤の形状の最適化およびハブとの接合手法の提案までを行い、回転円盤のみではなくローター全体を検討することで高速化を実現しており、学術的、技術的観点で新規性および独創性が高い研究である。

本論文は、再生可能エネルギーによる発電の出力変動抑制のための蓄電技術として注目されている、フライホイールシステムの高性能化に欠かせない回転円盤の高速化手法についてまとめている。より高速回転する円盤を実現するためには比強度の大きな材料の使用が望ましく、炭素繊維強化プラスチック複合材料(CFRP)の適用が有望である。しかし、CFRPは繊維方向にのみ高強度である異方性材料であるために、その適用には特有の設計が必要である。そこで本研究では、最初にそのような強度の異方性を極力小さくするために回転円盤の円周方向、半径方向および板厚方向に繊維を配置した3次元繊維強化CFRP(3DCFRP)の適用を提案している。高速回転円盤の実現のために、3次元繊維織物の設計、円盤の形状にまで踏み込んだ最適設計手法を明らかにしている。次に、自身の設計に基づいて、3DCFRP円盤の試作に成功している。3次元織物の製作手法および樹脂の含浸手法など、CFRPの製造プロセス上の課題を解決している。また、高速回転の実現のためには、回転軸と回転円盤を接合するハブも合わせて設計する必要がある。実際に3種類のハブを数値解析により検討した後に、3種類のハブをもつ3DCFRP回転円盤の試作および回転試験を実施している。その結果、熱膨張係数の大きい樹脂リングを用いたハブが最も高速回転を実現することのできる、3DCFRP円盤に適したハブであることを実証している。次に、樹脂に特有の粘弾性挙動による長期使用時の円盤とハブの接合性について数値解析を実施することでハブの設計方法を示し、実際の回転試験によりこれまでに例のない周速908m/sを軸振動0.15mm以下で達成することに成功している。一方で、試作した3DCFRP円盤の回転試験時の変位が設計よりも大きく、軸振動が予測より大きいことから、試作した3DCFRP円盤の弾性率発現率が設計値の0.7程度であると見積もっている。その後実施した回転試験時のひずみ計測から、周方向弾性率発現率は0.65であり、半径方向弾性率発現率は0.85であることを明らかとした。また、円盤の局所的な周方向弾性率をリ

ングバースト試験により測定することで弾性率が設計通りに発現できていないことを実証するとともに、発現率が小さい原因は、織物製造時の半径方向繊維束の分岐点や周方向繊維束の遷移点における局所的な屈曲ではなく、織物全体に発生する繊維のうねりであることを明らかにしている。繊維のうねりによる影響を定量的に見積もるために3次元計測により繊維の長さを測定し、繊維うねりモデル (Wavy model) による弾性率発現率の予測値が実測値と一致することを見出している。最終的に、繊維のうねりにより低下した弾性率をもつ3DCFRP円盤では、樹脂製のハブとの分離が当初設計よりも小さい回転数で発生することを見出し、回転試験の際に軸振動が大きくなったことを定量的に説明することに成功している。このように、本論文では、エネルギー密度の高い内外径比 0.5 以下の3DCFRP円盤の最適な設計・製作手法、および回転軸と円盤の最適な締結手法を自ら見出し、これまでに報告例のない高速回転を実現しているところに、独創性と高い学術的価値が認められる。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。