

平成 21 年 9 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360308
 研究課題名（和文）三次元強化 CFRP の最適化設計によるフライホイール用高速回転体の開発
 研究課題名（英文）Optimal Design of 3-Dimensionally Carbon Fiber Reinforced Composites for High Speed Rotation
 研究代表者
 八田 博志（HATTA HIROSHI）
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙構造・材料工学研究系・教授
 研究者番号：90095638

研究成果の概要：

繊維強化複合材料を用いた孔あき回転円盤の高速化のための一般的な設計指針および到達可能な最高速度について数値計算を用いて明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2008年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学

キーワード：三次元強化複合材料、高速回転体、エネルギー貯蔵、フライホイール

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料（CFRP; Carbon Fiber Reinforced Plastics）は、高比剛性、高比強度という特徴を有し、宇宙航空分野への適用が図られてきた。本研究では、これら CFRP の特徴を活かした高速回転体に関する最適設計技術の検討を行う。CFRP の回転体についてはこれまでに人工衛星のはずみ車、ジェットエンジンのファン、電力貯蔵用フライホイールなどの開発を目標にした検討が行われてきた。いずれの研究においても、高速回転を実現することが最重要課題であるが、回転体の最高回転速度は理論的には材料の比強度で決定されることが知られており、CFRP の有効性が指摘されてきた。高速化（高強度化）により、電力貯蔵フライホイールにおいては貯蔵エネルギー密度が大きくなり蓄電装置としての性能向上することが期待され、また回転運転時に強

度余裕が生まれシステムの信頼性を向上させる効果も期待されている。遠心分離装置への適用においても高速回転の有効性が指摘されており、複合材料を用いたウラン濃縮用遠心分離機では高速回転化により効率的な濃縮が可能となると期待されている。NASA では電力貯蔵と姿勢制御を兼ね備えた衛星搭載を想定した回転体（フライホイール）の研究が行われている。ここでは、エネルギー密度として 150Wh/kg が目標とされている。この目標が達成されると現在使用されているリチウム系 2 次電池のエネルギー密度である 100～120Wh/kg を凌駕することが可能となり、衛星への搭載可能性が出てくる。一様厚さで中実な円盤において、150wh/kg のエネルギー密度を達成するためには、周速 1300m/s 程度が必要となる。

これまでに回転体の周方向に繊維を巻き

つけた均一厚みの孔あき円盤（周巻き円盤と称す）が主として研究されてきた。直交異方性又は等方性の孔あき円盤（リング）では、回転時の応力としては周方向の応力が圧倒的に高くなるため、周方向に炭素繊維を巻きつけた周巻き円盤は高い破壊回転速度を示すことが期待された。しかし、径方向には繊維で強化されていないため、径方向の強度は樹脂にほぼ等しく、繊維に沿った破壊が最大回転速度を限定していた。

一般的に回転円盤では、内径（ r_1 ）に対する外径（ r_2 ）の比（ $\lambda=r_1/r_2$ ）で表される内外径比が小さくなると径方向の応力は大きくなる。このため、周巻き円盤では相対的に内外径比が小さくなると径方向の応力が樹脂の強度を越え、周方向の繊維束間に剥離（破壊）が生じやすくなる。繊維間の剥離を抑える手法として、いくつかの周巻き円盤を圧入によって同心円状に組み立てる手法が検討されてきた。

この方法は、圧入によって圧縮の径方向応力を予め与えるものであり、繊維間の剥離を抑える効果はある程度あった。しかし圧入によって与える負の応力には成形プロセス上の限界があり、このためこの方法による円盤の内外径比は 0.6 程度以上に制限されていた。

回転体を実際に使用するためには、一般的に円盤にハブを接合し、ハブに回転軸を組み付ける必要がある。例えば、アルミ(A7075)製のハブを取り付けることを考える。アルミの比強度からハブの最大周速は 600m/s 以下に制限される。内外径比を 0.6 とすると、アルミ製ハブの破壊のために円盤の周速は 1000m/s が限界となる。鋼 (SCM435) も比強度はほぼ等しく、状況は同様である。

2. 研究の目的

以上の問題は強化繊維を径方向に配置すること、即ち三次元強化することで克服可能である。径方向の強化により、繊維束のクラックを抑えるとともに円盤の内外径比を小さくすることができる。また、円盤の内外径比が小さいのでハブを介在させることなく円盤を回転軸に直接接合させる（ハブレス接合と称す）ことができる。この相乗効果により円盤の更なる高速化が可能となる。

本研究では円筒座標系で (R, θ, Z) の 3 軸を強化した炭素繊維強化複合材料 (3D-CFRP と称す) を用いた回転体の材料及び形状 (構造) の最適化を検討する。とくに内外径比が小さい円盤における検討に注力する。これまでに 3D-CFRP を用いた回転円盤の最適設計技術は確立されていない。これまでの申請者等の予備検討では、有限要素解析で 3D-CFRP の適用により回転軸を含め周速 1500 m/s の回転体の設計が可能である (応力余裕が取れる) との結果を得ている。この周速は回転円盤では世界最速になる。

最適化の検討においては、エネルギー密度と破壊周速の主たるパラメータとし、両者を同時に考慮した最適解を模索する。等方性材料であれば、材料の比強度から破壊周速とエネルギー密度を最大にするとそれぞれの形状が定まる。3 次元異方性材料において形状と材料の最適化を考慮し、最適化を検討する。

3. 研究の方法

円盤には、回転時に円筒座標系で R, θ, Z に一致する方向に主応力が発生する。これらの中で、特に R 方向の繊維含有率を最適化することで、円盤の破壊周速を向上させることが本研究の特長である。本研究では、まず数値計算による回転円盤の最適化を行った。数値計算の手法として有限要素解析を用い、最適化は、応答局面法を用いた。

次に設計した円盤の検証として円盤の試作を行い、材料試験、円盤の回転試験を行った。また円盤の特性を発揮させるためには、成形の検討が不可欠であるため、RTM 成型法での試作実験を行った。

4. 研究成果

4. 1 孔あき平円盤の最適化

R 方向強化の効果を確認するため、 λ が 0.5 以下での孔あき平円盤の最適化を行った。3 次元複合材料の全体の V_f を V_t とし、円筒座標系の R, θ, Z のそれぞれの V_f を $V_{fR}, V_{f\theta}, V_{fZ}$ とし、有限要素モデルの径方向において各要素の材料定数を変化させた計算を行った。

図 1 は、 $V_t=0.6, V_{fZ}=0.0, V_{fR}+V_{f\theta}=0.6$ とし、内外径比を 0.1, 0.3, 0.5 としたときの破壊周速 (以下 BTS ; Burst Tip Speed) を最大にする $V_{fR}, V_{f\theta}$ の比である。横軸は半径であり、外径に対して無次元化している。内外径比が定まると最適な V_f の比率は一意に定まる。図 1 は、 V_t の大きさに関わらず適用することが可能である。

図 2 は最大破壊周速が得られたときの応力分布である。横軸は半径であり、縦軸の応力は、周速 (v) と密度 (ρ ; kg/m³) で無次元化している。normSSr、normSSt はそれぞれ、径、周方向応力を表す。

グラフから、最大応力は周方向で発生しその最大値から、円盤の BTS を求める式を得ることができる。たとえば、 $\lambda=0.1$ では最大応力は 0.6 であるから、破壊周速 (V_{BTS}) は次式で得られる。

$$V_{BTS}(\lambda=0.1) = \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{0.6 \times \rho}} \quad (\text{m/s})$$

式中、 σ_{max} は、図 1 の $V_{f\theta}$ から次式で求める。
 $\sigma_{max} = 0.75 \times V_{f\theta} \times F_s$ (MPa)

ここで F_s は繊維の強度であり、0.75 はスケールファクターである。

図 1 の最適比および上記 2 つの式を用いる

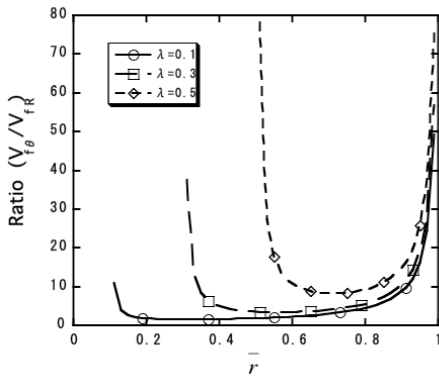


図1 最適強化円盤の Vf 比率

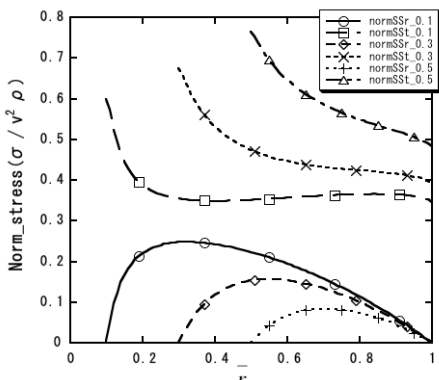


図2 最適強化円盤の一般化応力

ことで、径方向が強化された有孔円盤の BTS を求めることができる。

たとえば、東レ社製 T1000G, M46J, M60J の $Vt=0.6$ における BTS は、それぞれ 1660, 1350, 1260m/s となる。

有孔円盤では、厚みは一定であるため、内外径比 λ を用いて、エネルギー密度 e_w は次式より求めることができる。

$$e_w = \frac{V_{BTS}^2}{4} (1 + \lambda^2) \times 2.78 \times 10^{-4} \quad (\text{Wh/kg})$$

東レ社製 T1000G, M46J, M60J の $Vt=0.6$, $\lambda=0.1$ における e_w は、それぞれ 195, 128, 111 (wh/kg) となる。

同様に、 $\lambda=0.3, 0.5$ の BTS は、それぞれ次式より求めることができる。

$$V_{BTS(\lambda=0.3)} = \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{0.68 \times \rho}}$$

$$V_{BTS(\lambda=0.5)} = \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{0.77 \times \rho}}$$

4. 2 形状を考慮した最適化

前項は、平板における破壊周速の最適化を行った。ここでは、強化繊維を T1000G として径方向において円盤の厚みを変化させて、

応答局面法を用いてエネルギー密度を最大化する形状の最適化を行った。径方向強化の効果が大きい 0.5 以下の λ で検討した。

図3は円盤の断面であり、最適化を行った2つの変数である。外周部の厚み t_0 と外形曲線を n を実数として、半径 r のべき数とした。

計算の条件として、 $Vt=0.6$, $V_{fz}=0.02$, $V_{fR}+V_{f\theta}=0.58$ とした。また強化基材の製作を考慮して、径方向の強化繊維は内周から外周に渡り連続であることとした。これによりある半径での V_{fR} 円盤は厚みに依存して求めることができる。

応答局面は設計変数の組み合わせとして 12 個のサンプリング点の有限要素解析結果から求めた。

表1は、最適化された設計変数とそのときの BTS およびエネルギー密度である。 R_a^2 は自由度調整済み決定係数であり、回帰式の実験点における適合度を表す指標である。 R_a^2 は 1 のときに完全な一致を示す。表中の R_a^2 から応答局面は信頼できる範囲であった。ここでの検討結果から、厚みを変化させることで、エネルギー密度と破壊周速は向上する。ここでの検討結果から、厚みを変化させることで、エネルギー密度と破壊周速は向上する。

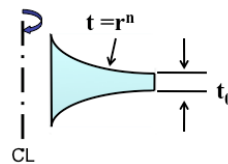


図3 形状最適化における設計変数

表1 最適化された設計変数

λ	0.1	0.3	0.5
n	-1.06	-1.68	-5
t_0	3.2	2.02	0.5
R_a^2	0.809	0.948	0.913
BTS (m/s)	2050	2030	1867
e_w (wh/kg)	216	216	222

4. 3 ハブとの接合を含めた設計

4. 3. 1 円盤の内側で接合

孔あき円盤の内径に接する金属製ハブの接合条件について検討した。

図4(a)は、回転する金属製ハブと CFRP 円盤である。また図4(b)はそれぞれを独立して示したものである。

図(b)において、3D-CFRP の回転中の内径変位を U_{CFRP} 、金属ハブの外周変位 U_{Metal} とする。双方が接合して回転するための条件は、次式で与えられる。

$$U_{metal} > U_{CFRP}$$

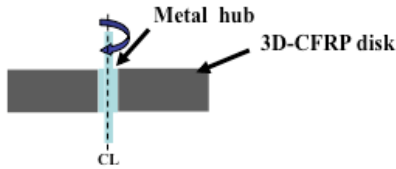


図 4 (a) ハブと円盤

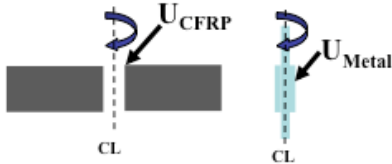
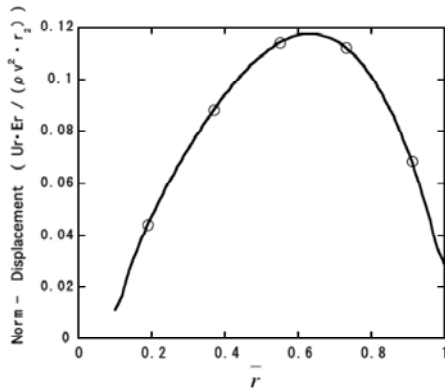


図 4 (b) 接合面の変位

ここでは、4. 1項で最適化された 3D-CFRP ($\lambda=0.1$) の内径にアルミ合金製中実円盤を冷やしばめし接合が分離しない周速を求める。アルミ合金 (A7075) を採用する理由は、鋼に比較して線膨張係数が大きいためである。線膨張係数を $23 \times 10^{-6}/K$ 、液体窒素と室温との温度差を 200K とした。

図 5 は、4. 1項で求めた最適化された 3D-CFRP ($\lambda=0.1$) の内径変位である。

縦軸は、変位, U_r (mm) を径方向弾性率, E_r (MPa)、周速, v (m/s)、密度, ρ (kg/m^3)



および外半径, r_2 (mm) で無次元化している。

図 5 最適化平円盤の一般化変位

図中、内径における一般化変位の値、0.01 から、円盤内径の回転変位 (U_r) は次式で与えられる。

$$U_r = \frac{0.01 \times \rho \times v^2 \times r_2}{E_r}$$

この式の左辺は U_{metal} としてアルミ合金の冷やしばめ時の変位と回転変形の和を入れる。また右辺は、 U_{CFRP} とし図 1 の内径における最適化された V_{FR} 、 $V_{F\theta}$ の比から E_r 、 ρ を求め、 r_2 を定めて、両辺が等しくなる v が分離する周速となる。

表 2 は、東レ社製 T1000G, M46J, M60J の

3D-CFRP 平円盤の内径にアルミ合金製ハブを冷やしばめ接合させて回転させたときの接合が分離する周速とそのときのエネルギー密度である。

表 2 アルミハブとの接合と周速

表から、高弾性繊維を用いることが分離する

	T1000G	M46J	M60J
Tip Speed (m/s)	947	1007	1141
e_w (wh/kg)	53	71	92

周速を向上させるために有効である。 U_{metal} を大きくする方法としてハンドル型のハブやスプリットハブが採用されてきた。これらの手法を用いることで、分離する周速を向上させることは可能と考えられる。

しかしながら、T1000G 製円盤の回転強度は、4. 1項により 1660m/s であることから、その繊維強度を有効に活用するハブの接合方法が必要である。

4. 3. 2 円盤のボス部の外側に接合

前項とは異なる接合方法として、図 6(a) のように円盤のボスの外側に金属製ハブを接合させる方法を検討した。図 6(b) は双方を個別に示したもので、3D-CFRP のボス部の外径の変位を U_{CFRP} 、ハブの内径面の変位を U_{Metal} とする。図* (a) において双方を圧入によって接合させる。回転中に双方が影響を及ぼさない条件は、次式で与えられる。

$$U_{metal} = U_{CFRP}$$

この条件となるように図 6(b) の寸法 T を設計することができる。この方法は、 λ が小さいときに効果があると類推する。

4. 2項の結果から、3D-CFRP の厚みが $n=-1$ となるように、図 7 のような強化基材を製作し、これに接合する鋼製ハブ (SNCM616) の設計検討を行った。

図 6 (a) 円盤部のボス部での接合

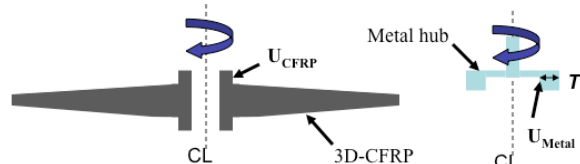
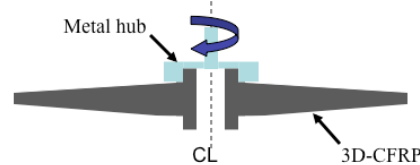


図 6 (b) 円盤部のボス部での接合条件

表 3 に製作した基材の各方向の Vf とその偏差である。

表 4 は、製作した基材の応力解析の結果である。BTS は 1520m/s である。

図 8 は、製作した回転試験体である。

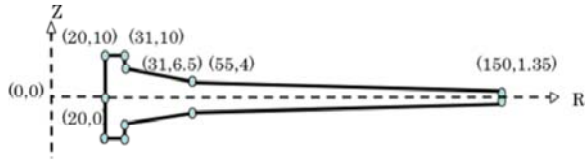


図 7 試作した強化基材

表 3 基材の Vf

	V _{FR}	V _{Fθ}	V _{FZ}
Average(%)	18.3	25.2	2.4
Deviation(%)	±2.0	±5.6	±4.1

表 4 応力解析

	σ _{Rmax}	σ _{θmax}
Generated stress(MPa)	734	1321
Material Strength(MPa)	855	1356
Margin	1.165	1.027
Durable tip speed(m/s)	1618	1520



図 8 試作回転体

4. 4 材料試験

4. 4. 1 円盤材料特性試験

試験体をエアタービン駆動式スピンドル（丸和電機）に取り付け、回転時に円盤に生じるひずみの測定を行った。最高回転数は 18000rpm、上昇、下降速度は 50rpm/s とした。半径 50, 60, 70, 80, 90mm の径、周方向にひずみゲージを貼り付け、各径のひずみを測定した。

回転時のひずみ測定結果を図 9 に示す。図中の連続線、破線は円盤の設計値をもとに有限要素法解析により計算した径、周方向ひずみの分布である。計測された歪みは、計算による値よりも 50%程度大きくなった。

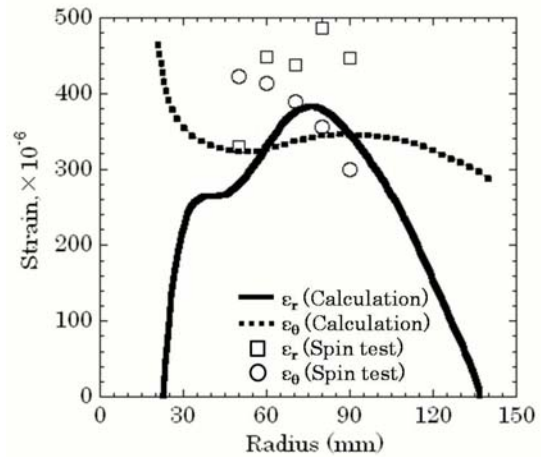


図 9 18000rpm 回転時の各径のひずみ測定結果とひずみ分布の計算値

次に円盤の周方向ヤング率、強度測定のため、円盤から切り出したリング状試験片のリングバースト試験を行った。リングバースト試験はリング状試験片に静的内圧を負荷することでリングの周方向引張試験を行うものである。試験片は外径 φ50mm (I) が 3 個、φ104mm (II) と φ186mm (III) は各 1 個ずつ、高さと同径方向肉厚はいずれも 5mm の 3 タイプ計 5 個を用意した。

円盤より切り出したリング状試験片のリングバースト試験による周方向ヤング率、強度の測定結果を図 10, 11 に示す。図中の計算値は円盤設計における周方向繊維体積含有率 V_θ から見積もられる各径の周方向ヤング率、強度である。

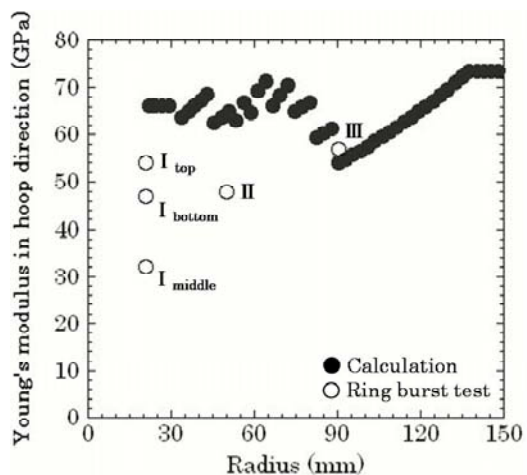


図 10 リング状試験片の周方向弾性率測定結果と計算値

試験結果から弾性率は設計値の 50~80%、また強度は 20~50%であった。

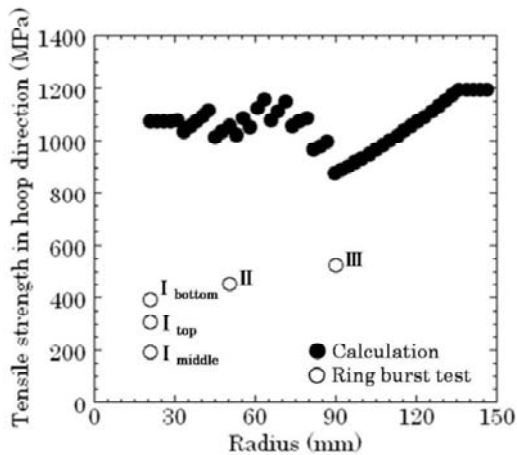


図 1.1 輪状試験片の周方向強度測定結果

4. 5 回転試験

試験体を回転ひずみ測定時と同様のスピンドルに取り付け、回転破壊試験を行った。ギャップセンサーにより軸振動を測定しながら、回転数の上昇速度 100rpm/s で試験を行った。

試験時の回転数に対する軸振動の測定結果を図 1.2 に示す。回転数が 31000rpm を過ぎてから軸振動が増大し、回転数 35929rpm、軸振動 0.449mm に達した直後、破壊に至った。破壊時の周速は 527m/s であった。

材料試験の結果から考察すると、破壊の原因は、強化基材の弾性率や強度の発現率が低く、鋼製ハブとの接合部での剪断変形が大きくなり、永久変形を生じさせ、軸振動を増大させ、破壊に至ったと考えられる。材料試験によって剪断応力を評価するとともに、鋼製ハブとの接合を見直した試験体での回転試験を検討している。

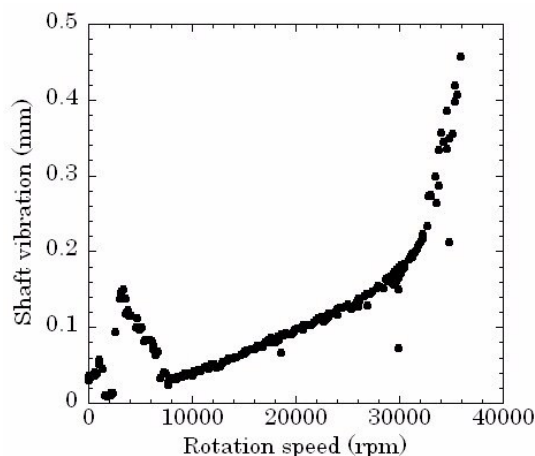


図 1.2 回転破壊試験時の軸振動測定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

① N.Hiroshima, H.Ohkita, K.Goto, H.Hiroshi, Y.Kogo, **Optimal Design of 3-Dimensionally Carbon Fiber Reinforced Composites for High Speed Rotation**, The 6th Korea-Japan Joint Symposium on Composite Material, 2007/11/1, Pohang University of Science and Technology

② N.Hiroshima, K.Goto, H.Hiroshi, 3-Dimensionally Carbon Fiber Reinforced Composites for High Speed Rotation, The 9th Annual International Conference on Textile Composites, 2008/10/15, University of Delaware

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 高速回転体

発明者: 広嶋登 八田博志 後藤 健 他

権利者:

種類: 特許権

番号: 特願 2009-000609

出願年月日: 平成 21 年 1 月 6 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八田 博志 (HATTA HIROSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙構造・材料工学研究系・教授

研究者番号: 90095638

(2) 研究分担者

後藤 健 (GOTO KEN)

(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙構造・材料工学研究系・准教授

研究者番号: 40300701

(3) 連携研究者