

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630394

研究課題名(和文)超軽量高剛性バイコンベックスブームによる大型宇宙構造物の実現

研究課題名(英文)Realization of Large Space Structure by Ultra-light High-stiffness Bi-convex boom

研究代表者

宮崎 康行(MIYAZAKI, Yasuyuki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30256812

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)：展開・伸展後は閉断面梁と同等の高剛性を有し、かつ、平面上に折り畳まれて小さな曲率半径で巻き付けることが可能な、画期的なバイコンベックスブームの力学特性、特に、収納特性と自己伸展特性を理論的に明らかにし、実験により理論の妥当性を確認した。この理論を用いて、このブームを用いた自己伸展/展開構造物の設計手法を明らかにした。このブームを用いたトラス部材の自己伸展運動の構造保存型陽解法を定式化し、数値シミュレーションによりその妥当性を示した。そして、19ノード42ブームの自己展開トラスを試作し、提案するトラスが非同期展開性に優れ、大型宇宙構造物に適していることを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：The novel bi-convex boom, which can be rolled-up into small radius of curvature and has as high stiffness as the closed cross-section beam after the deployment, was proposed and its mechanical property, especially the characteristics of storage and self-extension was clarified theoretically. The validity of the theory was verified by the experiment. The design method of the self-extensible/self-deployable structure consisting of the proposed booms was clarified by using the presented theory. New structure-conserved explicit time-integration algorithm of the self-extension dynamics of 2-nodes 1-boom truss using the proposed boom was formulated and its validity was verified by the numerical simulation. The proto-type of the self-deployable truss consisting of 19 nodes and 42 booms was produced. The experimental result showed that the proposed truss structure has high performance for asynchronous deployment so that it is suitable for future large space structure.

研究分野：宇宙構造物工学

キーワード：展開宇宙構造物 自己展開 超軽量トラス 超軽量大型宇宙構造物

1. 研究開始当初の背景

太陽発電衛星など数百～数千 km オーダーの大型宇宙構造物の構想は数十年前から提唱され続けている。しかし、超軽量・大面積かつ剛性の確保を要求するなど構造力学の面で実現性が低い。筆者は、このような大型宇宙構造物の実現可能性を高め、工学的に妥当な議論をするには、超軽量かつ高剛性、優れた自己伸展/展開力、高い収納効率を兼ね備えた構造部材の開発が必須と考えていた。そんな中、本研究を開始する1年ほど前の2012年、コンベックステープ（巻尺のように断面が凸型のテープ）を組紐で合わせて閉断面状にしたバイコンベックスブーム（図1）が開発され、BCONブームと名付けられた。一般に、コンベックステープを巻き付けておいて、保持を緩めると、するすると伸展し始める。すなわち、自己伸展力を有している。これを2つ合わせたBCONブームは、単純にコンベックステープの2倍の自己伸展力よりも大きな自己伸展力を有すると考えられる。

筆者はこれまでの経験から、これを応用すれば次世代の大型宇宙構造物を実現できる可能性があると感じ、本研究を提案するに至った。具体的には図2のような、スピンドルと構体からなるノードと膜面によって構成される展開トラスであれば、軽量で展開性・収納性に優れた大型宇宙構造物を実現できるのではないかと考えた。



図1 BCONブーム

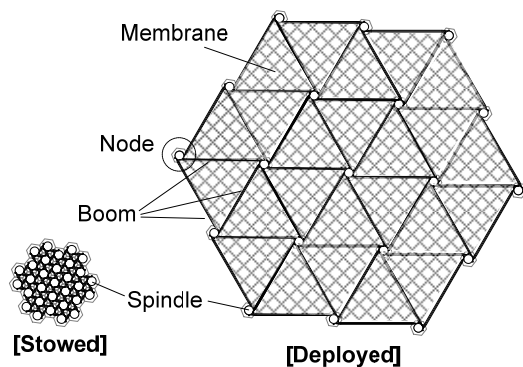


図2 多段式展開トラス

収納可能な閉断面ブームの研究は海外で盛んであるが、ブームを平面状に畳んで巻き付け収納を行うと、ブームの内側部分と外側部分とで巻き付け長さに差（内外周差）が生じ、部材に大歪が発生するため、部材剛性・収納長さに限界がある。これに対し、本研究のブームは閉断面性を維持しながら収差を吸収できる特殊な構造で収納性と高剛性が

両立する。したがって、本研究は、コスト・構造力学の両面で実現性のある大型宇宙構造物を議論する、事実上、世界初の研究であった。なお、当時のみならず、2015年現在も、このように内外周差を吸収できる部材は本研究以外には発表されていない。

2. 研究の目的

本研究は、展開・伸展後は閉断面梁と同等の剛性を有し、かつ、平面上に折り畳まれて小さな曲率半径で巻き付け収納が可能な、画期的なバイコンベックスブームの力学特性を明らかにし、このブームを用いた、スペースプラットフォームや太陽発電衛星に代表される次世代の数百～千 m 級大型宇宙構造物の実現可能性を示すことを目的とした。具体的には、次の4つの課題を解決することを目的とした。

- 課題1 ブーム一本の数学モデルと力学特性解析理論の構築
- 課題2 数値計算と実験によるブーム一本の力学特性（収納特性・自己伸力等）の評価
- 課題3 ブームを用いた三次元展開立体骨組み構造物の試作と数値計算及び実験による収納/非同期展開性能評価
- 課題4 軌道上運動シミュレーションによる千 m 級大型宇宙構造物の実現可能性評価

3. 研究の方法

2節で示した4つの課題について、それぞれ以下の方法で研究を実施した。

- (1) 課題1 ブーム一本の数学モデルと力学特性解析理論の構築
  - ① 1本のブームを円筒ハブに巻きつけた際の変形の解析解を導く
  - ② 1本のブームと2つのノードから成る部材の自己伸展のダイナミクスの定式化を行う
- (2) 課題2 数値計算と実験によるブーム一本の力学特性の評価
  - ① 課題1の①の解析解を用いて、ブームを巻き付け収納できる条件、ならびに、自己伸展力の解析解を導く
  - ② 自己伸展力を実験で計測し、解析解と比較することで、解析解の妥当性を示す
  - ③ 課題1の②の定式化をもとに、1本のブームの自己伸展運動のシミュレーションを行う
- (3) 課題3 ブームを用いた三次元展開立体骨組み構造物の試作と数値計算及び実験による収納/非同期展開性能評価
  - ① 三角柱型の立体骨組み構造物を試作し、その収納性と非同期展開性を評価する
- (4) 課題4 軌道上運動シミュレーションによる千 m 級大型宇宙構造物の実現可能性

評価

- ① 多段式平面展開トラスを試作し、その収納性と非同期展開性を評価する
- ② スピンドルの摩擦やノード部で伸展方向を誘導するガイドローラーとの摩擦を考慮した上で、ブームがノード部でスタックしないための条件を導く
- ③ “確実に” 展開するための多段式平面展開トラスの設計法を示す

研究開始当初は、課題3および課題4では数値シミュレーションを実施する予定であったが、研究を進めるにつれて、「非同期展開性の評価は多段式平面展開トラスで評価できる」、「大型化の可否については、軌道上展開シミュレーション結果から判断するよりは、各ノードで自己展開するための条件を求める方がより適切で設計に適用しやすい」との結論を得て、上記のように研究方法を修正した。

#### 4. 研究成果

3節に掲げた課題1~4を解決することができた。以下に、それぞれの課題に関する研究成果を述べる。

- (1) 課題 1 ブーム一本の数学モデルと力学特性解析理論の構築：

- ① 1本のブームを円筒ハブに巻きつけた際の変形の解析解を導いた（学会発表①, ②）。

まず、図3のようにコンベックステープが半径  $R$  の円筒ハブに巻き付けられた際の変形の解析解を導いた。

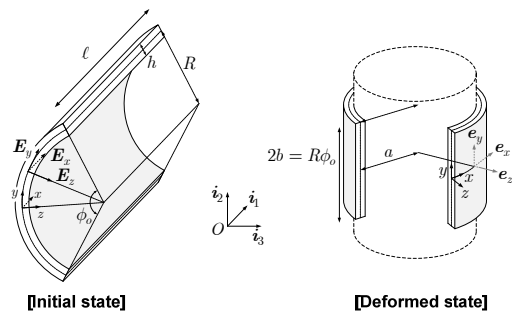


図3 円筒ハブに巻き付けられたコンベックステープ

そして、これを二つ合わせた、図4のようなバイコンベックステープの変形の解析解を導いた。

- ② 1本のブームと2つのノードから成る部材の自己伸展のダイナミクスの定式化を行った

課題2では図13のような2つの2N1B部材(2つのノードと1本のブームから成る部材)を試作したため、これのうちのタイプaの部材に対応したノードのモデル化(図5)を行い、ダイナミクスを定式化した。この定式化では、一般化座標と一般化

運動量を変数とすることで、ブームがノードの収納壁に接触する場合としない場合とを、接触判定のチャタリングを起こすことなく切り替えることができ、壁とブームのクーロン摩擦による stick-slip 運動も模擬できる。また、Discrete Contact Velocity という概念を導入することで、陽解法であっても運動量・角運動量・エネルギーを厳密に保存できる(摩擦がある場合には、摩擦仕事の分だけ厳密にエネルギーが減少する)数値時間積分手法を開発した。この手法は、この問題だけでなく、一般的な非線形運動、特に、接触を伴う運動に対して強力なツールとなる。実際、そのような運動は、通常、陰解法で解くか、疑似的な数値減衰を導入することで解くが、開発した手法であれば、数値減衰を導入しなくても解くことができ、陽解法であるので、コードの簡素化、計算時間の短縮化が見込める。この手法については、今後、学術論文として投稿する予定である。

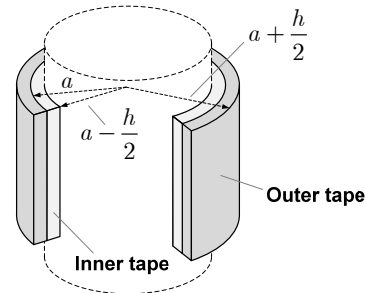


図4 円筒ハブに巻き付けられたバイコンベックステープ

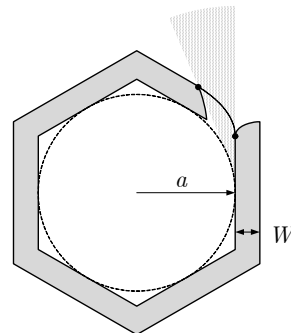


図5 ノードのモデル化

- (2) 課題 2 数値計算と実験によるブーム一本の力学特性の評価

- ① 課題1の①の解析解を用いて、ブームを巻き付け収納できる条件、ならびに、自己伸展力の解析解を導いた

まず、課題1の①の解析解を用いて、ハブに巻き付けられた BCON ブームに蓄えられる単位長さあたりの歪エネルギー  $\pi$  と、両端に作用する曲げモーメント  $M$  を求めた(図6, 図7)。

そして、この単位長さあたりの歪エネルギーが伸展力に相当することを示した。

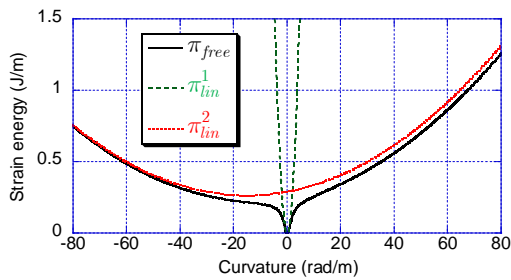


図 6 歪エネルギーとハブの曲率との関係の例

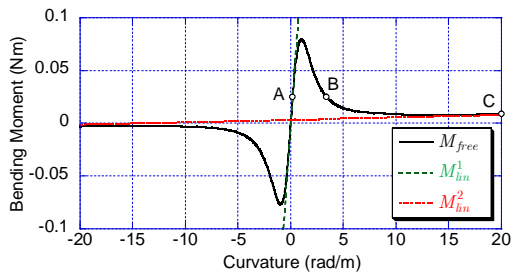


図 7 曲げモーメントとハブの曲率との関係の例

次に、ブームを最も巻き付けやすいのは、ハブ曲率がブームの準安定曲率（図 8 のように、ブームの両端を保持したときにブームが呈する曲率半径  $a$  の逆数）と一致するときであること、この曲率が  $M \cdot \kappa - \pi = 0$  を満たす  $\kappa$  のことであることも示し、その計算法も示した（学会発表②）。

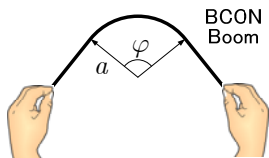


図 8 ブームの準安定曲率半径

そして、この曲率よりもハブの曲率が小さい（ハブの半径が  $a$  よりも大きい）ことが、巻き付け可能条件であることも示した。

- ② 自己伸展力を実験で計測し、解析解と比較することで、解析解の妥当性を示した

まず、図 13 のような装置で自己伸展力を測定した。

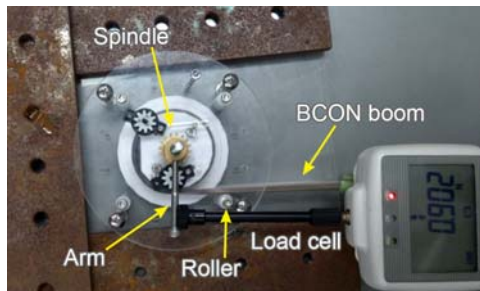


図 9 自己伸展力の測定

課題①の解析解では、BCON ブームを構成する 2 つのコンベックステップの接触の度合いによって伸展力が異なることを

示しており、自己伸展力の下限值も求めた。実験結果と解析解との比較をしたところ、自己伸展力は、ブームの巻き付け量にほとんど依存せず、伸展中はほぼ一定で、その値は解析解による下限値に近く、常に上回っていることが明らかとなった。このことは、BCON ブームを用いて大型の展開トラスを構築する場合、この下限値を用いて設計することが可能であることを示している。つまり、この下限値が摩擦や膜面による展開拘束力を上回れば展開が可能と言えるようになったわけである。これは、これまでは明らかにされていない、貴重な成果となった。これについては、学会発表⑤にて発表し、学术论文に投稿する予定である。

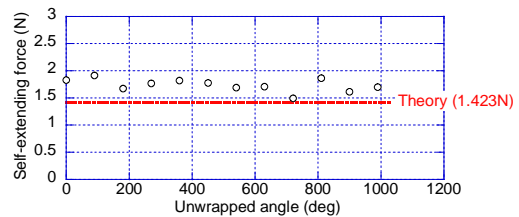


図 10 自己伸展力の測定結果と理論値との比較

- ③ 課題 1 の②の定式化をもとに、1 本のブームの自己伸展運動のシミュレーションを行った

まず、図 13 に示すような 2 種類の 2N1B 部材を試作し、タイプ a に対応した数値シミュレーションを行った。その例を図 12 と図 12 に示す。図 12 に示す通り、接触の発生と消滅を詳細に模擬できており、摩擦の影響も明確に表現できている。

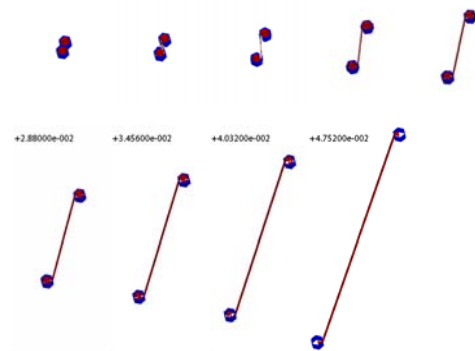
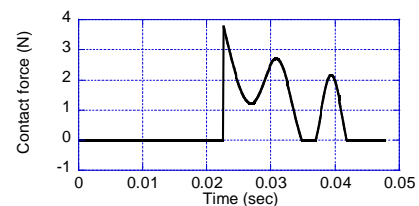
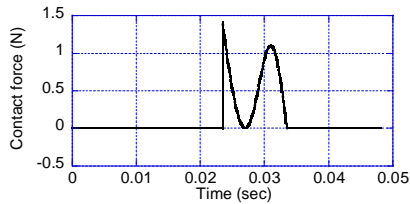


図 11 伸展解析例(伸展形状)

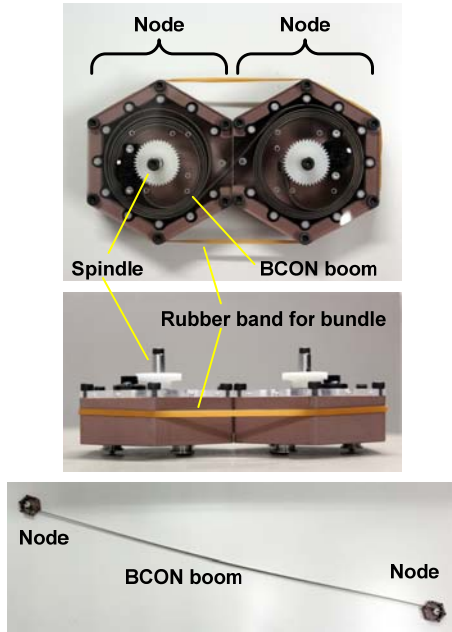


(a) 摩擦がない場合の接触力

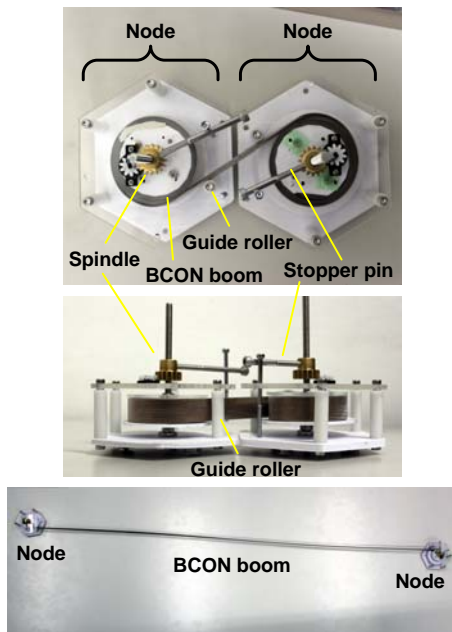


(b) 摩擦がある場合の接触力

図 12 伸展シミュレーション例(接触力)



(a) タイプ a



(b) タイプ b

図 13 試作した 2N1B 部材

- (3) 課題 3 ブームを用いた三次元展開立体骨組み構造物の試作と数値計算及び実験による収納/非同期展開性能評価

- ① 三角柱型の立体骨組構造物を試作し、その収納性と非同期展開性を評価する

図 14 に示すような三角柱トラスを試作したが、ノードの重量が重すぎ、それにより摩擦が増加し、完全には展開しない結果となり、展開性を評価することはできなかった。これは本研究で解決しなかった課題であり、これを解決するため、2015 年 11 月に航空機を用いた微小重力実験を実施する予定である。これにより、非同期展開性を評価できるものと考えている。



図 14 試作した三角柱型展開トラス

- (4) 課題 4 軌道上運動シミュレーションによる千 m 級大型宇宙構造物の実現可能性評価

- ① 多段式平面展開トラスを試作し、その収納性と非同期展開性を評価した

試作した 19N42B トラスの収納時及び展開時の写真を図 15 に示す。このトラスの展開実験より、多段式であっても、ロータリーダンパを使って適切に伸展力を調整することで、スタックすることなく展開することを示した。実際、次の②で示す通り、伸展力が強すぎると、スピンドルが速く回り過ぎ、ブームの伸展を追い抜いてしまい、ノード内でのスタックが起り、逆に、伸展力が弱すぎると、摩擦等に負けて伸展しなくなるため、どこまで伸展力を弱めるかが問題となるが、後述の③で示す通り、課題 1 の①の解析解を用いて、必要十分な伸展力を見積もることができるため、この自己展開トラスを設計することが可能となった。



図 15 試作した 19N42B トラス

実際の展開は、スピンドルやガイドローラの摩擦はそれぞれのノードで若干異なるため、完全同期とはならないが、それでも非同期な部分をブームの弾性変形が吸収し、問題なく展開した。この非同期展開性は、構造物を大型化するためには必須の特性であり、これまでの展開トラスでは実現が困難なものであった。それを、わずかな弾性変形を許容することで実現した

今回のバイコンベックスブーム式展開トラスは、次世代の大型宇宙構造物様式として大変有力であることを確認できた。

さらに、非同期展開の極端な例として、スタックした際の現象を確認するため、一つのノードのストッパーピンを固定することで、そのノードの回転を止めたところ、周囲のノード・ブームは展開し、一部のブームは折れ曲がった状態で静止し、ストッパーをはずしたところ、そこから全体が展開することを確認した。このように、提案するトラスは、展開途中は柔軟で非同期性を許容し、展開後（曲率0付近）は図7に示す通り、高い曲げ剛性を有するため、展開構造として理想的と言える。

- ② スピンドルの摩擦やノード部で伸展方向を誘導するガイドローラーとの摩擦を考慮した上で、ブームがノード部でスタックしないための条件を導いた

まず、高速度カメラで図16のようにハブに巻き付けられたコンベックステープがハブから剥離する現象がノード内でのテープのスタックの原因であることを確認した。そこで、図17のようなハブの回転モデルを考え、これを解くことで、剥離しないためには、テープの展開中にハブの角速度がある条件式の値を超えないことが必要であることを突き止め、実験でも確認した。この式から、ロータリーダンパによる力の上限值が決まり、適切にノードを設計することが可能となった。

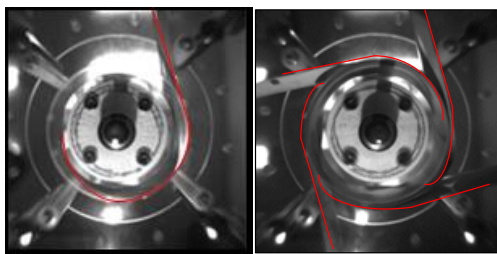


図16 ノード内でのテープの剥離

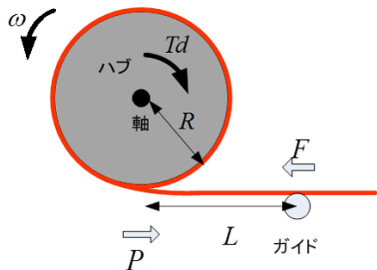


図17 ハブの回転モデル

- ③ “確実に” 展開するための多段式平面展開トラスの設計法を示す

以上の結果から、課題1の①で得た解析解と、課題4の②で得た展開条件から、どのような大きさの多段式トラスであっても、条件を満たすよう設計すれば展開する

ことを示した。詳細は学会発表⑤、⑥で発表し、⑤は学術雑誌にそのまま投稿する予定である。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

- ① 田村明寛, 井上翔太, 宮崎康行, BCONブームを用いた自己展開トラス構造の構造特性, 第57回構造強度に関する講演会, 2015年8月5~7日, 岡山理科大学(岡山県岡山市)。
- ② Shota Inoue, Akihiro Tamura, Noboru Tada, and Yasuyuki Miyazaki, Dynamic Characteristics of Self-Deployable Structure Consisting of Tape Springs, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015年7月9日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)。
- ③ Yasuyuki Miyazaki, Noboru Tada, Shota Inoue, Akihiro Tamura, and Masahiko Yamazaki, Space Verification of Advanced Deployable Structure by Using Nano-Satellite, 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, June 16-19, 2015, Istanbul (Turkey)。
- ④ 宮崎康行, BCONブームの曲げ理論, 第56回構造強度に関する講演会講演集, 1A18(JSASS-2014-3019), 平成26年8月6日~8月9日, 浜北文化センター(静岡県浜松市)。
- ⑤ 村田亮, 井上翔太, 宮崎康行, 宇宙構造物の伸展部材用コンベックステープの展開挙動, 第56回構造強度に関する講演会講演集, 1A17(JSASS-2014-3018), 平成26年8月6日~8月9日, 浜北文化センター(静岡県浜松市)。
- ⑥ 宮崎康行, 村田亮, 井上翔太, 鈴江隼太, コンベックステープの巻き付け時の変形の理論解, 第29回宇宙構造材料シンポジウム, 平成25年12月3日, JAXA(神奈川県相模原市)。

[その他]

ホームページ等

<http://forth.aero.cst.nihon-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮崎 康行 (MIYAZAKI, Yasuyuki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 30256812