

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18773

研究課題名（和文）生物を模倣したフレキシブルかつ折りたたみ可能な展開式火星飛行機の研究

研究課題名（英文）Research on biological flexible and foldable deployable Mars airplanes

研究代表者

永井 大樹（Nagai, Hiroki）

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：70360724

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：この提案は、生物を模倣したフレキシブルかつ折り畳み可能な柔軟膜翼によって翼面上の流れ場を制御することにより、より高次元の性能を有する固定翼の飛行機の開発を目指している。そのため、まずは柔軟膜を用いた翼を作製し、風速による膜の変形が空力特性に及ぼす影響を非定常流れ場を可視化することで調査した。特に翼面上の複数枚の流れ場を取得し、それらを再結合することで非定常流れ場と膜振動の関係を明らかにした。もう一つは誘電エラストマーによる柔軟膜のアクティブ制御で、予ひずみが誘電エラストマー翼に与える影響を調査した。特に電圧による予ひずみを変化させた際の膜変形量を計測し、空力特性との関係性を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案において生物を模倣した翼を有する超小型火星飛行機の実現性を示すことが出来れば、世界各国の惑星探査研究者たちを魅了し、様々なアイデアの探査機が派生的に検討されるなど、その世界に与えるインパクトは大きい。本提案ではその先鞭をつける意味で大きな意義を持つ。また本提案で本研究を行う柔軟膜翼は翼を極限まで薄く、柔軟性を持たせること（柔軟膜）ことにより、その空力特性を向上させ、ロバスト性も見込めるアイデアとなり、高高度無人機などの開発に大きく貢献するといえる。

研究成果の概要（英文）：This proposal aims to develop a fixed-wing Mars airplane with a higher dimensional performance by controlling the flow field on the wing surface with a flexible membrane wing that mimics a living organism. We first fabricated a flexible membrane wing and investigated the effect of membrane deformation due to dynamic pressure on aerodynamic characteristics by visualizing the unsteady flow field. In particular, the relationship between the unsteady flow field and membrane vibration was clarified by acquiring multiple flow fields on the wing surface and recombining them. The other is the active control of flexible membranes by dielectric elastomers, and the effect of pre-strain on dielectric elastomer airfoils was investigated. We measured the membrane deformation when the pre-strain was varied by voltage and investigated the relationship with aerodynamic characteristics.

研究分野：空気力学

キーワード：低レイノルズ数 火星飛行機 柔軟膜翼 誘電エラストマー

1. 研究開始当初の背景

火星飛行機のアイディアは、過去にも検討されてきた。NASA では、図 1(a)のような大型の飛行機が本格的に検討され、多くの知見を得ている。ただし、これまでに実現した例はない。その理由は、火星大気密度が地球と比較して 1/100 しかなく、飛行機の揚力（飛ぶ力）を十分に確保するために、様々な革新的なアイディアや技術開発が必要となり実現が困難であったことが挙げられる。このため、リスクが大きく、失敗の許されない国家の宇宙機関では採択することができなかった。JAXA を中心とした日本の大学においてもこれまでに小型の飛行機を火星に送ることを想定し、研究開発を進めていた（図 1(b)）が、上記と同様な理由から実現には至っていない。この反省点の一つとして、飛行機形状や翼、構造・材料などが既存の航空機開発の延長上にしかなかったことも一因として挙げられる。このような背景により、本提案では、これまでに検討された飛行機とは一線を画し、超小型の飛行機（図 1(c)）に焦点を絞ることとした。飛行機は 1U（10cm×10cm×10cm 四方の管体）のサイズに収まるようにし、火星上空で大きな翼を広げる。このように極限まで小さくすることで近年活発な小型衛星を利用することも可能となり、火星へ飛行機を輸送する機会が格段に増えるといえる。また地上では生物を模倣した飛行体のアイディアはたくさん見られるが、火星での飛行体に適用した例はなく、また翼の変形を積極的に利用するアイディアも類をみない。火星飛行機は極限までの軽量化のため翼を薄くする必要がある。薄翼は低レイノルズ数環境ではメリットがあるが、剛性が弱く変形による、空力特性変化が好ましくないと考えられてきた。

本研究では、発想を逆転し、翼を極限まで薄く、柔軟性を持たせること（柔軟膜）ことにより、その弱点を克服するだけでなく、性能向上、ロバスト性も見込めるアイディアになり得るとして、柔軟膜翼を提案している。

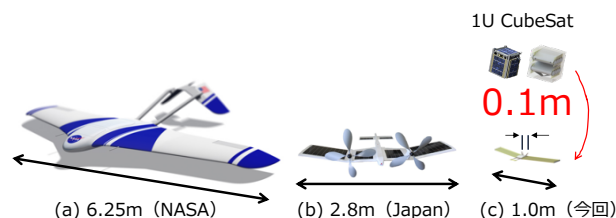


図1 提案する機体のサイズ

2. 研究の目的

本研究では、世界初の超小型の飛行機による火星飛行探査を目指し、生物を模倣したフレキシブルかつ折り畳み可能な展開式火星飛行機の研究・開発を行うことを目的とする。この火星飛行機の開発には既存の航空機開発技術の先にあるものではなく、全く別次元の革新的な翼の開発が求められる。火星の大気密度は地球と比較して 1/100 程度であるため、流体力学的な観点からの流れ場は、低レイノルズ数流れとなる。この低レイノルズ数環境下での飛行は、流れ場の突然の変化（層流剥離、剥離泡、失速）により揚抗比（飛行性能）が急激に悪化することがよく知られており、飛行機的设计を困難にしている。これに対して、昆虫や鳥などは、同等のレイノルズ数環境下で容易に飛行しており、その飛行性能も十分高い。また通常は翼を収納することでコンパクトになっており、これらの条件は火星で飛行させる超小型飛行機の要求（大面積、超軽量および折り畳み翼）と重なる。本研究では、この生物を模倣した翼の研究開発を行うことを目的とし、さらに翼面上の流れ場を制御することにより、より高次元の性能を有する飛行機（羽ばたき翼ではなく、固定翼の飛行機）の開発を目指す。そこで、まずは柔軟な膜翼の空気力学に着目し、流れ場による翼型の変形（および伸長）が空力特性に及ぼす影響を調べることにする。またその変形を積極的に利用（流れ場に最適な形状に変形）し、失速特性の改善、揚抗比の向上、動圧補償、飛行制御への応用（高次元の性能を有する機体）を目指す。この際、膜の特性（厚み、弾力）のみによる受動変形と誘電エラストマアクチュエータを用いた能動変形の二種の方法を調べる。

3. 研究の方法

実験は、東北大学流体科学研究所附属の小型低乱風洞にて行った。この風洞は単路回流式で、測定部は開放型とした。翼模型は図 2 に示すように 2 種類用意した。どちらも平面形は矩形であり、翼型は翼弦長の 5% 厚の平板翼である。一つは SUS 製の剛体翼であり、もう一方は SUS 製フレームの片側に膜厚 0.3mm、ヤング率 13MPa の合成ゴムシートを貼り付けた柔軟膜翼とした。翼弦長はどちらも 50mm で、アスペクト比は 4.0 である。翼端効果を軽減するため、翼の両端には翼端板を設置して計測を行った。実験セットアップおよび実験条件実験セットアップの概略を図 3 に示す。翼模型は三分力天秤を介して地面と垂直に取り付けられている。翼模型に対して垂直に PIV 計測用レーザーシートを翼端から 80 mm の位置に照射し、測定部上方に設置した高速度カメラにより撮影する。翼表面や細かい流れ計測を可能とするため、前縁から後縁にかけて視野を 4 分割して行った。主流速度は 9.0 m/s であり、翼弦長基準のレイノルズ数は $Re = 3.0 \times 10^4$ 迎角は 6deg. とした。

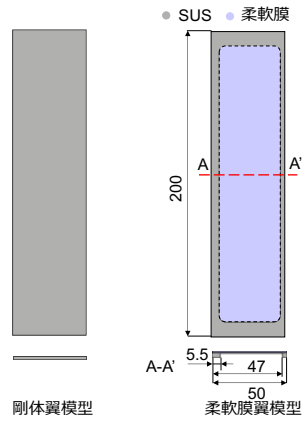


図2 翼模型

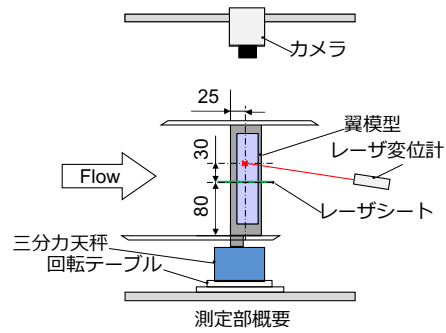


図3 実験セットアップ

4. 研究成果

図4において剛体翼と柔軟膜翼の揚力係数および揚抗比を比較する。剛体翼と比較して柔軟膜翼は正の迎角において揚力係数が大きくなった。失速時の揚力係数を比較すると剛体翼は 6° の0.58付近であるのに対して、柔軟膜翼は 12° の1.3付近となり0.72ほど向上した。柔軟膜翼の失速迎角は剛体翼の 6° 付近に対して 13° となり 7° 程向上した。特に失速特性についてみると剛体翼は一般的な薄翼失速特性であるのに対して、柔軟膜翼では揚力係数が最大値を取ったのち減少する傾向となった。剛体翼と柔軟膜翼の揚抗比 L/D を比較すると正の迎角で柔軟膜翼が大きくなった。最大揚抗比では剛体翼の5.9に対して柔軟膜翼では6.6となり0.7程向上した。なお、揚力係数および揚抗比においてエラーバーは剛体翼と比較して柔軟膜翼の方が大きくなった。これは膜面が振動していることに起因する。この振動の影響を確認するために翼周りの可視化を行った。

図5に主流方向速度の時間平均流れ場とレイノルズ剪断応力(RSS)分布を示す。柔軟膜翼周りの流れ場については、膜の最大変位でマスクしたものについて示す。剛体翼の平均流れ場より、前縁から剥離が起り、その後再付着したことが分かる。またRSS分布図より、前縁部の翼近傍ではRSSが小さい一方、前縁から $x/c=0.15$ より下流の広い範囲でRSSが高いことがわかる。これらは、剥離した流れが下流まで再付着しなかったこと、運動量交換が盛んに行われ、流れの剥離せん断層が乱流遷移したことをそれぞれ示唆している。柔軟膜翼の平均流れ場より、剛体翼と比較して逆流領域が減少したことが分かる。これは膜面が振動することで、剥離領域が抑えられ、揚力係数が増加したことに対応する。RSS分布図より、前縁から $x/c=0.17\sim 0.4$ でRSSが高いこと、前縁から $x/c=0.5$ にかけて翼近傍でRSSが低いこと、 $x/c=0.5$ 付近でRSSが正であることが分かる。これらは、せん断層の不安定性により速度が大きく変動していること、剥離した流れがこの領域において再付着しなかったこと、運動量交換によって剥離せん断層が乱流に遷移し再付着したことをそれぞれ示唆している。また、剛体翼、柔軟膜翼ともに、前縁部でRSSの符号が変化する点があり、この点は翼の前縁で巻き上げられた流れが運動量交換を経て主流垂直方向速度が反転することに起因すると考えられる。

以上は、柔軟膜翼を利用した受動変形による空力特性の変化について調べた。もう一つは誘電エラストマーによる柔軟膜のアクティブ制御である。その成果は、柔軟膜の予ひずみが誘電エラストマー翼に与える影響を調査した。特に電圧により予ひずみを変化させて、その際の膜の変形量をデジタル画像相関法を用いて計測し、空力特性との関係性を調査し、アクティブ制御の有効性を確認している。

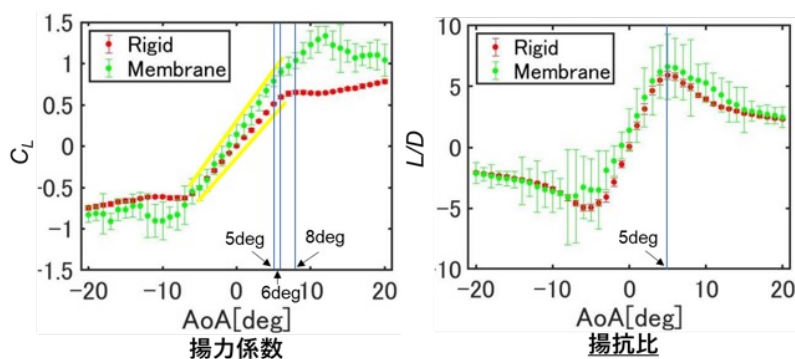


図4 空力特性の比較

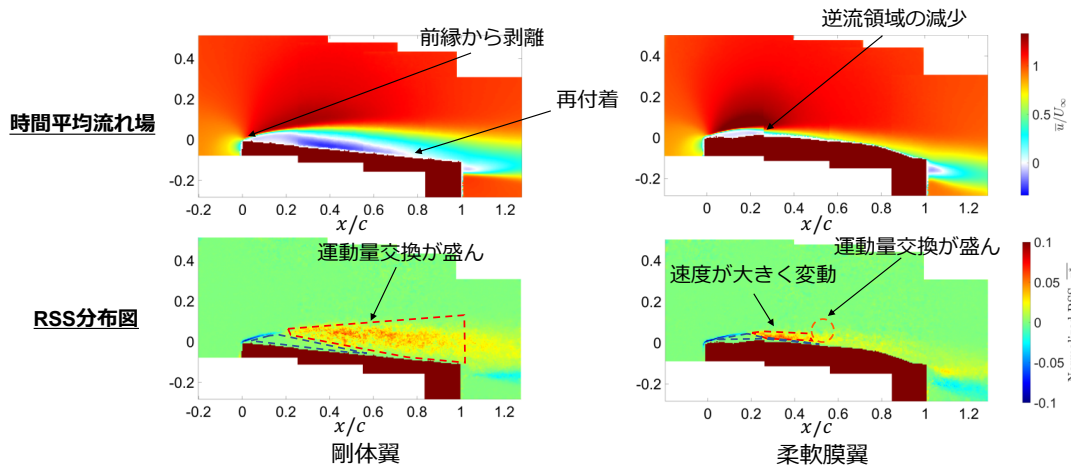


図5 時間平均流れ場とレイノルズせん断応力分布の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小林達矢, 藤田昂志, 永井大樹	4. 巻 -
2. 論文標題 誘電エラストマ-アクチュエータ型柔軟膜翼における予ひずみと膜厚の空力特性への影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第54回流体力学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井大樹, 山本健太郎, 伊神翼, 大川真生, 藤田昂志	4. 巻 -
2. 論文標題 低レイノルズ数における柔軟膜翼の非正常流れ場解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第54回流体力学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haruka Kurahashi, Kentaro Yamamoto, Masaki Okawa, Tsubasa Ikami, Koichi Takahashi, Hiroki Nagai	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Oscillation of Flexible-membrane Wing on Flow Field at Low Reynolds Number	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Nineteenth International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuya Kobayashi, Koji Fujita, Keisuke Otsuka, Hiroki Nagai	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Pre-strain on Dielectric Elastomer Actuator Wing at Low Reynolds Number	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuya Kobayashi, Koji Fujita, Keisuke Otsuka, Hiroki Nagai	4. 巻 -
2. 論文標題 Unsteady Characteristics of Membrane Wing Applied Dielectric Elastomer Actuator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Nineteenth International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Nagai	4. 巻 -
2. 論文標題 A new way to explore Mars with a micro-size airplane in the sky -Mars Shot PLUS-	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 33rd International Symposiums on Space Technology and Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirotō TANAKA, Tsubasa IKAMI, Kohei SONE, Yudai HAMASHIMA, Kento KANEKO, Kazuma YOMO, Tatsuya KOBAYASHI, Masaki OKAWA, Koji FUJITA, Hiroki NAGAI	4. 巻 -
2. 論文標題 Deployable Micro-Mars Airplane Stowed in 1U Cubesat	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 33rd International Symposiums on Space Technology and Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中寛人, 伊神翼, 曾根航平, 濱島優大, 武田浩平, 金子賢人, 四方一真, 松原幸世, 小林達矢, 大川真生, 藤田昂志, 永井大樹	4. 巻 -
2. 論文標題 1Uのキューブサットから展開する超小型火星飛行機概念設計及び火星までの軌道設計	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第65回宇宙科学技術連合講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kentaro Yamamoto, Tsubasa Ikami, Koichi Takahashi, Koji Fujita, Hiroki Nagai	4. 巻 -
2. 論文標題 Unsteady Flow Field around Flexible-membrane Wing at Low Reynolds Number	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 18th International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山本健太郎, 伊神翼, 高橋幸一, 藤田昂志, 永井大樹	4. 巻 -
2. 論文標題 低レイノルズ数における柔軟膜翼の非定常流れ場のPIV解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第53回流体力学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李本茂, 藤田昂志, 永井大樹	4. 巻 -
2. 論文標題 展開式膜翼を用いた超小型火星飛行機概念検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会北部支部2021年講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小林達矢, 藤田昂志, 永井大樹	4. 巻 -
2. 論文標題 誘電エラストマアクチュエータを用いた膜翼による空力特性の向上に関する基礎研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会北部支部2021年講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山本健太郎, 李本茂, 藤田昂志, 永井大樹	4. 巻 -
2. 論文標題 超小型飛行機のための柔軟膜翼の空力特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会北部支部2021年講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 小林達矢, 藤田昂志, 永井大樹
2. 発表標題 誘電エラストマーアクチュエータ型柔軟膜翼における予ひずみと膜厚の空力特性への影響
3. 学会等名 第54回流体力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永井大樹, 山本健太郎, 伊神翼, 大川真生, 藤田昂志
2. 発表標題 低レイノルズ数における柔軟膜翼の非定常流れ場解析
3. 学会等名 第54回流体力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haruka Kurahashi, Kentaro Yamamoto, Masaki Okawa, Tsubasa Ikami, Koichi Takahashi, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Effects of Oscillation of Flexible-membrane Wing on Flow Field at Low Reynolds Number
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuya Kobayashi, Koji Fujita, Keisuke Otsuka, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Effect of Pre-strain on Dielectric Elastomer Actuator Wing at Low Reynolds Number
3. 学会等名 The 2022 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉橋晴香, 大川真生, 伊神翼, 高橋幸一, 永井大樹
2. 発表標題 低レイノルズ数における柔軟膜翼周りの非定常流れ場
3. 学会等名 2022年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuya Kobayashi, Koji Fujita, Keisuke Otsuka, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Unsteady Characteristics of Membrane Wing Applied Dielectric Elastomer Actuator
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Nagai
2. 発表標題 A new way to explore Mars with a micro-size airplane in the sky -Mars Shot PLUS-
3. 学会等名 33rd International Symposiums on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroto TANAKA, Tsubasa IKAMI, Kohei SONE, Yudai HAMASHIMA, Kento KANEKO, Kazuma YOMO, Tatsuya KOBAYASHI, Masaki OKAWA, Koji FUJITA, Hiroki NAGAI
2. 発表標題 Deployable Micro-Mars Airplane Stowed in 1U Cubesat
3. 学会等名 33rd International Symposiums on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中寛人, 伊神翼, 曾根航平, 濱島優大, 武田浩平, 金子賢人, 四方一真, 松原幸世, 小林達矢, 大川真生, 藤田昂志, 永井大樹
2. 発表標題 1Uのキューブサットから展開する超小型火星飛行機の概念設計及び火星までの軌道設計
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Yamamoto, Tsubasa Ikami, KoichiTakahashi, Koji Fujita, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Unsteady Flow Field around Flexible-membrane Wing at Low Reynolds Number
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本健太郎, 伊神翼, 高橋幸一, 藤田昂志, 永井大樹
2. 発表標題 低レイノルズ数における柔軟膜翼の非定常流れ場のPIV解析
3. 学会等名 第53回流体力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李本茂, 藤田昂志, 永井大樹
2. 発表標題 展開式膜翼を用いた超小型火星飛行機概念検討
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2021年講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林達矢, 藤田昂志, 永井大樹
2. 発表標題 誘電エラストマアクチュエータを用いた膜翼による空力特性の向上に関する基礎研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2021年講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本健太郎, 李本茂, 藤田昂志, 永井大樹
2. 発表標題 超小型飛行機のための柔軟膜翼の空力特性
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2021年講演会
4. 発表年 2021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
研究 分担 者	藤田 昂志 (Fujita Koji) (80774471)	東北大学・流体科学研究所・助教 (11301)	

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