

第30回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要書(3ページ以内)

1. 作品情報・応募者情報

作品名 (20文字以内) 火星縦孔探査プロジェクト「HOTARU」
副題 (自由記入) 火星探査 UAV 及び複数 CanSat による連携探査ミッションの検討
学校名 東北大学大学院, 大分大学, 弘前大学, 慶應義塾大学

2. ミッションの概要 (プレスリリース等で使用するので, 200 字程度でわかりやすく表現して下さい.)

火星の縦孔の発見によって生命の痕跡探査など, 地下空洞探査の意義・重要性が高まる中, 自律移動する複数ローバを用いた火星縦孔の探査手法は, 単機ローバの場合よりも広い探査範囲と高いローバスタ性が期待できる. また, 月面と異なり, 火星では飛行することが可能であるため, 比較的縦孔に到達しやすい. そこで本研究では, 探査範囲の拡張及び縦孔へのアプローチの方法として飛行型探査機及び複数の小型探査ローバによる連携探査を目標として開発を行った.

3. ミッションの目的と意義 (目的・重要性・技術的/社会的意義等)

(a)目的 本ミッションは UAV を用いた縦孔へのアプローチ手法の確立と, LiDAR を搭載した複数 CanSat による Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を用いた火星縦孔内部の環境地図作成・探査を目的としている. 火星には若干の大気が存在していることを利用し, 着地点から縦孔まで UAV を用いて複数の CanSat を運ぶことで, 探査範囲の拡張及び 1 機故障時の探査継続を可能にする.
(b)重要性・技術的, 社会的意義等 月や火星で縦孔が発見されて以来, 縦孔や地下空洞の探査及びその科学的意義が注目を集めている. 中でも火星の縦孔では地表と違って外部の影響を受けにくく, 特にアルシア山付近は共に火星の 1 年のうち 1-2 週間ほど液層の水が存在しうる可能性が高いことが報告されており, 生命探査の重要候補地である. 現在, 月における縦孔探査は様々な手法が検討されているが, 火星は未だに目立った探査方法が示されていない. しかし, 月とは異なり, 火星には若干の大気が存在するため, 着陸地点から縦孔まで Unmanned Aerial Vehicle(UAV)などの飛行型探査機を用いて容易に CanSat を運ぶことができると考えられる. UAV と CanSat を用いた新たな探査手法を検討・確立することで容易に, かつ低コストで縦孔探査を実現することができ, 将来の火星探査及び有人火星探査に向けて重要な意義があるといえる.

4. ミッションの具体的な内容

(a)システム 本ミッションでは以下の 3 つを提案する 1.火星縦孔探査ミッションプロジェクト「HOTARU」 2.縦孔探査用 小型ローバ CanSat 3.CanSat 運搬及び探査用 UAV 今回のミッションの目的は, 火星において縦孔が集中して分布しているアルシア山付近の縦孔の探査であり, CanSat を積載した UAV での縦孔へのアプローチ及び複数の CanSat を用いた縦孔内部での SLAM を実施する. 打ち上げや軌道に関しては, 太陽活動極大期に弾道捕獲を導入した軌道で打ち上げることで, 観測器機への放射線の影響を減らし, 燃料を 25%節約することができる. ミッション期間は春～夏を想定するため, 2025 年の 7 月か 8 月の打ち上げが最適と考えられる. また, 縦孔が集中しているアルシア山付近は険しい地形であることが想定されるため, オリンポス山付近の比較的平坦な地点に着陸し, メインローバである程度まで縦孔へ近づく. その後, CanSat を積載した火星探査 UAV での縦孔へのアプローチを試みる. 縦孔へ接近した後, UAV より CanSat を投下, 縦穴底部到達後, 複数の CanSat での SLAM を行う. この間, メインローバと UAV はそれぞれ独自にリム等縦孔周辺の探査を行う.
(b)具体的な実現方法, もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

本プロジェクトで開発する CanSat(Fig.1)及び火星探査 UAV(Fig.2)を以下に示す。CanSat は車輪直径 150 mm, 機体の幅280 mmの円筒形をしている。弾力性及び柔軟性に優れている TPU 特殊素材を用いた 3D プリント部品タイヤ及び, CFRP で本体部分が構成されており, 自己位置推定及び環境地図作成のため 2D LiDAR を搭載している。本プロジェクトでは, CanSat 複数機を用いた探査を実施することで, 探査範囲の拡張及び1機故障時の探査続行を実現しつつ, 縦孔及び地下空洞内の環境地図を作成することで内部詳細把握を目指す。また, CanSat を運搬する UAV は NASA Ingenuity で用いられている二重反転方式とは異なった交差反転方式を採用した全く新しいものを検討した。二重反転方式よりも交差反転方式の方が気流の干渉軽減を期待でき, 人が乗る実機では主に山岳地帯での林業等に活用されることから, 薄い大気の火星での飛行性能向上が期待できるため, 交差反転方式の UAV を検討した。



Fig.1 CanSat の外観



Fig.2 火星探査 UAV の外観

本プロジェクトでは CanSat 実機及び火星探査 UAV 本機を開発した。Fig.3 及び Fig.4 に作成したモデルの写真を示す。



Fig.3 開発した火星探査 UAV 実機



Fig.4 開発した CanSat

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a)主張したい本ミッションの独創性

- ・火星縦孔複数探査を想定した 2DLidar 搭載した CanSat を開発したこと
- ・縦孔底面着陸時の衝撃吸収を想定して, 落下衝撃シミュレーションを実施し, 文献を参考に最適化構造の CanSat タイヤを設計したこと
- ・火星に大気が存在していることを活用し, UAV を用いた CanSat 運搬を考案したこと
- ・UAV として NASA Ingenuity の採用している二重反転方式とは全く異なった, 交差反転方式を採用し, 基礎実験予備及び流体解析によりその有用性を示しつつ, モデル機体を作成したこと
- ・可能な限り実現性の高いミッションを想定することで, 未来の有人火星探査につながるような実験を想定したこと

(b)得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

この火星縦孔探査プロジェクトは NASA の Ingenuity の成功を受け、これまでの火星探査の範囲を飛躍的に向上させることを想定したものである。中でも縦孔に限定したのには、科学的意義と技術的意義が大きいからである。科学的意義として、縦孔は地表とは異なり、保存状態が良いため、生命の痕跡探査、火星の歴史を解明、水の発見、メタンガスなどの帰還用燃料発見などにつながる可能性がある。また、技術的意義として、新たな飛行方式の UAV を考案することで、火星での飛行探査をより発展させることができ、複数 CanSat による広範囲探査を実現することで探査範囲を飛躍的に向上させることにつながる。

私たちが月の縦孔に関して様々な探査手法が検討されている中、敢えて火星縦孔を探査対象としたのは、今までに探査されていないという理由だけでなく、縦孔まで到達するという観点から見ると月よりも火星の方が実現可能性は高いといえるからである。

以上

第30回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

火星縦孔及び地下空洞探査プロジェクト 「HOTARU」 火星探査 UAV 及び CanSat を用いた連携探査と SLAM の検討

東北大学大学院, 大分大学, 弘前大学, 慶應義塾大学

阿依 ダニシ, 佐藤 海斗, 安田 伊吹, 館岡 佳蓮

1. 序論

1-1. 縦孔の詳細

近年, 月探査機かぐやの地形カメラや Mars Reconnaissance Orbiter の HiRISE によって Fig.1 のような月・火星で複数の縦孔が発見され, 注目を集めている. 日本でも, 将来の火星縦孔探査を見据え, JAXA 主導の UZUME 計画で月の縦孔及び地下空洞について, その探査手法が検討されている. これらの縦孔には底部に広大な地下空洞が広がっていると推定されるものも少なくない^[1]. 地下空洞は, 放射線や隕石等から防護されたシェルターであり, 地質学や生命科学等, 理学的に探査すべき要素の多い場所である. また, 将来の有人火星探査, 火星居住のための居住空間としても, 縦孔及び地下空洞は重要な候補地と考えられる^[1].

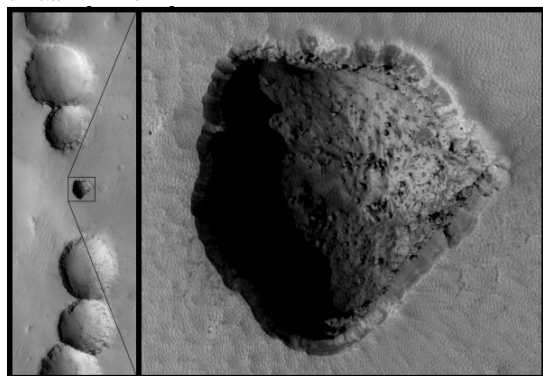


Fig.1 HiRISE で撮像された火星の縦孔(100m サイズ)の例 (Annie) ^[2]

1-2. 縦孔探査の意義

月や火星の縦孔は内部形状が険しいものであると推定されているが, その詳細をまだ把握できていない. また, 月の縦孔に関しては, 様々な探査方法が検討されているが, 火星についてはその探査方法だけでなく, 縦孔までのアプローチ手法も十分に検討されていない. 火星において, 縦孔が集中しているアルシア山付近では, 1年のうち 1-2 週間ほどの期間, 液層の水が存在している可能性が高いことから, 生命探査の重要候補地と考えられる^{[3][4]}. 以上を踏まえて, 火星の縦孔及び地下空洞内の環境地図を作成することで, 将来の火星縦孔探査に大きく貢献するだ

けでなく, 将来の有人火星探査や火星居住実現にも大きく寄与できると期待される.

1-3. 将来的な探査に関して

本ミッションでは, 火星探査 UAV と複数の小型探査機での連携探査が可能であることを示すことができるため, 将来的な探査範囲の拡張が示唆できる. また, 火星有人探査や火星居住の実現に役立てられ, メタンガス等現地での燃料調達も期待できる.

2. ミッション概要

2-1. ミッション内容

本ミッションは UAV と複数の CanSat の連携による縦孔へのアプローチ手法の確立と, LiDAR を搭載した CanSat による Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を用いた火星縦孔内部の環境地図作成を目的としている. 火星には若干の大気が存在していることを利用し, 着地点から縦孔まで UAV を用いて複数の CanSat を運ぶことで, 探査範囲の拡張及び 1 機故障時の探査継続を可能にする.

打ち上げや軌道に関して, 太陽活動極大期に弾道捕獲を導入した軌道で打ち上げることで, 観測器機への放射線の影響を減らし, 燃料を 25%節約することができる^[5]. ミッション期間は春～夏を想定するため, 2025 年の 7 月か 8 月の打ち上げが最適と考えられる. また, 縦孔が集中しているアルシア山付近は険しい地形であることが想定される^[6]ため, オリンポス山付近の比較的平坦な地点に着陸し, メインローバである程度まで縦孔へ近づく. その後, CanSat を積載した火星探査 UAV での縦孔へのアプローチを試みる. 縦孔へ接近した後, UAV より CanSat を投下, 複数の CanSat での SLAM を行う. この間, メインローバと UAV はそれぞれ独自にリム等縦孔周辺の探査を行う.

2-2. ミッション要求

本ミッションの流れ及び, サクセスクライテリアは以下の通りである.

ミッションの流れ

①火星に向け, 打ち上げ (詳細略)

- ②アルシア山またはエリシウム山付近への着陸
- ③縦孔へアプローチ:ある程度の距離までメインローバで近づき,以降は火星探査 UAV で CanSat を運搬
- ④縦孔へ CanSat を降下
- ⑤複数 CanSat での自己位置推定及び環境地図作成
- ⑥火星探査 UAV とメインローバによるリム等, 縦孔周辺の表面探査

サクセスクライテリア

- ミニマムサクセス

CanSat を UAV に搭載して縦孔に近づき, 透過することで縦孔底部に到着する

- フルサクセス
- 自己位置推定及び内部構造を調べられること
- アドバンスドサクセス
- 縦穴内部を複数機で群探査, ほぼ全体を把握

3. CanSat 詳細

3-1. 機体諸言

本ミッションで用いる CanSat の外観を Fig.2 に, 主要寸法と断面図を Fig.3 に示す. 車輪の直径は150 mm, 機体の幅は 310mm の円筒型をしている. CanSat は縦穴底部に投下することを想定し, 弾性が高く, 火星でも活用できる素材を採用する. また, この弾性の高いタイヤを再現するため試験機体では TPU 樹脂によるタイヤ製作を検討した.

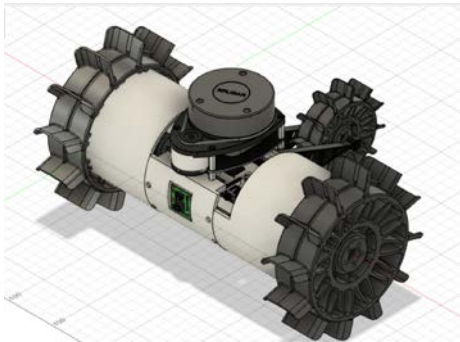


Fig2. CanSat の外観

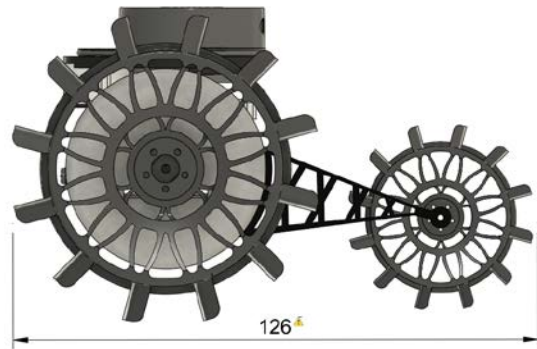
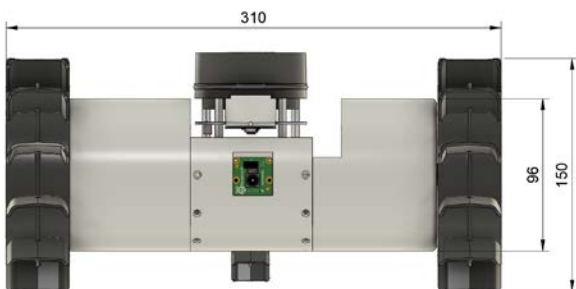


Fig3. CanSat の主要寸法と断面図

3-2. タイヤについて

本プロジェクトでは, 縦孔内部にローバを投下もしくは急な坂を降下する関係上, ローバのタイヤは機体を衝撃力から保護する重要なパーツである. また, 縦穴内部の環境は詳細に把握できておらず, 様々な障害物が存在すると考えられる. これを受け, 落下時の衝撃及び斜面などでの走破性を考慮してタイヤを設計した.

3-2-1. タイヤ径の設定

本機体を 4 輪や 6 輪ではなく 2 輪にした理由は, 機体の質量を減らし, 駆動性をあげるためである. また, 生産過程を縮小し, コストを削減することができる. 今回作成した CanSat とほぼ同じ大きさのローバで実験している文献^[7]を参考に, タイヤの直径は 150mm を採用した. この文献における実験結果によると直径 150mm のタイヤが最適とされており, 120mm では傾斜 15° までの坂しか上れず, 180mm では 150mm のときと同様に 22.5° の坂を上ることができるが, このときのスリップ率が 150mm のときよりも大きいと示されている. グラウザに関しては, 2.5cm を採用した. 実験により, グラウザを長くした方がスリップ率を下げるからである. 以下に理論的な設計の検討を示す. スリップ率 x は,

$$x = \begin{cases} \frac{(r+h)\omega - v}{(r+h)\omega} & (r\omega + h\omega \geq v, 0 \leq s \\ \leq 1) \frac{(r+h)\omega - v}{v} & (r\omega + h\omega \geq v, -1 \leq s \leq 1) \end{cases}$$

と求めることができる. ただし, r [cm] はタイヤの半径, h [cm] はグラウザの長さ, ω [rad/s] は角速度, v [m/s] は移動速度である. ここに今回の機体の条件を加え, 検討した結果, $x=20\%$, $h=2.5$ と導き出された.

3-2-2. タイヤの落下衝撃シミュレーション

CanSat の衝撃シミュレーションには,

Autodesk Fusion360 の動的イベントシミュレーションを用いた、シミュレーションを行うにあたり、タイヤを鋼鉄ブロックに衝突させるという条件を設定した。タイヤの材料を ABS 樹脂、地面の材質を鋼鉄に設定し、材料の物性値は Autodesk Fusion360 ライブラリのものを使用した。落下姿勢は Fig.4 のように一番変形が起こると推測される、2 枚のグラウザの中間が最も低い位置となるように設定した。

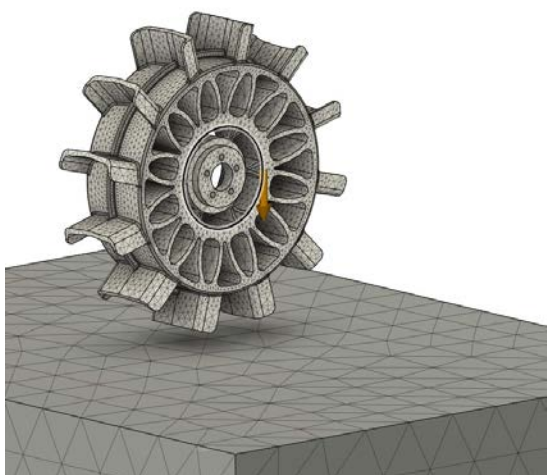


Fig.4 今回設計したタイヤ及び地面

続いて、火星におけるタイヤの落下速度について、火星の重力は 3.71m/s^2 、堅穴の深さを 100m と仮定して以下の式から推定を行った^[8]

$$v = 2gh = 23.71100 \\ = 27.24$$

以上の結果より、タイヤの落下速度を 27.24m/s と設定した。シミュレーション結果として、Fig.5 のように変形が起こることが示された。また、衝突時の応力分布から、衝突時にタイヤの内部形状がクッションの役割を果たすことによってタイヤ自体は変形しつつ力を分散させることができている。しかし、グラウザ自体は座屈しており、着地時に破壊がおこる可能性がある。また、グラウザ根元部分に応力集中しているため、クラックが入る可能性があることがシミュレーションにより示唆された。そこで、シミュレーションで使用した ABS 樹脂に代わり、TPU 樹脂（熱可塑性ポリウレタン）を試験的に使用した。TPU 樹脂は、耐摩耗性、耐屈曲性、耐油性に優れる材料であり、加工性もよいことから試験的に使用するうえで性能を素早く検証することができ、地面衝突時の衝撃に耐えることができるものと考えた。



Fig5. タイヤ落下シミュレーション

3-3. バッテリーの検討

本ミッションでは、縦孔の調査を対象としているため計測機器、保温機器及びアクチュエータを駆動させるためにバッテリーの選定は大変重要である。縦孔という特性上太陽光が全く届かず、気温も火星の最低気温である -120°C ^[9] に近い環境であると予想するため太陽電池や 2 次電池を用いることは難しいと考えた。電子機器を動作させるためには -40°C 以上を保つ必要があり、バッテリーに関しては二次電池を用いる場合は -40°C を、再生型燃料電池を用いる場合は 0°C 以上を保つ必要がある^[10]。そのため、一次電池や二次電池と比較して大きな電力を長期間にわたって供給することができ、小型化も実現できる原子力電池を搭載することが理想的であると考えられる。しかし、縦孔にローバを投下するフェーズで電池が破損する可能性があり、惑星等保護の観点から実際に搭載することは難しい。以上より、現段階で搭載することのできる電池は一次電池もしくは、充電を行わない二次電池であり、投下されてから限られた時間内での運用を前提とすることが適当であると結論づける。

3-4. LiDAR センシング、複数探査

本ミッションでは、火星縦孔内部の環境地図を作成するために LiDAR による SLAM を用いる。SLAM は GPS などの衛星システムに依存せずに環境地図の作成と自己位置の推定ができるため、低コスト化だけでなく、高い汎用性が期待できる^[11]。SLAM に用いるセンサーは ToF やカメラなど様々あるが、縦孔内部は画像によるセンシングが難しいことや非常に高い精度で物体までの距離が計測できることから、LiDAR を採用した^[11]。また、より低コストで環境地図を作成することを目的として、2D の LiDAR SLAM を採用した。LiDAR により作成された環境地図の例を以下の図に示す^[11]。

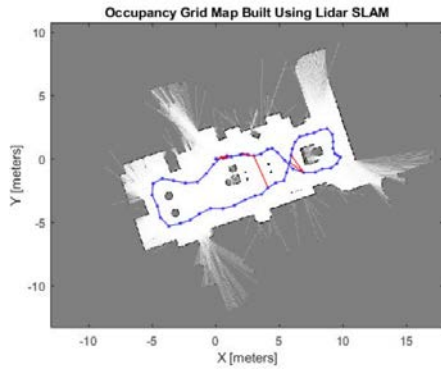


Fig.6 2D LiDAR による LiDAR SLAM の例

初期位置が不明である場合、CanSat の姿勢は異なる座標系 $\{G_1\}$ と $\{G_2\}$ にある Fig.7^[12]. LiDAR による自己位置推定では、全てのロボットの姿勢を一つの座標系で表現し、各 CanSat の位置を常時把握する Fig.8^[10]. 異なる座標系にある CanSat が自己位置を推定するために、複数の CanSat で共通の目標物を LiDAR により捉え、以下の式によって複数の CanSat を共通の座標系に落とし込むことで自己位置を推定する。ただし、式中の各項は CanSat の相対位置である。

$$b_{12} = x_t^1 \oplus (z_{12} \oplus (-x_t^2))$$

複数の CanSat の姿勢を共通の座標系に落とし込むための共通の目標物として、縦孔内の岩を想定している Fig.9^[12].

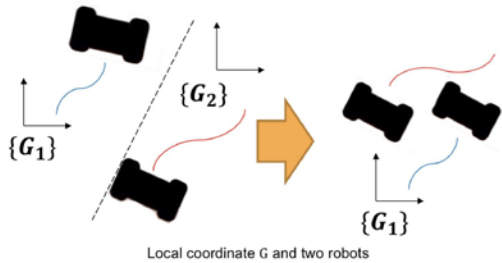


Fig.7 異なる 2 機の CanSat 座標系の統一を目指す

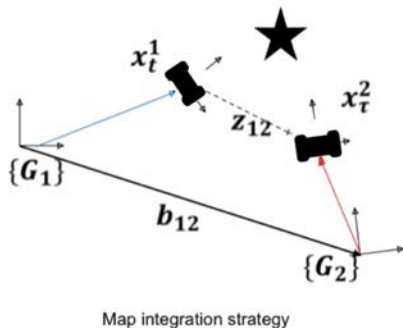


Fig.8 CanSat 座標系の統一方法

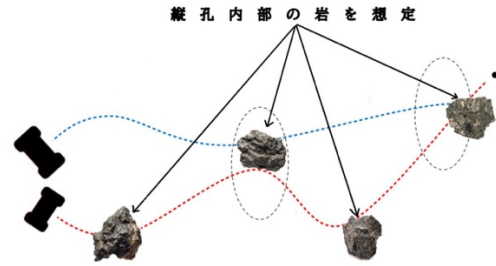


Fig.9 座標統一を用いた複数機による探査

複数機での探査について、これまで縦孔探査をターゲットにした CanSat による様々な手法が提起されているが、これまでの地球上における模擬実験により、予想以上に探査が困難であることが明らかとなった。例えば、縦孔の形状は頭上から把握するのが難しく、また、内部に光が差し込まないため、画像によるセンシングは難しい。そこで、探査範囲の拡張及び 1 機故障時の探査継続のため複数の CanSat を用いた探査を検討した。

3-5. 実験と検証結果

Fig.10 に実験の様子と LiDAR から得られたスキャン画面を示す。実験は大分県臼杵市の赤猫洞で行い、洞窟内での LiDAR を用いたマッピングの有用性を検証した。Fig.10 のように実際に LiDAR を搭載したローバを防空壕内にて動作させたところ、赤い点群で構成される内部地形を取得することができた。しかし、2D-LiDAR のみでは取得の難しい崖や地面のくぼみ等に把握・対応するためには、高光度ライトやカメラ、加速度センサー等複数のセンサーや装置を搭載するのが望ましいことが明らかとなった。



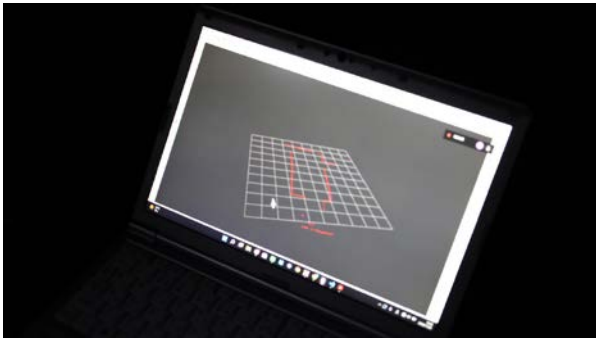


Fig.10 実験の様子と LiDAR でのスキャン画面

4. UAV 詳細

NASA の開発した Ingenuity が火星での初飛行を成功させたのは 2021 年であり, まだ新しい「火星での飛行」という分野では, さまざまな飛行型探査機の案が出されている. これを受け, 全く新しい火星探査 UAV に挑戦することで, CanSat を搭載して火星で飛行することを目指した. この新しい UAV は, Ingenuity が採用している二重反転方式とは異なる交差反転方式を採用している.

4-1. 機体諸元

Fig.11 に実際に開発した UAV を Fig.11 に CanSat を搭載した場合の概略図を示す



Fig.11 開発した火星探査 UAV

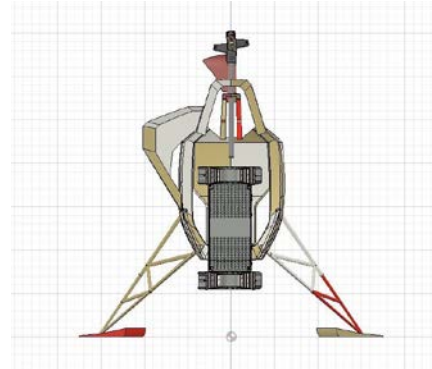


Fig.12 CanSat 搭載時の UAV 断面図

機体の高さは280 mm, 幅350 mm, 長さ350 mm, ブレード長さ700 mm であり, 今回は実験のため地球上を想定したヘリを開発することに留め, 実際に火星で飛行するものに比べ比較的小さい機体となっている. CanSat を本体内部に格納して飛行し, CanSat 投下後は周辺探査を実施する. NASA の Ingenuity は, 機体重量 1.8 kg 以下, ブレード長さ 1.21 m であり^[13], 実際にはこのデモ機体よりも大きなものになると推定される.

4-2. 流体解析による交差反転方式の検討

交差反転方式を採用した実機ヘリコプターは林業や山岳地帯への荷物運搬など特殊な用途に多く用いられている. 山岳地帯での飛行や運搬荷重などを見ると, 過酷な環境での飛行に適しており, 火星での飛行が期待できる. そこで, 実際の実用性を確かめるため揚力測定実験や CFD 解析を実施した. 交差反転方式の CFD 解析は Moving Overset Grid method で実現できる^[14]. 文献^[14]によると, この解析方法を用いた交差反転方式のシミュレーション結果として, ブレードに対する荷重の周期的変化が翼の枚数と一致していること, 翼-渦, 渦-渦などの干渉が存在していること, シャフト自体が揚力に影響を与えないことなどが示されていた. また, この解析結果をもとに作成された機体では, 高いホバリング効率を示したとも述べている. Fig.13,14

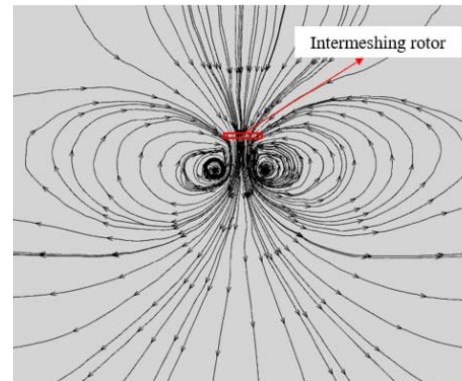
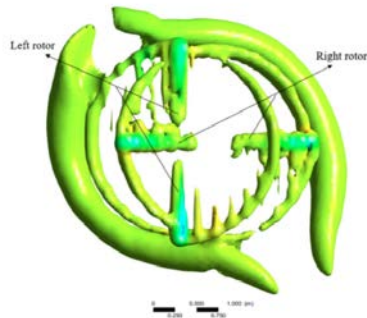


Fig.13 交差反転ロータの上下方向の流線図



(b)Top view

Fig.14 ホバリング時の交差反転ロータの渦度大きさ

4-3. 翼の検討

火星での飛行は、低レイノルズ数と高い亜音速マッハ数で行われる。よって、地球上で用いられている翼型では層状剥離を起こし、再接着しないため、抗力が著しく増大する。鋭い前縁を持つ薄い翼を採用することで、非常に低いレイノルズ数では、非定常渦の脱落により、従来の翼に比べて実際に性能が向上することが確認されている^[15]。また、火星の大気は密度が低いいため、空気力学の観点からはより低い剛性が要求される。文献によれば、炭素繊維、発泡コア、アルミニウム製のロータを使用することで、十分な制御性と剛性が得られることが示されている^[16]。また、CAMRAD II、NDARCを用いて翼全体を設計することができるが示されている。

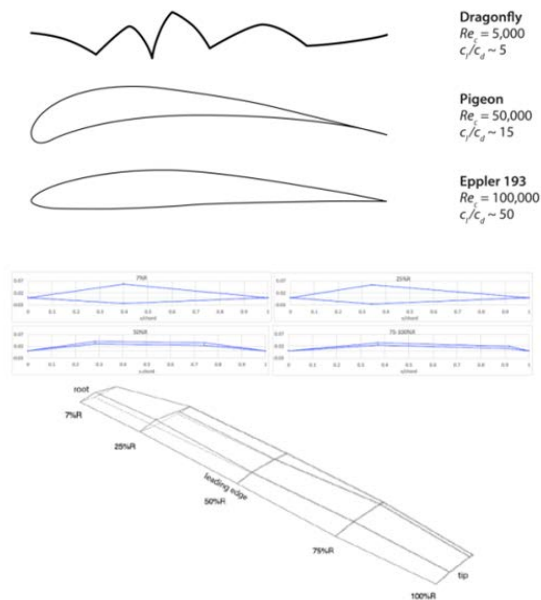


Fig.15 提案された翼型及び、その全体形状

4-4. 二重反転及び交差反転方式の比較検討

交差反転方式及び二重反転方式を比較検討するため、基礎実験装置を開発した。

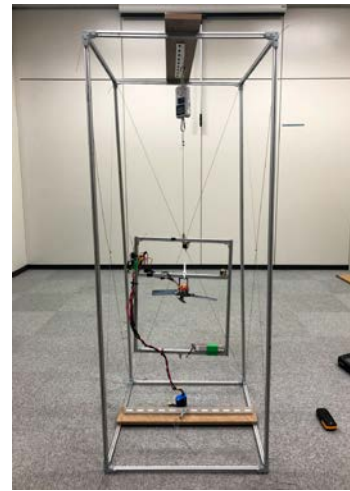
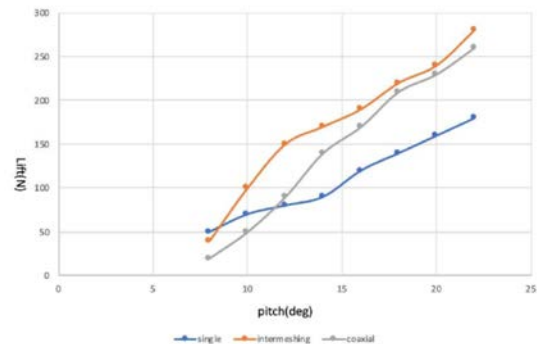


Fig.16 揚力測定実験

ブレードに関しては実験装置の関係上、10cmのものを用いている。また、火星ように最適化したブレードは制作が困難であり、仮に作れたとしても真空チャンバー等の環境下でなければ正確な実験ができない。これを踏まえ、仮実験としてNACA0006を用いている。実験においてはピッチ角、回転数、消費電力等及びバネ測りにより揚力を測定し、二重反転方式との比較検討を行った。



灰色：二重反転 橙：交差反転 青：シングル

Fig.17 ピッチ角と揚力の関係

ピッチ角の増加に伴い、交差反転方式の揚力が二重反転方式よりも優れた結果を示している

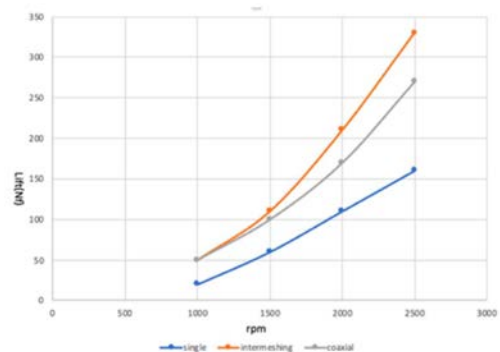


Fig.18 回転数と揚力の関係

回転数増加に伴い交差反転方式の方がより揚力を生み出している。結果として、この実験では交差反転方式の方がより揚力を生み出すという結果になり、火星探査に向いていると示された。しかしながら、より実際の機体に反映させるためには、交差反転方式及び二重反転方式それぞれの最適ブレードを用いて、火星環境を作り出せる真空チャンバーで実験する必要がある。また、実際の機体制作によって明らかとなる問題点も解決していかなければならない。よって交差反転方式は将来的に火星で用いることができる可能性があるが、さらなる研究が必要である[17]。

4-4. マッピング, 投下

安定した3次元測量技術は本ミッションに欠かせないため、ウェアラブルカメラを搭載した測量実験を行った。測量実験は火星の縦穴を想定して石灰岩が雨水などにより浸食されてできた鉢型の地形であるドリネ形状が確認できるところで実施した。Fig.19に測量結果を示す。この3次元測量を活用し、CanSatを搭載して縦孔まで向かい、内部にCanSatを投下する。

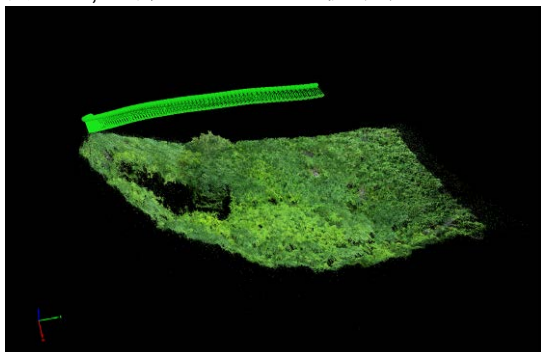


Fig.19 UAVを用いたドリネでの三次元測量

5. まとめ

本プロジェクトでは火星探査UAVによって複数CanSatを縦孔まで運び、群探査することを提案した。CanSatを開発して実験し、火星探査UAVのモデルを作成、揚力測定実験を実施したことにより様々なことが明らかとなった。また、実際のCanSat機体を考案するには、電源系や群探査方法、通信系統などの検討が必要であり、火星探査UAVは機体開発をしたうえで、真空チャンバーで試験実施などが求められる。しかしながら、既に示した結果により、本プロジェクトのコンセプトは実現できる可能性があり、さらに検討開発を進められると考えられる。

6. 参考文献

- [1]UAV-UGVシステムによる縦孔・地下空洞の計測探査シミュレーションの検討,
https://researchmap.jp/read0178846_1171xp/published_papers/19399485/attachment_file.pdf
- [2]月,火星の縦穴と模擬形成実験
https://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2011/image/0303_plasma_proc/33.pdf
- [3]古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画
<https://www.wakusei.jp/book/pp/2020/2020-3/2020-03-115.pdf>
- [4]Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review
- [5]MELOS1 火星探査提案書ドラフト版
<http://melos.ted.isas.jaxa.jp/Missions/MELOS/>
- [6]Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology
- [7]Initial Design Characteristics, Testing and Performance Optimisation for a Lunar Exploration Micro-Rover Prototype
- [8]Mars Fact Sheet
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>
- [9] NASA Science MARS 2020 MISSION PERSEVERANCE ROVER, Mars Weather Report from Perseverance (2022/11/03 閲覧)
<https://mars.nasa.gov/mars2020/weather/>
- [10]内藤 均, 宇宙探査用電力供給技術, GS Yuasa Technical Report, 2016年12月第2号
- [11]SLAMとは?これだけは知っておきたい3つのこと
<https://jp.mathworks.com/discovery/slam.html>
- [12]A Review of Visual-LiDAR Fusion based Simultaneous Localization and Mapping
- [13]Håvard Fjær Grip, et. al. "FLIGHT DYNAMICS OF A MARS HELICOPTER", 2017
<https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/4/7584/CL%2317-3117.pdf?sequence=1>
- [14]Zeming Gao, et. al. "Numerical Simulation and Aerodynamic Investigation of the Intermeshing Rotor in Hover", ISAES 2022
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2252/1/012056/pdf>
- [15]Shannah Withrow Maser, et.al. "An Advanced Mars Helicopter Design"
https://rotorcraft.arc.nasa.gov/Publications/files/An_Advanced_Helicopter_Design_SW_ASCEN_D_final.pdf
- [16]Wayne Johnson, et.al."Mars Helicopter Conceptual Design",2020
https://rotorcraft.arc.nasa.gov/Publications/files/MSH_WJohnson_TM2020rev.pdf
- [17] Danish Ai, "Research on optimal rotor method in Mars exploration UAV"