

ACTS 報告書

提出日：2021年 12月 26日

- チーム情報

CanSat チーム名	東京工業大学 Elec. TETRA
CanSat チーム 代表者情報	大坪 恵人 all2keito@gmail.com, 080-5729-7261
UNISEC 団体名	東京工業大学 CanSat Project
UNISEC 団体 学生代表	大坪 恵人
責任教員	中条 俊大 chujo.t.aa@m.titech.ac.jp, 03-5734-3180

- メンバー

役割	名前 (学年)
PM・機体構造統括・ケーブル・パラシュート	大坪恵人 (B3)
刺しこみ	荒井湧介 (B3)
走行	尾関優作 (B3)
刺しこみ	木原遼 (B3)
走行	下岡大樹 (B3)
ケーブル・パラシュート	田代克樹 (B3)
刺しこみ	田中翔真 (B3)
ケーブル・パラシュート	塚本悠太 (B3)
電装統括・走行	林和輝 (B3)

※走行：ローバ駆動部の開発を担当

※ケーブル：ケーブル送り機構・電氣的接続の開発を担当

※刺しこみ：刺しこみ・装填機構の開発を担当

- CanSat の製作目的・大会参加理由

チーム Elec. TETRA は東京工業大学工学院機械系の学士3年のメンバーが集まったチームとなっている。私たちが ACTS2021 に参加した主な目的としては、CanSat の開発を通して実際の衛星の開発の流れを体験することを目的とした東京工業大学の講義において、ミッションの策定から製作までを行った機体を実際に投下することにある。

そのため、私たちが開発・設計を行った CanSat はミッション面や技術・システム面において強く実際の宇宙開発を意識したものであり、それに沿って行うことが目的となっている。

目次

第1章	ミッションについて	4
1.	ミッションステートメント（ミッションの意義と目的）	4
2.	ミッションシーケンス	5
第2章	サクセスクライテリア	8
第3章	要求項目の設定	12
1.	システム要求（安全確保、レギュレーションのための要求）	12
2.	ミッション要求（ミッションを実現するにあたり要求される性能）	13
第4章	システム仕様	14
1.	CanSat 外観	14
2.	CanSat 内観・機構	17
3.	システム図（CanSat 搭載計器仕様一覧）	48
4.	アルゴリズム	50
第5章	試験項目設定	54
第6章	実施試験内容	55
1.	システム要求を満たすための試験内容	55
2.	ミッション要求を満たすための試験内容	81
第7章	工程管理、ガントチャート（スプレッドシートを推奨）	111
第8章	責任教員による自己安全審査結果のまとめ	112
1.	安全基準審査	エラー! ブックマークが定義されていません。
2.	責任教員所感	エラー! ブックマークが定義されていません。

第1章 ミッションについて

1. ミッションステートメント（ミッションの意義と目的）

私たちのチームではミッションステートメントを以下のように定めた。

「火星などの天体における地中探査の手段としての電気探査システムの実証」

これまで、さまざまな観測・探査により火星には水や氷が存在すると言われている。将来的には、火星における過去の気候の調査や水や氷を資源利用することが考えられる。その際に、地中に存在する水や氷の詳細な分布を知ることは重要となる。

一方、地中探査の手法の1つとして電気探査と呼ばれるものがある。これは、地面に複数の電極を刺しこみ、設置した電極に電圧をかけて土中の比抵抗を測定することで地中の内部構造を得る手法である。この手法は、地球上で地下水の探査手段としての利用実績があり、測定範囲も数メートルから数キロメートルまでとることができる。また、測定深度をうまく選べば他の地中探査手段と比較して比較的小型で構造的な要求も少なく探査することができるというメリットも存在する。

そこで、今回は火星などの天体における地中氷分布などのデータ取得を見据えた地中探査の手段として電気探査の手法を採用する。今回の CanSat ミッションでは、想定する宇宙ミッションのシーケンスを模擬し電気探査システムの実証を目指す。

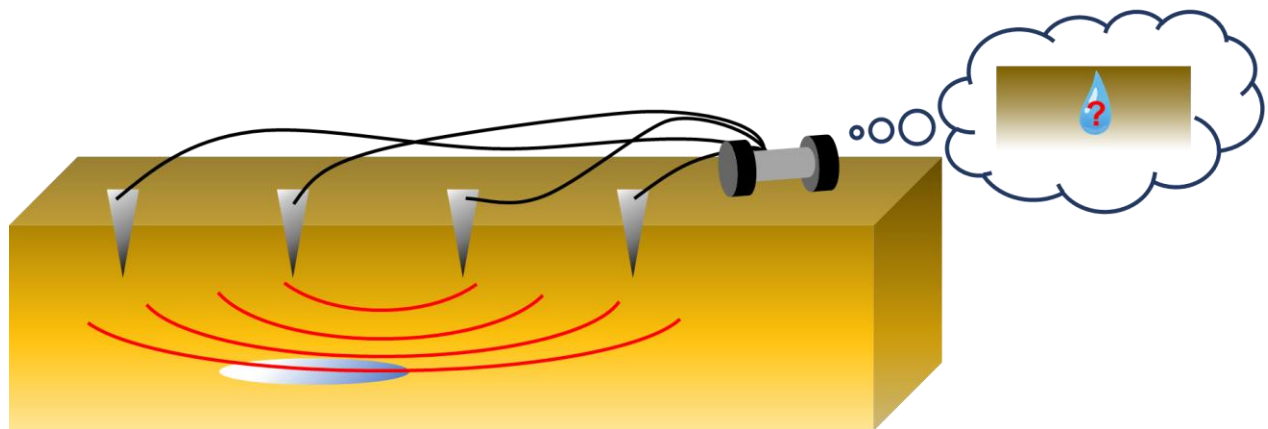


図 1-1 ミッションイメージ（電気探査）

2. ミッションシーケンス

私たちのミッションでは、火星などの天体を想定した電気探査システムの計測シーケンスを提案して、下記に示す技術的な主要部分を CanSat を用いて実証する。

CanSat ミッションにおけるシーケンスは以下の通り。シーケンス①～⑨は CanSat が自律的に行うが、シーケンス⑩⑪は人間が介入して行う。これは、比抵抗の測定には高圧の電源及び複数の電圧・電流計が必要であるが、ACTS のレギュレーションの容積・質量的に機体への搭載が困難であると判断したためである。本番では CanSat のほかに電気探査に必要な機器（鉛蓄電池・電圧計・電流計など）を持参し測定を実施する。

①キャリアから機体を放出

②パラシュートを展開し減速
(図 1-2)

③着地 (図 1-3)

④溶断機構を動作させ、パラシュートを切り離しとスタビライザの展開を同時に行う。(図 1-4)

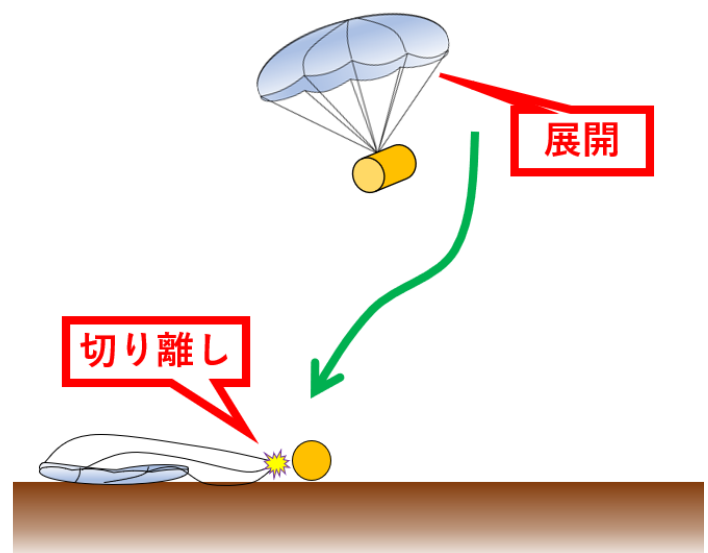


図 1-2 パラシュートの展開・切り離し

上から見た図



横から見た図



図 1-3 着地 (電気探査シーケンス開始)

⑤着地点に1本目の電極を刺しこむ (図 1-4)

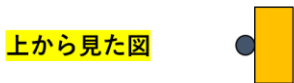


図 1-4 1 本目の電極刺しこみ

⑥フィールドのある方向に向かってケーブルを送り出しながら一定の距離だけ移動する
(図 1-5)

※フィールド内の移動距離については今回のミッションでは 10 m を目指すが、具体的な判定については第 2 章 サクセスクライテリアにて後述する。



図 1-5 移動と 1 本目のケーブル送り出し

⑦指定された範囲内に 2 本目の電極を刺しこむ (図 1-6)



図 1-6 2 本目の電極刺しこみ

⑧「フィールドのある方向に向かってケーブルを送り出しながら一定の距離だけ移動→電極を刺しこむ」をあと2回繰り返し、計4本の電極を刺しこむ(図1-7)

※刺しこむ電極の数が4本である理由は第2章 サクセスクライテリアにて後述する。

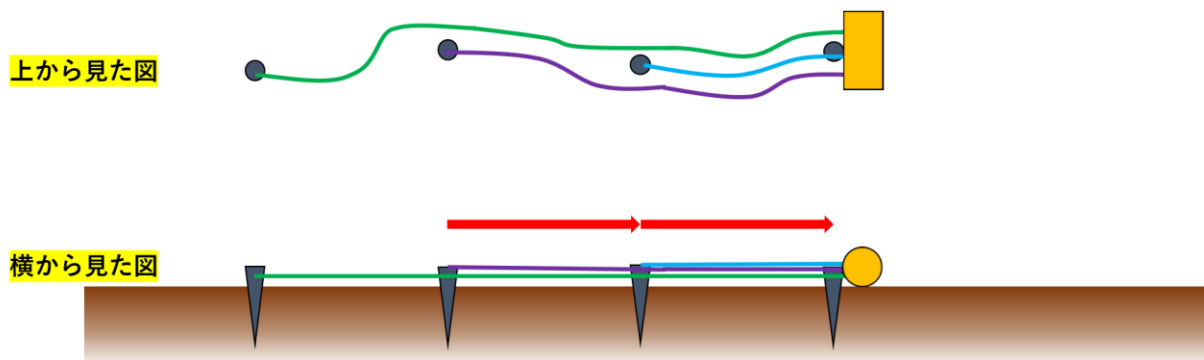


図1-7 「移動→ケーブル送り出し」の2回繰り返し

⑨機体を静止させる

⑩4本の電極を用いて電気探査を模擬し、地面の比抵抗測定を行う(図1-8)

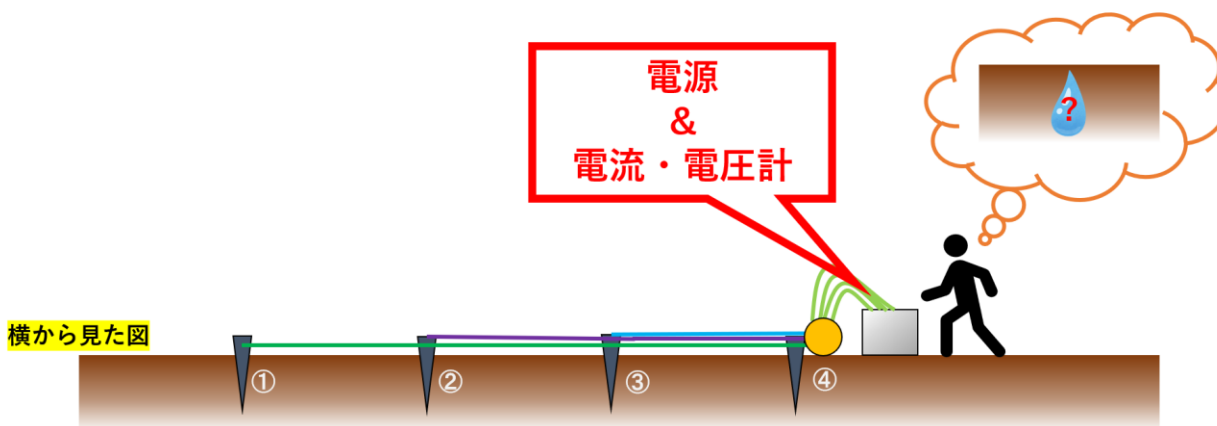


図1-8 電気探査(比抵抗の測定)

⑪ CanSatによって刺しこんだ電極の横に人間の手でより大きな電極を刺しこみ、同様に比抵抗測定を行う。

第2章 サクセスクライテリア

ミニマムサクセス	<ul style="list-style-type: none"> ● パラシュートを展開する ● パラシュートが機体から切り離されている ● スタビライザーを展開する ● 1本目の電極が刺しこまれている ● 走行している ● 1本目のケーブルが送り出されている
フルサクセス	<ul style="list-style-type: none"> ● 4本の電極が刺しこまれている ● 4本のケーブルが送り出されている ● 電気探査を行える (土の見かけ比抵抗を10%の誤差以内で測定できる)
エクストラサクセス	<ul style="list-style-type: none"> ● 4本の電極が30mmの深さまで刺しこまれている ● 電気探査に必要な距離(電極間隔10m)を走行する ● 4本の電極の相対位置精度の誤差が10%以内に収まっている ● 電極の刺しこみ角度が地面に対する法線から10°以内に収まっている

上記のサクセスクライテリアについて、各機能ごとの分類は表2-1の通り。各々の評価方法は【】内に記載した。

表2-1 サクセスクライテリアの分類及び評価方法

機能	ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
パラシュート	パラシュート展開 【目視で確認】		
	パラシュート切り離し 【目視で確認】		
ローバ駆動	スタビライザー展開 【目視で確認】		
	走行する 【着地地点とミッション終了時の地点が異なる事で判断】		電気探査に必要な直線距離(電極間隔10m)を走行する 【GPSのログおよび電極間の距離を測定(ただし、電極が刺しこまれていない場合には、電極刺しこみ動作位置の実測により判定)】
電極刺しこみ	1本目の電極刺しこみ 【電極が倒れていないことを目視で確認】	4本の電極刺しこみ 【電極が倒れていないことを目視で確認】	4本の電極が30mmの深さまで刺しこまれている

			<p>【電極の下から 30mm の距離に印をつけておき目視で確認】</p> <p>電極の刺しこみ角度が地面に対する法線から 10° 以内に収まっている</p> <p>【分度器で実測】</p>
ケーブル送り出し	1 本目のケーブル送り出し 【送り出されていることを目視で確認】	4 本のケーブル送り出し 【送り出されていることを目視で確認】	
電氣的接続		<p>電気探査を行える（土の見かけ比抵抗を 10% の誤差以内で測定できる）</p> <p>【CanSat が刺しこんだ電極の位置に人間の手でより正確な比抵抗が測定できる電極（鉄釘）を刺しこみ、それを用いて測定した比抵抗と比較する】</p>	
電極位置推定			<p>4 本の電極の相対位置精度の誤差が 10% 以内に収まっている</p> <p>【電極位置の実測により判定する。ただし電極が刺しこまれていない場合には電極刺しこみ動作位置の実測により判定】</p>
電極位置制御			<p>電極位置制御の結果、電極刺し込み時における目標位置からの誤差が 10% 以内に収まっている</p> <p>【電極位置の実測により判定する。ただし電極が刺しこまれていない場合には電極刺しこみ動作位置の実測により判定】</p>

本ミッションにおいては、地球上で実際に行われている電気探査から得られる要求および、将来的に火星などの天体において他の地中探査手段よりも有用と考えられる深度における探査を行うための要求からサクセスクライテリアを定めた。特に、刺しこんだ電極の本数、ローバが走行した距離については以下の表 2-2、表 2-3 のような根拠をもってサクセスレベルを策定した。

表 2-2 刺しこんだ電極の本数によるサクセスレベルの判別

刺しこんだ電極の本数	サクセスレベル	策定理由
1 本	ミニマムサクセス	電極を刺しこめることを判断するため。
2 本	ミニマムサクセス	
3 本	ミニマムサクセス	
4 本	フルサクセス	電気探査により比抵抗を測定するためには 4 本の電極を用いた 4 端子法による測定が必要不可欠であるため。

表 2-3 ローバが走行した距離によるサクセスレベルの判別

ローバが走行した距離	サクセスレベル	策定理由
0.1 m 以上	ミニマムサクセス	最低限の走行機能を確認するため。
10 m 以上	エクストラサクセス	他の地中探査手段よりも有用と考えられる深度における探査を行うため。

表 2-2 に示す刺しこんだ電極の本数によるサクセスレベルであるが、サクセスクライテリアは電気探査を行うことができるかについてを基準としたため、4 本すべてが刺しこめていない以上はフルサクセスとはならない。

また、表 2-3 に示すローバが走行した距離によるサクセスレベルについて、他の地中探査手段よりも有用と考えられる深度における探査を行うため、エクストラサクセスを 10m 以上の走行としたとあるが、これは後述する Wenner 配置による測定深度が電極間隔に一致することによって根拠にある。加えて 10m 以上である根拠については、地中レーダによる探査が地表より 10m まで可能になっており、かつ既に宇宙利用されたことによっている。そのため、この測定範囲では電気探査は宇宙での利用実績のある地中レーダと比較してその有用性に劣る可能性がある。電気探査は深度数メートルから数キロの範囲で測定できるというメリットがあるため、このメリットを生かした測定を行うという意味でも電極間隔を 10m 以上とすることを目標とした。

今回電気探査において比抵抗測定に利用する電極配置は図 2-1 に示すような Wenner 配置である。

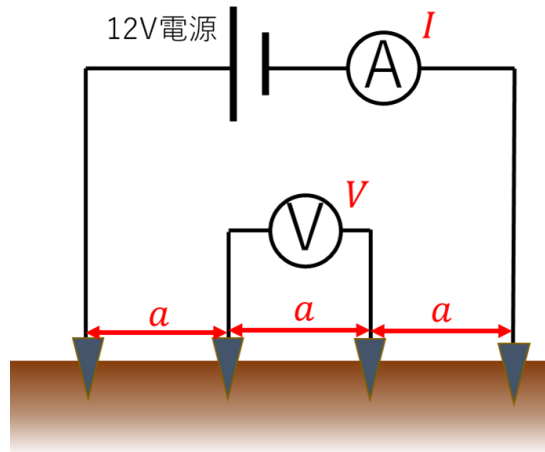


図 2-1 今回のミッションで想定する電極配置

図 2-1 に示すように四端子法に基づいて抵抗値を測定し、電極と地面間をはじめとする接触抵抗の影響を抑えている。なお、Wenner 配置においては見かけ比抵抗 ρ_a [Ωm]は測定した電圧を V [V]、電流を I [A]、設置した電極の間隔を a [m]とおくと次式で定義される。

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I}$$

本ミッションにおいて電気探査を行えること条件としてより理想的な条件で測定した比抵抗との誤差が 10%以内となることとしている。使用する電極は実際の電気探査で使用されている電極ではなく、スケール・質量ともに非常に小型化されたものである。これは実際の電気探査で使用されている電極は非常に大きく、今回の ACTS の体積と質量のレギュレーションを満たすものではないためである。そのため、ここでいう理想的な条件での測定とは実際に電気探査で使用されている電極に近い大きな鉄釘を電極として使用した測定のことを指す。

また、誤差を 10%以内とした根拠については、事前にミッションに搭載する電気探査システムで実施し得られた比抵抗の値が、より正確な電気探査システムで測定した場合との誤差が 10%以内に収まっていたことによるものである。（後述する【V21】電気探査試験を参照）

刺しこむ深さについては事前の電気探査実験により 30mm の深さまで刺しこまれていれば、理想的な条件での測定と比較し十分妥当な精度で測定できることが確認できたため、この深さの刺しこみを指標とすることとした。

第3章 要求項目の設定

1. システム要求（安全確保、レギュレーションのための要求）

要求番号	自己審査項目
	ACTS 安全基準
R1	<u>質量と容積</u> がレギュレーションを満たすことが確認できている
R2	<u>ロスト対策</u> を実施しており、有効性が試験で確認できている（例：地上局にダウンリンクする場合、ACTS で十分な通信距離が実現できると推測できる根拠が明確に示されていること。）
R3	地表近くで危険な速度で落下させないための <u>減速機構</u> を有し、その性能が試験で確認できている
R4	打ち上げ時の <u>準静的荷重</u> によって、安全基準を充足するための機能が損なわれないことが試験で確認できている
R5	打ち上げ時の <u>振動荷重</u> によって、安全基準を充足するための機能が損なわれないことが試験で確認できている
R6	分離時の <u>衝撃荷重</u> によって、安全基準を充足するための機能が損なわれないことが試験で確認できている
R7	打ち上げ時の <u>無線機の電源 OFF</u> の規定を遵守できることが確認できている（FCC 認証かつ 100mW 以下の機器は OFF しなくて良い。また、スマートフォンを用いる場合は FCC 認証かつソフトウェアまたはハードウェアスイッチで off にできること（2017 年追加））
R8	無線のチャンネル調整に応じる意思があり、また実際に調整ができることを確認できている
R9	R1-R8 の充足を確認した設計の機体によって、ロケットへの装填から打ち上げ後の回収までを模擬した End-to-end 試験を実施できており、今後、安全性に関わる大幅な設計変更はない
R10	CanSat の収納・投下準備が 5 分以内でできている

2. ミッション要求（ミッションを実現するにあたり要求される性能）

要求 番号	自己審査項目（ミッション実現要求項目）
M1	パラシュートが展開できる
M2	着地時の衝撃荷重によって、ミッションを実現するための機能が損なわれていないことが試験で確認できている
M3	シーケンスを行うために十分な電力を供給できる
M4	OBC の起動が正常に行われる
M5	パラシュートが分離できる
M6	スタビライザーが展開できる
M7	草地のフィールドにおいて走破性をもち、スタックしない
M8	直線距離で 30m 以上走行できる
M9	電極を刺しこみ機構に装填できる
M10	電極を深さ 30mm、角度 10° 以内で地面に刺しこめる。
M11	4 本のケーブルをローバの走行によって送り出せる
M12	機体に搭載したシステムによって電気探査ができる
M13	自己位置を推定でき、その精度の誤差が 10%以内に収まっている
M14	自己位置を制御でき、その精度の誤差が 10%以内に収まっている

第4章 システム仕様

1. CanSat 外観

設計した CanSat の外観を以下の図 4-1、図 4-2 に示す。

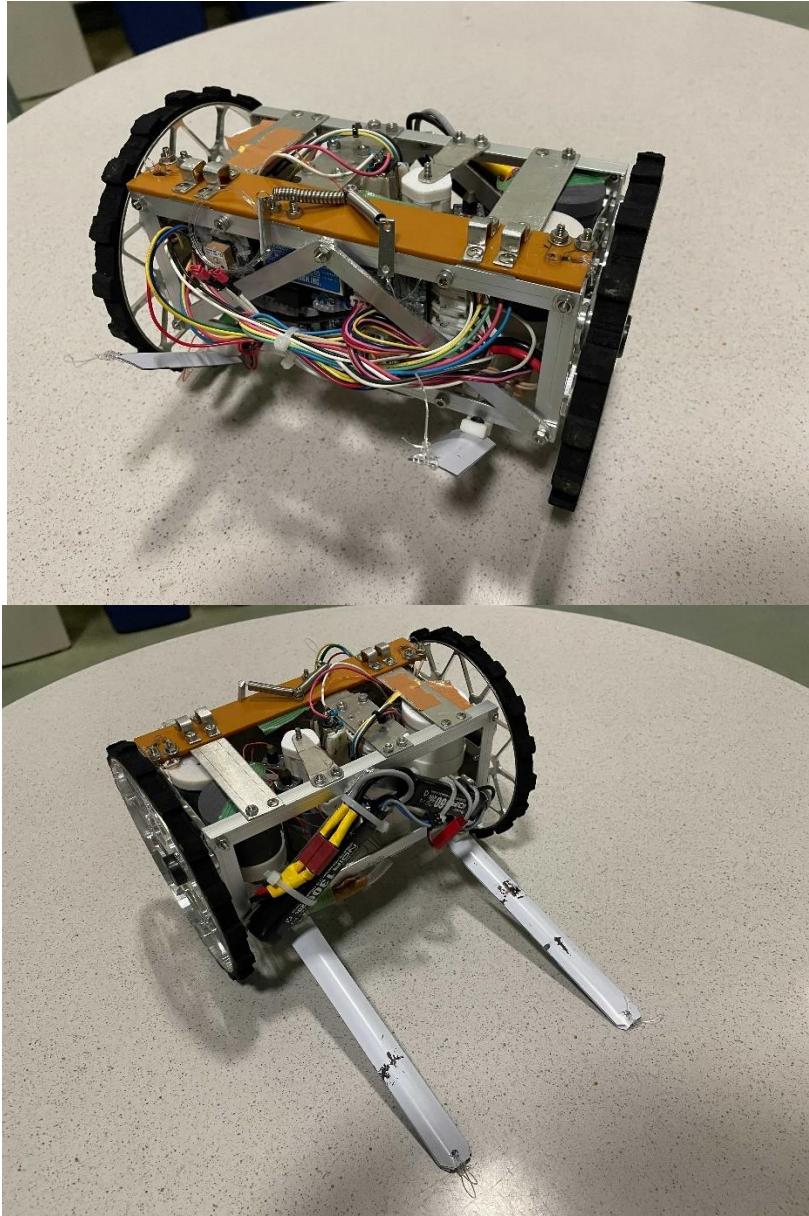


図 4-1. CanSat 外観

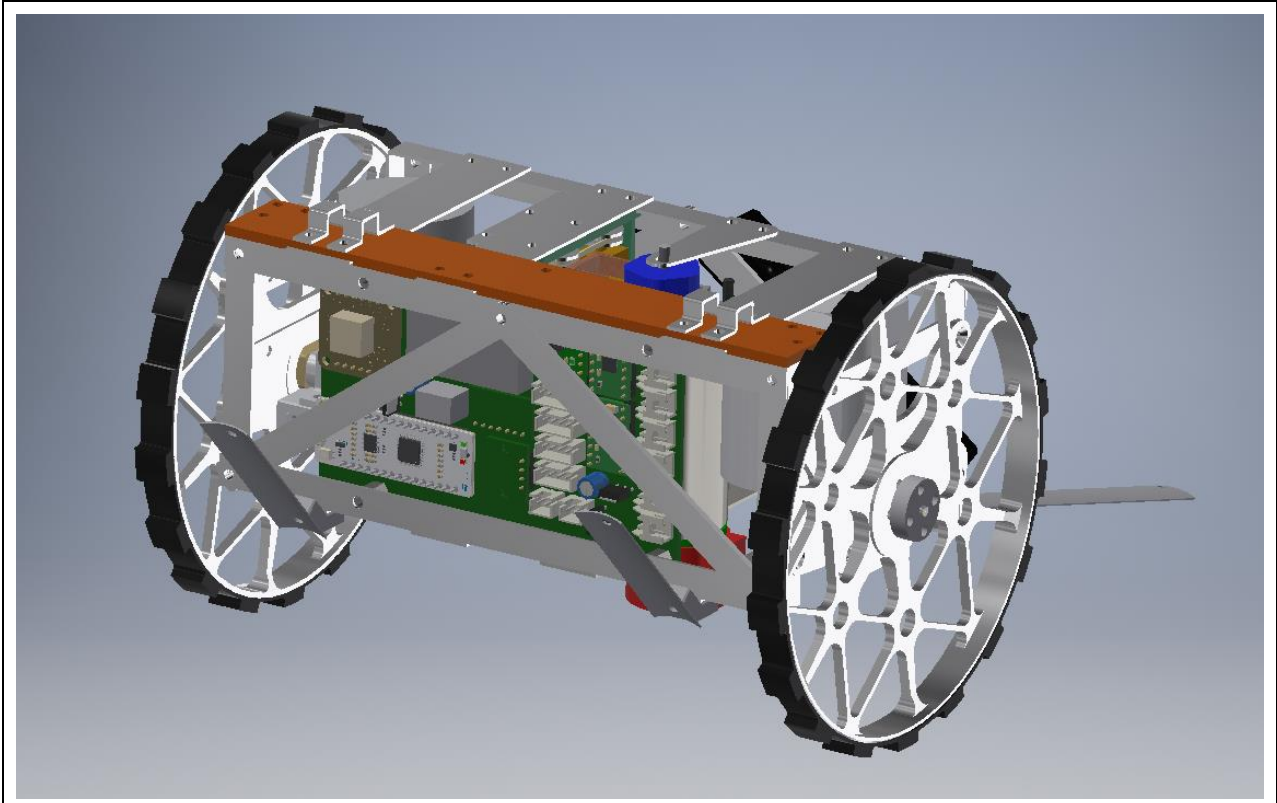


図 4-2. CanSat 外観 (CAD)

次に、機体コンポーネントの配置を図 4-3、図 4-4 に示す。

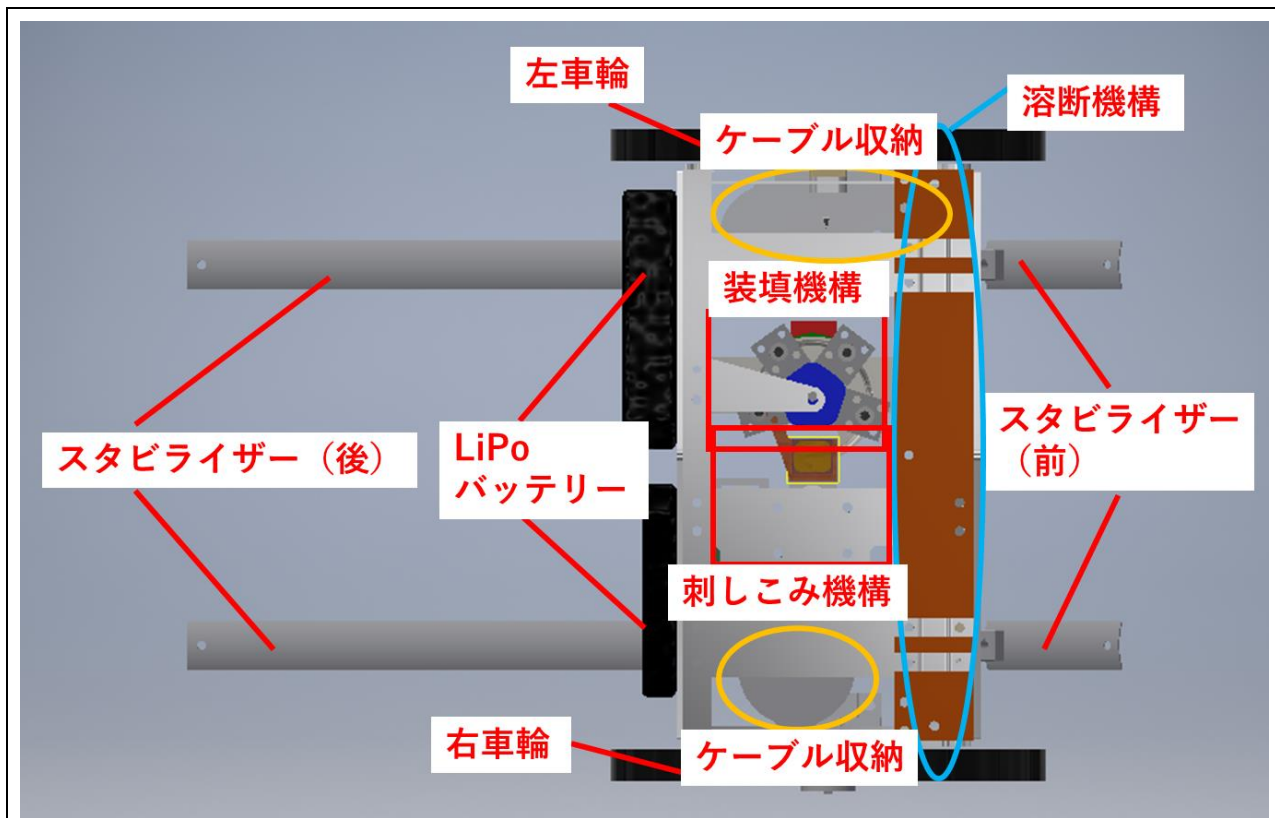


図 4-3. 各コンポーネントの配置 (上面から)

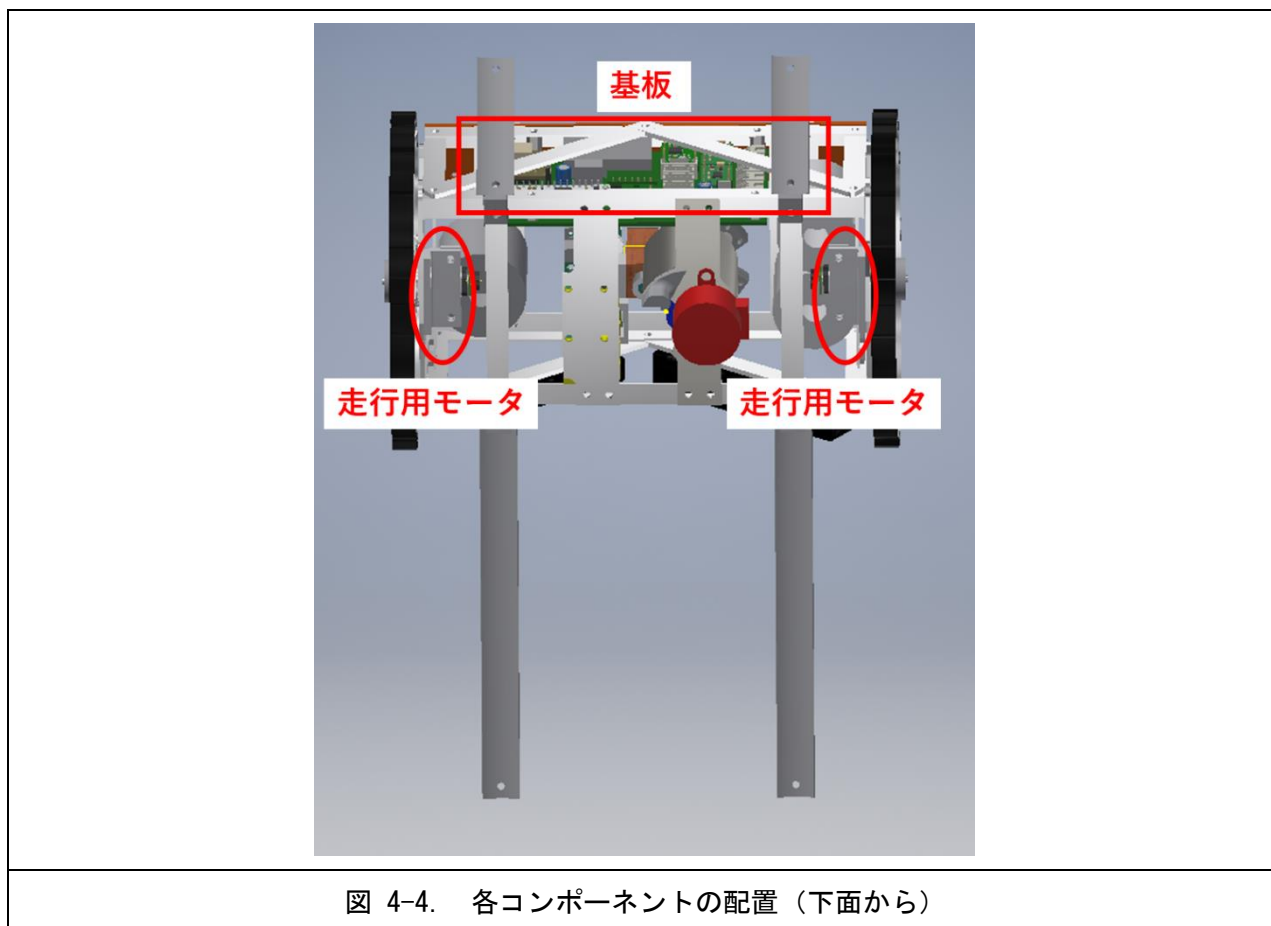


図 4-4. 各コンポーネントの配置（下面から）

機体の体積については、最外径が車輪の 140mm、軸方向の長さが 214mm である。パラシュートを含めても、内径 146mm、高さ 240mm のキャリアに十分収まっていることが確認できる。また、実際に制作したフライトモデルでもキャリアに収まっていることが、後述する【V2】機体の収納・放出試験によって確かめられている。

機体の質量については、後述する【V1】質量試験によって、パラシュートを含めて 1020g であるとわかっており、レギュレーションである 1050g 以下であることが確かめられている。

2. CanSat 内観・機構

【ローバ駆動部】

ローバ駆動部の外観を図 4-5 に CAD 図を図 4-6 に示す。タイヤフレームはアルミ（A7075）製で、黒い部品は天然ゴムスポンジ製である。図 4-7 に示すように、タイヤフレームにはベアリングが埋め込まれており、そのベアリングはアルミ（A7075）製のサイドプレートに取り付けられるようになっている。モータは 3D プリンタ（ABS）製の部品でサイドプレートに取り付けられている。図 4-2 において白のコンベックスはスタビライザーである。これは走行中のローバの姿勢を水平に保つだけでなく、着陸後に反転した機体をスタビライザーが展開しようとする

力によって正常な姿勢に戻すのにも役立つ。本ミッションにおいて、ローバ駆動部に求められる仕様は次のとおりである。

- ・ 電極刺しこみ機構が体積を取るため、モータの最後端部から最後端部までの距離が115mmであること
- ・ 芝地で30m以上走行する走破性を有すること
- ・ 着地衝撃に耐え走行可能であること

以上の3つの要求から、モータを可能な限り小さくすること、タイヤの材質を選定して十分な走行性を確保すること、タイヤと駆動軸および軸受の耐衝撃性が求められる。

そのためモータについては、計算から求めたトルクを満足するモータの中で最も小型軽量であると思われるものを選定した。しかし、摩擦などの複雑な状況で正確なトルクを計算で求めることはできなかったため、実験を行い走行性能に問題がなかったため選定したモータで決定した。またタイヤの材質などについても草地を走行させる実験を行って選定した。

耐衝撃性については先ほどの説明通り、タイヤとサイドプレートはベアリングで結合されており、タイヤに伝わる着地衝撃をベアリングを介してフレームで受けることの出来る構造になっている。モータ軸などのローバ駆動に必要な部分に衝撃荷重が作用することを防ぐことが可能なため、ローバ駆動部の耐衝撃性を高めることができる。

ここでは動的効果の係数を利用し設計を行う。図4-7におけるサイドプレートの一部である段付きの円柱状の部材にかかる曲げモーメント M [Nmm]はCanSatの質量 m [kg]、サイドプレート間の距離 L [mm]、サイドプレートの表面から円筒の端までの距離 l_b [mm]により $m = 1020\text{kg}$, $L = 184\text{mm}$, $l_b = 5\text{mm}$ とすると一つのタイヤに作用する静荷重 W [N]は最大で $W = mg$ ゆえ

$$M = W \left(\frac{L}{2} + l_b \right) = 970\text{Nmm}$$

である。このとき内径 d_1 [mm]、外径 d_2 [mm]の円筒に働く最大応力は以下のように計算できる。

$$\sigma = \frac{16d_2}{\pi(d_2^4 - d_1^4)} \left(k_b M + \sqrt{(k_b M)^2 + (k_t T)^2} \right)$$
$$\tau = \frac{16d_2}{\pi(d_2^4 - d_1^4)} \sqrt{(k_b M)^2 + (k_t T)^2}$$

A70755の $\sigma_{\max} = 230$ [MPa]、 $\tau_{\max} = 150$ [MPa]であり、衝撃荷重のため安全率は12とすると、

$$\sigma \leq \frac{\sigma_{\max}}{12}, \quad \tau \leq \frac{\tau_{\max}}{12}$$

を満たすように $d_1 = 6$ [mm]、 $d_2 = 12$ [mm]とした。サイドプレートとタイヤフレームに関しては、先ほど求めた σ と τ に段付きの円柱状の部材の断面積をかけた値を衝撃力として、破壊しないようにFEM解析を用いて設計した。

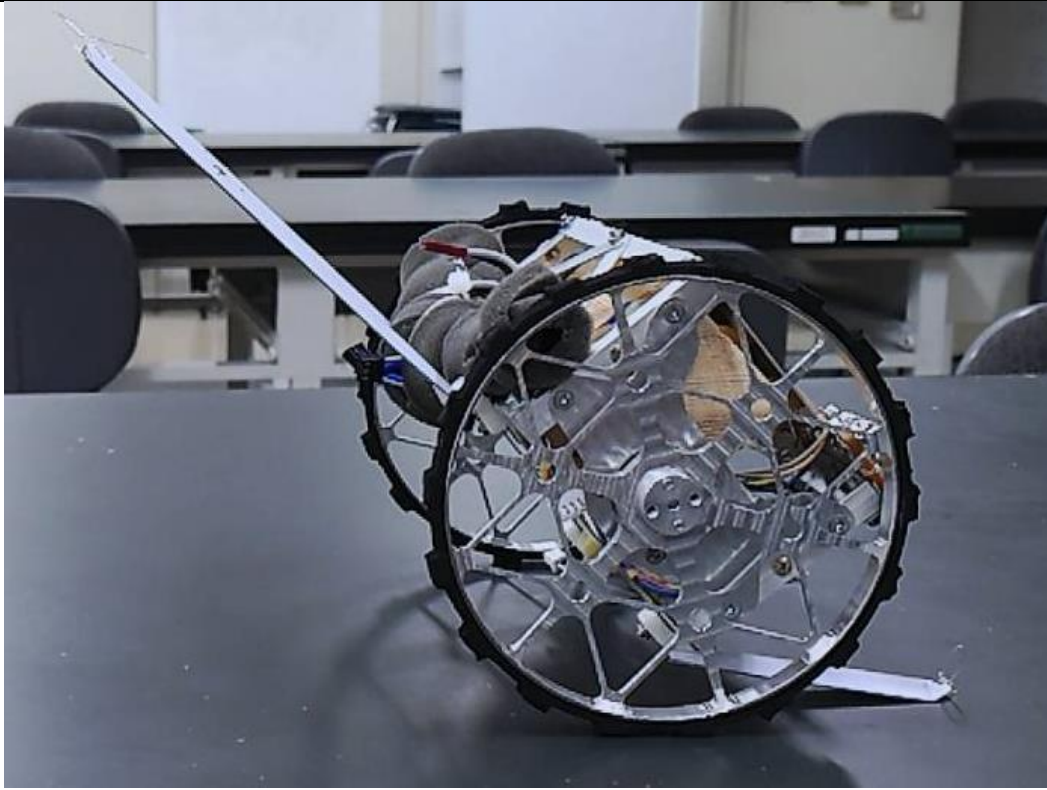


図 4-5. ローバ駆動部の外観

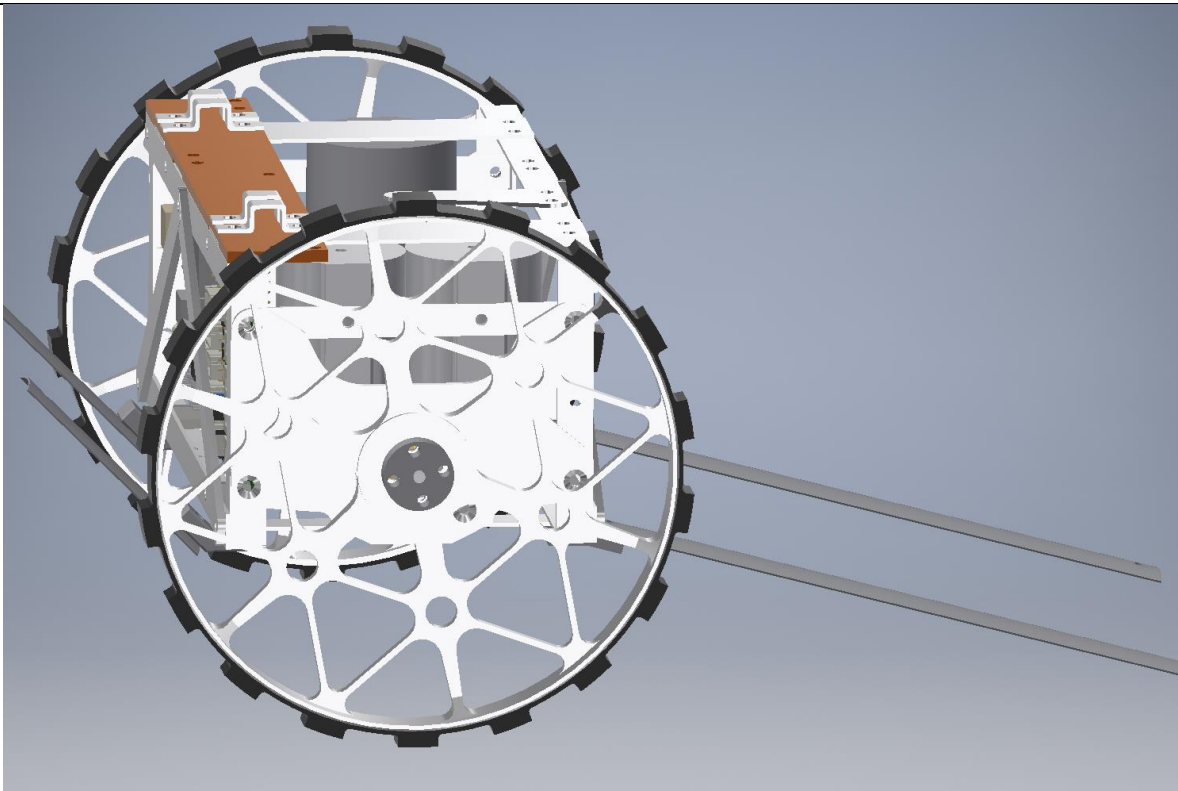


図 4-6. ローバ駆動部の外観 (CAD)

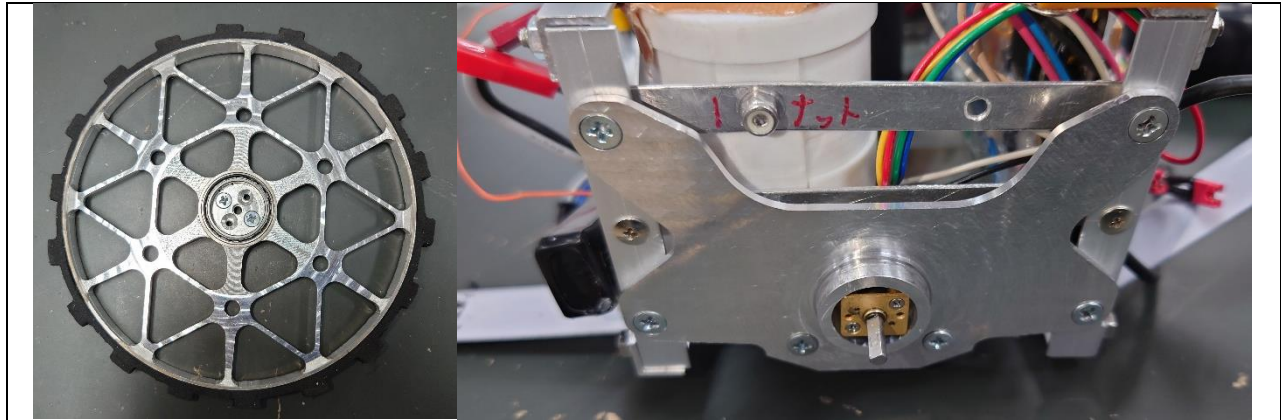


図 4-7. タイヤおよびサイドプレート

【スタビライザー】

スタビライザーは CanSat を正立させる（適切に刺しこみを行える姿勢にすること）ために必要な機能である。本 CanSat は重心が非常に高く静安定性が低いため、多くのスタビライザーを必要としており、図 4-8 に示すように前と後ろに 2 つずつ付いている。

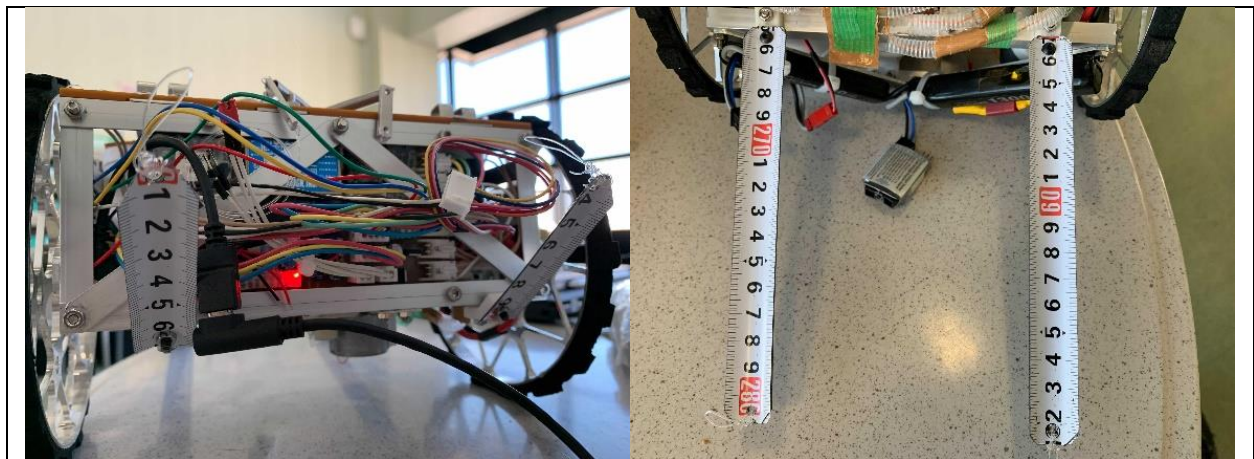


図 4-8. スタビライザーの外観

次に、落下直後から正立状態までの遷移を説明する。まず重心が高いため図 4-9 のような姿勢で安定する。そしてスタビライザーを拘束しているテグスを溶解すると、後ろスタビライザーの復元力によって図 4-10 の姿勢になる。ここで、前スタビライザーが無ければ CanSat は前転してしまうため、前スタビライザーが必要となる。この姿勢になれば制御が可能となり、モータを適切に回転させることで図 4-11 の姿勢、つまり正立状態になる。



図 4-9. 落下直後の CanSat



図 4-10. スタビライザー展開後の CanSat

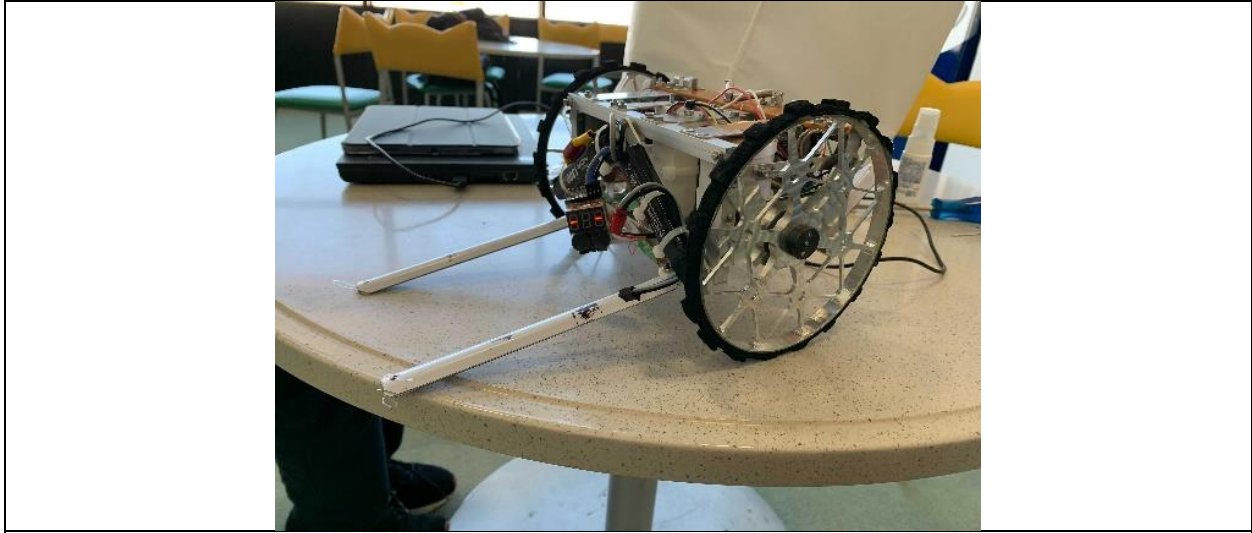


図 4-11. 正立状態の CanSat

【刺しこみ機構部】

刺しこみ機構は、電極を地面に刺しこむための機構である。全体図を図 4-12・図 4-13 に示す。

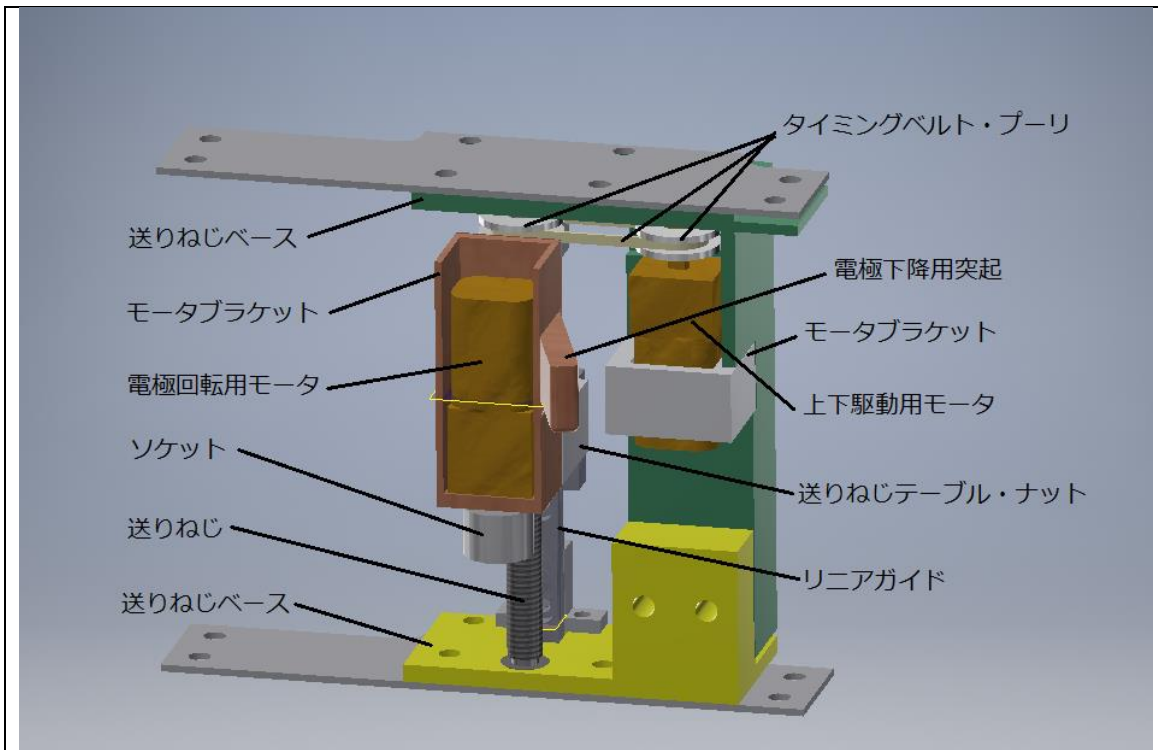


図 4-12. 刺しこみ機構 (CAD)

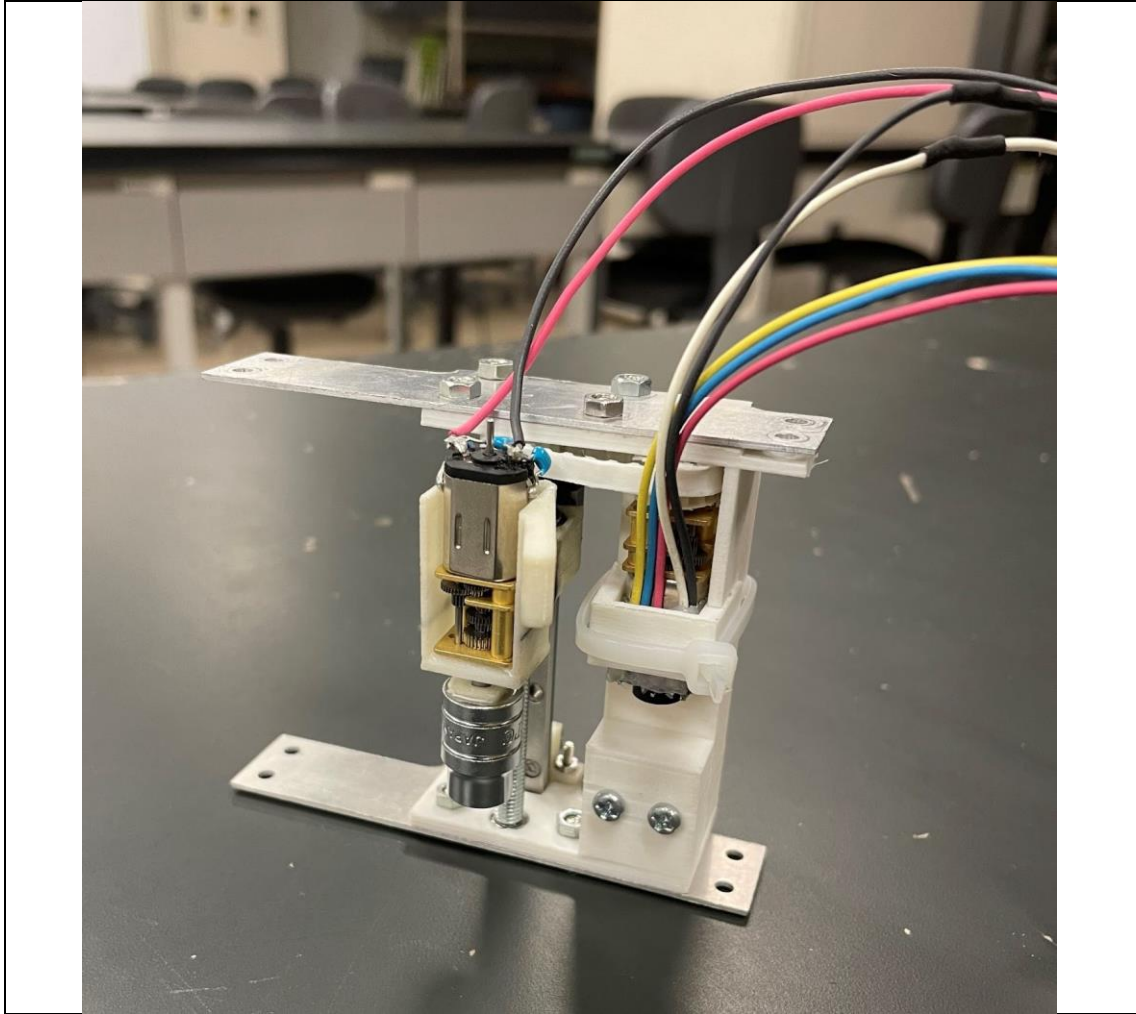


図 4-13. 刺しこみ機構(写真)

ミッションシーケンスに沿って刺しこみ機構を説明する。ローバが電極を刺しこむ所定の位置に到達したら、刺しこみ機構は動作を開始する。送りねじ機構・上下駆動用モータによって電極回転用モータが回転しながら下がり、ソケットを介して電極と接続される。その後、電極を回転させながら押し込み、電極を刺しこむ。

送りねじの駆動に関しては、モータとタイミングベルト、タイミングプーリを使用している。送りねじがリニアに動くためにリニアガイドを使用した。

図 4-12 に示す電極下降用突起は電極を下ろすためのものである。電極下降用突起の付いている電極回転用モータを送りねじ駆動で下げることで、装填機構から電極を下降させる。

刺しこみ機構の動作の様子は以下のリンクを参照されたい。(電極刺しこみ試験時の動画と同じものである。)

https://youtu.be/pr_01bxmHE0

【装填機構部】

装填機構は4本ある電極を倒れないように支えるとともに、刺しこむタイミングで刺しこみ機構と接続できる位置に電極を移動させるための機構である。全体図を図4-14に示す。

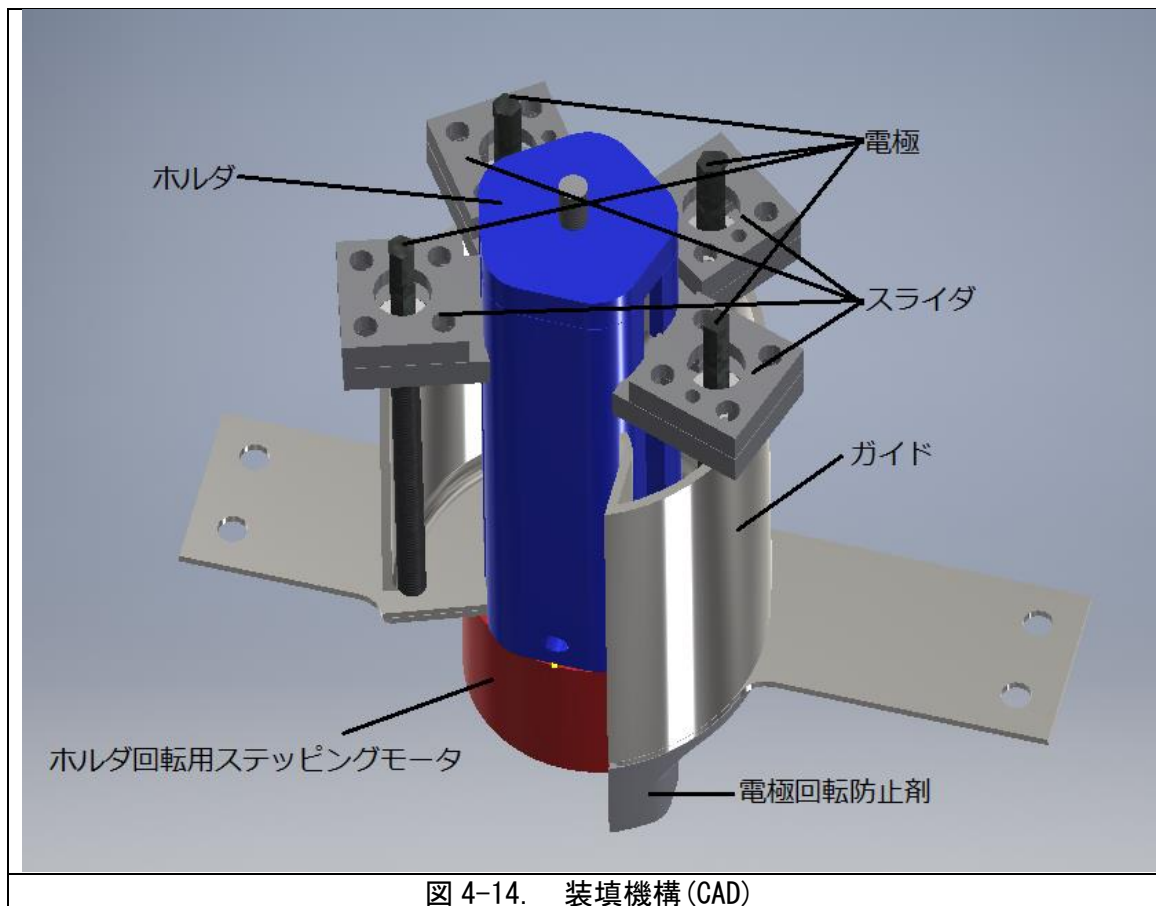


図 4-14. 装填機構 (CAD)

ミッションシーケンスに沿って装填機構を説明する。本ミッションでは、電極を4本それぞれ別の位置に刺しこむ。各電極の刺しこみ位置にローバが到達したタイミングで、装填機構の下部に付いたホルダ回転用ステッピングモータによってホルダが回転する。まず、一本目の電極を刺しこみ機構の電極下降用突起の下部まで移動させ、電極下降用突起に押されて下降する。その後、ホルダ回転用ステッピングモータの回転により、電極が刺しこみ機構のソケットの真下まで移動する。ソケットは六角のメスになっており、電極の上部の六角軸部分にソケットがはまることによって接続が達成される。

ホルダやガイドは3Dプリンタで作成した。電極の詳細は次項で述べる。

装填機構の動作の様子は以下のリンクを参照されたい。(電極装填試験と同じ動画である。)

<https://youtu.be/A7Jbiv4FmAo>

【電極】

電極は電気探査を行うために欠かせないものである。また、刺しこみ機構・装填機構によって所定の位置に刺しこまれるようにするため、電極は上部が六角軸形状になっている。その下にベアリング、その周りにはホルダに支えてもらうためのスライダ及び電氣的接続を確保するための部品が付いている。ベアリング周りのスライダは3Dプリンタで作成した。全体図を図4-15に示す。

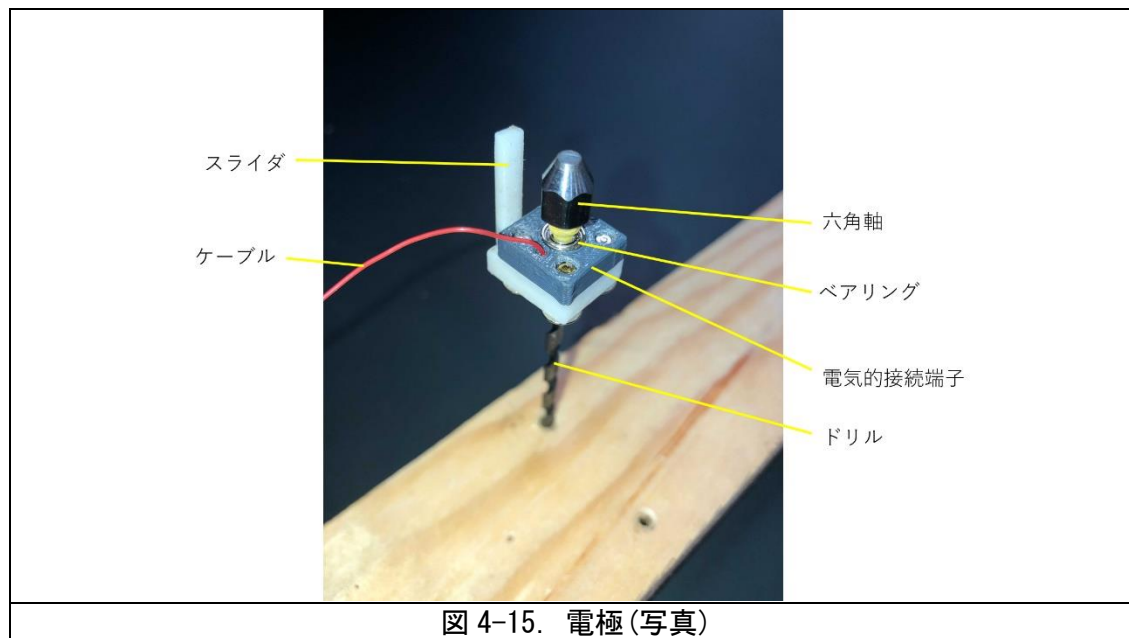


図 4-15. 電極 (写真)

ケーブルと電極との電氣的な接続については、押しバネと銅板を用いた電極と接続するコネクタを用いることにした。

コネクタは以下に示す図 4-16 のように、上下に分かれている部品をねじで留めることによって作成する。

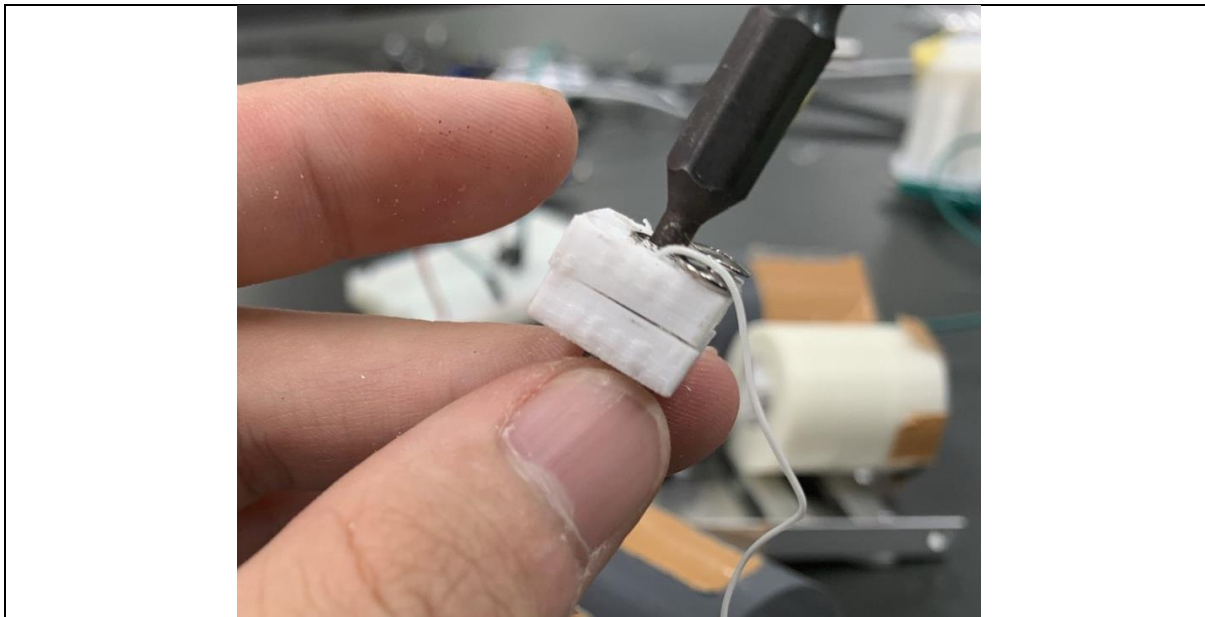


図 4-16. コネクタ 外観

このコネクタは図4-17のように上下それぞれのコネクタパーツの中心にベアリングをつけて、そこに電極を通すようになっている。

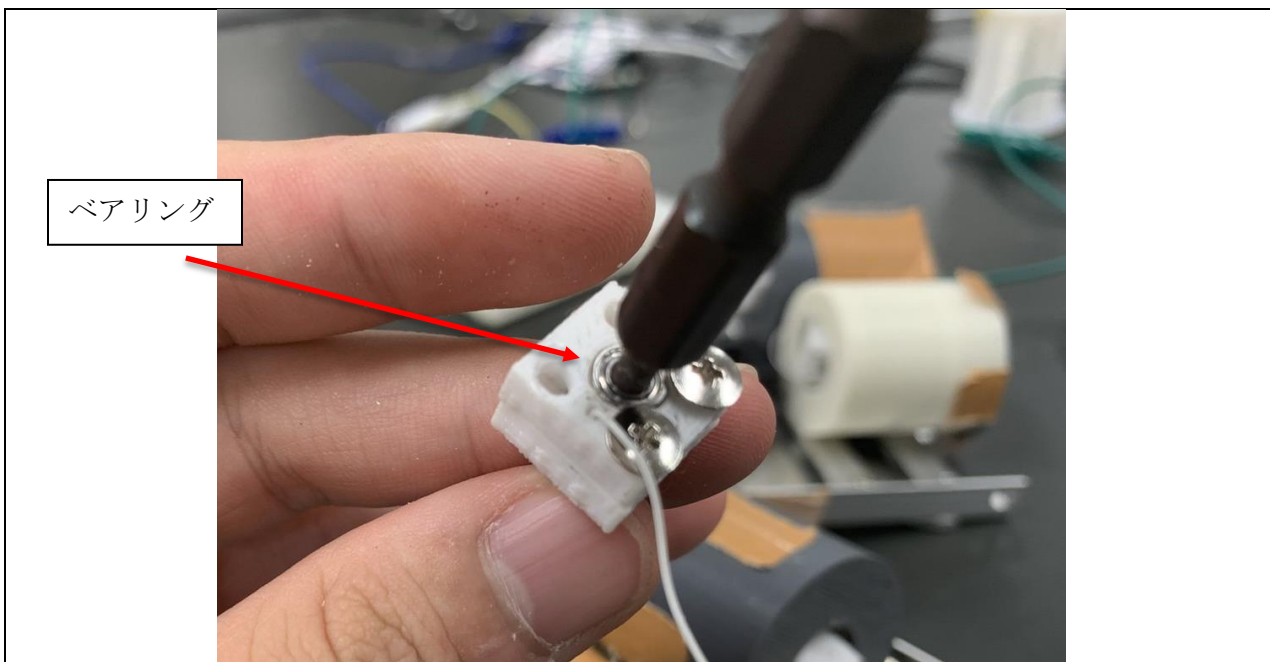


図 4-17. ベアリング部

ケーブルと電極が常に接触するように押しバネで銅板を押すという仕組みによって電極とケーブル間の接続を行う。

押しバネと銅板をはんだでつけたものは下の図 4-18 のものである。

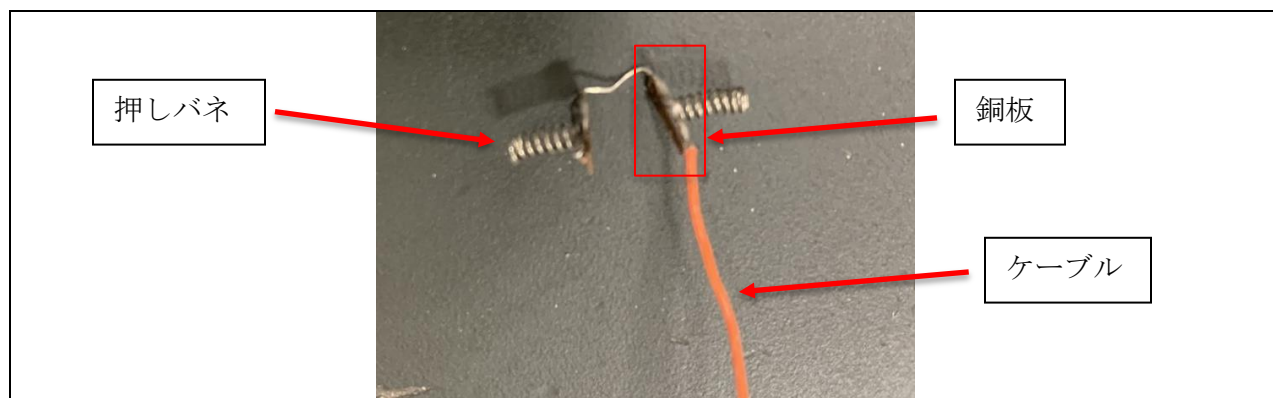


図 4-18. ケーブルと押しバネ・銅板のセット

このセットを図 4-19 に示すようにコネクタ内部に電極と接するように設置する。

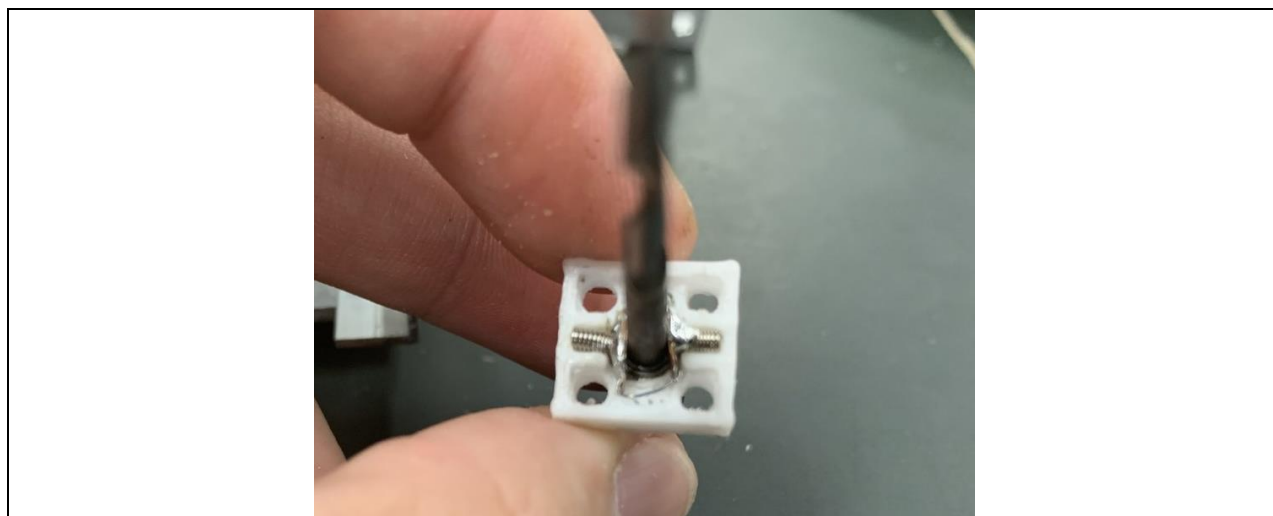


図 4-19. 電極とコネクタの接触

押しバネと銅板の機構を用いる理由としては、電極は回転しながら地面に刺しこまれていくため、ケーブルの接続部は電極に対して回転自由でなければいけない。そのためこの機構を採用した。

ベアリングを用いた理由は、土などの異物が入り込んでくる可能性があり、それを防ぐために上下をシールドベアリングで挟み込むことで異物混入を防止している。

といった理由のもこの構造に決定した。

【ケーブル送り機構部】

ケーブルは、図 4-20 のように巻くことに決定した。(以下内巻と呼ぶことにする。)

内巻の状態から送り出されるときケーブルを引く力はほとんど必要とせず、ローバの走行に支障を与えないことが理由である。

図 4-20 のようにケーブルを巻く手法としては図 4-21 に示すように

木の棒に紙を巻いたものにケーブルを巻く。

実際にケーブルを巻いたものは図 4-22 に示されているものである。

そのあとに紙を残して木の棒を抜くことでケーブルを取り出すことが可能になり、ケーブルの形を崩すことなく図 4-20 の形が再現性をもって製作することを可能になった。

このケーブルを図 4-21 に示すような、筒状のケースに収納する。このケースを機体に搭載し、ローバの移動によって受動的にケーブルが送り出す手法を用いることにした。

製作においては 3D プリンタを用いて作成する素材は ABS である。

また、要件を満たすケーブル長が 1.5 m, 10 m, 20 m, 30 m であるため、それぞれの大きさに合わせて収納できるように、収納機構のサイズを調整して製作を行った。

各々のサイズは

5 m 用のもの

15 m 用のもの

25 m 用のもの

35 m 用のもの

である。

この収納機構には蓋が作成されておりケーブル収納後にテープもしくは接着剤を用いて収納機構本体に固定することを考えている。

実際にケーブルを収納したときと合わせて図 4-24 で示す。

機体への固定方法に関しては図 4-26 に示すように収納機構にアルミ板をねじ止めする。またそのアルミ板を機体にねじ止めすることによって行う。

ケーブルと機体間の電氣的接続は直接接続できる。



図 4-20. ケーブル収納時の外観

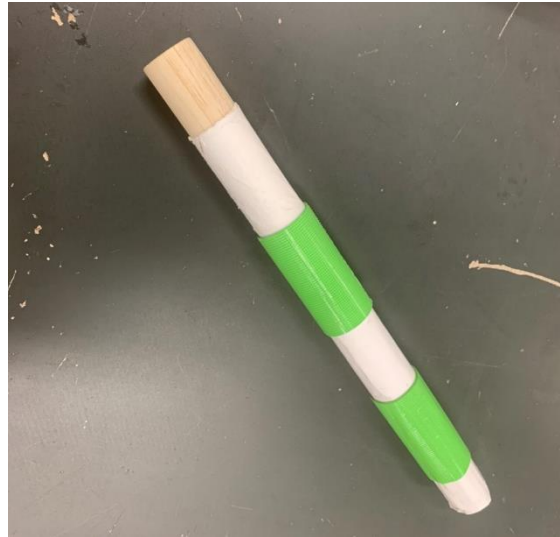


図 4-21. ケーブル作成手法 1



図 4-22. ケーブル作成手法 2

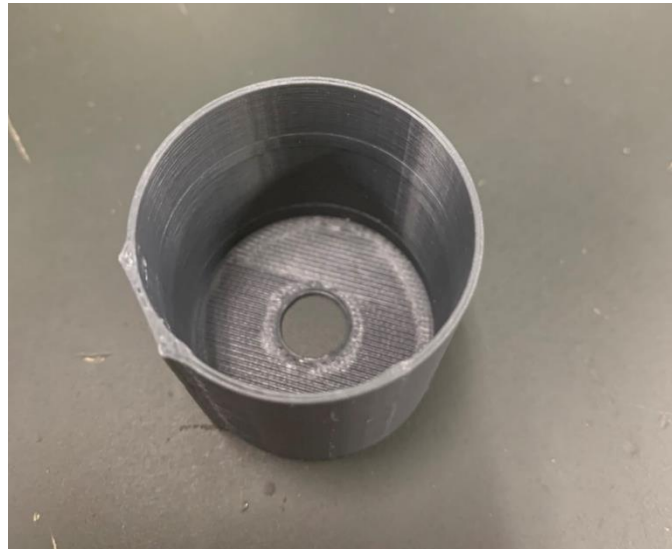


図 4-23. ケーブル収納機構の外観(上)

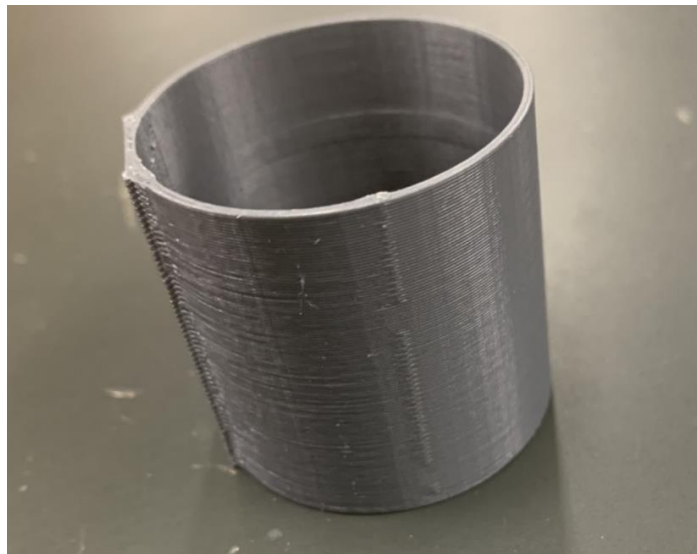


図 4-24. ケーブル収納機構の外観(横)



図 4-25. ケーブル収納時



図 4-26. 収納機構の機体保持

機体内部でのケーブルの配線について

走行終了時、機体から4本のケーブルが出ることになる。あらかじめケーブルは電極に接続されており、電極の刺しこみ時にケーブルも一緒に機体外部に出ていき走行に伴って送りだされていることになる。

そのため機体内部での配線によっては内部で他のケーブルや機構等に絡まってしまうことが考えられる。

機体内の絡まりを防ぐ手段として配線時にケーブルをストローに通すことで他との干渉を防ぐことにした。以下の図 4-27 のように配線をすることにした。

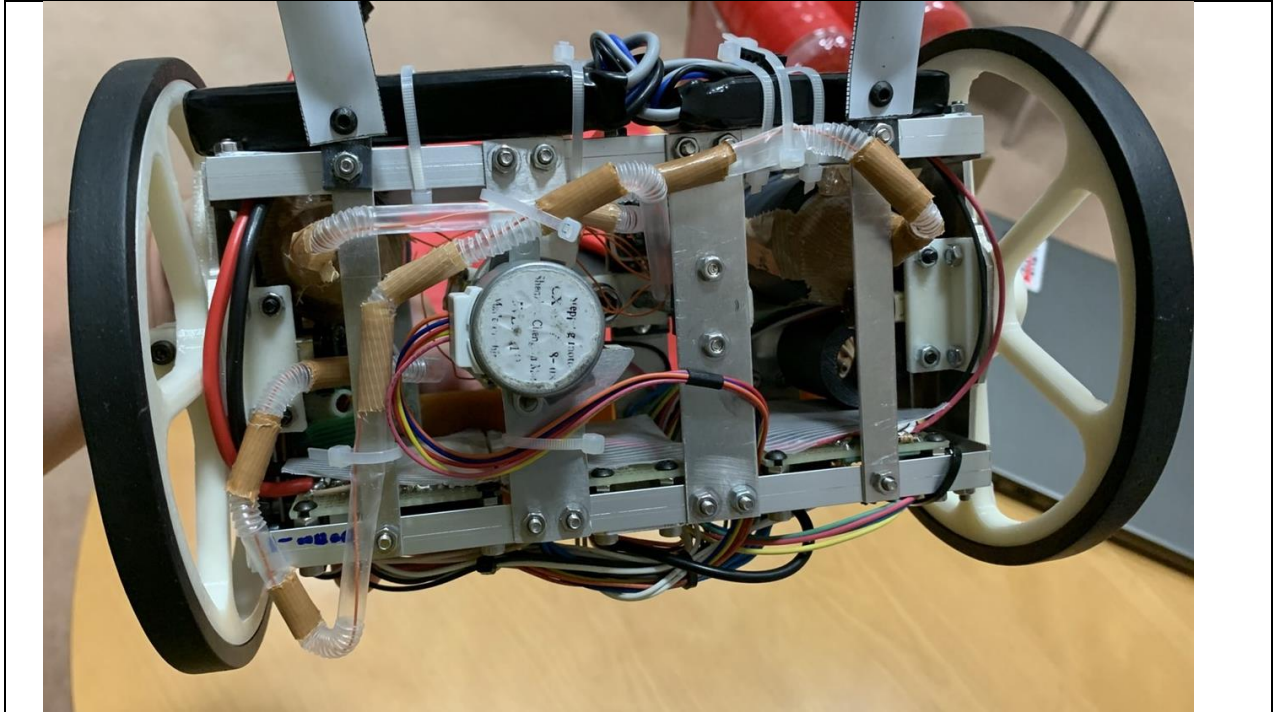


図 4-27. 機体内の配線

【溶断機構】

以下の図 4-28 のように溶断機構を配置する。ニクロム線に電流を流し熱することによって、テグスを焼き切る。その際に円筒が引きばねに引っ張られるときに円筒（フライトモデルでは厚めの板材に変更）に巻きつけていたパラシュートの紐が円筒から外れることによってパラシュートを分離する。（図 4-28、図 4-29）

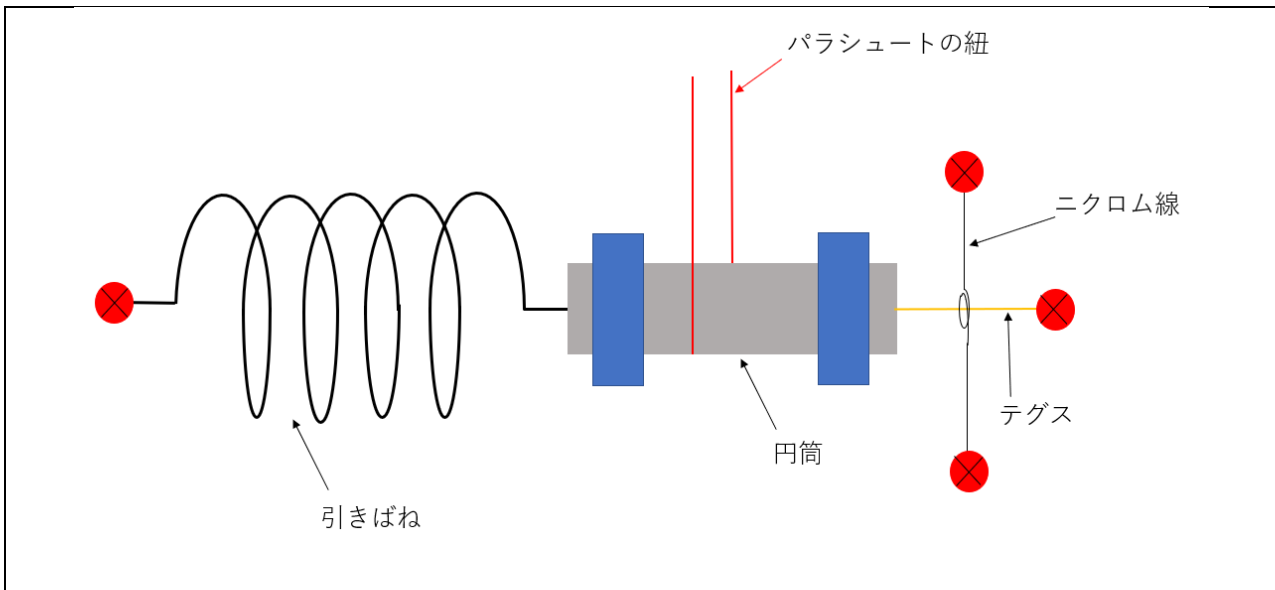


図 4-28 溶断機構(設置時)

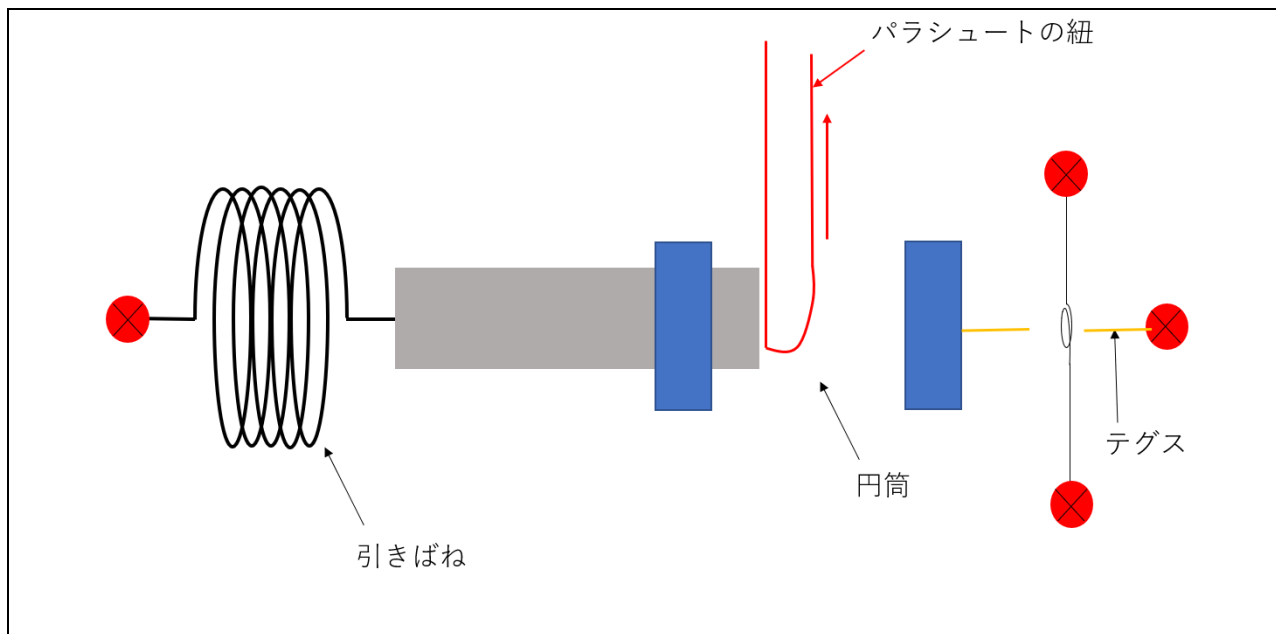


図 4-29 溶断機構(分離時)

また、本機体はミッションの都合上機体中央部からケーブルが流れ出るため、スタビライザーを左右に2つずつ、合計4つ搭載している。溶断機構は、パラシュートに加えこのスタビライザーの展開も担っているため、機体には2つ搭載している。機体の容積やスタビライザーの配置の要求から図 4-30 のように配置することにした。実際に搭載したものは図 4-31 に示す。

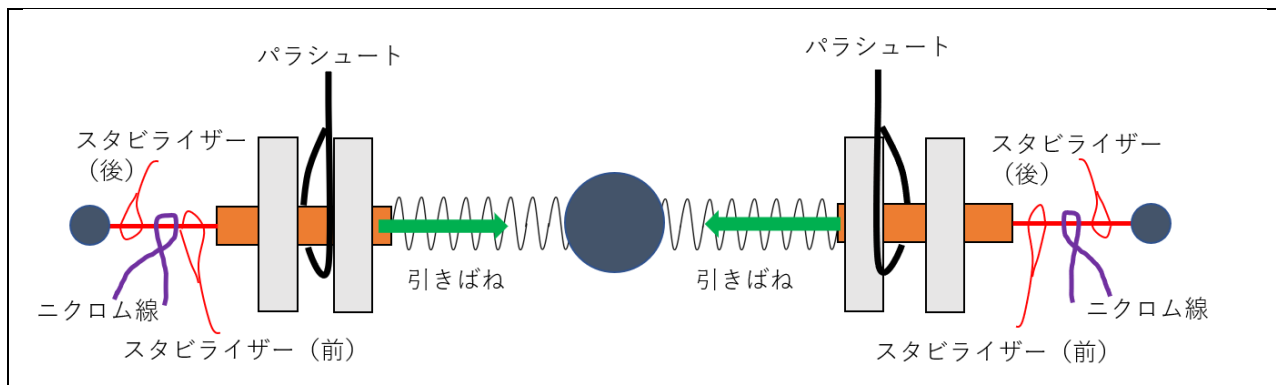


図 4-30 溶断機構の配置 (赤色がテグス)

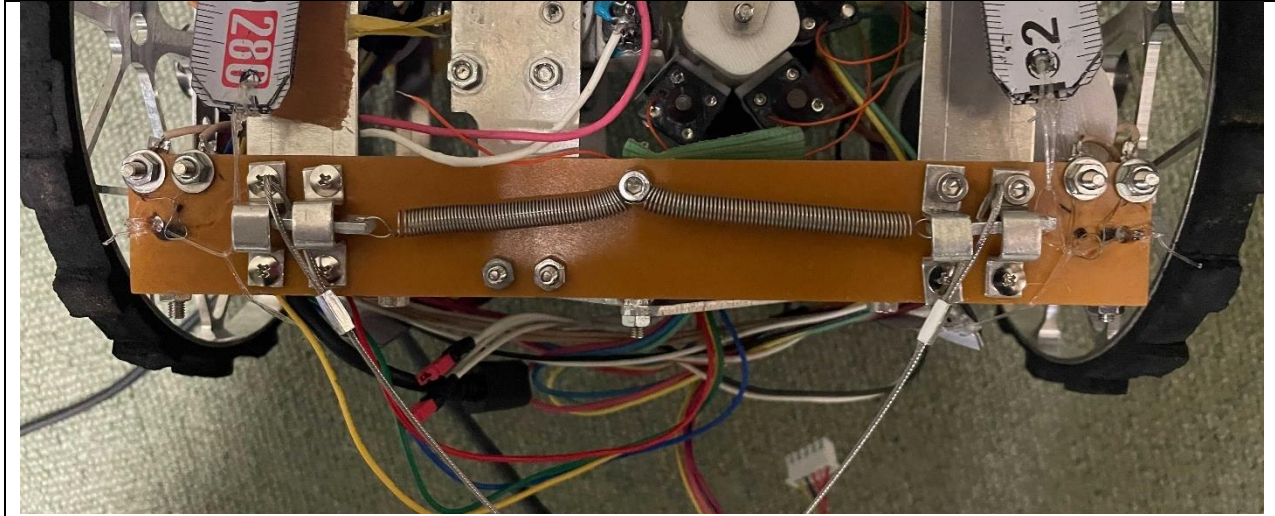


図 4-31 溶断機構の実際の配置

【パラシュート】

パラシュートの形は製作のしやすさを考えて、正六角形で作成することとした。また、パラシュートの底角については寸法に大きな影響を与えないことから 0° と仮定し、平面のパラシュートとして設計を行う。正六角形を 6 つの正三角形に分けた時の一辺の長さを R とし、スピルホールの穴を無視して六角形の面積は

$$S_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2$$

で与えられる。この面積は、「Parachute Recovery System Design Manual, T. W. Knacke」の資料にある公称面積に対応する。

次に、本機体に搭載するパラシュートはその安定のためスピルホールを作成することとする。スピルホールの大きさについて Utah State University の資料「Recovery System: Parachutes 101」（参考 URL : http://mae-nas.eng.usu.edu/MAE_6530_Web/New_Course/launch_design/Section3.5.pdf）によれば、パラシュートの公称面積を S_0 、スピルホールの面積を S_v としたとき、

$$\frac{S_v}{S_0} \sim 0.01 (= 1\%)$$

とするのが一般的という記述があった。ここで、六角形で作るパラシュートが展開した際、その断面形状が正六角形となるのは考えにくく、円形に近い形になることが考えられる。そこから、スピルホールの設計モデルとしては円形のモデルを採用することにする。そこで、パラシュートの半径を R 、スピルホールの半径を r とおいて考える。

設計計算を見通しよくするため、スピルホール比というパラメータを

$$\zeta = \frac{r}{R}$$

と定義することにする。すると、

$$\zeta \sim 0.1$$

と計算できる。ここに過去のパラシュート投下試験の経験則から得られるパラシュートが安定するためのスピルホール比が少し大きいことを加味し、 $0.1 < \zeta < 0.2$ 程度で想定し、投下試験の結果からより安定するスピルホール比を $\zeta = 0.2$ と決定した。

次に、目標終端速度を5 m/sとし理想的なパラシュート開傘時の運動方程式から設計値 R を決定する。運動方程式は m を機体質量、 v を機体の降下速度として以下のように記述される。

$$m\dot{v} = mg - \frac{1}{2}\rho v^2 [(C_D \cdot S_0)_p + (C_D \cdot S_0)_v]$$

ただし、 $(C_D \cdot S_0)_p$ はパラシュート、 $(C_D \cdot S_0)_v$ は機体に関する、抗力係数と公称面積の積を示している。ただし、機体の公称面積は表面積ではなく断面積で定義することとする。

機体について、解析的には円柱にモデル化して捉えることとする。機体質量は大きく見積もり、 $m = 1.05 \text{ kg}$ 、機体直径は想定している $d = 0.14 \text{ m}$ 、機体長さも想定している $l = 0.20 \text{ m}$ と与えることにする。すると、 $\frac{l}{d} \approx 1.42$ であり、横向きに落下することから抗力係数は以下の値が使える。

$$C_D = \{0.63, \left(\frac{l}{d} = 1\right) 0.68, \left(\frac{l}{d} = 2\right)\}$$

この値から線形補間することで、機体の抗力係数は

$$C_{D,v} = 0.63 + \frac{0.68 - 0.63}{2 - 1} \cdot (1.42 - 1) \approx 0.65$$

を用いることとする。また、

$$S_{0,v} = ld = 0.028 \text{ m}^2$$

より

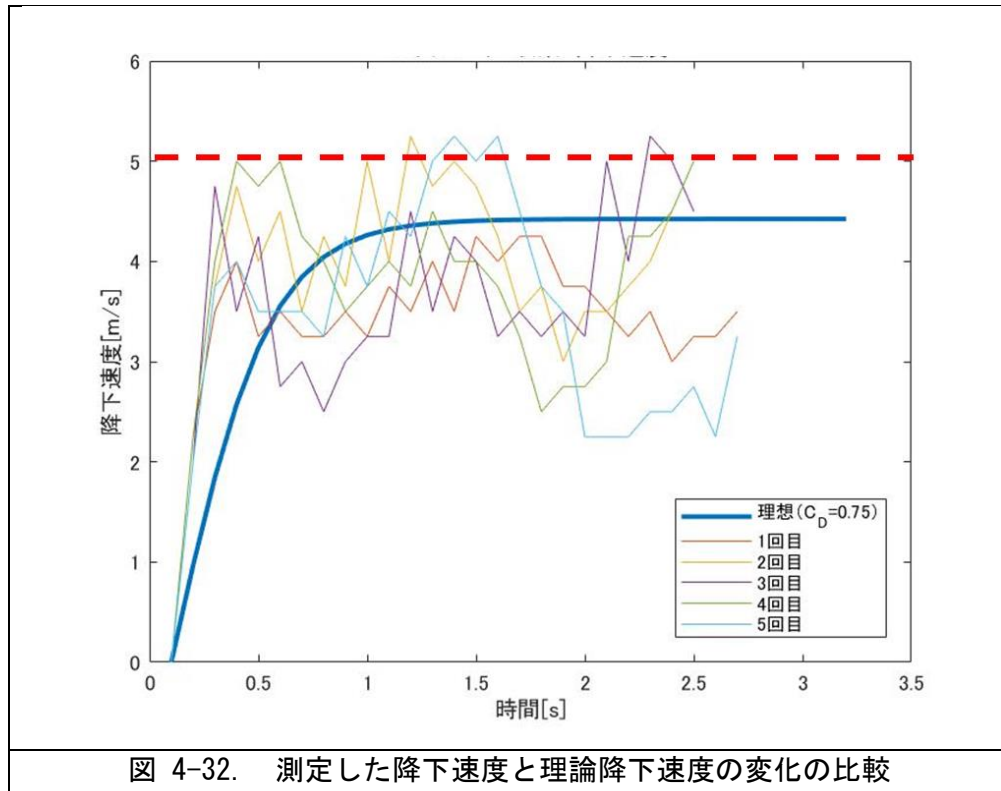
$$(C_D \cdot S_0)_v = 0.0182 \text{ m}^2$$

が得られる。

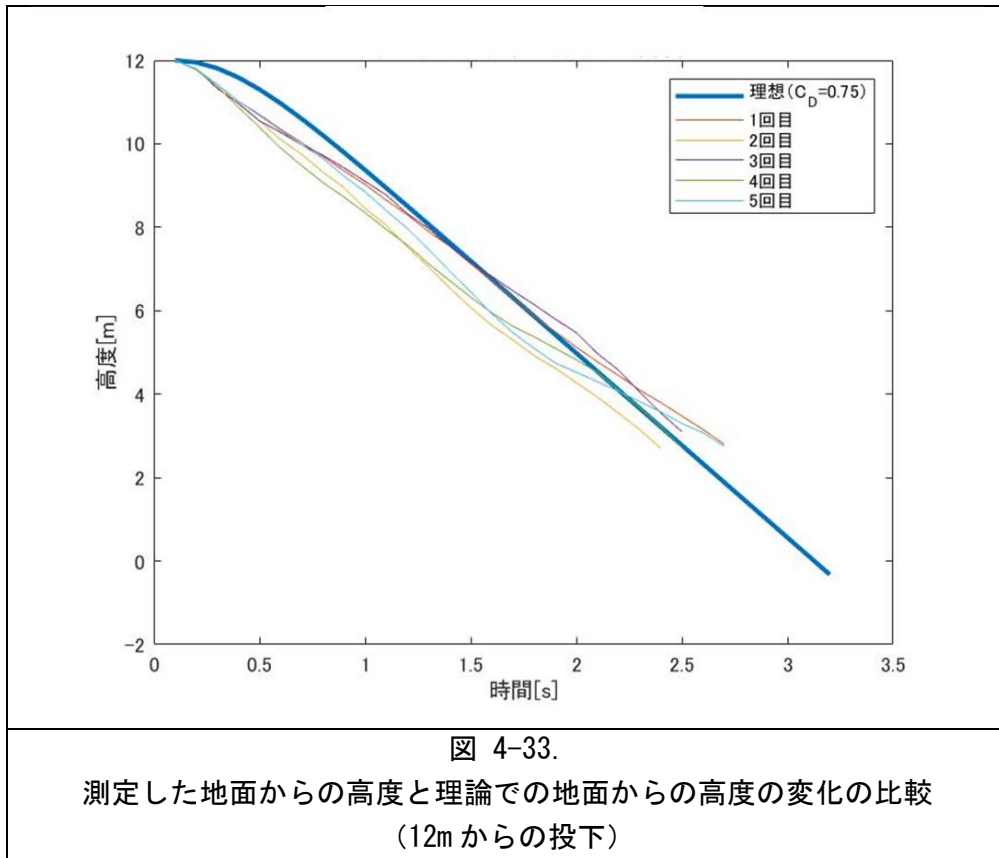
パラシュートの抗力係数について、「Parachute Recovery System Design Manual, T. W. Knacke」による円形モデルの抗力係数

$$0.75 < C_D < 0.80$$

から、低めに見積もり設計値として $C_{D,p} = 0.75$ を採用し投下試験を実施した。投下した際の降下速度と理論降下速度の変化を比較したグラフを図4-32に示す（後述する【V4】パラシュート投下試験で示しているものと同じグラフ）。



また、投下試験を実施した環境に合わせて 12m から投下した際の地面からの高度の変化のグラフを図 4-33 に示す。



さらに、朝霧での投下高度である 50m からの投下で地面からの高度の変化を図 4-34 に示す。

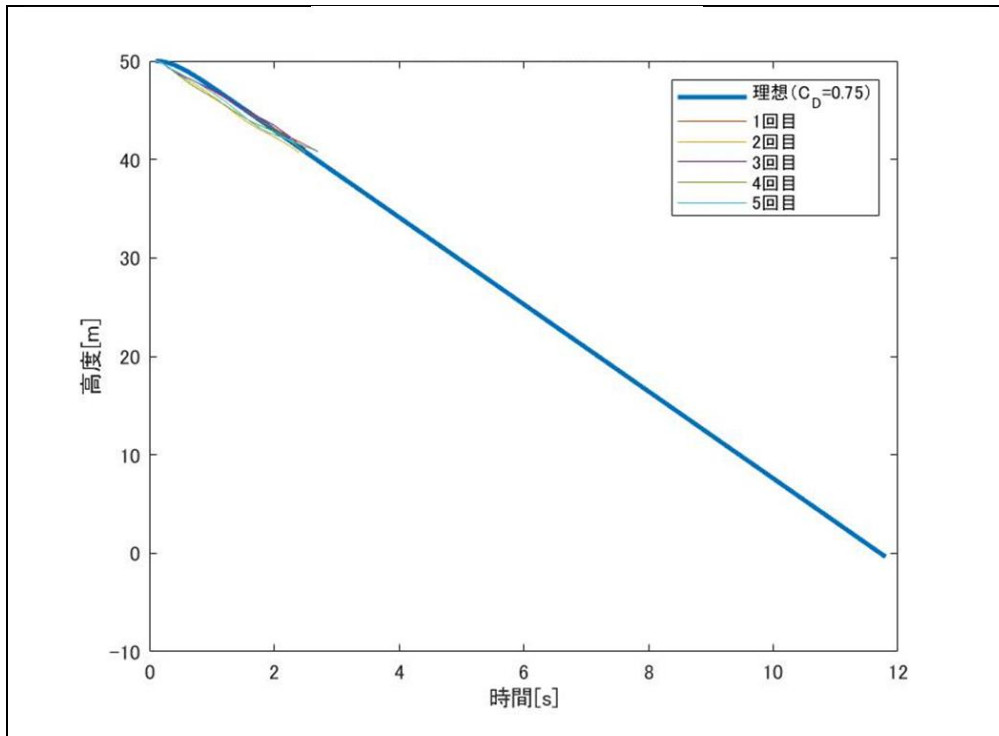


図 4-34.
測定した地面からの高度と理論での地面からの高度の変化の比較
(50mからの投下)

これらのグラフから抗力係数 0.75 は妥当であると考えられ、この値を採用して設計することにする。

なお、運動方程式を解く際に用いた大気密度については US Standard Atmosphere 1976 (https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/online-publications/miscellaneous/us-standard-atmosphere-1976/us-standard-atmosphere_st76-1562_noaa.pdf) から朝霧高原の高度 (950 m 程度) から $\rho = 1.1171 \text{ kg/m}^3$ を採用した。

終端速度が目標に到達することを見るため、 $v = 5 \text{ m/s}$ 、 $\dot{v} = 0 \text{ m/s}^2$ とおいて運動方程式を解くと

$$0 = mg - \frac{1}{2} \rho v_{req}^2 [(C_D \cdot S_0)_p + (C_D \cdot S_0)_v]$$

から

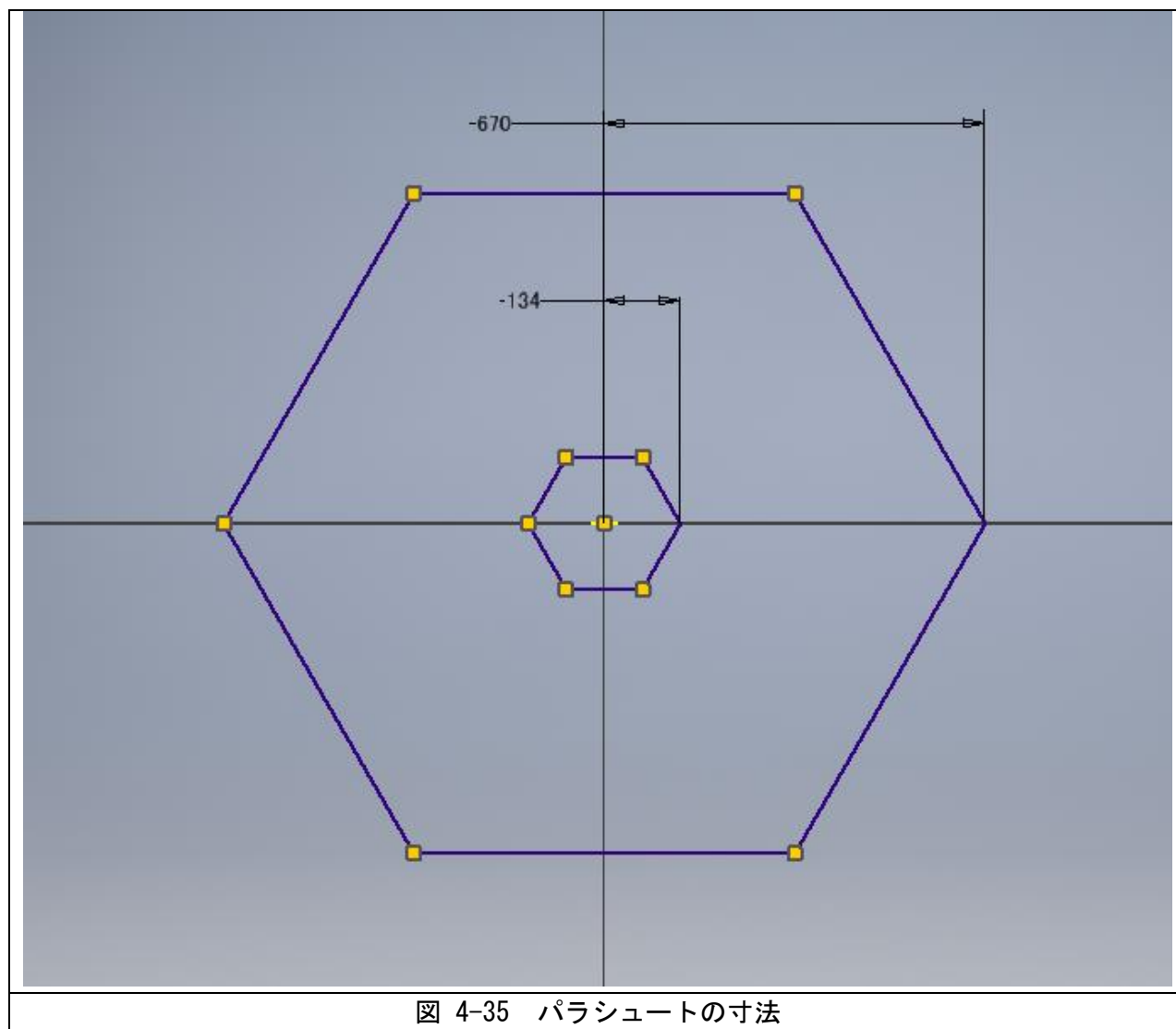
$$S_{0,p} = \frac{\frac{2mg}{\rho v_{req}^2} - (C_D \cdot S_0)_v}{C_{D,p}} = 0.9531 \text{ m}^2$$

として必要なパラシュートの公称面積が得られる。ここから逆算することにより、 R を求めると

$$R = \sqrt{\frac{2S_0}{3\sqrt{3}}} \approx 0.67 \text{ m}$$

となり、今回のパラシュートではこの寸法を採用することにした。

パラシュートの寸法を図 4-35 に示す。



パラシュートの材質はリップストップを用い、裁断部は折り返してナイロン 66 の糸を用いて縫った。ハトメは内径 5 mm のものを各々の頂点に計 6 個分つけた。実際に製作したパラシュートを図 4-36 に示す。

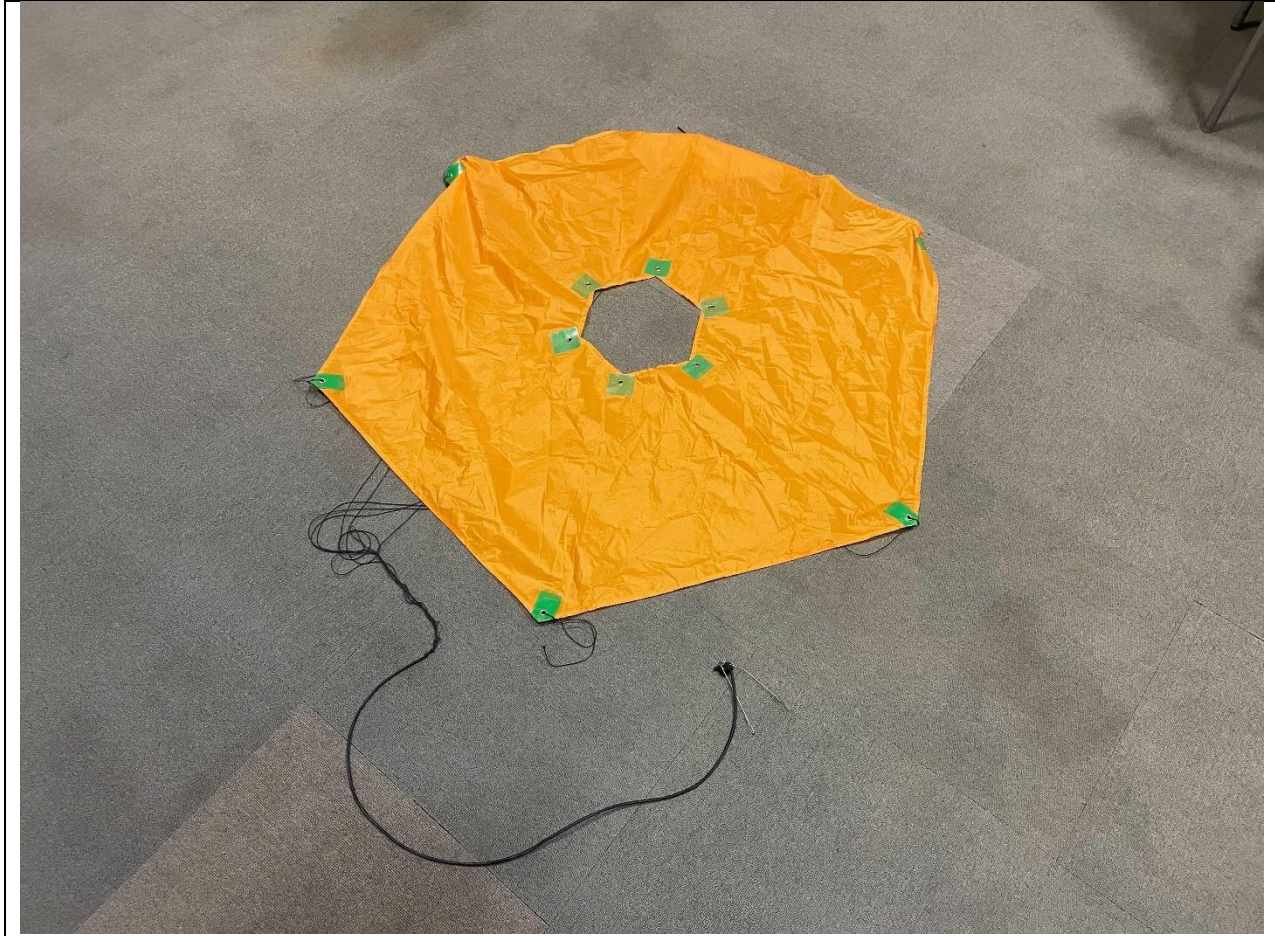


図 4-36 製作したパラシュート

シュラウドラインに関してはケブラーラインを用いて作成した。長さはパラシュートの公称径

$$D_0 = \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}} \approx 1.10$$

を用いて、Utah State University の資料「Recovery System: Parachutes 101」（参考 URL : http://mae-nas.eng.usu.edu/MAE_6530_Web/New_Course/launch_design/Section3.5.pdf）により、シュラウドラインは $1 < \frac{l}{D_0} < 2$ に設定することが多いため、この範囲内にあてはまる値を用いてシュラウドラインを $l = 1.5 \text{ m}$ と決定して作成している。

また、機体からの分離をひっかかりなく行うため溶断機構との接続部は両端がアイ加工されたワイヤを使用している。加えて、着地後、パラシュートが機体の上にかぶさらないようシュラウドラインを束ねた点からワイヤ部まで 1m 離し、収縮チューブによって硬化させている。

【電装基板】

電装基板の回路図を図 4-37～4-44、実装図を図 4-45、外観を図 4-46 に示す。

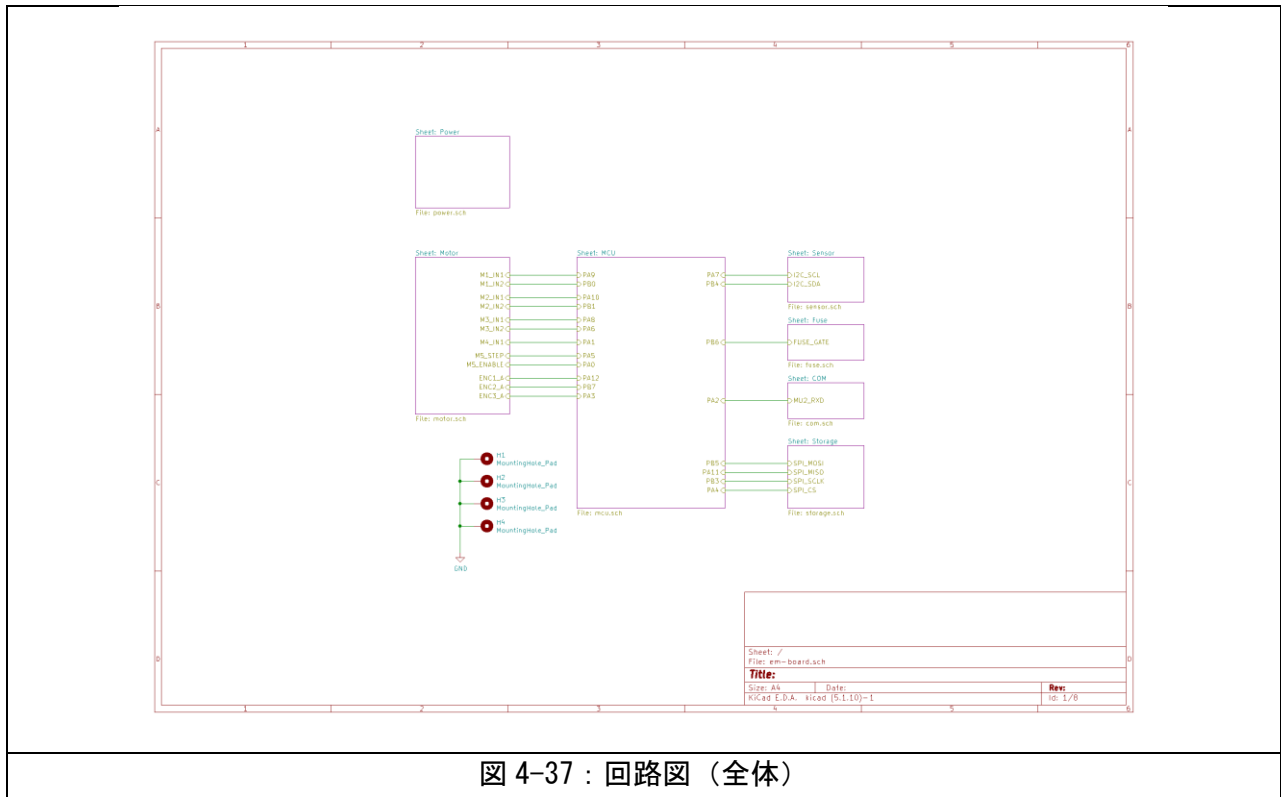


图 4-37 : 回路图 (全体)

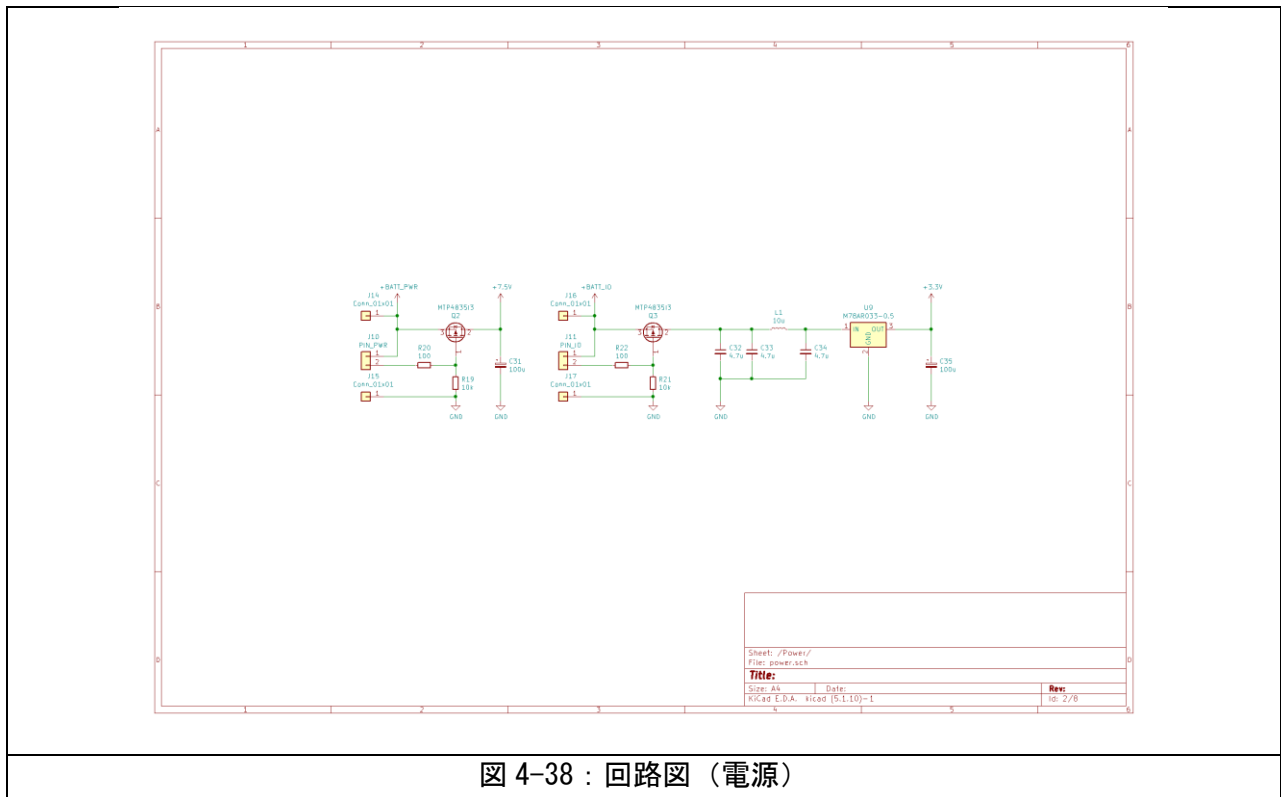


图 4-38 : 回路图 (電源)

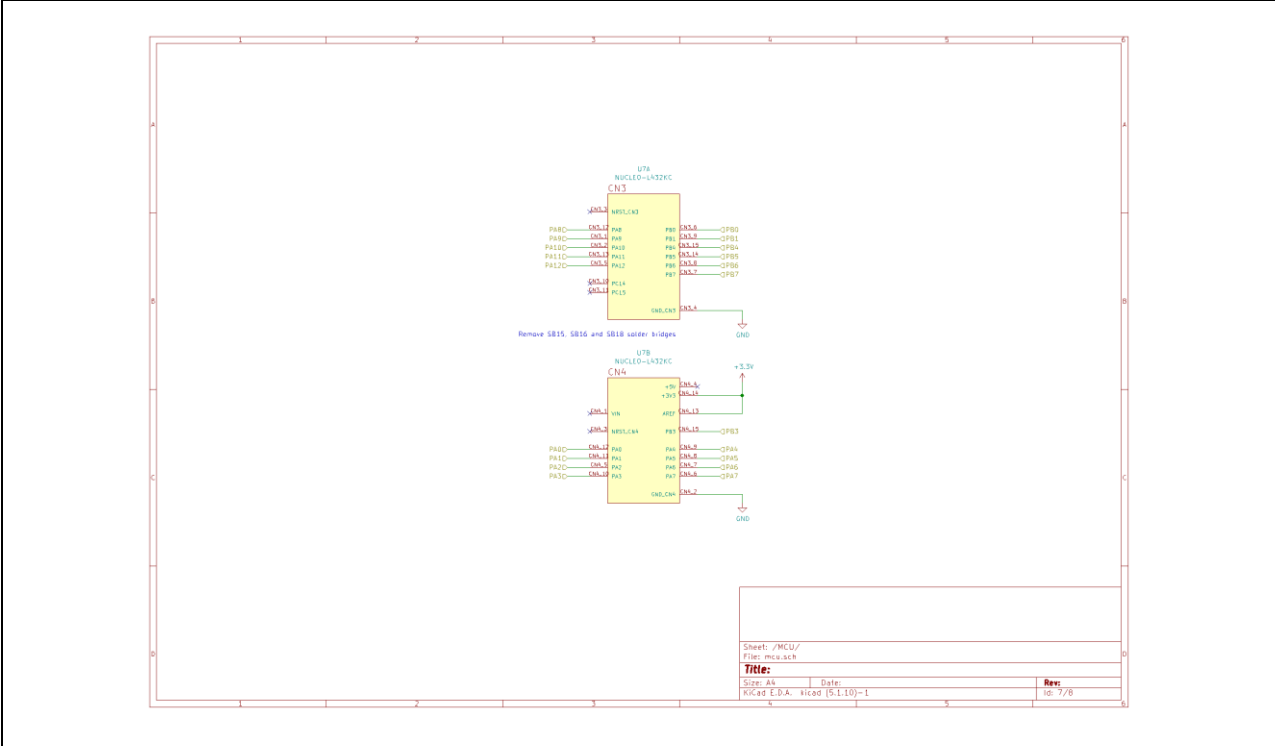


图 4-39 : 回路图 (OBC)

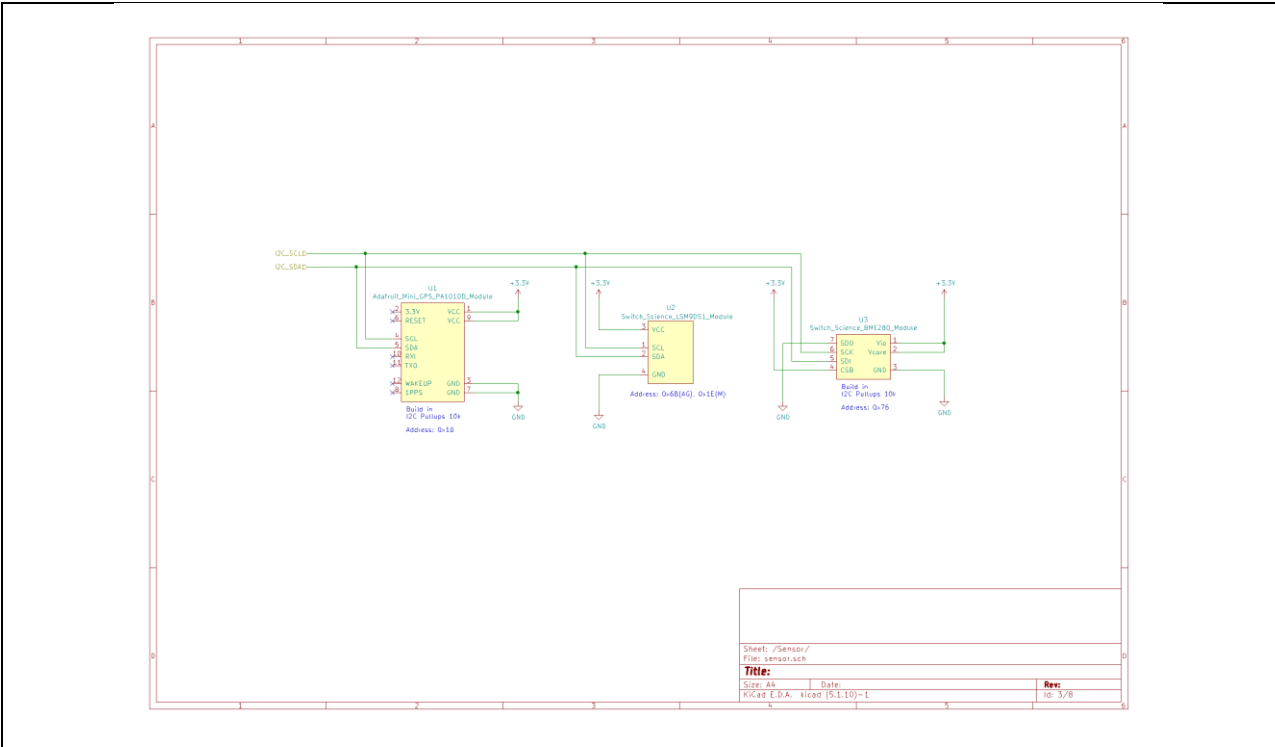


图 4-40 : 回路图 (センサ)

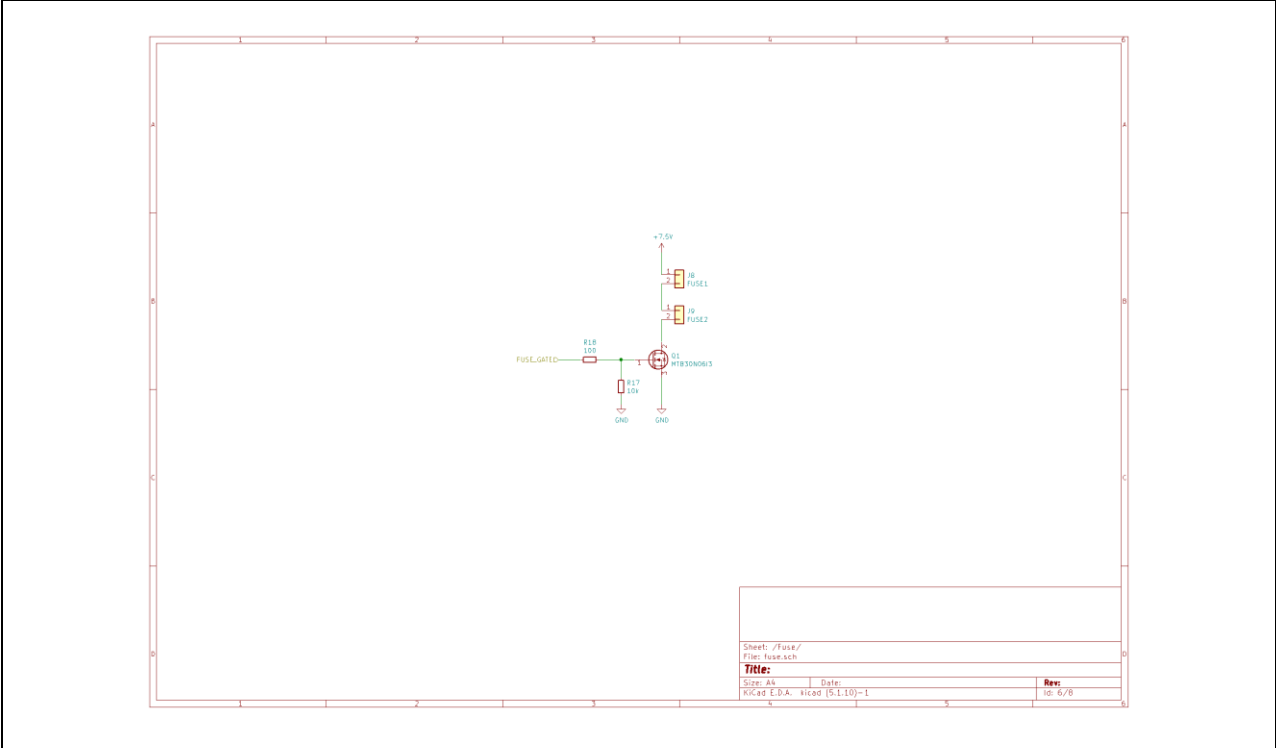


図 4-41 : 回路図 (パラシュート分離機構)

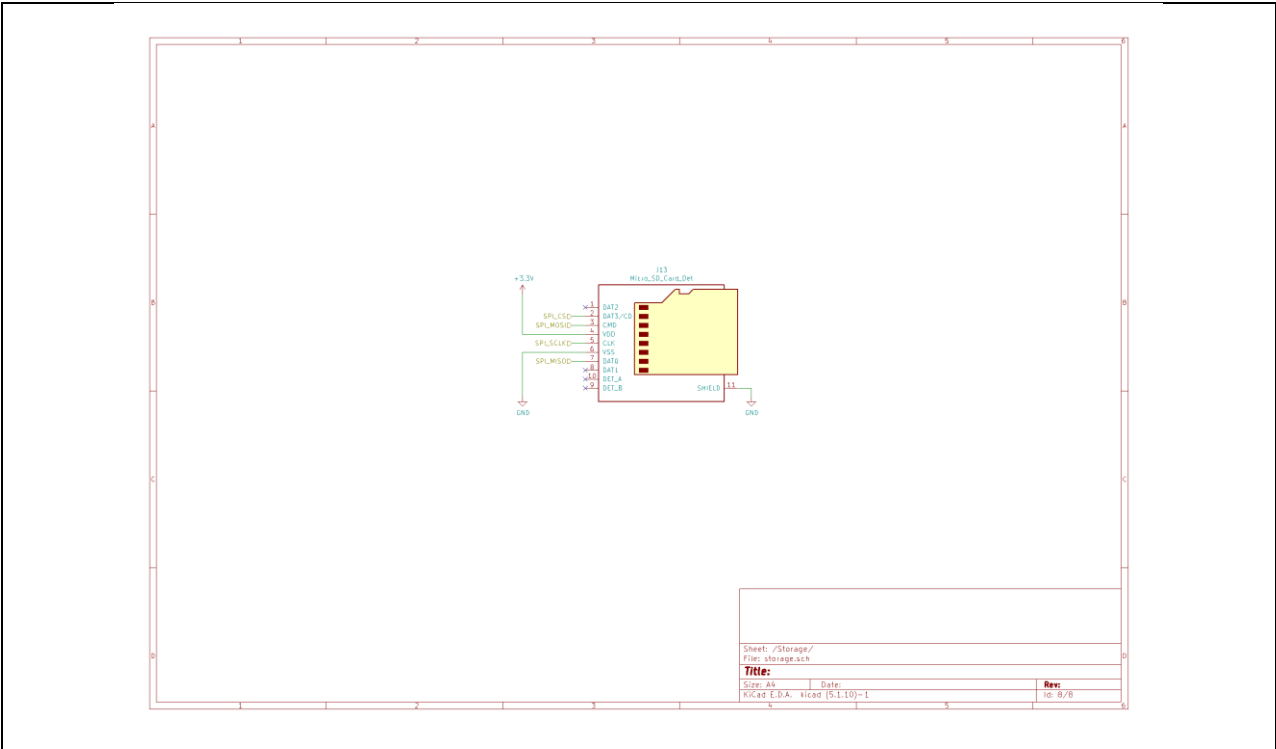


図 4-42 : 回路図 (ストレージ)

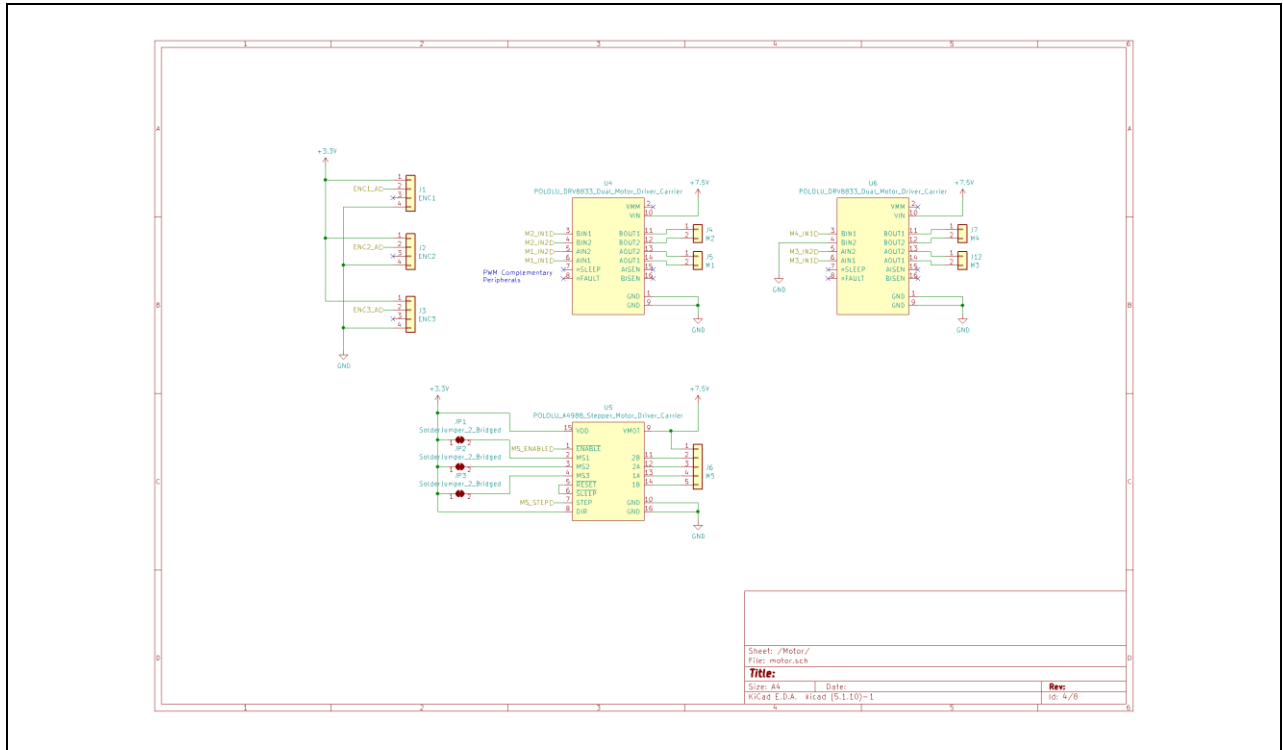


图 4-43 : 回路图 (ローバ走行機構・電極刺し込み機構)

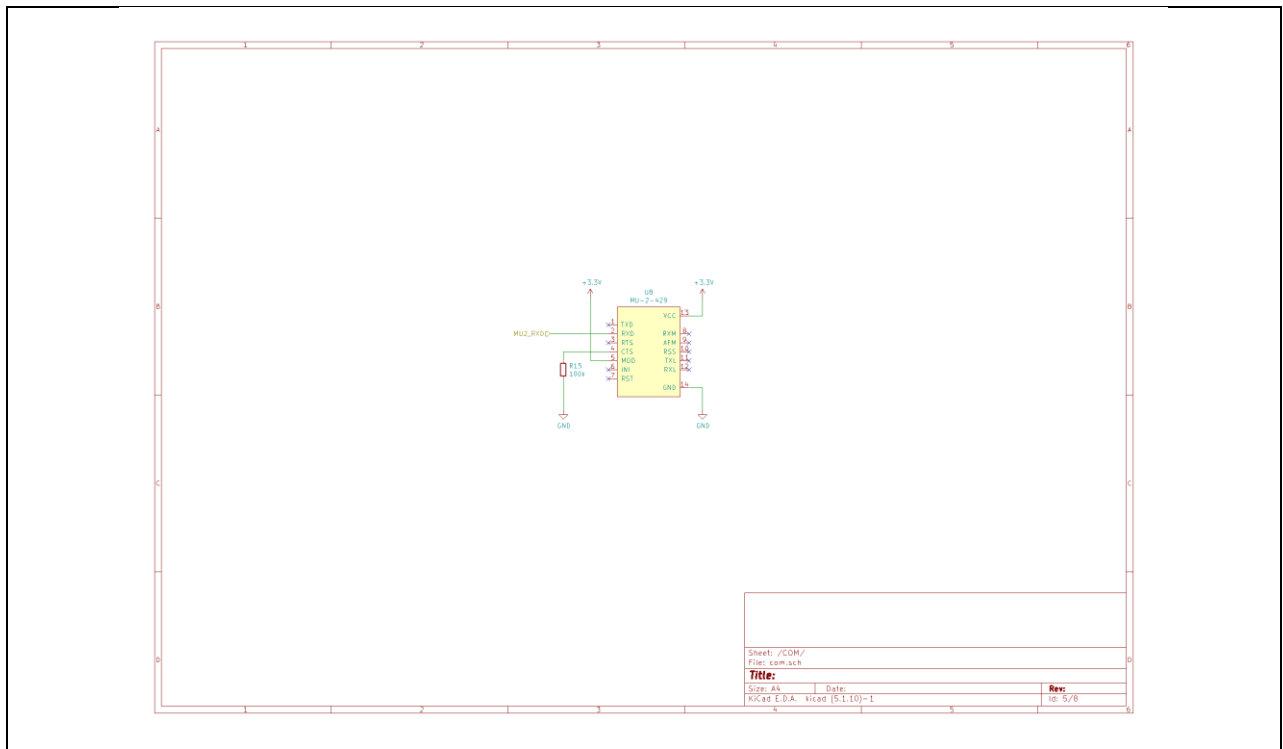


图 4-44 : 回路图 (無線機)

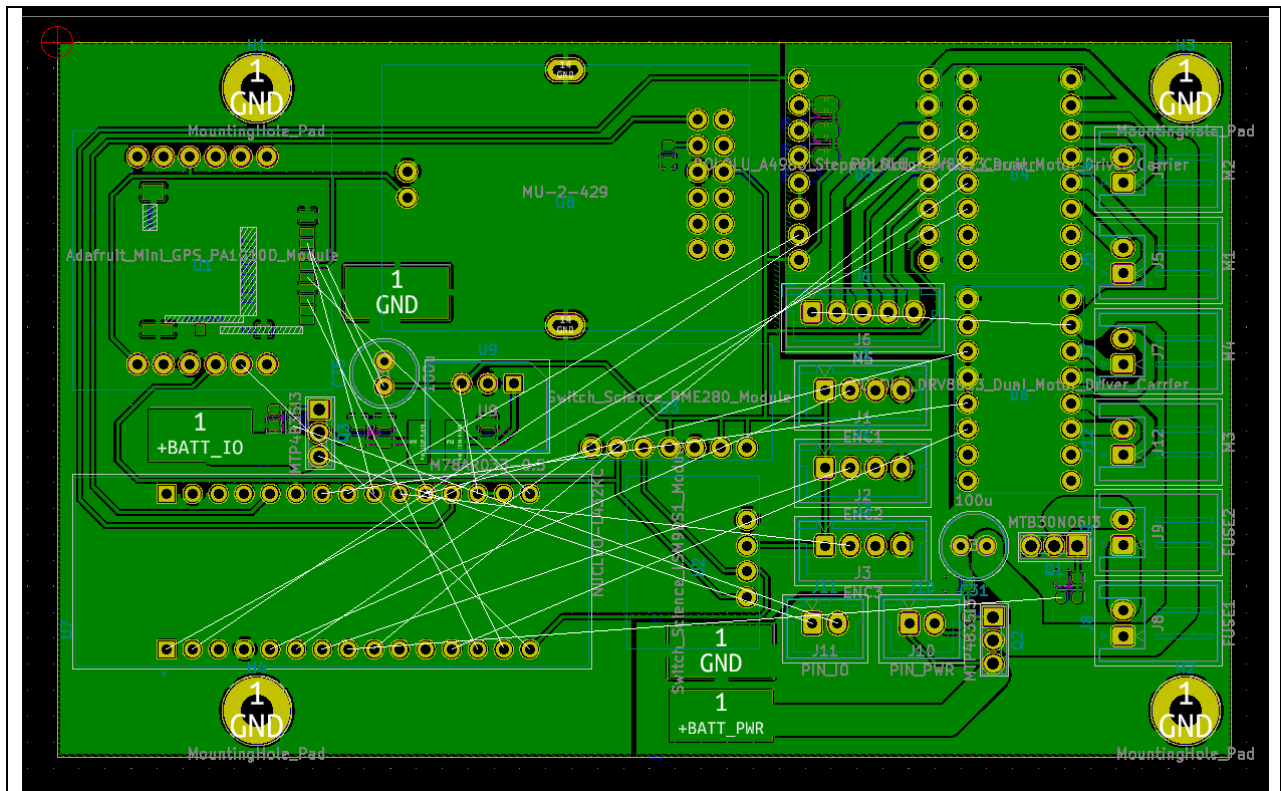


図 4-45 : 実装図

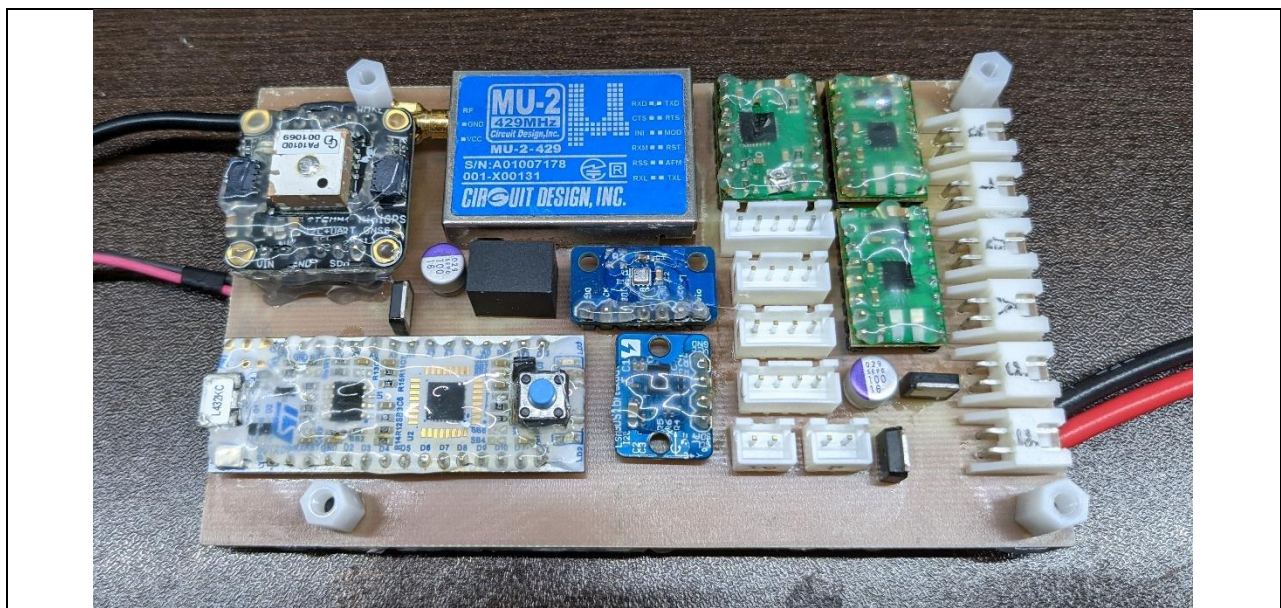
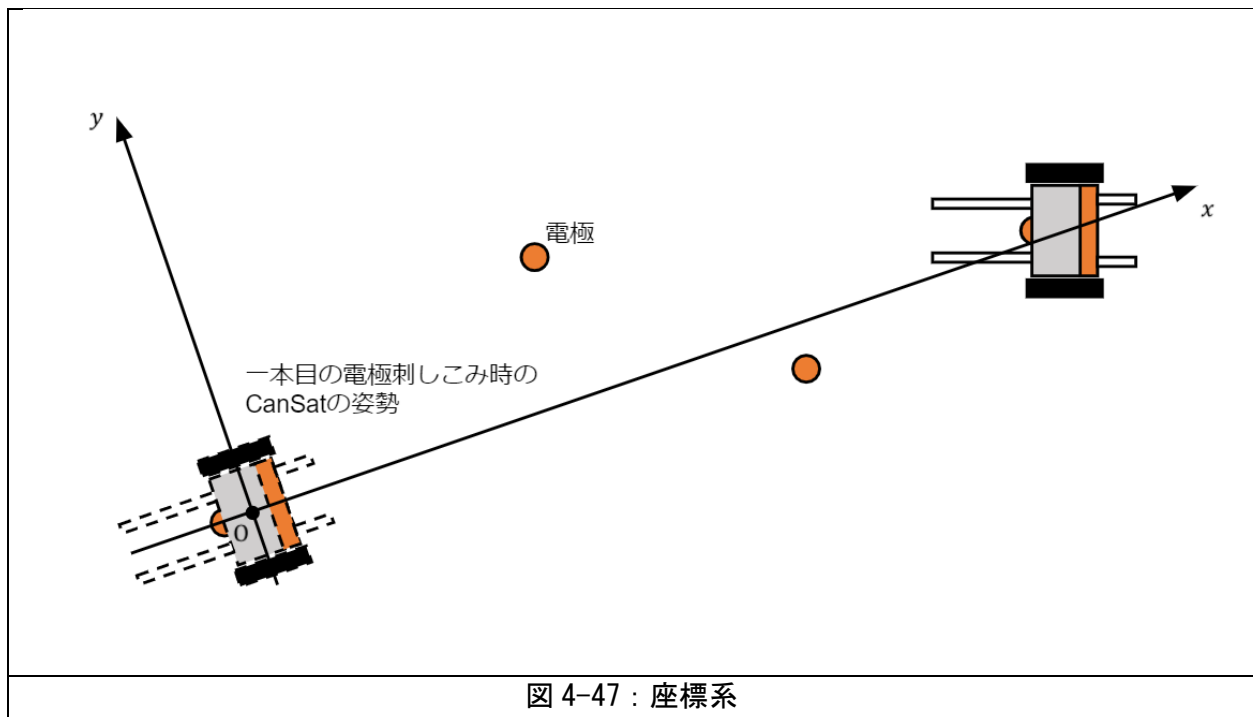


図 4-46 : 電装基板の外観

【位置推定】

両輪のモータにつけられたエンコーダによるオドメトリを基礎として、カルマンフィルタを利用したジャイロセンサとのフュージョンにより位置推定を行う。ここで利用するモデルは参考文献のモデルを基本としている。

カルマンフィルタによって推定する状態量は機体の位置 x, y [m]、機体の方位角 θ [rad]、機体の鉛直軸まわりの角速度 z [rad/s]、機体の速さ v [m/s]、ジャイロセンサのオフセット値 b_{gyr} [rad/s]、鉛直軸まわりのすべり ω_{slip} [rad/s]などである。なお機体の位置 x, y はCanSatの走行開始時における位置を原点とし、そのときの進行方向 x 軸、そのときの進行方向左側直角方向を y 軸とする座標系におけるものである。また、鉛直軸まわりのすべりについては、ロータリエンコーダの回転数差に表れないローバの回転、すなわちオドメトリによる加速度値と真の加速度値の差を表している。



状態方程式は持続予測モデルを基本とし、位置、方位角およびジャイロセンサのバイアスはシステムノイズをのぞくと以下のように得る。ただし t [s]はカルマンフィルタの実行周期、 b_0 はCanSatを静止させた状態において測定したジャイロセンサによる z 軸まわりの加速度値の平均である。

$$\begin{aligned}\theta_{k+1} &= \theta_k + \omega_z \Delta t \\ x_{k+1} &= x_k + v \cos \theta \Delta t \\ y_{k+1} &= y_k + v \sin \theta \Delta t \\ b_{k+1} &= b_0\end{aligned}$$

上式および持続予測モデルに対し参考文献を基とするシステムノイズを右辺に加えたものを状態方程式としている。

一方、観測値はエンコーダによる角速度 ω_{wheel} [rad/s]と速さ v_{wheel} [m/s]、ジャイロセンサの角速度 ω_{gyr} [rad/s]の三つであり、観測方程式は観測ノイズを除くと以下のように定める。

$$\omega_{wheel} = \omega_z + \omega_{slip}$$

$$\omega_{gyr} = \omega_z + b_{gyr}$$

$$v_{wheel} = v$$

上式に参考文献を基とする観測ノイズを右辺に加えたものを観測方程式としている。

参考文献 : Jinglin Shen, David Tick, Nicholas Gans, “Localization Through Fusion of Discrete and Continuous Epipolar Geometry with Wheel and IMU Odometry”, in 2011 American Control Conference.

【位置制御】

位置推定により得られた CanSat の姿勢 (x, y, θ) をもとにフィードバック制御によって CanSat の航法を行う。目標経路は CanSat の初期姿勢における x 軸上、すなわち y, θ の目標値を

$$x = 0, \theta = 0$$

とする。CanSat の車輪は定回転数制御するため、上記のような姿勢になるように左右の車輪の目標回転数をフィードバック制御する。

3. システム図 (CanSat 搭載計器仕様一覧)

本ミッションにおける CanSat のシステムダイアグラムを図 4-48 に示す。

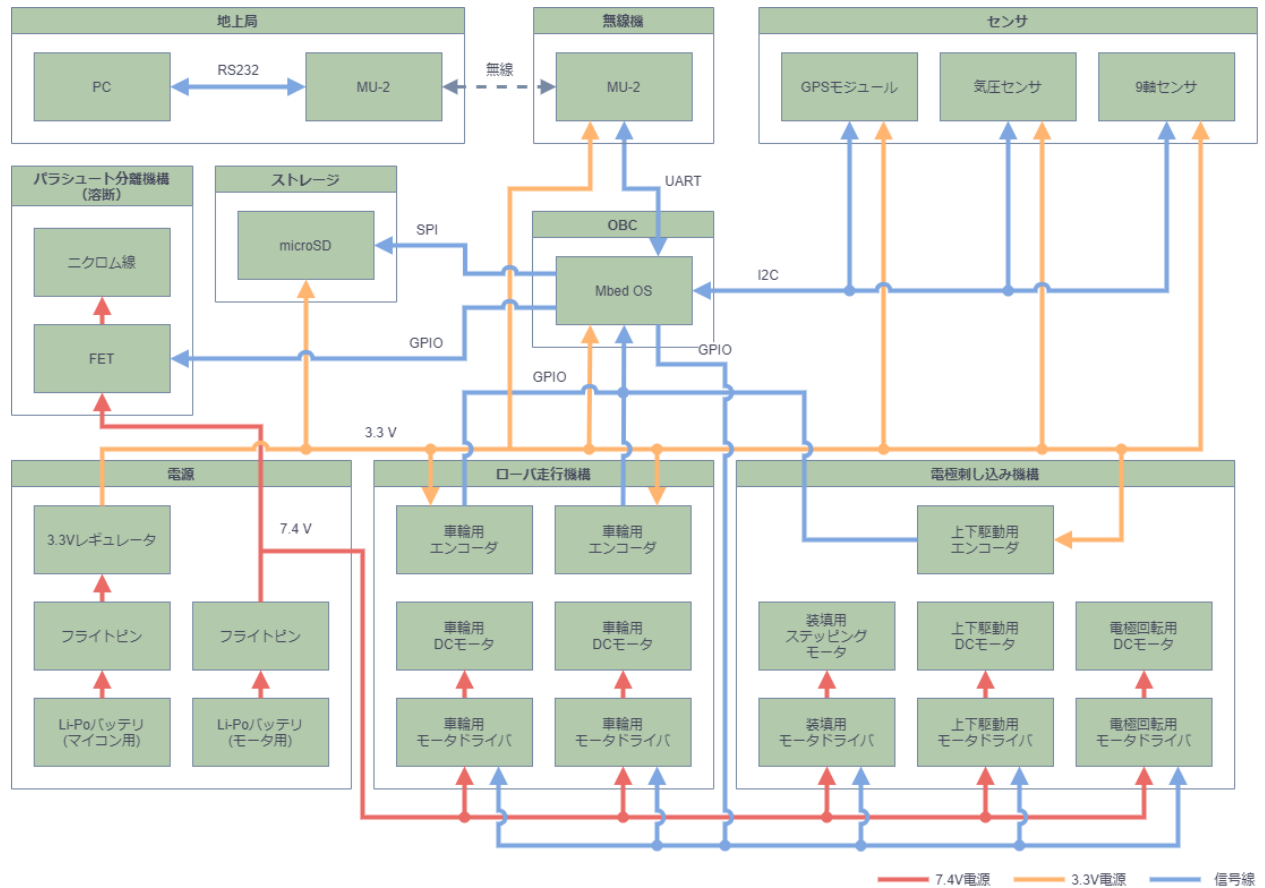


図 4-48. システムダイアグラム

それぞれのコンポーネントの詳細を表 4-1 に示す。

表 4-1 搭載コンポーネントの詳細

OBC

コンポーネント名	詳細
OBC Nucleo-L432KC (Mbed OS)	制御ボード。各モータの制御、センサデータの取得、無線送受信、ログデータの保存、溶断機構の起動を行う。

電源系

Lipo バッテリ (マイコン用)	3.3V レギュレータを通して、OBC、各センサ、ストレージ、エンコーダへ電力を供給する。
----------------------	---

Noir LiPo 7.4V 560mAh	電圧 7.4V (2 セル)、560mAh、20C。
Lipo バッテリ (モータ用) Noir LiPo 7.4V 1300mAh	電圧変換を行わず、各モータ、溶断機構のニクロム線へ電力を供給する。 電圧 7.4V (2 セル)、1300mAh、20C。
フライトピン MTP483513	CanSat 放出後に OBC を起動させるスイッチとして機能する。 放出時にピンが抜けることで、OBC への電力供給が開始され、OBC が起動する。
3.3V レギュレータ M78AR033-0.5	Lipo バッテリーから 3.3V 電源を得るための電圧変換を行う。 得られた電源は OBC、各センサ、ストレージ、エンコーダへ供給される。最大電流は、各コンポーネントの消費電流から決定する。

無線系

無線機 MU-2-429	地上局との通信に用いる。主に、GPS 位置情報、気圧高度、シーケンス状態のダウンリンクを行う。
-----------------	---

ストレージ系

microSD 32GB	ログデータの保存に用いる。 主に、GPS 位置情報、制御履歴を保存する。
-----------------	---

センサ系

GPS モジュール PA1010D	CanSat の位置情報の取得を行う。
気圧センサ BME280	気圧、温度から気圧高度を計算する。 気圧高度の変化を着地検出に使用する。
9 軸センサ LSM9DS1	加速度、角加速度、地磁気から機体姿勢を推定する。 推定値を走行制御に用いる。

パラシュート分離機構 (溶断) 系

FET MTB30N0613	ニクロム線への電力供給を OBC の信号によりスイッチする。 ニクロム線の消費電力から許容電流を定め素子を決定する。
ニクロム線 HK-NK05H	発熱によって、ナイロン線を溶断する。 FET によって、発熱がスイッチされる。

ローバ走行機構系

車輪用 DC モータ POLOLU-3080	ローバの車輪を駆動するモータ。
車輪用エンコーダ POLOLU-3081	車輪用モータの回転数を計測する。 車輪の定回転数制御および、走行制御のためのオドメトリに用いる。
車輪用 モータドライバ DRV8833	車輪用モータへの電力供給を OBC の信号によりスイッチする。

電極刺し込み機構系

装填用ステッピングモータ CX28BYJ48	装填機構を駆動するモータ。
装填用モータドライバ A4988	装填用ステッピングモータへの電力供給を OBC の信号によりスイッチする。
上下駆動用 DC モータ POLOLU-3078	上下駆動部を駆動させるモータ。
上下駆動用エンコーダ POLOLU-3081	モータの回転数から、上下駆動部の位置を計測する。
上下駆動用モータドライバ DRV8833	上下駆動用 DC モータへの電力供給を OBC の信号によりスイッチする。
電極回転用 DC モータ POLOLU-3080	電極回転部を駆動させるモータ。
電極回転用モータドライバ DRV8833	電極回転用 DC モータへの電力供給を OBC の信号によりスイッチする。

4. アルゴリズム

本ミッションでは、ミッションシーケンスを「着地検出シーケンス」、「パラシュート分離シーケンス」、「刺し込みシーケンス」、「走行シーケンス」、「位置情報ループ」の5種類のシーケンスに分けて行う。「刺し込みシーケンス」は1本目～4本目の電極、「走行シーケンス」は2本目～4本目の電極に応じて、繰り返し行われる。

ミッションシーケンス全体をフローチャート形式で図 4-49 に示す。図 4-49 中の定義済み処理については、図 4-50～4-52 で示している。

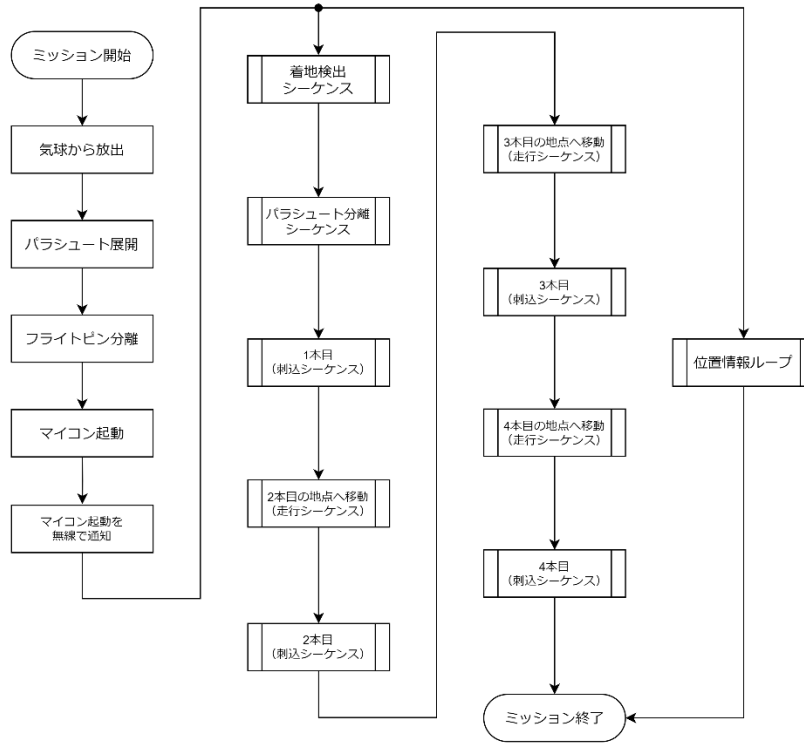


図 4-49 ミッションシーケンス全体

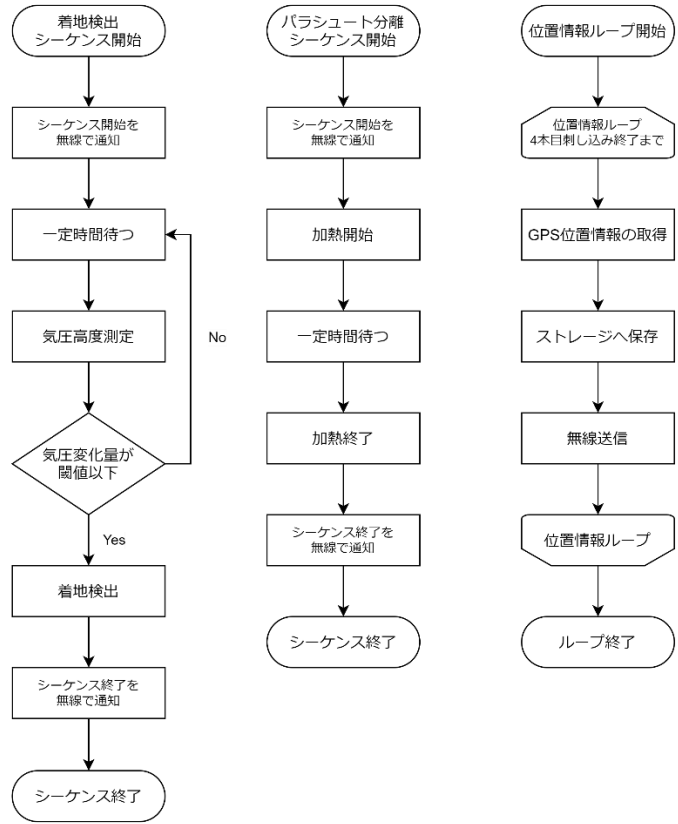


図 4-50 着地検出・パラシュート分離シーケンス、位置情報ループ

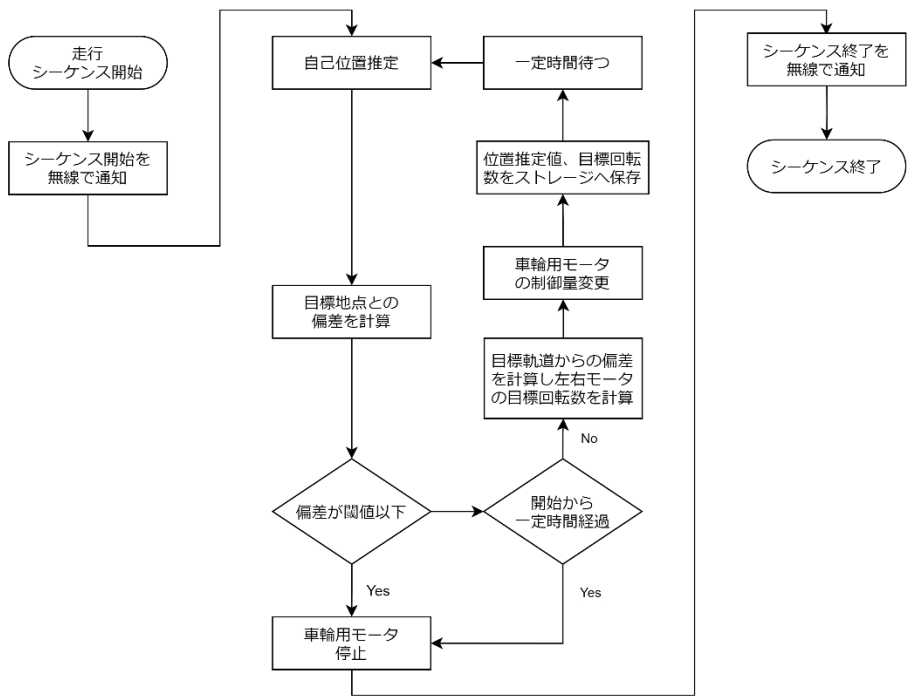


図 4-51 走行シーケンス

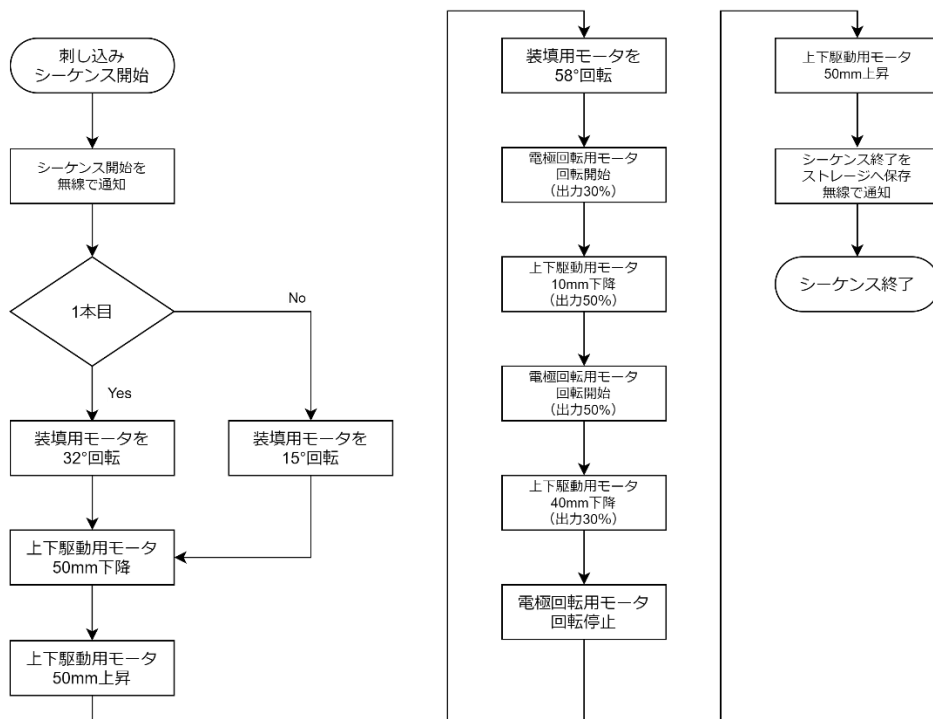


図 4-52 刺し込みシーケンス

第5章 試験項目設定

番号	検証項目名	対応する自己審査項目の 要求番号（複数可）	実施日
V1	質量試験	R1	10/23
V2	機体の収納・放出試験	R1、R10	10/18
V3	GPS データダウンリンク試験	R2	10/24
V4	パラシュート投下試験	R3、M1	7/24
V5	静荷重試験	R4	10/20
V6	振動試験	R5	10/20
V7	開傘衝撃試験	R6	10/20. 21
V8	通信機電源 OFF/ON 試験	R7	10/22
V9	周波数変更試験	R8	10/22
V10	End-to-end 試験	R9	10/23
V11	着地衝撃試験	M2	10/20
V12	電力耐久試験	M3	10/24
V13	OBC 起動試験	M4	10/22
V14	パラシュート分離試験	M5	10/18
V15	スタビライザー展開試験	M6	10/11
V16	走破性能試験	M7	8/27
V17	30m 走行試験	M8	8/27
V18	電極装填試験	M9	10/14
V19	電極刺しこみ試験	M10	10/15
V20	ケーブル送り出し試験	M11	9/15
V21	電気探査試験	M12	8/21
V22	位置推定・制御試験	M13、M14	8/27

第6章 実施試験内容

1. システム要求を満たすための試験内容

(V1) 質量試験

○ 要求項目

【R1】質量と容積がレギュレーションを満たすことを確認できている。

○ 目的

CanSat とパラシュートを合わせた質量が規定質量である 1050 g 以下を満たすことを確認する。

○ 試験日時

2021 年 10 月 23 日 (土)

18 : 00

○ 試験場所

東京工業大学 大岡山キャンパス

○ 参加者

大坪恵人

○ 試験内容

質量計で測定を実施し、機体とパラシュートを含めた全ての質量が、レギュレーションに記載されている質量 (1050 g) 以下であることを確認する。

○ 結果

質量を測定した様子を図 6-1 に示す。



図 6-1 測定した質量

このように、パラシュートを含めた機体の質量は1020gであり、レギュレーションである1050gに収まっていることが確認できる。

○ 結論

試験によって質量がレギュレーションを満たしていることが確認できた。

(V2) 機体の収納・放出試験

○ 要求項目

【R1】質量と容積がレギュレーションを満たすことが確認できている。

【R10】CanSatの収納・投下準備が5分以内でできている。

○ 目的

1. CanSatとパラシュートを合わせた容積がキャリア(内径146mm、高さ240mm)に収納でき、さらに、自重でキャリアから放出できることを確認する。
2. CanSatを素早く収納できるようにする。

○ 試験日時

2021年10月18日(火)

19:00~19:30

- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス

- 参加者
大坪恵人
下岡大樹
塚本悠太

- 試験方法
 - 試験系
 - CanSat
 - パラシュート
 - キャリア

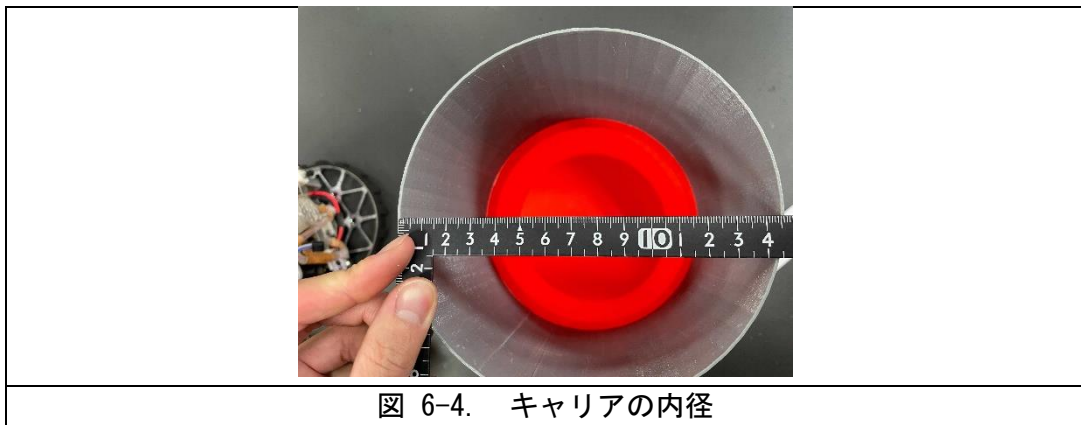
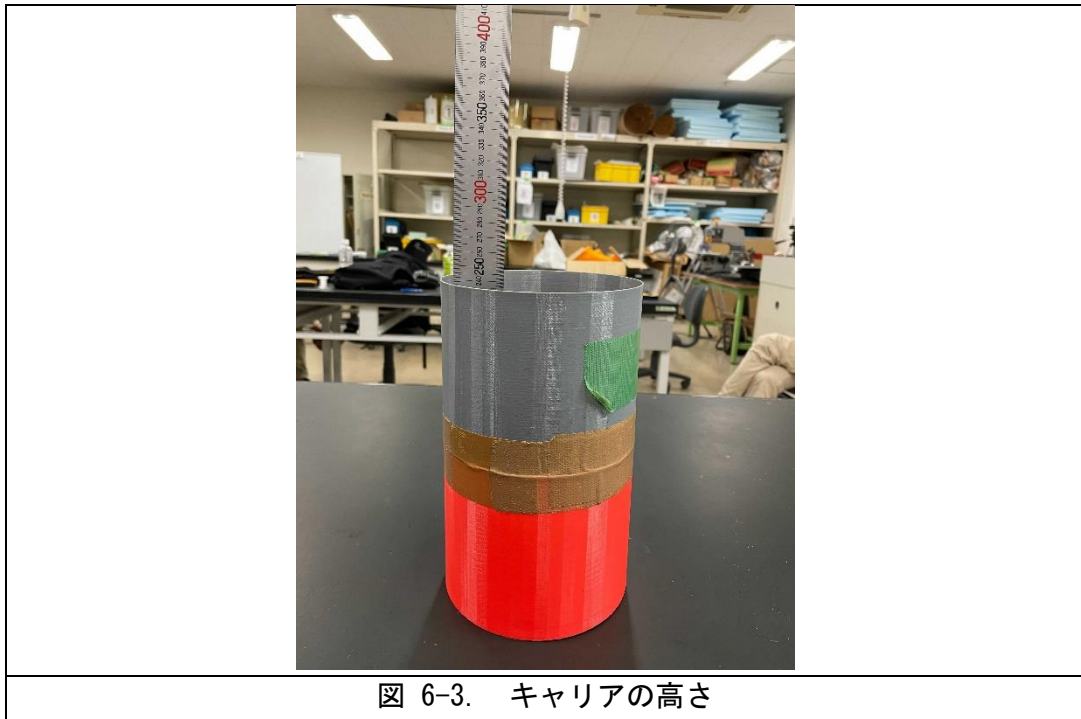


■ 試験手順

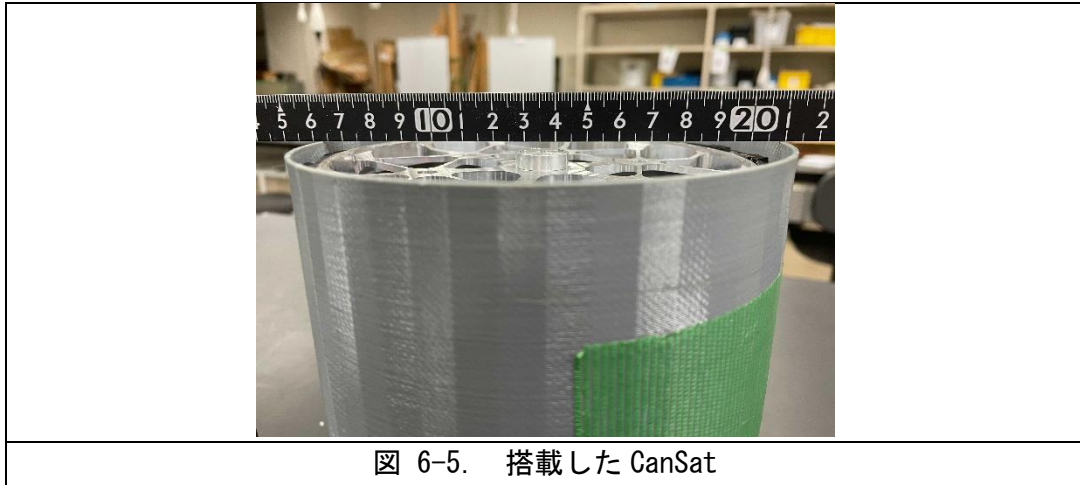
1. キャリアを作成し、内径 146 mm、高さ 240 mm であることを確認する。
2. CanSat とパラシュートを合わせてキャリア内に収納できることを確かめる。
3. キャリアから収納した CanSat とパラシュートが自重によって放出されることを確かめる。
4. 本番を模擬し、5 分以内に CanSat とパラシュートがキャリアに収納でき、投下準備まで持っていけることを確認する。

○ 試験結果

試験で使用したキャリアは図 6-3 および図 6-4 よりレギュレーションに収まっていることが確認できた。



キャリアに搭載した CanSat は図 6-5 に示す通りしっかりと収まっていることが確認できる。



試験の動画は以下の URL にアップロードしてある。

(1 回目) <https://youtu.be/DN0gHHPX9kI>

1:53 : キャリアに収納

2:14 : キャリアから放出

(2 回目) <https://youtu.be/ypAGw3Q90Yo>

1:51 : キャリアに収納

2:25 : キャリアから放出

(3 回目) <https://youtu.be/tiRWp71RZ9U>

1:49 : キャリアに収納

2:12 : キャリアから放出

○ 結論

試験結果より、機体が自重でキャリアから放出できることを確認できた。

(V3) GPS データダウンリンク試験

○ 要求項目

【R2】ロスト対策を実施しており、有効性が試験で確認できている。（例：地上局にダウンリンクする場合、ACTS で十分な通信距離が実現できると推測できる根拠が明確に示されていること。）

○ 目的

CanSat のロスト防止のため、CanSat に搭載した無線機によって、CanSat の GPS 位置情報を地上局へ送信し、表示することで捜索することを可能にする。

本試験では、CanSat 搭載の無線機（以下、移動局）と地上局の無線機の間で、十分な距離の通信が可能であることを確認する。

○ 試験日時

2021 年 10 月 24 日（日）
3:59～4:08

○ 試験場所

多摩川河川敷 丸子橋付近

○ 参加者

林和輝
荒井湧介

○ 試験方法

■ 試験系



図 6-6. 試験系

- CanSat
- PC
- MU2-USB-429

■ 試験手順

1. 移動局と地上局の無線通信リンクを適切に設定する。
2. 地上局を多摩川河川敷に設置する。
3. 移動局と地上局を同じ場所に設置し、移動局の GPS 位置情報を記録する。
4. 1 秒毎に自信の GPS 位置情報を送信するようにした移動局を持って、川沿いを進む。
5. 通信が途絶えた直前の移動局の GPS 位置情報から通信可能距離を計算する。

表 6-1 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	地上局の位置情報	PC MU2-USB- 429	ダウンリンクデータにおける初期位置の緯度経度
2	通信ロス直前の移動局の位置情報	PC MU2-USB- 429	ダウンリンクデータにおける最終受信データの緯度経度

○ 試験結果

地上局の位置情報：北緯 35° 35.048200' (35.58414°)

東経 ~139° 39.996400' (139.6666°)

通信ロス直前の移動局の位置情報：北緯 35° 34.711200' (35.57852°)

東経 139° 40.150600' (139.6692°)

2 地点間の直線距離：666.592 m



○ 結論

試験結果より、ACTS においてロスト対策が有効であることが確認できた。

(V4) パラシュート投下試験

○ 要求項目

【R3】地表近くで危険な速度で落下させないための減速機構を有し、その性能が試験で確認できている。

【M1】パラシュートが展開できる。

○ 目的

1. パラシュートが正常に展開することを確認する。
2. パラシュートによって機体の落下速度が終端速度に達することを確認する。
3. 終端速度が機体の強度設計として保障している降下速度である 5m/s 以下になることを確認する。

○ 試験日時

2021 年 7 月 24 日 (土)

5:30~9:00

- 試験場所
多摩川河川敷 丸子橋下

- 参加者
大坪 恵人
塚本 悠太
田代 克樹
荒井 湧介

- 試験方法
 - 試験系
 - パラシュート
 - ダミーマス (1 kg)
 - メジャー

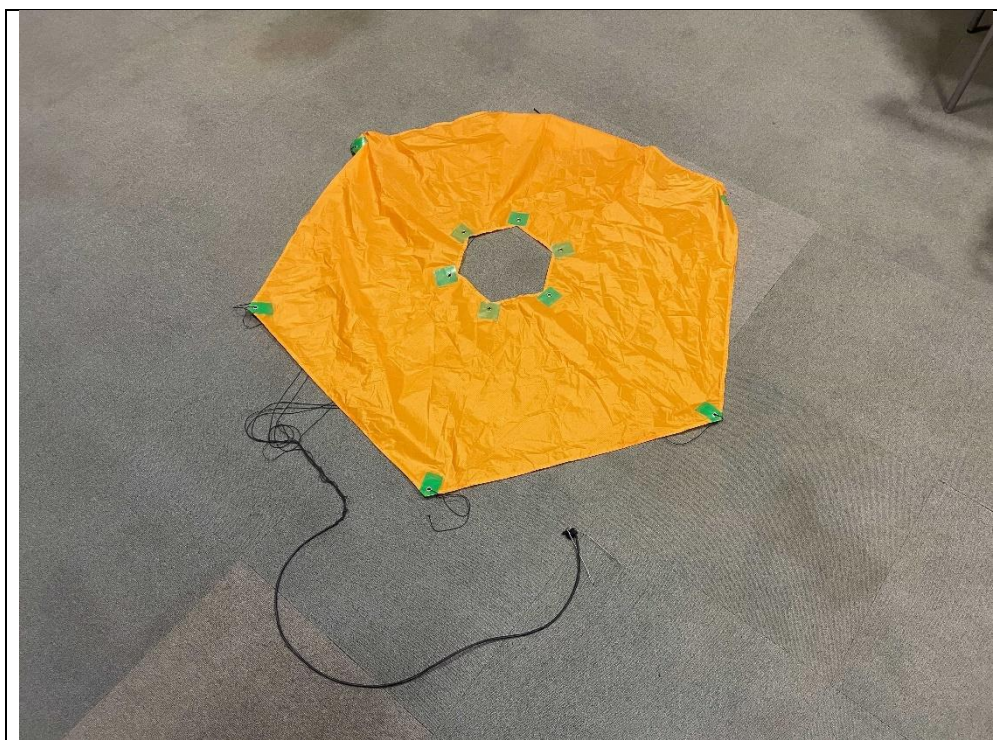


図 6-8. 使用したパラシュート



図 6-9. 使用したダミーマス

■ 試験手順

1. 機体を模擬したダミーマスにパラシュートを取り付け、パラシュートを折りたたんだ状態で投下して開傘することを確認する。(2回実施)
2. パラシュートを開いた状態で投下し、終端速度に達することを確認し、その速度を測定する。(5回実施)

○ 試験結果

手順1の開傘チェックについて、試験の様子の動画及び開傘の成功可否を表6-2に示す。いずれも問題なくパラシュートが展開できていることが確認できた。

表 6-2 手順1・試験結果

	開傘	試験動画
1回目	成功	https://youtu.be/MZuy21QTnho
2回目	成功	https://youtu.be/Y7Kh1ues47I

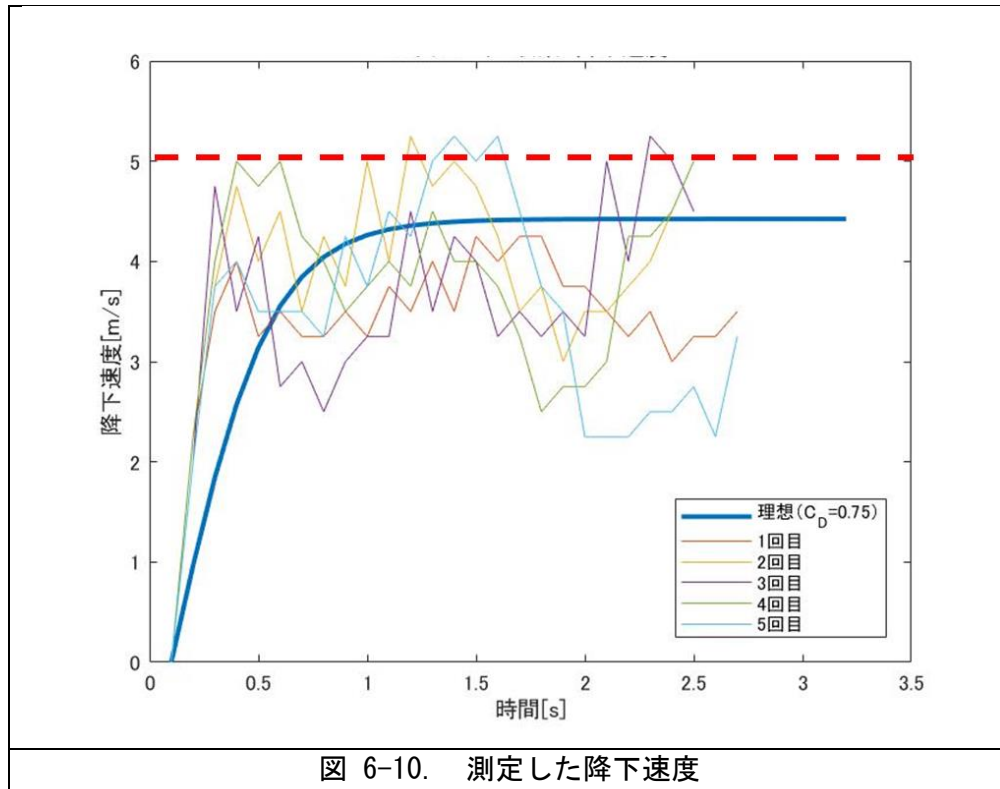
手順2の終端速度の測定について、試験の様子の動画を表6-3に示す。

表 6-3 手順2・試験結果

	試験の動画
1回目	https://youtu.be/k9Jhsnxkph4
2回目	https://youtu.be/zUWnTucs-JU

3回目	https://youtu.be/4wFwkWt3pFE
4回目	https://youtu.be/KDfgoWpP7AA
5回目	https://youtu.be/fzCMCYyYRYU

また、動画より測定した効果速度のグラフを図 6-9 に示す。



このように、いずれも終端速度に至っていることが確認できた。また、設計の際に利用した抗力係数 0.75 の理想的なモデルに対して誤差をもって近い傾向が見て取れた。また、終端速度が 5m/s 以下となることが確認できた。

○ 結論

試験結果より、パラシュートが問題なく展開されることが確認できた。また、パラシュートの展開により降下速度が終端速度に達し、それが 5m/s 以下となり機体にとって安全に着地できる降下速度となることを確認できた。

(V5) 静荷重試験

○ 要求項目

【R4】打ち上げ時の準静的荷重によって、安全基準を充足するための機能が損なわれないことが試験で確認できている。

- 目的
ロケットによって打ち上げ時にかかると想定される荷重 10G に機体が耐えうるかを確認する。
- 試験日時
2021年10月21日（水）
16:00～16:30
- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
大坪恵人
尾関優作
林和輝
塚本悠太
田代克樹
荒井湧介
- 試験方法
 - 試験系

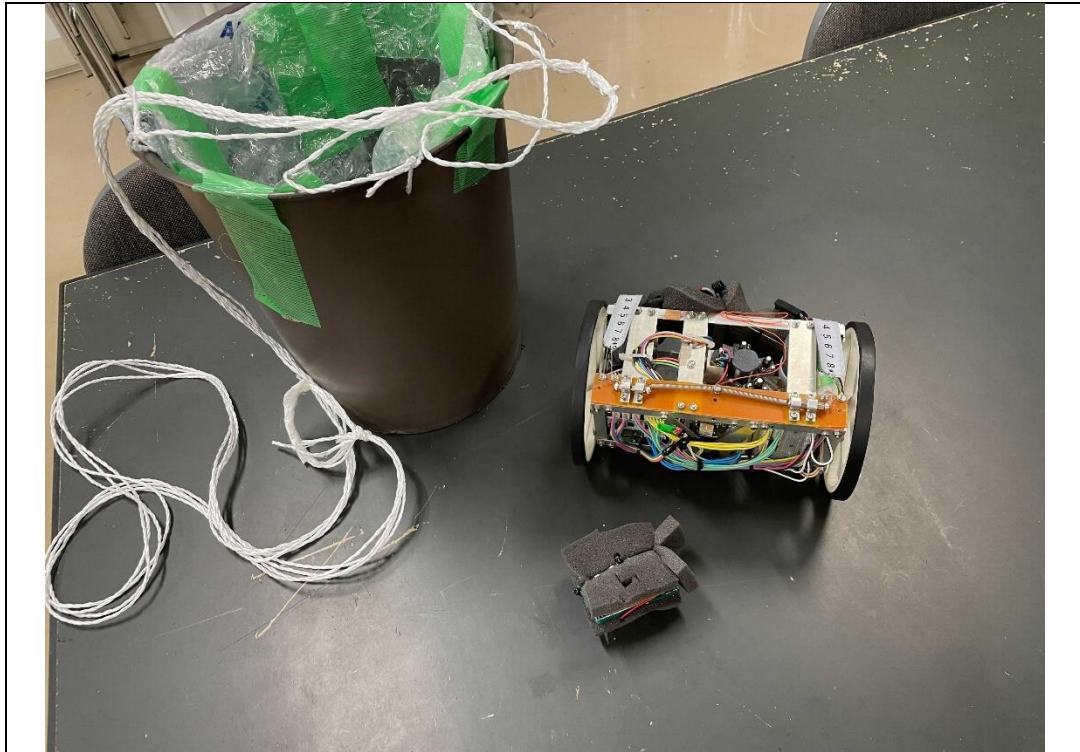


図 6-11. 試験系

- CanSat
- 加速度センサ
- 試験容器

■ 試験条件

- CanSat に 10G 程度の準静的な加速度を 30 秒程度負荷する。
- 10G の負荷については試験容器に長さ 2.5m のロープを取り付け、1 秒に 1 回転以上回すことで得られる遠心力によって準静的荷重を再現する。

半径 2.5m、回転速度 $2\pi \text{ rad/s}$ によって得られる遠心加速度は

$$2.5 \text{ m} \times (2\pi \text{ rad/s})^2 = 98.6960 \dots \text{ m/s}^2$$

より、

$$10 \text{ G} \approx 98.1 \text{ m/s}^2$$

以上の加速度を再現できると考えられる。

- 加速度については加速度センサを用いて測定する。加速度センサには ADXL375 を用いる。

■ 試験手順

1. CanSat の外観に異常がないかを確認する。
2. CanSat に加速度センサを括り付ける
3. CanSat と加速度センサを試験容器に入れる。
4. 周囲の安全を確認した後、試験容器に取り付けてあるロープの下端を人が持ち、半径 2.5m で回転させる。

5. 毎秒 1 回転以上の負荷が 30 秒以上加わったタイミングで回転をやめる。
6. CanSat を試験容器から取り出す。
7. 加速度センサを取り外し、データを回収。10G 程度の荷重が 30 秒以上にわたって加わっていることを確認する。
8. 外観の破損がないかを確認する。
9. 動作確認用のプログラムを実行し、機能の確認を行う。

表 6-4 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	静荷重の確認	加速度センサの値を確認	10G 程度の加速度が 30 秒程度計測されていること
2	外観の破損がないことの確認	目視	変形・傷がないこと トルクマークのずれがないこと コネクタ類が奥まで刺しこまれたままであること
3	CanSat の電氣的機能に異常がないことを確認	動作確認用のプログラムを実行	正常に機能が動作すること

○ 試験結果

試験により得られた加速度は図 6-12 のようになった。

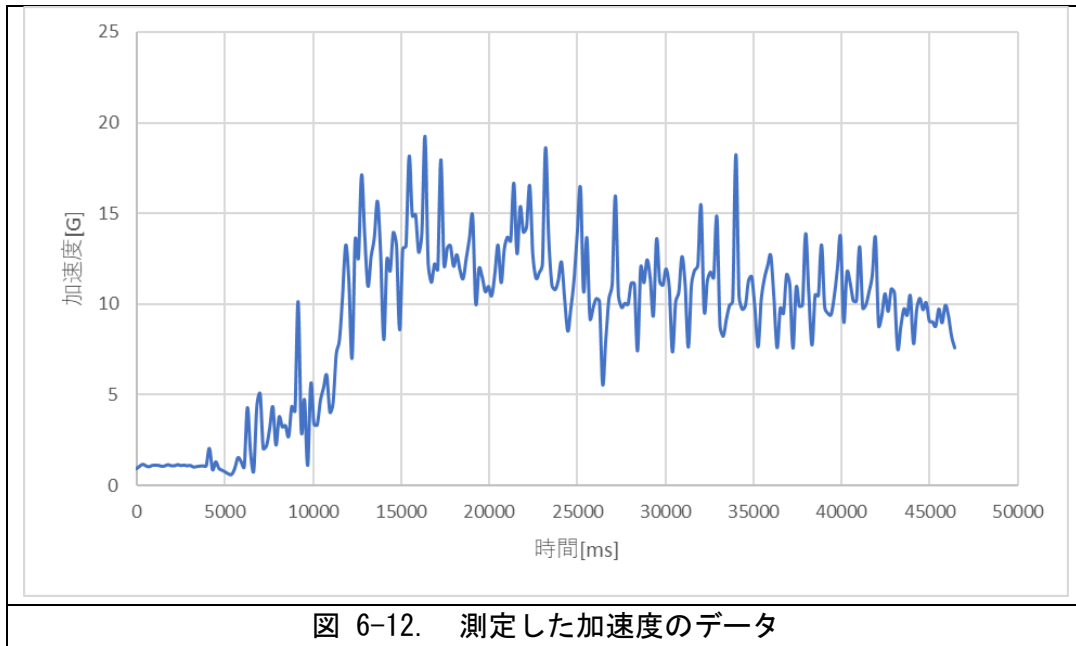


図 6-12. 測定した加速度のデータ

図 6-11 の計測結果からわかる通り、11.70 秒から 44.82 秒までの 33.12 秒間で平均 11.51057276 G の加速度がかかっており、10G 程度の荷重が 30 秒程度加わるという目標の荷重を十分に満たしていることが確認できた。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/wu7cMGi36hw>

0:04 : 静荷重負荷前の機体外観チェック

0:20 : 加速度センサの取り付け

1:17 : 機体とセンサを試験機に入れる

1:42 : 静荷重負荷開始

2:27 : 静荷重負荷終了

3:50 : 測定した加速度の確認

4:03 : 静荷重負荷後の機体外観チェック

4:25 : 機能チェック

○ 結論

試験結果より、本機体が想定される準静的荷重に対して耐えうることが可能であり、レギュレーションを充足することが確認された。

(V6) 振動試験

○ 要求項目

【R5】打ち上げ時の準静的荷重によって、安全基準を充足するための機能が損なわれないことが試験で確認できている

○ 目的

CanSat が打ち上げ振動環境に耐えうることを確認する

○ 試験日時

2021 年 10 月 20 日 (水)

15:30~16:00

○ 試験場所

東京工業大学 大岡山キャンパス

○ 参加者

大坪恵人

林和輝

田中翔真

塚本悠太

○ 試験方法

■ 試験系

- CanSat
- 加振機
- 加振コントローラ

■ 試験条件

- 加振条件を表 6-5 に示す。

表 6-5 加振条件

	加振周波数 [Hz]	加速度レベル [G]	加振時間 [s]
加振 1	30~500	5	
加振 2	固有振動数	15	60
加振 3	30~500	5	

■ 試験手順

1. 加振前の CanSat の外観検査を行い、機体構造に異常がないことを確認する。
2. CanSat を試験機に取り付ける。
3. 30~500Hz にかけてスイープ加振により CanSat の固有振動数確かめる。(モーダルサーベイ試験)
4. 確認した固有振動数にて 15G で 60 秒間の加振を実施。
5. 加振前後で CanSat の固有振動数に大きな変化がないことを確かめるため、もう一度モーダルサーベイ試験を実施する。
6. 固有振動数に大きな変化がないことを確認した後、試験機から CanSat を取り出す。
7. もう一度外観検査を実施し、機体構造に異常がないことを確認する。
8. 機能確認プログラムを実行し、電氣的機能が損なわれていないことを確認する。

表 6-6 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	CanSat の固有振動数の確認	加速度センサの波形から確認	振幅が最大となる振動数
2	15G の加振に耐えられること	加速度センサの波形から確認	15G の加振に 60 秒間耐えられること
	CanSat の外観に構造的欠陥がないことの確認	目視	変形・傷がないこと トルクマークのずれがないこと コネクタ類が奥まで刺しこまれたままであること

3	CanSat の電氣的機能に異常がないことを確認	動作確認用のプログラムを実行	正常に機能が動作すること
---	--------------------------	----------------	--------------

- 試験結果
加振前後のモーダルサーベイ試験結果を表 6-7 に示す。

表 6-7 モーダルサーベイ試験結果

	固有振動数 [Hz]
15G 加振前	205
15G 加振後	205

この結果より、固有振動数において 15G の加振をした後も固有振動数が変化しないことが確かめられた。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/vkEWITZmDIO>

- 0:04 : 加振前の外観検査
- 0:44 : 機体を加振器に設置
- 3:25 : モーダルサーベイ試験開始
- 7:19 : 15G 加振開始
- 9:27 : 加振後の外観検査
- 12:30 : 加振後のモーダルサーベイ試験開始
- 14:30 : 動作確認

- 結論
試験結果より、本機体が想定される振動荷重に対して耐えうることが可能であり、レギュレーションを充足することが確認された。

(V7) 開傘衝撃試験

- 要求項目
【R6】分離時の衝撃荷重によって、安全基準を充足するための機能が損なわれないことが試験で確認できている
- 目的
パラシュート開傘時に想定される衝撃（約 40G）に CanSat 及びパラシュートが耐えられることを確認する。

- 試験日時
2021年10月
20日(水) 19:30~20:00 (パラシュート側)
21日(木) 22:30~23:00 (機体側)

- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス

- 参加者
大坪恵人
林和輝
木原遼
塚本悠太

- 試験方法
 - 試験系
 - <機体の開傘衝撃試験>
 - CanSat
 - パラシュートの紐
 - 加速度センサ

 - <パラシュートの開傘衝撃試験>
 - ダミーマス (1 kg)
 - パラシュート
 - 加速度センサ

 - 試験条件
 - <機体の開傘衝撃試験>
 - CanSat に 40G 程度の衝撃加速度を与える。
 - 加速度センサには ADXL375 を用いる。

 - <パラシュートの開傘衝撃試験>
 - パラシュート及びパラシュートの紐に 40G 程度の衝撃加速度を与える。
 - 加速度センサには ADXL375 を用いる。

 - 試験手順
 - <機体の開傘衝撃試験>
 1. CanSat の外観を目視で確認し、構造的な異常がないことを確認する。
 2. CanSat に加速度センサを取り付け、開傘衝撃でとれないようにしっかりと固定する。
 3. 長さ 1.7m のパラシュートの紐の端を手すりに固定し試験対象を投下する。

4. 投下した試験対象を引き上げ、測定した加速度を読みとり、40G 程度の加速度が出ていることを確認する。
5. 外観の破損がないかを確認する。
6. 動作確認用のプログラムを実行し、機能の確認を行う。

<機体の開傘衝撃試験>

1. パラシュートの外観を目視で確認し、欠陥がないこと、紐がしっかりと無図ばれていることを確認する。
2. パラシュートの紐にダミーマスを取り付け、さらに加速度センサを取り付ける。これらが開傘衝撃でとれないようにしっかりと固定する。
3. 合計長さ 1.7m のパラシュートの紐の端を手すりに固定し試験対象を投下する。
4. 投下した試験対象を引き上げ、測定した加速度を読みとり、40G 程度の加速度が出ていることを確認する。
5. 外観の破損がないかを確認する。
6. 動作確認用のプログラムを実行し、機能の確認を行う

表 6-8 測定・確認項目（機体の開傘衝撃試験）

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	衝撃荷重の確認	加速度センサのデータを 確認	40G 程度の加速度が計測されていること
2	外観の破損がないことの確認	目視	変形・傷がないこと トルクマークのずれがないこと コネクタ類が奥まで刺しこまれた ままであること
3	CanSat の電氣的機能に異常がないことを確認	動作確認用のプログラムを実行	正常に機能が動作すること

表 6-9 測定・確認項目（パラシュートの開傘衝撃試験）

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	衝撃荷重の確認	加速度センサのデータを 確認	40G 程度の加速度が計測されていること
2	外観の破損がないことの確認	目視	パラシュートの生地に敗れやほつれがないこと

			パラシュートの紐が切れていたり、ほどけていたりしていないこと
--	--	--	--------------------------------

○ 試験結果

<機体の開傘衝撃試験>

機体の開傘衝撃試験において測定した衝撃加速度のデータを図 6-13 に示す。



図 6-13 からわかる通り、最大の衝撃加速度が 63G 程度と 40G 以上となることが確認できた。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/HYBsKpAHRFE>

0:10 ; 衝撃負荷前の外観検査

0:40 : 加速度センサの取り付け

<パラシュートの開傘衝撃試験>

パラシュートの開傘衝撃試験において測定した加速度のデータを図 6-14 に示す。



図 6-14 からわかる通り、最大の衝撃加速度が 70G 程度と 40G 以上となることが確認できた。試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/hUBqFCv-ghc>

○ 結論

試験結果より、本機体が想定される準静的荷重に対して耐えうることが可能であり、レギュレーションを充足することが確認された。

(V8) 通信機電源 OFF/ON 試験

○ 要求項目

【R7】 打ち上げ時の無線機の電源 OFF の規定を遵守できることが確認できている。

○ 目的

CanSat 搭載の無線機がキャリアに収納時は継続して電源が OFF であり、キャリア放出後正常に通信機の電源が ON になることを確認する。

○ 試験日時

2021 年 10 月 22 日 (金)

22:38

○ 試験場所

東京工業大学 大岡山キャンパス

- 参加者
林和輝
尾関優作
- 試験方法
 - 試験系

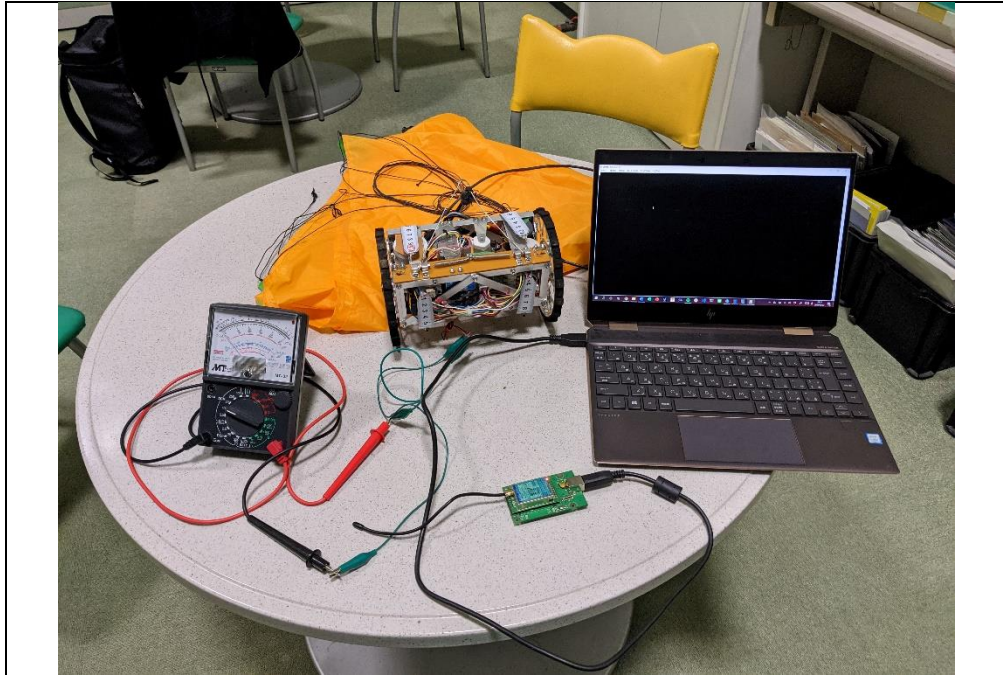


図 6-15. 試験系

- CanSat
- 電圧計
- PC
- MU2-USB-429

■ 試験手順

本試験は、OBC 起動試験と同時に行う。

1. フライトピンが接続されている状態で、無線機の電源電圧を測定し、電源が OFF であることを確認する。
2. フライトピンを抜き OBC を起動させ、無線機の電源電圧を測定し、電源が ON であることを確認する。
3. 地上局の無線機で OBC 起動メッセージを受信し、無線機が動作していることを確認する。

表 6-10 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法	判定基準
-----	------	------	------

		確認方法	
1	無線機の電源電圧	電圧計	フライトピン接続時：0V フライトピン分離時：3.3V
2	無線の送信状態	PC MU2-USB- 429	フライトピン接続時：受信メッセージが表示されない。 フライトピン分離時：受信メッセージが表示される。

○ 試験結果

電源電圧

フライトピン接続時：0V

フライトピン分離時：3.3V

受信メッセージ

フライトピン接続時：表示されなかった。

フライトピン分離時：表示された。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/1Qe8IWRPCuw>

0:00：試験系の説明

0:19：フライトピン接続時の確認

0:30：フライトピン分離

0:35：フライトピン分離時の確認

○ 結論

試験結果より、打ち上げ時の無線機の電源 OFF の規定を遵守できることが確認できた。

(V9) 周波数変更試験

○ 要求項目

【R8】無線のチャンネル調整に応じる意思があり、また実際に調整ができることを確認できている。

○ 目的

CanSat 搭載の無線機 MU-2 がチャンネル調整機能を有し、また、実際にチャンネル調整ができていることを確認する。

○ 試験日時

2021年10月22日（金）

23:02

- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
林和輝
尾関優作
- 試験方法
 - 試験系

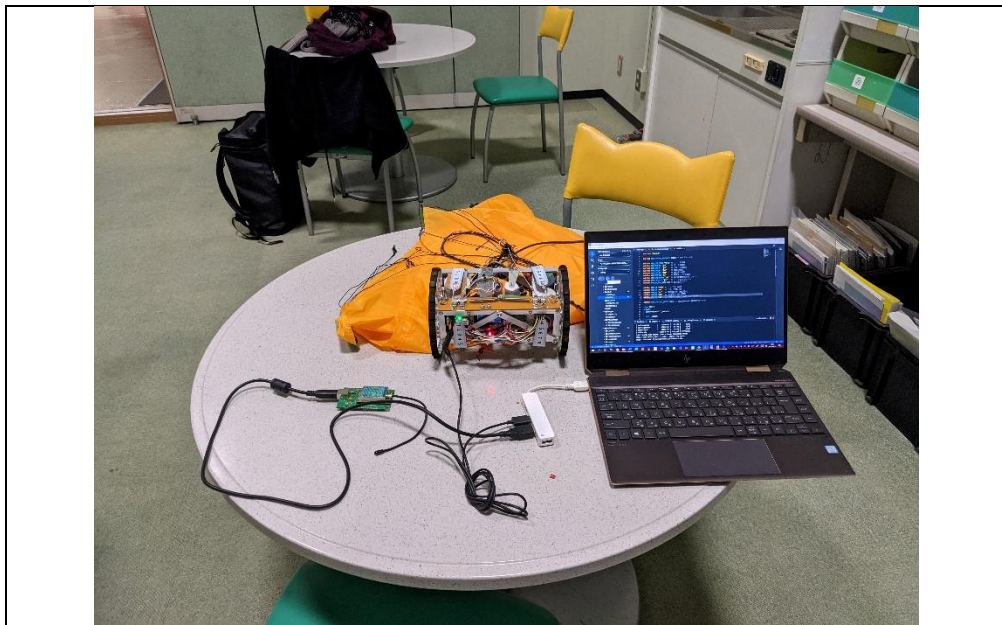


図 6-16. 試験系

- CanSat
- PC
- MU2-USB-429

■ 試験手順

CanSat 搭載の無線機 MU-2 を移動局、地上局の無線機 MU-2 を地上局と表記する。

1. 移動局および地上局のチャンネルを 1B (周波数 429.5000 MHz) に設定する。
2. 移動局からデータを送信し、地上局で受信できていることを確認する。
3. 移動局および地上局のチャンネルを 2A (周波数 429.6875 MHz) に設定する。
4. 移動局からデータを送信し、地上局で受信できていることを確認する。

表 6-11 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	無線の受信状態	PC MU2-USB- 429	受信メッセージが表示されている

○ 試験結果

周波数変更前、変更後ともに受信メッセージが表示されていることを確認できた。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/tgUqwd5FSqs>

0:00 : 試験系の説明

0:11 : 地上局のチャンネルを 1B に設定

0:30 : 移動局のチャンネルを 1B に設定

1:18 : 受信状態の確認

1:26 : 地上局のチャンネルを 2A に設定

1:48 : 移動局のチャンネルを 2A に設定

2:58 : 受信状態の確認

○ 結論

試験結果より、無線機のチャンネルを変更できることが確認できた。

(V10) End-to-end 試験

○ 要求項目

【R9】R1-R8 の充足を確認した設計の機体によって、ロケットへの装填から打ち上げ後の回収までを模擬した End-to-end 試験を実施できており、今後、安全性に関わる大幅な設計変更はない。

○ 目的

安全試験書類提出後の安全性に関わる大幅な設計変更を防止するため、安全審査に使用した機体を用いることでキャリアからの投下からミッション終了までを遂行できることを確認する。

○ 試験内容

End-to-End 試験は以下の 4 つのフェーズに分けて実施する予定である。

1. 搬入からキャリアへの収納・放出及び質量試験
2. パラシュートの展開

3. 着地後、パラシュートの分離から4本の電極設置まで

4. 4本の電極設置後から比抵抗測定まで

フェーズ1に関しては【V1】質量試験、【V2】機体の収納・放出試験によって、フェーズ2に関しては【V4】パラシュート投下試験によって、フェーズ4に関しては【V21】電気探査試験によって実施する。そのため、本試験ではフェーズ3のみを実施する予定である。

実施するEnd-to-End試験のシーケンスに関して、図6-17に示す。

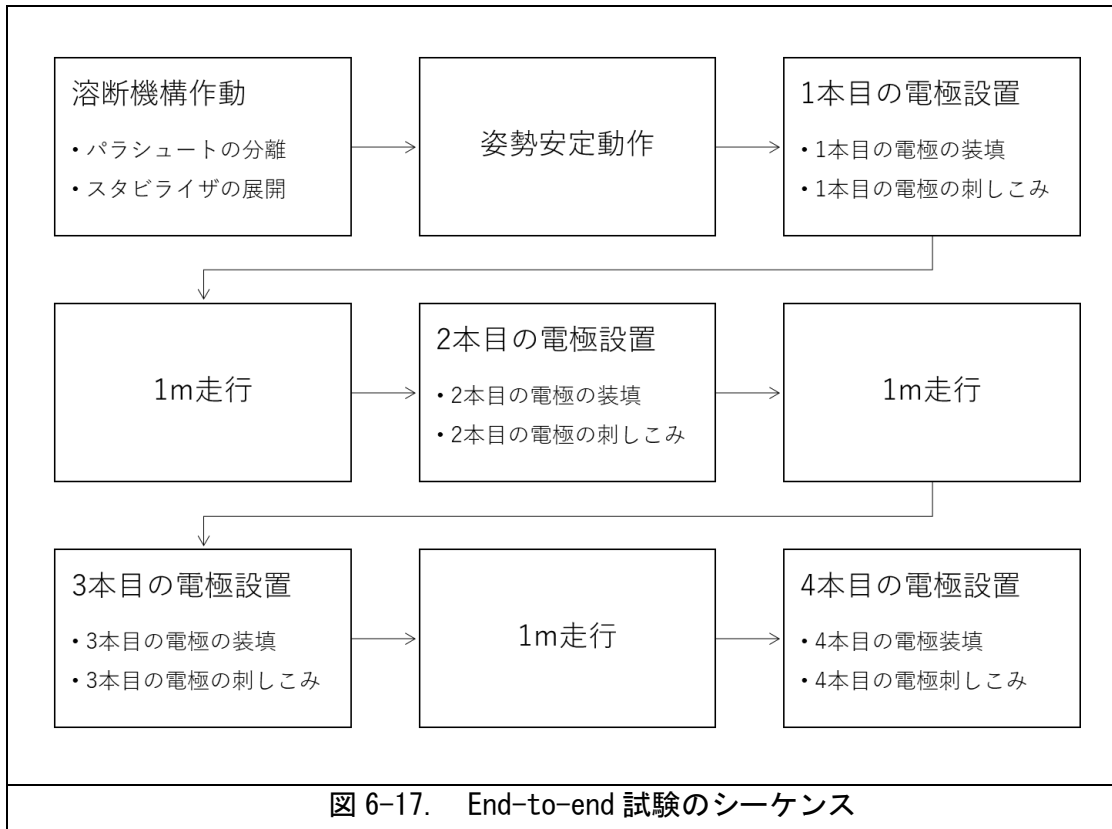


図 6-17. End-to-end 試験のシーケンス

End-to-end 試験ではサクセスクライテリアにおけるフルサクセスを達成できることを目標にするため、エクストラサクセスである電極間隔 10m に関して、1m に変更して実施した。これは、電極間隔 10m すなわち総走行距離 30m 程度で End-to-end 試験が実施できるような環境が少なく、なおかつ電極を刺しこみ可能な環境も少ないことから変更した。30m の走行については別途【V17】30m 走行試験にて試験を実施してあるため、その項を参照されたい。

加えて、全シーケンスを完遂できることを確かめるため、実験環境に電極の刺しこみが不可能となるような石等の障害物があればそれは試験前に排除してから試験を実施することとする。

- 試験日時
2021 年 10 月 23 日 (土)
- 試験場所

- 参加者
大坪 恵人
尾関 優作
荒井 湧介
林 和輝
田代 克己
木原 遼

- 試験結果

試験を実施した際の動画は以下を参照されたい。

<https://youtu.be/QdzhPDCIVoQ>

0:08 : フライトピンを抜く
1:08 : 着地検出タイムアウト、溶断機構動作
1:26 : 姿勢安定動作
1:30 : 1 本目の電極刺しこみ開始
3:21 : 1 回目の走行開始
3:38 : 2 本目の電極刺しこみ開始
5:13 : 2 回目の走行開始
5:27 : 3 本目の電極刺しこみ開始
7:04 : 3 回目の走行開始
7:21 : 4 本目の電極刺しこみ開始
9:08 : すべての動作が完了

- 結論

End-to-end 試験によりすべての機能が正常に動作し、すべてのシーケンスを完遂することを確認できた。

2. ミッション要求を満たすための試験内容

(V11) 着地衝撃試験

- 要求項目

【M2】着地時の衝撃荷重によって、ミッションを実現するための機能が損なわれていないことが試験で確認できている。

- 目的

CanSat が 5m/s で着地する衝撃によって破損しないことを確認する。

- 試験日時

2021 年 10 月 20 日 (水)

16:00~17:00

- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
尾関優作
下岡大樹
- 試験方法
 - 試験系



- CanSat
- メジャー
- 脚立
- 試験条件
 - CanSat を自由落下で落とす高さは 2m(これは終端速度が確実に 5m/s を超えるように、空気抵抗を無視して計算した時に 6.26m/s となる高さである)とする
- 試験手順
 1. CanSat を水平 (地面との角度が 0 度) にして 2m の高さから自由落下させる

2. フレームに歪みや破損が生じていないことを目視で確認する
3. CanSat を地面との角度がおおよそ 45 度にして 2m の高さから自由落下させる
4. 2 と同じ
5. CanSat を垂直（地面との角度が 90 度）にして 2m の高さから自由落下させる
6. 2 と同じ

表 6-12 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	フレームが歪んでいない	目視	フレームが歪んでいないことを目視で確認する
2	モータの軸が曲がっていない	目視	モータの軸が曲がっていないことを目視で確認する

○ 試験結果

CanSat は 2m の高さから自由落下させた着地衝撃によって破損しないことが確認できた。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

(0 度)

<https://youtu.be/tw7hnInqyR4>

0:00 : 試験開始

0:10 : 落下開始

0:11 : 着地

0:16 : CanSat の破損の有無の確認

(45 度)

<https://youtu.be/HBDQ2k0d4Wc>

0:00 : 試験開始

0:14 : 落下開始

0:15 : 着地

0:21 : CanSat の破損の有無の確認

(90 度)

<https://youtu.be/U-EIkvvGJJY>

0:00 : 試験開始

0:04 : 落下開始

0:05 : 着地

0:10 : CanSat の破損の有無の確認

○ 結論

試験結果より、CanSat は終端速度 5m/s の着地衝撃によって破損しないことが確認できた。

(V12) 電力耐久試験

- 要求項目
 - 【M3】シーケンスを行うために十分な電力を供給できる

- 目的
 - 電装系に電力を供給し、CanSat が活動を終了するまで連続して電力を安定供給できるかを確認する。バッテリーが電力を十分有している点と、過電流によりシステムが停止しない点を評価の対象とする。

- 試験日時
 - 2021 年 10 月 24 日
 - 0:00~2:10

- 試験場所
 - 東京工業大学 大岡山キャンパス

- 参加者
 - 林和輝
 - 尾関優作

- 試験方法
 - 試験系

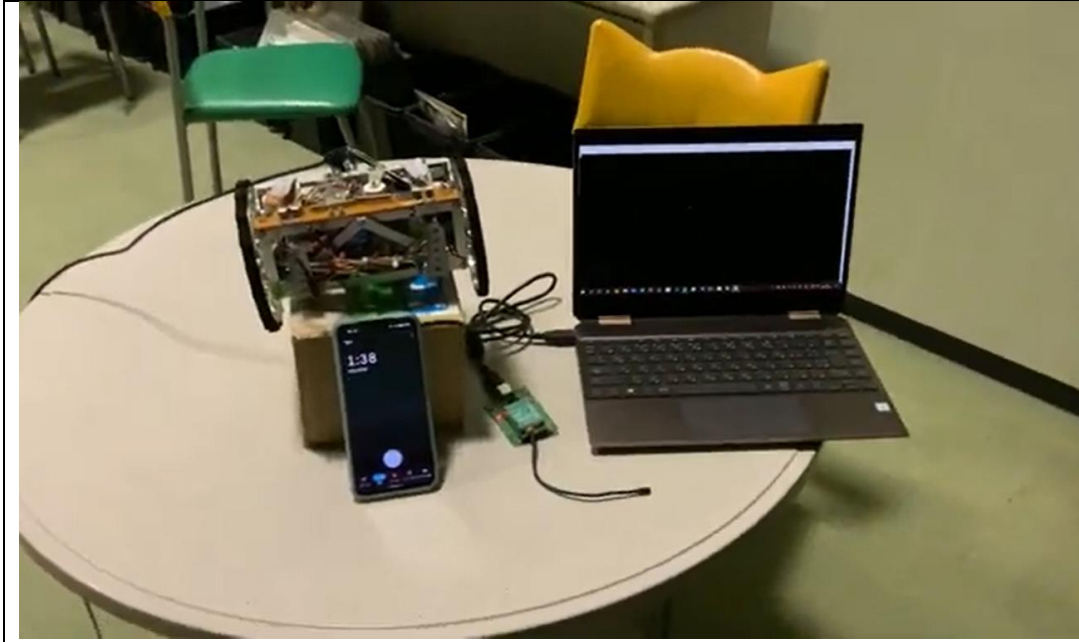


図 6-19. 試験系

- CanSat
- 時計
- PC
- MU2-USB-429

■ 試験手順

End to End 試験を行い、バッテリーが途中で切れることなくシーケンス終了まで実施できることを確認する。

試験では、機体を気球に搭載してから投下までの時間を考慮するため、フライトピンを挿入した状態で 1.5 時間の待機し、その後フライトピンを抜き、シーケンスを開始するという操作を行う。

表 6-13 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	全シーケンスの動作	目視	各シーケンスの動作が正常に行われる。
2	シーケンスの完了	PC MU2-USB- 429	シーケンス完了のメッセージが表示される。

○ 試験結果

1.5時間の待機後、全シーケンスが正常に動作し、シーケンス完了のメッセージを確認できた。

試験開始時および試験開始後 1.5 時間経過直後の様子は図 6-20, 6-21 に示す。

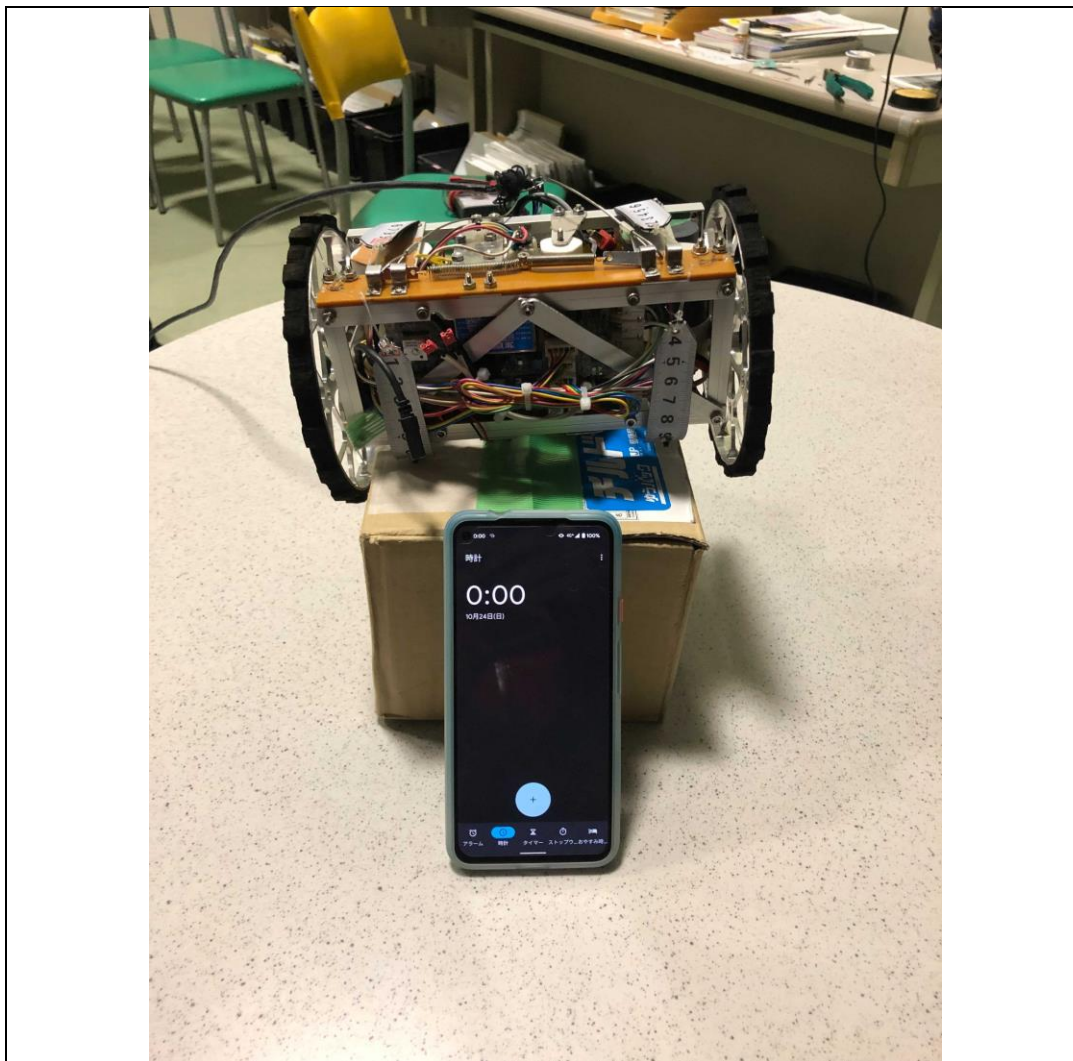


図 6-20. 試験開始時の様子



図 6-21. 試験開始後 1.5 時間経過時の様子

また試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/WxQVf3IMeGM>

0:00 動作開始

0:40 シーケンス開始

13:32 全シーケンスの動作確認完了

- 結論
試験結果より、シーケンスを行うために十分な電力を供給できることが確認できた。

(V13) OBC 起動試験

- 要求項目
【M4】OBC の起動が正常に行われる

- 目的
OBC が正常に起動できることを確認する。
- 試験日時
2021年10月22日（金）
22:38
- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
林和輝
尾関優作
- 試験方法
 - 試験系

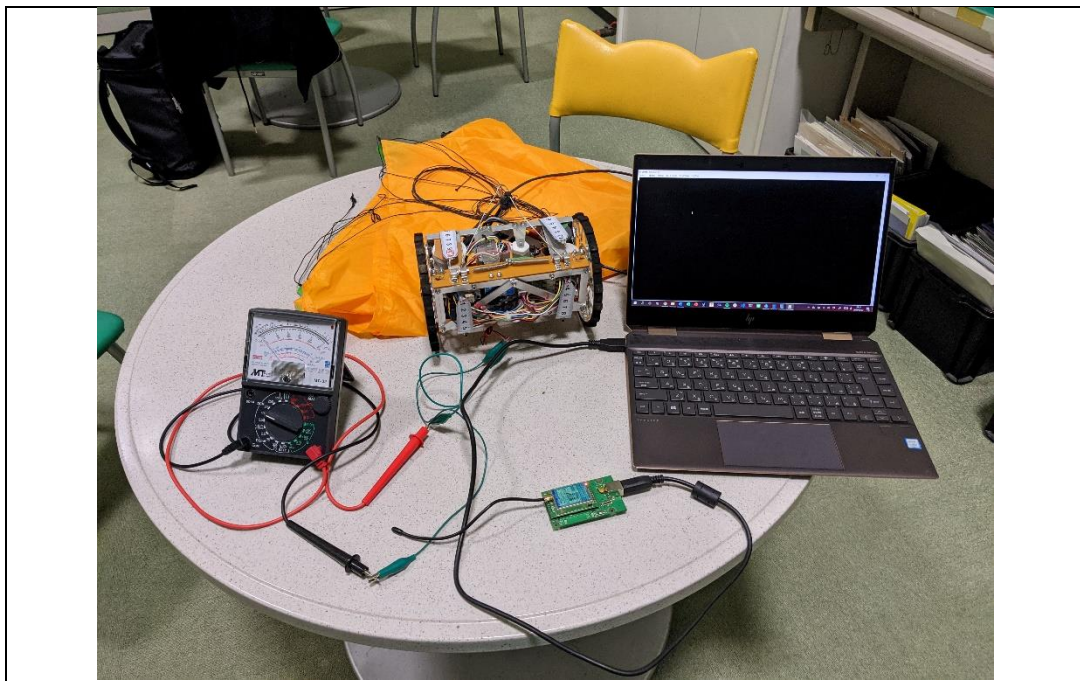


図 6-22. 試験系

- CanSat
- 電圧計
- PC
- MU2-USB-429

■ 試験手順

本試験は、通信機 OFF/ON 試験と同時に行う。

1. フライトピンが接続されている状態で、無線機の電源電圧を測定し、電源が OFF であることを確認する。
2. フライトピンを抜き OBC を起動させ、無線機の電源電圧を測定し、電源が ON であることを確認する。
3. 地上局の無線機で OBC 起動メッセージを受信し、無線機が動作していることを確認する。

表 6-14 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	OBC の電源電圧	電圧計	フライトピン接続時 : 0V フライトピン分離時 : 3.3V
2	プログラムの起動メッセージ	PC MU2-USB- 429	フライトピン分離後、起動メッ セージが表示される。

○ 試験結果

電源電圧

フライトピン接続時 : 0V

フライトピン分離時 : 3.3V

起動メッセージはフライトピン分離後表示された。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/1Qe8IWRPCuw>

0:00 : 試験系の説明

0:19 : フライトピン接続時の確認

0:30 : フライトピン分離

0:35 : フライトピン分離時の確認

○ 結論

試験結果より、OBC の起動が正常に行われることが確認できた。

(V14) パラシュート分離試験

○ 要求項目

【M5】パラシュートが分離できる。

- 目的
溶断回路によって、CanSat とパラシュートの切り離しができることを確認する。
- 試験日時
2021 年 10 月 18 日（月）
21:00～21:05
- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
大坪恵人
尾関優作
林和輝
- 試験内容
指定した電流量・時間でテグスを確実に焼き切ることができ問題なくパラシュートを切り離すことができていることを目視で確認する。

試験系

- ◇ CanSat
- ◇ パラシュート

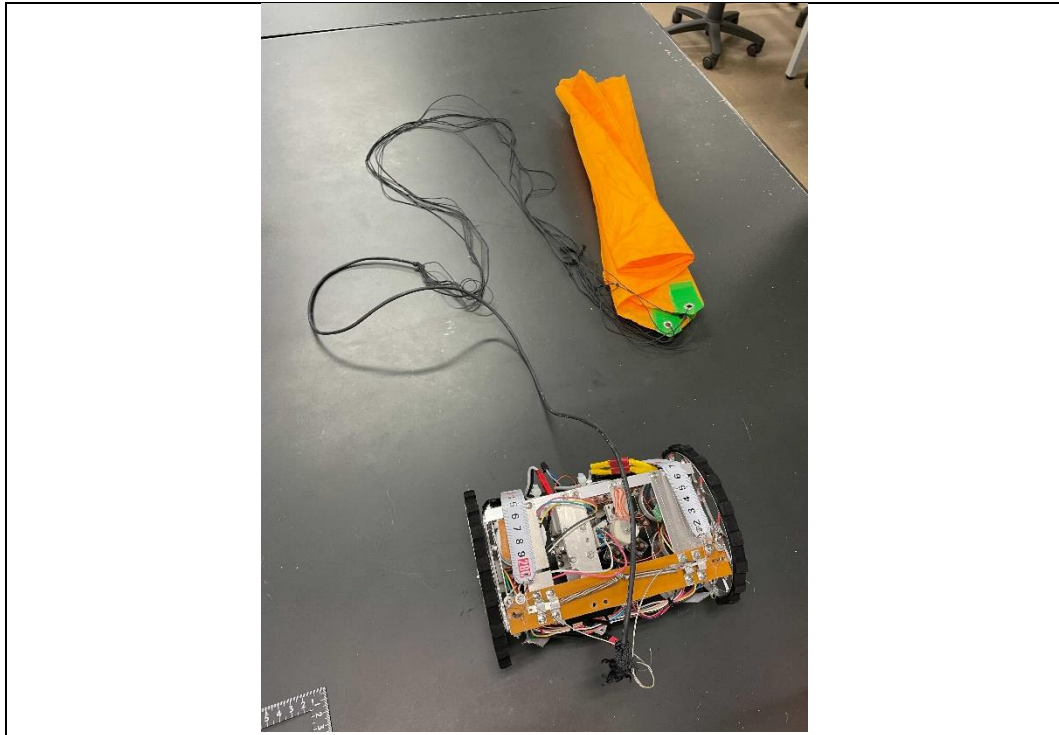


図 6-23. 試験系

○ 結果

実験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/1p1ekx2to5M>

このように問題なく溶断機構が動作し、機体とパラシュートの切り離しができることが確認できた。

○ 結論

機体に搭載した溶断機構により問題なくパラシュートが分離できることが確認できた。

(V15) スタビライザー展開試験

○ 要求項目

【M6】スタビライザーが展開できる。

○ 目的

テグスが切れるとスタビライザーが展開し、機体が制御可能な姿勢になることを確認する。

- 試験日時
2021年10月22日（金）
23:45～23:55
- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
尾関優作
- 試験方法
 - 試験系



- CanSat
 - ニッパ2本
- 試験手順
1. CanSat を平面に置く。
 2. スタビライザーを拘束しているテグスを溶断機構により切断する。
 3. CanSat が制御可能な姿勢になることを確認する。

表 6-15 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	スタビライザーが展開すること	目視	スタビライザーが展開することを目視で確認する
2	CanSat が制御可能な姿勢になること	目視	CanSat が制御可能な姿勢になることを目視で確認する

○ 試験結果

スタビライザーが展開し、CanSat の姿勢が制御可能な姿勢になることを確認できた。試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/JWnDwm76Pik>

0:00 : 試験開始

0:37 : 溶断開始

0:38 : スタビライザー展開

0:41 : CanSat が制御可能な姿勢になる

○ 結論

試験結果より、テグスが溶断されればスタビライザーが展開し、CanSat が制御可能な姿勢になることを確認できた。

(V16) 走破性能試験

○ 要求項目

【M7】草地のフィールドにおいて走破性をもち、スタックしない。

○ 目的

CanSat と同程度の高さの草地においても走行可能であることを確認する

○ 試験日時

2021年8月27日(金)

7:30~8:00

○ 試験場所

多摩川河川敷 丸子橋下

- 参加者
尾関優作
下岡大樹

- 試験方法
 - 試験系



図 6-25. 試験系

- CanSat
- メジャー
- 500ml ペットボトル

■ 試験条件

- CanSat を 1m 走らせる
- 草の高さは CanSat と同程度の高さとする

■ 試験手順

1. CanSat の右輪の 5cm 右に水の入ったペットボトルを置く
2. CanSat を 1m 走らせる
3. 1m 走ったことをメジャーで測定する
4. CanSat が乗り越えた草が CanSat と同程度の高さ (15cm 程度) であることを確認する

表 6-16 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	CanSat がスタックしない	目視	CanSat がスタックせずに走行することを目視で確認する
2	CanSat の走行距離	メジャー	走行距離が 1m を超えていることをメジャーで測定して確認する
3	草の高さ	メジャー	走行した場所の草の高さが 15cm を超えていることをメジャーで測定して確認する

○ 試験結果

CanSat は 15cm を超える草をスタックせず走行することが出来た。
試験の様子は以下の動画を参照されたい。

https://youtu.be/fMQV_k0V1EE

- 0:00 : 試験開始
- 0:00 : 走行開始
- 0:11 : 走行終了
- 0:40 : 草の高さの計測

○ 結論

試験結果より、CanSat は 15cm 以下の草地であればスタックせずに走行可能であることが確認された。

(V17) 30m 走行試験

○ 要求項目

【M8】直線距離で 30m 以上走行できる。

○ 目的

背の低い草地において 30m 以上走行できることを確認する

- 試験日時
2021 年 8 月 27 日（金）
6:30～7:00
- 試験場所
多摩川河川敷 丸子橋下
- 参加者
尾関優作
下岡大樹
- 試験方法
 - 試験系



図 6-26. 試験系

- CanSat
- メジャー
- 500ml ペットボトル
- 試験条件
 - CanSat を 30m 走らせる
 - 草の高さは CanSat と 2cm 以下とする

■ 試験手順

1. 30mの紐をCanSatが走行する経路に敷く
2. CanSatの右輪の5cm右に水の入ったペットボトルを置く
3. CanSatを35m走らせる
4. 紐をCanSatが走行を開始した点を中心として端点を回してCanSatの走行終了位置が半径30mの円にないことを確認する

表 6-17 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	CanSatの走行距離	紐	CanSatがスタート地点を中心とする半径30mの円にないことを紐を用いて測定し確認する

○ 試験結果

CanSatは背の低い草地において30m以上走行することが出来た。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/C-Vh4nEVA7A>

0:00 : 試験開始

0:00 : 走行開始

5:16 : 走行終了

5:44 : CanSatの走行終了位置が半径30mの円にないことの確認

○ 結論

試験結果より、CanSatは30m以上走行可能であることが確認された。

(V18) 電極装填試験

○ 要求項目

【M9】電極を刺しこみ機構に装填できる。

○ 目的

装填機構が動作し、電極が刺しこみ機構の真下に装填されることを確認する。また、電極と刺しこみ機構が接続されることを確認する。

○ 試験日時

2021年10月14日(木)

23:30~24:00

- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
荒井湧介
木原遼
田中翔真
- 試験系
 - ◇ 機体（刺しこみ機構・装填機構搭載）
 - ◇ 電極 4 本（長さ 64mm, 太さ Φ 3mm, 材質 鉄）
- 試験方法・手順
 1. ホルダ回転用ステッピングモータを動かし、電極位置のキャリブレーションを行う。
 2. 刺しこみ機構の突起の下部に 1 本目の電極が来るまでホルダ回転用ステッピングモータを動かす。
 3. 上下駆動用モータを動かし、刺しこみ機構の電極回転用モータを上下させ、突起で電極を押し下げる。
 4. 1 本目の電極が刺しこみ機構の下に来るまでホルダ回転用ステッピングモータを動かす。
 5. 上下駆動用モータ及び電極回転用モータを動かし、刺しこみ機構のソケットと電極が接続されるのを確認する。
 6. 電極を取り外す。
 7. 上下駆動用モータを動かし、電極回転用モータを電極と干渉しない位置に動かす。
 8. 2～7 を 3 回繰り返す、4 本の電極が装填及び接続されるのを確認し終了とする。
- 測定・確認項目
試験における測定・確認項目を表 6-18 に示す。

表 6-18 測定・確認項目

No.	確認項目	対応する試験フロー	測定項目 確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	4 本の電極が刺しこみ機構のソケットと接	1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8	4 本の電極が刺しこみ機構のソケットと接	目視	電極とソケットが接続され、電極

	続されることを確認する		続されることを確認する		が電極回転用モータによって回転を始める
--	-------------	--	-------------	--	---------------------

○ 試験結果

以下の動画の通り、4本の電極とソケットが接続された。複数回実験を行い、装填・接続されることを確認した。その際の動画は以下を参照されたい。

<https://youtu.be/A7Jbiv4FmAo>

00:16 : 電極装填試験開始
00:21 : 一本目電極下降開始
01:45 : 一本目電極接続
02:42 : 二本目電極下降開始
04:01 : 二本目電極接続
05:05 : 三本目電極下降開始
06:16 : 三本目電極接続
07:21 : 四本目電極下降開始
08:30 : 四本目電極接続
09:35 : 装填シーケンス終了

○ 結論

装填・接続が問題なく成功することが確認できた。

(V19) 電極刺しこみ試験

○ 要求項目

【M10】電極を深さ 30mm、角度 10° 以内で地面に刺しこめる。

○ 目的

上下駆動用モータ及び電極回転用モータが動作し、電極が地面に刺しこまれることを確認する。その際深さ 30mm まで刺しこまれることを確認する。

○ 試験日時

2021年10月15日(金)
18:30~19:00

○ 試験場所

東京工業大学 大岡山キャンパス

○ 参加者

荒井湧介

木原遼
田中翔真

- 試験系
 - 機体（刺しこみ機構・装填機構搭載）
 - 電極 4 本（長さ 64, 太さ Φ 3mm, 材質 鉄）
- 試験方法・手順
 1. 電極装填試験 V18 の手順 1~4 に従って電極を動かす。
 2. 上下駆動用モータと電極回転用モータを動かし、地面に電極を刺しこむ。
 3. 上下駆動用モータを動かし、電極回転用モータを一番上まで移動させる。
 4. 電極が 30mm 以上刺しこまれたことを確認する。
- 注意点

電極の全長が 64mm なので、地面から出ている部分の長さが 34mm 以下ならば 30mm 以上刺しこまれたと判断する。
- 測定・確認項目

試験における測定・確認項目を表 6-19 に示す。

表 6-19 測定・確認項目

No.	確認項目	対応する試験フロー	測定項目 確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	電極が地面に刺しこまれることを確認する。	1. 2. 3. 4	電極が地面に刺しこまれることを確認する。	ものさしを用いて計測する。	電極の地面から出ている長さをものさしで計測し、34mm 以下であることを確認する。

- 試験結果

電極が 30mm 刺しこまれたことが確認できた。その際の動画は以下を参照されたい。
https://youtu.be/pr_01bxmHE0

00:03 : 試験開始
00:12 : 電極下降開始
01:26 : 電極接続
02:23 : 刺しこみ完了
02:46 : 刺しこみシーケンス終了
02:51 : 刺しこみ深さの計測

- 結論
電極が問題なく 30mm 刺しこまれることが確認できた。

(V20) ケーブル送り出し試験

- 目的
実際にローバでケーブルを送り出しながら走行させたときに、ケーブルの張力によって走行不能になることはないか、進路方向の変化によってケーブルの張力が生じる方向が変化した際にも問題なく走行できるかを確認する。
- 試験日時
2021年9月15日(水)
13:00~18:00
- 試験場所
東京工業大学 大岡山キャンパス
- 参加者
尾関優作
下岡大樹
田代克樹
塚本悠太
荒井湧介
木原遼
田中翔真
林和輝
大坪恵人
- 必要物
・ FM 機体
・ ケーブルコネクタ (4 つ)
・ ケーブル (1m 用、10m 用、20m 用、30m 用)
- 試験方法・手順
1. ケーブルを積んだローバをスタートの位置にセットし、機体からケーブルの先端につけられたコネクタ部を取り出し手でつかんで抑える。

2. 10 m の走行を行い、そこで停止しその場で機体からケーブルの先端につけられたコネクタ部を手でつかみ抑える。
3. を2回繰り返して30 m地点まで到達する。(30 m地点ではコネクタ部を取り出し抑えることはしない。)

○ 注意点

※前提として今回の実験はケーブルが走行の妨げにならず送り出せることを確認するための試験である。したがって、本番のように電極を刺して試験を行った場合、刺しこみ時の失敗によって走行途中で電極が抜け、最終的に計3本分のケーブルの張力がかからなくなることが想定される。そのため走破できても走行不能の判断ができず試験として不十分なものになってしまうので、電極を刺すことはせずにコネクタ部を手で押さえることによって測定を行うことにしている。

※今回の10 mなどの値は走行の自己位置推定による測定値に基づいた値を想定している。

そのため、走行距離が10 mを満たしていなくとも自己位置推定によって得られた10 m分の走行ができていれば問題ないものとする。

○ 測定・確認項目

試験における測定・確認項目を表6-20に示す。

表 6-20 測定・確認項目

No.	確認項目	対応する試験フロー	測定項目 確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	ケーブルの張力が走行の妨げになっていないことを確認	1. 2. 3	ローバが走行できるかどうかの確認	走行完了することができているかどうかで確認	各区間で自己位置推定での10m分の走破できたかどうかを確認 途中で止まらず走り切れていたら問題ないものとする。

○ 試験結果

<https://www.youtube.com/watch?v=cHgR47nWPFA>

時刻

0:45 : 1 本目のコネクタを抑える

5:15 : 走行開始
9:45 : 2 本目のコネクタを抑える
11:43 : 走行開始
17:12 : 3 本目のコネクタを抑える
18:13 : 走行開始
19:38 : 走行完了

上記の動画のように完全な直進ではなくカーブを描くように走行をしたが送り出し方向によらず、各区間自己位置推定での 10 m 分の走行が問題なく行うことができるという結果になった。

- 結論
動画にあるようにケーブルの張力で走行不能になることがないことが確認できた。さらに張力のかかる方向によらず走行不能にさせることなく送り出しことができることが確認できた。

(V21) 電気探査試験

- 要求項目
【M12】機体に搭載したシステムにより電気探査ができる。
- 目的
 - ◇ 実際に使用する電極を用いて電気探査を行い接触面積や刺しこみ深さの変化によって、どの程度計測に差が出るのか、またその差が許容できるものであるのかを確認する。
 - ◇ 同時にケーブルとの接続部(以下ケーブルコネクタと呼ぶ)が入ることにより接触の弱さや土などの外部要因によって計測にどの程度差が出て、それが許容できるものであるのかを確認する。
- 試験日時
2021 年 8 月 21 日(土)
6:30~10:30
- 試験場所
多摩川河川敷 丸子橋下
- 参加者
荒井湧介
大坪恵人
下岡大樹
田代克樹
塚本悠太

○ 必要物

- ◇ 電極(長さ 64mm, 太さ $\Phi 3$ mm, 材質 鉄, 4 本)
- ◇ ケーブルコネクタ(4 つ)
- ◇ 丸釘(長さ 150 mm, 太さ $\Phi 6$ mm, 材質 鋼, 4 本)
- ◇ ケーブル(1 m 用、10 m 用、20 m 用、30 m 用、2 種類)
- ◇ 鉛蓄電池(12 V, 2 つ)
- ◇ テスター(予備も含めて 3 つ)
- ◇ ワニ口クリップ(予備を含めて 8 つ)
- ◇ 電動ドリル
- ◇ 絶縁手袋(5 双)
- ◇ ハンマ

○ 前提

一つ目の目的は、地面と電極間の接触の評価を行うことである。

本実験では本番時に実際に刺しこむ電極を用いて電気探査を行うことになるのだが、その地点でのボーリング調査の結果が得られない可能性が高いため何か基準となる値が必要となる。

そこで以前実際に電気探査を行なっている業者の方に伺った際に、10 cm 程度の金属棒を刺しこむことで電気探査を行なっているとの話を聞くことができた。

そのため、今回はその地点での比抵抗値の基準値として使用する電極に比べて十分に長く太さのある丸釘を電極として電気探査を行った場合の値を採用することにした。その値を電極を用いて電気探査を行なって得られた値と比較することでどの程度正しい値が得られているのか、また、後述する基準に収まっているのかを確認する。

二つ目の目的は、ケーブルと電極間の接触の評価を行うことである。

今回用いるコネクタには押しバネを用いて接触をさせているため、接触の仕方やコネクタ内部への土や砂の流入により接触抵抗が大きくなる。

このことによって、得られる比抵抗値が本来得られる値に対して大幅にズレてしまう可能性がある。

そのため、ケーブルコネクタを用いて接触した場合と、電極にケーブルコネクタを用いた接触をせずにそのままワニ口クリップでつかむ場合を比較することで、ケーブルコネクタの性能を評価しようとしている。

以上の目的の前提を基に以下の試験方法手順を決定した。

電圧に関しては 12 V で電気探査を行っている複数の事例があったためそれを参考に決定した。

鉛蓄電池を 2 つ用意し 24 V への変更を可能にして実験をした理由については、地上で電気探査を行う場合、地面の比抵抗が大きく地面と電極間の接触抵抗が大きくなる場合に、大地に印加する電圧を大きくして電気探査されているという事例をもとにして準備することにした。

今回の電気探査においても電極とケーブル間や電極と大地間の接触抵抗が大きくなる可能性が考えられた。そのため 12V では測定が難しい場合に、電源電圧を 24V と大きくすることで測定値が小さくなり真値に近づくと推測をした。

したがって、電源電圧を大きくする場合にも小さい場合と同様の測定値が得られれば、

電極とケーブル間や電極と大地間の接触抵抗が十分小さくなっていると判断できると考え行った。

許容できるかどうかの判定に関しては、結論にも示すが、丸釘との比較に関しては自己位置推定でも用いられている 10 %以内の差に収められていれば問題ないとみなすものとする。

ケーブルコネクタの評価に関しては結論で示す RMS 残差を用いたときに平均的に生じる解析誤差 5%以内に入っているかどうかで評価する。

○ 試験系

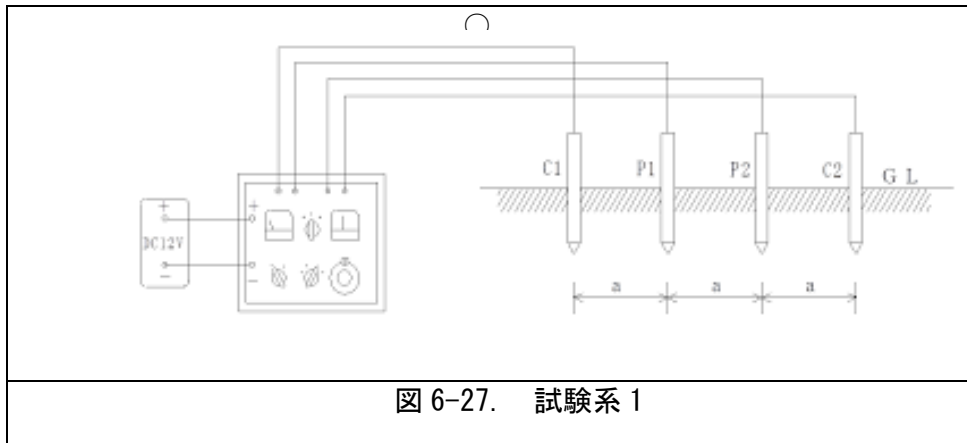


図 6-27 のように地面に 4 本の電極 (C1, C2, P1, P2) を電極間隔 $a = 10 \text{ m}$ で刺し電気探査を行った。

その際に C1-C2 間の電流、P1-P2 間の電圧を測定し、測定値から比抵抗を求めている。実際の電極の刺しこみは以下の図 6-28 のようである。

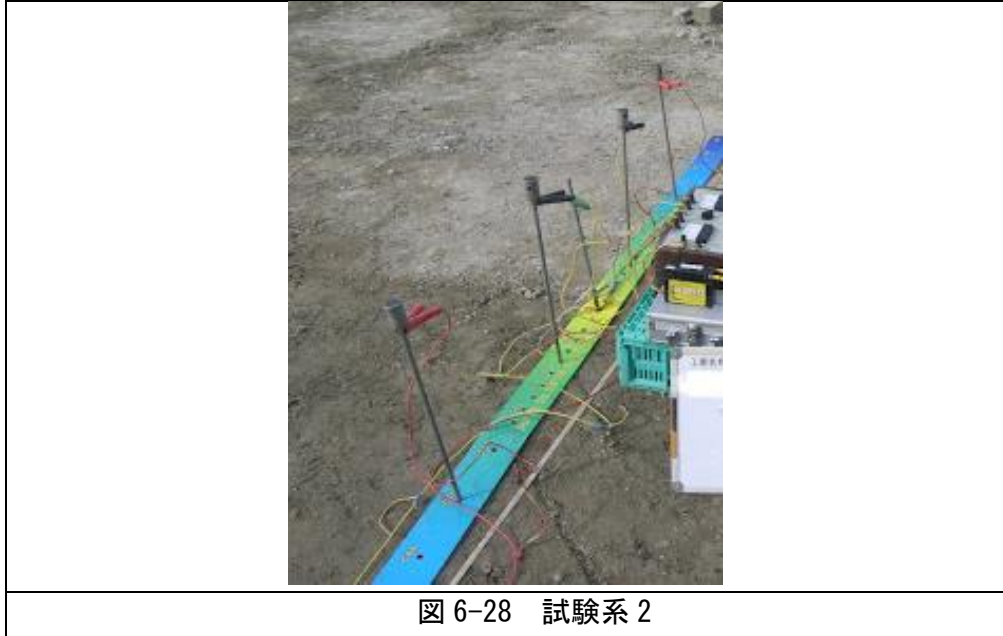


図 6-28 試験系 2

<https://www.sankosha.co.jp/earthing-systems/measurement-method/>
<http://n-d-c.net/daititeikouritusokutei.html>

より画像を引用している。

○ 試験方法・手順

1. 丸釘を用いて今回の実験地での基準値となるデータを測定する。(刺しこみ深さ 140 mm)

- a. 12 V 電圧をかけて計測する。
- b. 24 V 電圧をかけて計測する。
- ※この時 a, b, とともに 2 回は計測する。

2. 電極にワニ口クリップで挟み計測を行う。(刺しこみ深さ 30mm)

- a. 12 V 電圧をかけて計測する。
- b. 24 V 電圧をかけて計測する。
- ※この時 a, b, とともに 2 回は計測する。

3. ケーブルコネクタをつけた電極で計測を行う。(刺しこみ深さ 30mm)

- a. 12 V 電圧をかけて計測する。
- b. 24 V 電圧をかけて計測する。
- ※この時 a, b, とともに 2 回は計測する。

4. ケーブルコネクタに上から土をかける。また、電極を回転させて再度計測を行う。

○ 注意点

※ 電流が大きく危険な状況での実験のため回路に触れるものは必ず絶縁手袋を使用すること。

- ※ 基準として計測している丸釘の測定地点とほぼ同じ場所(半径 150mm 以内範囲)で電極を刺し計測を行うものとする。
- ※ 4. では 2. の値と 10 %以内のずれであれば問題ないものとみなし、1 回のみ計測で終了とする。もし計測結果が 10 %以上ずれた場合はコネクタとの接触状況を調整して 2 回目の計測は実施するが、それ以降はコネクタの問題とみなし改良し、後日再実験をする。
- ※ 解析はあらかじめ作成しておいたエクセルシートに計測結果を入力し、比抵抗を算出することで、実験の成功可否をその場で確認する。

○ 測定・確認項目

試験における測定・確認項目を表 6-21 に示す

表 6-21 測定・確認項目

No.	確認項目	対応する試験フロー	測定項目 確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	選定電極, 想定刺しこみ深さでの電気探査の実現可能性	1, 2	基準としてしている丸釘との比抵抗の差で確認	テスターでの測定値をもとに計算した比抵抗	計測値の差が 10 %以内に収まっていること
2	ケーブルコネクタを使用時の電気探査の実現可能性	1, 3, 4	電極をワニロクリップで接続した場合とケーブルコネクタで接続した場合の差で確認	テスターでの測定値をもとに計算した比抵抗	計測値の差が 10 %以内に収まっていること

○ 結果

初回実験で 4. まで問題なく計測できたため再実験は行わずに完了した。

電気探査の計測結果

表 6-22 各電極の測定比抵抗値と差

電極の種類	比抵抗(平均値)($\Omega \cdot m$)	差(絶対値%)
丸釘	45.619	
実際に使用する電極	47.469	4.06
ケーブルコネクタ付き電極	47.465	0.00843

表 6-23 各の測定比抵抗値と差

電極 (ワニロクリップ)	電極 (ケーブルコネクタ)
-----------------	------------------

45.160	45.696
47.600	45.432
54.132	50.265
52.199	47.600
47.124	48.332

(単位は全て $\Omega \cdot m$)

○ 結論

基準の値として用いる丸釘の比抵抗値と使用する電極による比抵抗値の差に関する評価については、走行の自己位置推定の目標としている数値が 10 % であることからこの 2 つの差に対する評価も同様に 10 % 以内に収まっているかどうかで判断することにした。

表 6-の平均値に対する計算より実際に使用する電極に対しては 4.06 %、ケーブルコネクタ付きのものに対しては 4.07 % 程度であり、十分に収まっていることが確認できた。

また、これらの値は丸釘に比較して大きくずれすぎていなければ問題はなく、実際に本番でもミッション終了後今回用いた丸釘を用いて参考値をとり比較するため、今回使用する電極との差がつかめているため、本番もこの差を目安にすることにする。次にケーブルコネクタの評価には電気探査の解析をする際に用いられる手法である RMS 残差を用いて評価していこうと考えた。

RMS 残差の評価式は $\sqrt{\sum_{i=1}^N (\ln \rho_{afi} - \ln \rho_{aci})^2} / N \times 100$ (%) として表せる。

この時の N は全データ数、 ρ_{afi} は測定見かけ比抵抗値、 ρ_{aci} は計算見かけ比抵抗値であるが、今回は計算見かけ比抵抗値ではなくこの値を直接ワニ口クリップで電極を挟んだ場合によって取得できた値とする。

その際に実際の解析の際に生じる誤差である 10 % より小さければ問題が生じないという判断をすることにした。

評価式の計算は表 6-より $\sqrt{((0.01)^2 + (0.04)^2 + (0.07)^2 + (0.1)^2 + (0.03)^2) / 5} \times 100 = 5.92$ となるため、土などのゴミを振りかけた場合も含めて上記 10 % 以下の誤差範囲に入っており、ケーブルコネクタを用いても問題なく導通・測定が確認できた。

- 要求項目
 - 【V13】自己位置を推定でき、その精度の誤差が10%以内に収まっている。
 - 【V14】自己位置を制御でき、その精度の誤差が10%以内に収まっている。
- 目的
 - 芝地において相対的な自己位置を推定するとともに、適切な位置へ移動可能であることを確認する。
- 試験日時
 - 2021年8月27日（金）
 - 7:30～8:00
- 試験場所
 - 多摩川河川敷 丸子橋下
- 参加者
 - 尾関優作
 - 下岡大樹
- 試験方法
 - 試験系



図 6-29. 試験系

- CanSat

- 試験条件
 - 芝地のある点に CanSat を置く
 - CanSat ローバで初期姿勢方向へ 10m だけ移動するプログラムを実行する
- 試験手順
 1. CanSat を芝地上のある点に置く。
 2. CanSat の初期位置に目印となる構造物を置く。
 3. CanSat と PC をつなぎ 10m だけ走行する試験用のプログラムを実行する
 4. 実行が終了したのちに初期位置と CanSat の位置の間の距離を測定する。

表 6-24 測定・確認項目

No.	確認項目	測定方法 確認方法	判定基準
1	最終位置の確認	CanSat の自己位置推定による位置と実際の位置の間の距離を測定する。	距離の実測値と自己推定値が相対誤差 10%以内であることを確認する。

○ 試験結果

試験により得られた CanSat ローバによる自己位置推定値は $(x, y) = (9.58, -0.107)$ でありこれは直線距離で 9.76m になる。一方実測値では直線距離は 9.64m でありこの相対誤差は 1.2% であった。

試験の様子は以下の動画を参照されたい。

<https://youtu.be/C-Vh4nEVA7A>

0:00 : 試験開始

0:00 : 走行開始

1:15 : 走行終了

1:21 : CanSat の推定する座標の目視

2:54 : CanSat の位置と原点間の距離の測定および相対誤差が 10% 以内にある事の確認

○ 結論

試験結果より CanSat ローバによる自己推定値は相対誤差が 10% を下回っておりミッション要求を満たしていることが確認できた。

第7章 工程管理、ガントチャート（スプレッドシートを推奨）

各担当（ハード・ソフト・全体などの進行状況・予定を記入）

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oaCfHlaW01_ABQVSnLCNUUaeXKgfJiXC/edit?rtpof=true#gid=1999756615

第8章 大会結果報告

1. 目的

Elec. TETRA の ACTS での検証目的は CanSat を用いた「電気探査システムの技術実証」であり、その技術要素として、ローバ駆動と位置推定と制御、複数の電極の地面への刺しこみ、ケーブルを用いた電極同士の電氣的接続担保を技術実証として行った。

2. 結果

(i) 投下1回目

1回目の投下は ACTS1 日目の 11 月 20 日（土）に実施した。

当初の予定では、電極間隔 10m の計 30m の直線距離について CanSat の動作を行い、電気探査を実施する予定であった。しかし、会場の草の背が高く、ローバ駆動部の走破性に難がある可能性が考えられ、急遽、電極間隔 1m の計 3m の直線距離についてのミッションを行った。このような判断を下した理由が以下のとおりである。

- 芝地の様子から、ローバ駆動部の走破性が不安視された
- 1m 間隔のミッションでもすべてのフルサクセス及びエクストラサクセスの達成は可能（＝最低限の電気探査システムの技術実証を実施・達成することが可能）
- 比抵抗測定まで行うため、ミッション時間が相当かかる上に走行距離が長いと自チーム以降のミッション妨害となる可能性があった。そして、その場合はミッション続行の優先度は以降のチームの方にあるため、我々のミッションの完遂を行うことがより困難になると予想された。
- 上記の件もあり、フィールド外での投下も考えたが、フィールド外の方が芝地の状態が悪く、より走破性能が不安視された。

そのため、まず 1m 間隔でのミッションを行い、成功次第 10m 間隔でのミッションを行うという方針とした。

この条件下で 1 回目の投下を実施したが、投下後強風にあおられ、着地点がフィールドギリギリまで流されてしまい、図 8-1 に示すような形で着地した。着地点は深い草地となっており、なおかつ進行方向に大きな草があったため、ミッションの続行が不可能となった。



図 8-1 一回目の投下後の機体の様子

着地判定は実施され、溶断機構は動作したが、これらの草によりスタビライザの展開・パラシュートの分離まで実施することはできなかった。

1 回目の投下におけるサクセスクライテリアの達成度を表 8-1 に示す。

表 8-1 一回目の投下で達成したサクセスクライテリア（黄色で表示）

	MIN (1/6)	FULL (0/3)	EXTRA (0/5)
パラシュート	パラシュート展開		
ローバ駆動	パラシュート分離		
電極刺しこみ	スタビライザ展開 10cm 走行		電極間隔 10m 走行
	1 本目の刺しこみ	4 本の刺しこみ	4 本全て 深さ 30mm 以上 4 本全て垂直 10° 以内
電氣的接続		比抵抗 RMSLE 10%以下	
ケーブル送り出し	1 本目の送り出し	4 本の送り出し	
位置推定			相対誤差 10%以内
位置制御			相対誤差 10%以内

このように、ミニマムの 1 項目のみしか達成することが適わなかった。

(ii) 投下 2 回目

投下 2 回目は ACTS2 日目の 11 月 21 日（日）に実施した。

1 回目の投下では 1m 間隔のミッションに失敗したため、2 回目の投下についても同様に 1m 間隔でのミッションに挑戦した。

投下後パラシュートの展開に成功し、無事着地に成功した。この際、機体の位置と姿勢は想定していた理想的な形で着地することができ、進行方向が次以降のチームの妨害とならないと形となった。その後、溶断機構が動作し、パラシュート分離とスタビライザの展開に成功し、その後の姿勢の正立にも成功した。次に1本目の電極の装填・刺しこみのフェーズに移行したが、問題なく1本目の刺しこみに成功した。1本目の刺しこみ後はローバ駆動により1本目のケーブルを送り出しながら2本目の刺しこみ位置まで走行を行い、1本目のケーブルの送り出しに成功した。その後、2本目・3本目の電極の装填・刺しこみとケーブル送り出しを行ったが、3本目の刺しこみについては刺しこみが中途半端になり深さが浅く、傾きも大きくなってしまった。4本目については無事、刺しこみに成功することができた。

この、2回目の投下の様子については次の URL を参照されたい。

<https://www.youtube.com/watch?v=h58JaSH8og8>

2回目の投下におけるサクセスクライテリアの達成度を表 8-2 に示す。

表 8-2 二回目の投下で達成したサクセスクライテリア（黄色で表示）

	MIN (6/6)	FULL (3/3)	EXTRA (1/5)
パラシュート	パラシュート展開		
ローバ駆動	パラシュート分離		
電極刺しこみ	スタビライザ展開 10cm 走行 1 本目の刺しこみ	4 本の刺しこみ	電極間隔 10m 走行 4 本全て 深さ 30mm 以上 4 本全て垂直 10° 以内
電氣的接続		比抵抗 RMSLE 10%以下	
ケーブル送り出し	1 本目の送り出し	4 本の送り出し	
位置推定			相対誤差 10%以内
位置制御			相対誤差 10%以内

このように、フルサクセスをすべて、エクストラサクセスについては位置推定の項目のみを達成することができた。これにより、軌道上衛星に依存しない、CanSat による自律的な電気探査システムの技術実証を行うという目標を達成することができた。

比抵抗の対数平均二乗誤差 (RMSLE) については、CanSat が刺しこんだ電極と後から人の手で刺しこみを行った評価用電極について比較し、0.568%と目標の 10%を大幅に下回る非常に精度の良い電氣的接続を達成できた。

電極間隔 10m での走行については先述した通り、2 回の投下で 1m 間隔での走行のみしか実施することができなかつたため、達成することができなかつた。これにより、他の探査手段との優位性を示すということころまで至ることができなかつた。

4 本の電極全ての刺しこみ深さ 30mm 以上及び垂直 10° 以内での刺しこみについては 3 本目の電極で刺しこみに失敗したため達成することは適わなかつた。

位置推定の相対誤差 10%以内については、最も誤差の発生した 2 本目の位置でも 7.44%となり、目標の 10%以内を達成することができた。

一方、位置制御の相対誤差 10%以内については、2 本目の位置で 13.00%の誤差が発生してしまい、達成することができなかった。

3. 考察

(i) パラシュート

パラシュートの展開については 2 回の投下とも問題なく成功した。

しかし、パラシュートの分離については 1 回目の投下で失敗してしまった。これは、分離には溶断機構の作動だけでなく、スタビライザの展開を利用した機体の回転を受動的に利用することも含まれていたためと考えられる。

(ii) ローバ駆動部

1 回目の投下では、パラシュートが風に流されて枯れた葉の掃き溜めのような場所に落下してしまっただ。スタビライザを溶断することはできたが、コンベックスによる地面との反力でスタビライザが展開するため、あまりに落下地点が柔らかすぎると展開できない。よって、スタビライザが展開せずミッション失敗となってしまった。

2 回目の投下では、スタビライザの展開に成功し、3m 走行することが出来た。しかし、スタビライザの展開は確実なものではなかった。というのも会場の草地に合わせてスタビライザ（コンベックス）の枚数を調整する必要があったのだが、朝霧高原に想定以上の勾配があったため、図 8-2 に示すように CanSat の進行方向が上り坂か水平であれば展開に成功するが、下り坂であればスタビライザを展開する勢いで一回転してしまう状態であった。しかし、2 回目の投下では運よく進行方向が水平であったためスタビライザの展開に成功した。



図 8-2 スタビライザ展開

(iii) 電極刺しこみ

1 回目の投下時には刺しこみシーケンスにまで到達しなかったため 2 回目投下についての記述となる。

2 回目投下では、サクセスクライテリアはフルサクセスまで成功し、シーケンス終了後に電極が地面から抜けていないことを確認した。

1, 2, 4 本目の電極に関してはエクストラサクセスの基準を突破していたが、3 本目のみ達成できなかった。その原因として、あさぎりの環境が想定より草が深く、機体の底面と地面との距離が長かったことにあるとみられる。工夫した点にて説明するように、機体の回転を防ぐために停止・下降を繰り返すフェーズがあるが、地面までの距離が長いことでこのフェーズの長さが足りなかったことが失敗の原因であるとみられる。

(iv) ケーブル送り出し

1 回目の投下時にはケーブルを送り出すシーケンスにまで到達しなかったため 2 回目投下についての記述となる。

2 回目投下では、ケーブルの送り出し機構部のサクセスクライテリアをすべて達成し大きな問題がなく終わることができた。サクセスクライテリアにはないが、走行に影響を与えない送り出しも実現できた。

評価方法は目視での確認であり途中で切れていたりすることなく送り出せていたので問題なく達成としている。

(v) 電氣的接続

1 回目の投下時には電気探査試験を行うシーケンスにまで到達しなかったため 2 回目投下についての記述となる。

2 回目投下では、電気探査を行う環境の構築まで達成でき実際に見かけ比抵抗値の測定まで達成できた。

その取得した値は、電氣的接続のサクセスクライテリアを達成することができた。データ取得方法については、事前実験の際に測定された電圧値・電流値が安定しないことや時間的に変化するオフセット電圧のようなものが生じたことため、テスターの値をロギングして変化を観察し測定方法を確立した。

電圧値・電流値が安定しないことに関しては地面やケーブルなどの影響によって CR 回路の過渡応答になっていると考え、オフセットに関しては、周期的に電源を ON/OFF することで問題を解決した。

以下確立した測定方法について

1. 一定時間で電流の ON/OFF の周期を作る。
2. OFF 時間の値の平均値をオフセット電圧の代表値とする。
3. ON 時間で取得した測定値それぞれに対して以下の操作を行う。

電圧は上記で求めたオフセット電圧を減算した値を v [V] とし、電流は測定値そのものを a [A] とし、瞬間の抵抗値を v/a で求めた。

それらの平均値をその地面での見かけ比抵抗の代表値として用いることにした。今回実際の投下時には 30s 間隔で測定を行い、十分なデータ量をとるために ON/OFF の切り替えは 10 回程度行った。

そのためデータ量総量が大きくなってしまったため以下図 8-3 にそれをグラフ化したものを載せる。

縦軸は見かけ比抵抗値 [Ωm]であり、横軸は時間 [s]である。

また、左半分は今回にミッションで使用した電極の結果、右半分に評価用電極として用いた丸釘の結果を載せている。

丸釘は、実際に電気探査で用いられているものと同程度のサイズであり十分な精度で測定ができていていると考えている。

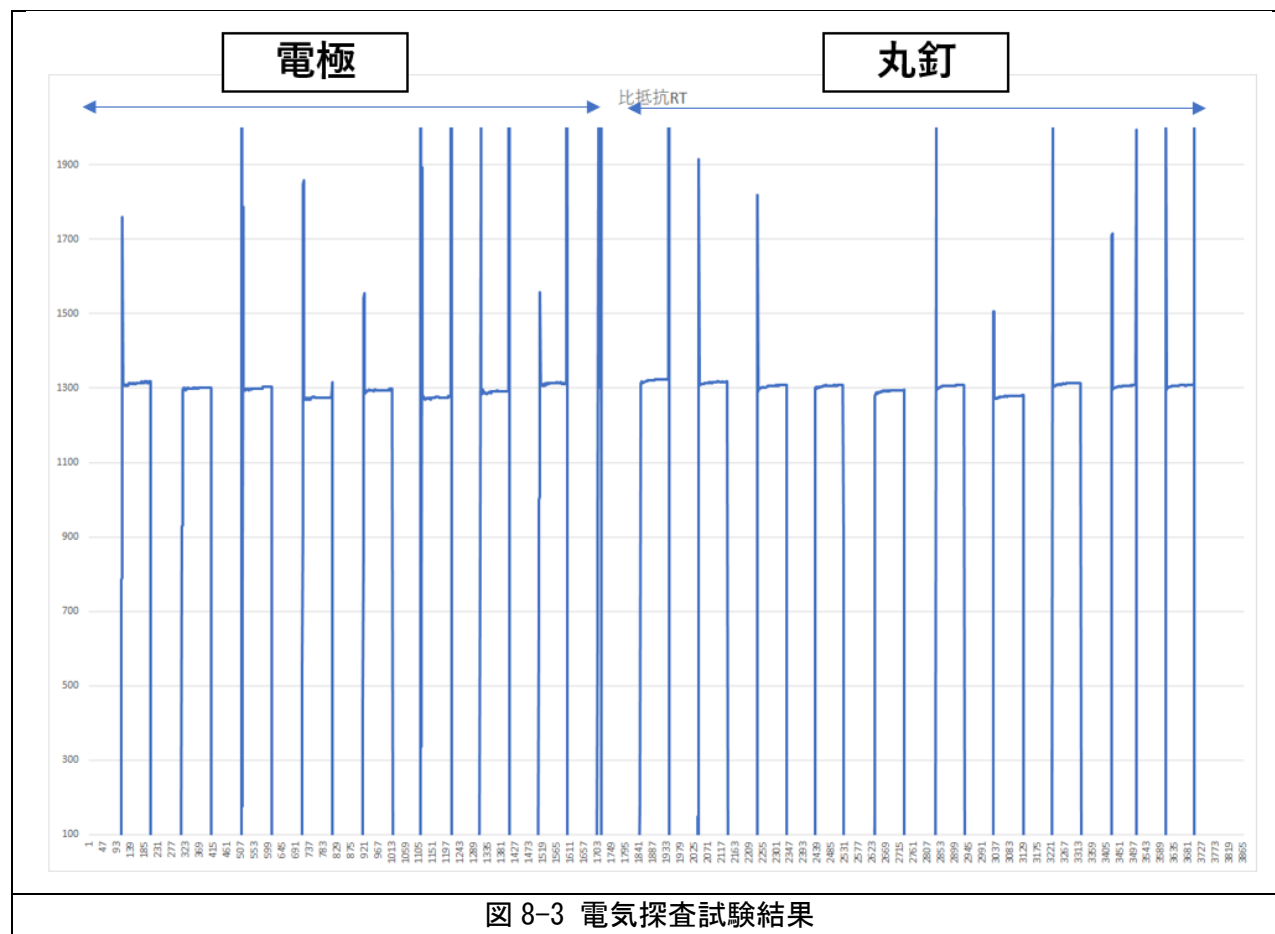


図 8-3 電気探査試験結果

この値各々について RMSLE (本審査書内では V21 電気探査試験で式等を記述している。) という手法で真値としている丸釘の値に対してどの程度の誤差が生じているかを判別してサクセスクライテリアとした。

その計算結果 0.568% の誤差に収まっており非常に精度よく測定ができたことがわかり、サクセスクライテリアの 10% 以内という条件も問題なく達成できた。

(vi) 電極位置推定

1 回目の投下時には走行シーケンスにまで到達しなかったため 2 回目投下についての記述となる。

2 回目投下では、位置推定のエクストラまで達成した。一本目の電極における相対誤差が最も大きく 7.44%であった。位置制御の考察で言及するように、走破抵抗が高く滑りが生じたために位置推定に乱れが生じたためと考える。

(vii) 電極位置制御

1 回目の投下時には走行シーケンスにまで到達しなかったため 2 回目投下についての記述となる。

一本目の相対誤差が 13%となってしまったため位置制御はミニマム達成ができなかった。その原因としては到着判定に問題があったこと、一本目の電極から二本目の電極へ走行する間に滑ってしまったことが挙げられる。

一つ目の要因として挙げた到着判定に問題があったことについては、位置制御の到着判定を行うアルゴリズムに問題があり電極間隔を設定より過小評価してしまったことがある。ミッション時の処理では 0.1m 手前で到着判定を行ってしまった。これにより目標の電極位置と実際の電極位置の差である位置制御誤差は 13%と大きくなったと考える。

二つ目の要因として挙げた滑ってしまったことについては当該の区間では走破抵抗が高く、走行が難しくなる箇所があった。その箇所では車輪の滑りが生じてしまいオドメトリの推定位置が乱れてしまったために、一本目の誤差が大きくなったと考えている。

(viii) 電気探査

1 回目の投下時には走行シーケンスにまで到達しなかったため 2 回目投下についての記述となる。

みかけ比抵抗の測定に成功し、朝霧高原の地質として矛盾のないものと分かった。測定値は $1\text{k}\Omega\text{m}$ のオーダーであり、比抵抗としては比較的大きな値となった。ミッションを行った朝霧フードパークは厳密には含まれていないものの、朝霧高原を含む富士山西麓の CSMT 法による先行探査では、表面から 1km ほどの深さまでの範囲に数 $\text{k}\Omega\text{m}$ ほどの高比抵抗帯が分布すると指摘されている（大野正夫「富士山西麓地域における CSMT 観測（序報）より」）。今回得られた値でも $\text{k}\Omega\text{m}$ のオーダーであり、この先行探査の報告に矛盾がないことが分かる。

第9章 まとめ

1. 工夫・努力した点（ハード、ソフト、マネジメントすべて）

(i) ミッション

ミッションを定義するにあたり工夫・努力した点の一つ目は、電気探査という有用性が見込まれ、新規性のある課題に取り組めたことがある。電気探査は地上における地質調査の手法としては広く使われる技術であるが、それを宇宙応用したり CanSat で行ったりするものは少ない。また電気探査は地上において地中の水分を知るという点で多用されており、宇宙において水分探査を行う場合に宇宙応用できる見込みがある。このような課題に着目し、CanSat ミッションとして掲げられた点が、本ミッションのミッション定義における工夫点の一つである。

ミッションを定義するにあたり工夫・努力した点の二つ目は、CanSat で実際に値の測定を目指すミッションを行えたことにある。Elec. TETRA で行う CanSat ミッションは構造的な展開や電子的な動作だけではなく、展開する構造物により実際にみかけ比抵抗という量を測定するまで至る。CanSat のミッションという枠組みの中で、技術的な目標だけではなく量の測定という目標を目指した点が、本ミッションのミッション定義における工夫点の一つである。

(ii) 機体構造部

機体構造部として最も努力した点は、やはりパラシュートや基板などのバス部からローバ駆動部、刺しこみ・装填機構部、ケーブル送り出し機構部などの多様なコンポーネントを1つの CanSat に組み込み、これをレギュレーション内に収めたことである。組立性を多少犠牲にしてもミッションを達成するために最適なコンポーネント配置を優先し設計を実施した。特に刺しこみ機構については、その特性上機体中央にあることが求められ、ほかのコンポーネントにも大きなスペースをとる中、確実に中央に配置できるようコンポーネントのサイズや位置を調整したところは工夫点に上げられる。

また、上記のコンポーネントの最適配置を行うため、機体フレームはできるだけ最小限・最小質量に抑えつつ、各荷重に耐えられるような設計をとる必要があった。コンポーネントとの干渉を防ぐために、梁のサイズや位置についても強度も勘案しつつ微調整を行い設計した。

(iii) パラシュート部

パラシュート設計において、パラシュートの形状のモデルを作成し数値シミュレーションを繰り返すことで、より最適なパラシュートの寸法を探り、30回以上にわたる複数形状・寸法のパラシュートの投下により実測値を使用したフィールドバック設計を行ったことは努力した点と挙げられると思う。これにより、CanSat に過負荷を与えない減速着地を実現することができた。

また、シュラウドラインについては先端をアイ加工されたワイヤを使用したり、中間に収縮チューブを用いた部分を設けることで、比較的軽量に保ちつつ、機体に絡まらずパラシュートの分離ができるような設計を行った点も工夫点として挙げられると思う。

(iv) 電装部

電装部の工夫・努力した点として、まず電装基板の小型化に努めたことがあげられる。本ミッションの機体では機体中央部にケーブルや刺し込み機構といった要素が配置されており、基板を設置することができるスペースが限られていた。そのため、機体前面のフレームに固定する形をとった。試作段階において基板を3枚に分割した設計を行ったが、基板どうしを接続する配線が扱いにくく、余分なコネクタで基板の面積を増加させてしまったため、1枚の基板で作成するよう再度設計を行った。

また、他の要素との干渉を避けるため、基板の部品高さとコネクタの配置を工夫する必要があるため、設計時に基板上の部品を含めて正確な3D CADモデルを作成することを行った。コネクタの配置はフレームの構造を避けるように配置しており、基板の面積が少ない中、適切な位置にコネクタを配置するのが難しい作業だった。

回路設計及び部品選定においても基板の小型化を意識した。OBCには32ピンサイズのマイコンボードを使用するため、NUCLEO-L432KCを選定しており小型化と十分なSRAMの確保を両立することを意識している。

しかし、本ミッションの機体ではモータが5個と多いのに加え、そのうち3個にはインクリメンタル式のエンコーダを使用していた。そのため、全体的にI/Oピンが不足しており、回路設計においてはその点に工夫が必要であった。逆転操作が不要なモータについては、積極的に逆転機能を廃止し、モータードライバとマイコンの接続を1本のGPIOで行った。また、エンコーダは回転方向の検知ができなくなるものの、2週倍で使用し1相のみをマイコンと接続することでI/Oの削減を行っている。MU-2との接続においても、ミッションにおいてアップリンクを行う必要が無かったため、UARTを片側1本だけの接続としている。

ソフトウェアの開発においては、オブジェクト指向に基づいた積極的な抽象化を行っており、モータードライバやセンサモジュール等のドライバソフトウェアを抽象化し、シーケンスの実装がドライバやセンサに依存しないような設計を行っている。また、mbed OSのスレッド機能を積極的に使用し、センサ情報の読み出しやGPSダウンリンクなどは、シーケンスの進行とは独立して行われるようにしている。さらに、SDカードへのログデータの保存については、データの整理と読み出しが容易なようにファイルシステムを使用したが、Fat32では書き込み中にマイコンがリセットされるとファイルシステムが破壊される危険性があり、組み込み用に信頼性の向上が図られたLittleFsを使用するようにした。

(v) ローバ駆動部

ローバ駆動において最も工夫・努力した点は必要最小限の質量、体積でローバ駆動部を設計したことである。

刺しこみ・装填機構部やケーブル送り出し機構部が質量、体積を取ってしまうことからローバ駆動部はなるべく軽く、小さく作ることが求められた。そのためにローバ駆動部は片方で、サイドプレート、モータ、セットカラー、タイヤ、サイドプレートとモータを接続する部品×2というたった7つの部品で構成されている。

各部品にも工夫点があり、図 9-1 に示すサイドプレートと呼んでいる CanSat の横に接続されたプレートは、厚さ 10mm のアルミ板を CNC で削り出して製作した。このような形状にすることでモータをサイドプレート内に一部収納することが出来るため、CanSat 内部の体積は大きくなる。図 9-2 に示すタイヤはアルミ製のタイヤフレームに天然ゴム製のスパイクを接着して製作した。タイヤフレームは CAE を用いてなるべく軽くて衝撃を耐えられるように設計した。そのため、厚さ 10mm のアルミ板を両面 CNC で削るといって 1 枚 50 時間かかる大変な加工であった。また、スパイクは厚さ 10mm の天然ゴム板をレーザーで加工跡をつけてそれを糸鋸盤で切断して製作した。

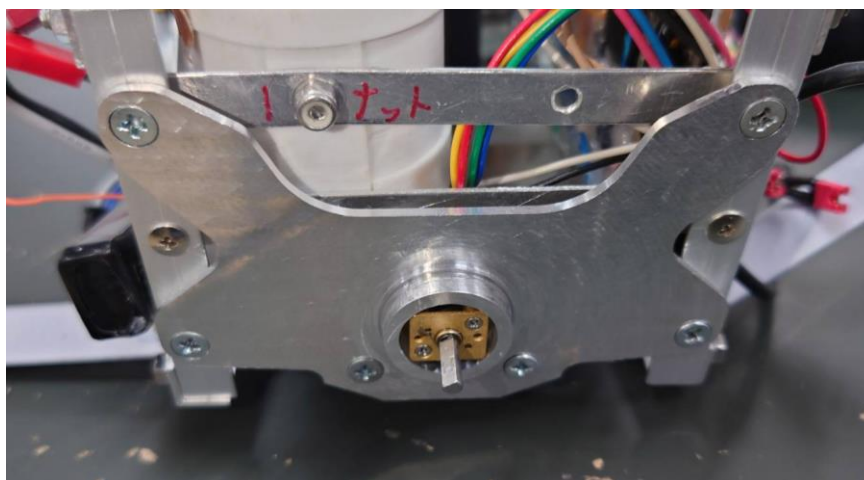


図 9-1 サイドプレート

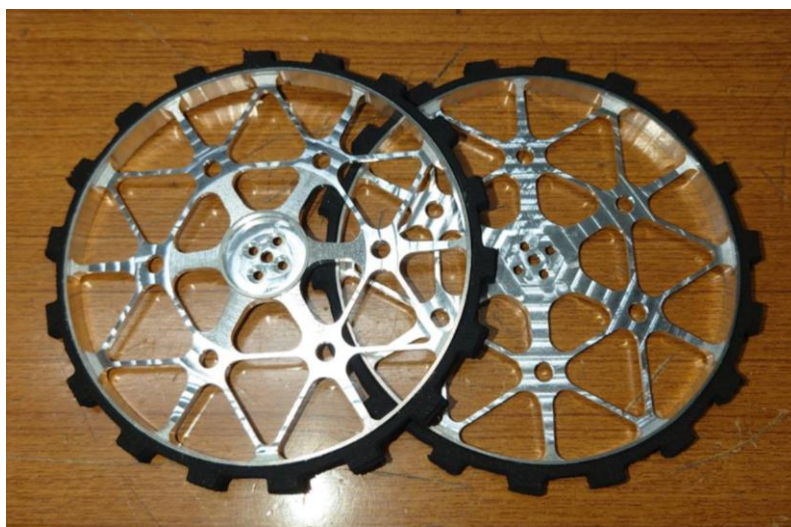


図 9-2 タイヤ

(vi) 電極位置推定・制御

電極位置制御推定において工夫したことは、Elec. TETRA という CanSat ローバの特性にあわせて位置推定を行った点がある。

Elec. TETRA ではケーブルを送り出しながら走行するため、ケーブルの張力が CanSat の進行方向を変えようとする向きの外トルクとなる。ケーブルは 3 本独立に送り出す必要があるため、CanSat ローバの中心から離れた点から送り出す必要性が生じる。加えてケーブルは受動的な送り出しであるため、ある程度の張力が生じてしまう。これによりケーブル送り出しで生じる外力は CanSat の進行方向を変えようとする外トルクとなる。ケーブル張力としては走破性能に問題のない程度の大きさであるものの、トルクとしては CanSat の進行方向を徐々に曲げるのに十分な大きさとなっている。

ケーブルによる外トルクで生じた CanSat の進行方向変化はエンコーダによるオドメトリで検知できない。オドメトリは CanSat の左右の車輪の回転数差から CanSat の進行方向変化を求めることができる。しかし、外トルクによる CanSat の進行方向変化は左右の車輪の回転数差に現れない。よってオドメトリだけを利用して CanSat の航法を行うと、オドメトリの推定値上ではまっすぐに走行していても、実際の走行は大きく曲がっていつてしまうことがある。

カルマンフィルタによりジャイロセンサとエンコーダによるオドメトリの値をフュージョンさせ、すべりを検知できるように工夫した。ジャイロセンサにはドリフトが生じるため、バイアス値を静止時の値から推定した。そのもとで逐次的にジャイロセンサとオドメトリによるヨー方向角速度を比べ、定常的に差が生じる場合にはオドメトリの推定値が滑っていると判定するようモデルをつくった。一瞬のすべりは検知できないが、このモデルによって定常的にすべる場合を検知できるため、その積分によって得られる位置推定位置はすべりに対する耐性が向上した。

(vii) 刺しこみ・装填機構部

刺しこみ機構における工夫・努力した点は、安定して電極を 4 本刺しこむためにドリルの回転を利用したことと、ドリルの下降速度をセンシングして停止・下降を繰り返す制御を行ったことである。

電極にはドリルの形状を利用しており、これをドリルと同じように回転させることで掘削性を上げている。これによって草の根を切り、固い土を排土することで刺しこみ能力を高めている。

地面が固かったとき、普通に刺しこもうとするのでは機体が浮上してしまったり回転してしまったりする。これを防ぐために停止・下降を繰り返すプログラムを実装した。具体的には、刺しこみ前半では停止・下降を周期的に繰り返すことで、少しずつ刺しこむようにした。これにより、機体が回転することなく電極の先端を地面に刺しこむことができる。刺しこみ後半ではドリルの下降速度をセンシングして、しきい値を下回ったときに停止するようにした。機体が浮上するとき、ドリルの下降速度が小さくなることが実験により判明していたので、これを利用した。

装填機構における工夫・努力した点は、限られたスペースの中電極を 4 本装填・接続するためにリボルバー機構を用いて、電極の頭にテーパを付けたことである。

リボルバー機構を採用することで必要最小限の大きさで 4 本の電極を保持することができ、電極の頭のテーパによって接続時の誤差を吸収することができる。

これらの工夫点によって装填機構は実験段階から成功率 100%を達成している。

(viii) ケーブル送り出し機構部

今回ケーブルの送り出し部に関する工夫・努力した点は、開発時に様々な拘束条件があったため、その条件をすべて満たす巻き方及び収納方法を確立するために十数種類もの手法を開発・検討・実験を行ったところである。

これまでに行った主な検討事項を書いていくと、一般に糸を収納する際に用いられるボビンへの巻き付けを初めに考えたのですが、走行の力のみで送り出さないといけない、つまりアクチュエータを使用できないという条件があった。そのため、ボビンであると送り出す際の抵抗が大きくこの条件を満たさないため使用できなかった。

また、長方形や三角形の板にケーブルを巻き付ける手法を実験した際には収納スペースが足りず使用ができなかった。

その他にもボビンを機体の外に放出する手法や、巻き付け軸方向に送り出す手法などさまざまな手法を考えたが、収納スペースやアクチュエータを必要としない送り出しを可能とする低抵抗な巻き方等、全ての条件を満たす巻き方が玉巻のみであったことからこの巻き方を採用するに至った。

このように何度も繰り返した開発・検討・実験が工夫・努力した点である。

また、収納ケースに関しても何度も送り出し実験を行いそのたびに送り出しミスの要因を考察し、サイズや構造を変更させて再度実験を行う過程を経て収納ケースの形状やサイズを決定した。

さらに、機体内の配線に関しても何度も装填部と合わせた実験を行うことでどのような状態の際に機体内で絡まるのか、他の電極に干渉するのかということを考察し、さらにそれを投下前チェックリストにいれて毎回確認するちょっとした工夫によって、機体内の配線の位置を確立させた後には1度もミスなく実施することができた。

(ix) マネジメント

Elec. TETRAの開発では週に1度、チームメンバー全員でのミーティング、責任教員の中条先生らによるレビューを行うことで設計や製作などの開発を進めた。進捗の進捗については適宜ガントチャートを利用し、計画の修正を行うことにより調整を行った。

また、開発方針として初めにミッション目標を達成するための開発優先度を設け、これに従って開発を進めた。これはシステム要求やミッションとは異なるものであり、取り組むべき開発が多い我々のチームにおいてその優先度を示すことにより、力をより早くより多く入れる部分を明確化するとともに目標に向けた開発速度の効率化を目指したものである。策定した開発優先度について表 9-1 に示す。

表 9-1 Elec. TETRA の開発優先度

優先順位	項目
1	体積的・質的に収まる
2	パラシュートの展開
3	1 本目の電極を刺す
4	パラシュートの切り離し
5	草地で走行する
6	1 本目のケーブルを送り出す
7	2 本目の電極を刺す
8	1, 2 本目の電極に電氣的接続がある
9	1-2 本目の電極間の位置を推定する
10	2 本目のケーブルを送り出す
11	3 本目の電極を刺す
12	3 本目の電極に電氣的接続がある
13	1~3 本目の電極間の位置関係を推定する
14	2-3 本目の電極間の距離を推定する
15	3 本目のケーブルを送り出す
16	4 本目の電極を刺す
17	4 本目の電極に電氣的接続がある
18	1~4 本目の電極間の位置関係を推定する
19	実際に電圧をかけて測定する
20	5cm の深さで刺す (→後の実験で 3cm で十分である結果が得られた)
21	電気探査に必要な距離 (電極間隔 10m) を走行する
22	部分的な自立走行で必要な電極位置精度を得る
23	垂直精度を高めて電極を刺す
24	完全な自立走行

この開発優先度の策定基準は以下のようなものである。

- ① 電気探査システムとして成り立つ
- ② より多くの理学的につながる
- ③ 宇宙転用を見据えた技術実証の意義がある
- ④ ミッションシーケンス順

このようにして、チームメンバー各々がどの部分から優先度を高くして開発を行うべきかを常に明確化しておくことによって、取り組みやすくしたというところが工夫の一つである。

また、ACTS 本番に向けて、準備漏れがないようチェックリストを作成した。しかし、会場はスマホ以外にインターネット環境がないことや担当者各々がチェックを実施するためチェックに時間を要すること、ログが残しづらいといったことが考えられた。そこで、各個人のスマートフォンからチェックと状況の共有を行うために、このチェックリストをチームの slack で行えるように GAS と slack api を使用し実装した。これにより、負担がなく、より円滑で漏れのないスマートな投下前チェックを実施することができた。

2. 課題点

(i) 機体構造部

機体構造部の最大の課題点はやはり組立性が悪かったことにあると考えられる。もちろん意図して組立性よりコンポーネントの理想的配置を行うことを優先して設計を行ったが、それにしては組立に多大な時間を要してしまうことになってしまった。

特にケーブルを送り出した走行後にケーブルユニットを交換する際は、機体のサイドユニットをすべて分解して再度組み立てなおす必要があった。この点にはもっと改善の余地があったかと思う。

また、溶断機構の位置にも再検討の余地があると考えられる。溶断機構の位置はほかのコンポーネントの配置との関係から従属的に決定したが、これが後々のキャリアとの干渉問題を引き起こしてしまった。次回以降の設計ではタイヤ外径ギリギリを狙うようなボディサイズの設計は避けるべきだと考えている。

(ii) パラシュート部

パラシュートはおおむねうまく機能したが、その分この部分に非常に多大な時間を割いてしまい、より詰めるべきミッション部の開発への遅れをもたらしてしまう結果となってしまった。より簡易的な手法で寸法・形状を決め、試験による実証によってのみ評価することで開発時間の短縮が見込めたと考えている。

(iii) 電装部

まず、電装基板の大きな課題点として、無線モジュールに関する設計があげられる。使用した基板において、MU-2 下部に配線パターンが存在しており、ベタ GND となっていなかった。MU-2 のデータシートにおいてもモジュール下部を GND にする用指示があり、適切な設計となっていなかった。このことは、審査書においても指摘をいただいている。また、アンテナの取り回しについても十分な考慮はされておらず、ACTS 試験会場の距離では問題なかったものの、GPS ダウンリンク試験における通信可能距離は同モジュールを使用した他の CanSat に比べて小さくなっている。

次に、さらなる基板の小型化と MCU の最適化が可能であったことがあげられる。マイコンボードの大きさを基準として MCU の選定を行ったが、工夫・努力したことで述べたように、I/O ピンが十分ではなかった。使用する I/O ピンを最小限にすることで必要な機能は実現したが、開発の段階でより柔軟性のある動作や、追加のセンサ・アクチュエータを要求されることは少なくなかった。具体的には、モータの逆転動作・アップリンクなどがあげられる。

今回、世界的な半導体不足の影響で MCU やセンサのチップ単体での入手が困難だったことがあり、マイコンボードとモジュール基板を使用した設計となった。そのため、MCU 選定の自由度が制限されていた。最適な部品の入手が可能となれば、MCU やセンサをチップ単体で基板上に実装することができるため、さらなる小型化が可能だろう。また、無線モジュールは基板上で面積を多く締めているが、その選定において、東工大の過去の CanSat を前例に MU-2 としており、より小型なモジュールを選定できた可能性は大きい。

(iv) ローバ駆動部

ローバ駆動部の主な課題として、ギヤヘッドの能力不足が挙げられる。今回使用したギヤヘッドは耐久トルクが低く、高トルクを負荷すると、ギヤが破損してしまうため、大量のギヤヘッドを使用してしまった。走行に必要なトルクなどの計算が正確に出来なかったため、体積と質量を重視してモータを選定した結果、このギヤードモータが最適だと判断していた。しかし、BBMの走行実験でこのモータで走行できることは確認していた。そのため解決策として、モータに流れる電流値を制御すること、ギヤヘッドに歯車を取り付け、さらに減速すること、ブラシレスモータの採用を検討することが挙げられる。電流センサはポートが足りず今回搭載することはできなかった。また、ブラシレスモータは、探しはしたものの丁度良いものが無かったため採用を見送ってしまった。ギヤヘッドに歯車を取り付け、さらに減速することについては図9-3の左図に示す現行のものから、右図に示すような構造に変更するというものである。現行のものはタイヤをモータに直付けしているが、改良案ではモータにピニオンを取り付けて歯車を介してタイヤを回転させる。こうすることでモータの耐久トルク以上の負荷をタイヤにかけても歯車で減速しているおかげでギヤヘッドが破損することはなくなる。しかし、欠点として質量、体積は増えてしまう。

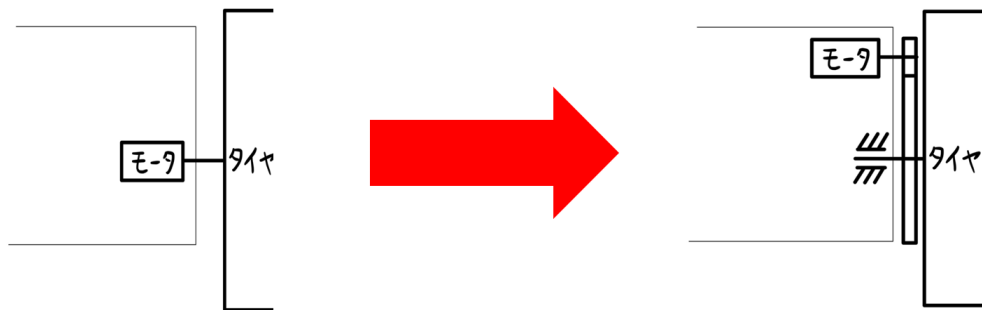


図 9-3 ローバ駆動部の改良案

(v) 電極位置推定・制御

電極位置制御推定の課題として、推定方法が基本としてデッドレコグニングのため一度推定値が乱れると、永久的に誤差を修正できない点があげられる。カルマンフィルタによりすべりを加味した位置推定などを行ったが、大前提としてオドメトリに頼る位置推定である以上、一度すべりの検知に失敗するなどして位置推定が乱れてしまえば、そのずれは以後の位置推定すべてに波及してしまう。

(vi) 刺しこみ・装填機構部

刺しこみ機構の課題として、石や非常に固く太い草の根等があった場合に刺しこみを完了できないというものがある。モータの出力と機体の重量が1kg程度という制約がある以上、石などの固いものに当たった場合は現在の刺しこみ機構では刺しこみを完了できず、機体が浮上してしまう。

(vii) ケーブル送り出し機構部

ケーブルの送り出しが失敗してしまうとローバが走行不能になり停止してしまうため、ミッションが失敗になってしまう。

そのため、今回結果として80~90%程度の成功率であったがより100%の成功率に近づける必要がありこの点が課題になってくると考えている。

今回送り出しの際にミスが発生する要因として、図9-4の上部において先に送り出される内側のケーブルに外側の層のケーブルが干渉することによる絡まりが考えられている。



図9-4 玉巻の収納

玉巻形状は送り出しミスには問題がないと考えているものの、このような絡まりが起こる原因として巻ききった後、収納ケースに収納するまでの間に形状を十分に維持できていないことであると考える。

(viii) 電氣的接続

測定方法には大きな問題がないと考えているため課題ないとしている。

機構に関してはメンテナンス性の悪さが課題として挙げられている。

コネクタ部の構造上、ケーブルが切れた場合コネクタ内部の銅板、ばねに再びはんだ付けをしないといけない機構になってしまっている。

そのため、ケーブルが切れた場合長時間をかけて修正することになるため、実験の試行回数を増やすことへの妨げになってしまう。

3. 今後の展望

Elec. TETRA は今回「電気探査システムの技術実証」を軌道上衛星に依存することなく自律的に行えるということを達成した。しかし、他の地中探査と比較した際の優位性を示すことができていないため、以下のようにこの技術を実宇宙ミッションでの応用に向けて展開していくとよいと考えている。

- ① 電極間隔 10m 以上の電気探査の実施
- ② 電気探査を行うための測定装置や電源の搭載
- ③ 電極数を増やしたより高度で広域な電気探査の実施
- ④ 電極を引き抜き、再度刺しこみ、配置する技術の確立
- ⑤ 複数機による探査の効率化

①については、今回の投下では実施できなかったものであり、これを達成することにより探査深度の面で他の地中探査手法に比較して電気探査システムも優位性を示すことができると考えている。

②については、今回は CanSat に搭載できないと早い段階で判断し、人の手を介入して実施した。しかし、実宇宙ミッションを考えると人の手を加えることは基本的にできない（人の手を介する状況であれば、自律的に電気探査を行うこのシステムの意義があまりない）ため、この点についても自律的に行うということを実際に検討する必要があると考える。

③については、今回 4 本の電極という電気探査に必要な最低限の本数の電極で電気探査を実施したが本数を増やしていくことでより実用的な電気探査を行うことができると考えている。

④については、1 機の電気探査機によって複数個所、複数深度の探査を実施できるようになるため、探査コストの削減につながると考えられる。

⑤については、この探査機が CanSat サイズという超小型であることの利点を生かすことができると考えている。

最後に、Elec. TETRA はミッション決めに沢山の時間を費やし、目標をしっかりと定めたからこそ、メンバー全員がしっかりとした指針をもって開発を進めることができました。何を目的に CanSat を開発して、その先にはどのようなビジョンがあるのか、この点をしっかりと考えてから実際の開発に駒を進めていくことを強くお勧めします。