

## 第23回衛星設計コンテスト

事務局使用欄

受付番号 2738

年 月 日

# アイデア概要説明書

応募区分 ジュニアの部

### 1. 作品情報・応募者情報

作品名 (20文字以内)

ヨーヨーの原理を用いた探査ロボット

作品名 副題 (これは公式文書では省略する場合があります)

ヨーヨー型探査ロボットを用いた、低リスクかつ低コストなサンプルリターン

	氏名(フリガナ)	学校名、学科	学年
代表者(正)	木谷 太祐 (キヤ タイスケ)	山口県立山口高等学校 理数科	1
代表者(副)	村本 剛毅 (ムラモト コウキ)	山口県立山口高等学校 理数科	1
メンバ1	柳田 翔平 (ヤナギタ ショウヘイ)	山口県立山口高等学校 理数科	1
メンバ2	宮木 惇広 (ミヤキ アツヒロ)	山口県立山口高等学校 理数科	1
メンバ3	八鍬 理希 (ヤクワ リキ)	山口県立山口高等学校 普通科	1
メンバ4	石津 智基 (イシヅ トモキ)	山口県立山口高等学校 理数科	1
メンバ5	宮本 翔一郎 (ミヤモト ショウイチロウ)	山口県立山口高等学校 普通科	1
メンバ6			
メンバ7			
メンバ8			

### 2. アイデアの概要 (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。)

ヨーヨーのように自身の回転エネルギーを利用して探査機本体に帰還する探査ロボットを使い、衛星などの天体の表面や内部の物質をサンプルリターンする。エネルギーの消費を最小限に抑え、探査機本体は大気圏突入や着陸をしないですむので、本体が直接傷つく恐れがなく、地球に帰還する余裕を残しながらのサンプルリターンが可能になると考えた。

### 3. 目的と意義 (目的・重要性・技術的意義等)

#### (a) 目的 (今回考えたアイデアを何に利用するか等)

天体の構成成分や構造を調査する際、小惑星探査機はやぶさが行ったように、実際に成分を採取して地球に持ち帰ることで調査の精度は上がる。しかし、採取の対象となる天体に着陸すると、探査機本体が傷つき、地球への帰還を困難にする可能性が高くなる。そこで、ヨーヨーのように、自身の回転エネルギーで天体から探査機本体へ帰還する探査ロボットを用いることで、衛星本体には一切のダメージを与えずにサンプルリターンを行い、高精度な調査を行うことが可能であると考えた。今回は、この探査ロボットを用いてエウロパの氷を採取するプロジェクトを提案する。エウロパには生命が存在している可能性が指摘されており、大気が希薄でサンプルリターンの実施が容易であることから、対象をエウロパにした。

#### (b) 重要性・技術的意義等 (ex: 宇宙空間で利用する理由、他にない技術など)

探査機本体が大気圏突入や着陸をすることで機体が損傷することを防ぎ、探査に必要なエネルギーを必要最小限にとどめることができるので、地球に帰還できる可能性が高まる。小惑星探査機はやぶさの場合、結果として地球に帰還を果たしたものの、着陸に失敗してサンプルリターンが上手くいかなかったり燃料が漏れ出したりと、着陸前後のアクシデントが多く、地球への帰還が極めて困難になった。今回の探査ロボットを用いれば、このようなアクシデントを最小限にとどめることができる。なお、今まで困難であった大気を持つ他の天体へのサンプルリターン計画も可能になる。

また、モーターなどで直接巻き上げる方法では、エウロパの地表までの約1キロメートルの間を行き

来するだけの電力を余計に消費するので、地表からの高さを上手く利用するどころか探査機本体が帰還するための電力の浪費になりかねない。ヨーヨーの動作を用いると、消費する電力を低減することができる。なお、巻き上げ方式より短時間で作業を終了できるため、本体の姿勢制御に用いるエネルギーも少ない。つまり、「ヨーヨーを用いた探査ロボット」のシステムは、従来の惑星探査では利用されることの少なかった「位置エネルギー」を有効に利用できる方法なのである。

#### 4. アイデアの概要

##### 《ヨーヨー型探査ロボットの概要》

- |       |                               |    |         |
|-------|-------------------------------|----|---------|
| ● 円盤  | 材質:超々ジュラルミン A2057、半径:25.0cm   | 質量 | 45.40kg |
| ● 軸   | 材質:ハイス鋼 SKH56、直径:5.0cm、長さ:2cm | 質量 | 0.15kg  |
| ● 紐   | 材質:タングステン、太さ:0.1cm、長さ:1000m   | 質量 | 0.76kg  |
| ● おもり | 材質:鉄、半径:13.6cm、厚み:1cm         | 質量 | 7.80kg  |
- 総質量 54.11kg

(数値等詳細は添付資料「サンプルリターン概要説明書」を参照)

今回のミッションでは、この探査機に加えて、サンプル掘削機としてエウロパ用ヨーヨー型探査ロボット(図1)を製作する。また、ヨーヨー着氷時の回転を維持するために外枠(図1A)を設けた。他の天体のサンプルリターンを行うときはおもり(掘削部、図1B)のみを対象天体にあわせて変更するだけでよい。外枠とヨーヨーは軸受けを介して接続し、ヨーヨーが回転しても外枠は回転しない構造となっている。

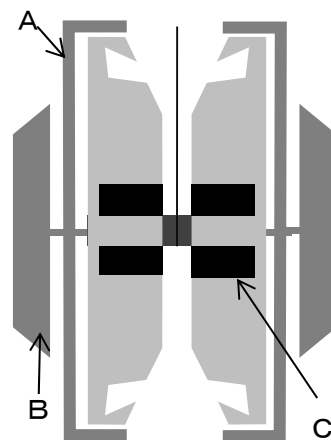


図1 ヨーヨー型探査ロボット

##### 《掘削機概要》

今回のミッションに使用するヨーヨー型探査ロボットには、側面に掘削部をつける(図1B)。掘削部の端の角度は30度、質量は2つで7.8kgとする。探査ロボットと掘削部は、探査ロボットの内側に配置されたリング型磁石(図1C)との磁力で結合する。そのため、ヨーヨーが最下端に到達したときに、掘削部は自身の落下運動を持続させようとしてリング型磁石と分離する。そして、そのまま地表に衝突し、氷の破片を飛ばす。

##### 《探査機概要》

エウロパと地球を往復する探査機の構造はJAXAの小惑星探査機「はやぶさ2」をベースとする。サンプラーホーンに代えて、探査ロボット発射口兼回収口を設ける(図3)。

図2 小惑星探査機「はやぶさ2」→  
写真提供: JAXA<sup>3)</sup>

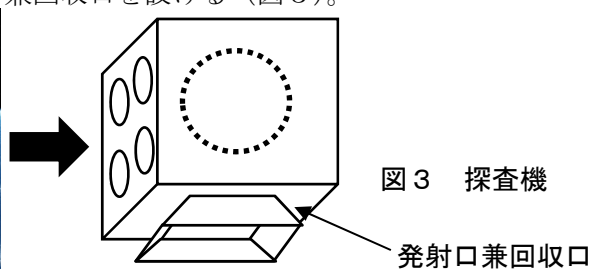
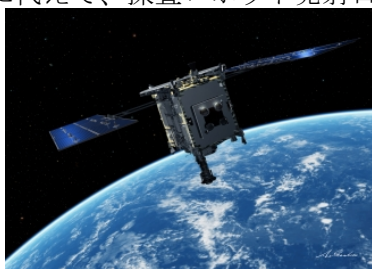


図3 探査機

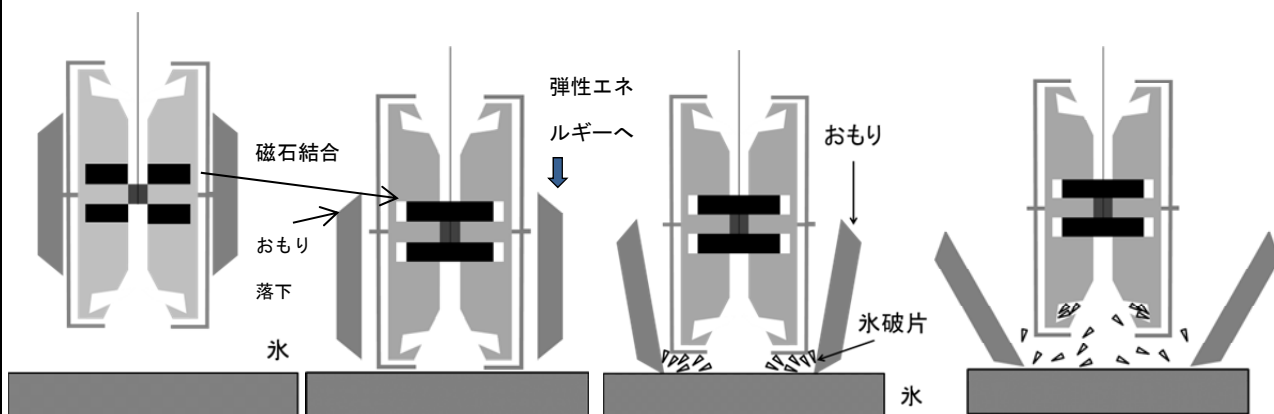
発射口兼回収口

##### 《ミッション概要》

本ミッションは、「はやぶさ」や「はやぶさ2」と同じようにイオンエンジンによる航行を行う。目標天体は木星第二衛星エウロパ。本体はイオンエンジンによるスイングバイ(EDVEGA)で地球の重力を脱出し、エウロパへ向かう。エウロパの軌道に入り次第、データを地球に送り、探査ロボットを投下するタイミングの指示を受ける。本体はまずエウロパに向かって降下、本体が地表から1000m地点に達したところで、今度は目的地に探査ロボットを投下する。この時、反作用で本体は上昇するため、本体は噴射によって姿勢の悪化を防ぐ。探査ロボットが地表についた瞬間、リング型磁石が紐を固定し、掘削機が分離し氷を掘削する。氷の破片を回収した探査ロボットは自らの回転エネルギーと地面から受ける抗力を用いて一切のエネルギーを消費せず本体へ帰還する。探査ロボットが探査機本体に回収された後に本体は上昇、回収される際の衝撃を吸収しつつエウロパの重力を脱出し地球を目指す。

→添付資料「サンプルリターン概要説明書」に関連説明

## 《氷採取時の動き》



### ①ヨーヨー型探査ロボットの落下

エウロパの重力に引かれて落下。

### ②着氷、おもり分離

リング型磁石がお互いに引き合い、紐を挟む。外枠が地表に衝突し、運動エネルギーを弾性エネルギーに変換して蓄積。ヨーヨー部分は、そのまま回転を維持する。

### ③おもりが着氷

おもりが氷を破壊し破片を飛ばす。探査ロボットは外枠の弾性エネルギーを受け、リング型磁石を軸に上昇開始。

### ④氷破片を回収

ヨーヨーの遠心力により、氷の破片を採取部で保持。そのまま、探査機へ帰還する。

## 5. 得られる成果

従来の調査のように探査機から送られてきたデータだけで解析をするのには精度に限界があり、実際に地球に成分を持って帰り実物を調査することによって、新しい事実が発見される可能性が高くなる。今回のミッションでは、エウロパの氷の成分や溶けている物質などから地球外生命に関する研究が大きく進展する可能性がある。またこの探査ロボットのシステムは、他の天体のサンプルリターンへの応用も比較的容易であり、生命の存在が示唆されている他の天体や、宇宙の起源を解明する手掛かりになる天体の成分を解析することも可能にする。並びに、ヨーヨーが探査に用いられることにより、宇宙への関心をよりいっそう高めることができると思われる。

## 6. 主張したい独創性または社会的な効果

「探査機がサンプルを採取する」のではなく、「探査機から探査ロボットを落とし、サンプルを回収する」という点がこのミッションの大きな特徴である。その構造にヨーヨーを用いることで、回収がより低リスクかつ低コストで行えるようになる。2010年の「はやぶさ」帰還の際、日本中が、その偉業をたたえ、同時に宇宙に興味を持つ国民が増えた。今回我々が提案したヨーヨー型探査ロボットによって探査機の帰還確率が上がれば、国民の宇宙に対する興味がより増幅し、日本の宇宙開発がより進展していくだろう。

## 7. 謝辞

今回の提案を行う上で北海道大学低温科学研究所 杉山慎先生、大阪教育大学天文学研究室 福江純先生、熊本大学先進マグネシウム国際研究センター 河村能人先生、東邦金属(株) 渡部聡様、津田泰志様よりご支援、ご指導をいただきました。東邦金属様にはタングステンワイヤーをご提供いただきました。皆様のご支援に心からお礼申し上げます。

## 8. 参考文献

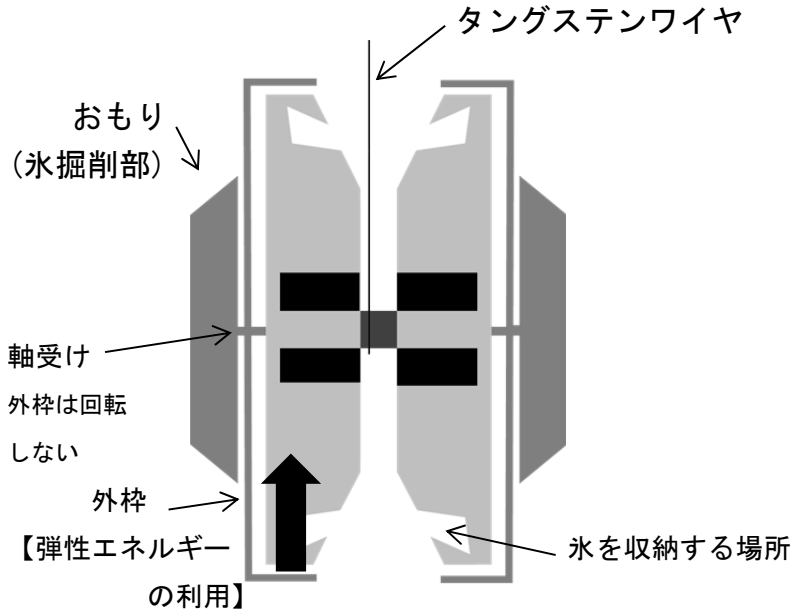
- (1) 石本敬志 (1990) . 氷の破壊強度, 開発土木研究所月報 441, 34-35
- (2) Kimberly L. Litwin, Beth R. Zigelbaum, Peter J. Polito, Leonard S. Sklar, and Geoffrey C. Collins (2012). Influence of temperature, composition, and grain size on the tensile failure of water ice: Implications for erosion on Titan. Journal of Geophysical Research. Vol. 117. E08013.
- (3) はやぶさ2の写真 <http://jda.jaxa.jp/result.php?lang=j&id=a2e2df2ef1adf379e9193d1a1074266c>

(添付資料) 第23回衛星設計コンテスト ジュニアの部

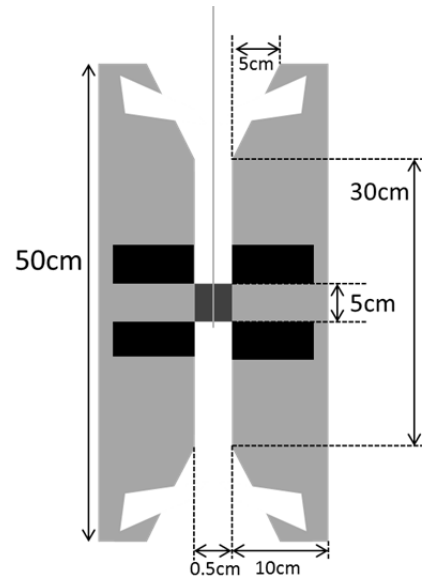
山口県立山口高等学校 ヨーヨーの原理を用いた探査ロボット

(構造とミッション時の動き、数値の導出過程について)

《探査ロボットの構造》



(図1 ヨーヨー型探査ロボット)



(図2 ヨーヨー部分)

《掘削機の質量の導出過程》

おもり (掘削部) の着氷滞在時間を  $\Delta t=0.1$  とし、ヨーヨーをエウロパ上空 1000m ( $h=1000$ ) から落とすと仮定すると、

$$mah = \frac{1}{2}mv^2 \quad \dots \textcircled{1}$$

( $m$ =質量 [kg],  $a$ =加速度 [ $m/s^2$ ],  $h$ =高さ [m],  $v$ =速度 [m/s])

$$F \cdot \Delta t = mv \quad \dots \textcircled{2}$$

( $F$ =力 [N],  $\Delta t$ =時間の変位 [s],  $m$ =質量 [kg],  $v$ =速度 [m/s])

エウロパの重力加速度は  $1.314 [m/s^2]$  とする。

$$\textcircled{1} \text{より、} v^2=2ah \quad \dots \textcircled{1}'$$

$\textcircled{1}'$  に  $h=1000m$ ,  $a=1.314$  (エウロパの重力加速度)  $\times \frac{2}{3}$  (ヨーヨーの加速度の定数) を代入すると、

$$a=\sqrt{1752}$$

$$a=41.8$$

$$a \doteq 42 [m/s]$$

エウロパの平均気温:103K における氷を破壊するのに必要な力 (\*) は、 $1.65MPa$  (メガパスカル)  $=1.65 \times 10^6 [N/m^2] \quad \dots \textcircled{3}$

(\*Influence of temperature, composition, and grain size on the tensile failure of water ice:

Implications for erosion on Titan ,Figure4.より破壊強度を求めた)

③より、 $1.65 \times 10^2$  [N/cm<sup>2</sup>] …③´

③´より 165N となる。

おもり（掘削部）と氷の接地面積を 10cm<sup>2</sup> とすると破壊するのに必要な力は 1650N となる。

接触時間を 0.1 秒と仮定すると

②より

$$F = \frac{mv}{\Delta t} \dots \text{②´}$$

②´に③´で求めた  $v=42$ ,  $\Delta t=0.1$ ,  $F=1650$  を代入すると、

$$\frac{m \times 42}{0.1}$$

$$= 420m$$

$$m > \frac{1650}{420}$$

$m > 3.9$  となる。

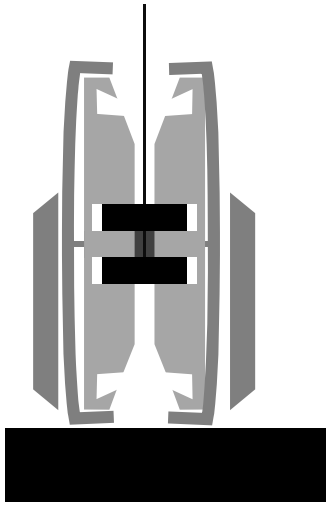
よっておもり（掘削部）の質量は一つ 3.9 kg とした。

掘削部の質量 3.9 kg とし、その他のヨーヨーの質量や各部分の大きさを算出した。

《エウロパ重力圏でのサンプルリターン タイムテーブル》

	探査機本体	ヨーヨー型探査ロボット	おもり（掘削部）
①	ヨーヨーを放出、 反力を受けて上昇		ヨーヨーとともに 落下運動
②		着氷（速度 42m/s）、 外枠が弾性エネルギーを蓄積	ヨーヨーから分離
③		内部のリング型磁石が引き合い 磁石が紐を固定	
④	下降開始 （必要に応じて高度調節）	地面からの抗力（弾性エネルギー） を受けて上昇開始	
⑤			着氷、氷を掘削 氷の破片を飛ばす
⑥		内部の空間（溝）に氷破片が入る	
⑦	ヨーヨーを回収	探査機本体に回収される	
⑧	衝撃を吸収して上昇		
⑨	エウロパの重力圏を脱出		

《特徴的な過程の具体的な説明》 \*○の中の数字は上記のタイムテーブルと連動している



氷

#### 過程②ヨーヨー型探査ロボットが着氷

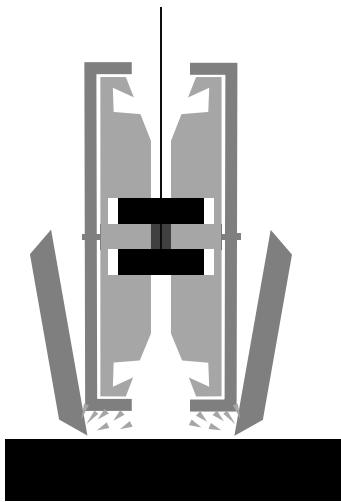
磁力で結合していた掘削機は自由落下運動を続けようとして探査ロボットから分離する。

外枠は地面からの抗力で変形、弾性エネルギーを蓄積する。

#### 過程③紐を固定

掘削機と磁力で結合していた内部のリング状磁石は、外側に引かれる力を失ってお互いに内側へ引き合う。

着氷時、まだほどかれていない紐が残るが、その紐ごと固定し、磁石の外周を新たな軸として上昇し始める（過程④）。

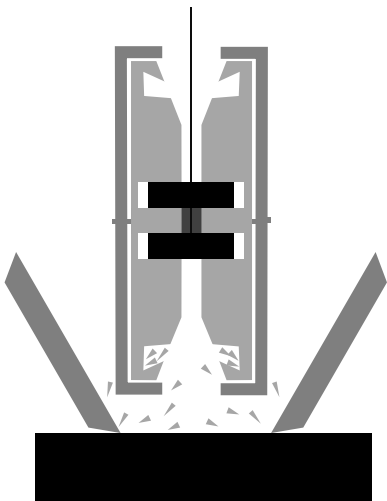


氷

#### 過程⑤おもりが着氷

過程②で探査ロボットから分離した掘削機が着氷、エウロパの地表の氷を破壊する（破壊できる根拠については本資料の「掘削機の質量の導出過程」に記載）。破壊された氷の破片はヨーヨーの内側の方向へ飛び散る。

この時、探査ロボットはすでに上昇を開始しており、地表から少し浮いている状態である。



#### 過程⑥氷の破片を回収

過程⑤で飛ばした破片の一部がヨーヨー型探査ロボットの内側の溝に入る。この溝の形状により、氷はヨーヨーの回転による遠心力を受けて溝から出ることはない。