

## 第 3 1 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) エンケラドス氷床突破装置「Bagger」 エンケラドス氷床突破装置「Bagger」
副題 (自由記入) エンケラドスにおける水中探査のための環境開発の提案
学校名 金沢工業大学 夢考房人工衛星開発プロジェクト

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

近年、土星の衛星エンケラドスから噴出するプルームから液体の水と有機物の存在が確認されたことにより、一層エンケラドスに生命が存在する可能性が高まっている。しかしエンケラドスの表面は分厚い氷に覆われ、水中に探査機を投下させることが困難である。本稿はエンケラドスの水中を探査するために電熱により氷に穴を開け、探査機を水中に投入する経路を確保するための装置を提案する。

#### 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

本ミッションの目的は、氷で覆われたエンケラドスの氷に穴を開ける方法を確立し、探査機を水中に投入できるようにすることである。

##### (b) 重要性・技術的、社会的意義等

エンケラドスに液体の水や有機物が確認されてから、水中探査やサンプルリターンを行うことにより、生命起源の解明などにつながると期待されている。特に水中は地球と似た環境であるとされ、水中探査を行う手段が考えられている。

しかし、エンケラドスの表面は厚い氷に覆われており、探査機が氷を削る、溶かして水中に到達する方法など、探査以外の機能の追加が検討されている。しかし、宇宙探査機は大きさや重量に制約が多く、機能を増設することは、探査機能の縮小につながる。

そこで、探査機と別に氷を融解することに特化した装置を用いて、水面までの探査機投入経路を確保する。これにより、水中探査機には投入経路確保の機能が不要となり、探査の機能を拡充できる。さらに、確実に安全な投入経路を確保することは、継続したエンケラドスの水中探査につながると考えられる。

#### 4. ミッションの具体的な内容

##### (a) システム

(地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等，必要に応じて図表添付のこと)

本ミッションでは，提案する装置(以下，氷床突破装置)により，エンケラドスの氷を円柱状に融解し，切断して排出する作業を繰り返し行うことで氷床に投入経路を確保する．本稿では，この切り出した氷を氷床コアと記載する．

氷床コア切り出しのプロセスは①氷の融解②氷の切り出し③氷の把持④氷の排出の4フェーズに分けられる．氷床突破装置の全体像とミッションの各フェーズを図1に示す．

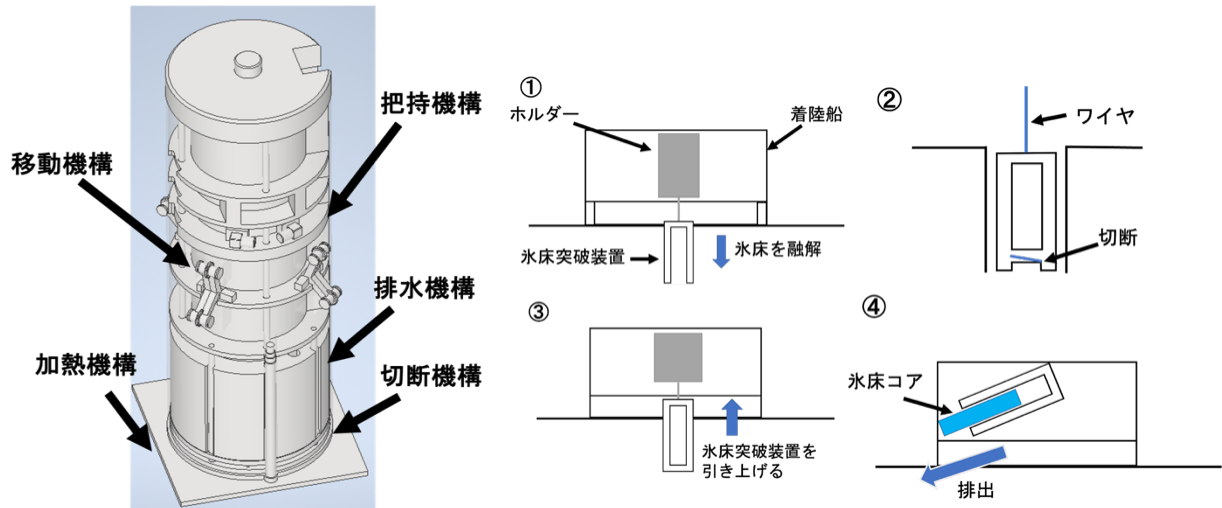


図1：氷床突破装置の全体像とミッションの各フェーズ

##### (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

エンケラドスの氷床コアを切り出すため，氷床突破装置に搭載する加熱，切断，把持，移動，排水機構を図2にそれぞれ示す．

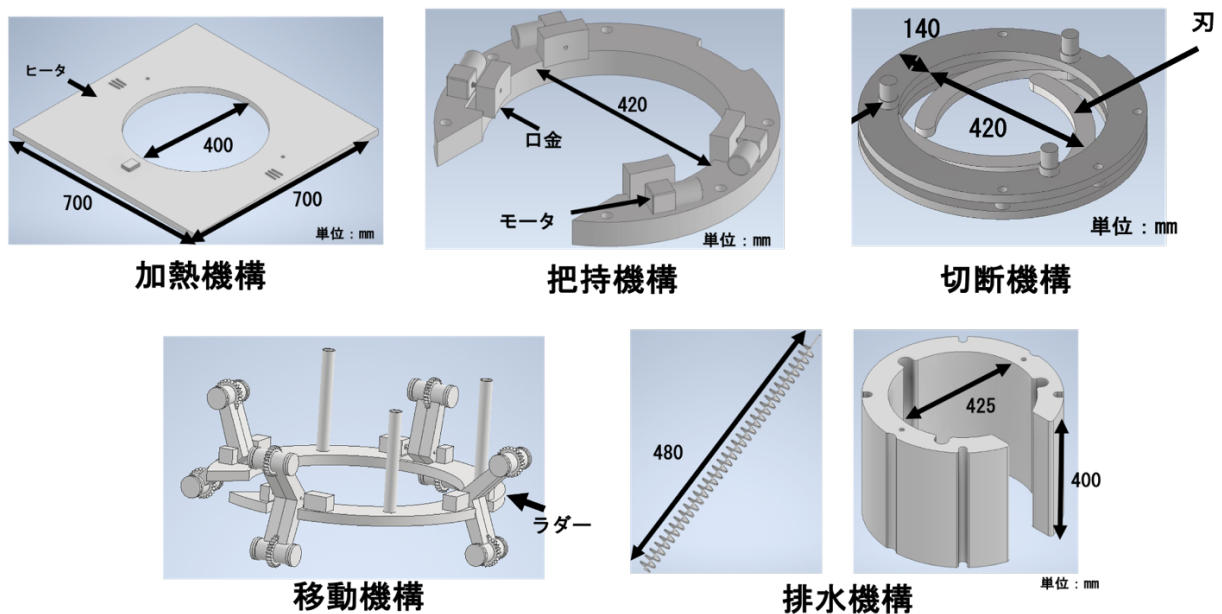


図2：各種機構

加熱機構は、ニクロム線を用いたシーズヒータで構成し、加熱面を 650[°C]まで加熱して氷床を円柱状に融解する。切断機構は、稼働式の 3 枚の刃で構成し、氷柱コアを 1.50[m]間隔で切り出す。把持機構は、4 つの万力を模した機構で構成し、切り出した約 230[kg]の氷床コアを 4 つの口金で把持して氷床コアを持ち上げる。また、氷床突破装置の投下・引き上げは、着陸船に搭載した電動ウィンチで行う。氷床突破装置をエンケラドス表面まで引き上げ後は、着陸船のホルダーで固定し、ホルダーを傾け、把持を解除することで氷床コアの自重によりを排出する。融解中に障害物があった場合は移動機構で装置を傾け、融解する経路を変更する。また、融解中は氷が溶けた水が発生するため、アルキメデスポンプを用いた排水装置で対処する。

本稿実現のために必要な課題、開発検討すべき項目を以下に記す。

- ・ 氷床を貫通して、水面に到達したかどうかの判断
- ・ 掘削中に穴が塞がった場合の対処方法
- ・ 排出して地上に溜まる氷床コアの対処方法
- ・ 装置をエンケラドスへ送る方法
- ・ 提案する装置の有用性の評価

## 5. 主張したい独創性や社会的効果

### (a) 主張したい本稿の独創性

本ミッションでは、ドリルによる掘削ではなく、電熱線により発生させたエネルギーを用いて氷を融解することで投入経路を確保している。これにより、環境に左右されずに探査機の確実な投入経路を確保することが可能となる。熱によるエネルギーを採用することで、ドリル等の摩耗、破損による部品交換や、装置自体を小型化できる点が、本稿の優位な点である。

### (b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

エンケラドス探査において難点である分厚い氷に投入経路を確保することは、エンケラドスの探査を確実に、かつ継続して行うことにつながる。これは、天文学だけでなく、宇宙生物学など様々な学問の発展に寄与できると考える。また、氷で覆われた氷天体はエンケラドスだけでないため、他の氷天体の探査を行う環境を整備する事につながる。

以上

# 第 31 回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

## エンケラドスヒョウショウトッパソウチ「バガー」 エンケラドス氷床突破装置「Bagger」

金沢工業大学

夢考房 人工衛星開発プロジェクト

イケオカミカ、タカハシコタロウ、トヨオカエリカ、ハシグチフウコ、フクザワケイ  
池岡美佳, 高橋虎太郎, 豊岡恵梨香, 橋口楓子, 福澤慧

### 1. 背景

土星の衛星エンケラドスに、液体の海と熱水循環の存在が推定されることがカッシーニの探査により発表された<sup>[1]</sup>。エンケラドスにおける有機物などの調査は<sup>[2]</sup>、宇宙生物学の研究に大きく寄与することが期待される。

一方で、エンケラドスは間欠泉と厚さ数十 km の氷に覆われていることも確認されている<sup>[1]</sup>。水中探査を行うためには、この分厚い氷を突破する必要がある。間欠泉からの探査機の投下方法は、間欠泉内部の状況が不明瞭なことに加え、吹き出すプルームによる探査機への影響も考えられるためリスクを伴う。

そこで、エンケラドスの氷床に穴をあけ、その穴から探査機を投入することで、投入時のリスクを軽減できると考えられる。また、一度あけた穴を再利用することで、その穴から複数の探査機を投入できる。これにより、様々な探査、探査の効率化が可能となる。

### 2. ミッション概要

#### 2.1 目的

エンケラドスの水中探査を実現するためには、安全で確実な投入経路を確保する必要がある。そこで、本稿では氷床に投入経路を確保することを目的に、ニクロム線による電熱で氷床を融解し、円柱状に切り出した氷(以降、氷床コアとする)を排出する氷床突破装置(以下、装置)装置を提案する。

#### 2.2 ミッション内容

エンケラドス表面の氷は 20.0-25.0[km]、極地周辺は 1.00-5.00[km]程度の厚さであると推定されている<sup>[1]</sup>。そこで本稿では、比較的氷が薄い南極地点に穴をあける。氷の組成はエンケラドスから噴出するプルームより H<sub>2</sub>O と推定されている<sup>[3]</sup>。また、エンケラドスの気温は 75.0[K]と推定されている<sup>[4]</sup>。

掘削の手法の一つとして、ドリルによる掘削が考えられるが、ドリルの固定が困難な点、5.00[km]の距離を掘削し続ける刃を製作する必要がある点、低温で氷の硬度が高くなる点で本ミッションの達成に適さないといえる。

そこで本ミッションでは、ニクロム線を用いた電熱と切断機構で氷を融解し、氷床コアの切り出しと排出を繰り返し行うことで、投入経路を確保するための作業を完遂する。また、提案する装置は、サブミッションとして、探査機を安全に水中まで運搬する装置としても利用できる装置とする。

#### 2.3 ミッション要求

ミッションの流れは以下の通りである。

- ① 着陸船から装置を降下させ、加熱機構により円筒状に氷を融解する。
- ② 把持機構で氷床コアを把持し、切断機構により氷床コアを切り出す。
- ③ 氷床コアを装置とともに地上まで引き上げる。

- ④ 氷床コアを排出する.
- ⑤ ③～⑤のプロセスを繰り返し、水面までの約 5.00[km]の穴をあける.

本稿では、①～⑤に示すミッションを達成する装置を提案する。①～⑤の流れを図1に示す。

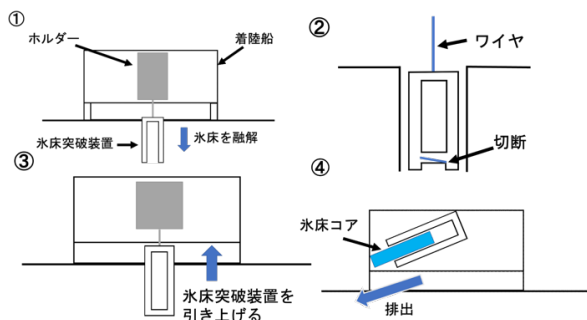


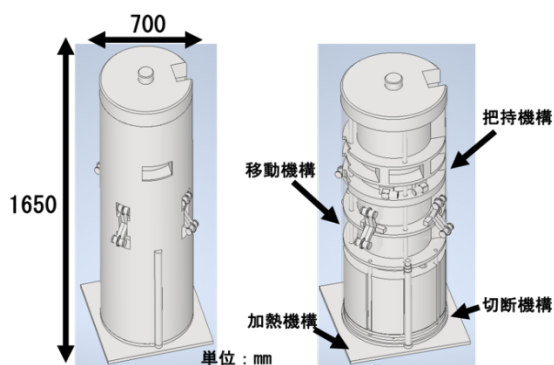
図 1：ミッションの流れ

①～⑤で示したミッションを達成のため、「氷の融解」「氷の切断」「切断した氷の運搬」の機能を有する必要がある。

### 3. 氷床突破装置の詳細

#### 3.1 装置について

提案する装置外観を図2に示す。



(a)装置外観 (b) 内部構造

図 2：提案する装置

装置は、加熱機構、切断機構、把持機構、移動機構から構成している。また、本ミッションは極低温下であるため、断熱材とヒータで各機構を作動温度に保つ。各機構の重量は加熱機構が 31.1[kg]、把持機構が 16.5[kg]、排

水機構が 9.34[kg]、移動機構が 14.9[kg]、その他構造が 136[kg]の総合計 229[kg]となっている。その他の機構は外装カバーや各機構の接合部材を示す。

電源は公表されている”Prometheus”や”Fission Surface”などの宇宙炉を利用する<sup>[5]</sup>。

### 3.2 加熱機構について

#### 3.2.1 必要な熱量の算出

図3に加熱機構を示す。

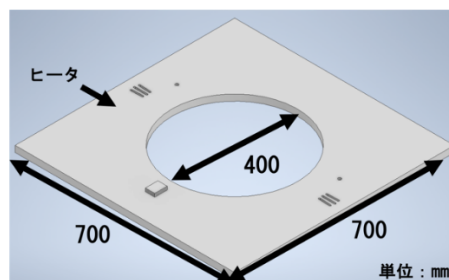


図 3：加熱機構

加熱機構はエンケラドスの氷を加熱し、融解する。必要なエネルギー量について記載する。なお、本ミッションでは、直径 0.400[m]、長さ 1.50[m]に氷床コアを切り出し、排出する。これを最大 5.00[km]まで繰り返すものとする。エネルギー量導出に用いるパラメータを表1に示す。

表 1：エネルギー量導出のパラメータ

パラメータ	記号	値	単位
ヒータ表面積	$S$	0.363	$m^2$
切り出し長	$L$	1.50	m
水の密度	$\rho$	0.917	$g/cm^3$
昇温温度	$\Delta T$	237	K
氷の比熱	$C_p$	2.10	$J/(K \cdot kg)$
氷の融解熱	$C_q$	334	$kJ/kg$

1 度の切り出しで融解する氷の質量  $M$  を式 (3.2.1) を用いて算出する。

$$M = \frac{\pi}{4} S \rho L \times 1000 \quad (3.2.1)$$

上式から、一度に融解する氷の質量は 328[kg]と算出される。

次に、氷の質量と氷の比熱、融解熱から必要な熱量 $q$ を式(3.2.2)から算出する<sup>[6]</sup>。

$$q = MC_p \Delta T + MC_q \quad (3.2.2)$$

上式から一回切り出すために必要な熱量を求めると  $2.76 \times 10^5$ [kJ]となる。以上から、必要な熱量が得られるヒータの設計を行う。

### 3.2.2 ヒータの設計

ヒータ設計に用いるパラメータを表 2 に示す。

表 2：ヒータ設計のパラメータ

パラメータ	記号	値	単位
必要な熱量	$q$	275825	kJ
切削時間(3年)	$s$	94608000	s
電圧値	$V$	1500	V
安全率	$S$	1.30	—
温度抵抗係数	$\lambda$	1.06	—

ヒータは一般のシーズヒータと同様の原理を用いる。5.00[km]分の氷床を掘削するための時間 $t$ を3年( $9.46 \times 10^7$ [s])とし、(3.2.1)で算出した熱量 $q$ を切り出す氷床コア 5.00[km]分の総熱量 $Q$ は  $6.90 \times 10^6$ [kJ]から、必要な出力 $P$ は式(3.2.1)を用いて、7.29[kW]と算出される。

$$P = \frac{Q}{t} \quad (3.2.1)$$

ヒータには NCHI(ニッケルクロム 1 種)の線径 0.500[mm]、導体抵抗 5.50[Ω/m]のニクロム線<sup>[7]</sup>を採用する。電圧 $V$ は  $1.50 \times 10^4$  [V]の電源でニクロム線を 650[°C]まで加熱する。電圧変動等を考慮して安全率 $s$ を 1.30 と設定すると出力 $P'$ は(3.2.2)より 9.48[kW]になる。出力を元に電流値 $I$ は 7.53[A]になり、抵抗値

$R$ は 199[Ω]と算出される。

$$P' = P_s \quad (3.2.2)$$

また、ニクロム線は温度変化すると内部の抵抗値が増加してしまい、650[°C]で加熱装置を運用した場合、温度抵抗係数 $\lambda$ は 1.06 となり、その時の抵抗値 $R'$ は式(4.2.3)から算出される。

$$R' = \lambda R \quad (3.2.3)$$

上式から 252[Ω]となる。このとき必要な出力 $P''$ は式(3.2.4)より 8.92[kW]と算出される。

$$P'' = \frac{V^2}{R'} \quad (3.2.4)$$

以上のことから、650[°C]の使用では設定した出力 $P''=8.92$  [kW]から安全率 1.3 による設計で使用するヒータは問題ないといえる。また、このヒータは 3.1 項で提案した電源より小さな値のため、ミッションを行える設計となった。

### 3.2.3 融解実験および損失の推定

融解実験を行うために図 4(左)の模擬加熱装置を作成した。この装置を図 4(右)のような実験環境で氷を溶かした。

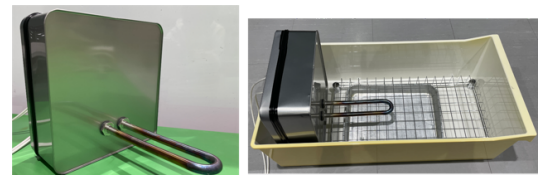


図 4：模擬加熱装置(左)，実験環境(右)

気温 15[°C]、湿度 40[%]の環境で 2 回融解実験を行った。実験で使用したヒータは定格容量  $1.00 \times 10^3$ [W]、定格電圧 100[V]である。融解実験はヒータが 100[°C]に達したのち  $80 \times 80 \times 170$ [mm]の氷をヒータに載せ、 $20 \times 80 \times 150$ [mm]の大きさに切り出した。計測するデータは氷を切り出すまでにかかる時間と溶け出た水の量である。得られたデータから損失を考えない場合、このヒータで

$m_w$ [kg]の氷を溶かすと次の式(3.2.5)が成り立つ<sup>[6]</sup>.

$$t = m_w C_p \Delta T + m_w C_q \quad (3.2.5)$$

式(3.2.5)より算出される理論ヒータ加熱時間 $t$ と実際に氷を溶かすのに要した時間 $t'$ から熱損失率 $a$ を式(3.2.6)で定義する.

$$a = \frac{t' - t}{t} \times 100 \quad (3.2.6)$$

実験結果および算出値を表3に示す.

表3：実験結果および算出値

項目	1回目	2回目	単位
溶けた水量	0.461	0.433	kg
融解時間	140.1	138.1	s
熱損失率	13.7	7.38	%

表3と式(3.2.6)を元に熱損失率 $a$ は10%前後の値となる. 650[°C]の使用では設定した出力 $P''=8.92$  [kW]が必要であると, 3.2.2項でヒータ設計を行なった. この出力から10%損失した場合でも, 出力は9.82[kW]になるため, 電源選定は3.1項のままで良いと考える.

### 3.3 切断機構について

切断機構を図5示す.

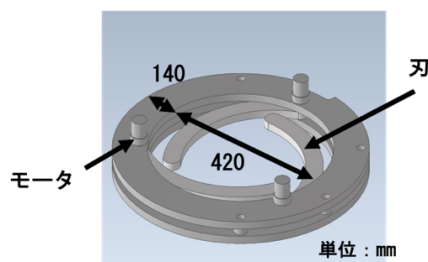


図5：切断機構概要図

切断機構は3枚の刃で構成する. これは, 刃が折れた場合にミッション継続が困難になる可能性を低くするためである. 刃にはそれぞれモーターを取り付け, 独立して刃が稼働す

る. 刃は加熱機構と同様に熱で溶かしながら氷床コアを切り出す仕様としている. 図6は切断における刃の動作の様子を示す. 1回目の切断で刃は60[deg]角度まで切り出し操作を行い, 動作後は初期位置に戻る. このとき②部と③部が残るため, 2回目では②部と③部の一部, 3回目で③部の残りを融解することで氷床コアを完全に切り出す.

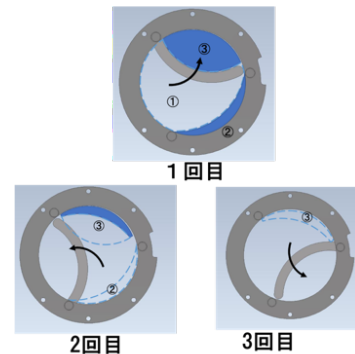


図6：氷床コア切断プロセス

### 3.4 把持機構について

図7に把持機構(上), 動作イメージ(下)に示す.

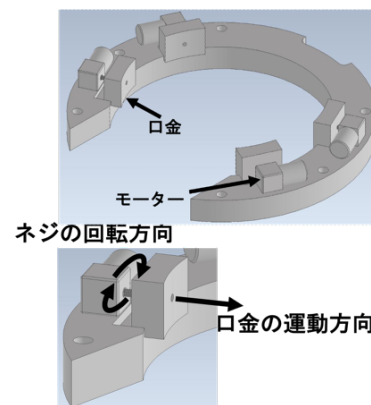


図7：把持機構概要図

把持機構はモーターの回転運動を直線運動に変換し, 氷床コアを把持する機構とする. この把持機構を4つ取り付け, 氷床コアに口金を押し付けることで把持を行う.

直径0.400[m], 面積 $3.14 \times 10^{-2}$  [m]の氷床コア1個の質量 $m$ は, 式(3.2.1)と表1のパラメ

ータから 173[kg]と算出される。

氷床コアを把持した際にかかる力を図 8 に、表 4 に氷床コアを把持する力の算出に用いるパラメータを示す。

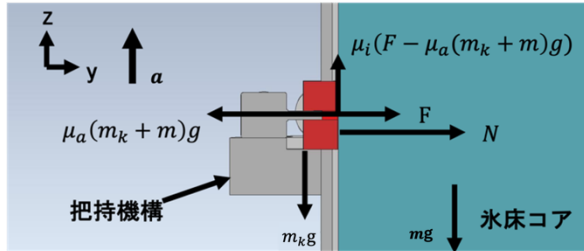


図 8：氷床コアを把持している様子

表 4：把持力算出用のパラメータ

パラメータ	記号	値	単位
氷床コアの質量	$m$	230.5	kg
装置本体の質量	$m_k$	1.605	kg
引き上げる加速度	$\alpha$	0.1000	$\text{m/s}^2$
重力加速度 <sup>[7]</sup>	$g$	0.1130	$\text{m/s}^2$
ネジ摩擦係数	$\mu_s$	0.2000	—
氷の摩擦係数	$\mu_i$	0.4984	—

モータより発生する推力を  $F$ [N]、口金と氷床コアとの間に発生する摩擦力を  $\mu_a(M + m_k)g$  [N]、氷床コアに口金を押し当てた際に発生する垂直抗力  $N$  を  $F - \mu_a(m + m_k)g$  [N]、引き上げ時の加速度を  $\alpha$ [ $\text{m/s}^2$ ]とする。

ここで、4 つの把持機構で氷床コアを把持した状態を維持するためには、式(3.4.1)を満たす摩擦力  $f$ [N]を発生する必要がある。

$$f = 4\mu_i N \quad (3.4.1)$$

モータの回転によって口金に推力  $F$ が発生し、 $\mu_a(m + m_k)g$ の摩擦抵抗がはたらいている。したがって氷床コアにはたらく垂直抗力は式(3.4.2)より算出できる。

$$N = F - \mu_a(m + m_k)g \quad (3.4.2)$$

氷床コアを把持して持ち上げた際の  $Z$ 方向のつりあい式は式(3.4.3)になる。氷床コアを

引き上げるときにかかる加速度は  $\alpha$ とする。

$$m(g + \alpha) = \mu_i f \quad (3.4.3)$$

式(3.4.1)から式(3.4.3)を用いて式(3.4.4)を得る。

$$M(g + \alpha) = 4\mu_i(F - \mu_a(M + m)g) \quad (3.4.4)$$

これを变形して式(3.4.5)を得る。

$$F \geq \frac{m(g + \alpha)}{4\mu_i} + \mu_a(m + m_k)g \quad (3.4.5)$$

上式から推力  $F$ が 22.4 [N]以上であれば氷床コアを持ち上げることができる。モータの出力トルク  $T$  [Nm]の算出のためのパラメータを表 5 に示す。

表 5：モータ選定に必要な数値

パラメータ	記号	値	単位
推力	$F$	22.4	N
リード角	$\gamma$	4.55	deg
ボルト軸有効径	$d_b$	8.00	$\text{m/s}^2$
ピッチ	$P_n$	2.00	—
ネジ摩擦係数	$\mu_s$	0.200	—

モータのトルク  $T$ を式(3.4.6)で算出する<sup>[8]</sup>。

$$T = \frac{FP_n}{2\pi\eta} \quad (4.4.6)$$

なお、変数  $\eta$ はネジ効率で、式(3.4.7)より算出する<sup>[9]</sup>。

$$\eta = \frac{1 - \mu_s \tan \gamma}{1 + \frac{\mu_s}{\tan \gamma}} \quad (4.4.7)$$

求められたトルク  $T$ は  $2.26 \times 10^{-2}$ [Nm]となり、このトルクを出力できるモータを選定することで把持機構を実現することができる。

### 3.5 氷床コアの排出について

切り出した氷床コアを排出するためにホルダーを着陸船に設置する。氷床突破装置はウィンチによりテザーケーブルを巻き上げることで装置を回収し、ホルダーにはテザーケーブルを案内するための滑車を設置する。ホル



ダーと装置は、二本のツメにより固定する。氷床コアの切り出しから地表に排出するまでの流れを以下に、図9にその様子を示す。

- ① 把持機構で氷床コアを掴み、ウィンチを巻き上げホルダーに装置を収納する。
- ② ホルダーのツメにより装置を固定する。
- ③ 装置を傾けた後に把持機構を解除し、氷床コアを地表へ排出する。

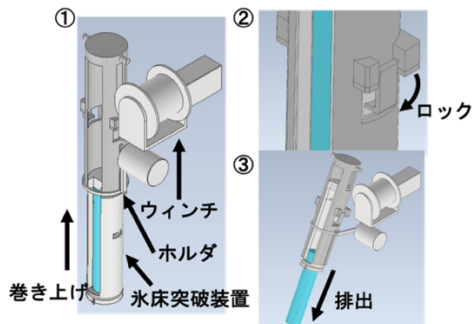
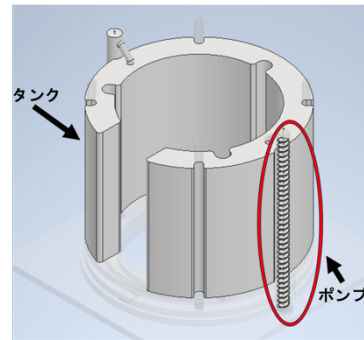
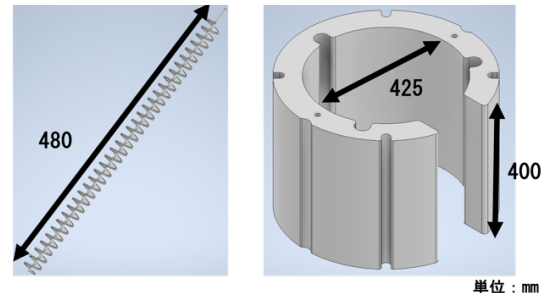


図9：氷床コア排出の流れ



(a):排水機構概要図



(b):アルキメデススクリュー, (c)タンク

図10：アルキメデスポンプとタンク

### 3.6 排水装置

ミッション中に発生する水の結氷を防ぐため、この水を排水する必要がある。そのため、排水は、アルキメデスポンプとタンクを用いて行う。アルキメデスポンプは、エンケラドスの大気圧の変動による影響がなく<sup>[10]</sup>、渦巻きポンプ等で必要な呼水が不要であるため採用した<sup>[11][12]</sup>。

融解により発生した水をアルキメデスポンプの原理でタンクに回収し、氷床コアを排出する際に地表へ排水する。2本のアルキメデスポンプがタンクと接合されている。

図10にアルキメデスポンプとタンクの概要図を示す。

### 3.7 障害物の回避方法

ミッション中に岩石等の障害物があった場合、図11のラダーによってこれを回避する。

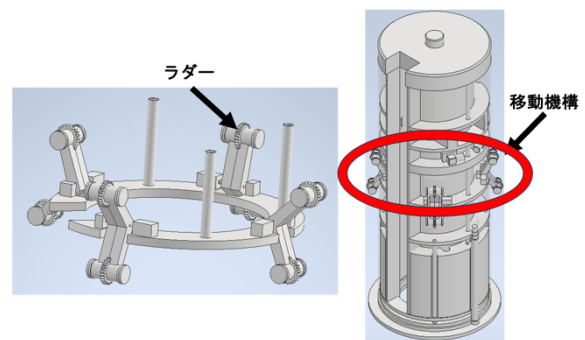


図11：移動装置

進行方向に障害物を探知するとこれを避けるように氷床突破装置の進路を変更する。この進路に沿って移動できるようにラダーを稼働させる。ラダーはラダーの傾きを変えるモータとモータによって稼働する車輪で構成されており、これらを調節して装置を傾ける。一対のラダーによって角度調節を行い、もう1対のラダーを推進器として車輪を回転させ、

進路変更した方向へ進行する。ラダーの稼働の様子を図 12 に示す。障害物は超音波センサーで探知する<sup>[13]</sup>。

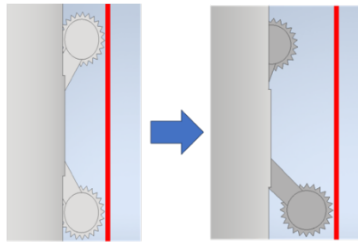


図 12：ラダー稼働時の融解中のイメージ

#### 4. 検討すべき課題

現在、考えられる問題点として、提案する装置を実際に製作し、氷の融解、把持、排出の動作確認を行うことができていない。加えて、提案する装置の有用性を示すために、評価実験を行う必要がある。融解実験を行なったがサンプル数や実験方法の妥当性も評価する必要があると考える。

また、実際にエンケラドスで氷床突破を行うためには装置だけでなく、エンケラドスの地上で運用を支援する機器やエンケラドスへ装置を送る手段の設計を行なわなければならない。

#### 5. まとめ

本稿では、エンケラドス探査の投入経路を確保するため、熱で氷を融解し、氷床コア状に切断して氷床に穴をあける装置を提案した。

実際に熱による氷の融解実験を行い、ヒータの熱が周囲に損失する量が明らかになった。しかし、ドリルによる掘削との比較評価や氷点下の環境での実験を行い、ヒータによる融解と比較評価を行なう必要がある。

今後は各機構の評価実験を行い、装置全体の評価を行うことで本アイデアの実現性を高めたい。

#### 参考文献

- [1] cassini-huygens, ESSA, 最終閲覧日:2023.11  
<https://sci.esa.int/web/cassini-huygens/-/59736-heating-ocean-moon-enceladus-for-billions-of-years>
- [2] Frank Postberg, Macromolecular organic compounds from the depths of Enceladus, 2018,
- [3] Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus Plume Composition and Structure
- [4] Spencer, J. R.; Pearl, J. C, “Cassini Encounters Enceladus, Background and the Discovery of a South Polar Hot Spot”, 2016
- [5]西山潤, 宇宙探査のための原子力, 日本原子力学会公演「創立60周年シンポジウム」—震災をこえて原子力の明日—2019.4
- [6] 日本機械学会, JSME テキストシリーズ熱力学, 丸善出版, 2015
- [7] 製品情報:電熱・電気抵抗用 NCH1 (ニッケルクロム1種), 東京抵抗線株式会社
- [8] ボールねじの推力計算方法, KEYWNCCE, 最終閲覧日:2023.11, URL:  
[https://www.keyence.co.jp/support/user/controls/faq/answer.jsp?faq\\_id=55571](https://www.keyence.co.jp/support/user/controls/faq/answer.jsp?faq_id=55571)
- [9] 福岡俊道, 技術者のためのねじ力学, コロナ社, 2015
- [10] Candice J, 他, Water Vapor Plume, 2006
- [11]渦巻きポンプ, speck, 最終閲覧日:2023.11  
<https://speckjapan.com/aboutcent>
- [12] P.J. Kantert, Manual for Archimedean Screw Pump Adviser and Decision Guidance for Planners, 2008
- [13]氷厚計の開発試験について -経過報告-, 高島和夫 他, 1989