

# 宇宙人類学：

銀河系恒星間航行における人類の進化

および

存続に必要な宇宙船搭乗員数

第29回 月惑星に社会を作るための勉強会

2023年4月25日

佐野 智

## 自己紹介/略歴



・2000年3月 東京大学 理学部生物学科人類学課程卒業（生態人類学研究室）



→進化の産物としての人類の特徴に関する講義、実験、研究

遺伝学、霊長類学、文化人類学、考古学、数理生物学、進化論、文化進化等

実習：DNA実習、骨の発掘実習、人体解剖、猿山個体識別実習、石器実習

・2002年3月 東京大学大学院 理学系研究科生物科学専攻修了（生態人類学研究室）

→特に数理生物学、進化の中立説などをもとに人類の進化を研究

・2002年4月～ 宇宙航空研究開発機構 入社

きぼう利用センター：創薬や新素材創成に向けたISS実験、新しい有人研究会の立ち上げ

（宇宙睡眠、宇宙トイレ、宇宙鍼灸、宇宙生存学研究会など）

経営企画部：H3プロジェクトの立ち上げ、はやぶさ2打ち上げなど含むJAXA全予算の折衝

・2019年10月～ 宇宙飛行士健康管理グループ

宇宙飛行士に宇宙生活の課題をヒアリングし新しい生活用品の開発

宇宙食開発、宇宙飛行士健康管理全般に関するマネジメント

# 今回の話題に関する研究

○東京大学大学院 理学系研究科生物科学専攻 2023年1月 学位取得(博士(理学))

Population genetic and cultural evolutionary analyses on the minimum viable population and the evolutionary rate in interstellar migrations: A quantitative approach to space anthropology

(恒星間移住における最小存続可能人数と進化速度に関する集団遺伝学的・文化進化論的解析  
:宇宙人類学への定量的アプローチ) ※本資料に出てくるグラフ・データ等は本論文からの引用

○投稿論文

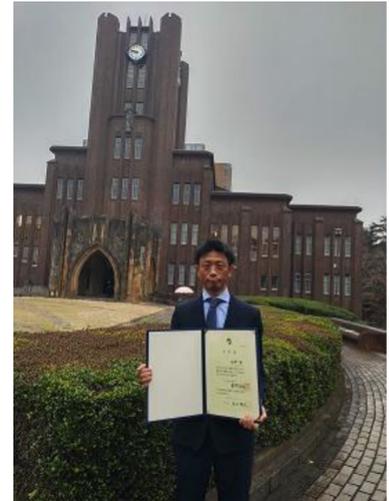
Jour. British Interplanetary Soc. (英国惑星間協会誌)

惑星間や恒星間の宇宙航行に関する工学的研究、宇宙生物学などの理工学分野のほか、法学、倫理、経済学研究など学際的領域を扱う。

①Vol. 74, 243-251. (2021), S. Sano.

②Vol. 74, 419-426. (2021), S. Sano.

③Vol. 75, 118-126. (2022), S. Sano.



## 研究の目的

本研究の目的は、人類が銀河系内恒星間宇宙旅行を行った場合の宇宙航行中の人類進化の可能性と、恒星間宇宙旅行において人類が存続するために必要な最小限の宇宙船搭乗員数を考察することである。

NASAやJAXAなどでは、月や火星などの有人宇宙探査計画も検討され、世界の様々な研究機関で恒星間宇宙航行の研究がなされている。

今後、人類の活動領域がさらに拡大すること想定される中、本論文では、恒星間旅行用の宇宙船設計に必須となる人類学的データの提示と、人類学の研究対象を宇宙探査まで拡張し宇宙人類学という新しい学問領域の進展を図る。

# 導入：宇宙誕生～人類誕生

・約138億年前:ビッグバン

★1000億以上の銀河が誕生

1000億以上の恒星in銀河系

・約46億年前:地球誕生

・約40億年前:海ができる

→ 生命誕生

・約5億年前:生命が地上へ拡散

★進化のビッグバン

[カンブリア紀]

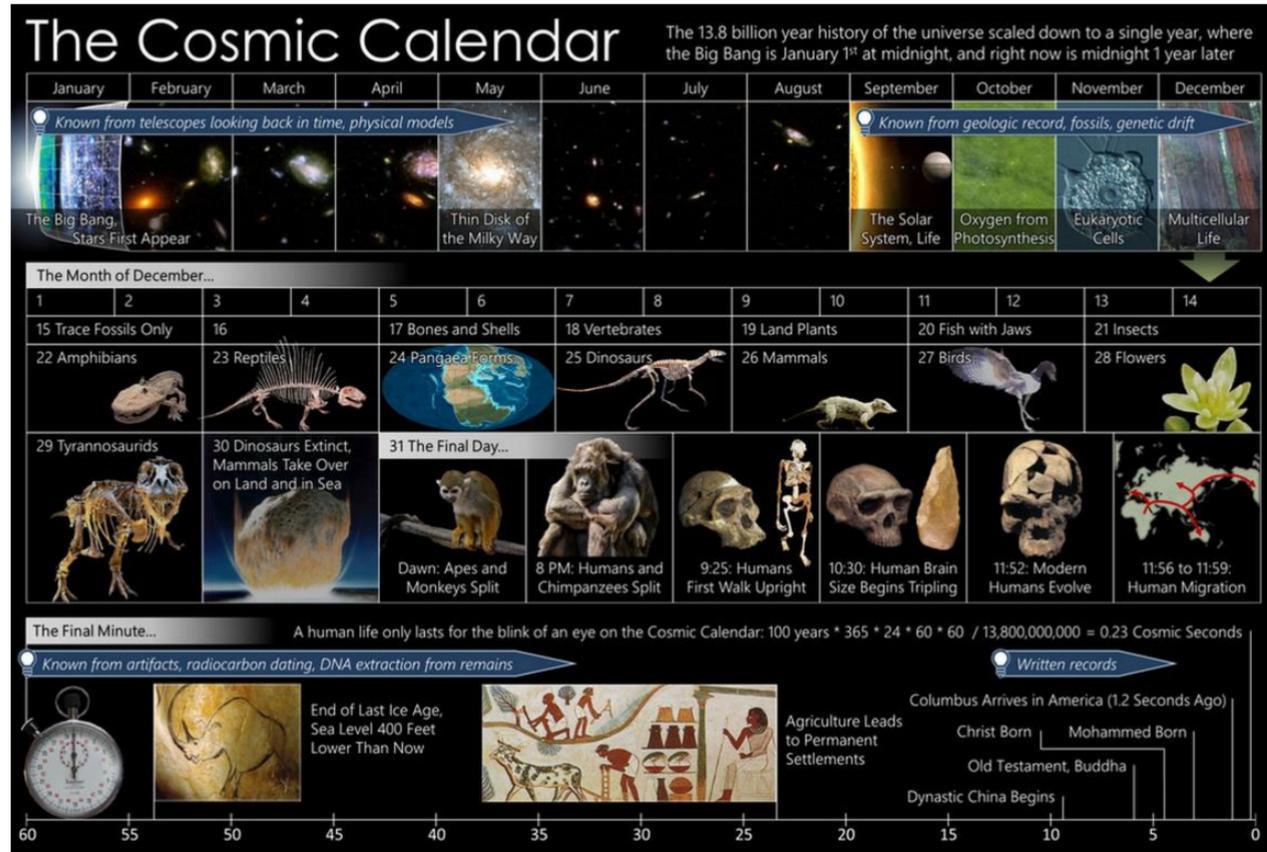
・約6600万年前:恐竜絶滅

→ 哺乳類進化加速

・約2000万年前:チンパンジー誕生

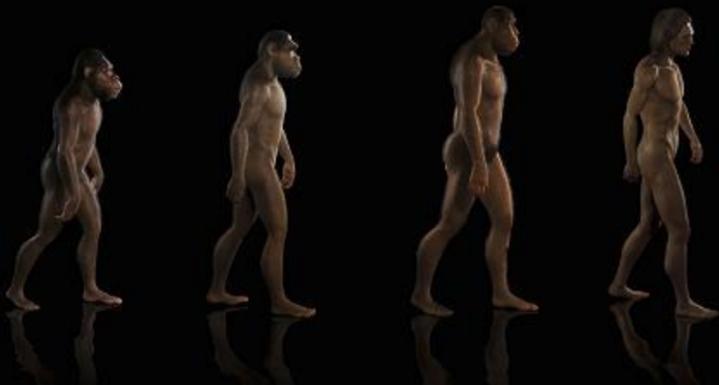
・約7-900年前:人類誕生

・未来:人類はどこへいくのか



# 導入：人類の特徴

## ①直立二足歩行：



@Science Picture Co.

## ②累積的文化進化

-世代間の文化伝達

→言語や数学、科学、技術を次世代へ伝達

→文化を活用し、アフリカを出たのち、**地球全体へ拡散**

→ロケットや人工衛星技術も蓄積

→1961年ついに地球を出て**宇宙へ拡散**

→月面着陸、無人探査では**太陽系外へも拡散**

→さらには恒星間有人探査も検討

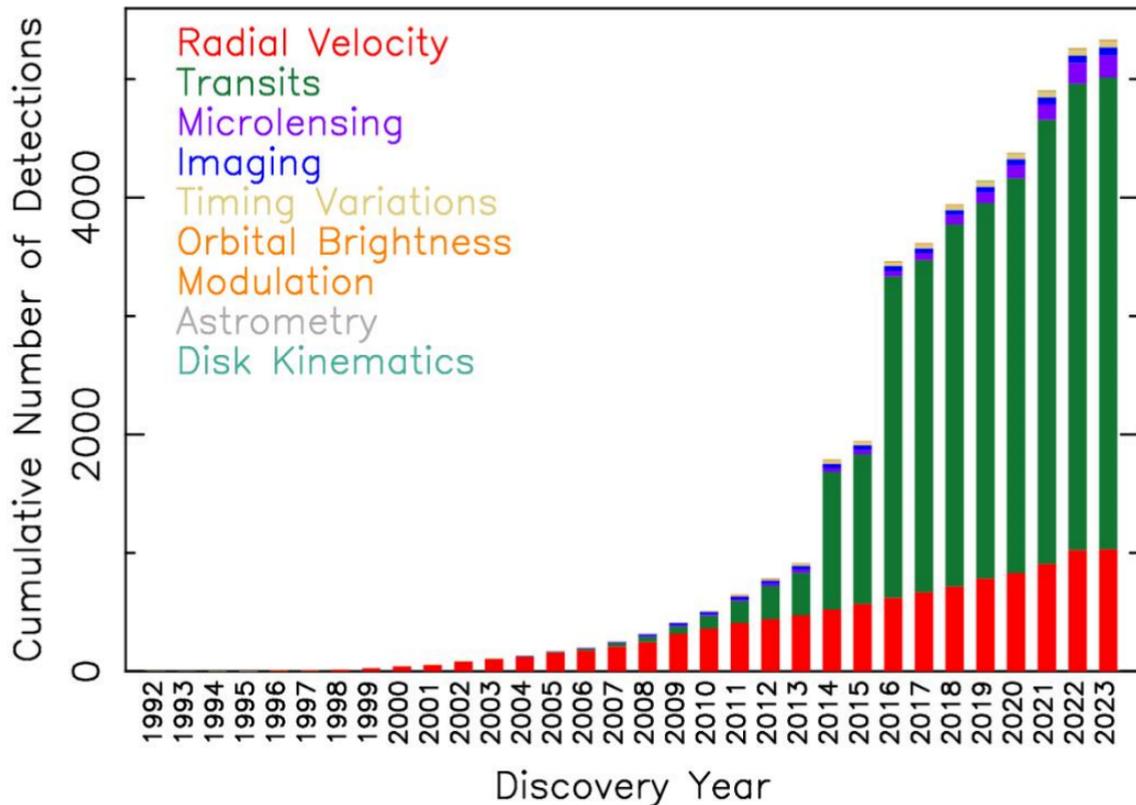


©NASA

# 発見された太陽系外惑星の数

Cumulative Detections Per Year

13 Apr 2023  
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



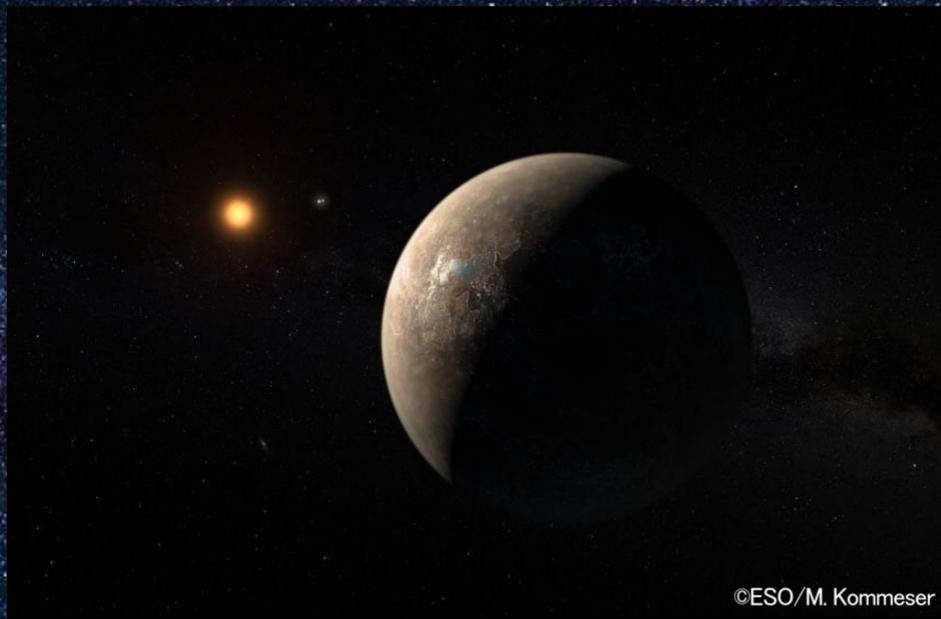
•1992年:初発見

•2023年:5363個(4月17日)

# 導入：銀河系恒星間有人探査で考えられる航法

地球から最も近い太陽系外惑星Proxima Centauri b(右図)は、地球から4.2光年の距離

4.2光年は太陽系から出たボイジャーで7.5万年、  
最速の宇宙探査機でも6300年かかる距離。



現時点、銀河系恒星間有人探査には、

①人工冬眠、②胚の輸送、③多世代恒星間宇宙旅行などの検討されている。

# 導入：銀河系恒星間有人探査で考えられる航法

## ①人工冬眠

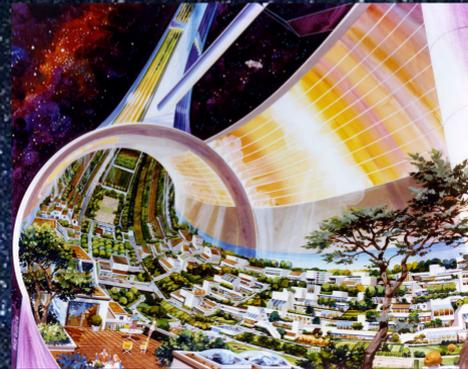
- ・技術は未成熟
- ・地上での人対象試験は、倫理面で課題あり。

## ②胚の輸送

- ・技術は未成熟
- ・新生児を育てる・教育する仕組みも必要。
- ・倫理的課題もあり。

## ③多世代恒星間宇宙旅行

- ・技術は未成熟だが、国際宇宙ステーションなどで、常時、地球外で人類が長期滞在できる技術の一部確立。
- ・宇宙船や推進系の設計、一部地上試験などが行われている。
- ・宇宙船搭乗員数や生物学的・文化的研究も着手されたところ。



Space colony ©NASA

→本研究では、「③多世代間恒星間宇宙旅行」における最小搭乗員数と人類進化に関する研究の深化を狙う。

# 導入：最小搭乗員数に関する先行研究

多世代恒星間宇宙船:水・空気循環システムや、食料生産システム、トイレなどから構成。

設計には乗客員数が必須。コストの観点からも**最小乗客員数の推定は本研究分野の主要な対象**。

①人類学者J. Moore : 150-180人(2003年:Interstellar travel & multigenerational space ships)

・地上での人類学研究から150-180人で恒星間宇宙旅行を維持できると提案し、数値計算で実証。

★課題:地上のマジックナンバー150-180人は、**近隣のグループとの遺伝的交配**がある。

②人類学者C. Smith:11,000人(2014年)

・ヒトの有効な集団の大きさから、**十分な大きさ**として、11,000人というオーダーを提示。

★課題:数千年オーダーで、到着後に進化可能な集団の大きさは、もっと小さくても可能。**最小限でなく高コスト**。

③宇宙物理学者 F. Marin 98人(2018年)、100-500人(2021年)

・個体群変動シミュレーションで、最小98人と提示。

★課題:遺伝的多様度は考慮してない。

→2018年の論文内でも**集団遺伝学**を取り入れたシミュレーションが必要と考察している。

④航空宇宙工学者AM Hein:X人(2020年)

・恒星間宇宙旅行船の設計検討→船内**文化・技術維持**のための最小限の搭乗員数も必須のパラメータと指摘。

★課題:**これまで研究なし**。

## 導入: 宇宙での進化に関する先行研究

「宇宙人類学」という宇宙における人類の生物学的・文化的側面を総合的な研究分野は、**着手されたばかり**。  
“Principles of Space Anthropology: Establishing a science of Human Space Settlement”(C. Smith):2019年出版  
・本書の中では、**宇宙での人類の生理学的変化**、**集団遺伝学的考察**、宇宙への人類の適応、  
**文化**(言語、倫理、規則、家族構成、食文化等)、**移住**(準備、移動、到着、発展)、古代文明からの考察

他にも宇宙での人類の生物学的、文化的進化を考察した研究はいくつかあるが、抽象的な**考察に留まっている**。

★課題: 数千年の恒星間宇宙旅行で人類進化が起きる可能性、起きた場合の進化速度は不明。

宇宙放射線の影響で宇宙での突然変異率は高いため、**遺伝子進化速度は地上と異なる**ことが想定。

⇒ 遺伝的進化、及び文化的進化の度合によっては宇宙船システムへの設計変更、反映が必要になる。

これらの課題に対応して、当研究では、

- ① 恒星間宇宙旅行で人類が存続するための最小宇宙船搭乗員数を**遺伝的多様度**、および**文化・技術維持**の観点から推定
- ② 宇宙における人類の遺伝的、および文化的進化の可能性、進化速度に関する推定を行い、**恒星間宇宙旅行における人類学的アプローチによる貢献**、および**宇宙人類学の発展**を目指す。

# 研究概要：行った3つの研究

本研究では、モンテカルロ法を用いたシミュレーションモデル(EVOLVE)を開発した。

1) 研究①: 恒星間宇宙旅行での中立変異した遺伝子の遺伝的多様度、進化速度の計算及び考察

(Journal of the British Interplanetary Society, 2021 Vol74, No.7, July, 243–251, S.Sano)

2) 研究②: 自然淘汰を受ける遺伝子の遺伝的多様度、進化速度の計算及び考察

(Journal of the British Interplanetary Society, 2021 Vol74, No.11, November, 419–426, S.Sano)

3) 研究③ : 恒星間宇宙旅行での文化レベルの変化、文化進化の速度の計算及び考察

(Journal of the British Interplanetary Society, 2022 Vol75, No.4 April, 74–80, S.Sano)

また、(1)多世代恒星間宇宙旅行の先行研究の社会モデルに(2)遺伝学モデルを組み込み、シミュレーションを行った。

# 方法：多世代恒星間宇宙旅行モデル

(1)EVOLVEに組み込んだ、先行研究における多世代恒星間宇宙旅行の原則及びモデル

## ①人類学者Moore (2003)の原則

- ・初期搭乗員は子を持たない若い搭乗員とする。(ポリネシア人移住の実践例から)
  - ・子供を産む時期を遅めにする。(遺伝的多様度維持の観点および船内の収容可能乗員数の観点から)
- (Mooreのモデルにより、近親交配を防ぎながら150人程度で集団で存続維持できることを検証。)

## ②人類学者Smith (2014)の破壊的事象モデル

- ・閉鎖空間では感染症などのCatastrophic的事象が起きることを前提にする。
- (Smithのモデルでは、14世紀の黒死病をもとに人口の30%が減少と設定。→本研究でも活用。)

## ③宇宙物理学者Marin (2018)の搭乗員上限モデル

- ・宇宙船搭乗員数が許容閾値を超えた場合には出産数を抑制する。  
→最大許容塔所員数=初期搭乗員数×2
- ・平均寿命や不妊率なども本モデルのパラメーターを参考にし、EVOLVEのパラメーターを設定した。

# 方法: 遺伝学的モデル(1/2)

## (2)EVOLVEに組み込んだ遺伝学的モデル

### ①木村(1969)の分子進化の中立説、無限座位モデル

- ・遺伝子座位にサイト数は無限。
- ・突然変異は、新規サイトで起きる。
- ・組換えは起きない。

$$\frac{\partial \phi(p, x; t)}{\partial t} = M(p) \frac{\partial \phi(p, x; t)}{\partial p} + \frac{V(p)}{2} \frac{\partial^2 \phi(p, x; t)}{\partial p^2}$$

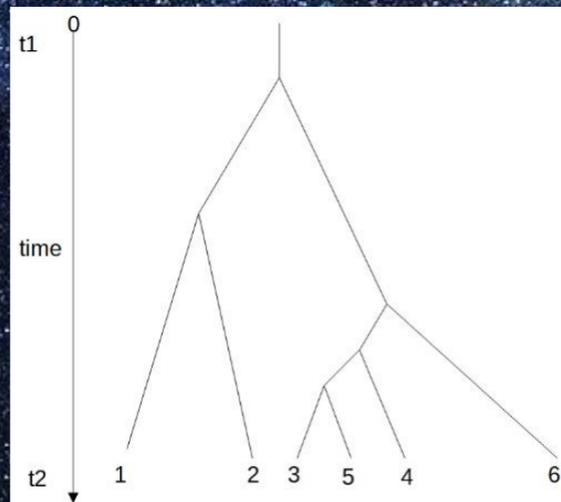
時間tにおける遺伝子頻度xをKolmogorovの後向き方程式で記述

### ②Method of Takahata & Nei (1990), 右図参照

- ・各遺伝子の突然変異が起きたサイトの箇所、年代をベクトルで記録。

### ③自然淘汰モデル: 1-s、1+sで淘汰係数を設定【EVOLVE ver.2】

Allele 1	(1,1,5,0,0,0,)
Allele 2	(1,1,5,3,0,0,)
Allele 3	(1,3,2,8,0,0,)
Allele 4	(1,3,2,8,3,0,)
Allele 5	(1,3,2,8,4,0,)
Allele 6	(1,3,2,8,1,2,)



## 方法：遺伝学的モデル(2/2)

### ④Henrichの文化進化モデル(2004)【EVOLVE ver.3】

- ・各個体は集団内の最高水準技術を有する個体を模倣し、模倣した技術水準はガンベル分布(下記式、図)に従う

### ⑤遺伝子と文化の共進化モデル【EVOLVE ver.3】

- ・Cavalli-Sforza and Feldman, 1981;
- ・Boyd and Richerson, 1985

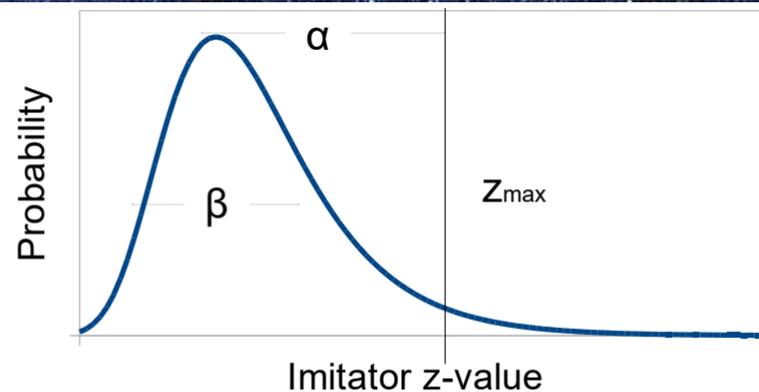
$$f(z) = \frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{z - z_{\max} + \alpha}{\beta}\right] \exp\left\{-\exp\left[-\frac{z - z_{\max} + \alpha}{\beta}\right]\right\}$$

$\alpha$ は分布のピーク、 $\beta$ は分布の幅を示す。  
また、平均文化進化速度は以下で示される。

$$\Delta \bar{z} = -\alpha + \beta(\varepsilon + \log N)$$

$\varepsilon = 0.577$  : オイラーの定数

→タスマニアの技術喪失などの本モデルで説明



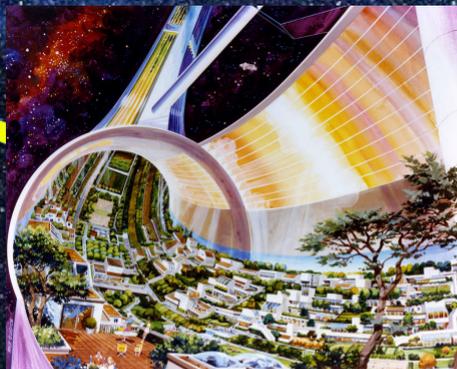
# 方法：世代間恒星間宇宙船シミュレーションの対象



- ・範囲：地球から目的地までの航行期間  
(下記図の黄色い矢印部分)
- ・目的地：地球から最も近い太陽系外惑星
- ・距離：4.2光年の距離。
- ・時間：6300年かかる想定。

目的地到着後は、以下のような環境変化があり、別のシミュレーションが必要。

- ・居住空間が拡大し、人口増大可能
- ・使える資源が大幅に増加
- ・重力環境
- ・追加の地球からの移民の可能性あり



# 方法：恒星間旅行の成功率の考え方

各パラメーターごとに100回(1回あたり6300年)の飛行をシミュレーション。

## ① 個体生存に関する成功率

- 太陽系外惑星に到着後(6300年後)、宇宙船内に集団が生存している確率

## ② 遺伝的多様度に関する成功率

- 系外惑星到着後、遺伝的多様度が一定以上に維持されている確率

$$H_i = 1 - \sum_{j=1}^k x_j(t)^2$$

## ③ 文化水準にかかる成功率

- 系外惑星到着後、文化・技術レベルが開始時のレベルを維持している確率

# 方法: 進化速度の計算

## ① 遺伝的進化速度

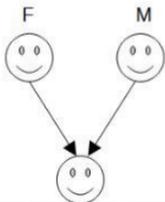
- 恒星間宇宙旅行中、遺伝子の固定が起きた回数

## ② 文化進化

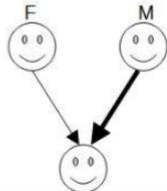
- 恒星間宇宙旅行中の文化水準の増減

- 文化伝達の方法: 垂直、水平/斜行モデル ( $f, 1-f$ )

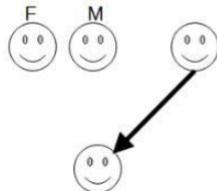
(1) Genetic inheritance



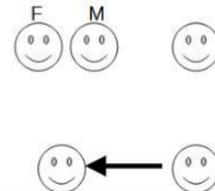
(2) Vertical cultural transmission



(3) Oblique cultural transmission



(4) Horizontal cultural transmission



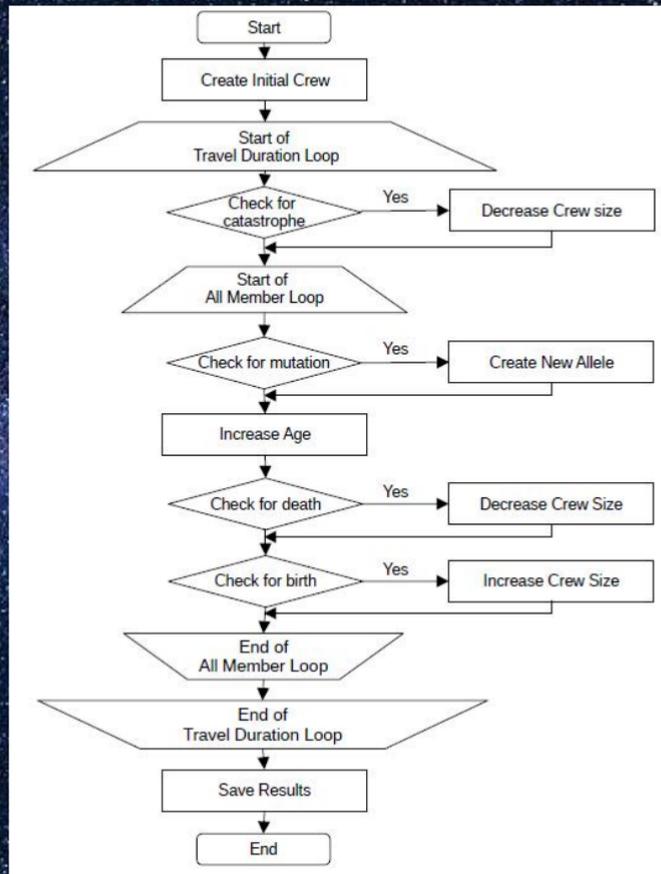
## 方法: 遺伝子と文化の共進化

	Cultural Phenotype	
Genetic Phenotype	$H_i=0$	$H_i>0$
Nonadaptive	1	1
adaptive	1	$1+s*H_i$

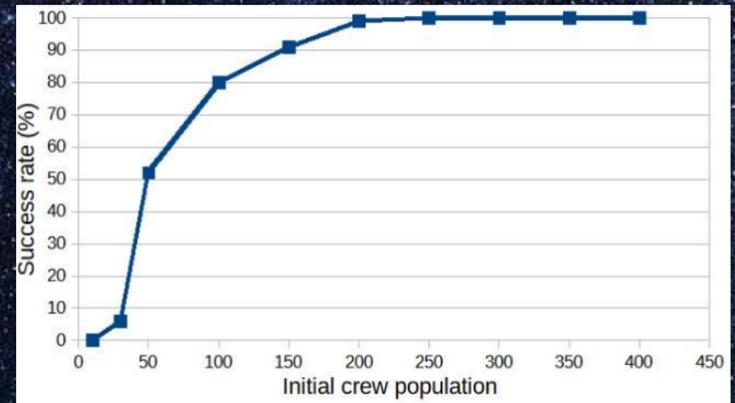
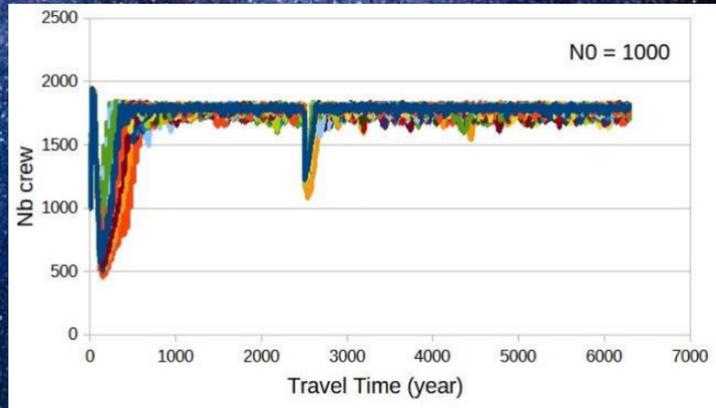
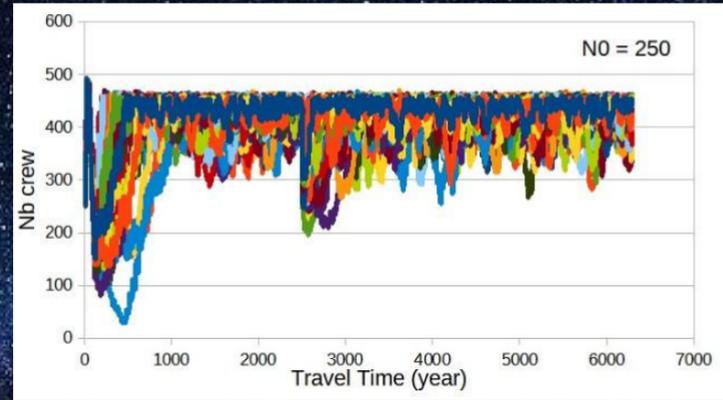
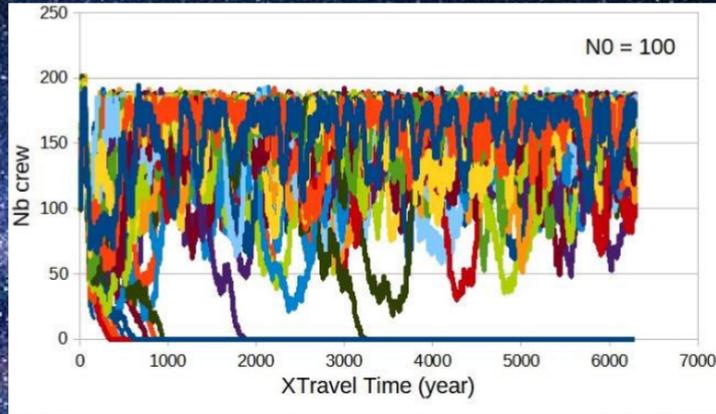
# 変動させた主なパラメーター

研究①（中立変異）	Value(base)	Value (range)	Unit	根拠
初期人口	-	20-15000	humans	先行研究の100人オーダー及びS1万人オーダーを比較。
平均出産数	3	2.6-3.4	humans	Marin氏のモデル※の出産平均人数の3人をベースに多少の増減を考慮。
繁殖開始年齢	32	20-32	years	Marin氏の繁殖期間※を参考に32歳をベースの繁殖開始年齢とした。 繁殖開始年齢を早めて20～32歳の場合の遺伝的多様度の変動を確認。
繁殖終了年齢	40	NA	years	繁殖年齢を早めた際の変動を検証。
不妊率	0.1（女性） 0.15（男性）	0-0.2	(fraction)	Marin氏の不妊率をベースに、初期搭乗員及び子孫の不妊率変動を考慮。
遺伝的多様度	0.32	0.095-0.5	(fraction)	人間の平均ヘテロ度は0.3(過去の文献から)をベースにした。 初期搭乗員の選び方によっては、変動の可能性を考慮。
突然変異率(宇宙) 突然変異率(地上)	0.0001 0.000001	0.000005-0.0002 0.000001	(fraction) (fraction)	宇宙の突然変異率を地上の5-200倍で変動。 -地球低軌道で放射線量100倍、地球磁気圏外である月や火星では放射線量が200倍以上というデータ。 -放射線量と突然変異量が線形の関係となる各種地上実験データ。 -地球低軌道では24倍のデータ。 -地上ストレス環境下で10-200倍に突然変異率増加するデータ
※研究②③も突然変異率を変動				
研究②（自然淘汰）	Value (base)	Value (range)	Unit	根拠
負の淘汰係数	-	0.0001- 0.03	(fraction)	弱有害変異も確認（0.0001および0.001のデータ）
研究③（文化・技術）	Value (base)	Value (range)	Unit	根拠
$\alpha/\beta$	-	7.0-9.0	(fraction)	7：簡易技術、9：難しい技術

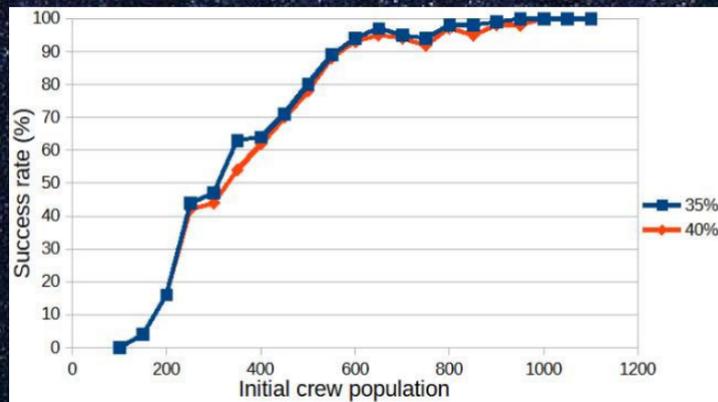
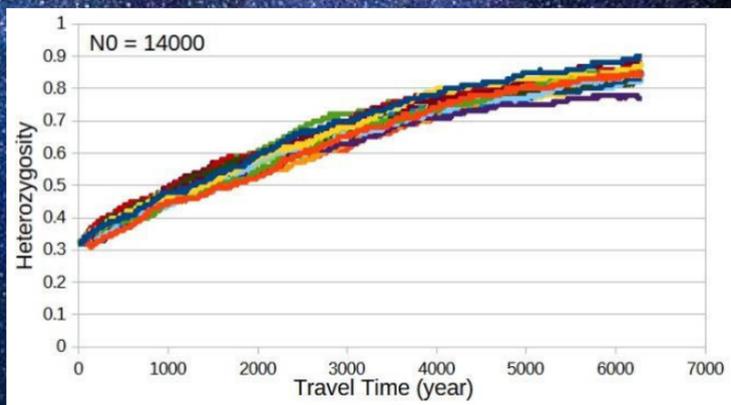
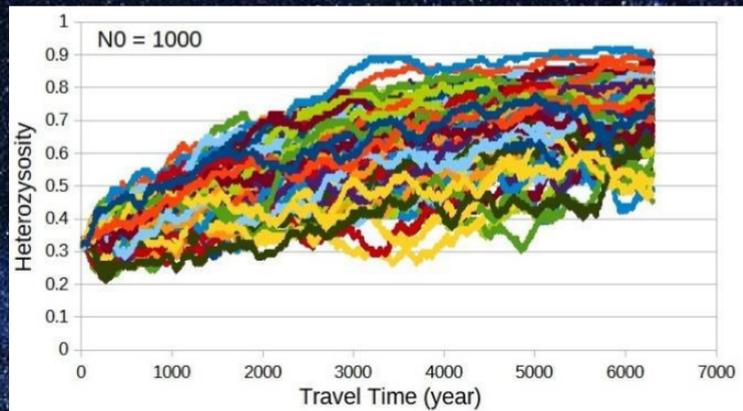
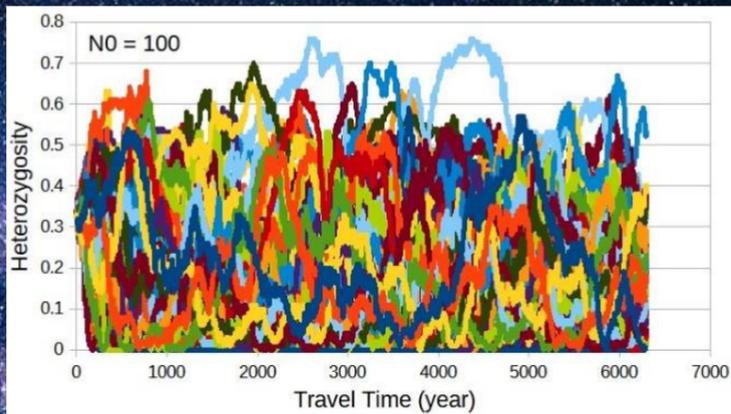
# 方法:フローチャート



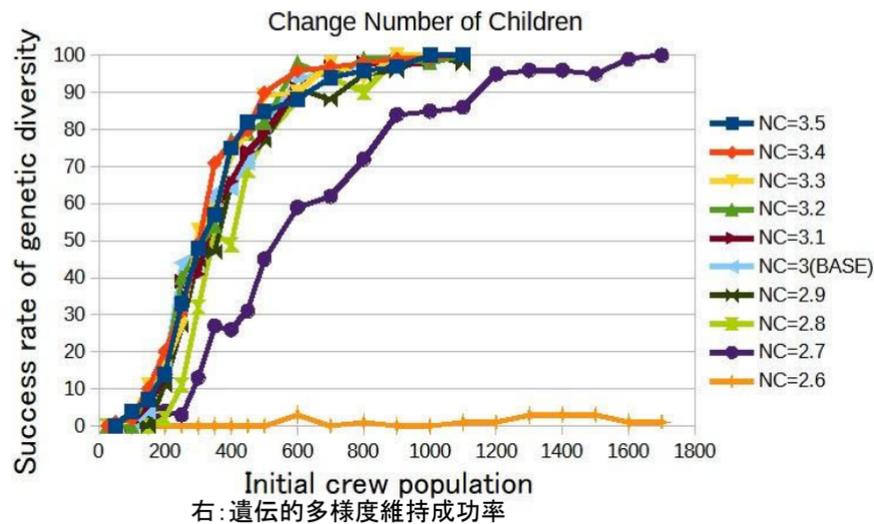
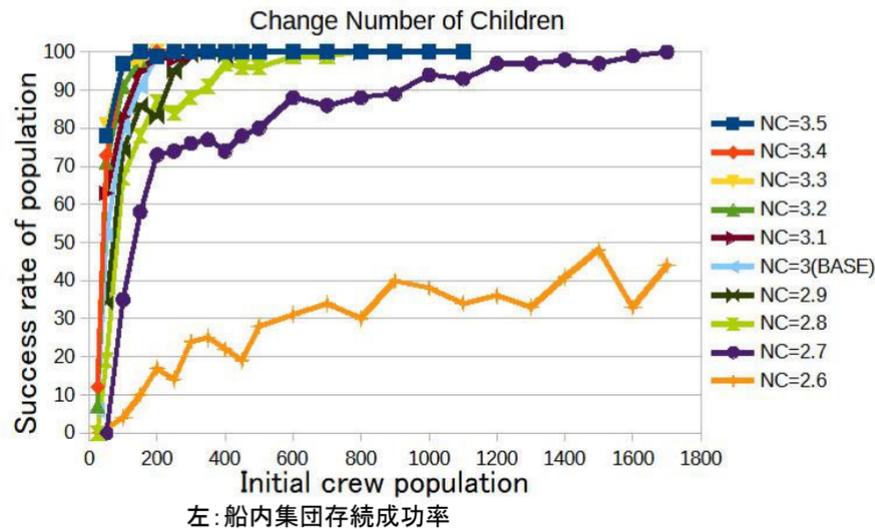
# 結果：研究①：個体数の変化



# 結果：研究①遺傳的多樣度



# 結果A(平均出産数の変動;2.6-3.5人)



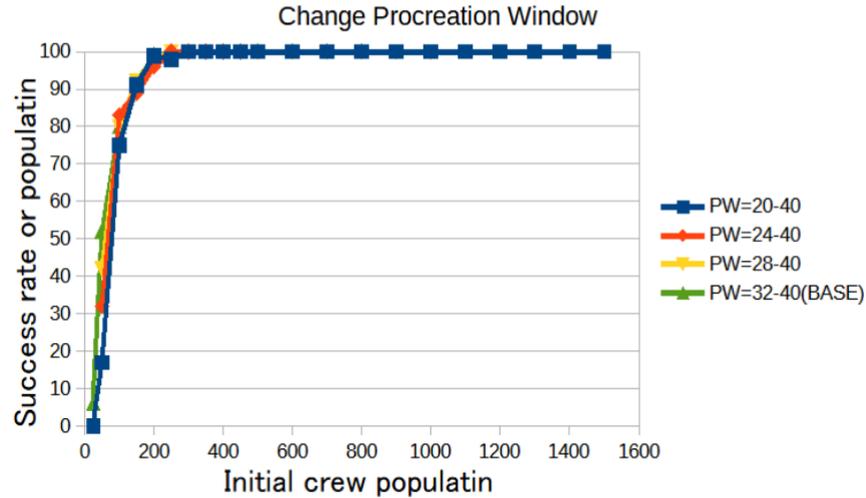
・集団存続成功率: 平均出産数が2.6以下では成功率が100にはならなかった。

=> 平均出産数2.7以上とすると、初期搭乗員150-1700名、宇宙船許容乗員数300-3400名で達成

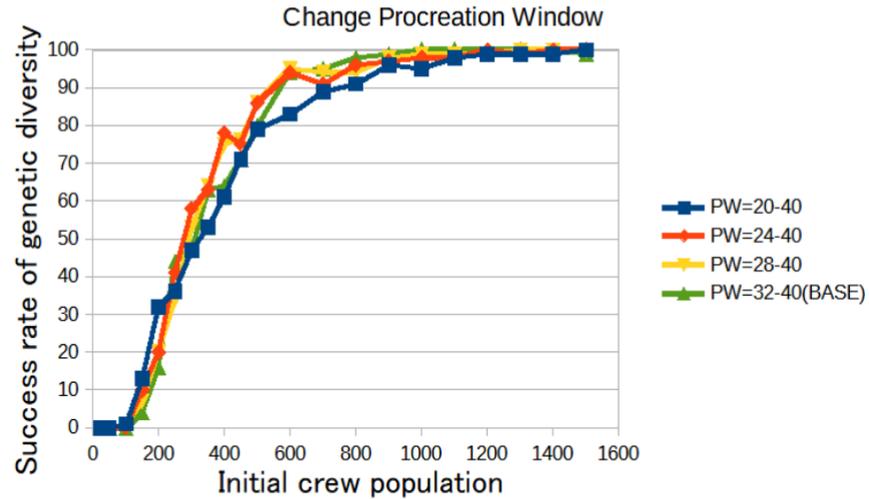
★ 一人当たりの女性が産む子供の数は平均を3人にコントロールしようとしてもずれる可能性はあり、今回のシミュレーションのパラメーターでは2.6と2.7の間で大きな差(存続不可)があり、出産数の管理が非常に重要。

・遺伝的多様度維持: 平均出産数が2.7-3.5のとき、初期搭乗員数900-1700、宇宙船許容乗員数1800-3400で成功率100を達成

## 結果B(繁殖開始時期の変動:20-32歳)



左:船内集団存続成功率

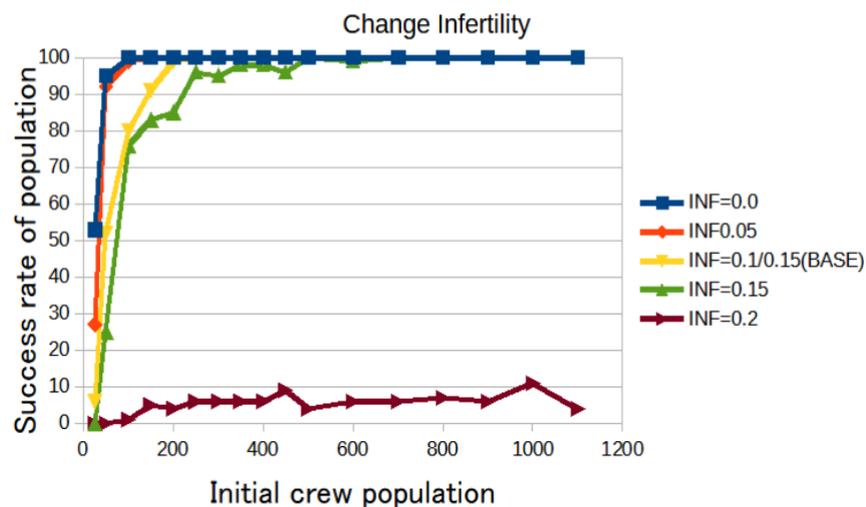


右:遺伝的多様度維持成功率

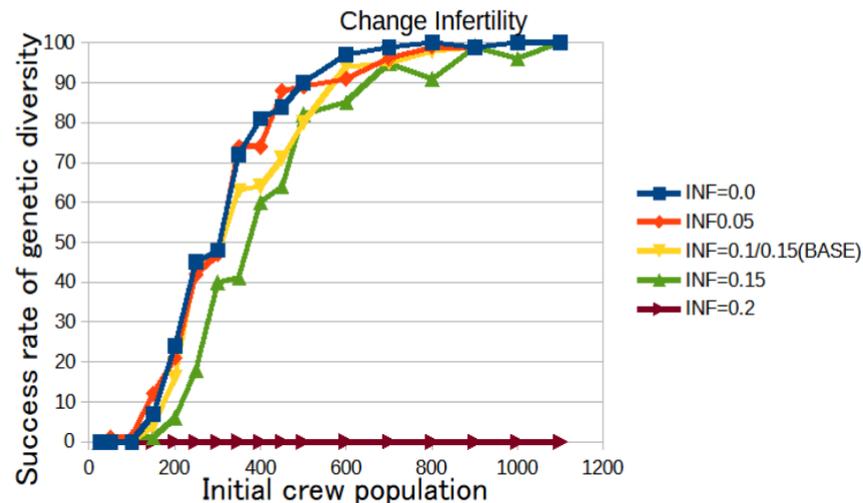
- ・集団存続成功率:いずれも初期搭乗員数250-300で成功率100を達成。出産間隔の差による有意な差はなし。
- ・遺伝的多様度維持率:繁殖開始年齢を早めると、集団の遺伝的多様度は落ちる(有意に)。  
遺伝的多様度維持には、20-40歳→1500名/32-40歳→1000名の初期搭乗員が必要。

★Moore氏の提言通り、繁殖時期を早めると世代数/単位時間が増えて、遺伝的多様度が減少する。

# 結果C(不妊率の変動:0-0.2)



左: 船内集団存続成功率



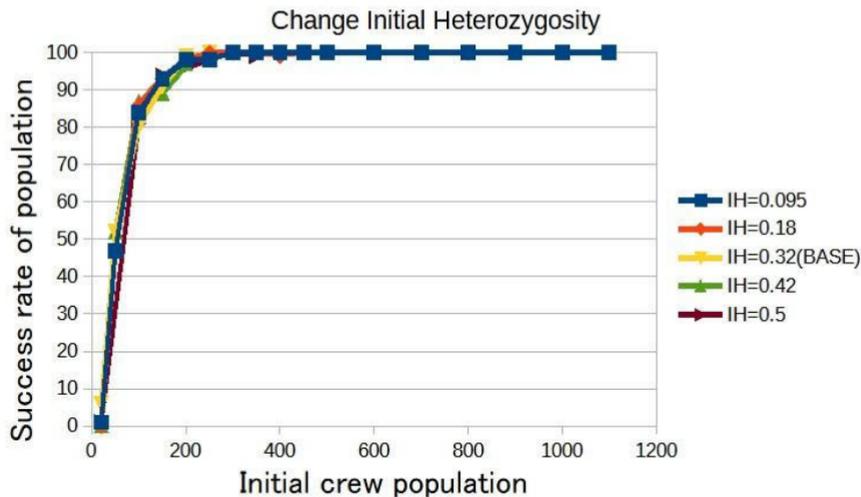
右: 遺伝的多様度維持成功率

・集団存続成功率: 不妊率0.2の場合、**不成立**(今回行ったシミュレーションのパラメーターで。出産平均数を上げるなど必要)。  
不妊率0→100人、0.15→500人の初期搭乗員が必要

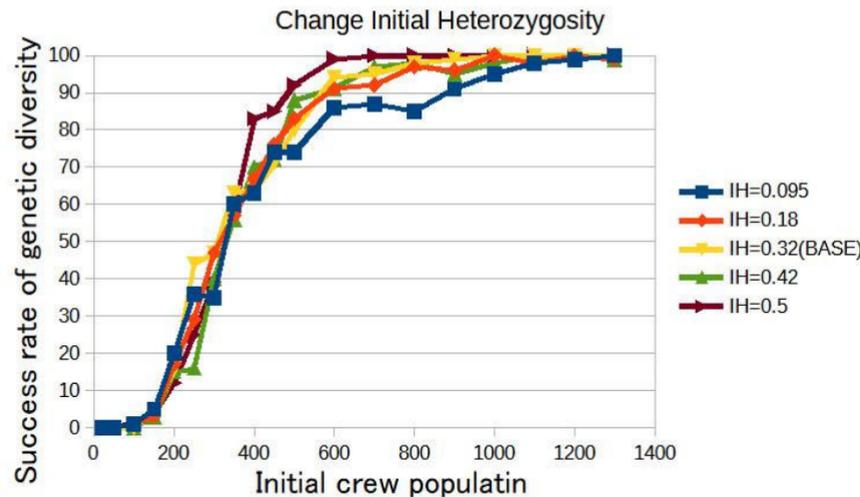
★不妊率は初期搭乗員の選抜方法で異なりうり、また宇宙船内で誕生した子孫の不妊率はばらつきうるため、宇宙船内での不妊率を計測して、それに応じた出産平均数とともに集団数をコントロールすることが必要。

・遺伝的多様度維持率: **不妊率が低いと多様度を維持**できやすい傾向(有意に)

## 結果D(初期遺伝的多様度の変動:0.095-0.5)



左: 船内集団存続成功率



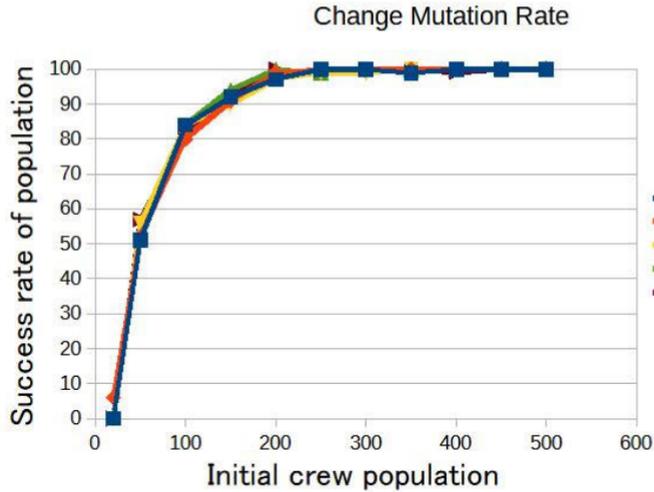
右: 遺伝的多様度維持成功率

・集団存続成功率: いずれも、初期搭乗員数250-300で成功率100を達成。初期遺伝的多様度の差による有意な差はなし。

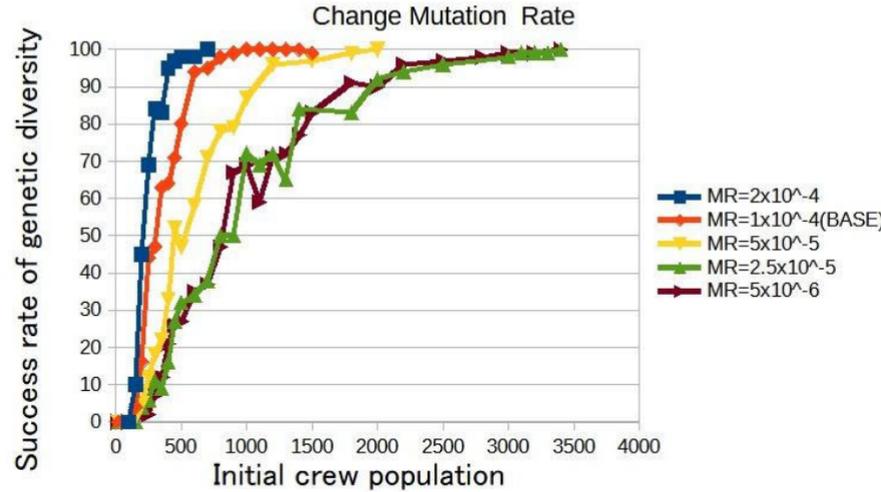
・遺伝的多様度維持率: 初期遺伝的多様度が高いと多様度を維持できやすい傾向(有意に)

★初期搭乗員数の遺伝的多様度をなるべく高めになるように選抜すると、宇宙旅行中遺伝的多様度を高く保つことができる。→初期搭乗員の選抜における遺伝的多様度の要素は大切。

# 結果E(突然変異率の変動:地上の5-200倍)



左: 船内集団存続成功率



右: 遺伝的多様度維持成功率

・集団存続成功率: いずれも、初期搭乗員数200-300で成功率100を達成。有意な差はなし。

・遺伝的多様度維持率: 突然変異率が高いと多様度を維持できやすい傾向(有意に)

★他のパラメーターに比べて遺伝的多様度への直接的影響が大きい。

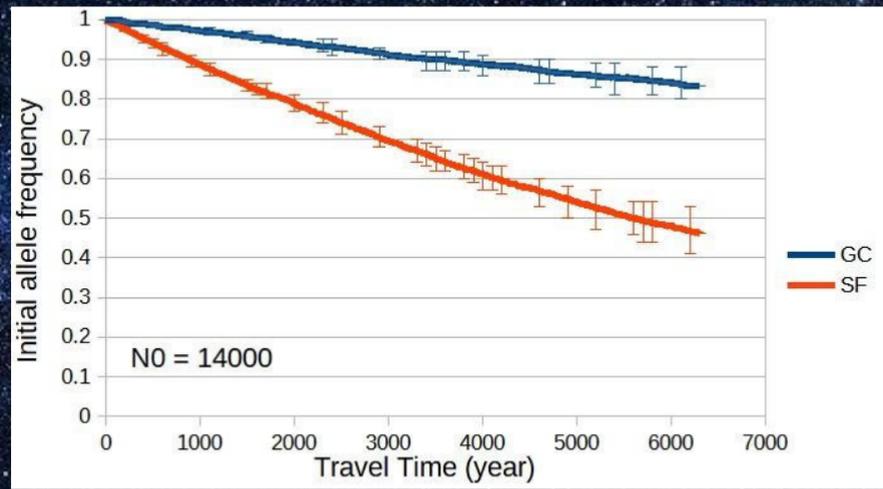
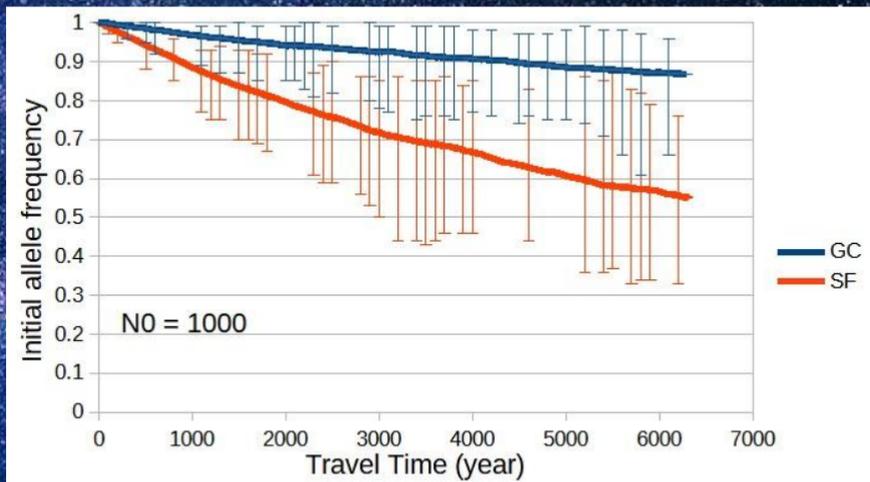
→宇宙環境、特に地球磁気圏外の月以遠での突然変異率の測定など今後進め、突然変異率を推定することが大切。  
また、突然変異率が高い場合、遺伝的多様度の影響だけでなく、負の自然淘汰の影響も検討の必要あり。→研究②

# 結果A-Eのサマリ:必要な宇宙船許容乗員数

Parameter	集団存続	遺伝的多様度	備考
A:出産平均数	300-3400	1800-3400	2.6-3.5人/女性
B:繁殖開始時期	500-600	2000-3000	20-32 から40歳まで
C:不妊率	200-1000	1600-2200	0-0.2
D:初期遺伝的多様度	500-600	1400-2600	0.095-0.5
E:突然変異率	400-600	1400-6800	5倍-200倍
上記を包含	200-3400	1400-6800	

- ・**集団存続成功率**: 集団を維持できるギリギリの平均出産数(2.7人)の場合、3400名程度の乗員数が必要、**平均2.8名以上を維持できれば200-1000名で集団維持**。  
★**遺伝的多様度維持の前に、出産数を維持できないと存続そのものできないため、不妊率とあわせて、平均出産数の測定・管理が大切。宇宙航行期間中、人口に応じた平均出産数の変動管理も必要。**
  - ・**遺伝的多様度維持率**: 遺伝的多様度は、突然変異率の変動に対する影響が大きかった。  
★**長期宇宙滞在中の突然変異率のデータ、太陽系外の放射線データなどを蓄積して精度向上が必要。**
- ⇒これまでの銀河系宇宙旅行に必要な最小の宇宙船搭乗員数に関しては、これまでの地上の人類学的データ等から150-180名、あるいは人類の有効な集団な大きさから11,000-44,000名という推定があったが、適切なモデルを構築し、初めて遺伝的多様度を維持するための乗員数として、**1400-6800**という数字を提示できた。

# 結果：研究①(3/4): 遺伝子の固定



## 結果：研究①(4/4)：結論

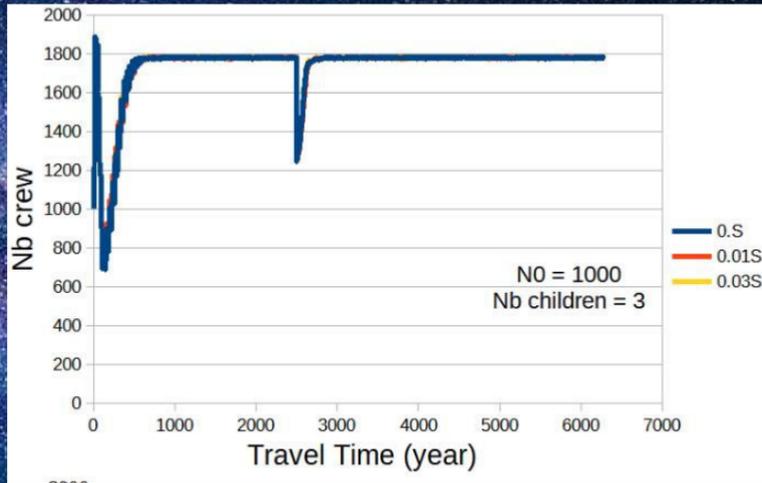
- ・恒星間宇宙旅行での**個体数維持**には、パラメーターによっては**100名オーダー**で維持可能(先行研究と同様の結果)
- ・**遺伝的多様度の維持**には、宇宙船内乗員**1000名オーダー**の乗員が必要  
※保全遺伝学における研究結果と同程度のオーダー
- ・中立変異では、突然変異頻度が高くても、恒星間旅行中(6300年)に遺伝子の固定が起きない。  
ただし、新規突然変異遺伝子の頻度は増加。  
→【考察】恒星間宇宙旅行中に、宇宙船の設計変更などの可能性も検討に入れる必要あり。  
自然淘汰がある場合、遺伝子固定確率が異なる※ので、検証が必要。

※中立遺伝子の固定確率： $u=1/2N$

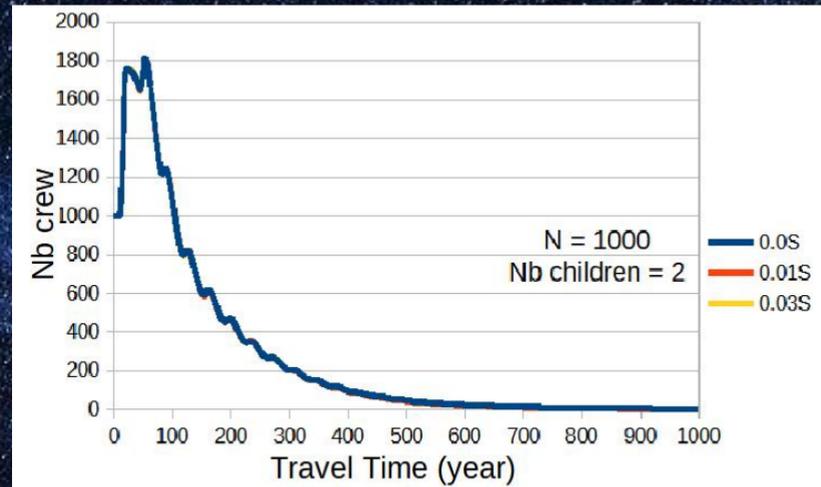
自然淘汰がある場合、以下。

$$u = \frac{1 - e^{-2s}}{1 - e^{-4Ns}}$$

## 結果：研究②(1/4)：個体数の変化

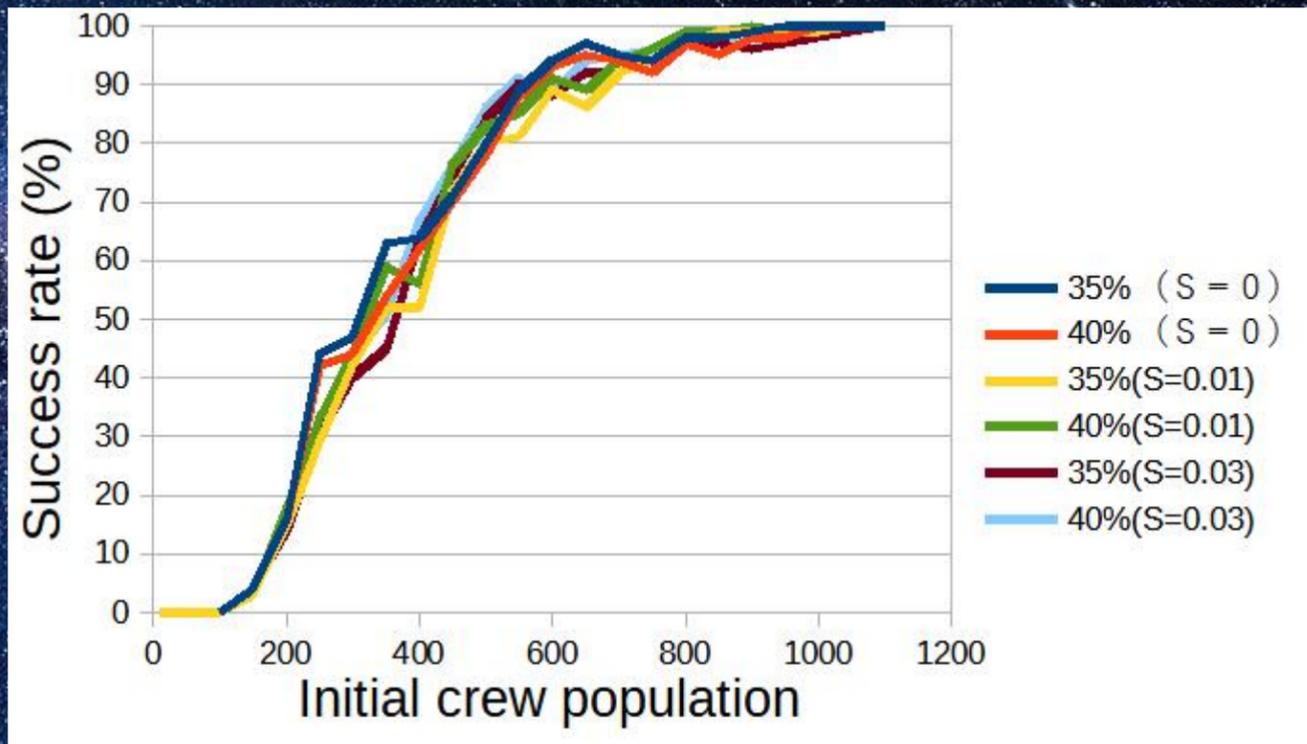


平均出産数=3

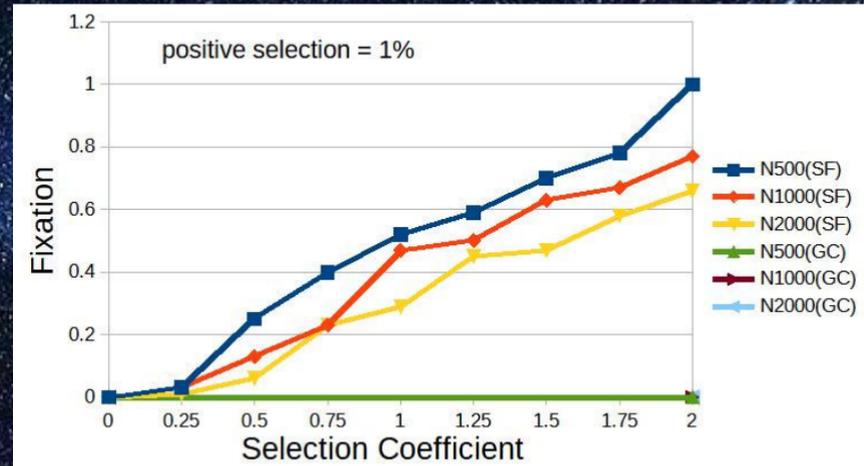
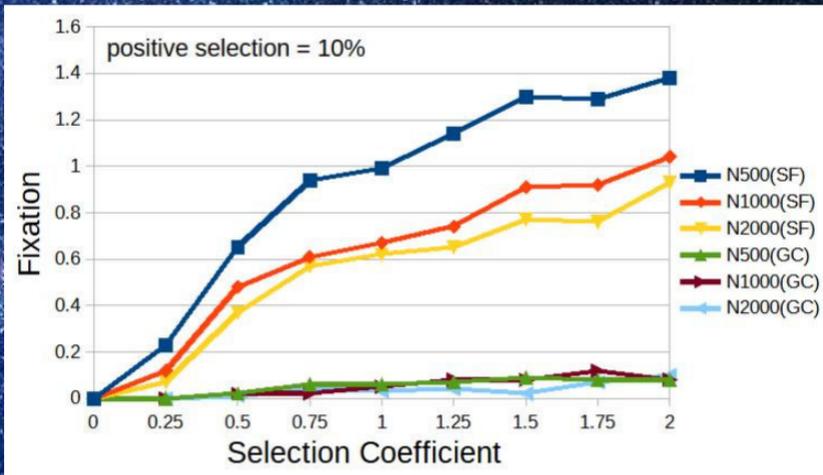


平均出産数=2

## 結果：研究②(2/4)：遺傳的多樣度



# 結果：研究②(3/4)：遺伝子の固定



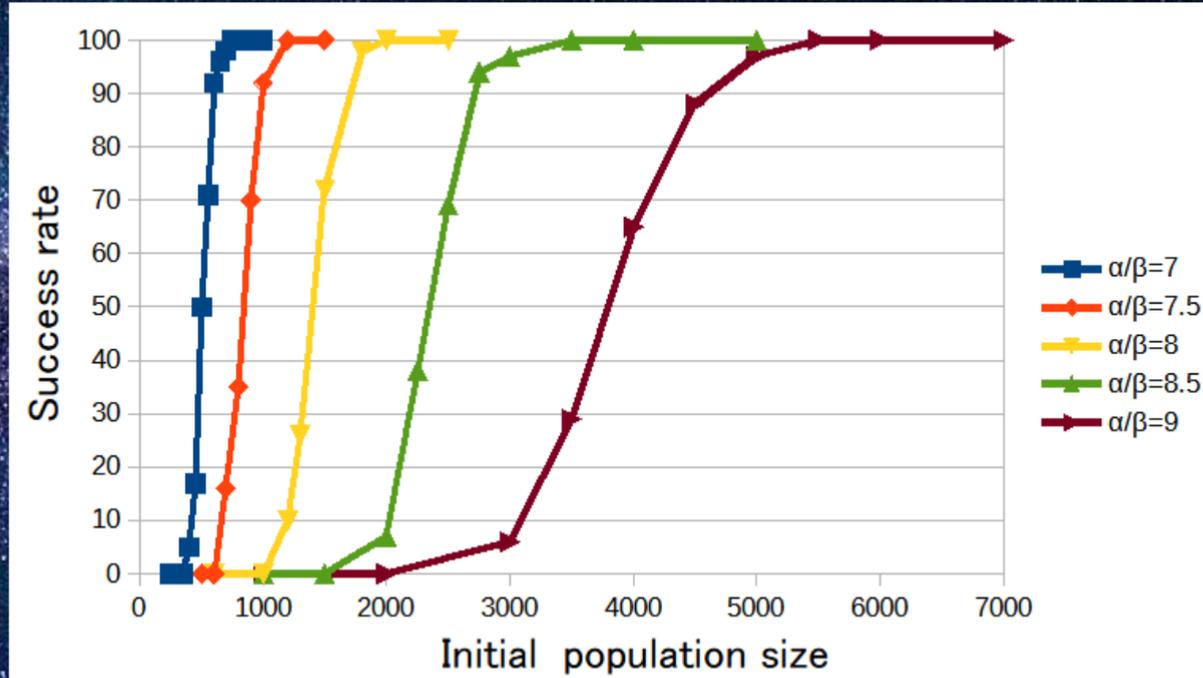
## 結果：研究②(4/4)：結論

- ・負の自然淘汰が遺伝子に働いた場合であっても、個体数、遺伝的多様度の維持に必要な乗員数は、中立変異と同等
- ・正の自然淘汰が遺伝子に働く場合、**遺伝子の進化速度は地上の10倍**(本研究で用いた条件下では)

### 【考察】

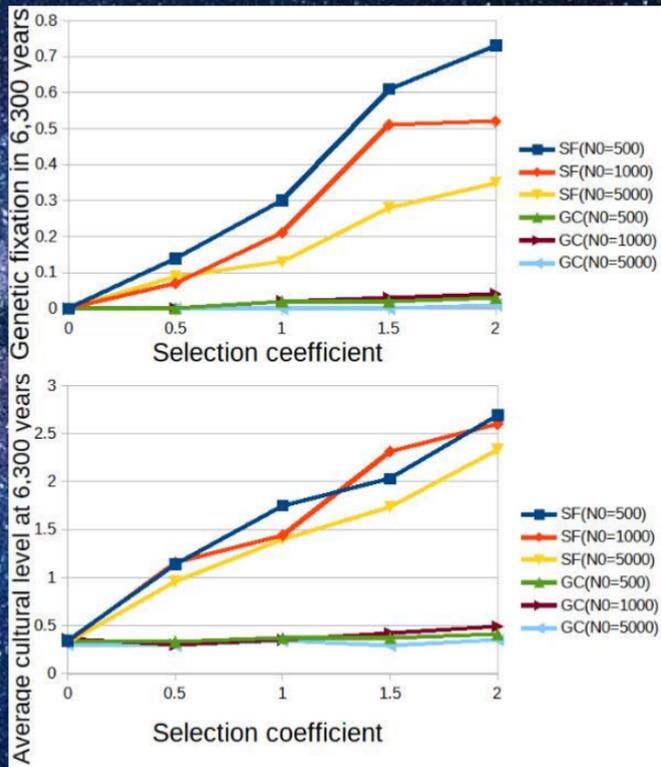
- ・生物は**新しい環境**に出ると進化が進みやすい(カンブリア紀の進化のビッグバン、陸上への生物進出)。
- ・**人類も新しい環境に出たとき**、Out of Africa期にドーパミン遺伝子、高地に適応したときなどに正の自然淘汰。他にも乳糖耐性遺伝子、マラリア抵抗遺伝子、皮膚色遺伝子などで正の淘汰が働いたことが示唆されている。
- ・無重力環境に出ると、**細胞レベル、遺伝子レベルでの変化**および骨密度や筋量の減少、耳石の感受性(平衡バランス感覚)変化、宇宙酔い、体液シフトなどの**個体レベルの生理的変化**が生じることが知られている。
- ・生命にとって**新しい環境である宇宙**では個体の生理的変化に留まらず、集団としての遺伝的進化の可能性もある。
- ・実際に無重力でのエネルギー代謝に適応した**バクテリアの宇宙実験**や、**宇宙環境で生じたカビの突然変異**の解析から宇宙環境での成長に関する**正(宇宙環境に適応した)の自然淘汰**を示す遺伝子解析結果が得られている。
- ・世代を経ると、**人類も無重力環境に適応**する形質が遺伝的に進化する可能性あり。
- ・人体がなんらかの形で無重力環境に適応、進化した場合、太陽系外惑星に到着後、重力のある惑星に適応できない可能性がある。その場合、恒星間宇宙船への**人工重力システム搭載**などの検討が必要。また、LEOだけでなく、月や火星での有人探査を通じて、宇宙環境での人類の生理的変化、遺伝的変化について更なる研究を進めることで進化の可能性についての検討を深めることが大切。

## 結果: 研究③(1/3): 文化水準の維持

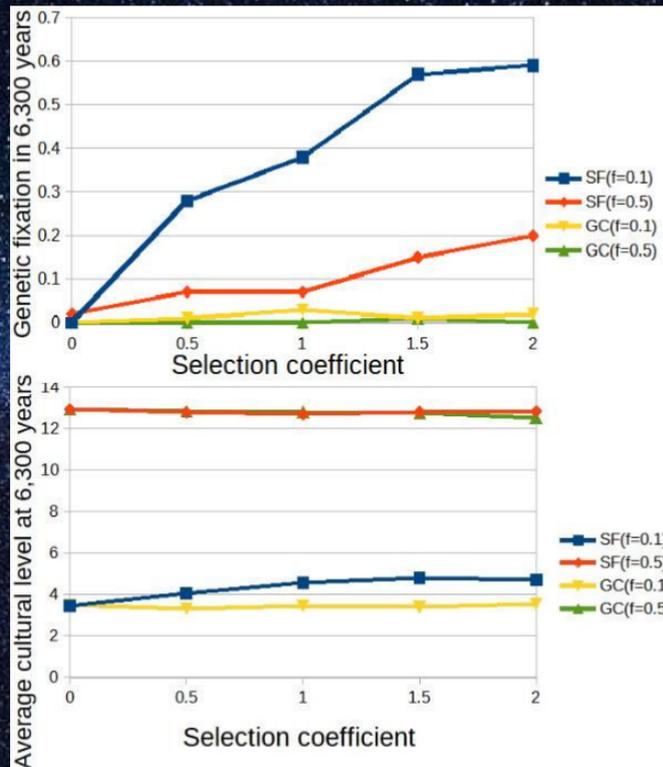


・技術が難しくなる( $\alpha/\beta$ が大)に連れて、その技術を維持するために必要な集団サイズが増加していく

# 結果: 研究③(2/3): 文化進化の速度



垂直伝達



水平/斜行伝達

## 結果：研究③(3/3)：結論

- ・恒星間宇宙旅行中の文化水準の維持には、1500名程度(簡易技術)～11000名程度(難しい技術)必要。
- ・文化進化の速度については、文化が垂直に(親から子へ)伝達し、正の自然淘汰が遺伝子に働く場合、遺伝子の進化速度が地上の10倍となる条件のとき、文化の進化速度は5倍程度。

### 【考察】

(遺伝子と文化の共進化による)文化進化の速度が地上より速くなる可能性を考慮すると、例えば、地上の食文化と消化遺伝子の共進化のような観点で、骨・筋減少など宇宙に対応した新しい食文化が進む可能性あり、宇宙船内の食システムの再設計の必要性、また地上の言語と遺伝子の共進化の観点では地球上人類との言語の分岐、通信のための宇宙船内での言語教育の必要性などが考えられる。

月や火星への移住に関しては、食料という観点で人工植物栽培、培養肉技術、人口光合成、食・排泄循環システムの研究開発が進められている。それらと人類進化との関係や、今後の月・火星における文化の変化データの更なる研究を進めることでこのような検討を深めることができる。

# 全体のまとめ(1/2)

## 【将来への取り組み】

将来の取り組みとして、以下を進めることにより、本研究分野の進展につながることを期待される。

- 遺伝子への負の自然淘汰の影響だけでなく、**宇宙放射線の人体への影響**の考察、および防御システムの検討
  - ・低線量放射線の身体への影響の把握、**寿命や不妊率等への反映**、必要に応じ遮断技術の追加/突然変異率の減少
  - ・**太陽系外における放射線被ばく量**の把握も必要。必要に応じた突然変異率への反映。
- あるべき恒星間宇宙旅行の姿、社会的ルールをさらに検討したうえでの、より適切な社会モデルの構築
  - ・1人あたりの出産数、出産間隔などを含めた**家族モデル**や(遺伝子と文化の共進化)に関する文化進化の検討だけでなく、宇宙社会を維持するための適切な**政治モデル**、**教育モデル**、**社会モデル**の検討
- 上記含めて様々なパラメータを扱っているため、各種パラメータの精緻化および網羅的な計算による精度向上。  
そのための**月や火星・地球低軌道施設での関連データ(遺伝的データ、身体的変化データ、文化的データ)の取得**。
  - ・特に、突然変異率、適応度、文化伝達のパラメータ( $\alpha/\beta$ )

## 全体のまとめ(2/2)

### 【結論】

・これまで、多世代恒星間宇宙旅行に必要な人数は、地上の人類学的研究から100名オーダー、あるいは、有効な集団の大きさから10,000名オーダーという数字が出されたが、本研究により**世界で初めて**、遺伝的多様度を維持するために**必要十分な人数**として、**1,000名オーダー**という数字を提示できた。

・宇宙船の**文化・技術維持に必要な人口**も大切なパラメーターとされながら、これまで全くオーダーレベルでも数字は導出されていなかったが、本研究により**初めて**、**1,500-11,000名**という数字を導出した。

(乗員数を抑えるためには技術の簡易化も必要)

⇒恒星間宇宙旅行での人類存続の最小限の人数として、宇宙船設計に必須の数字を提示。

・宇宙における、**遺伝的進化および文化進化**の速度を**世界で初めて**示した。

⇒宇宙における突然変異率を用いた進化速度の推定は、LEOを含む**宇宙生物学、宇宙医学研究の発展**に寄与。

恒星間旅行における進化速度の推定は、恒星間宇宙船の**システム設計、文化・社会モデル**検討の一助。

- 本研究により、宇宙空間における6000年程度の期間での進化の可能性が示された。  
現在、宇宙環境の耐性の強い他の種を使った恒星間航行の試行も検討されている。  
新しい環境では劇的な進化の可能性があり、**Out of Earth**は、**進化のビッグバン**を再び起こすかもしれない。

# 我々はどこから来たのか 我々は何者か 我々はどこへ行くのか



- ・どこから来たのか何者か: 古人類学、形態人類学、遺伝人類学、分子人類学、ゲノム人類学、文化人類学・・・
- ・どこへ行くのか: 人類学の多様な成果を生かし、将来、人類がどのように新しい環境に適応していくか、どうあるべきかを研究  
宇宙人類学、・・・

# 月・火星探査への応用

対象を恒星間航行から、月面・火星での移住へ。

● **期間の変化** : 6000年→10~100年程度(進化が起きる期間ではない。)

→ 遺伝的多様度よりも、食糧生産効率やエネルギー効率の観点から最小必要人数を考えることが必要。

(各種循環システムなどの設計・制御のために人口の増減把握・コントロールは大切)

● **集団間の接触の変化**

・ 宇宙船内で孤立→月や火星に地球から新しい集団が到着しうる。

→ 遺伝的多様度に関しては、地球から随時新しい乗員を追加可能。

● **検討すべきパラメーター** : 社会が成立するための適切な政治モデル、教育モデル、社会モデルなど検討が重要。

# 参考図書(一般書)

## 1. 生物進化

- ・生物進化を考える(木村資生)
- ・分子進化のほぼ中立説(太田朋子)
- ・知の挑戦(エドワード・O・ウイルソン)

## 2. 遺伝子と文化の共進化

- ・文化が人を進化させた(ジェセフ・ヘンリック)
- ・文化進化の数理(田村光平)

## 3. 多世代恒星間航行

- ・Interstellar Travel and Multigeneration Space Ships (Yoji Kondo)