

【配付先：関係者限り】
【公開範囲：配付先限り】

宇宙人類学： 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

TansaXセミナー
2024年8月23日

株式会社 国際社会経済研究所
Thought Leadership推進部
プロフェッショナル 博士（理学）
佐野智

Career History



Satoshi Sano



2002年

国際宇宙
ステーション
利用

新規宇宙事業開発
オープンイノベーション拠点

JAXA予算
(約2000億円)
政府折衝

経営企画部

文化

創薬

環境

はやぶさ2

H3ロケット

地球観測衛星

科学技術
イノベーション
基本計画

測位衛星
みちびき

地球観測衛星
防災

民間
宇宙
利用

内閣府
出向

宇宙ステーション利用

新規
ユーザー
開拓

サントリー

ヤクルト

事業
推進部

宇宙飛行士
健康管理

民間宇宙旅行向け
新規事業開発

宇宙
生活用品

宇宙食

月面
健康管理

NEC
IISE

転職・出向
2023年

国際社会経済研究所（IISE）について

沿革・事業概要

NECグループの独立シンクタンク

- 今後の情報社会の在り方を、中立的な立場からグローバルに発信していくことを目的に2000年設立。
- 2022年、ソートリーダーシップ活動をファシリテートする存在として体制を強化。
〈ソートリーダーシップ活動、ベースリサーチ、経済安全保障〉を軸に事業を展開。

体制

代表取締役：松木 俊哉



1983年 NEC入社。
2016年 同社執行役員常務、グローバルビジネスユニット長。
2022年 同社コーポレートエグゼクティブ、IISE代表取締役社長就任。

理事長：藤沢 久美



1996年 日本で最初の投資信託評価会社アイフィス設立。
2004年 シンクタンク・ソフィアバンクをMBO、
2013年 同社代表取締役。
2022年 IISE理事長就任。

理事：野口 聰一



1996年 NASDA（現JAXA）の宇宙飛行士候補者に選定。
2021年 ISS第64次/
第65次長期滞在ミッション完了。
2022年 IISE理事就任。

NEC 2030VISIONを実現するためのThought Leadership活動

気づき

仲間づくり

価値づくり

Thought Leadership活動

未来の構想を
つくる

共感

イニシアティブ組成

発信・共創PJ・
実証実験・価値検証

エコシステム形成

社会実装・拡大



Life



Business



Communication



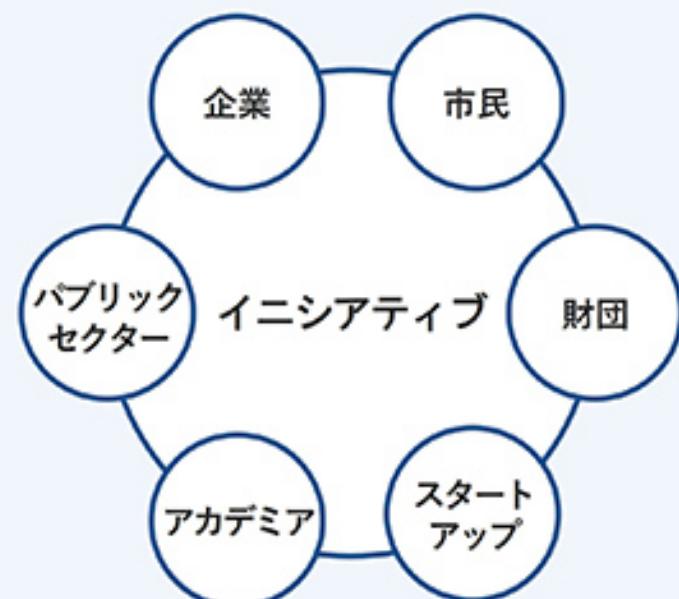
City



Environment

本質的な課題認識

多様な知見の取り込み



NEC 2030VISION

暮らし

社会

環境

I ISE フォーラム 2024



I 経済安全保障シンポジウム



I GX VISION 発行



I ホワイトペーパー作成



I 外部イベント登壇



I I S E note 宇宙マガジン

I I S E

宇宙デブリ、光害、衛星コンステレーション、宇宙法・・・

コモンズとは何か
～宇宙コモンズの検討に向けて～



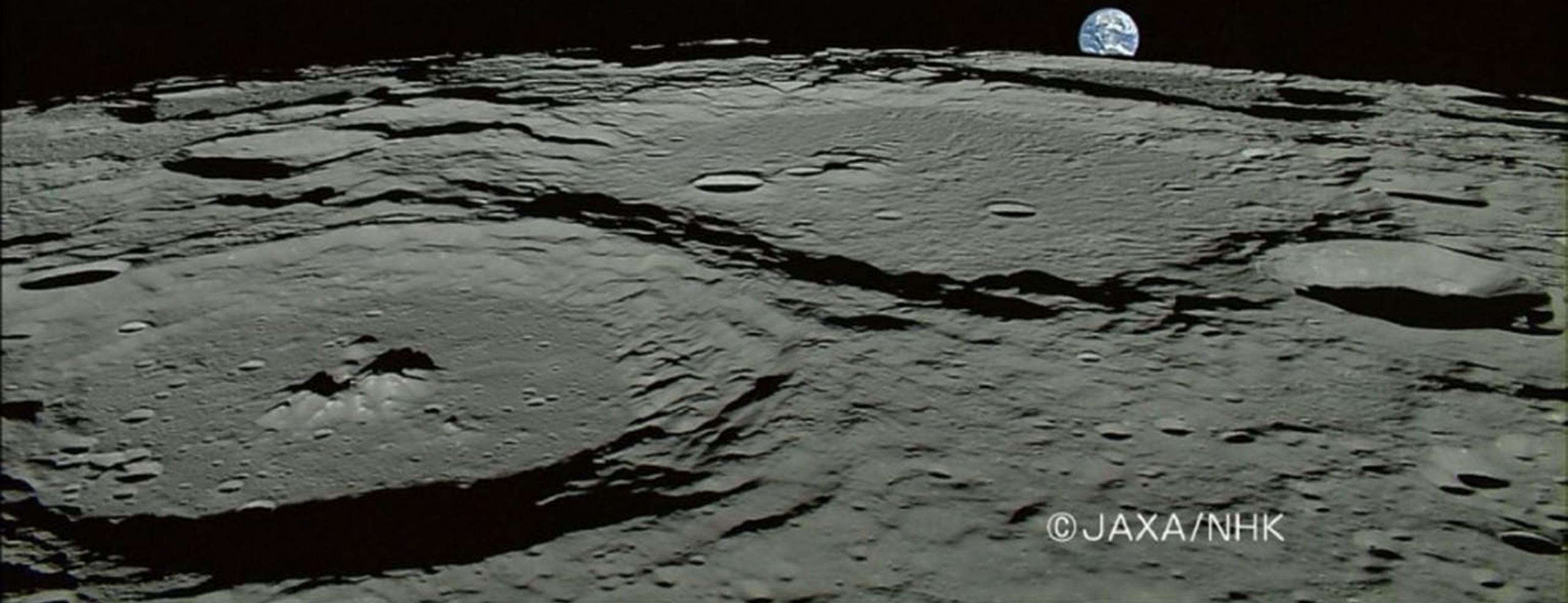
宇宙コモンズの探索



https://note.com/nec_iise/

宇宙人類学

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



©JAXA/NHK

バックグランド

- ・東京大学 理学部生物学科 人類学課程卒業、 同修士課程修了(生体人類学研究室)



→進化の産物としての人類の特徴を理解

遺伝学、霊長類学、文化人類学、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

→宇宙人類学研究で学位取得:東京大学 博士(理学)

- ・本日の内容:投稿論文Jour. British Interplanetary Soc. (英國惑星間協会誌)

①Vol. 74, 243–251. (2021), S. Sano.

②Vol. 74, 419–426. (2021), S. Sano.

③Vol. 75, 118–126. (2022), S. Sano.



British
Interplanetary
Society
From Imagination to Reality

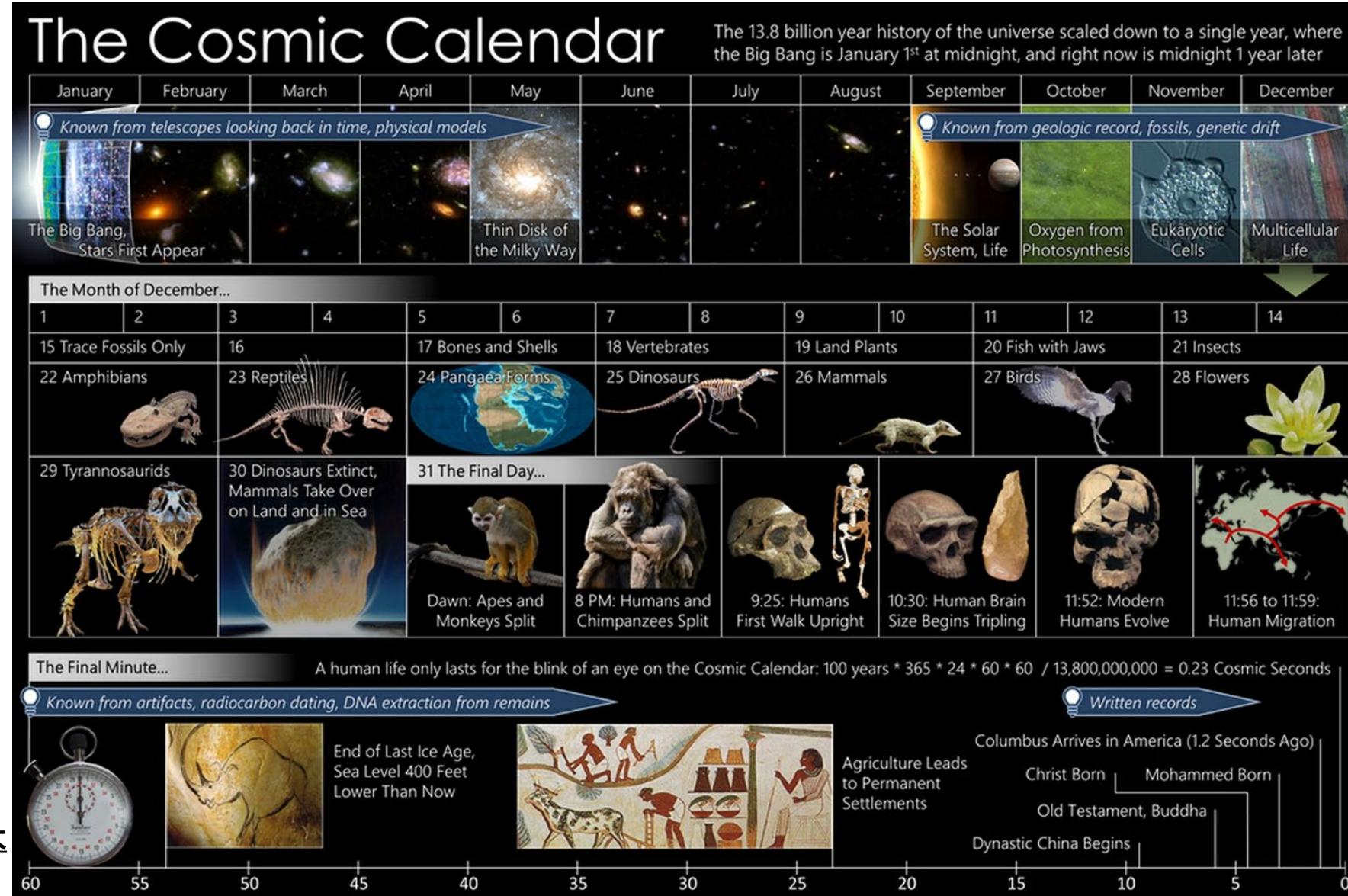
- ・MVA WG member: Lunar Human Physiology and Biology

研究の目的

- ・本研究の目的は、人類が銀河系内恒星間宇宙航行を行った場合の宇宙航行中の**人類進化の可能性**と、恒星間宇宙航行において**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。
- ・世界の宇宙機関では、月や火星などの有人宇宙探査計画が検討され、世界の様々な研究機関、企業(Diaspora Space[日本]など)で**恒星間宇宙航行**の研究開発がなされている。
- ・このように、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、本研究では、恒星間航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

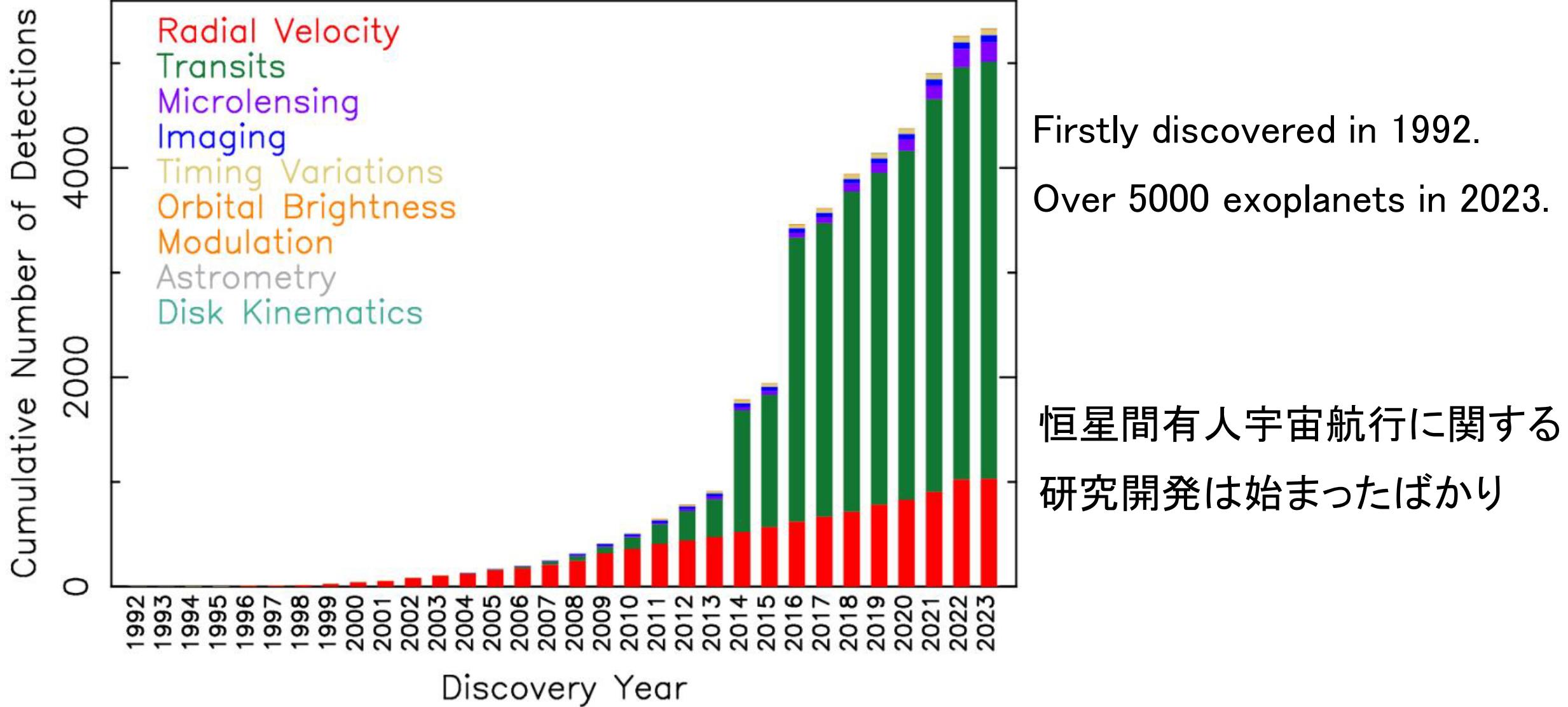
- 約138億年前: ★ビッグバン
1000億以上の銀河が誕生
1000億以上の恒星in銀河系
- 約46億年前: 地球誕生
- 約40億年前: 海ができる
→ 生命誕生
- 約5億年前: 生命が地上へ拡散
★進化のビッグバン
[カンブリア紀]
- 約6600万年前: 恐竜絶滅
→ 哺乳類進化加速
- 約2000万年前: チンパンジー誕生
- 約7-900年前: 人類誕生
→ 5万年前: アフリカから世界へ拡散
- 1960年代～: 人類の活動領域は宇宙へ拡大
- 未来: 人類はどこへいくのか



発見された太陽系外惑星の数

Cumulative Detections Per Year

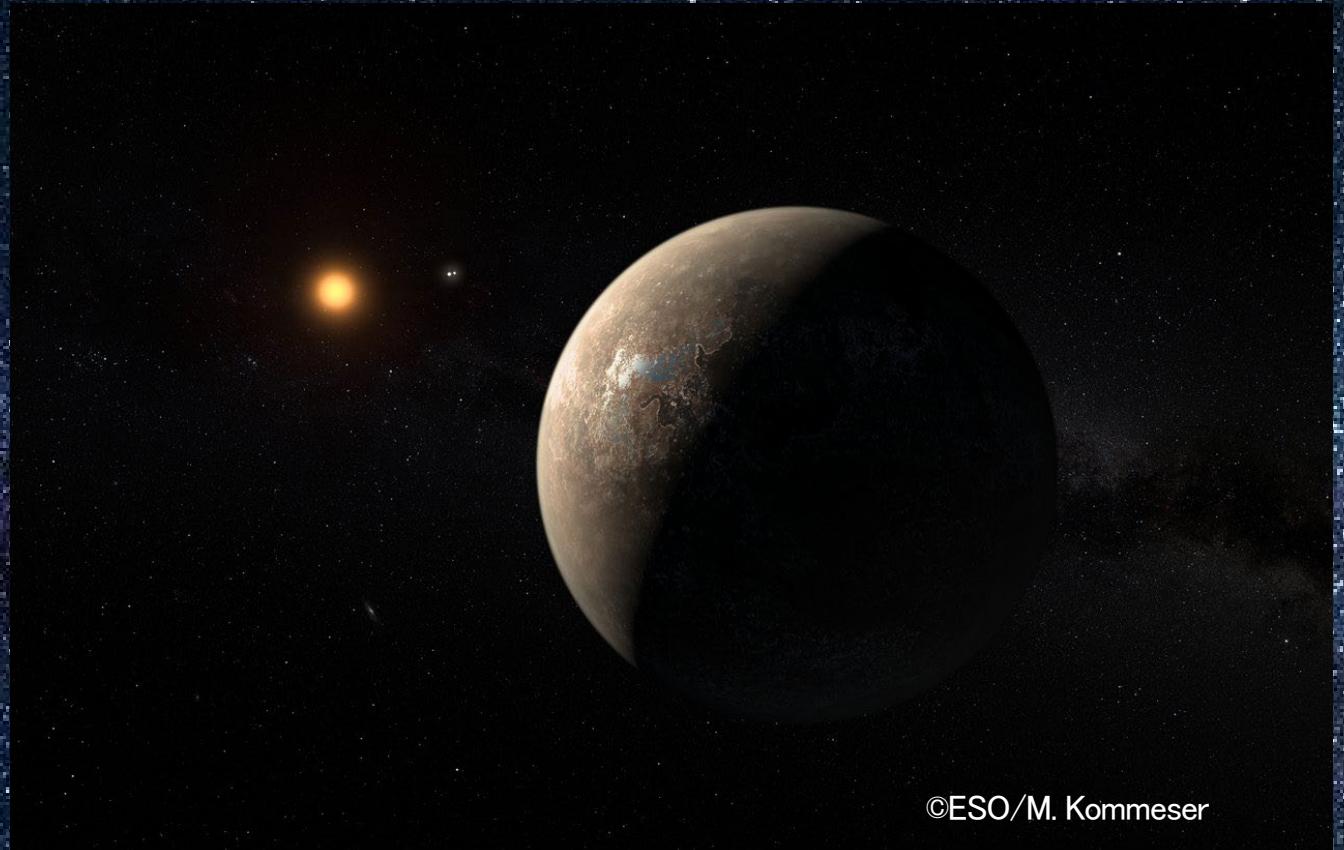
13 Apr 2023
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



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。



©ESO/M. Kommeser

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が検討されている。

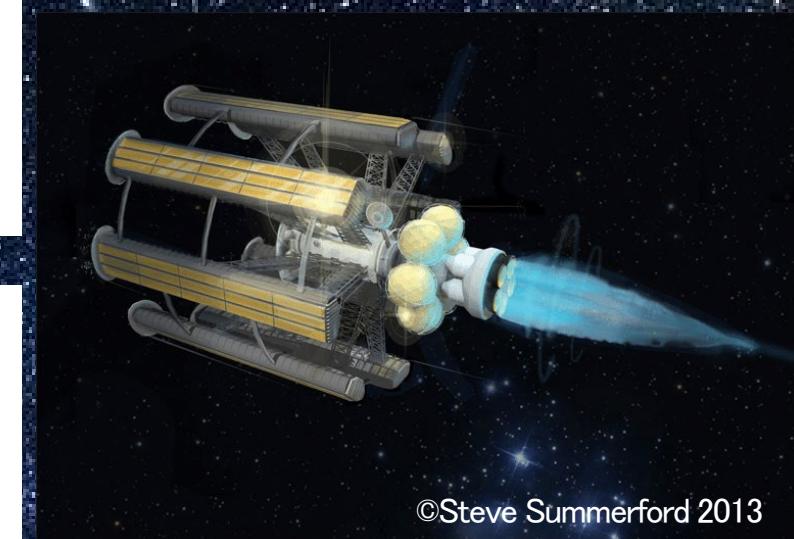
導入：銀河系恒星間有人探査で考えられる航法

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
- ・倫理的課題もあり。
- ・新生児を育てる・教育する仕組みも必要。



©Steve Summerford 2013

多世代恒星間宇宙旅行船のデザイン案

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。

→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人間学者J. Moore : 150–180人(2003年:Interstellar travel & multigenerational space ships:右図)

・地上での人間学研究から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人間学者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。

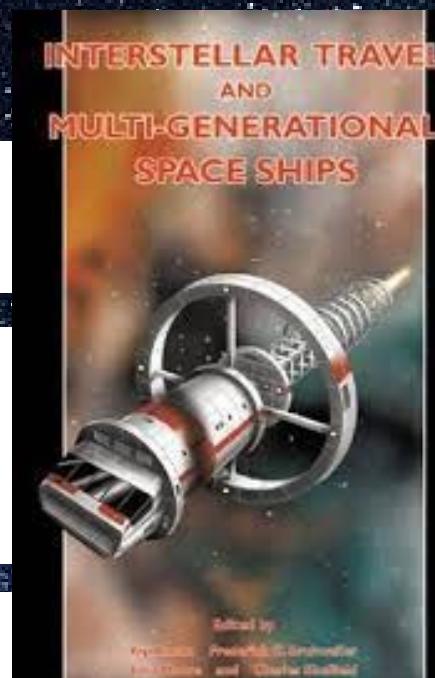
★課題:遺伝的多様度は考慮していない。

→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

Space and Society
Series Editor-in-Chief: Douglas A. Vakoch

Cameron M. Smith

Principles of Space Anthropology

Establishing a Science of Human Space Settlement

『宇宙人類学』という宇宙における人類の生物学的・文化的側面の総合的研究は、着手されたばかり。
“Principles of Space Anthropology: Establishing a science of Human Space Settlement”2019年出版
・本書の中では、宇宙での人類の生理学的变化、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、古代文明からの考察

宇宙での人類の生物的、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。

★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(進化のエンジン)率は高いため、進化速度は地上と異なる。

=> 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、ニーズに対応して、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世界で初めて数値的に推定

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、進化速度を世界で初めて数値的に推定し、

恒星間宇宙航行への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。

Springer

方法:遺伝的パラメータを使ったモンテカルロシミュレーション

- (1) 地上の人類学モデルを適用した人類学者Mooreの多世代宇宙航行の原則
- 初期搭乗員は若く、子供はない。～ポリネシアの事例から～
 - 遺伝的多様度の観点から出産時期は年齢遅めの段階

(2) 数理生物モデル

- ①分子進化の中立説, Kimura(1969)

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



Kimura

- ② 文化進化モデル, Henric (2004)

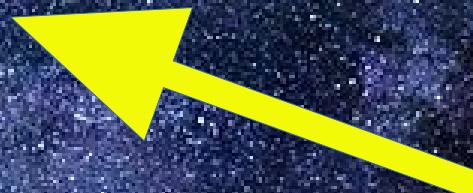
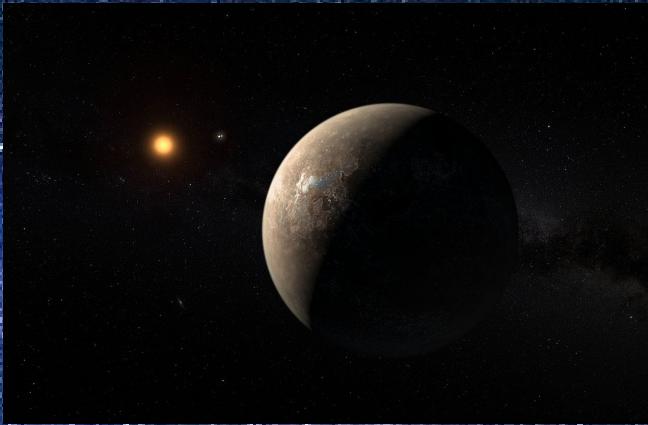
$$f(z) = \frac{1}{\beta} \exp \left[\frac{-z - z_{max} + \alpha}{\beta} \right] \exp \left\{ - \exp \left[\frac{-z - z_{max} + \alpha}{\beta} \right] \right\}$$

=>これらは人類学的遺伝解析で一般的に使われている。



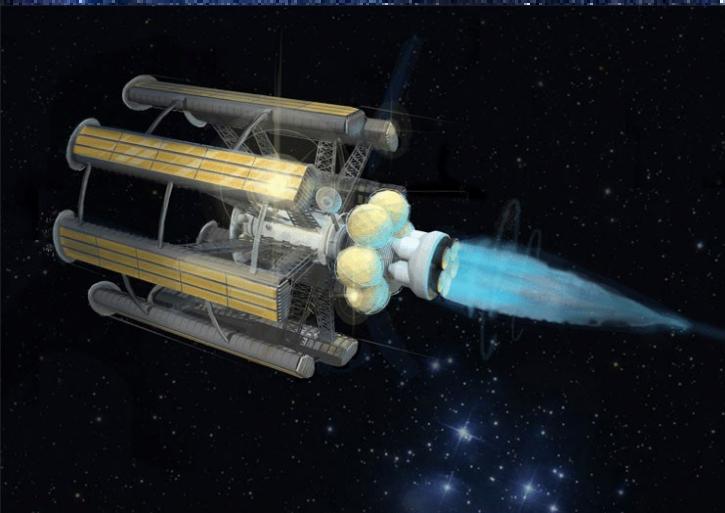
J. Henrich

方法: 世代間恒星間宇宙船シミュレーションの対象



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



- ・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。

宇宙航行の成功判定基準

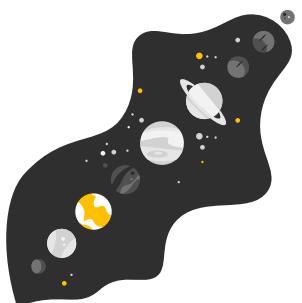
搭乗員数を変えながら、各パラメーターごとに100回のシミュレーションを実施

パラメーター例: 一人当たりの平均出産数、出産時期、不妊率、
初期搭乗員の遺伝的多様性 など

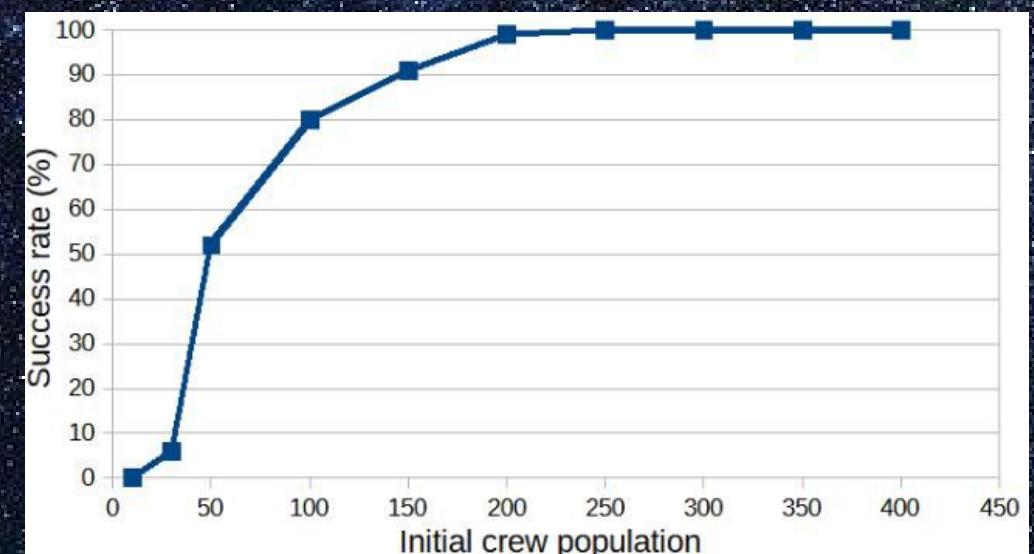
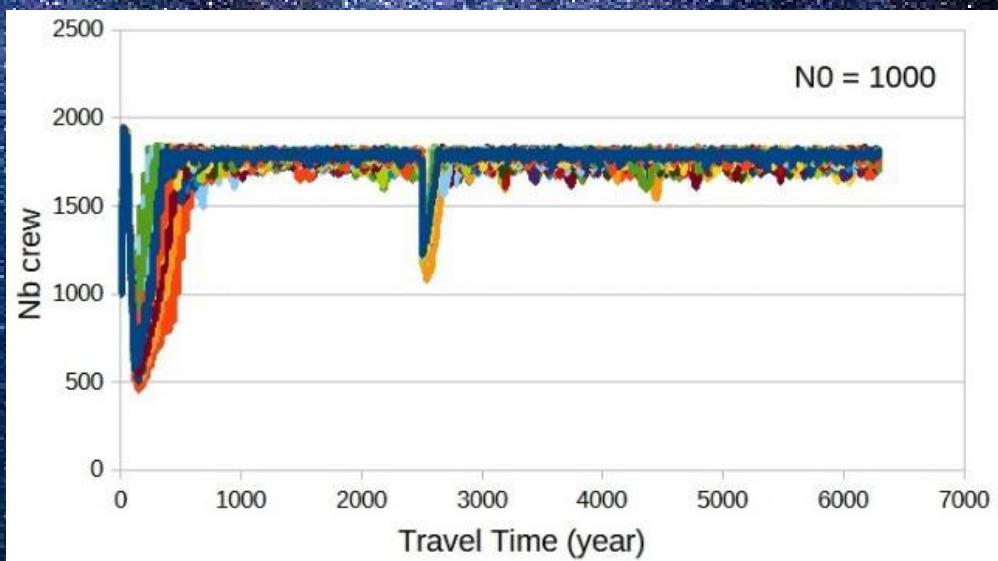
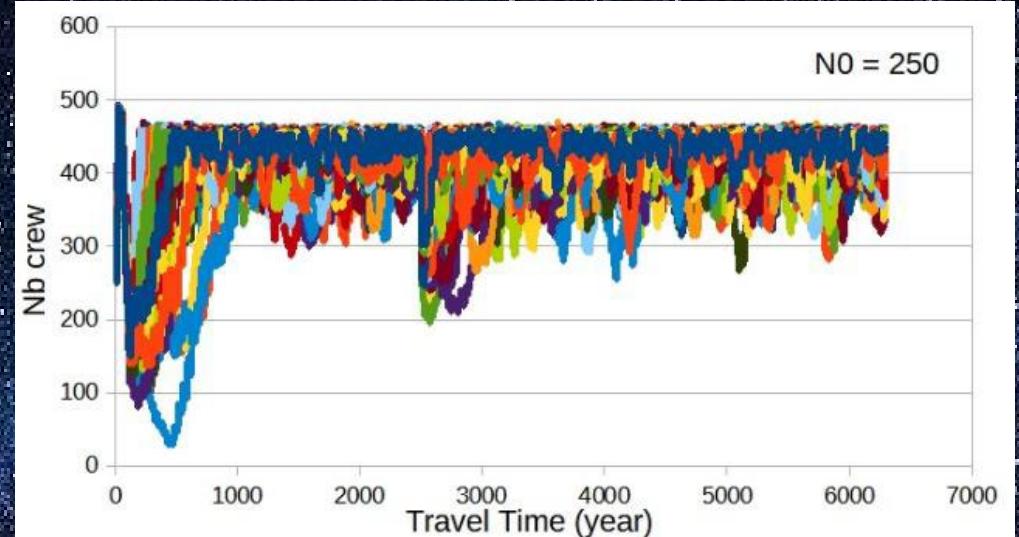
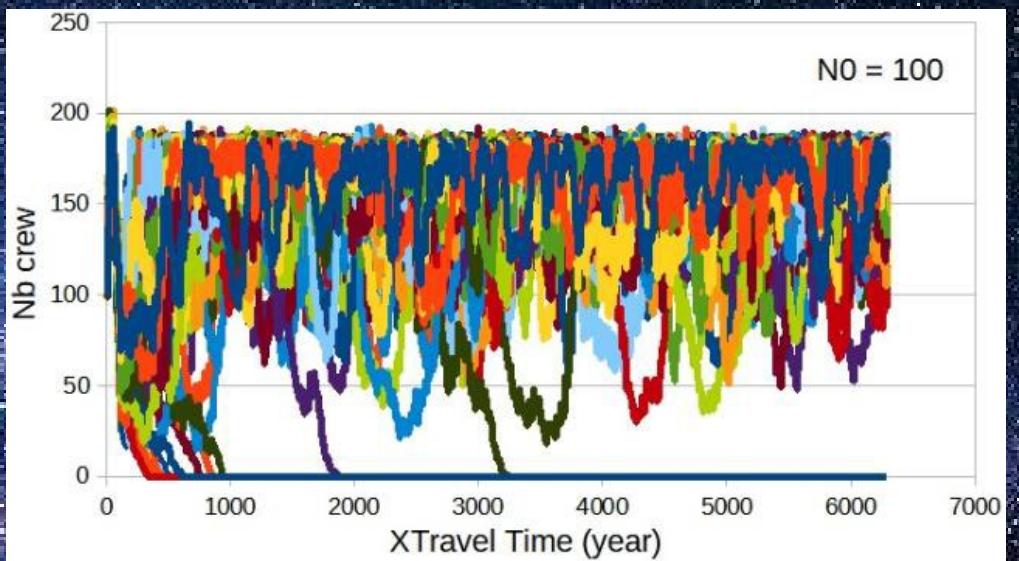
100回のシミュレーションを行い、以下の基準で成功率100%となる搭乗員数を適切な搭乗員数とした。

- 6300年後(到着時)、集団が存在しているか
- 6300年後(到着時)、遺伝的多様度が保たれているか
- 6300年度(到着時)、文化・技術レベルが維持されているか

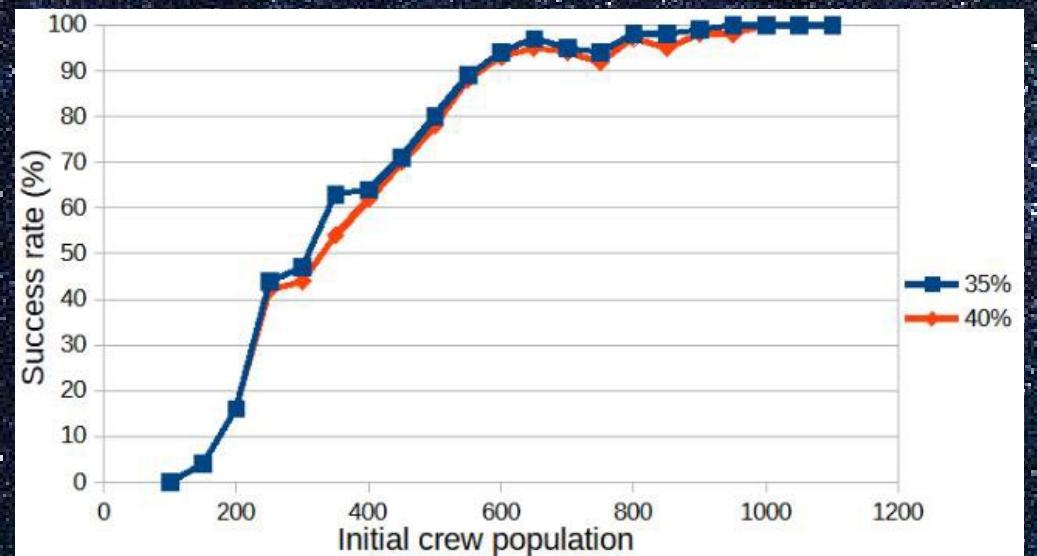
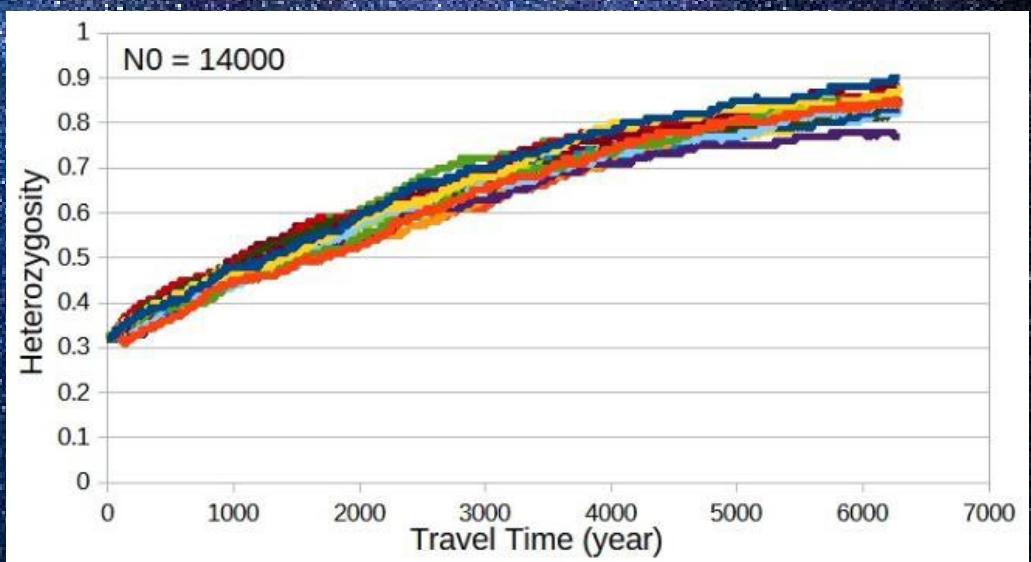
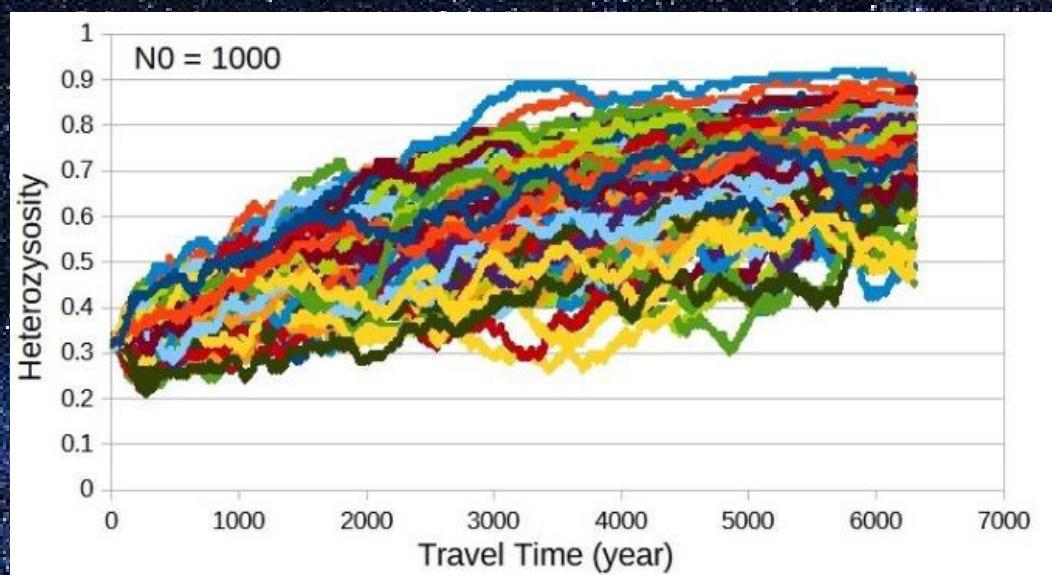
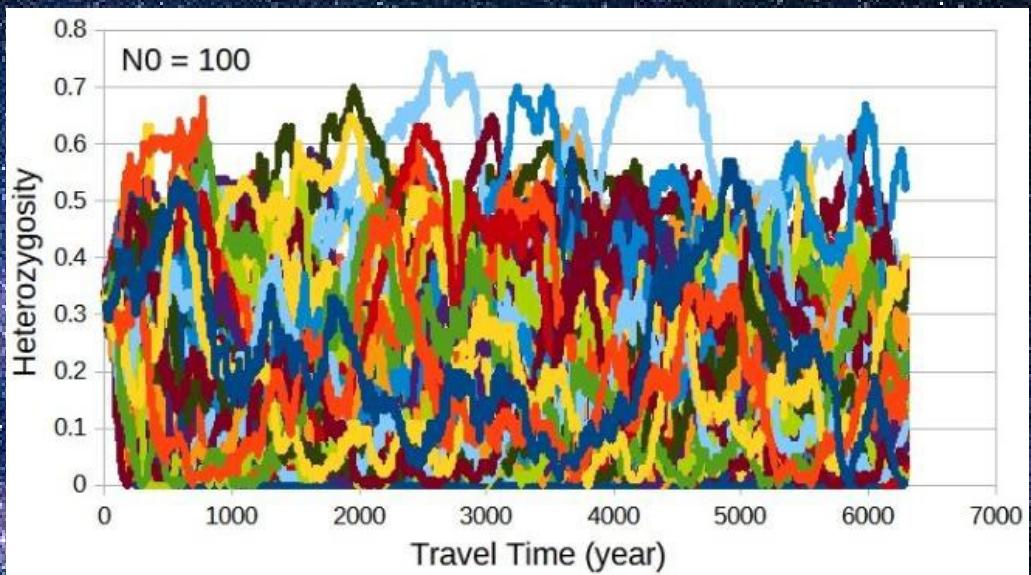
進化速度: 6300年間(宇宙航行の間)の遺伝子固定の回数
(新規突然変異遺伝子が集団内で100%になった頻度)



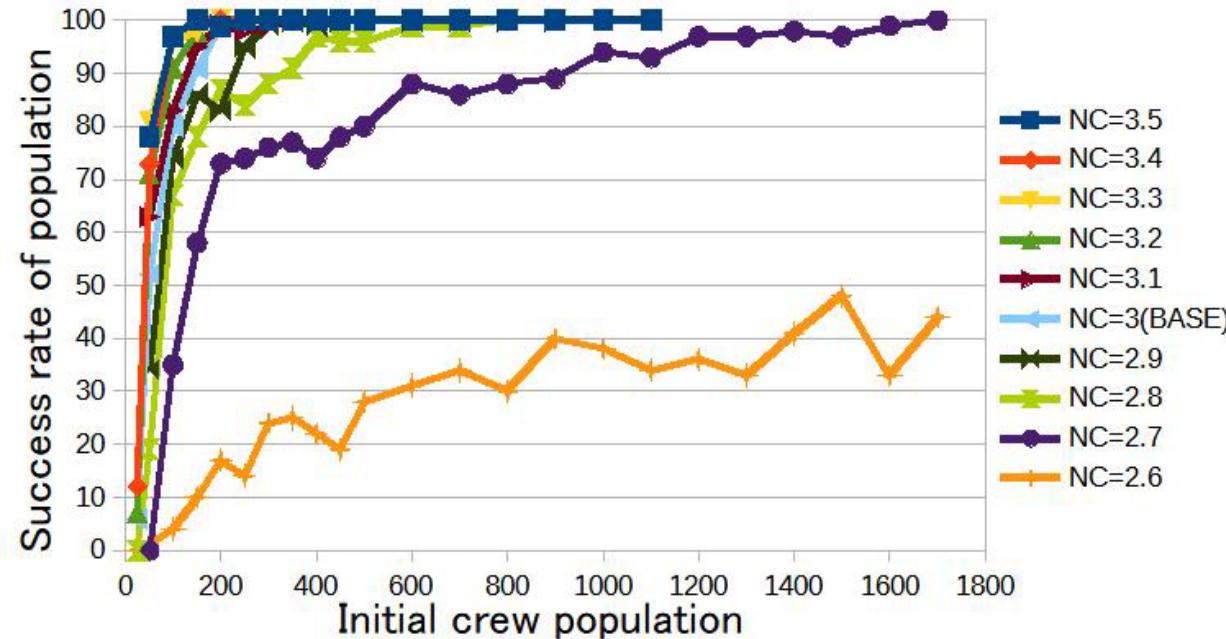
結果例：集団の存続



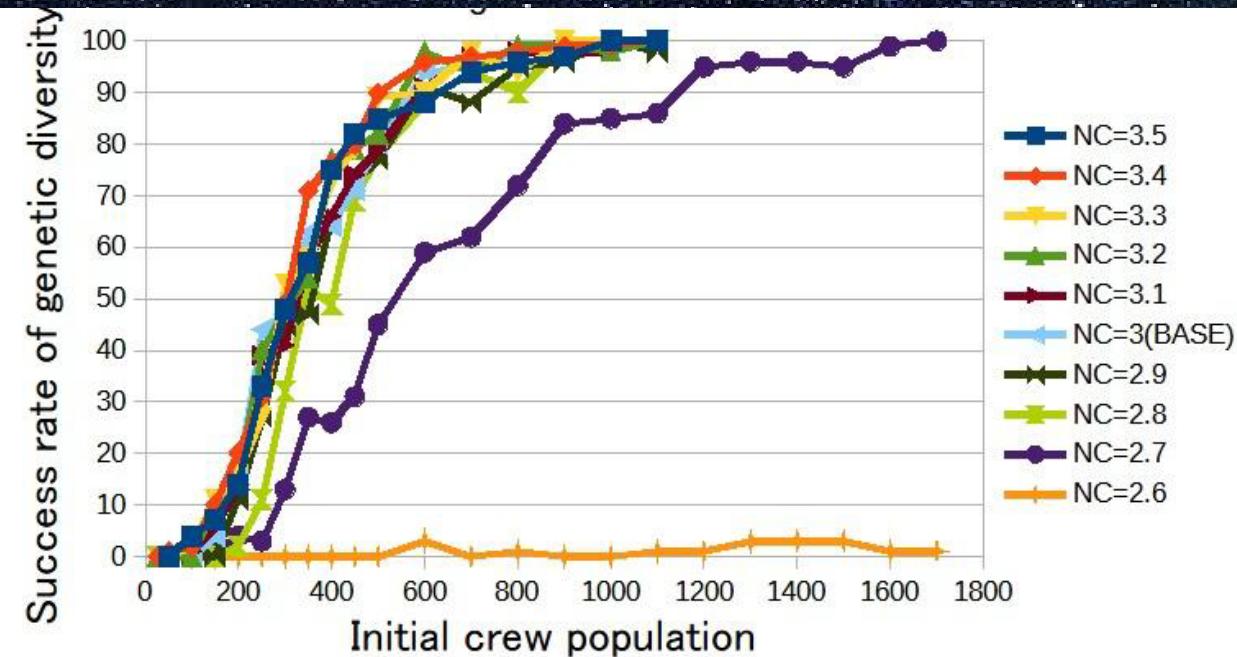
結果例：遺伝的多様度の維持



Case A(一人あたりの出産数を変動, 2.6–3.5)



a) 集団維持の成功率

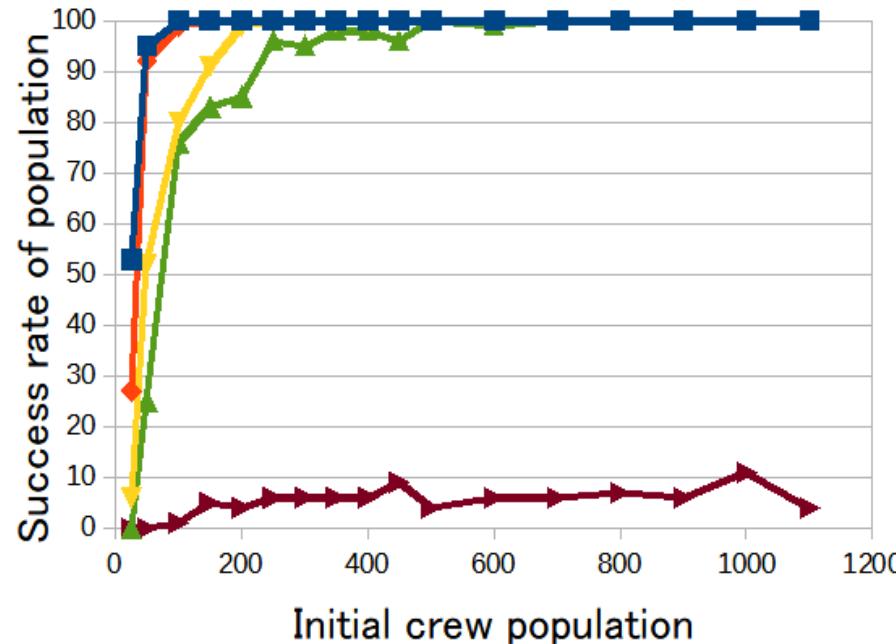


b) 遺伝的多様度維持の成功率

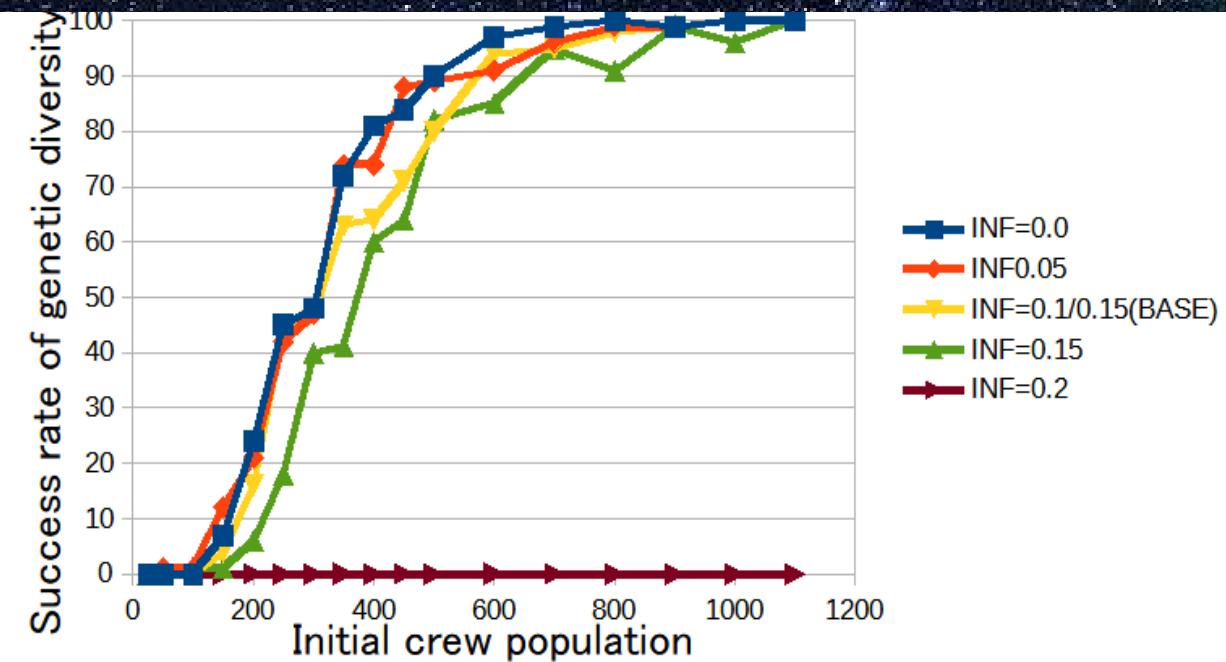
出産率が 2.6より小さいと、宇宙航行成功率は100%に達しない。

出産率 2.6 と2.7で結果が大きく変わる。→ 出産率のマネジメントはクリティカル

Case C(赴任率:0-0.2)



a) 集団維持の成功率



b) 遺伝的多様度維持の成功率

不妊率が 0.2 より大きいと、宇宙航行成功率は 100% に達しない、

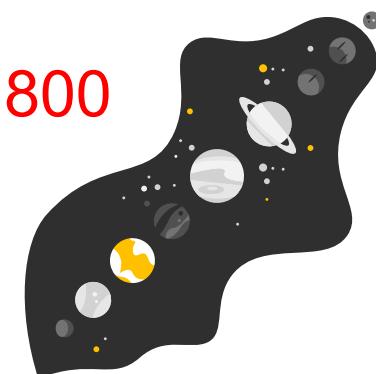
不妊率が 0.15 と 0.2 の間で大きな差がある。→ 不妊率のマネジメントもクリティカル

サマリー: Case A—E for Minimum Population Size

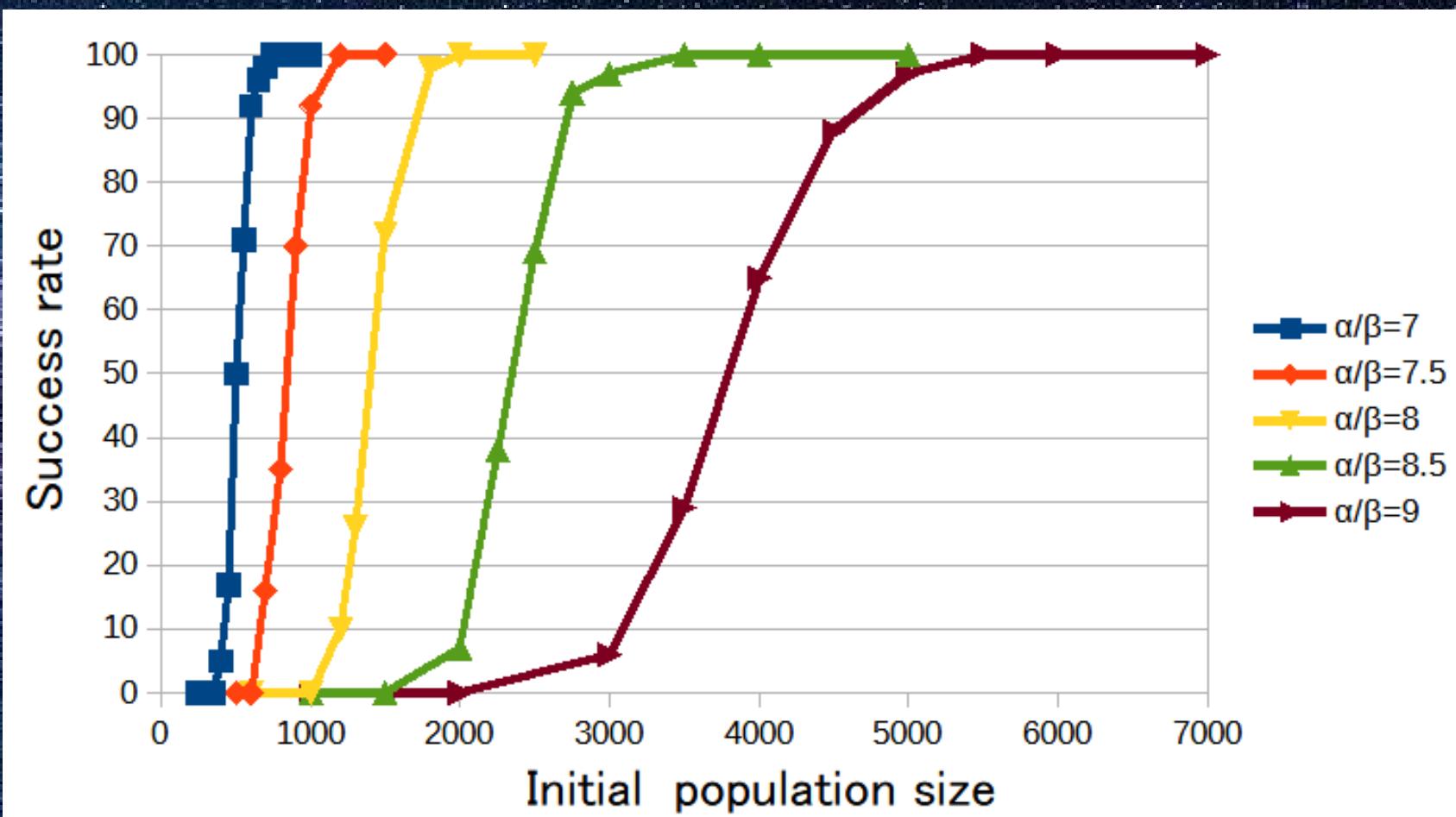
Parameter	Range	Population	Genetic diversity
A: Birth rate	(2.6–3.5)	300–3,400	1,800–3,400
B: Procreation start age	(20–32)	500–600	2,000–3,000
C: Infertility	(0–0.2)	200–1,000	1,600–2,200
D: Initial genetic diversity	(0.095–0.5)	500–600	1,400–2,600
E: Mutation rate	(5– 200 times)	400–600	1,400–6,800
Including the above		200–3,400	1,400–6,800

今回の結果: 遺伝的多様性を維持するために必要な最小搭乗員数は **1,400-6,800**

また、出産率と不妊率のマネジメントはクリティカル



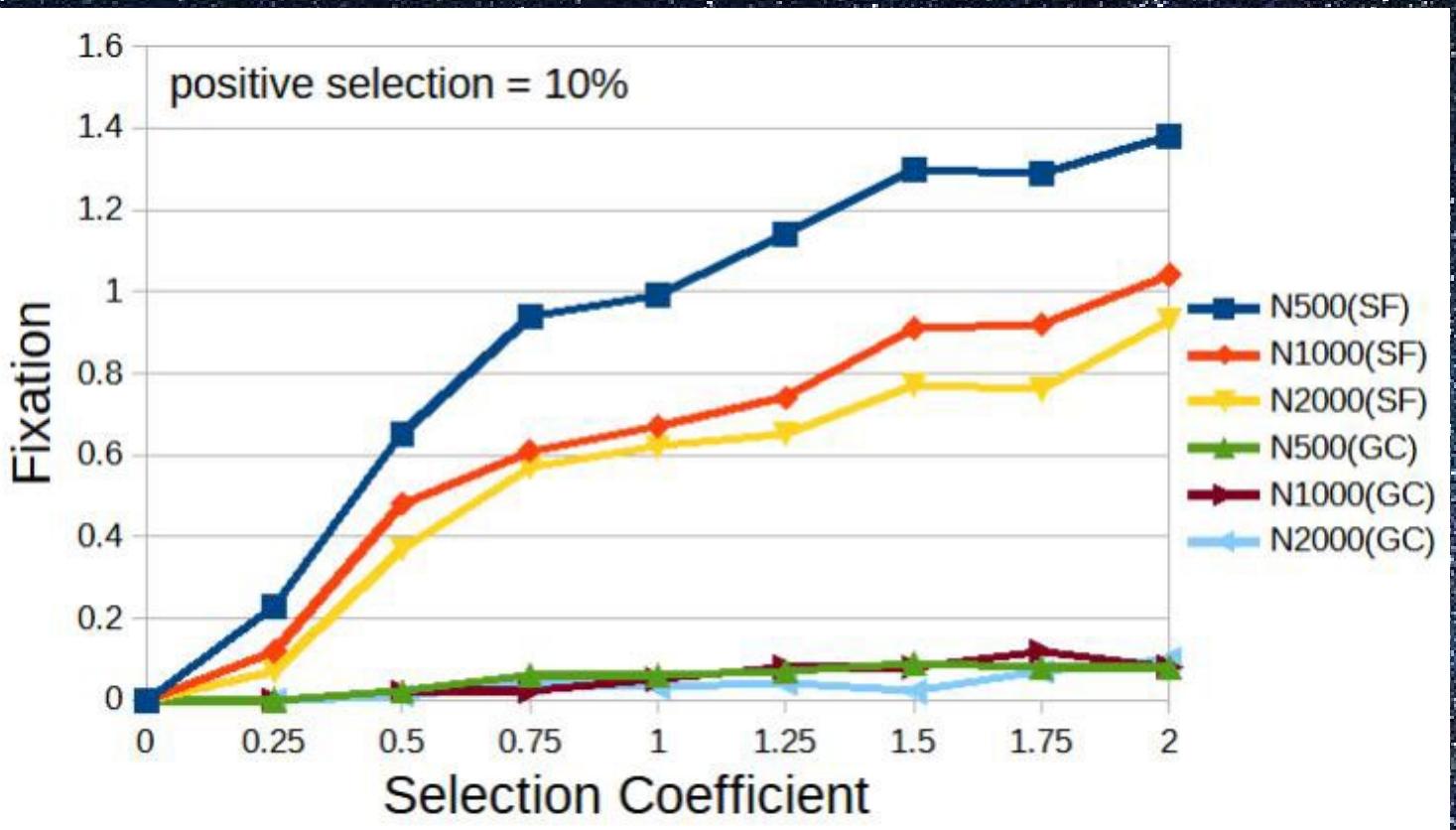
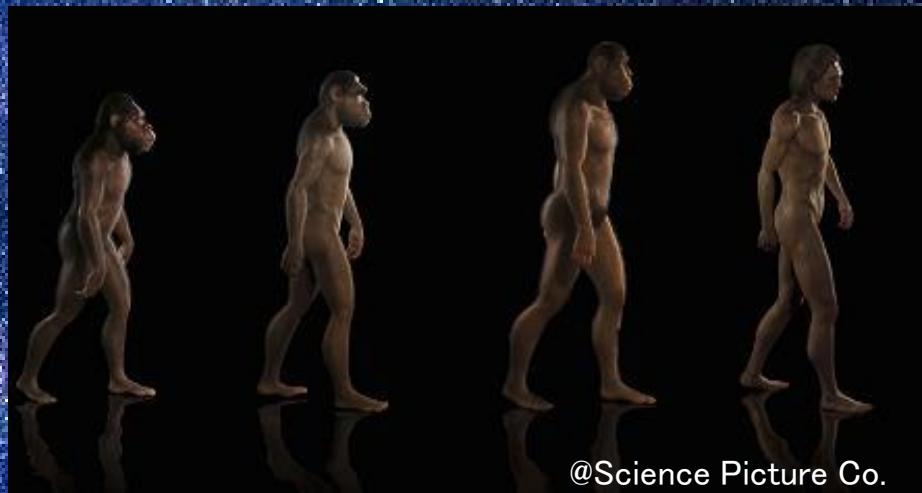
文化・技術維持に必要な搭乗員数



最小搭乗員数：

500 (1,000 船内搭乗員数):簡易技術 -5,500 (11,000 船内搭乗員数)：難技術

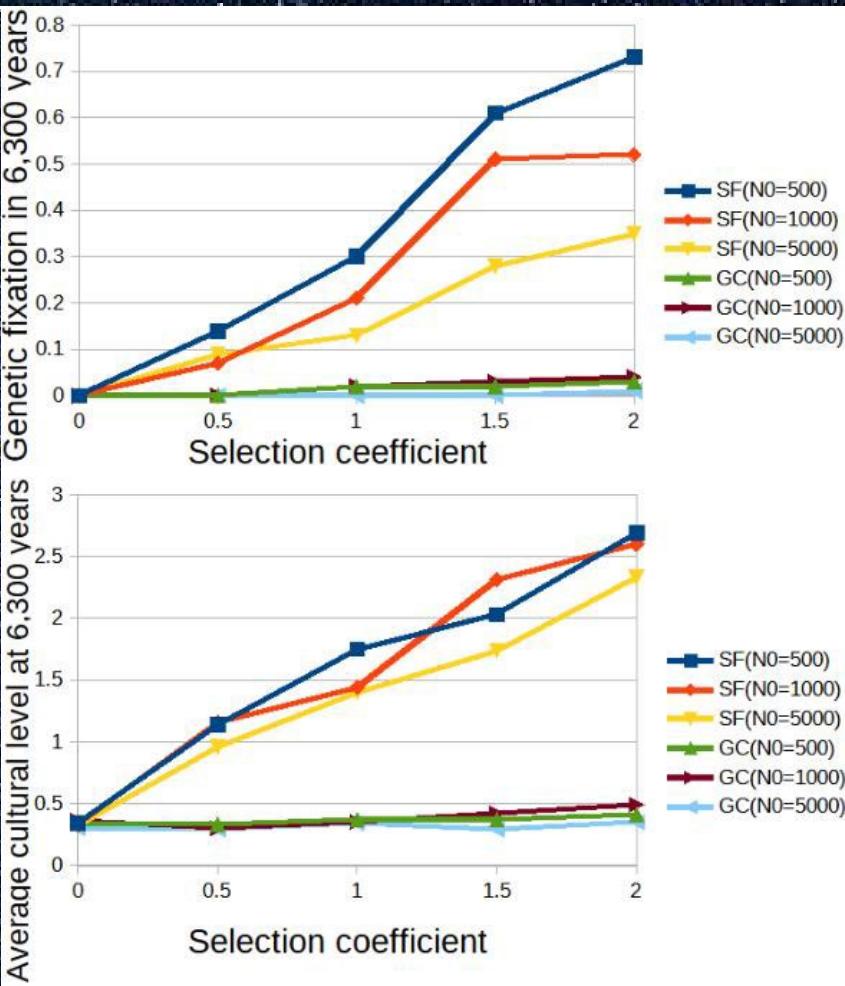
遺伝的進化速度



- 中立な突然変異では、進化速度は地上と変わらない
- 正の自然淘汰では、遺伝的進化速度は地上の10倍
(宇宙での突然変異率が地上の100倍の時)

遺伝子と文化の共進化

GENE
CULTURE



-正の淘汰の場合、文化進化率は地上の5倍
(遺伝子進化速度が地球の10倍の時)

結論

本研究により **世界で初めて** 宇宙移住で遺伝的多様度を保つために必要な搭乗員数(集団サイズ)を遺伝学的に勘案し、提示できた。

最小集団サイズ

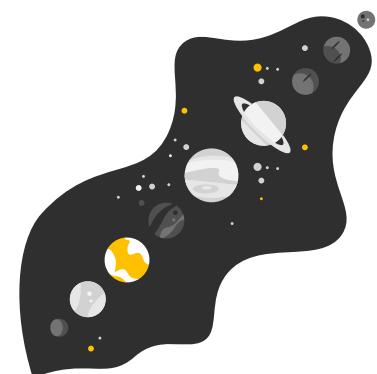
- 遺伝的多様度を保つために必要な集団サイズ: **1,400–6,800**
(先行研究では、遺伝学モデルを十分に考慮せず、150–180 or 11,000–44,000)
- 文化・技術を保つために必要な集団サイズ: **1,000–11,000**
(これまで宇宙移住での文化・技術を維持するために集団サイズの研究は**世界初**)

クリティカルなパラメーター

- **平均出産数、不妊率**

進化速度

- 遺伝的進化速度: 地上の**10倍**(正の淘汰の場合)
- 文化的進化速度: 地上の **5倍**(正の淘汰の場合)



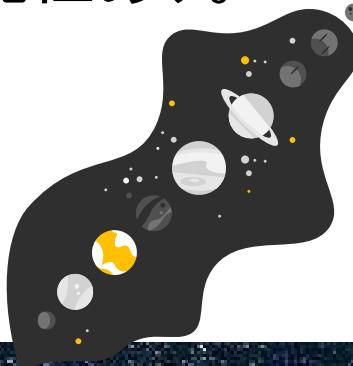
Discussion

恒星間航行の前にISSや月・火星探査で以下の実証が大切

- 長期宇宙滞在による**宇宙放射線**の人体への影響
- 無重力などの宇宙環境**による生物進化への影響
- 宇宙における**遺伝子と文化の共進化**
- どんな文化モデル、政治モデル、教育モデルが宇宙移住に適切か



- ヒトゲノムの遺伝データは、出アフリカなどの新しい環境に人間が出るとき、正の淘汰が働いていたことを示している。
- ISSのバクテリアなどの世代交代の実験で無重力に適応した正の淘汰が確認されている。
=>**宇宙という新しい環境に適応し、遺伝的進化が加速する可能性を示唆。**
=> 宇宙への地球生命の進出(出地球)は、**進化のビッグバン**をもたらす可能性あり。
- 地上での食文化と消化遺伝子のような、遺伝子と文化の共進化が
宇宙では加速する可能性がある。



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：これまでの人類学（遺伝人類学、形態人類学、文化人類学、…）（出アフリカ）
- ・どこへ行くのか：これまでの知見を生かした新しい人類学：宇宙人類学、…（出地球）



British
Interplanetary
Society

From Imagination to Reality

詳細を知りたい方はこちらから

- Journal of British Interplanetary Society, Vol.74, 243–251 (2021), S. Sano
- Journal of British Interplanetary Society, Vol.74, 419–426 (2021), S. Sano
- Journal of British Interplanetary Society, Vol.75, 118–126 (2022), S. Sano
- Journal of British Interplanetary Society, Vol.76, 288–296 (2023), S. Sano

ご清聴ありがとうございました！

