

クレジット:

UTokyo Online Education 東京大学朝日講座 2018 田近英一

ライセンス:

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。



地球惑星環境と生命

東京大学理学部地球惑星環境学科
東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

田近 英一

1. 生命の「居場所」＝惑星環境をめぐる問題

生命の居場所＝惑星環境 変動・進化する



生命は？

地球画像：

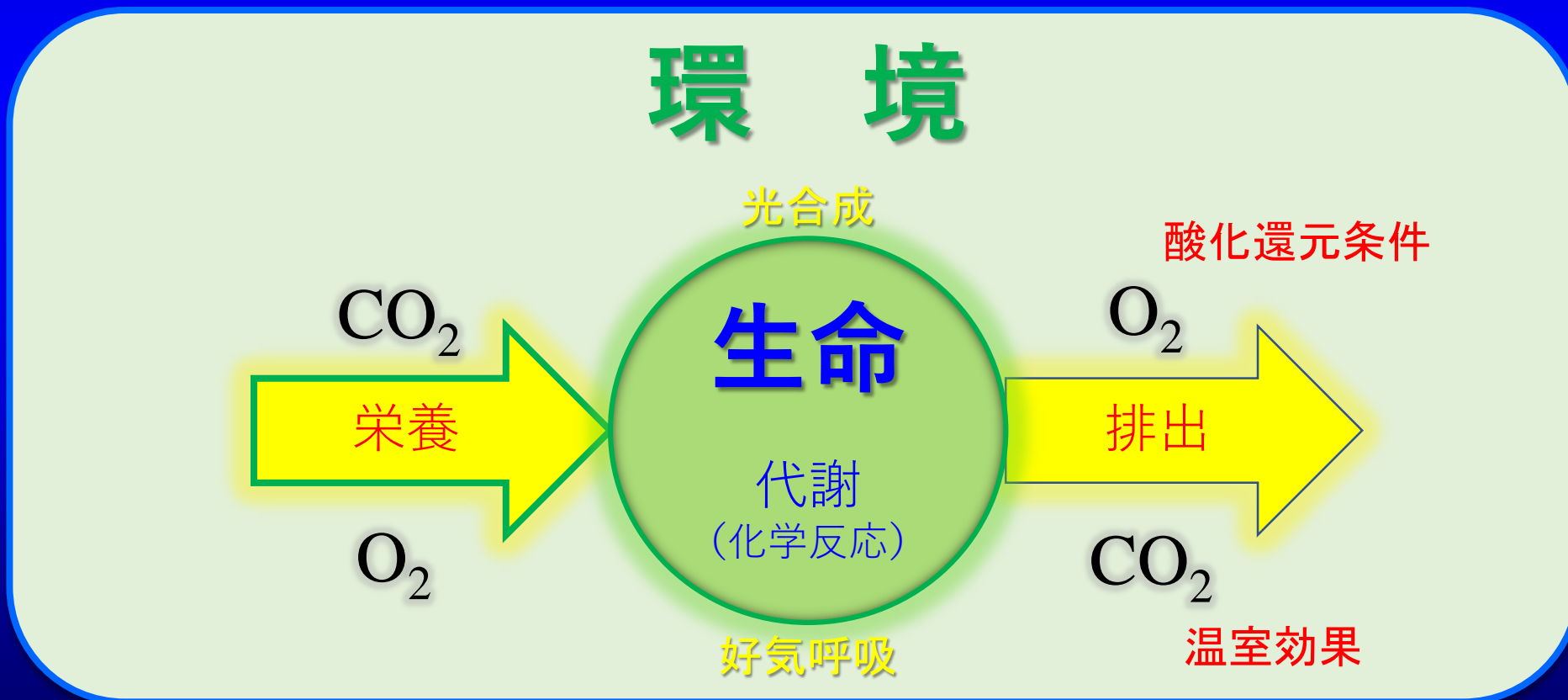
<https://www.nasa.gov/topics/earth/overview/index.html>

環境(居場所)変化 → 生命に影響
絶滅／適応進化

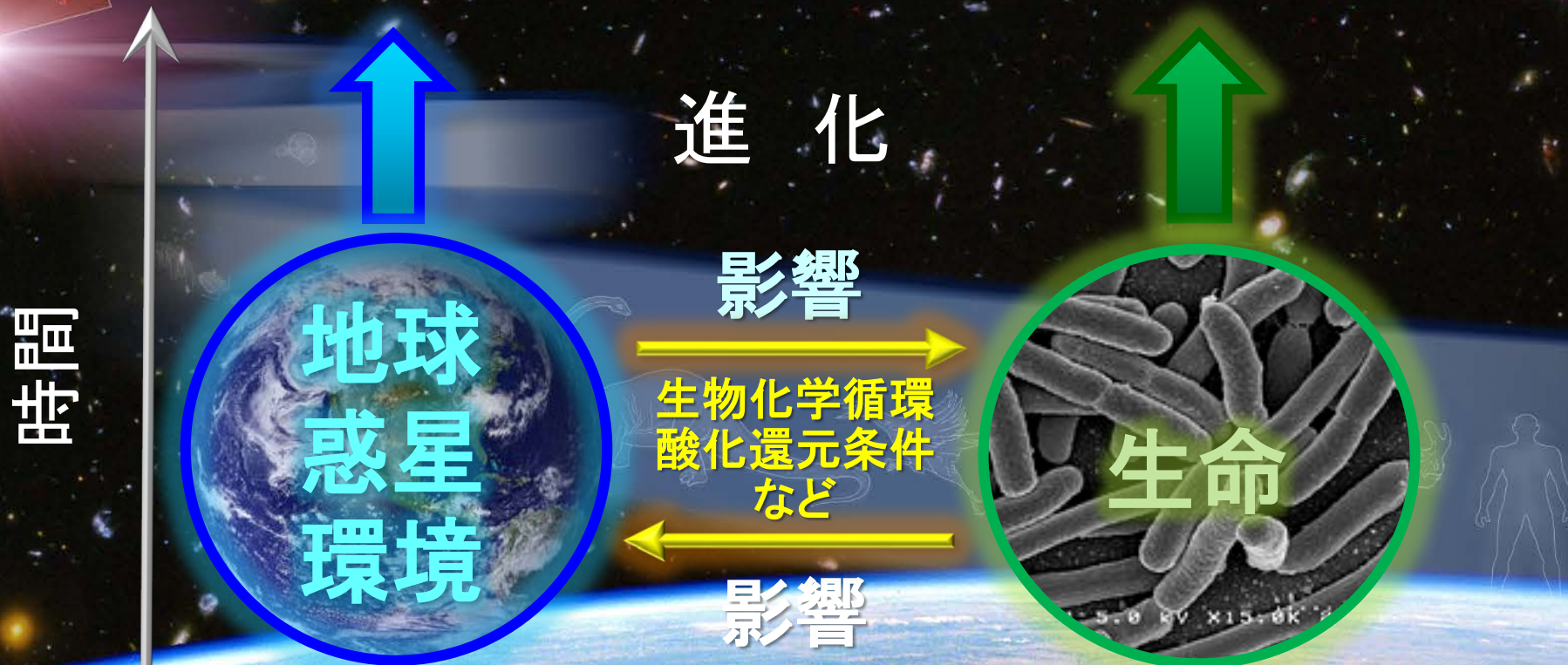
生命活動 → 環境(居場所)に影響
環境変動／環境進化

生命と環境

環境から物質を取り込んで代謝して排出



地球惑星環境と生命の“共進化”



地球画像: <https://www.nasa.gov/topics/earth/overview/index.html>

微生物画像: <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A7%E8%85%B8%E8%8F%8C>

2. ハビタブル(生命居住可能)惑星の条件

ハビタビリティ(生命の居住可能性)

■生命の生存の必須条件

これまで知られている地球上のすべての生命は、
液体の水が必要不可欠 栄養, エネルギー, ...

■液体状態の水が存在する惑星(=地球)

= 水惑星

≈ ハビタブルプラネット (生命居住可能惑星)

→ 水惑星の存在条件は？

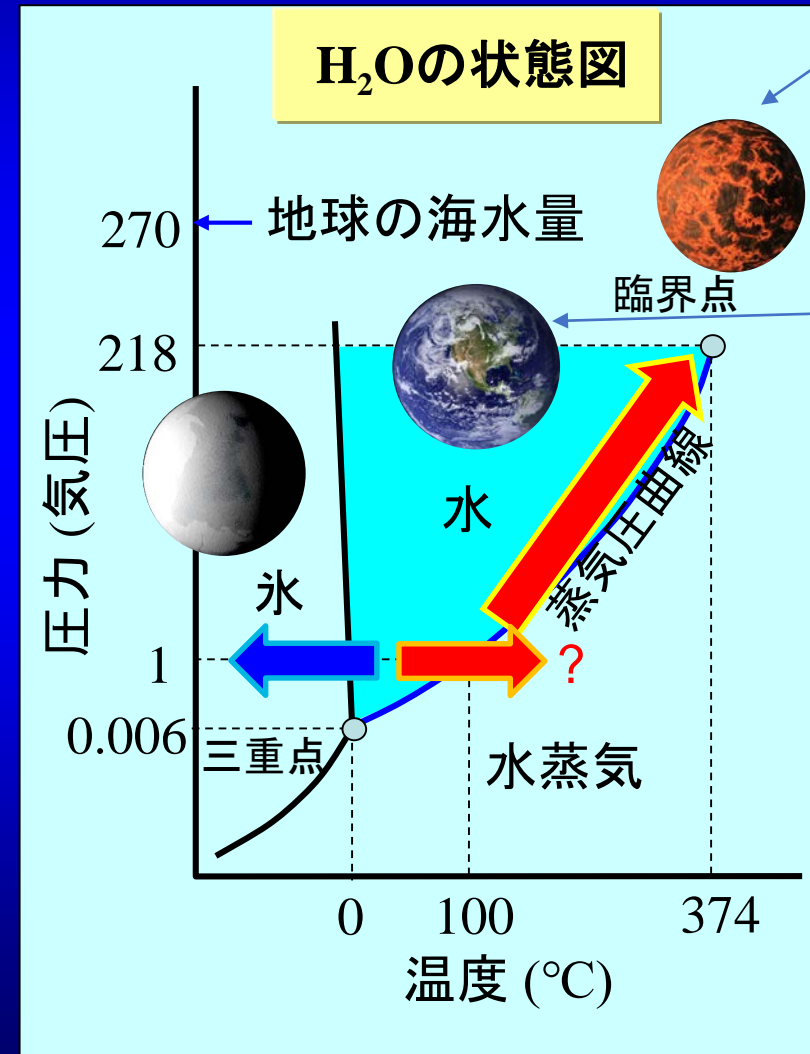
液体の水(海)の存在条件

■ 温度圧力条件

三重点 < 温度・圧力 < 臨界点

■ 条件を満たさない場合

- 1) 海が蒸発してしまう
暴走温室状態
- 2) 海が凍結してしまう
全球凍結状態



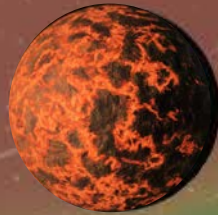
暴走温室惑星画像：
https://exoplanets.nasa.gov/multimedia/exoplanets/?page=0&per_page=25&order=pub_date+desc%2C+id+desc&search=&category=119%3A174&item_id=

地球画像：<https://www.nasa.gov/topics/earth/overview/index.html>

ハビタブルゾーン Habitable Zone

海は蒸発
(暴走温室条件)

TOO HOT



https://exoplanets.nasa.gov/multimedia/exoplanets/?page=0&per_page=25&order=pub_date+desc%2C+id+desc&search=&category=119%3A174&item_id=

JUST RIGHT



海は凍結
(全球凍結条件)

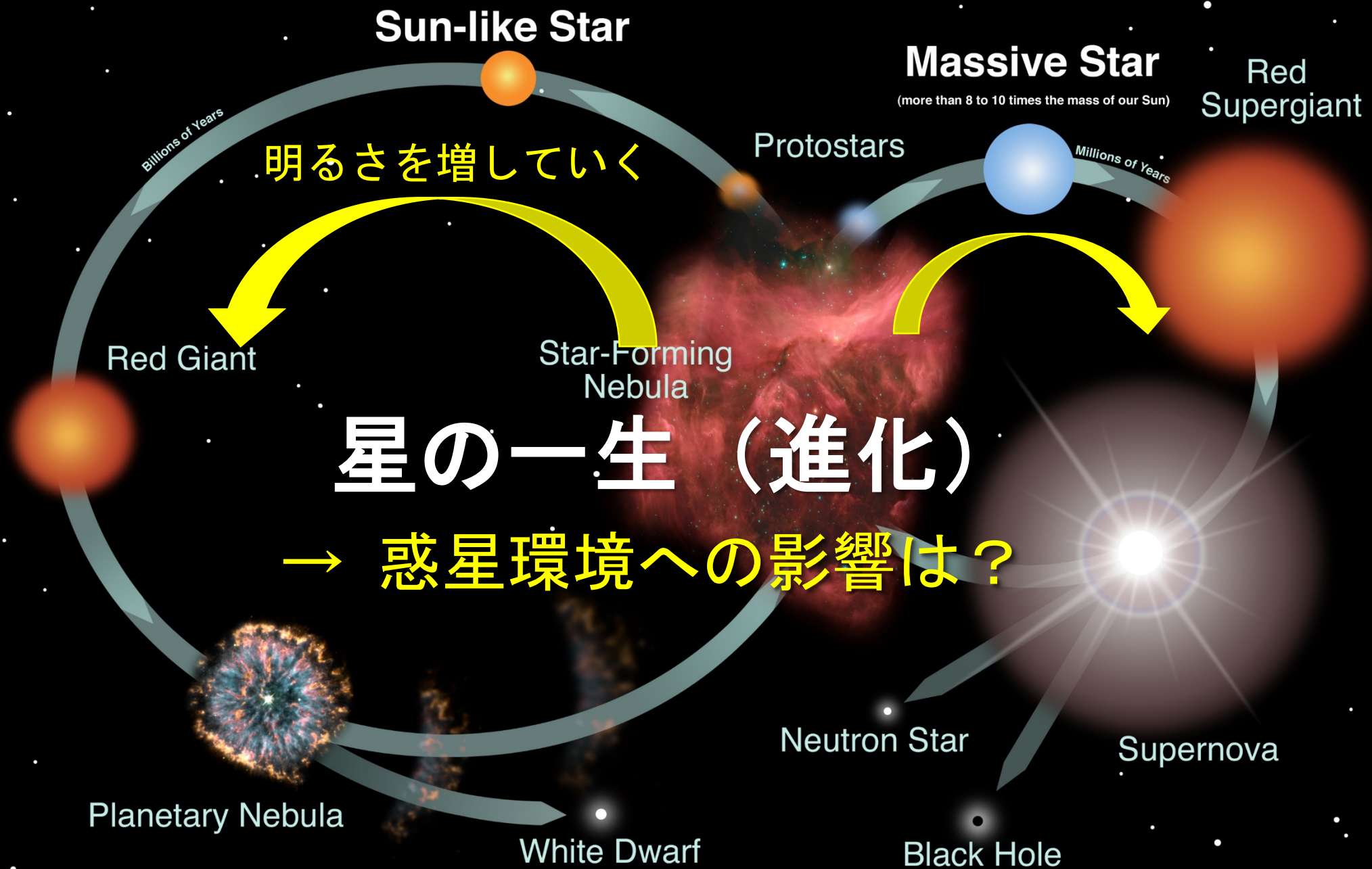
TOO COLD



Planet size: 1-2x Earth

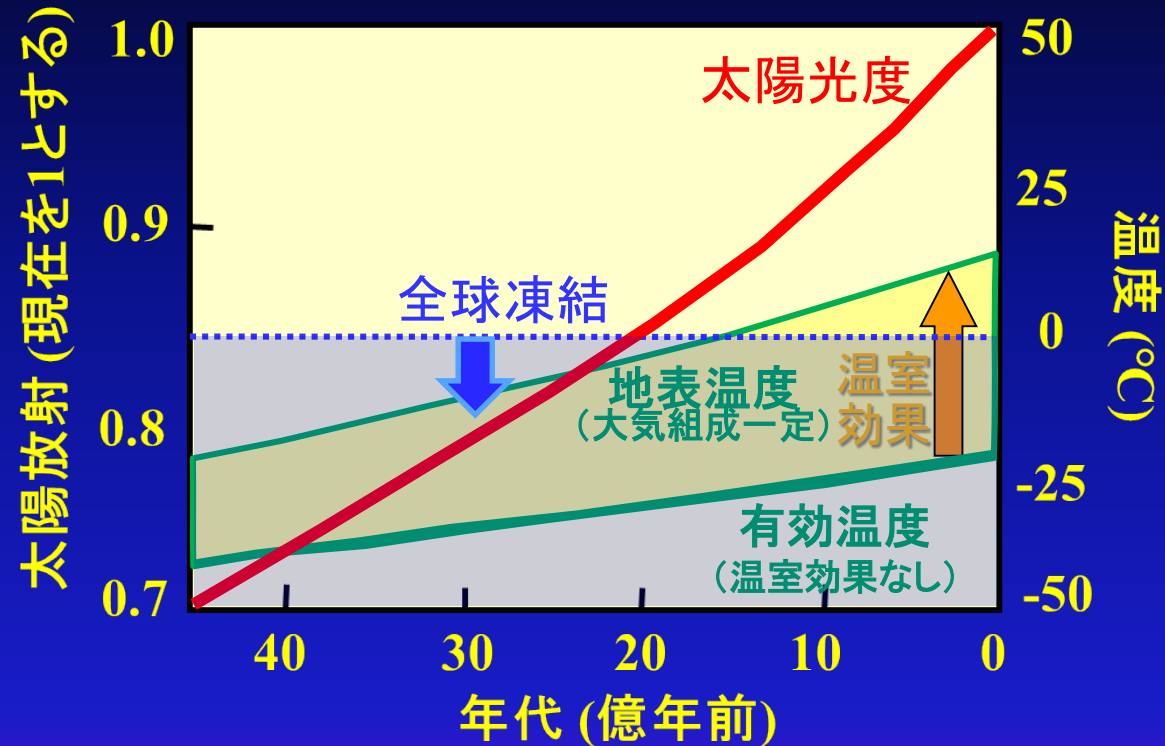
[<https://exoplanets.nasa.gov/the-search-for-life/habitable-zones/>]

3. 太陽進化と地球環境の進化



暗い太陽のパラドックス

[e.g., Sagan and Mullen (1972) *Science*]

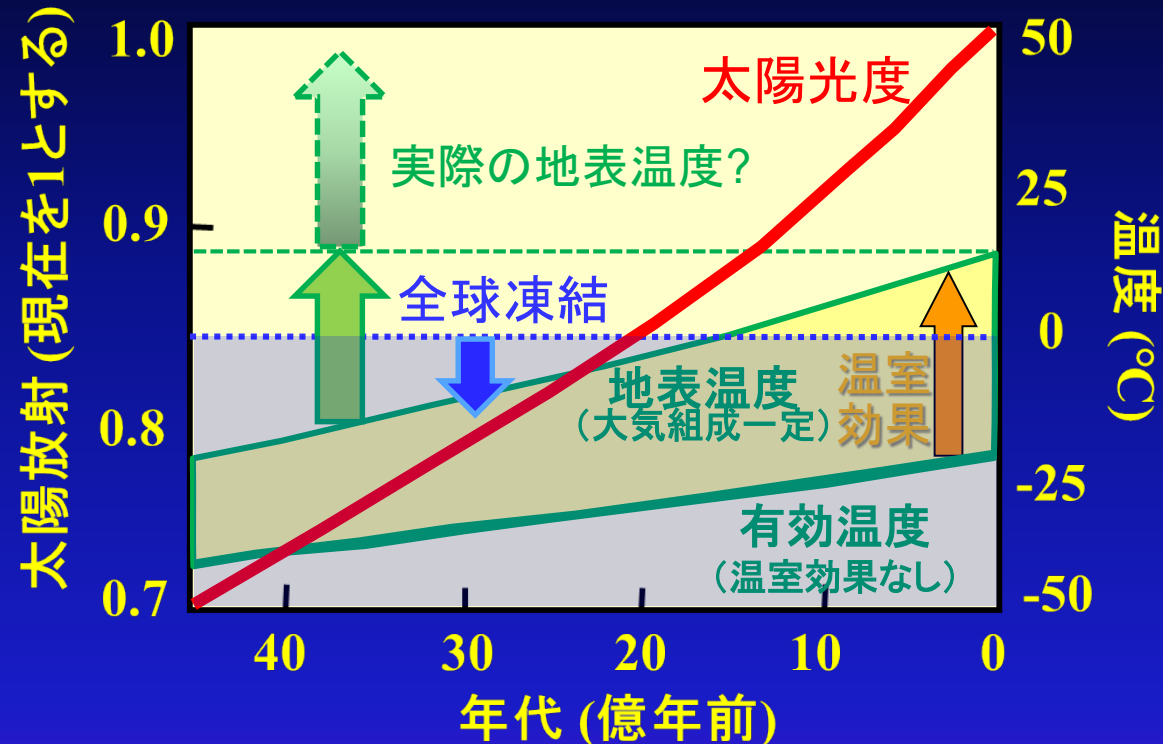


Carl Sagan and George Mullen, "Earth and Mars : Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures," *Science New Series*, Vol. 177, No. 4043 (Jul. 7, 1972), pp. 52-56. Fig. 1. (<http://science.sciencemag.org/content/177/4043/52>)

* 太陽光度は時間的に増大してきた

暗い太陽のパラドックス

[e.g., Sagan and Mullen (1972) *Science*]



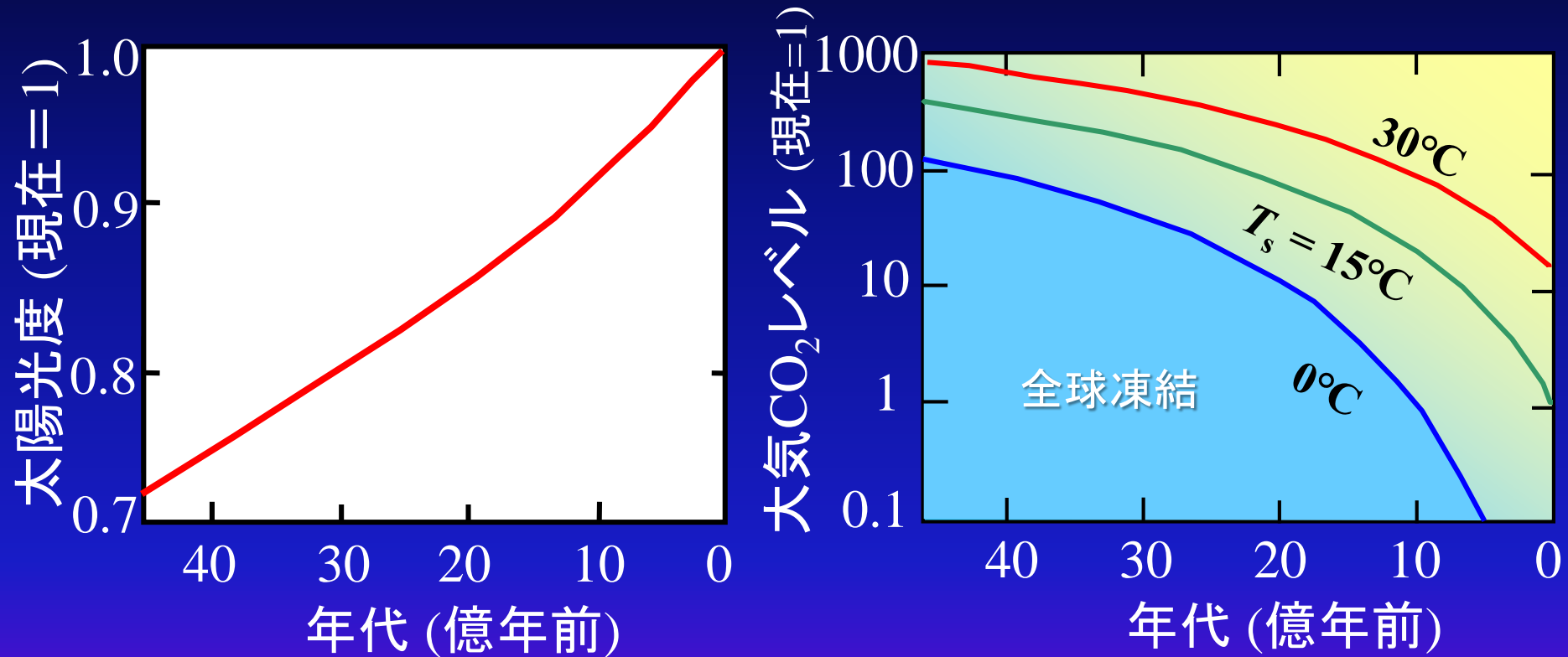
Carl Sagan and George Mullen, "Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures," *Science New Series*, Vol. 177, No. 4043 (Jul. 7, 1972), pp. 52-56. Fig. 1. (<http://science.sciencemag.org/content/177/4043/52>)

- * 太陽光度は時間的に増大してきた
もし大気組成(と惑星アルベド)が現在と同じならば
→ 約20億年前以前は全球凍結していたことになる!?

* しかし, 30億年前以前の海水温は60°Cを越える高温環境だった!

矛盾?

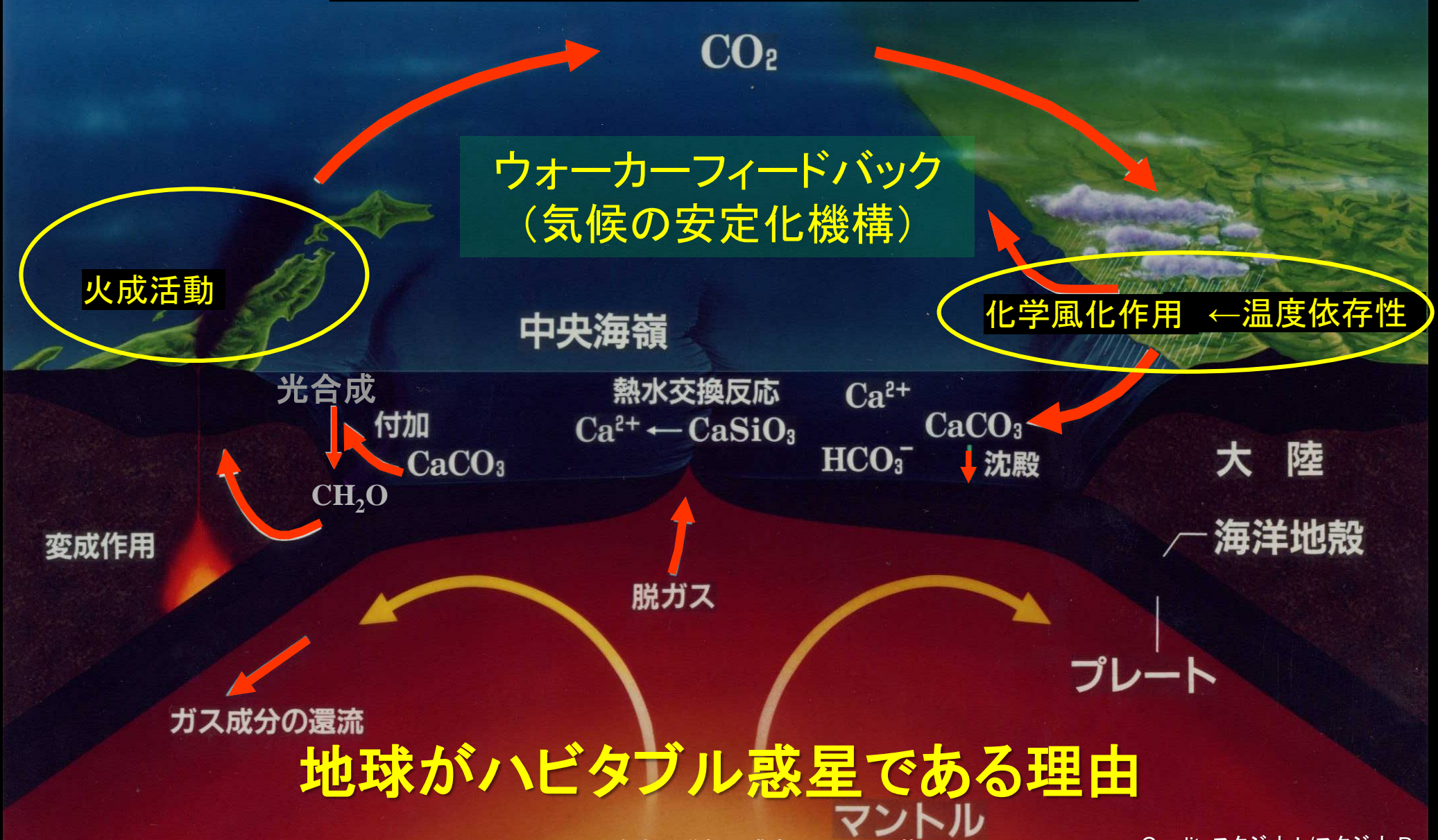
二酸化炭素の温室効果によって解決？




過去の地球大気は二酸化炭素濃度が高かった

→ 太阳光度の増大に合わせて都合良く減少してきたのか？

長期的な炭素循環



地球がハビタブル惑星である理由



火成活動(CO₂の供給)=惑星自身の活動が
長期的な炭素循環と気候の安定性を支えている

Pyroclastic flows at Mayon Volcano, Philippines, 1984.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pyroclastic_flows_at_Mayon_Volcano.jpg

Credit: U.S. Geological Survey/photo by C.G. Newhall

太陽進化と地球環境進化

■地球と生命圏の一生



<https://www.nasa.gov/topics/earth/overview/index.html>



<https://exoplanets.nasa.gov/resources/92/exoplanet-is-extremely-hot-and-incredibly-close-artists-concept/>

暴走温室状態

■太陽の一生

ゆっくりと増光

現在

ゆっくりと増光

赤色巨星

惑星状星雲

白色矮星

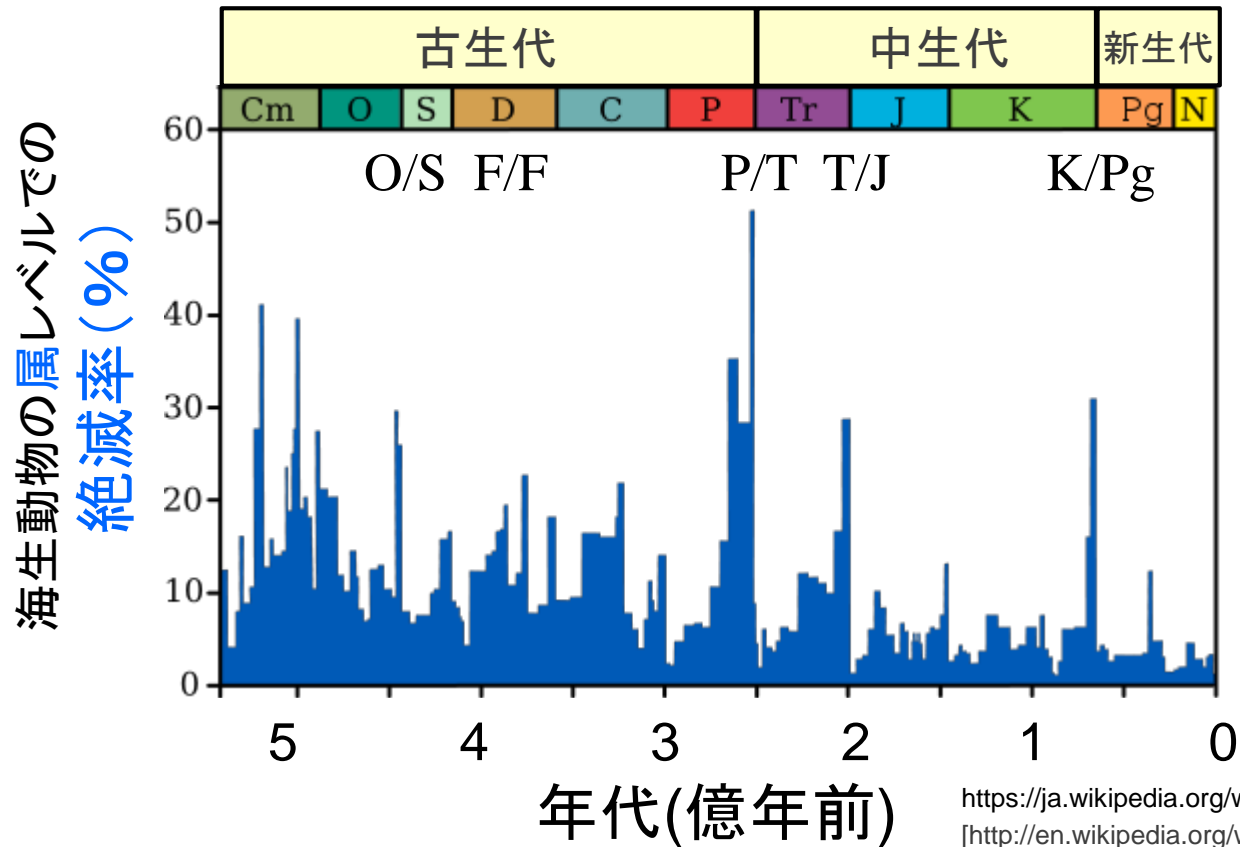


[Credit: Tablizer GFDL, CC-BY-SA 2.5, CC-BY-SA 2.0, CC-BY-SA 1.0]

地球と生命の一生はどのように決まっているのか？
地球と生命はこれからどうなるのか？

4. 酸素と生命の共進化史

生物の大量絶滅



地質年代境界＝生物の大量絶滅

→ 破局的な地球環境変動が生じた？

“海洋無酸素イベント”の発生

白亜紀/古第三紀 (K/Pg) 境界衝突イベント

約6,600万年前



<https://www.space.com/22880-life-from-space-panspermia-possibility.html>

<http://discovermagazine.com/2015/oct/18-in-line-of-fire>

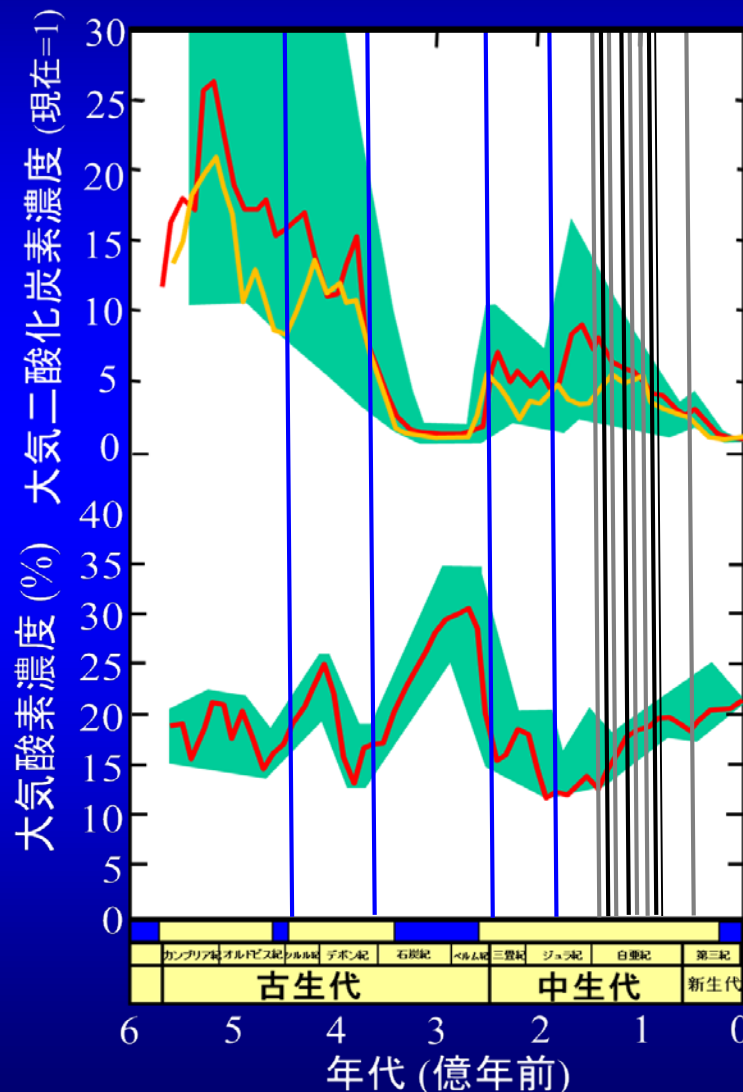
<https://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/276770/051300012/>

顕生代で生じた海洋無酸素イベント

(Ocean Anoxic Events; OAEs)



海洋無酸素イベント時の地層
(約9500万年前)



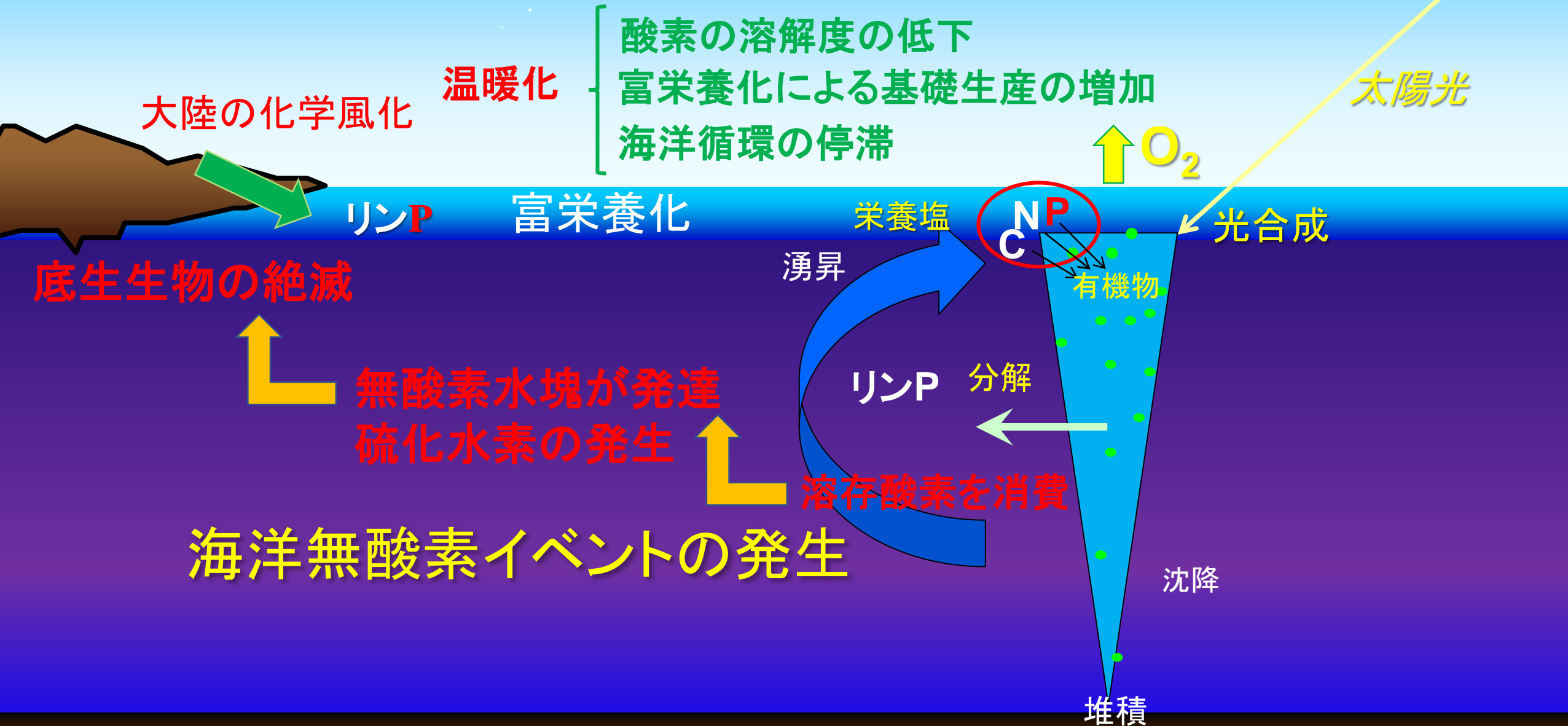
海洋内部に無酸素水塊が発生

顕生代(過去5億4千万年間)
において繰り返し生じた

海洋生物の絶滅をともなう

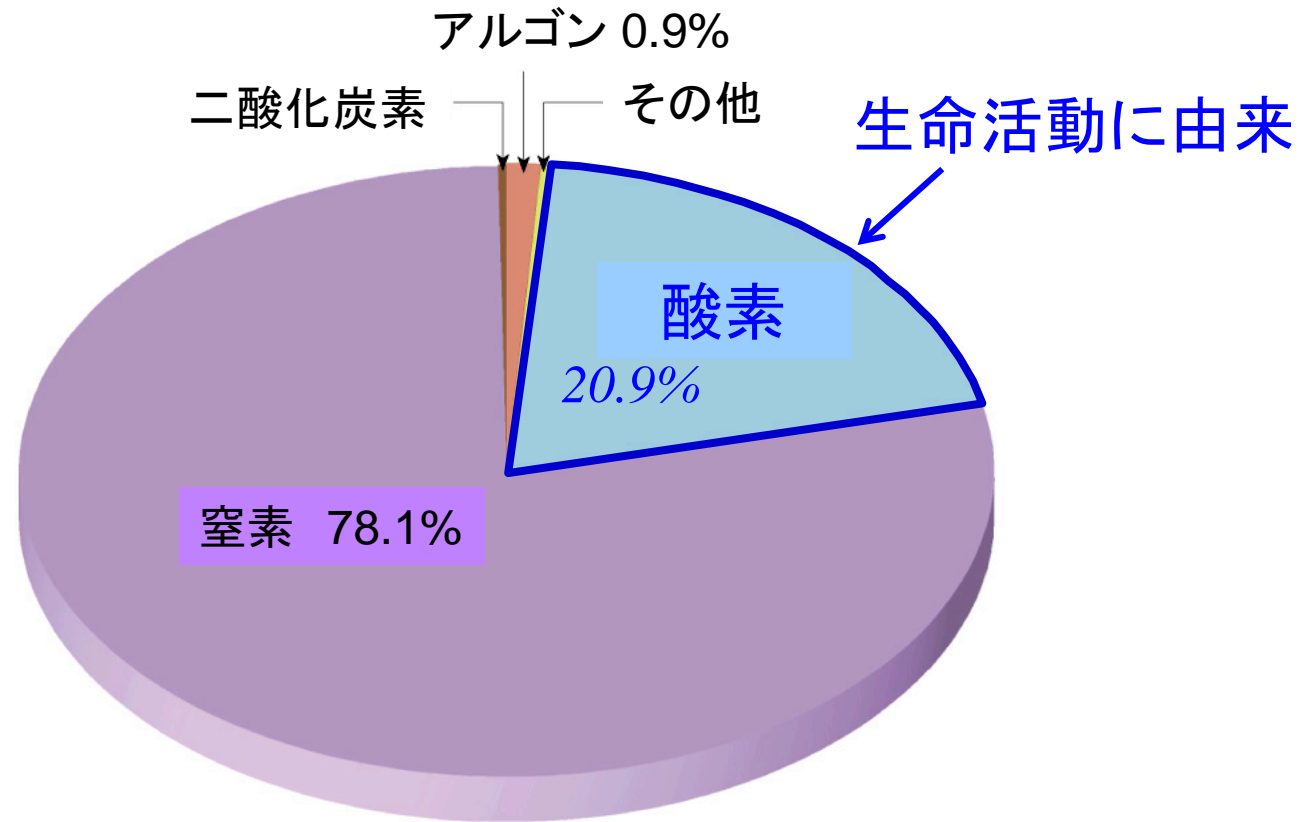
[Berner (2006) American J. Science,
Berner and Kothavala (2001) American J. Science に基づく]

海洋無酸素イベント



海洋無酸素イベントの発生

地球大気中の酸素

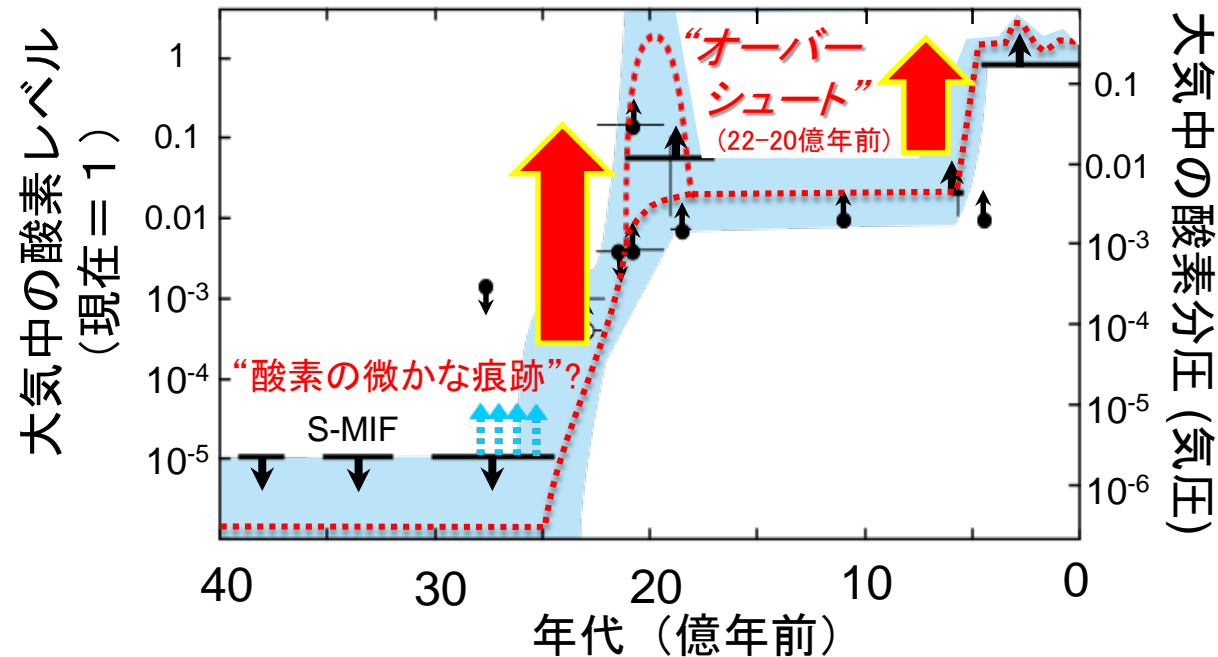


酸素は生命の光合成によって生成

生命誕生時には酸素はなかった—嫌気性生物は酸素があると死滅
好気性生物は酸素を呼吸してエネルギーを獲得(酸素がなければ死滅)

酸素濃度の増加

嫌氣的環境 → 好氣的環境

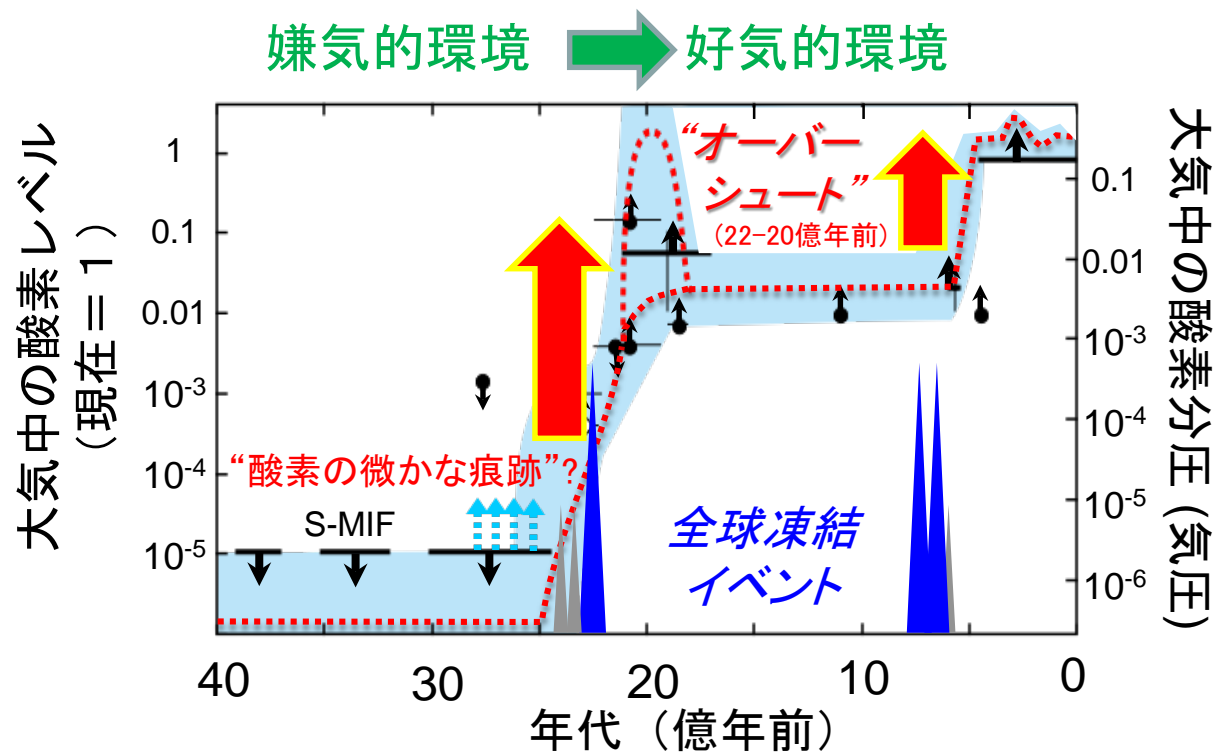


酸素濃度は約22億年前と約6億年前に急上昇？

※酸素濃度は25億年前以前にかすかに上昇？

※酸素濃度は約22-20億年前にオーバーシュート？

酸素濃度の増加



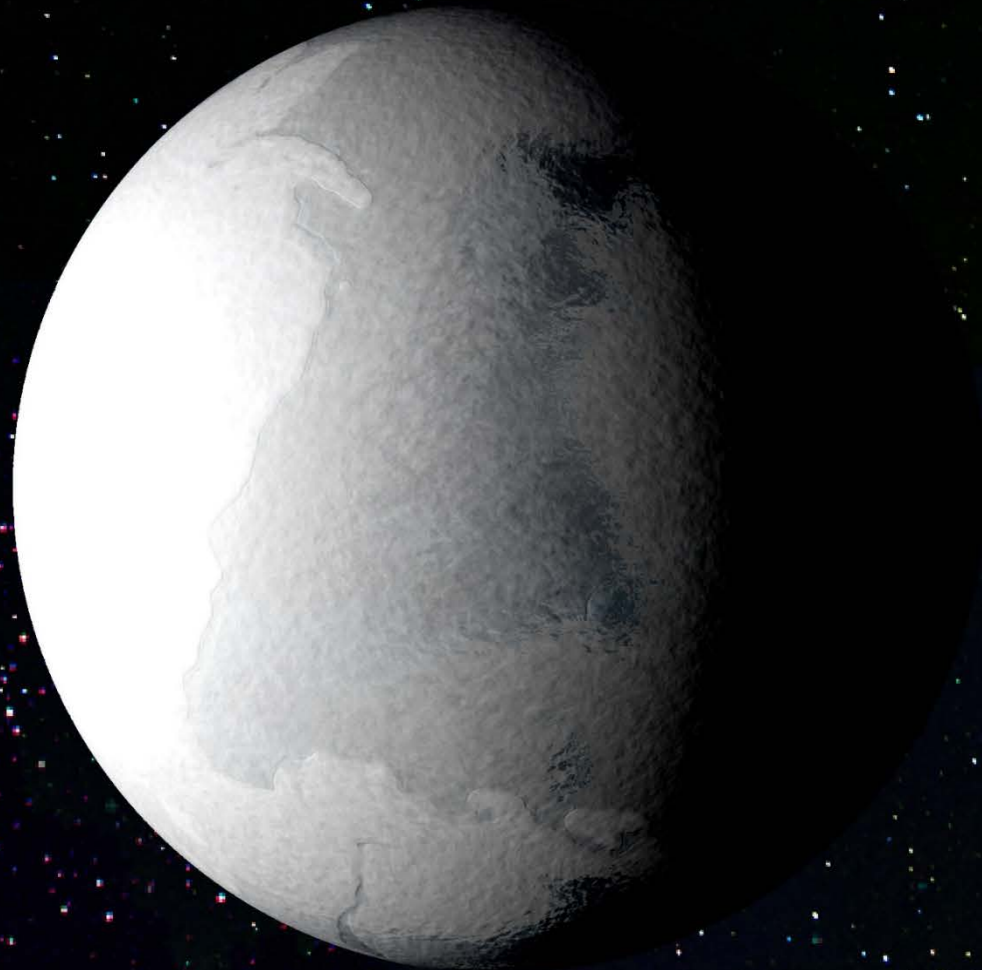
酸素濃度は約22億年前と約6億年前に急上昇？

※酸素濃度は25億年前以前にかすかに上昇？

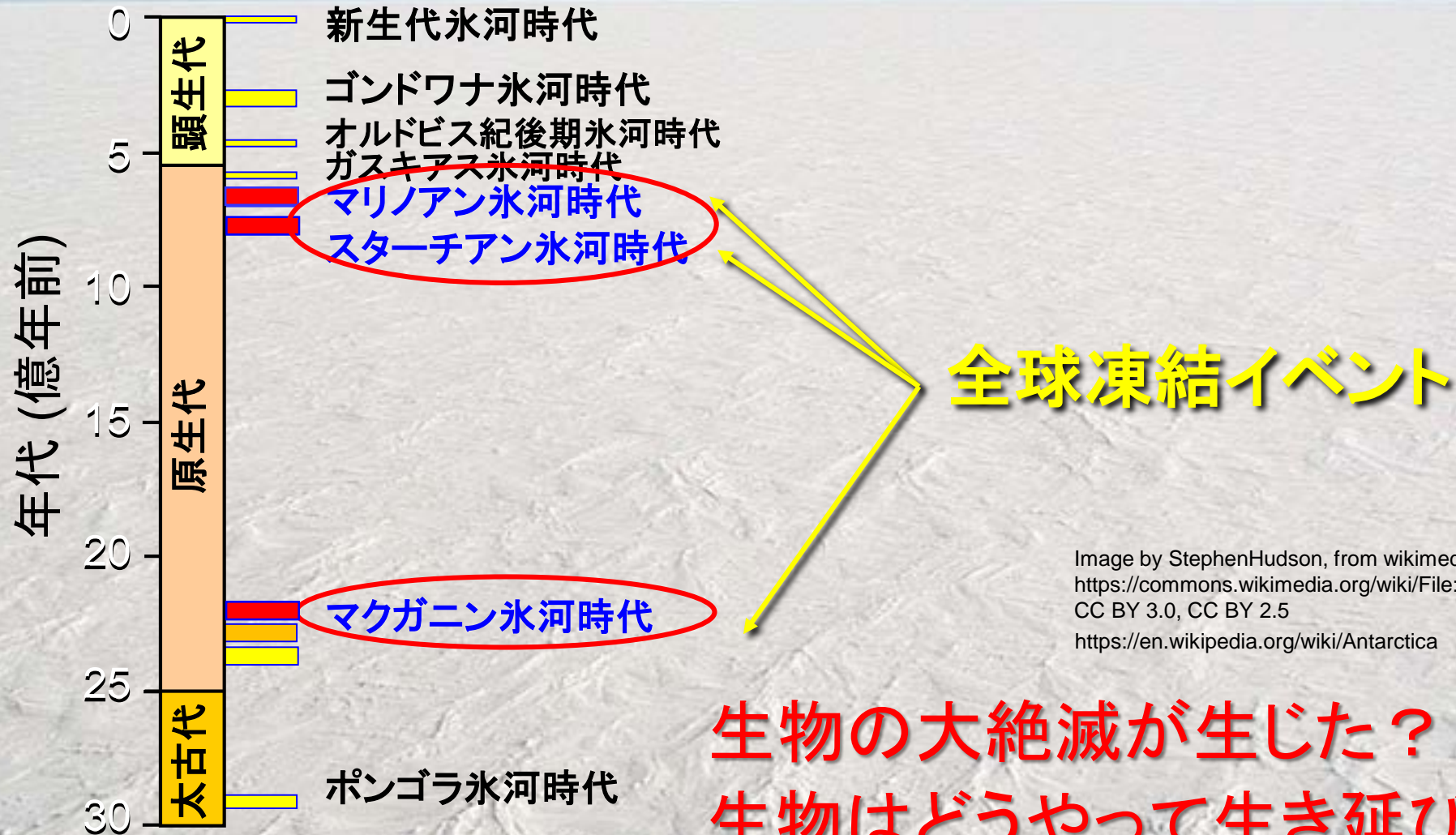
※酸素濃度は約22-20億年前にオーバーシュート？

全球凍結イベントと酸素濃度上昇が関係？

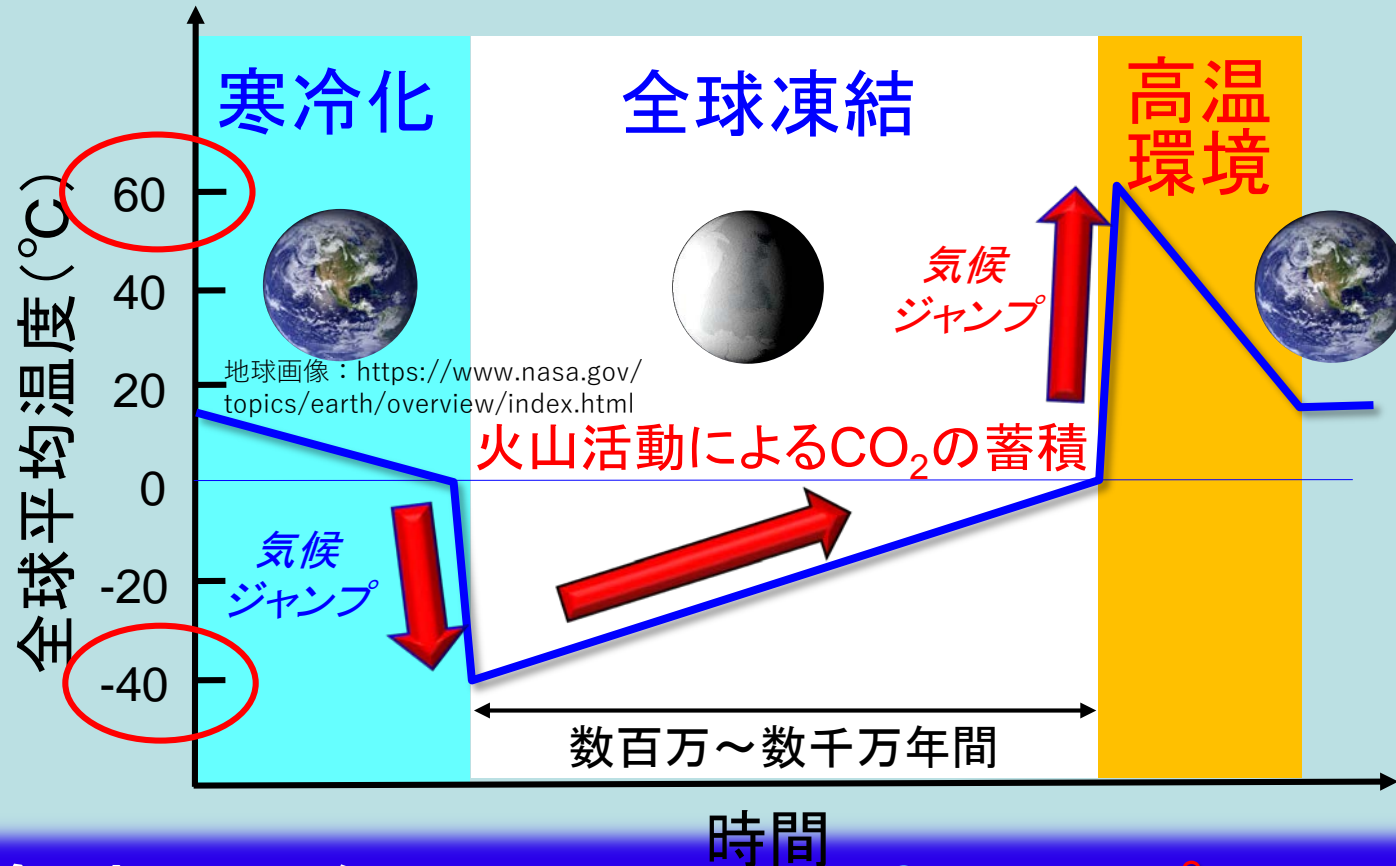
スノーボールアース(全球凍結)



地球史における氷河時代

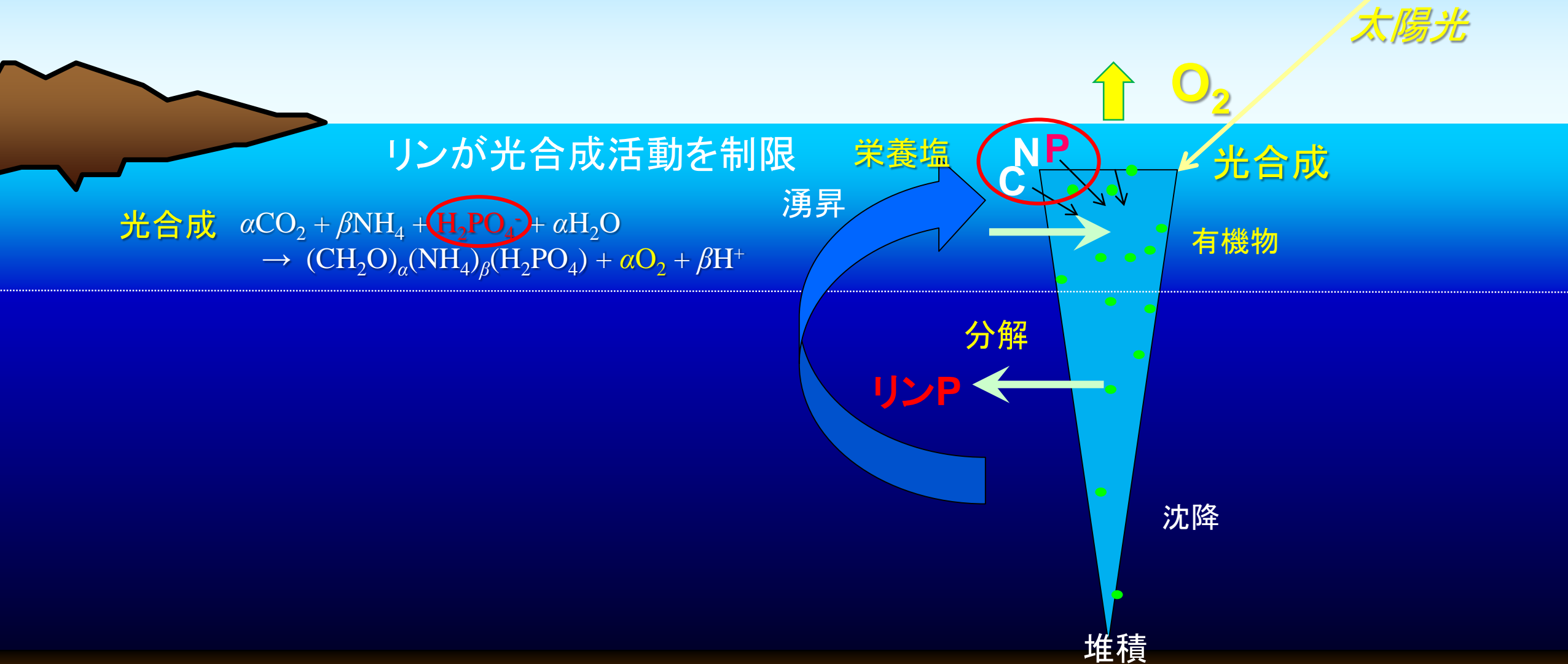


全球凍結イベントにおける気候変動



→ 全球平均気温 マイナス40°C から プラス60°C へ!
生物はどうやって生き延びたのか?

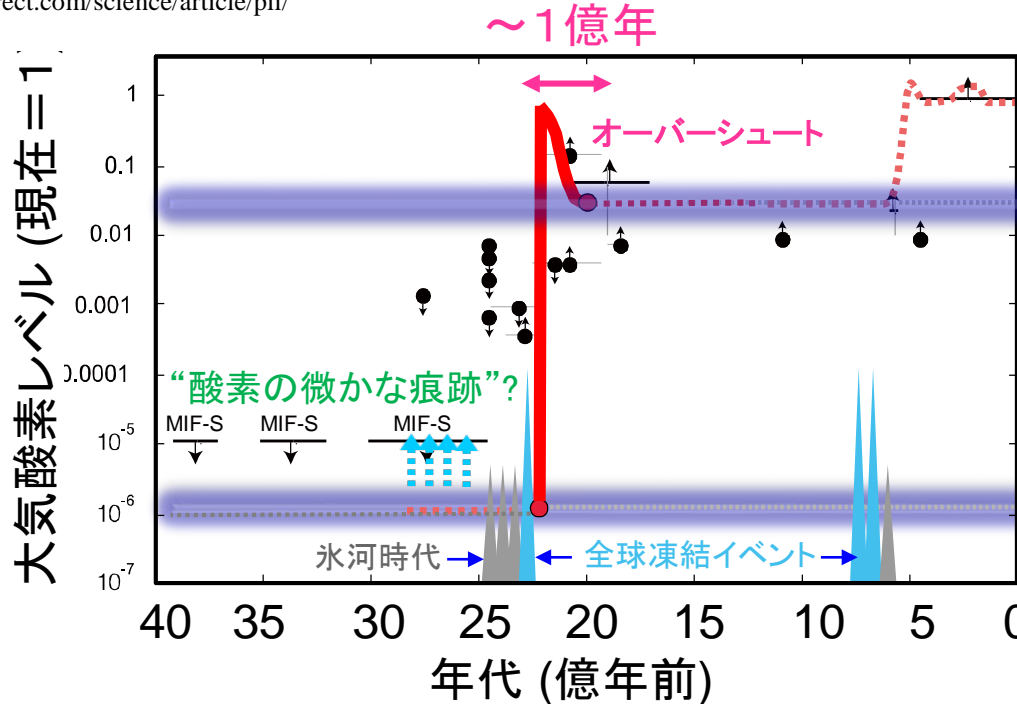
全球凍結直後の酸素濃度上昇メカニズム



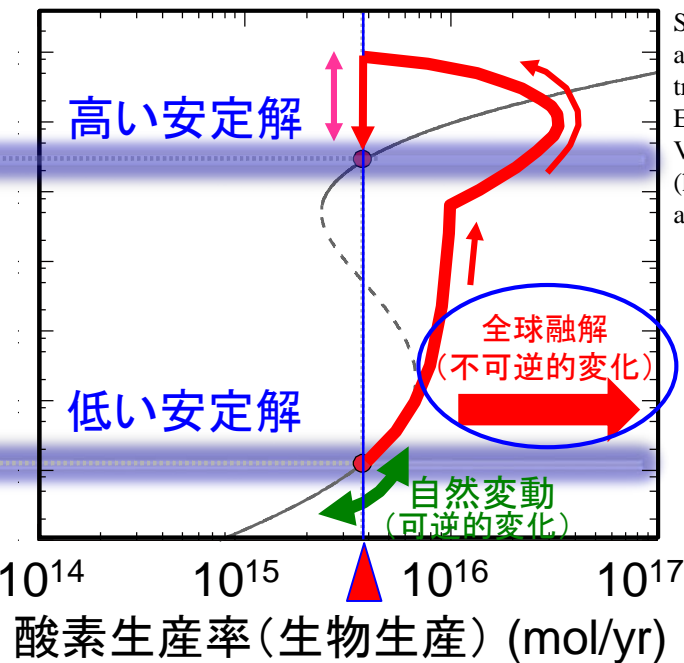
全球凍結直後に酸素濃度が上昇？

Mariko Harada, Eiichi Tajika, Yasuhito Sekine, "Transition to an oxygen-rich atmosphere with an extensive overshoot triggered by the Paleoproterozoic snowball Earth," *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 419, 1 June 2015, Pages 178-186. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X15001429>)

酸素レベルの時間変化



酸素レベルの安定解間の遷移



Mariko Harada, Eiichi Tajika, Yasuhito Sekine, "Transition to an oxygen-rich atmosphere with an extensive overshoot triggered by the Paleoproterozoic snowball Earth," *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 419, 1 June 2015, Pages 178-186. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X15001429>)

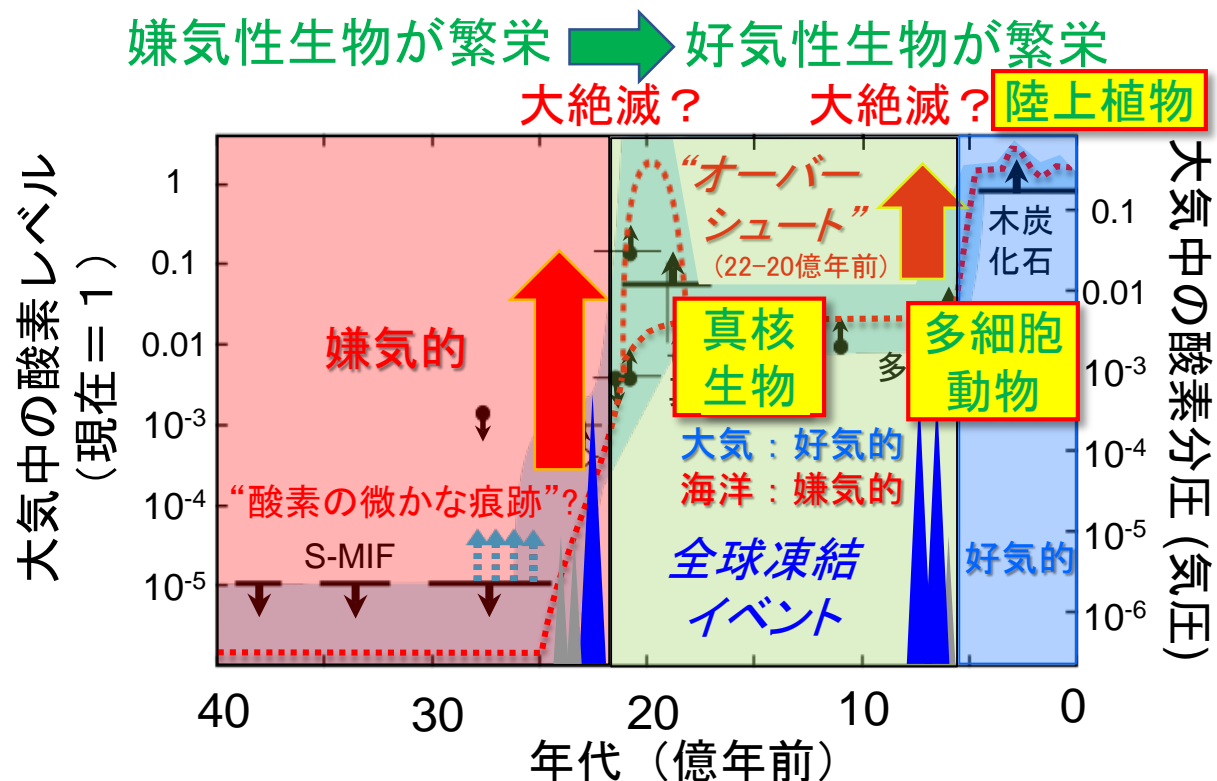
[Harada, Tajika and Sekine (2015) *Earth Planet. Sci. Lett.*]

全球凍結直後の大規模な地球システム擾乱 (高温環境下での激しい風化)

→ 全球凍結が生じなければ酸素は増えなかった!?

※自然変動では小さな擾乱しか生じない

酸素濃度上昇と生物進化



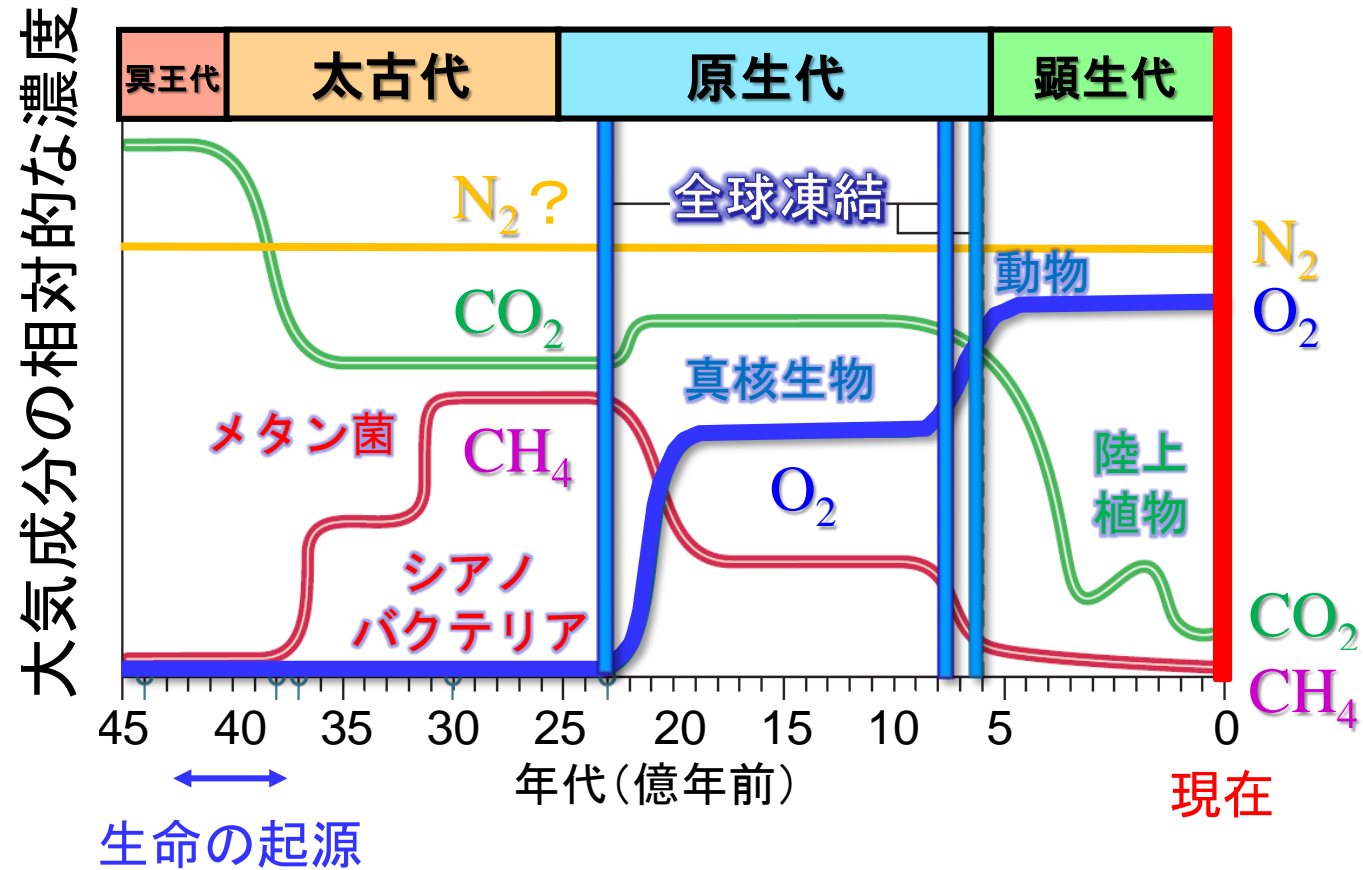
酸素大気の形成が生物の大進化を促した?

全球凍結が生じなければ富酸素大気は形成されなかった?

全球凍結—酸素濃度增加—生物進化



地球大気と生命の共進化史

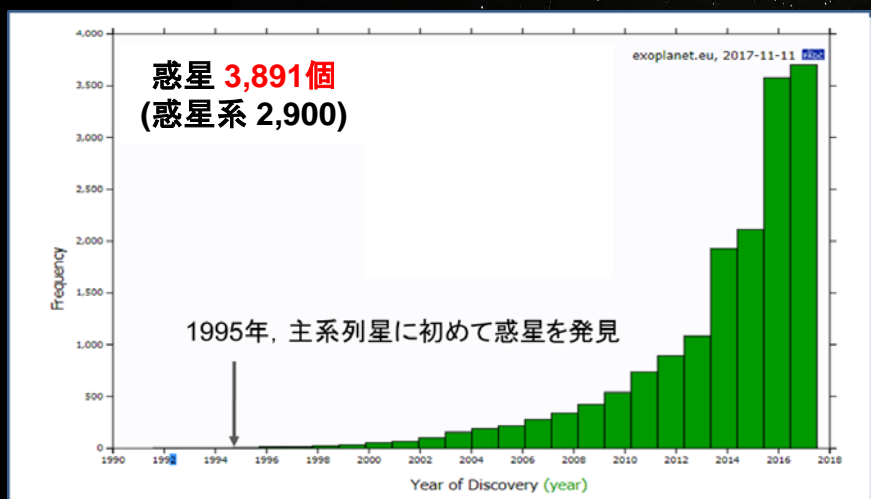


[Kasting (2005) Scientific American に基づく]

5. 太陽系外惑星環境と生命

太陽系外に数千個の惑星が発見されている！

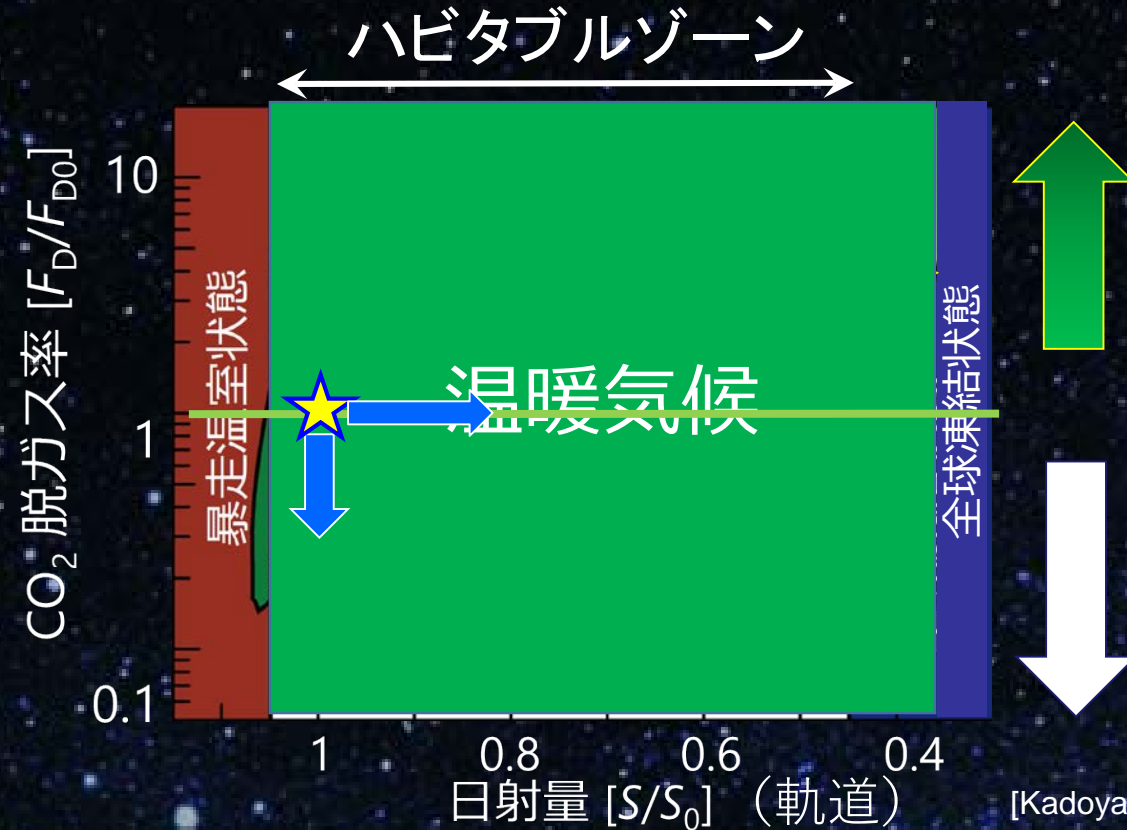
地球のようなハビタブルな惑星は存在するか？



2018年11月26日現在

<https://exoplanets.nasa.gov/resources/255/soaking-up-the-rays-of-a-sun-like-star-artistic-concept/>

太陽系ハビタブルゾーンにおける地球の気候モード

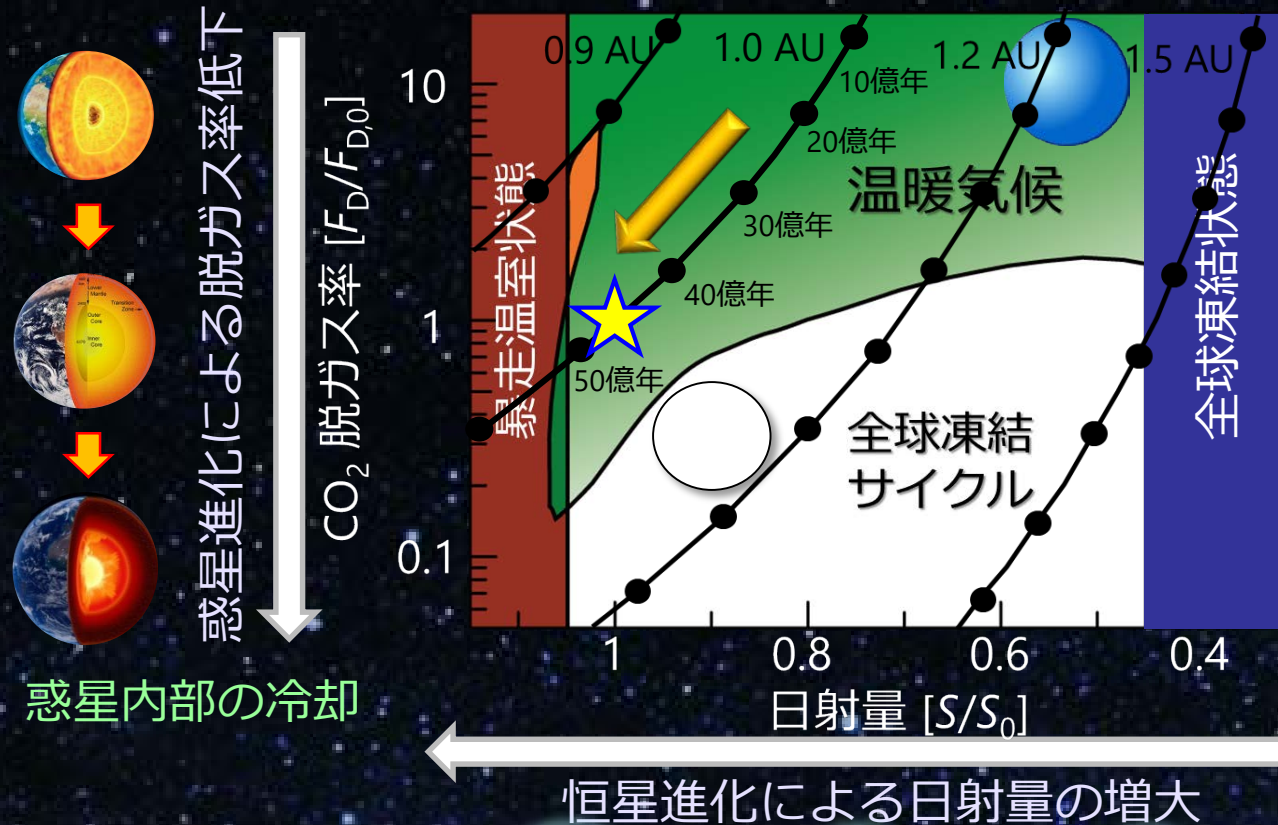


S. Kadoya and E. Tajika, "CONDITIONS FOR OCEANS ON EARTH-LIKE PLANETS ORBITING WITHIN THE HABITABLE ZONE." Science The Astrophysical Journal, August 1, 2014, 790: 107 (7pp), (http://www.astrobio.k.u-tokyo.ac.jp/tajika/wp-site/wp-content/uploads/2014/12/KadoyaTajika2014_Apj.pdf)

温暖気候モードは、日射量とCO₂ 脱ガス率によって制約されている

<https://exoplanets.nasa.gov/resources/255/soaking-up-the-rays-of-a-sun-like-star-artistic-concept/>

太陽系のハビタブルゾーンにおける地球の気候進化

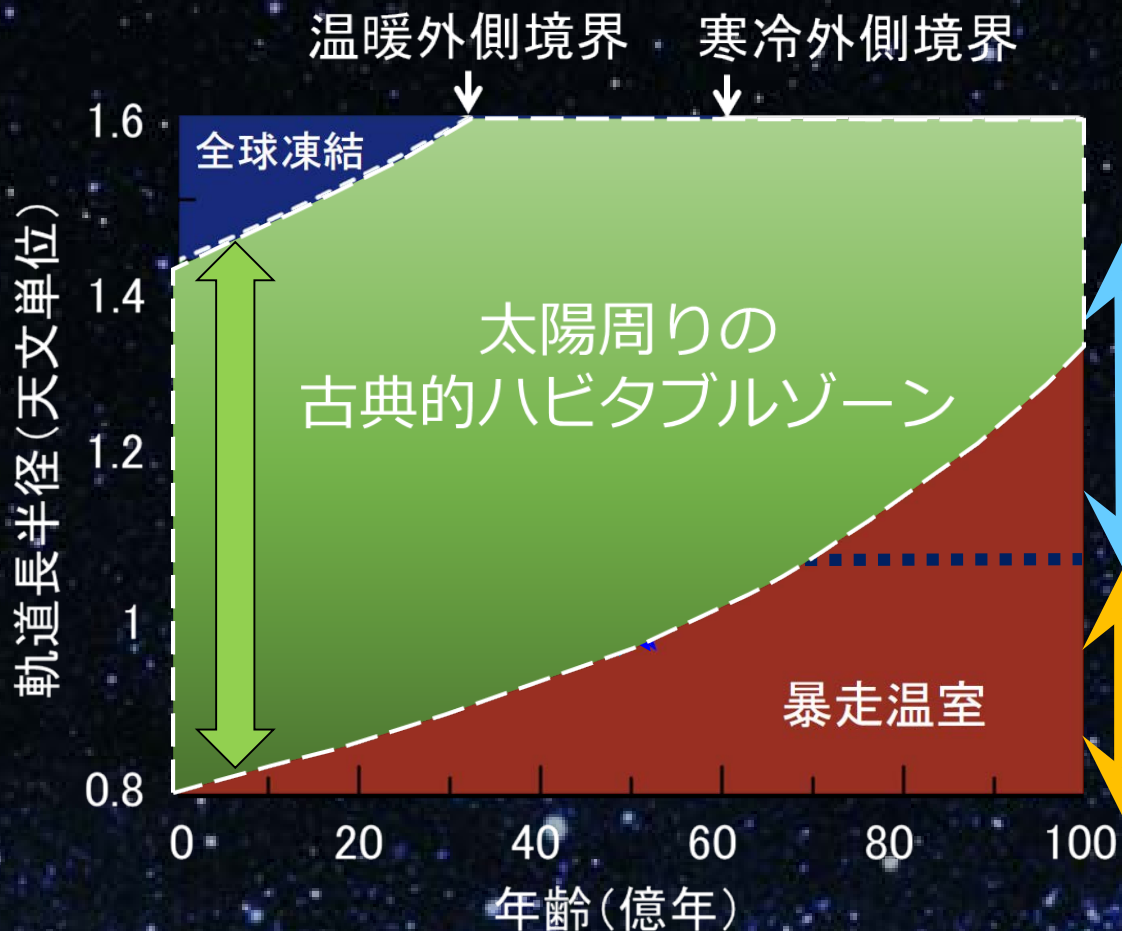


S. Kadoya and E. Tajika, "CONDITIONS FOR OCEANS ON EARTH-LIKE PLANETS ORBITING WITHIN THE HABITABLE ZONE:" The Astrophysical Journal, August 1, 2014, pp. 790:107 (7pp). (http://www.astrobio.k.u-tokyo.ac.jp/tajika/wp-site/wp-content/uploads/2014/12/KadoyaTajika2014_Apj.pdf)

[Kadoya and Tajika (2015) ApJ に基づく]

主星と惑星の進化によって気候の進化が決まる
地球はあと数億年で暴走温室状態となる!?

太陽系ハビタブルゾーンにおける地球の気候進化



惑星内部進化に依存
→ 全球凍結気候へ進化

中心星進化に依存
→ 暴走温室気候へ進化

S. Kadoya and E. Tajika, "CONDITIONS FOR OCEANS ON EARTH-LIKE PLANETS ORBITING WITHIN THE HABITABLE ZONE:" The Astrophysical Journal, August1, 2014, pp. 790:107 (7pp). (http://www.astrobio.k.u-tokyo.ac.jp/tajika/wp-site/wp-content/uploads/2014/12/KadoyaTajika2014_Apj.pdf)

[Kadoya and Tajika (2015) ApJに基づく]

ハビタブルゾーン外側領域における地球類似惑星の
ハビタブル寿命は 約40億年程度!

ハビタブル惑星環境の進化

恒星の進化(増光)
が支配的な場合

HZ内側領域



地球の場合

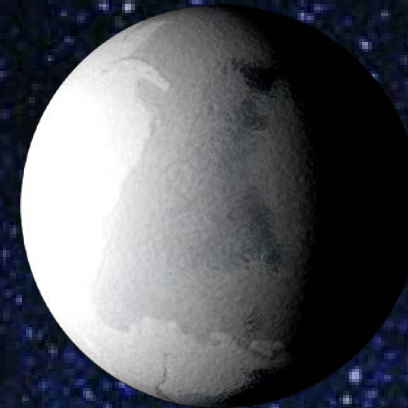
暴走温室惑星画像：
<https://exoplanets.nasa.gov/resources/92/exoplanet-is-extremely-hot-and-incredibly-close-artists-concept/>

暴走温室

進化

HZ外側領域

惑星の進化(冷却)
が支配的な場合



全球凍結

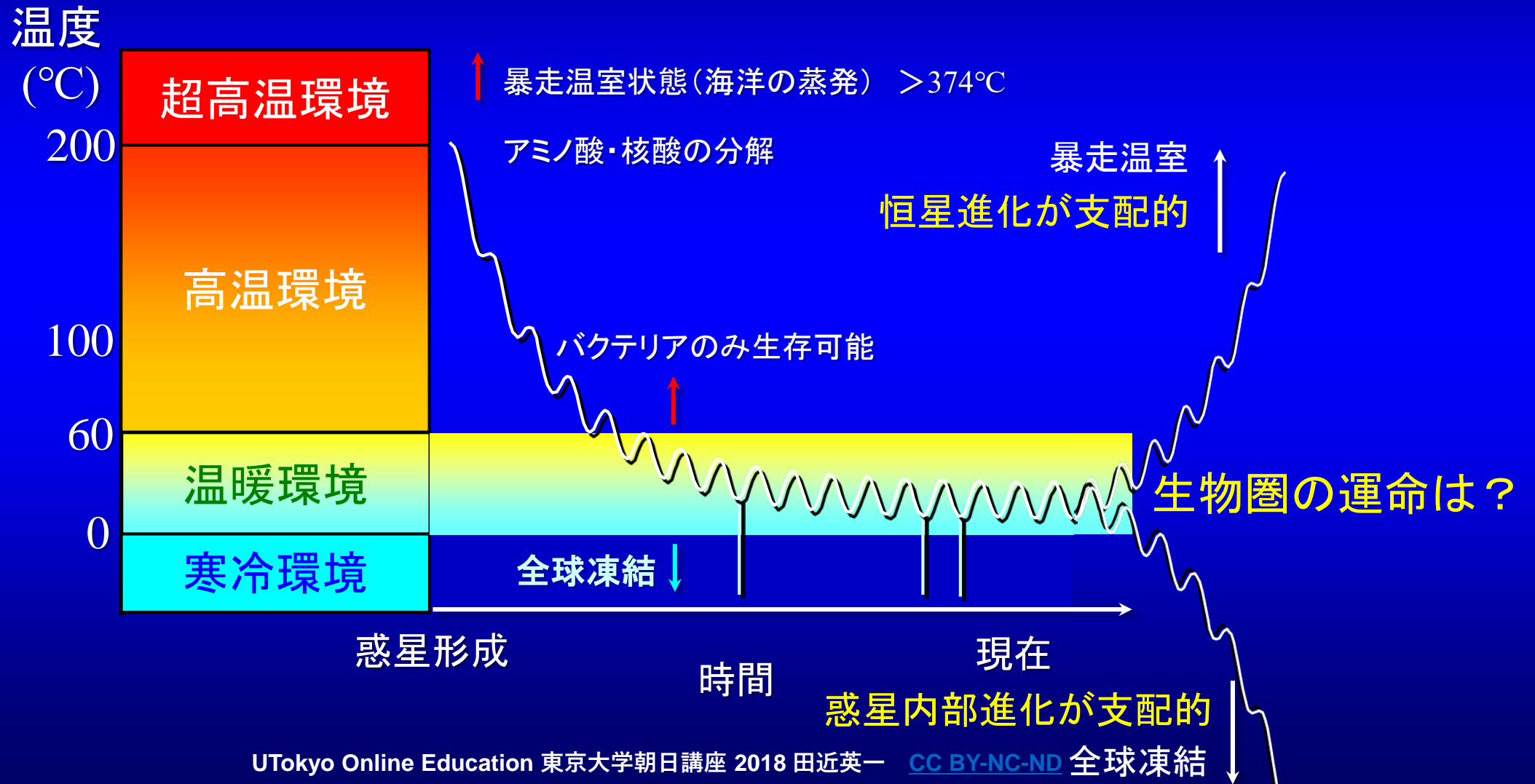
Credit : E. Tajika/ K. Oide

地球画像：
<https://www.nasa.gov/topics/earth/overview/index.html>



ハビタブル惑星環境の進化

恒星進化 vs 惑星内部熱進化 → ハビタブル惑星環境の進化



グループワーク課題

生命の存在が普遍的で必然的なものであり、
星の一生や惑星の一生が普遍的なものだとしたら、
生命はどのような一生(運命)をたどるのだろうか？

そのなかで、人類(や人類のような技術文明と
自らの意思を持つ知的生命体)は、どのように
「居場所」を確保していくのだろうか？