



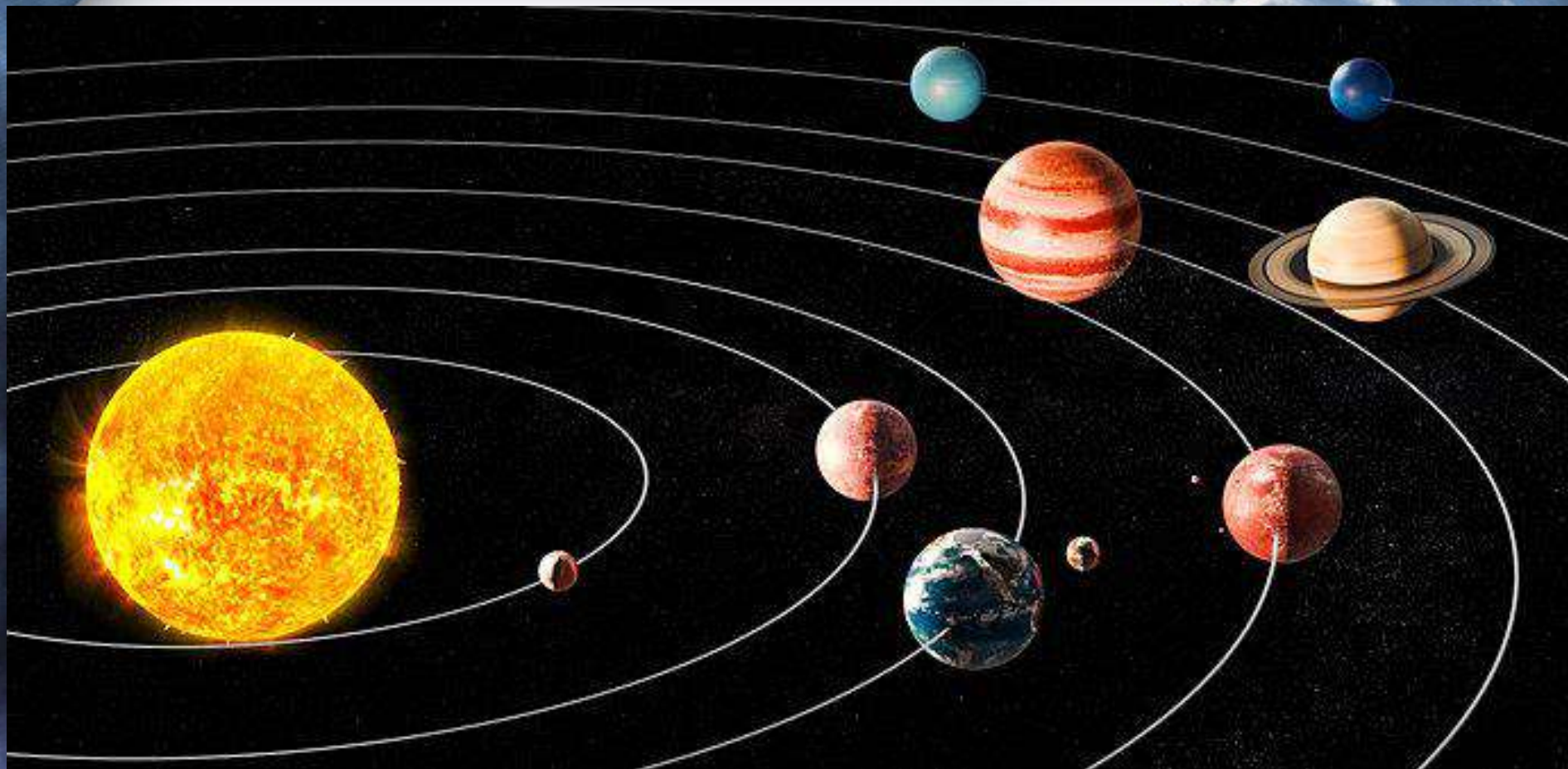
惑星氣象入門

氣象予報士
吉永泰祐



惑星の気象を勉強する意義

- ・ 地球の大気現象を深く理解するには、兄弟惑星である金星、火星の大気との比較、大きく異なる木星との比較が有用です。
- ・ 今回はこれらの惑星との比較で「温室効果」とは何か。金星で過去に起こった「暴走温室効果」
- ・ さらに火星の大気の歴史を学習し、
- ・ 地球大気の将来を展望します。
- ・ 時間軸の単位は「億年」です。



水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星

表 1.1 太陽系の惑星の特性

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
太陽からの平均距離(10 ⁶ km)	57.9	108.2	149.6	227.9	778.3	1,427	2,869.6	4,496.6
太陽からの平均距離(天文単位)	0.387	0.723	1	1.524	5.203	9.539	19.18	30.06
公転周期	88日	224.7日	365.26日	687日	11.86年	29.46年	84.01年	164.8年
自転周期	59日	-243日 逆行	23時間 56分 4秒	24時間 37分 23秒	9時間 50分 30秒	10時間 14分	-11時間 逆行	16時間
赤道半径(km)	2,440	6,050	6,380	3,390	71,400	60,000	25,900	24,700
質量(地球=1)	0.055	0.815	1	0.108	317.9	95.2	14.6	17.2
体積(地球=1)	0.06	0.88	1	0.15	1,316	755	67	57
密度(水=1)	5.4	5.2	5.5	3.9	1.3	0.7	1.2	1.7
扁平率	0	0	0.003	0.009	0.06	0.1	0.06	0.02
大気 (主な成分)	なし	二酸化 炭素	窒素, 酸素	二酸化炭 素, アル ゴン(?)	水素, ヘリウム	水素, ヘリウム	水素, ヘリウム, メタン	水素, ヘリウム, メタン
表面重力 (地球=1)	0.37	0.88	1	0.38	2.64	1.15	1.17	1.18

クイズ1 各惑星に降る雨又は雪は何か？

- ・ 地球

水 (H_2O)

- ・ 火星

雨や雪は降らない。氷 (H_2O) の雲はできる。

- ・ 木星

メタン、アンモニアの雪

- ・ 金星

硫酸の雨

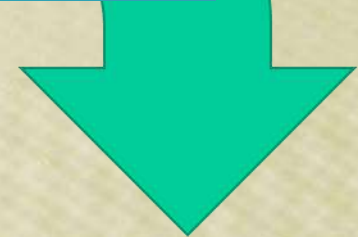
クイズ 2

アルプスの雲は山のどちら側でどうできる？

- ・ 北アルプスに岐阜県側から湿った風が流れ込むとき、雲は山脈のどちら側にどうできるか？



アンモニア メタン



クイズ3 これが木星だったら？
(ただし、木星には山がない)

クイズ2の答え 雲のでき方

- ・ 上昇気流の中で雲が発生するのは自明ではなく、地球大気の特徴である。
- ・ 気体が上昇すると気圧が低下して体積は膨張する。気温低下は蒸気の凝縮に好都合だが、膨張して蒸気密度が減少することは凝結に都合が悪い。
- ・ 飽和蒸気圧が温度に敏感な気体では、膨張で希薄になる損失より温度低下の効果が勝って、膨張過程で液化する。
水蒸気がいい例。
- ・ 逆の場合は圧縮過程で液化する。
メタンがその最たるもの。
 - どちらになるかは次の式による。
$$\text{凝結熱} \leq \text{等圧比熱} \times \text{温度}$$

(日本物理学会:“地球の物理”(丸善、1974)P64)

木星

- 木星では、水素ガス中のメタンが下降気流中に雲を作る。
- 量はメタンよりずっと少ないがアンモニアがあって、それが上昇気流中に雲を作る。

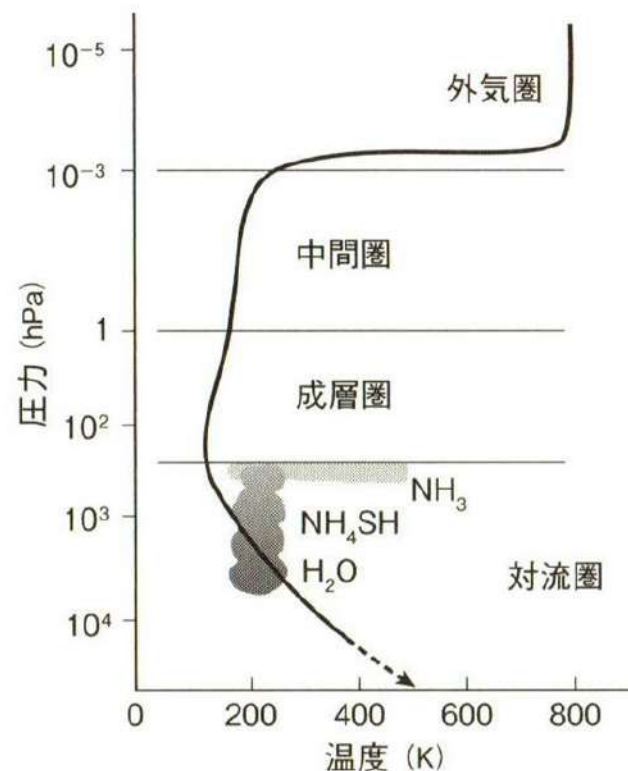


図 4-2 木星大気の鉛直構造
(中島, 2005).

木星の雪

気象大学校

昭和49年度

卒業論文

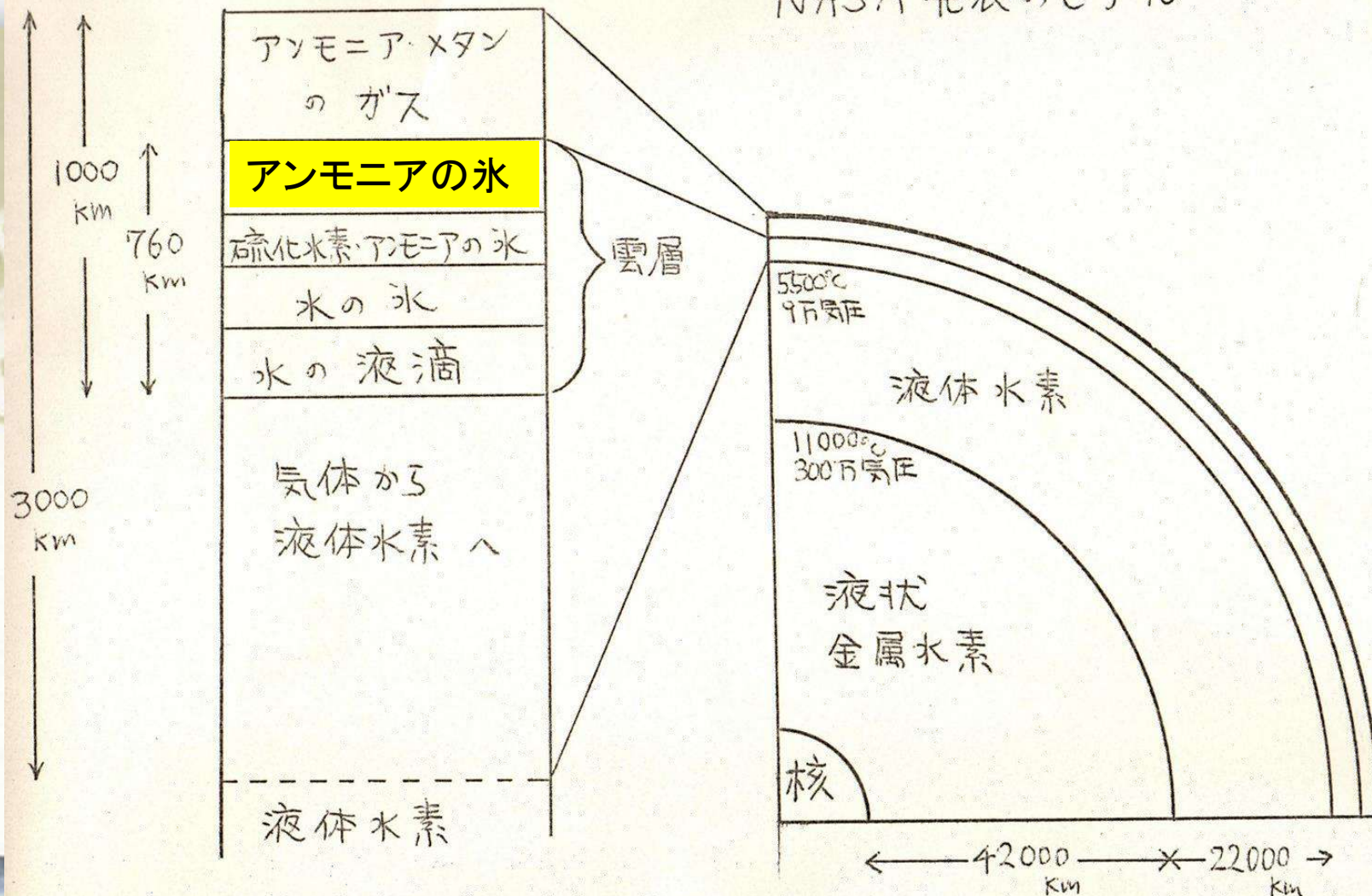
ヘリウム気体中のアンモニア結晶の
成長に関する実験的研究

吉永泰祐

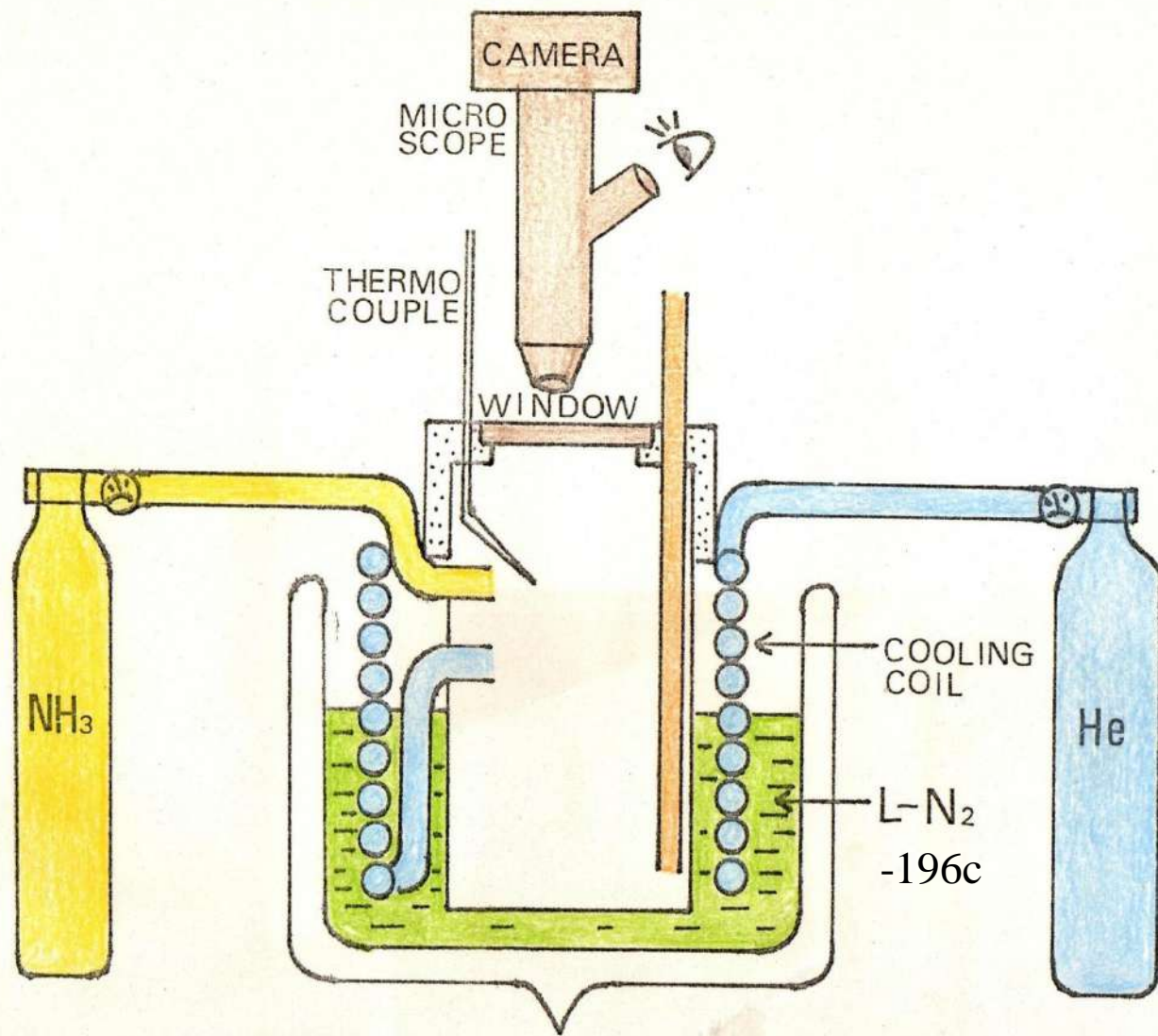
指導教官 駒林誠教授

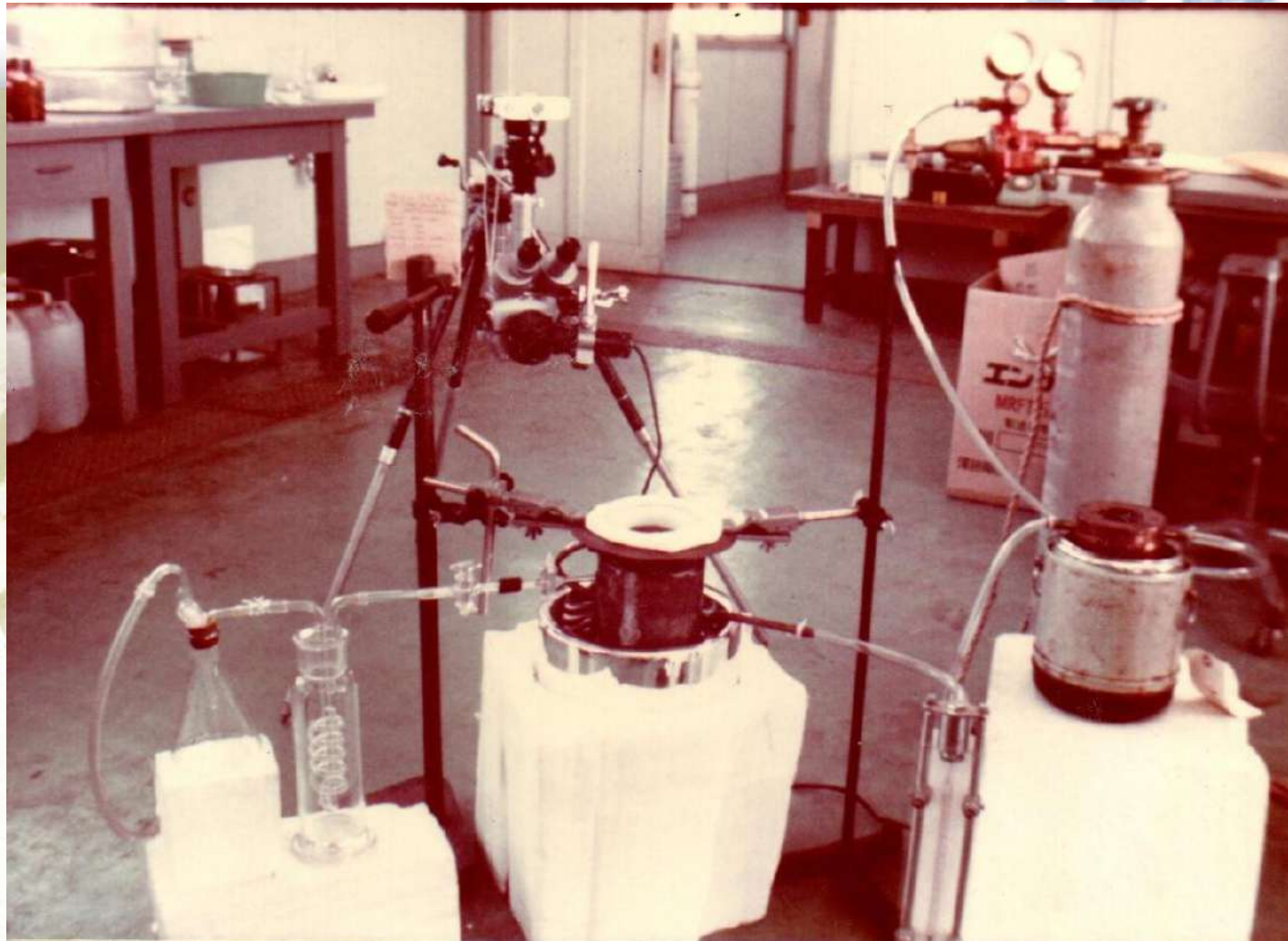
カ1図 木星の構造

NASA 発表のモデル



実験装置模式図





ヘリウムを冷やす銅製の管



写真 3 本体と蛇管

写真23 ある点で多くの枝分れをした例

撮影1974年11月26日



← 1ミリ →

温度 -120℃

写真25 雪片が付着した例

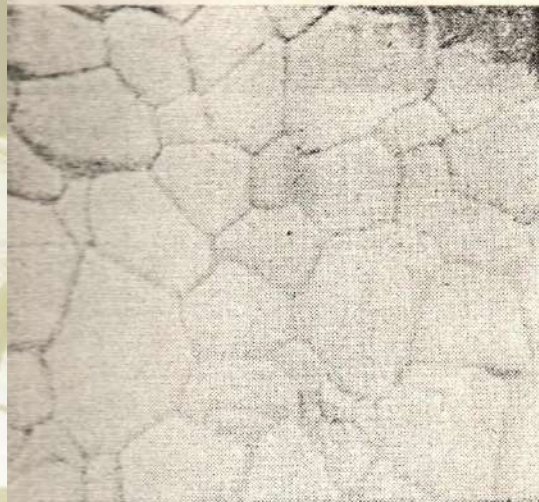
撮影1974年11月26日



← 1ミリ →

温度 -130℃

火星の霜と雪



気象大学で試作に成功

ク模様の霜

炭酸ガスで
雪は立方形

素、オゾン、水蒸気などがある。白い煙をふくんだような模様の炭酸ガスの霜だと考えられている。水の結晶という説や炭酸ガスと水との混合結晶という説もあるが、はっきりしない。上左には微量の雪も浮かんでおり、右下には雪がより厚く積もっている。雨が降らないから生物はいない。

高田さんは液体窒素で魔法びんを冷やして人工的に火星の極地を作り、氷点下百千度の銅板に炭酸ガスを冷やして霜を析出させ、同八十五度で、一気圧の窒素ガス中に炭酸ガスを放出して霜を析出させた。極地には、氷点下百千度の魔法びんを冷やして霜を析出した。

地球と違う結晶

地球以外の天体でも、雪や霜はやはり同じ色らしい。試作されたものは無色透明、光を当てると白く輝いた。ただし主成分は火星では炭酸ガス、木星ではアンモニア。積もると同じように白い雪や霜だが、成分が違えば、水蒸気が凍って出来る地球のものと結晶がちがっていた。火星の雪はザラメ砂のような立方形。霜はカメの甲のようなモザイク模様。地球の雪より細かくて、緻密(ちみつ)だった。木星の雪は霧氷のような針状結晶、肉眼で見える。おおよそは、火星の大気は地球の百分の一。主成分は炭酸ガスで、ほかに一酸化炭素と酸

木星の雪



霧氷のような針状

アンモニア
を冷却して

がある。火星は北極や南極に霜が降り、白い極冠になる。雲物理の専門家、気象大学の駒林誠教授の指導で、四年生の高田政幸さん三三、吉永泰祐さん三三の二人は、実際に近いと思われる火星の雪と霜、木星の雪を、卒業研究でつくることに成功した。今春かまたは秋の日本気象学会で発表する。

★

気象研究ノート

第128号 (1976)

最近の気象学と気象事業の展望

—気象庁創立百年を記念して—

1976年3月

日本気象学会

吉永泰祐
51.4.10

—(179)—

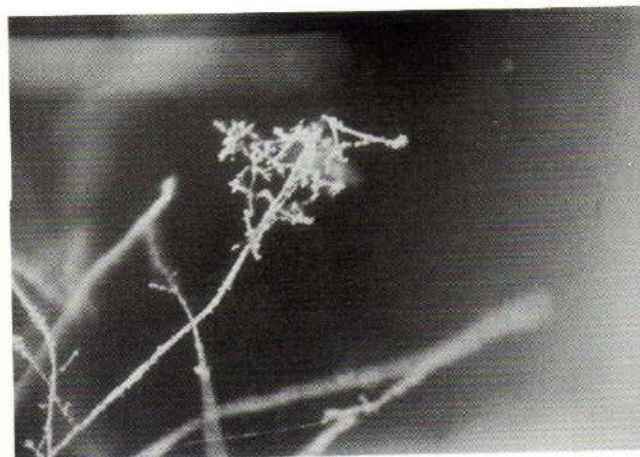


写真3 He (気) の中で枝分れしながら成長した NH_3 (固), -120°C , 1 気圧. 写真の長辺が 4.86 mm. (吉永泰祐 1975)

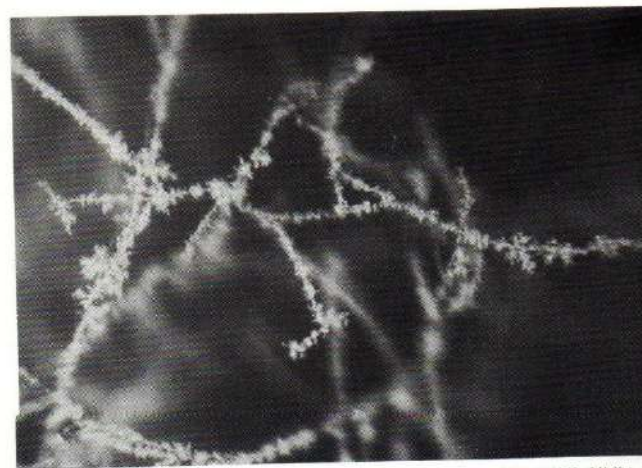


写真4 He (気) の中にウィスカー状に伸びた NH_3 (固). その上に, NH_3 雪結晶が付着している, -130°C , 1 気圧. 写真の長辺が 4.86 mm. (吉永泰祐 1975)

—179—

第二章 温室効果について

二酸化炭素の性質

IPCC report
communicator



熱を
きゅうしゅう
吸収するんだ



二酸化炭素の性質

IPCC report
communicator



まわりの空気を
あたた
暖めてしまうの

子供向けの説明

第二章 各惑星の温室効果について

- 放射平衡温度

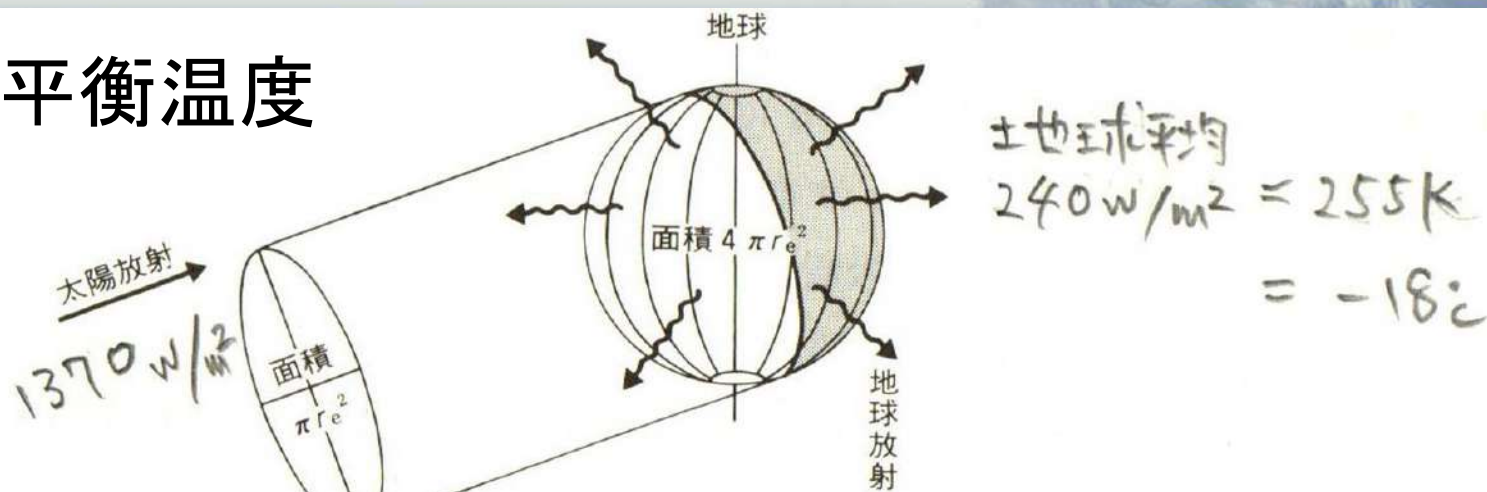
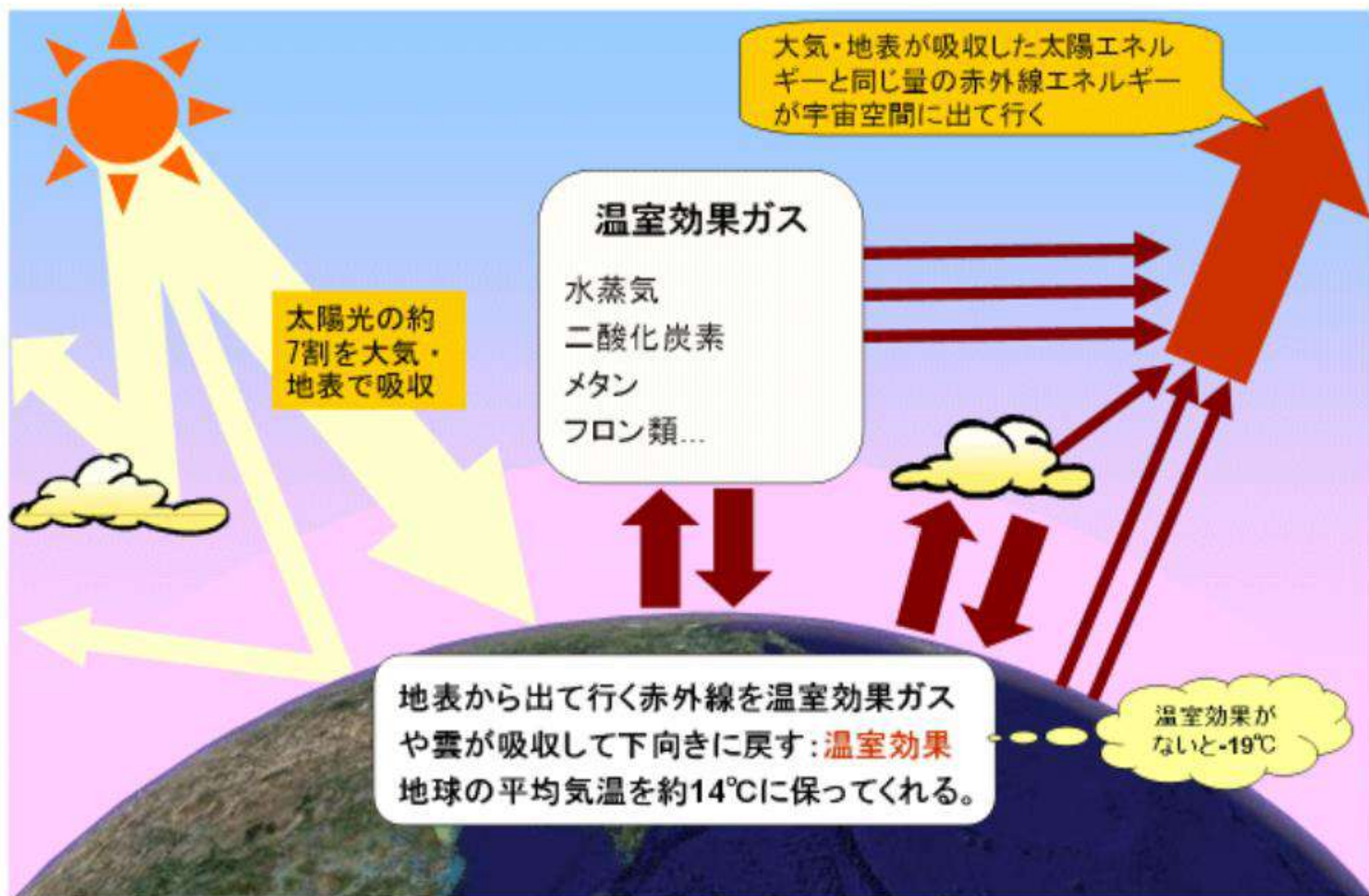


図5.7 地球の放射平衡
地球の半径が r_e .

- 実際の温度
- その差が温室効果
- 各惑星の温室効果について

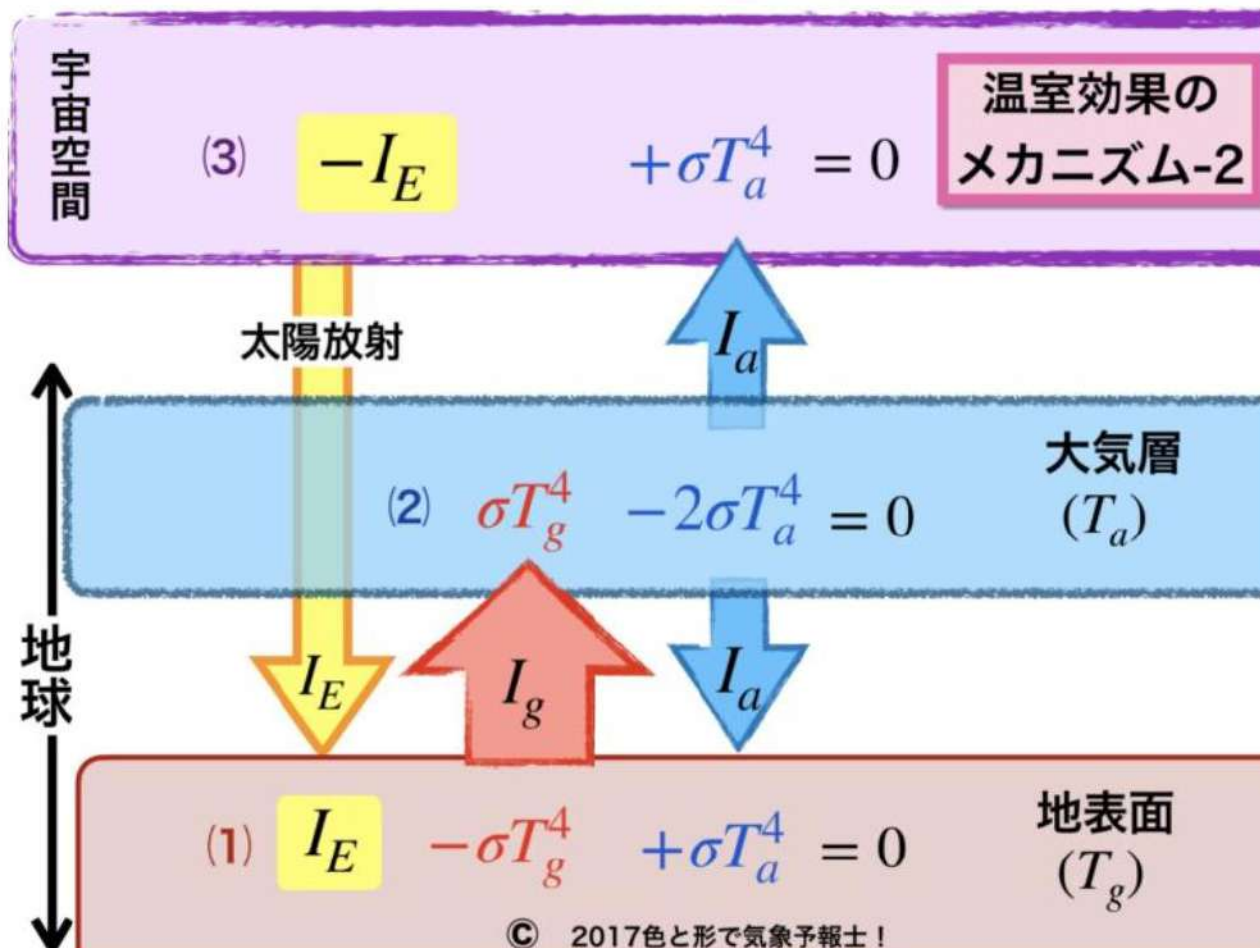
(小倉義光:“一般気象学”(東大出版、2011)P114)に加筆



温室効果の模式図

温室効果の説明

地面からの放射がすべてGHGに吸収される場合

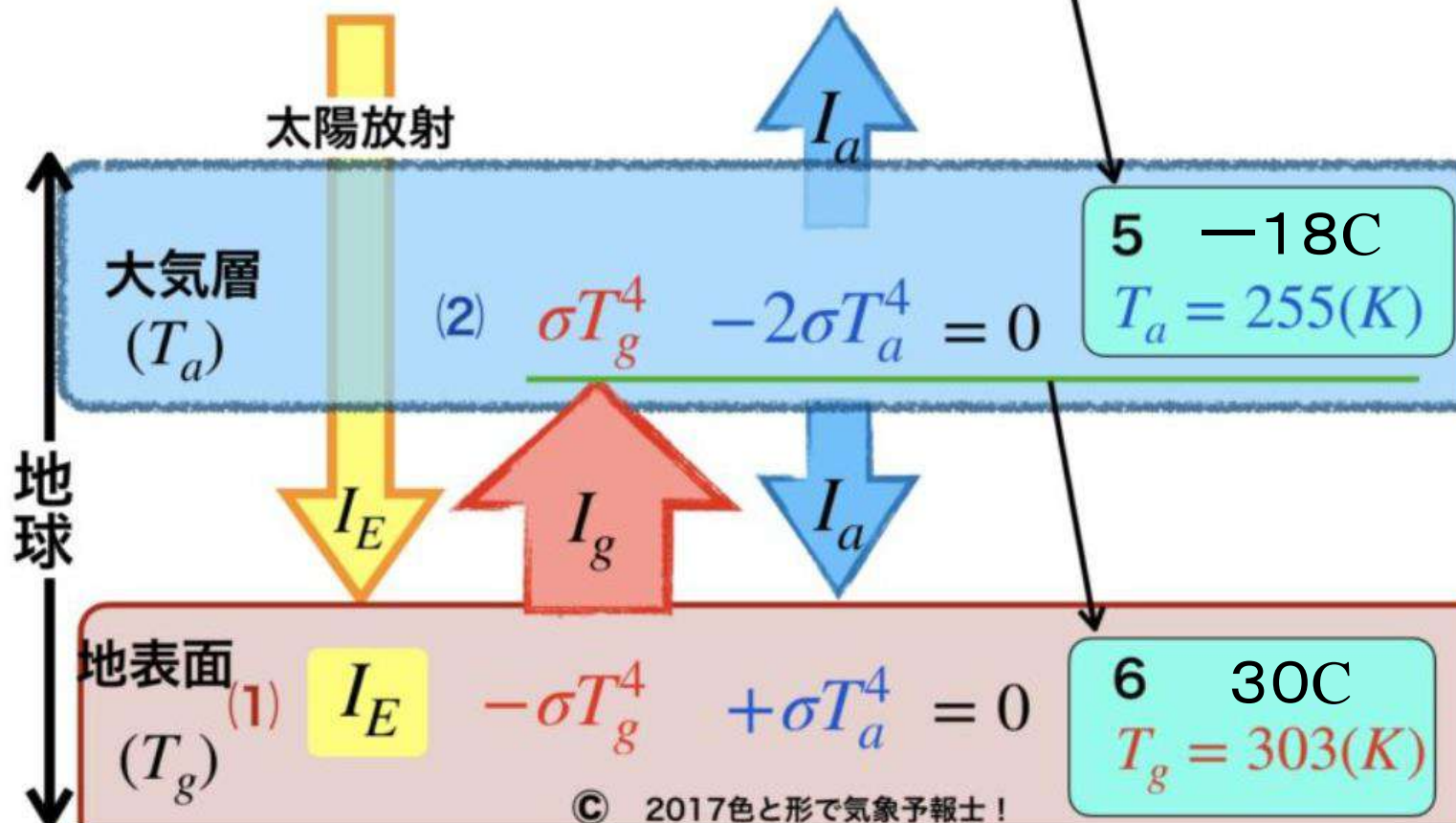


変数が3個、式が3個なので、この連立方程式は解ける。
(ステファン・ボルツマンの法則 $I = \sigma T^4$)

I_E は 240W/m^2 なので、この式は定量的に解ける。

温室効果の メカニズム-3

$$(4) \quad I_a = \sigma T_a^4 = 240 \text{ Wm}^{-2}$$



© 2017色と形で気象予報士！

地球型惑星の温室効果

表 4 金星・地球・火星の温室効果の特徴

惑星名	有効放射 温度(K)	平均地表 面温度 (K)	温室効果 の強弱	最重要赤外 線吸収気体	それ以外の 赤外線 吸収気体	太陽光の 吸収場所
金星	224 -49c	730 457c	きわめて 強い	二酸化炭素 (大量)	水蒸気(微 量), 雲粒	大部分雲層, 地面での 吸収は小
地球	255 -18c	288 15c	中程度	水蒸気 (少量)	二酸化炭素 (微量), オ ゾン(微量)	大部分地面
火星	210 -63c	220 -53c	弱い	二酸化炭素 (少量)	ダスト	地面と ダスト

惑星気象学入門 冒頭の表

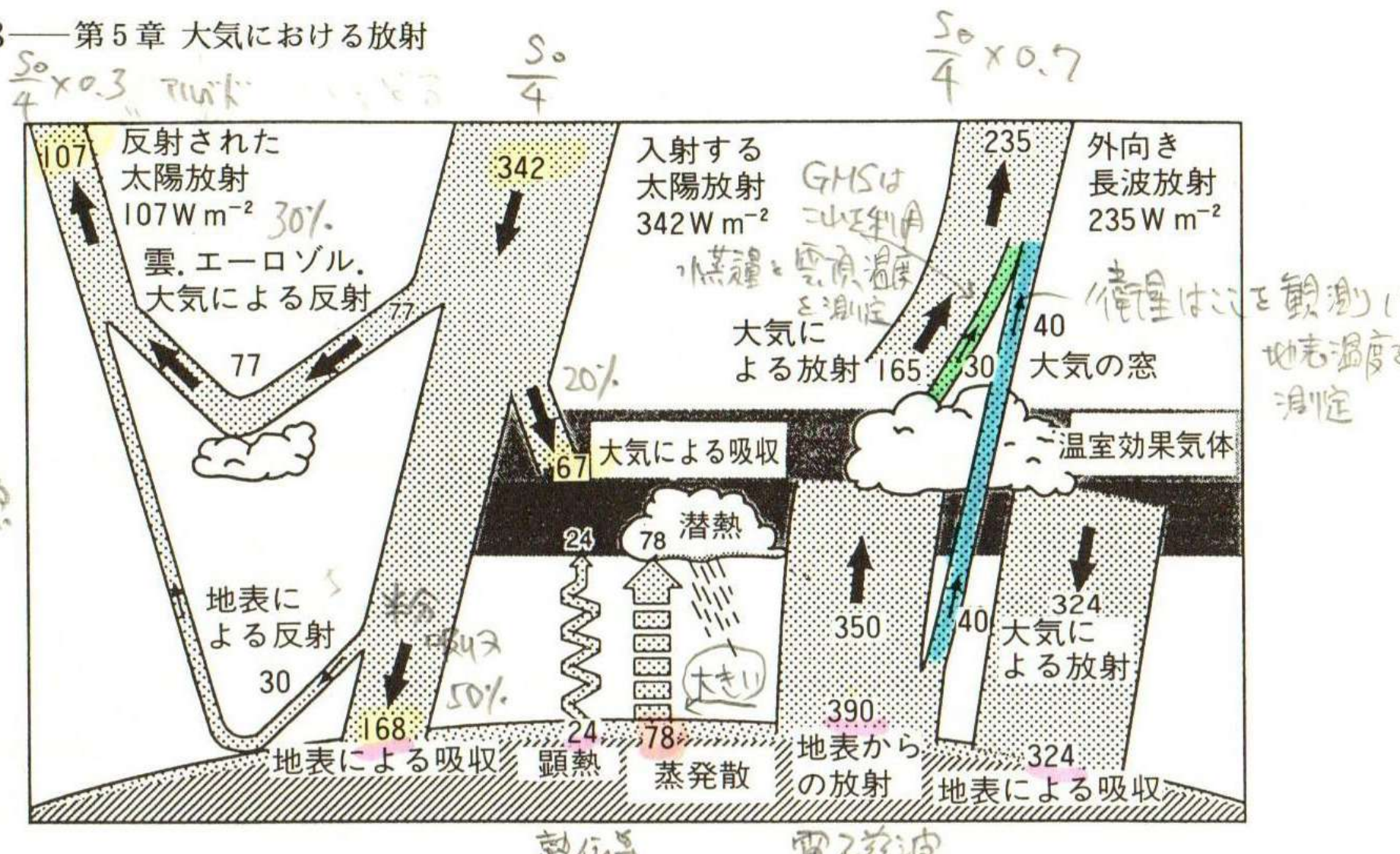


図5.17 地球のエネルギー収支 (IPCC, 1995)

(小倉義光: “一般気象学” (東大出版、2011) P128)

暴走温室効果(素朴なイメージ)

- 地球大気の温室効果は水蒸気と二酸化炭素の赤外吸収によっている。

- 太陽放射が増大し**海面温度が上昇すると、温度が高いほど水の飽和水蒸気量は高いので、大気中の水蒸気は増える。これは温室効果を強め、さらに海温を上昇させる。

- こうして温室効果による気温の上昇が止まらなくなる。つまり温室効果が暴走する。

- これが「暴走温室効果」の**最も素朴なイメージ**である。

－ 気象学会機関紙「天気」第37巻5月号 用語解説

金星

- ・ 暴走温室効果が過去に実際に起こった
- ・ スーパーローテーション

暴走温室効果（過去の金星）

- ・ 地面で大気と海洋が平衡状態にあるとき、大気が宇宙空間に射出できる惑星放射に上限がある。
- ・ この上限を「射出限界」と呼ぶ。（駒林、1968）
- ・ この上限より大きな太陽放射が入射している状態を「暴走温室状態」と呼ぶ。
- ・ 海がなくなって、地面での大気と海洋の平衡が破れない限り、地表温度の上昇は止まらない。
- ・ 暴走状態では海洋が消滅する。→過去の金星
- ・ 現在の金星は海洋の蒸発により、入射と射出のエネルギーが平衡状態で、暴走温室状態ではない。
- ・ では地球は？？？ これは最後に・・・

火星

- ・ 火星の気候変動
 - － 火星の大気と海の消失
 - ・ 地磁気の消失、隕石の衝突、弱い引力
- ・ 昔火星は湿潤で温暖だった→生命の痕跡を探せ
 - － パーシビアランス
 - － 生命とは何か？

火星大気の歴史

39億年前	37億年前	30億年前	現在
惑星誕生～	ノアキス紀	ヘスプリア紀	アマゾニア紀
	温暖で海があった	徐々に大気と海が消失	寒く乾燥した時代
	地球程度の大気	徐々に乾燥・寒冷化	
	地磁気消失、火山活発	火山活動減少	火山活動停止

大気消失の理由

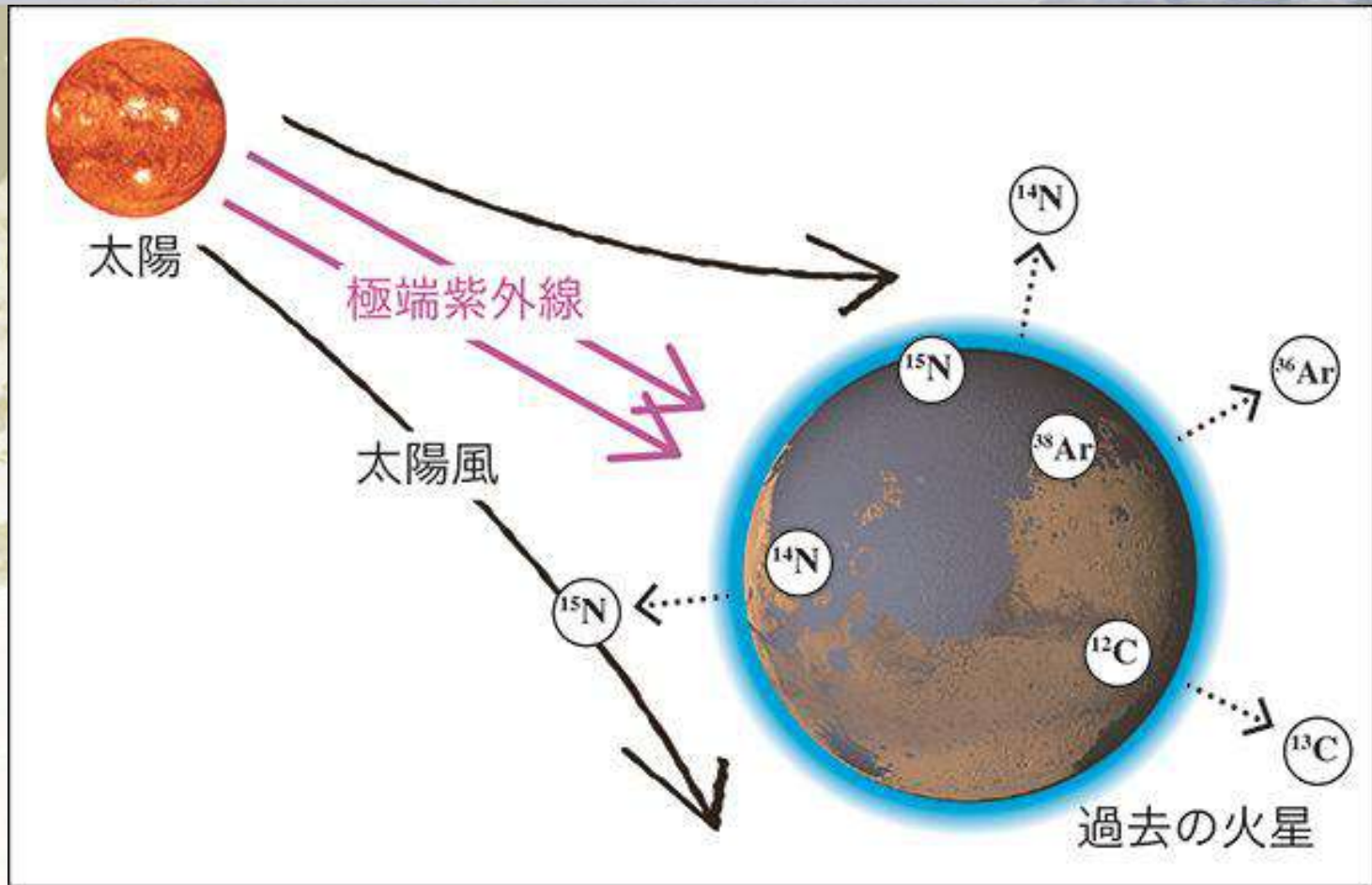
重力が小さいので宇宙に逃げる

隕石の衝突の衝撃で、宇宙に吹き飛ばされる

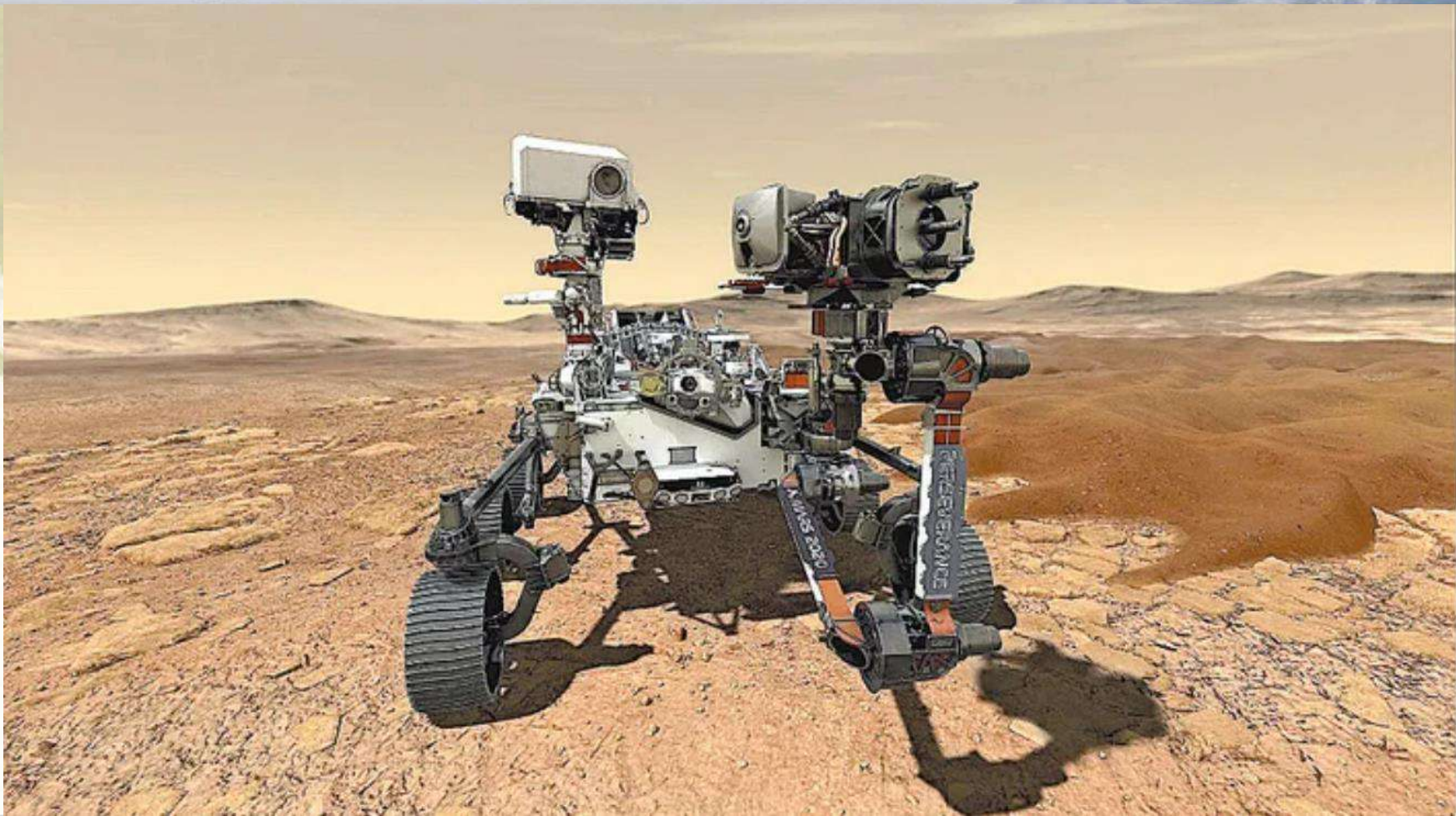
地磁気の消失で太陽風で、はぎとられる

火山活動減少で水蒸気や二酸化炭素の供給が減る

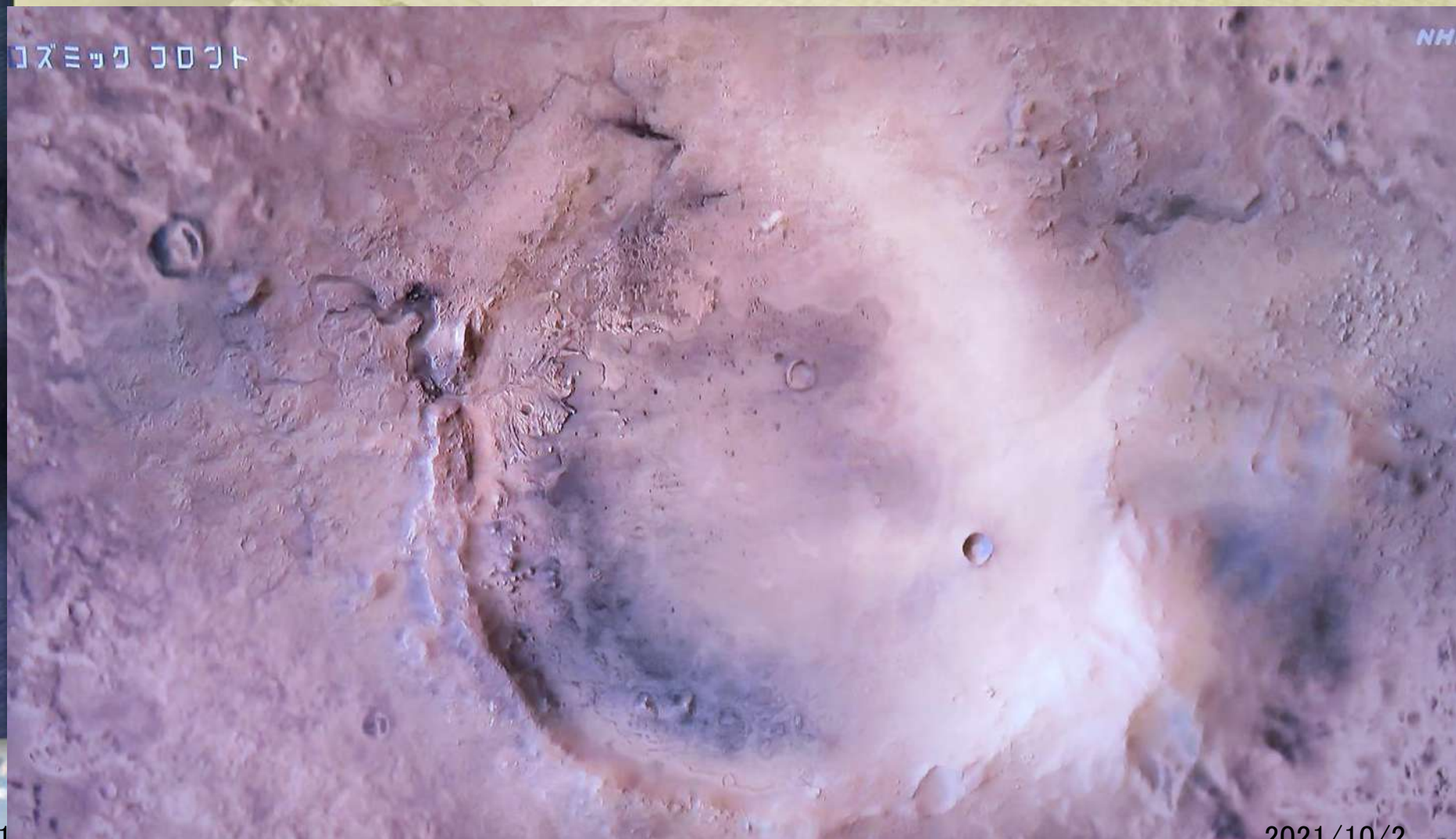
地磁気の無くなった火星への太陽風の影響



生命の痕跡を探して パーシビアランス



ジェゼロクレーター（直径45キロ）

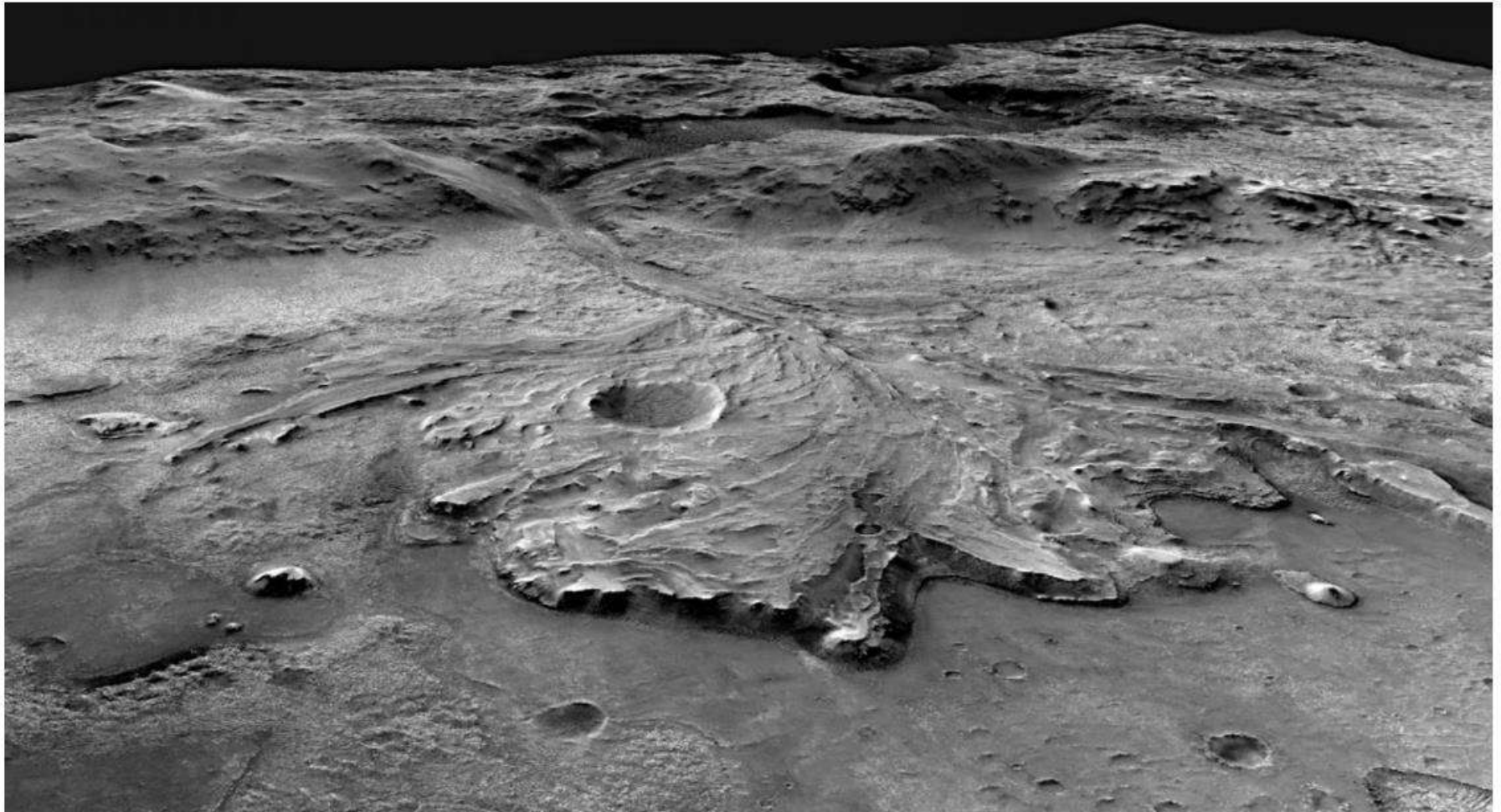


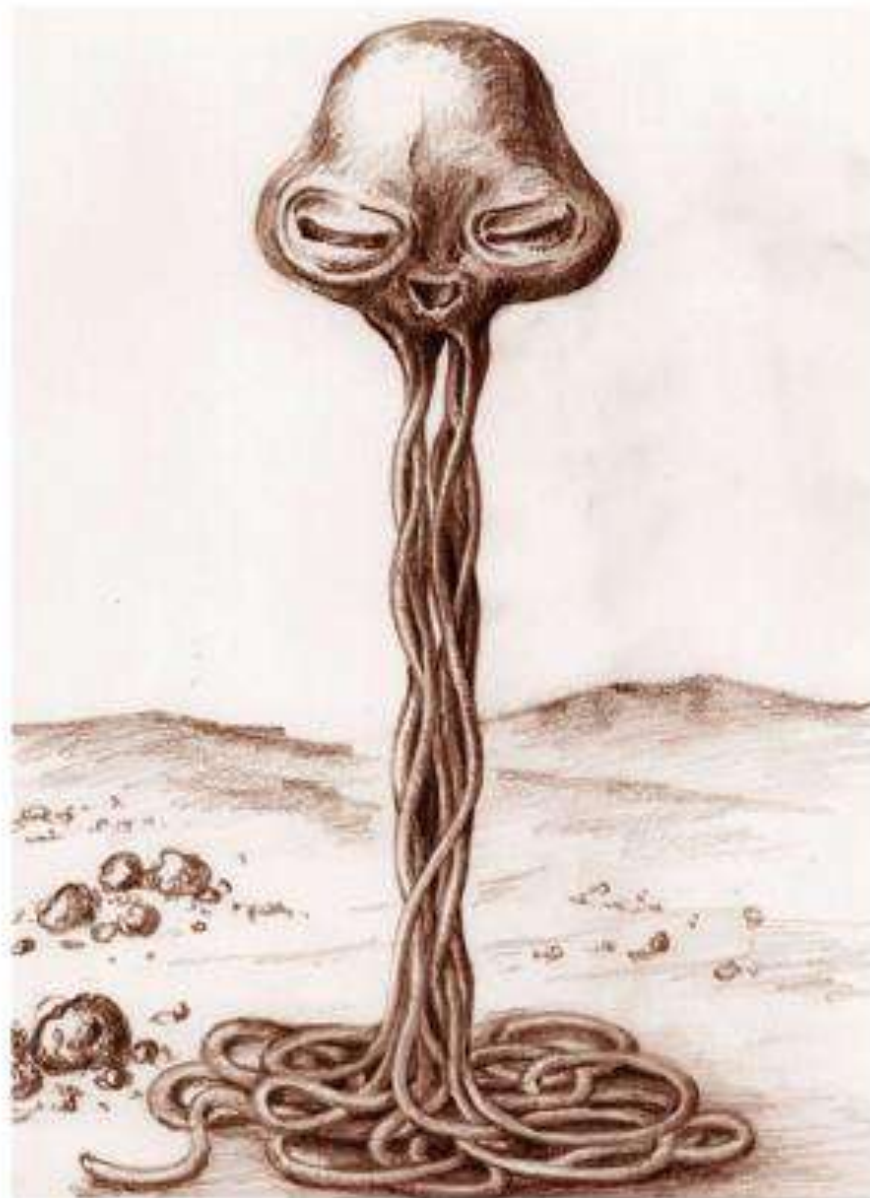
30億年前の想像図



火星探査車パーサヴィアランス着陸地点の詳細な立体画像

© 2020.07.28





火星では高等生物に
進化する前に水が蒸発
してしまった。
生命の痕跡を探してい
る。
バクテリアの化石：
ストラマとライトのような
ものが見つかれば
万々歳。



地球大気の未来

- ・ 暴走温室状態は出現するか？
- ・ 太陽定数が今の 1370 w/m^2 から 1600 w/m^2 に増えると発生。
地球大気の射出限界は 350 w/m^2 。
- ・ 現在の地球においても赤道では暴走条件を満たしている。
極域との熱輸送、物質循環の為、地球平均では暴走状態ではない。

石渡正樹,1997: 大気構造の太陽定数依存性 北大: 学位論文

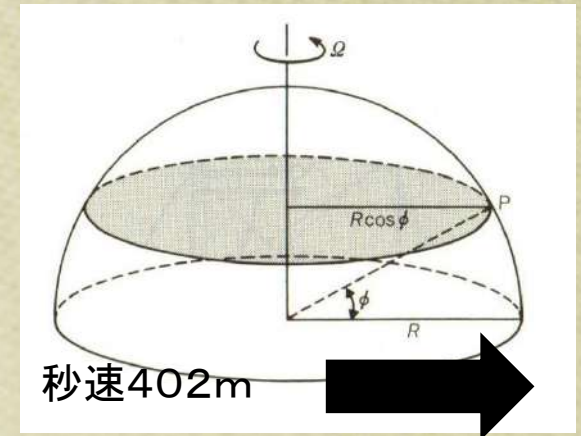
- ・ 暴走温室状態になるのは10億年後

阿部豊2015: 生命の星の条件を探る、文芸春秋 116ページ

- ・ プレートテクトニクス
 - － 海洋プレートの沈み込みがマグマを冷やす
 - － プレートの移動がなくなる
 - ・ 二酸化炭素循環が止まる、大陸移動、海洋深層循環→気候変動
- ・ 地磁気の消失は当分先

第3章 惑星に吹く風

- 地球の赤道上の風
- 赤道上の地面は402m/sで東に動いてる
- 赤道上で「10m/sの東風が吹いている」とは、その風は宇宙から見れば412m/sで東に動いていることになる。



- ・ では、固体表面を持たない木星の風速とは？

金星に吹く風

- ・ 金星は自転方向が他の惑星とは逆。
- ・ 自転周期は243日（地球の日）とゆっくり。
- ・ 4日で金星を1周する風（秒速100m）がある。
- ・ この風はスーパーローテーション（超高速回転）と言われる。
- ・ 空気を超高速で駆動するエネルギー源はどこにあるのか？（博士論文級）

最後のクイズ 木星の大赤斑

これはなんだ 3択

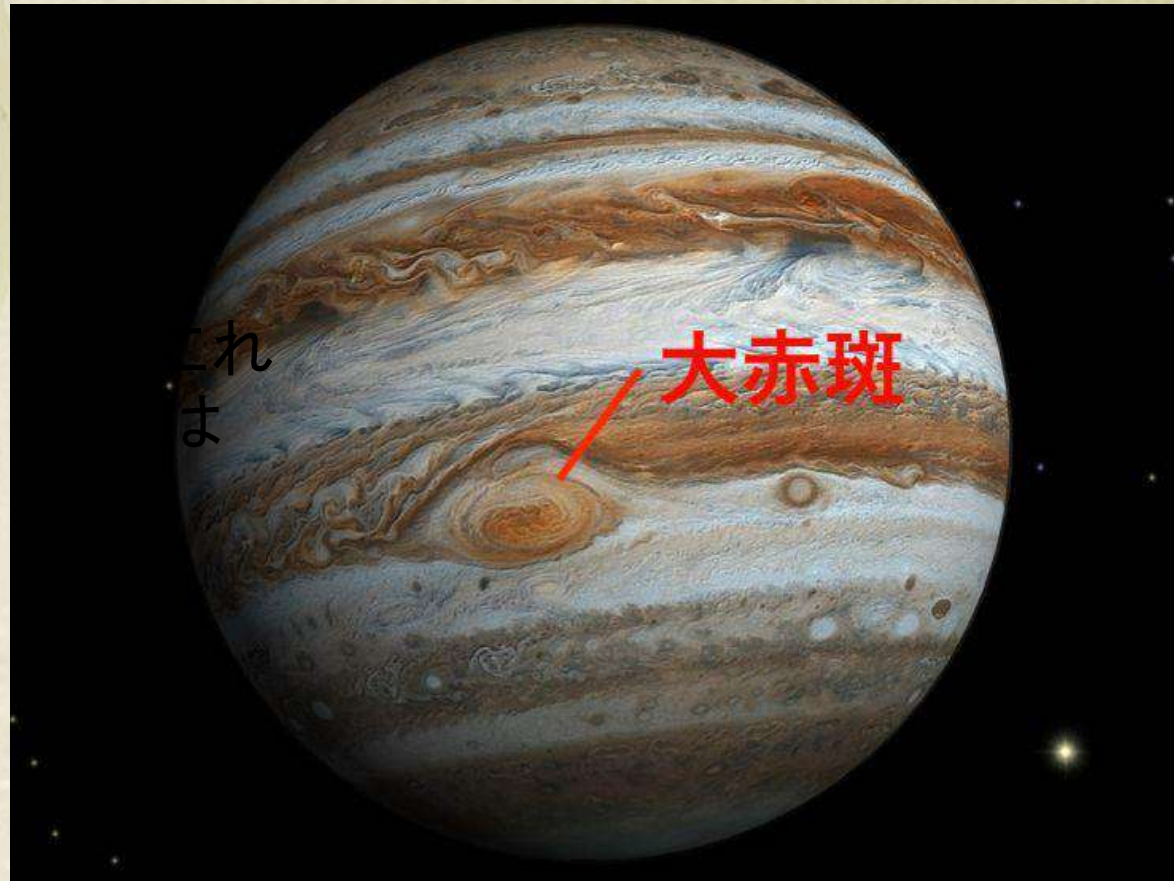
台風？

低気圧？

高気圧？

答

南半球で半時計回りに回転しているので
高気圧



不思議な惑星環境の世界をお楽しみいただけましたか？

- ・ 惑星の大気現象を理解することは、地球の大気現象のより深い理解につながる。

おまけ

「気象現象」とは言わない

「気象」とは「大気の諸現象」のこと

(気象業務法第2条 用語の定義)

第二条 この法律において「気象」とは、大気（電離層を除く。）の諸現象をいう。

ご清聴ありがとうございました。

