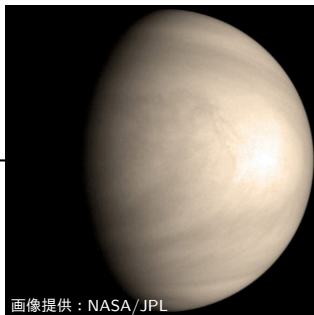


# 金星温故知新セミナー

## はしもとじょーじ

- ▶ 比較惑星気候学
- ▶ 表層環境システムの安定性
  - Hashimoto and Abe (2005) Planet. Space Sci., 53, 839-848.
- ▶ 地表放射率から金星の過去を探る
  - Hashimoto et al. (2008) J. Geophys. Res., 113, E00B24
- ▶ 活火山探索
  - Hashimoto and Imamura (2001) Icarus, 154, 239-243.



画像提供：NASA/JPL

# 比較惑星気候学

金星

地球

火星



画像提供：NASA

温度

灼熱

温暖

酷寒

H<sub>2</sub>O

微量

海洋

氷

大気量

100

1

0.006

進化

?

暑→温

温→冷

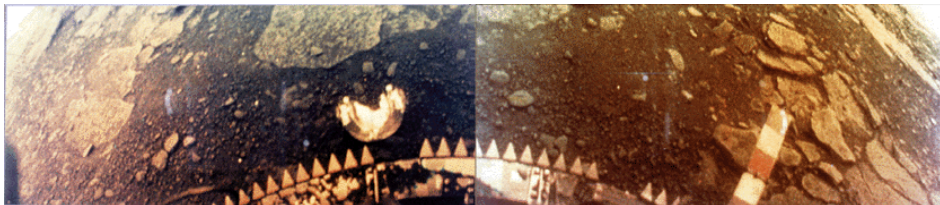
# 金星

大気と雲の温室効果がつくる灼熱の表層環境

- ▶ 高温 地表温度  $\sim 735$  K
- ▶ 乾燥  $\text{CO}_2 \sim 96.5\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} \sim 100$  ppmv
- ▶ 硫酸の雲

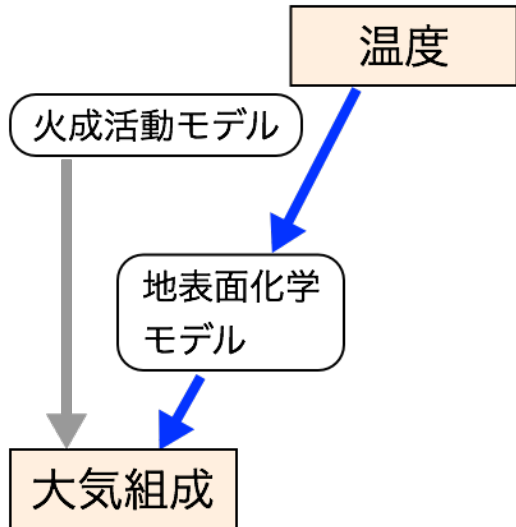
地表の年代  $\leq 10$  億年

- ▶ 地形から解読できるのは最近 10 億年以内



# 金星表層環境モデル 1990年代前半まで

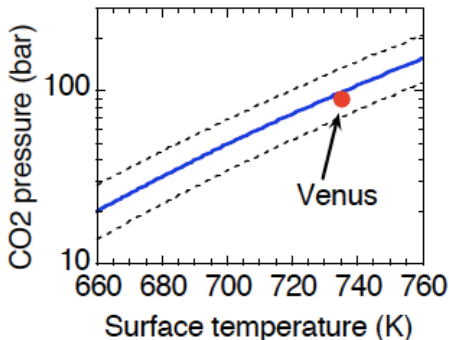
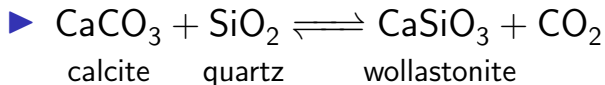
Urey (1952), Lewis (1970), Fegley and Treiman (1992)



# Carbonate Buffer 仮説

Urey (1952), Lewis (1970), Fegley and Treiman (1992)

高温・高圧の金星地表で大気と地表が化学反応する

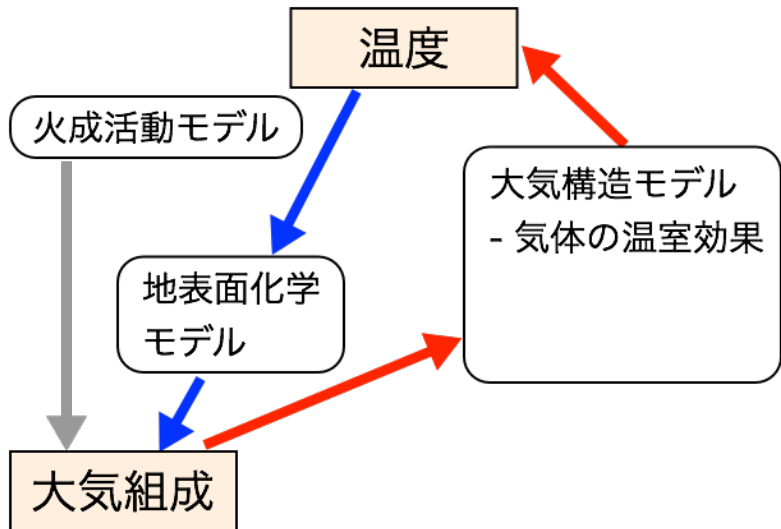


現在の金星の大気量は  
化学平衡で説明するこ  
とができる

# 金星表層環境モデル

1990年代後半

Bullock and Grinspoon (1996), Hashimoto et al. (1997)



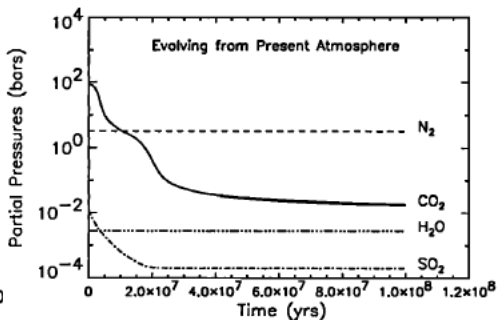
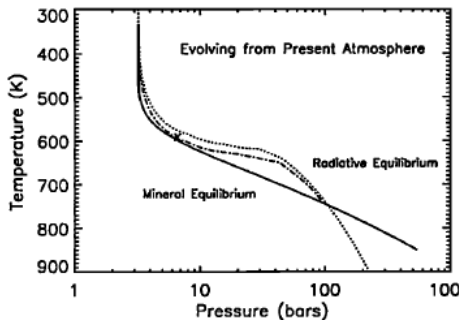
# 化学反応と温室効果のフィードバック

現在の金星は不安定平衡 (Bullock and Grinspoon, 1996)

CO<sub>2</sub> 減少に対するシステムの応答

化学反応 圧力の低下 ⇒ 炭酸塩の分解 ⇒ CO<sub>2</sub> 増加

温室効果 温度の低下 ⇒ 炭酸塩の生成 ⇒ CO<sub>2</sub> 減少



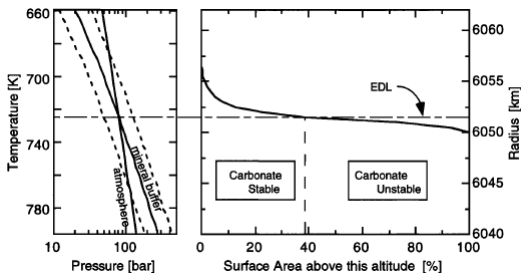
# 不安定が発生する条件

Topographic-Greenhouse Instability (Hashimoto et al., 1997)

$$1 + T_0 \frac{k}{\mu g} \left( \frac{P_S}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \frac{P_C}{P_S} \left( \frac{dH}{dz} \right)_{z=z_{CDF}} < 0$$

$H(z)$  標高が  $z$  より高い場所の割合

$P_C$  地面に固定される  $\text{CO}_2$  の最大量

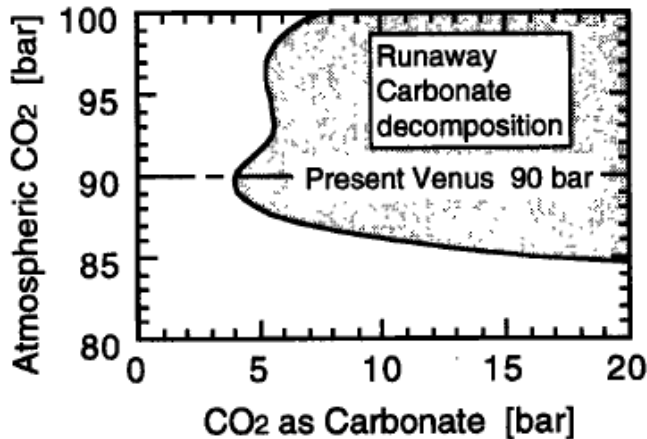


惑星表面の凸凹はシステムを安定化する



# 金星表層にあるCO<sub>2</sub>量の上限

大気と地面が反応するなら，システムが安定であるという条件から金星表層にあるCO<sub>2</sub>量が制約される



現在の金星が安定であるなら炭酸塩中のCO<sub>2</sub>は5 bar以下

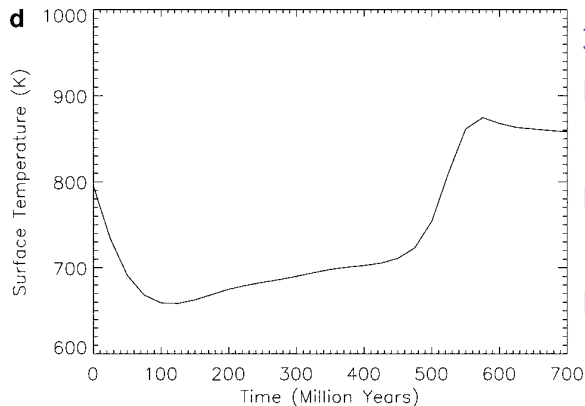


表層のCO<sub>2</sub>はほぼ全てが大気に出ている

# 現在の金星は遷移の途中？

Bullock and Grinspoon (2001)

- ▶ 熱収支：1次元鉛直放射対流平衡
- ▶ 化学：火山噴火＋地表面化学反応＋大気逃散



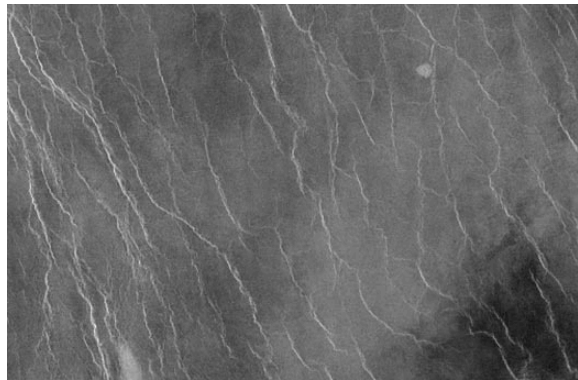
地表温度の時間発展

- ▶  $t = 0$   
火山ガスの放出
- ▶  $t \lesssim 100$  m.y.  
地表面化学反応
- ▶  $t \gtrsim$  数 100 m.y.  
大気逃散

# 気候変動が地形を形成する

Solomon et al. (1998)

- ▶ 地表温度が  $\sim 100$  K 上昇すると  
地表付近の岩石が暖まって膨張して**圧縮**の応力場  
もっと下まで暖まって膨張すると**伸張**の応力場

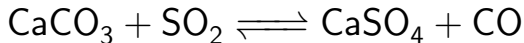


リンクル・リッジ  
金星の平原によく  
ある線状の地形

# 現在は遷移の途中なのか？

Bullock and Grinspoon のモデルが平衡にならないのは、  
地表に炭酸塩が存在すると仮定したから

- ▶ 地表の炭酸塩は大気中の  $\text{SO}_2$  と反応する



この反応が平衡になるのは  $\text{SO}_2 \sim 1 \text{ ppmv}$

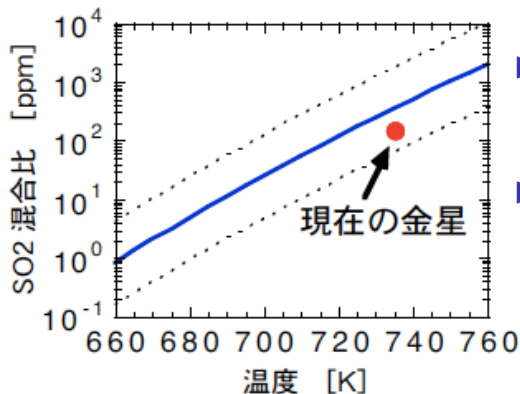
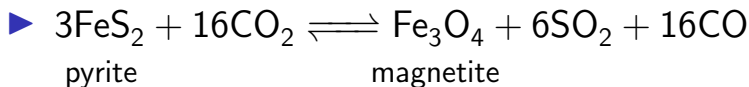
- ▶ 現在の金星大気は  $\text{SO}_2 \sim 150 \text{ ppmv}$

金星の地表に炭酸塩が存在することを示唆する  
観測事実はない

- ▶ Carbonate Buffer 仮説の呪縛？

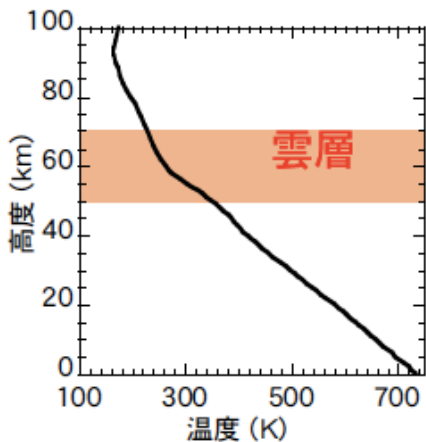
# Pyrite Buffer 仮説

Zolotov (1991, 1995), Klose et al. (1992)



- ▶ 金星大気中の SO<sub>2</sub> ~ Pyrite Buffer
- ▶ レーダー反射率？
  - ・高地 pyrite
  - ・低地 magnetite

# 金星表層環境とSO<sub>2</sub>



(VIRA; Seiff et al., 1986)

温室効果 (Pollack et al. 1980)

---

CO<sub>2</sub> 463 K

H<sub>2</sub>O 218 K

SO<sub>2</sub> 52 K

Clouds 113 K

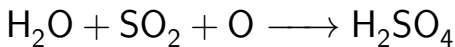
---

アルベド 0.77

惑星の全面を覆う雲が惑星のアルベドを規定

金星の雲 硫酸

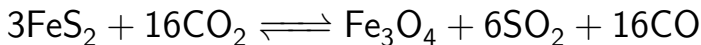
硫酸は光化学反応で生成



# 地表面化学反応と雲のフィードバック

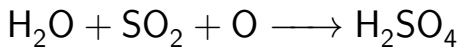
## 地表面化学反応

- ▶ 温度が変わると大気  $\text{SO}_2$  量が変わる



## 硫酸の雲

- ▶ 大気  $\text{SO}_2$  量が変わると硫酸生成量が変わる



## 惑星の熱収支

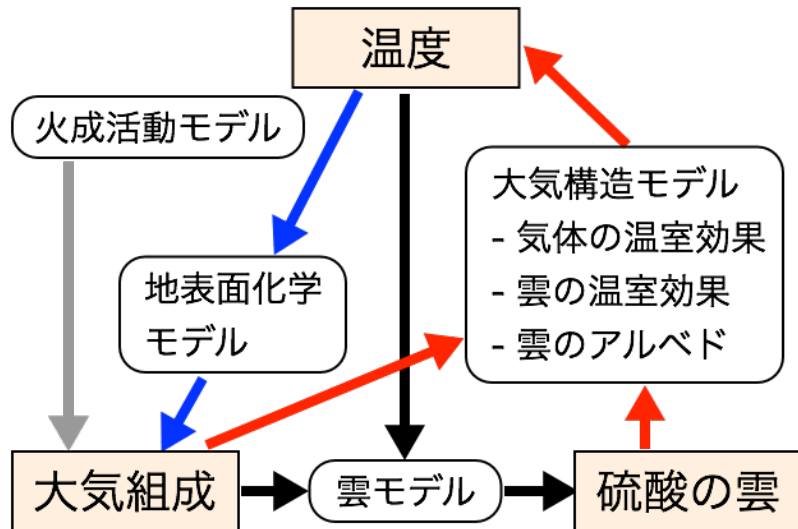
- ▶  $\text{SO}_2$  の温室効果
- ▶ 雲の温室効果
- ▶ 雲のアルベド

雲モデル Hashimoto and Abe (2001)

- ▶ 入力：大気組成と大気温度
- ▶ 出力：雲水量と雲粒サイズ

# 金星表層環境モデル

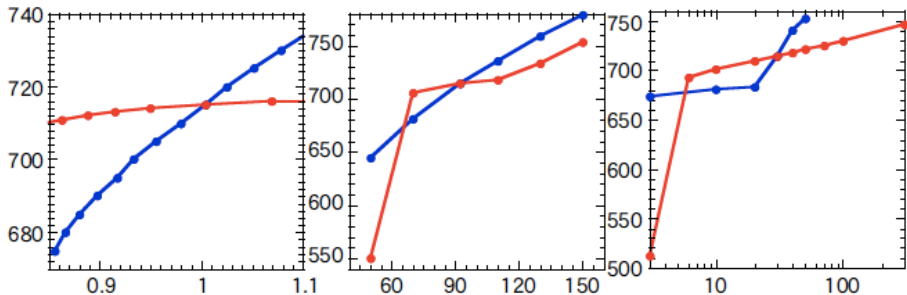
Hashimoto and Abe (2005), Hashimoto and Abe (2000)





# Pyrite による表層環境の安定化

Hashimoto and Abe (2000, unpublished)



(a) 有効太陽放射

(b) 大気量 [bar]

(c) 水蒸気量 [ppm]

赤 : Pyrite Buffer

青 : SO<sub>2</sub> 濃度一定

- ▶ Pyrite Buffer は雲を介したフィードバックによって地表温度の変動を小さくする #雲モデルに依存

# 安定化の時間スケール

---

地表面の化学反応の速度が時間スケールを規定する

- ▶ Pyrite Buffer 反応の時間スケール  
～数百万年 (Fegley et al., 1995)
- ▶ 熱応力による地形形成 (Solomon et al., 1998) は可能

全球一斉更新 (Global Resurfacing)

- ▶ ～5億年前に大規模な火成活動  
⇐ クレータ年代学 (e.g., Strom et al., 1994)
- ▶ 溶岩噴出量  $0.4 - 1.2 \times 10^9 \text{ km}^3$  (Basilevsky et al., 1997)  
推定放出量     $\text{H}_2\text{O}$  45-135 ppm  
                   $\text{SO}_2$  2400-7200 ppm

# Carbonate モデルと Pyrite モデル

Hashimoto and Abe (2005)

Carbonate モデル

Pyrite モデル

現在の状態

たまたま

平衡

安定性

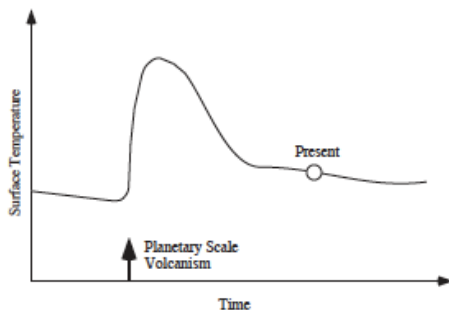
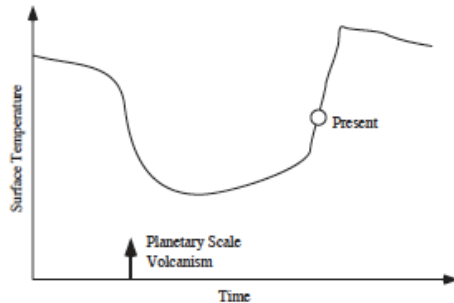
不安定 (遷移中)

安定 (定常)

温度

説明なし

安定化機構あり



# Carbonate モデルと Pyrite モデル

Hashimoto and Abe (2005)

	Carbonate モデル	Pyrite モデル
現在の状態	たまたま	平衡
安定性	不安定 (遷移中)	安定 (定常)
温度	説明なし	安定化機構あり
CO <sub>2</sub> 量	説明なし *	説明なし
H <sub>2</sub> O 量	説明なし	説明なし
SO <sub>2</sub> 量	説明なし	平衡
地表の鉱物		
高地	CaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>
低地	CaSiO <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>