

初期火星大気・水循環結合モデルを用いた地下水分布の長期シミュレーション

課題責任者

鎌田 有紘

東北大学大学院理学研究科

著者

鎌田 有紘*1, 黒田 剛史*1, 小玉 貴則*2, 丹 秀也*3

*1 東北大学大学院理学研究科, *2 東京科学大学地球生命研究所,

*3 海洋研究開発機構 超先鋭研究開発部門 超先鋭研究開発プログラム

キーワード: 惑星大気, 火星, 水循環, 地下水, 全球気候モデル

1. はじめに

地球のすぐ外側の軌道を回る火星は、地球外の生命の痕跡を探求する上で最も重要な天体の一つとなっている。1971年に米国のマリナー9号が初めて周回軌道に入ってから、これまで数多くの周回・着陸機による探査が行われてきた。一連の火星探査によって、火星表層には太古の海岸線と思われる地形[1,2]、三角州や扇状地[1]、バレーネットワークと呼ばれる樹状に分岐した地球の河川のような地形[3,4]、アウトフローチャンネルなどの大規模な流水地形、さらにはこうした水の影響を受けて形成された含水粘土鉱物[5]などが観測されている(図 1-3)。これらの地質学的証拠から、約 38.5 億年~36 億年前(後期ノアキス紀~前期ヘスペリア紀)にかけての太古の火星は、豊富な液体の水(約 100~1000m)と厚い大気(約 0.9 気圧)を有し[6,7]、温暖な気候が一定期間継続していた惑星であると考えられるようになった[3,5]。しかし、表層の水はその後次第に失われ、火星は荒涼とした現在の姿になったと考えられている。これまでの観測や室内実験による成果から、宇宙空間に散逸した水は一部にとどまり[8]、大部分の水は地下深部に地下水として移動したと考えられている[9]、その詳細は観測的にも数値計算的にも未だ明らかにされていない。

そこで本公募課題では、我々がこれまでに開発してきた初期火星全球大気・水循環モデル[10-12]を改良し、地球シミュレータで実行することで、初期火星における大気・海洋・陸面・河川間での複雑な水循環の描像を表現した。具体的には温暖な初期火星を再現するために 2 気圧程度の二酸化炭素大気と微量の水素大気、さらに真の極移動(TPW)を考慮した上で、初期の水源として北半球の低地に海洋を仮定した。次節以降において、我々が本公募課題で用いたモデル水循環モデルのうち、全球河川モデルと地下水モデルの概略を示す。

2. 全球河川モデルの概要

全球で河川をシミュレーションするにあたって、地形は流出方向や流量を決定する上で重要な要素となる。地球の河川シミュレーションでは一般に Single Flow Direction (SFD) Multiple Flow Direction (MFD) が使用される。SFD では、各グリッドは隣接する 8 つのグリッドのうち、最も急な下り勾配を持つグリッドに全て落水す

ると考える。この手法は 1 km 未満の比較的小さいグリッドスケールで比較的正確に流れ方向を導き出す。しかしながら、1 km 以上の粗いグリッドでは、人工的に直線的な河川を形成し、正確な流出方向を表現できないことで知られる[13]。一方で、MFD では、各グリッドは隣接する 8 つのグリッドのうち、下り勾配を持つ全ての周囲のグリッドに分配して落水すると考える。この方法は SFD に比べてより現実的な解を与えることが地球河川の水文学研究からも示されている。我々の全球河川モデルでは MFD を採用し、古火星での河川のシミュレーションを行なっている。全球河川の計算にあたって、時刻 t における各グリッドにおける流域貯留量 $D(t)$ [m³] と河川貯留量 $S(t)$ [m³] の時間発展を以下のように与える。

$$\frac{\partial D(t)}{\partial t} = (1 - \phi) \sum_i q_i - \beta D(t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial S(t)}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2)$$

$$Q_{in}(t) = \phi \sum_i q_i(t) + \beta D(t) + \sum_{up} Q_{out}(t) \quad (3)$$

β と ϕ は経験的なパラメータであり、それぞれ $1.67 \times 10^2 \text{ day}^{-1}$, 0.5 で与えられる[14]。 $\sum_i q_i$ は各土壌層からの流出であり、 Q_{in} , Q_{out} はそれぞれ各グリッドにおける流入量と流出量 [m³ s⁻¹] である。流出量の計算にあたっては貯留関数法を用いている。

また、我々の全球河川モデルでは河川流量の他に、河川温度の診断とそれに伴う河川凍結も計算している。河川温度 $T_{riv}(t)$ の時間発展は以下のように与えられる。

$$C_{riv} h_{riv} \frac{\partial T_{riv}(t)}{\partial t} = (1 - \alpha_{riv}) S^\downarrow + \varepsilon_{riv} L^\downarrow - \varepsilon_{riv} \sigma T_{riv}^4 + \sum_{up} Q_{thermal}(t) \quad (4)$$

C_{riv} は河川の体積熱容量、 h_{riv} は水深、 α_{riv} は可視光アルベド、 ε_{riv} は赤外輻射率、 σ はシュテファン・ボルツマン定数、 $\sum_{up} Q_{thermal}(t)$ は上流からの熱輸送量である。さらに、河川は海洋に注ぎ込むことで、海洋に水の他に熱エネルギーを供給する。また、一定ステップごとに海洋水位の変化を計算し、海から陸に変化、もしくは陸から海に変化するなどの全球領域の海陸判定を実施している。

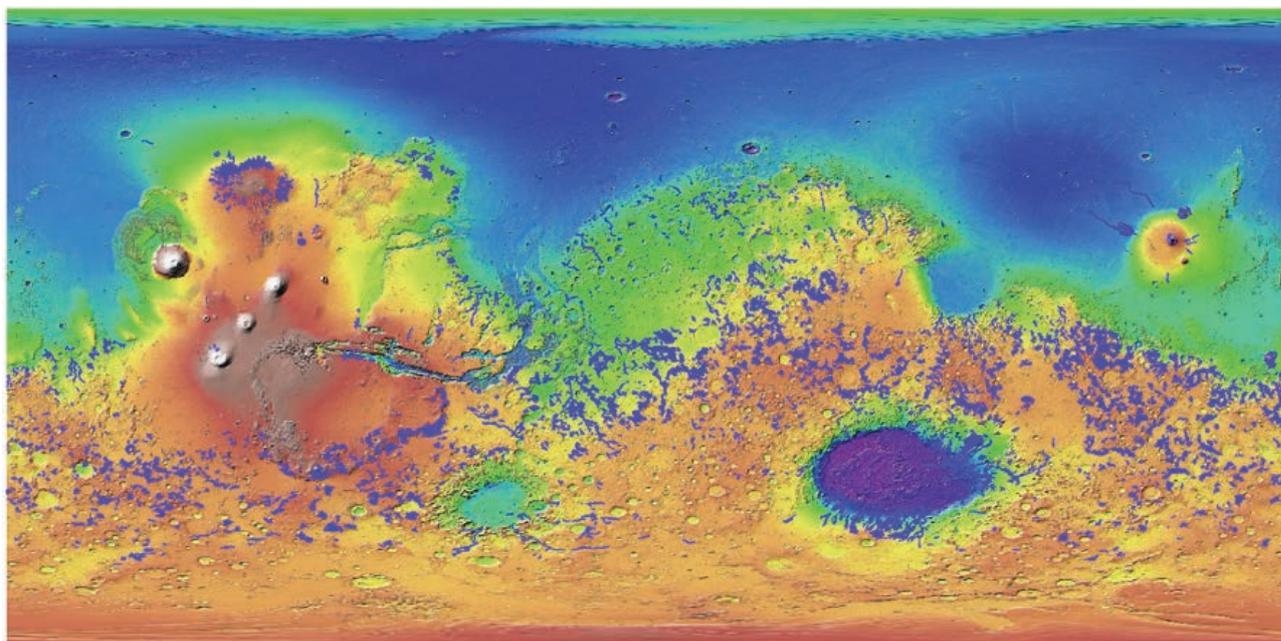


図1 火星全球におけるバレーネットワーク（青点）の分布図（引用文献[4]の QGIS データをもとに作成）
背景カラー地図は Mars MGS MOLA Global Color Shaded Relief 463m から取得

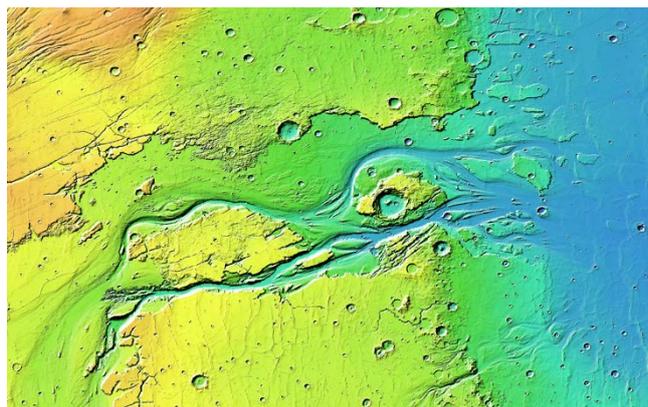


図2 Kasei Valles（北緯 24.6°，西経 65.0°）の拡大図

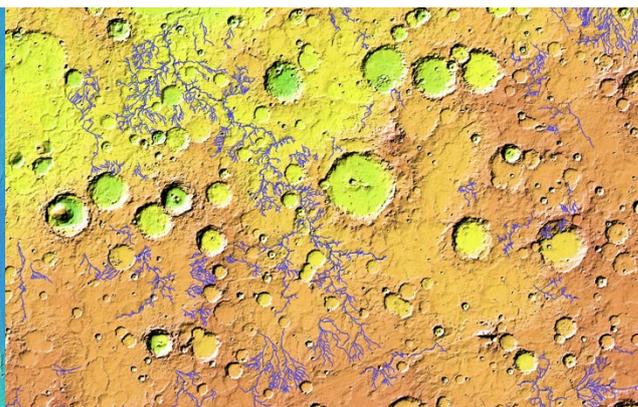


図3 Naktong Vallis（北緯 5.3°，西経 327.1°）の拡大図

3. 地下水モデルの概要

不飽和(有効飽和度 S_e が1未満)の領域においては、以下に示す Klute の水分鉛直拡散方程式[14]を用いた。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{dK}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (5)$$

ここで、 θ は体積含水率、 D は水分拡散係数($D = K/C$)、 K は不飽和透水係数、 C は比水分容量である。不飽和透水係数、比水分容量は以下の式で与えられるものとする。

$$K = K_s S_e^{0.5} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2 \quad (6)$$

$$C = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (7)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (8)$$

K_s は飽和透水係数、 S_e は有効飽和度、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 α 、 n 、 $m = 1 - 1/n$ は van Genuchten モデル[15]のパラメータである。

不飽和地下水モデルで各ステップにおいて計算されたある体積 V_i の層の体積含水率 θ_i がある臨界含水率 θ_c を超過する場合、その層から河川に出水すると仮定する。

$$q_i = (\theta_i - \theta_c) V_i \quad (9)$$

地下全層に対する q_i の総和が式(1)・(3)に与えられることで、河川流量などが計算される。

また、陸面モデルでの地下温度計算と連動して、地下各層の温度が氷点を下回った場合には凍結、上回った場合には融解の計算を実行する。

4. 結果の概要

本モデルで得られた動作実験における河川分布及び地下 10m における地下水分布を下記に示す。動作実験では初期火星を想定し、太陽定数 441.0 W/m^2 、自転軸傾斜角を 40 度、軌道離心率を 0 とした。また、 2 気圧の CO_2 大気、温室効果気体として 6% の H_2 を仮定した。初期水源としては標高 -2.3km 以下を一様に海洋/湖と仮定した。

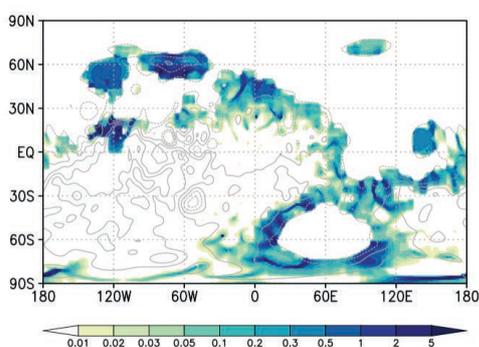


図4 年平均の全球河川流量分布図[mm/sol]

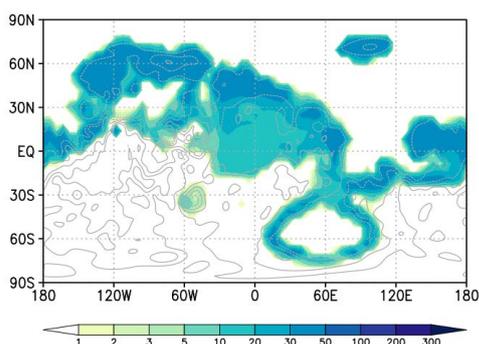


図5 年平均の土壌(地下10m)中の地下水量[kg/m³]

次年度以降では、本モデルを発展させた地下水の水平流動を考慮したシミュレーションを予定している。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 創発的研究支援事業 (Grant 番号 : JPMJFR212U) の支援を受けている。また、独立行政法人日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (課題番号 : JP22H00164, JP23K13166) の支援も受けている。

文献

- [1] Di Achille, G., and Hynek, B. M., “Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys”, *Nat. Geosci.*, 3, 459-463, (2010).
- [2] Citron, R. I., Manga, M., and Hemingway, D. J., “Timing of oceans on Mars from shoreline deformation”, *Nature*, 555, 643-646, (2018).
- [3] Hynek, B. M., Beach, M., and Hoke, M. R. T., “Updated global map of Martian valley networks and implications for

climate and hydrologic processes”, *J. Geophys. Res. Planets*, 115(E9), (2010).

- [4] Alemanno, G., Orofino, V., and Mancarella, F., “Global map of Martian fluvial systems: Age and total eroded volume estimations”, *Earth Space Sci.*, 5(10), 560-577, (2018).
- [5] Ehlmann, B. L., and Edwards, C. S., “Mineralogy of the Martian Surface”, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 42, 291-315, (2014).
- [6] Kurokawa, H., Sato, M., Ushioda, M., Matsuyama, T., Moriwaki, R., Dohm, J.M., and Usui, T., “Evolution of water reservoirs on Mars: Constraints from hydrogen isotopes in martian meteorites”, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 394, 179-185, (2014).
- [7] Kite, E. S., Williams, J. -P., Lucas, A., and Aharonson, O., “Low palaeopressure of the Martian atmosphere estimated from the size distribution of ancient craters”, *Nat. Geosci.*, 7, 335-339, (2014).
- [8] Jakosky, B.M., Brain, D., Chaffin, M., Curry, S., Deighan, J., Grebowsky, J., Halekas, J., Leblanc, F., Lillis, R., Luhmann, J.G., Andersson, L., Andre, N., Andrews, D., Baird, D., Baker, D., Bell, J., Benna, M., Bhattacharyya, D., Bougher, S., Bowers, C., Chamberlin, P., Chaufray, J.-Y., Clarke, J., Collinson, G., Combi, M., Connerney, J., Connour, K., Correia, J., Crabb, K., Crary, F., Cravens, T., Crismani, M., Delory, G., Dewey, R., DiBraccio, G., Dong, C., Dong, Y., Dunn, P., Egan, H., Elrod, M., England, S., Eparvier, F., Ergun, R., Eriksson, A., Esman, T., Espley, J., Evans, S., Fallows, K., Fang, X., Fillingim, M., Flynn, C., Fogle, A., Fowler, C., Fox, J., Fujimoto, M., Garnier, P., Girazian, Z., Groeller, H., Gruesbeck, J., Hamil, O., Hanley, K.G., Hara, T., Harada, Y., Hermann, J., Holmberg, M., Holsclaw, G., Houston, S., Inui, S., Jain, S., Jolitz, R., Kotova, A., Kuroda, T., Larson, D., Lee, K., Lee, C., Lefevre, F., Lentz, C., Loo, D., Lugo, R., Ma, Y.-J., Mahaffy, P., Marquette, M.L., Matsumoto, Y., Mayyasi, M., Mazelle, C., McClintock, W., McFadden, J., Medvedev, A., Mendillo, M., Meziane, K., Milby, Z., Mitchell, D., Modolo, R., Montmessin, F., Nagy, A., Nakagawa, H., Narvaez, C., Olsen, K., Pawlowski, D., Peterson, W., Rahmati, A., Roeten, K., Romanelli, N., Ruhunusiri, S., Russell, C., Sakai, S., Schneider, N., Seki, K., Sharrar, R., Shaver, S., Siskind, D.E., Slipiski, M., Soobiah, Y., Steckiewicz, M., Stevens, M.H., Stewart, I., Stiepen, A., Stone, S., Tennishev, V., Terada, N., Terada, K., Thiemann, E., Tolson, R., Toth, G., Trovato, J., Vogt, M., Weber, T., Withers, P., Xu, S., Yelle, R., Yiğit, E., and Zurek, R., “Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time”, *Icarus*, 315, 146-157, (2018).
- [9] Usui, T., Alexander C. M. O. D., Wang, J., Simon, J. I., and Jones, J. H., “Meteoritic evidence for a previously unrecognized hydrogen reservoir on Mars”, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 410, 140-151, (2015).
- [10] Kamada, A., Kuroda, T., Kasaba, Y., Terada, N., Nakagawa, H., and Toriumi, K., “A coupled atmosphere-hydrosphere global

climate model of early Mars: A ‘cool and wet’ scenario for the formation of water channels”, *Icarus*, 338, (2020).

[11] Kamada, A., Kuroda, T., Kasaba, Y., Terada, N., and Nakagawa, H., “Global climate and river transport simulations of early Mars around the Noachian and Hesperian boundary”, *Icarus*, 368, 114618, (2021).

[12] Kamada, A., Kuroda, T., Kodama, T., Kasaba, Y., and Terada, N., Evolution of ice sheets on early Mars with subglacial river systems, *Icarus*, 385, 115117, (2022).

[13] Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O., “The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models”, *Hydrol. Process.*, 5(1), 59-79, (1991).

[14] Klute, A., “THE DETERMINATION OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND DIFFUSIVITY OF UNSATURATED SOILS”, *Soil Soc.*, 113(4), 264-276, (1972).

[15] van Genuchten, M. T., “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”. *Soil Soc. Am. J.*, 44, 892-898, (1980).