

回転する水路に形成されるサイクリックステップ

Cyclic steps formed in a rotating channel.

北海道大学大学院工学院	○学生員	有雅 正修(Masanobu Ariga)
北海道大学大学院工学研究院	正員	山田 朋人(Tomohito Yamada)
大阪工業大学情報科学部	正員	横川 美和(Miwa Yokokawa)
北海道大学大学院工学研究院	正員	泉 典洋(Norihiro Izumi)

1. はじめに

近年の惑星探査機の発達に伴い、実測だけでなく地形変化シミュレーションの技術も向上している。特に流体が作用した惑星の地形形成メカニズムについての理解が進んできた。例えば惑星が自転の影響に伴い、流体が極から遠ざかるほど強力なコリオリ力を受けることで形成された地形の議論が活発に行われている。

例えば太陽周回軌道の小惑星ベスタの南極冠の地形はらせん構造を描いていると報告されている¹⁾。流体が極中心から赤道方向に流れる際、強力な進行方向右向きのコリオリ力を受け、曲線を描き流下している。

図-1 はアメリカ航空宇宙局(NASA)所有の火星惑星探査機マーズ・グローバル・サーベイヤー (Mars Global Surveyor) が撮影した火星北極冠の画像、図-2 は同極冠の一部の縦断面図を示す。図-1 内の白く見える箇所は粉状のドライアイスが積もることで形成され、その下には固形のドライアイスや塵が堆積していると報告されている⁴⁾。その堆積物上を火星北極冠中心から放射状にカタバ風と呼ばれる滑降風が流下方向右向きのコリオリ力を受け、流下することで地形形成が行われると考えられる。図-2 の縦断面図はカタバ風により波状の地形形成が行われた結果であると考えられている⁵⁾。最近の研究ではこのらせんを描いた波状の地形がサイクリックステップである可能性が高いと言われている⁵⁾。

サイクリックステップとは上下流端に跳水を伴い、波状の地形が上流方向に伝搬していく河床波の一種である⁶⁾。跳水とはフルード数が射流から常流へと遷移する際に発生する水理現象の一つである。他の河床波として河床が下流伝播、水面形と河床が逆位相、常流条件で発生するという特徴を有する Dune、河床が上流伝搬、水面形と河床が同位相、射流条件で発生するという特徴を有する Antidune などが挙げられる。Winterwerp et al.はサイクリックステップを現地調査により観測し⁷⁾、Parker は同形態の河床波をサイクリックステップと定義した⁸⁾。さらに Taki and Parker⁹⁾は5cm幅の水槽内でサイクリックステップを再現し、Powell et al.^{10,11)}は水槽幅を制限しない実験装置を用いることで跳水を伴うデルタ地形形成実験を行った。

本研究の目的は実験装置内にサイクリックステップを発生させ、そこに回転の効果を加えた際の挙動を観察、分析するものである。本研究の成果は、回転場内における河床波の挙動予測だけでなく、流体を伴う地形形成の理解に有用である。

2章において実験装置と実験方法の説明を行い、3章お

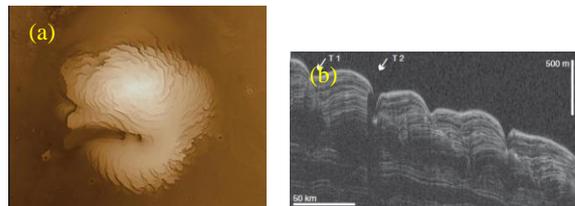


図-1(a) MGS が撮影した火星北極冠の画像²⁾

(b)火星北極冠の一部の縦断面図を Mars Reconnaissance Orbiter's Shallow Radar(SHARAD)により得た画像^{3,5)}

よび4章で実験についての議論を行い、最後にまとめを5章に記す。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

図-3 に本研究で用いる実験装置の概念図を示す。直径100cm、深さ70cmのタンク内部に堆積板を設置する。なお堆積板の直径は90cmである。さらに図-4に示す5cm幅のアクリル水槽を堆積板上に設置し、水槽内に水と砂を流下し、側方および上部から堆積状況を撮影する実験である。またこのタンクは回転台の上に設置しており、回転の効果を加えることができる。2.2.1において非回転実験、2.2.2において回転実験の方法を記す。なお本実験では硅砂7号(平均粒径:0.2mm)を用いて実験を行う。

2.2 実験方法

図-4に示すアクリル水槽内の堆積板中央部から水(50~100cm³/s)と砂(0.69~5.1 cm³/s)を攪拌しながら流下させ、サイクリックステップの発生条件を調べる。回転台を作動させず、非回転のまま実験を行う。水と砂を流下させ実験開始から約10分間動画を撮影し、その結果を3章に記す。また、3章の非回転実験でサイクリックステップが発生した条件に回転の効果(0rpm~4.2rpm)を加えた実験を行った。水と砂を流下させ実験開始から約10分間動画を撮影し、その結果を4章に記す。

3. 非回転実験

3.1 実験結果

非回転実験における2つのパラメータである水と砂の流量をまとめたものを表-1、各実験の詳細水理条件を表-2に記す。本実験では水の流量を50~70(cm³/s)、70~80(cm³/s)、80~100(cm³/s)、砂の流量を0.694(cm³/s)、2.0(cm³/s)、5.1(cm³/s)とそれぞれ3段階に分け、河床波の形成条件を調べた。ここで表-2に示したフル

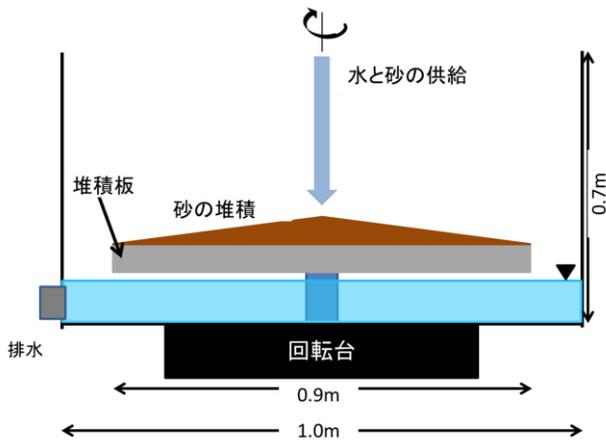


図-3 実験を行うタンクの縦断面図

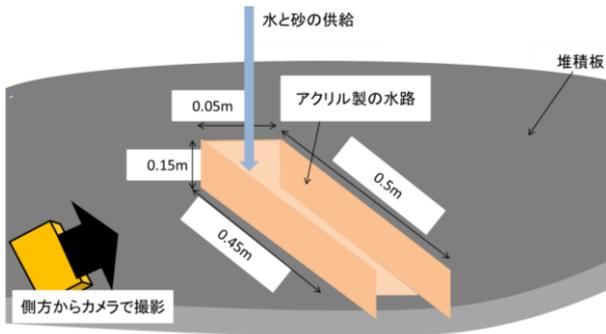


図-4 堆積板上に設置したアクリル水槽の斜視図

ード数、シールズ数については以下に示す。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}, \Theta = \frac{\tau_b}{\rho R g D}$$

v は水の流速、 h は計測した水深、 τ_b は底面の平均せん断力、 ρ は水の密度、 R は砂の水中比重、 D は砂の平均粒径、 g は重力加速度である。

まずサイクリックステップが形成した実験について述べる。図-5(a),(b),(c)に示すものは、実験 141202④の実験開始から約 7 分後の河床を(a)(b)(c)の順に 11 秒間隔で撮影した写真である。なお流下方向は図-5 内左から右方向である。下流で発生したステップが上流に伝搬していることが図-5 から見て取れる。上記のような現象が 10 分間の実験中に繰り返し発生した。

次にサイクリックステップが形成しなかった実験について述べる。図-6 はサイクリックステップが形成しなかった 141202②の実験結果写真を示す。図-5 同様に実験開始から約 7 分後と 10 分後の河床を(a),(b)の順に撮影した際の結果である。図-6(a)と(b)の間に 3 分の時間差があるが、図からわかるように河床に変化が全く見られない。

3.2 実験結果の考察

本研究では Taki and Parker(2004)に基づきサイクリックステップの分析を行う。表-2 の 141202④の欄のステップ前後のフルード数について着目する。ステップの上流側では射流、下流側で常流となっていることがわかり、跳水を伴うステップが形成されていると判断するこ

表-1 非回転実験における水と砂の流量のまとめ (表内の数字は実験名を示す)

水	砂	0.694(cm ³ /s)	2.0(cm ³ /s)	5.1(cm ³ /s)
~70(cm ³ /s)		141203⑥	141202① 141202② 141204③	141203③ 141203⑤
70~80(cm ³ /s)		141203⑦	141204① 141203① 141202④	141204②
80~(cm ³ /s)			141203②	141203④

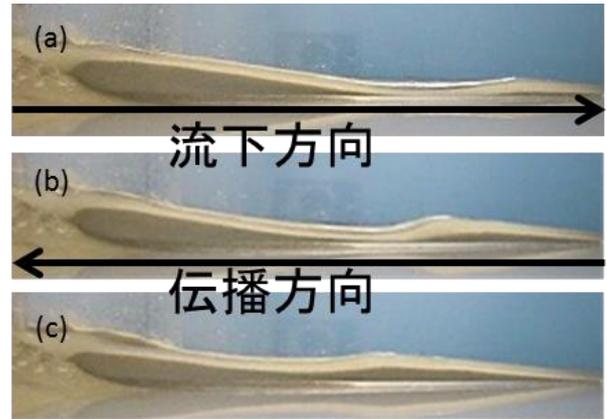


図-5 実験開始から(a)6分50秒

(b)7分01秒(c)7分12秒 経過後の河床形状の変化

とができる。前述のようにこのステップが 10 分の実験時間中に繰り返し発生すること、跳水が発生していること、上流に伝搬していくことからこの現象はサイクリックステップであると言える。また図-7 は横軸に相対粗度、縦軸にシールズ数をとったものである。ここでシールズ数とは底面せん断力を無次元化し、底面のせん断断さを示す無次元数である。図-7 に示すシールズ数は 2.0 以上の値が必要という結果は Taki&Parker の結果と一致した。またサイクリックステップ発生には相対粗度 (hn/D)の値が本研究の成果として、36 以上は必要という結果を得た。だが実験 141203⑦では相対粗度 36.482 という値を示したにも関わらずサイクリックステップは形成されなかった。これはサイクリックステップの発生にせん断力が重要なポイントで、十分なせん断力を得た水利条件を満たし、かつ相対粗度が 36 以上の時本実験でサイクリックステップが発生するということがわかった。

4. 回転実験

4.1 実験結果

本章で対象とする実験は 3 章においてサイクリックステップが形成した実験の水利条件を満たした上で、回転の効果を加えたものである。なお水利条件は表-3 に示す実験 141202④の砂の流量 2.0 cm³/s は固定し、水の流量を 76.2~78.52cm³/s という水利条件を用いた。実験ごとに 0rpm から 4.2rpm まで 7 通りの回転数で実験を行った。4.0rpm までは 3 章に示したものと同様にステップの前後で跳水を伴うサイクリックステップの発生が見られた。一方、4.2rpm に達すると発生が見られな

表-2 非回転実験における水理条件と各パラメータ

実験名	水(cm ³ /s)	給砂量(cm ³ /s)	水/給砂量	水深(cm)		ステップ 伝搬速度(cm/s)	勾配n	フルード数 ステップ上流側	フルード数 ステップ下流側	CSの発生 有無	相対粗度	シールズ数
				ステップ上流側	ステップ下流側							
141201①	30.7	2.0	15.3	-	-	-	0.121	-	-	×	29.660	1.911
141201②	51.2	2.0	25.6	-	-	-	0.098	-	-	×	36.318	1.835
141202①	66.5	2.0	33.2	-	-	-	0.081	-	-	×	36.252	1.520
141202②	33.7	2.0	16.9	-	-	-	0.105	-	-	×	29.693	1.673
141202③	33.7	2.0	16.9	-	-	-	0.108	-	-	×	23.300	1.377
141202④	76.2	2.0	38.1	0.599	1.323	0.846	0.133	1.050	0.707	○	40.536	2.746
141203①	70.2	2.0	35.1	0.545	1.190	0.586	0.138	1.114	0.754	○	39.086	2.752
141203②	95.6	2.0	47.8	0.487	1.192	0.802	0.107	1.796	0.882	○	52.829	2.699
141203③	65.4	5.1	12.8	-	-	-	0.080	-	-	×	33.450	1.397
141203④	88.8	5.1	17.4	0.600	1.192	1.212	0.120	1.220	0.866	○	42.975	2.583
141203⑤	57.6	5.1	11.3	-	-	-	0.101	-	-	×	30.386	1.637
141203⑥	57.6	0.7	82.9	-	-	-	0.028	-	-	×	31.506	0.470
141203⑦	68.0	0.7	98.0	-	-	-	0.027	-	-	×	36.482	0.517
141204①	70.3	2.0	35.2	0.481	1.322	0.642	0.111	1.345	0.812	○	36.746	2.100
141204②	70.3	5.1	13.8	0.479	1.521	0.727	0.146	1.124	0.631	○	39.811	2.964
141204③	58.4	2.0	29.2	-	-	-	0.089	-	-	×	33.549	1.575

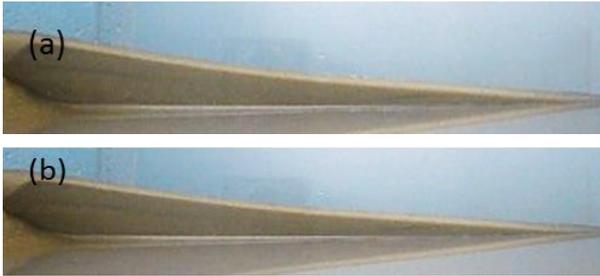


図-6 実験開始から(a)7分30秒(b)10分30秒経過後の河床形状の変化

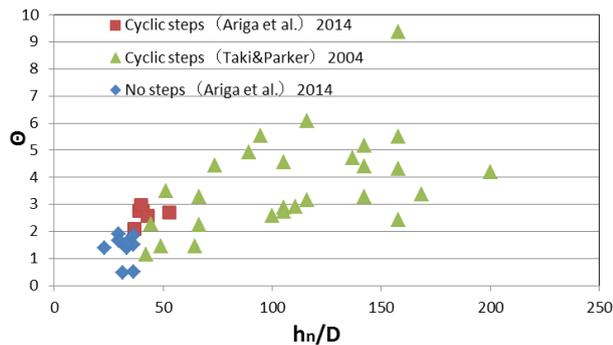


図-7 河床抵抗とシールズ数を比較した図

Taki&Parkerの実験結果と本実験結果を比較した。

なくなった。また表-2内、ステップ伝搬速度に着目すると図-8に示す図のように、回転数が増すほどステップ伝搬速度が遅くなるという結果を得た。上記2点について以下議論を行う。

4.2 実験の考察

まず回転数を増やすことでサイクリックステップの発生が見られなくなった点について議論する。回転数が増すことにより、アクリル水槽内を流下する水と砂に加わる遠心力が堆積板中心から離れるほど増す。そのため下流で発生し、上流伝搬するサイクリックステップは回転の効果を受けることで発生しづらくなると想定していたが4.0rpmまでは発生を確認した。これは回転による遠心力を無視できるだけの底面せん断力、水深、流速を与えていたからであると考えられる。また4.2rpmからは、主に流速に遠心力の影響が強く加わり、アクリル水槽内の流下方向流速分布に影響を与えることで跳水が発生するのに十分なフルード数が得られなかったと考えられる。

図-9に実験141210⑥の実験開始後約6分後の図を示す。これはアクリル水槽内を上流伝搬するサイクリックステップの跳水が回転の効果により斜めに上流伝搬し、

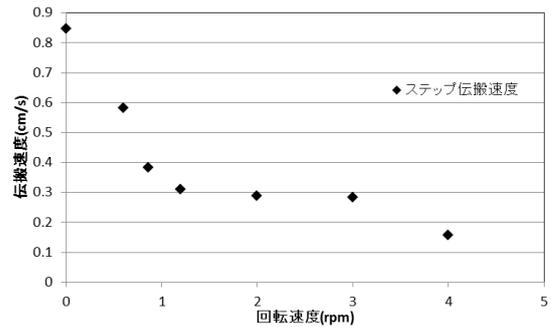


図-8 回転速度とステップ上流伝搬速度の推移

なお速度は伝搬の様子を画像で表示し

頂点の移動距離を時間で割ることで計算した。

左岸側の上流伝搬速度が右岸側の上流伝搬速度を上回った様子を示す。図-10は非回転条件における継時変化図であり、まっすぐ上流伝搬している様子が見えることから上記のことが言える。図-9内の黒色部は河床の浸食卓越、白色部は河床の堆積卓越の様子を示す。水槽内左岸と右岸に流速の差異が発生し、跳水が起こるタイミングが若干異なるため引き起こされる現象であると考えられる。

次に回転数が増すほどステップ伝搬速度が遅くなる点について議論する。上記の考察と同様に、回転数が増すことにより、アクリル水槽内を流下する水と砂に加わる遠心力の影響が流速分布に強く影響すると考える。遠心力の影響を受ければ受けるほど、左岸の流速が右岸の流速より速くなり、非回転条件の流速より遅くなる。そのため跳水が上流伝搬する速度も遅くなると考える。

5. まとめ

本研究は5cm幅アクリル水槽内にサイクリックステップを発生させること、サイクリックステップに回転の効果を加え、挙動を観察、解析することを目的とした。以下の結果が得られた。

- サイクリックステップの発生にはシールズ数が1.0以上必要
- 相対粗度(hn/D)の値が36以上必要
- 回転数4.0rpmまで回転の効果を受けながらサイクリックステップが生じる
- 回転の効果により斜めに跳水を生じ、そのまま斜めに上流伝搬する
- 回転数が大きいほど跳水に伴う上流伝搬速度は遅い

表-3 回転実験における水理条件と各パラメータ

実験名	水(cm ³ /s)	給砂量(cm ³ /s)	水/給砂量	回転数(rpm)	水深(cm)		ステップ	フルード数		CSの発生 有無
					ステップ上流側	ステップ下流側		伝搬速度(cm/s)	ステップ上流側	
141202④	76.22	2.0	38.11	0	0.599	1.323	0.846	1.050	0.707	○
141210①	78.52	2.0	39.26	0.6	0.595	0.925	0.583	1.093	0.564	○
141210②	78.52	2.0	39.26	0.864	0.609	0.968	0.384	1.055	0.527	○
141210③	78.52	2.0	39.26	1.2	0.610	0.927	0.310	1.053	0.562	○
141210④	78.52	2.0	39.26	2	0.599	0.928	0.290	1.083	0.561	○
141210⑤	78.52	2.0	39.26	3	0.599	0.993	0.283	1.083	0.507	○
141210⑥	78.52	2.0	39.26	4	0.607	0.934	0.158	1.061	0.556	○
141210⑦	78.52	2.0	39.26	-	-	-	-	-	-	×

6分15秒



6分18秒



6分24秒



6分26秒



6分29秒



6分32秒



6分39秒



図-9 141210⑤における、アクリル水槽(下流端から5cm~40cmの範囲)を上から撮影した写真を加工(「Microsoft Power point(2010)のアート効果 ペイント:描線」を用いた)し、時間変化の推移を示す。左に示すのは実験開始からの時間である。回転方向は図内左端を軸として時計回り回転である。

今後の展望として、現実験装置より幅の広いアクリル水槽や側壁が扇形状に広がる水槽内に回転の効果を加えて、サイクリックステップを形成したいと考える。最終的に360°全方向に水と砂を流下することで、多方向から中心に向け上流伝搬するサイクリックステップを実験タンク内に発生させたい。

謝辞

本研究は MEXT/RECCA, MEXT/SOUSEI(theme C-i-C), JST/CREST(Core Research for Evolutional Science and Technology)と JSPS 科研費 26242036 の成果の一部である。

参考文献

- 1) Katharina A. Otto, Ralf Jaumann, Katrin Krohn, Klaus-Dieter Matz, Frank Preusker, Thomas Roatsch, Paul Schenk, Fran Scholten, Katrin stephan, Carol A. Raymond, and Christopher T. Russell, Mass-wasting features and processes in Vesta's south polar basin Rheasilvia, Journal of Geophysical Research: Planets, Vol. 118, 2279-2294, doi:10.1002/2013JE004333,(2013)
- 2) NASA ホームページ
http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/multimedia/pia13163.htm
- 3) NASA ホームページ

7分03秒



7分06秒



7分10秒



7分14秒



7分17秒



7分20秒



7分22秒



図-10 非回転条件の 141202④における、アクリル水槽(下流端から5cm~40cmの範囲)を上から撮影した写真を加工(Microsoft Power point(2010)のアート効果、ペイント:描線を用いた)し、時間変化の推移を示す。

http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mro20100526.html

- 4) James, P. B., H. H. Kieffer, and D. A. Paige. The seasonal cycle of carbon dioxide on Mars. In *Mars* (H. H. Kieffer, B. M. Jakosky, C. W. Snyder, and M. S. Matthews, Eds.), pp. 934-968. Univ. of Arizona Press, Tucson.(1992)
- 5) Isaac B . Smith, W. Holt, J.,Spiga, A. Howard, A., and Parker, G. The spiral troughs of Mars as cyclic steps. Journal of Geophysical Reserch: Planets, 10. 1002/jgre.20142.,(2013)
- 6) Kostic, S et al. Cyclic steps: A phenomenon of supercritical shallow flow from the high mountains to the bottom of the ocean. Journal of Hydro-environment Reserch 3 , 167-172,(2010)
- 7) Winterwaerp, J.C., Bakker, W.T., Mastbergen, D.R., van Rossum, H., Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed., Journal of Hydraulic Engineering, 119(11), 1508-1525,(1992)
- 8) Parker, G. Some speculations on the relation between channel morphology and channel-scale flow structures., In: Proceedings, Coherent Flow in Open Channels. JohnWiley & Sons,Ltd.
- 9) Taki, K., Parker, G, Transportational cyclic steps created by flow over an erodible bed. Part1. Experiments., Journal of Hydraulic Research 43(5), 488-501.
- 10) Powell, E., Kim, W., and Muto, T., Varying discharge controls on timescales of autogenic storage and release processes in fluvio-deltaic environments: tank experiments: Journal of Geophysical Research, Earth Surface, v. 117, F02011, doi:10.1029/2011JF002097.(2012)