ベッドウェーブのフラックスに基づくベッドフォームの成長の評価

遠藤 徳孝*・横川 美和**・酒井 哲弥*
久保 雄介*・小島 出**・増田富士雄***

Study of development of bedform based on flux of bedwaves

Noritaka Endo *, Miwa Yokokawa **, Tetsuya Sakai *
Yu'suke Kubo *, Izuru de Kojima ** and Fujio Masuda ***

Flux of bedwaves was measured beside the wave-length, cross section, "reduced height" and migration rate during transition from plane bed through "upper ripples" to dunes, after decrease of flow velocity from upper-plane-bed regime. The flux has the minimum value on the way, while migration rate almost monotonously decreases, and length, cross section and "reduced height" show roughly monotonous increases even in the constant flow velocity. The reason flux has the minimum value may be explained by the abrupt decrease of migration rate in the early time and successive increase in "reduced height" in the later time, although this explanation does not include the influence of increasing bed roughness. The existence of the minimum may be related to the annexation of a few small bedwaves into a large one, which causes discontinuous bedform-transition. The possibility of explanation of this phenomenon by the change of dynamical characteristics of the fluid and/or moving sand in the whole systems can be pointed out now.

This paper is showing the importance of attention to the a mounts such as flux of bedwaves which would take the lead in understanding bedform dynamically, although details wait for further researches.

key words : bedform-transition, dune, flux of bedwaves, migration rate, upper ripples

はじめに

流速を上げていくと、ベッドフォームはリップル、デューン、アッパープレーンへと変化する。リップル、デューンはうねりのある規則正しいベッド

フォームで、デューンはリップルより波長が長い。一般にリップルやデューンは、流速が速いほど波長は長い。また、通常、波長が長いと、波高は高い。デューンができた状態からさらに流速を上げるとしばらくは波長、波高ともに成長する。しかし、ある流速を境に、流速を上げても波長はほとんど変わらず、波高は逆に低くなっていき、だんだんと平らの状態へ向かいプレーンベッドになる。

逆にプレーンベッドが実現している状態から流速を下げていくと、デューンに遷移する途中で、流速はデューン発生条件にもかかわらず小さなリップルが生じることが見いだされた(遠藤他, 1995; 遠藤他, 1996)。これをデューンより遅い流速でできる通常のリップルと区別するために、“アッパーリッ

受付: 1996年8月30日 受理: 1996年10月21日

*大阪大学 理学研究科 物理学専攻

**大阪大学 理学研究科 宇宙地球科学専攻

***京都大学 理学研究科 地質学鉱物学教室

* Department of Physics, Graduate school of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560, Japan

** Department of Earth and Space Science, Graduate school of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560, Japan

*** Department of Geology and Mineralogy, Graduate school of Science, Kyoto University, Kyoto 606-01, Japan

ブル” (upper ripples) と呼んだ。これは従来の平衡状態に対するベッドフォームのフェイズダイアグラム (例えば, Ashley, 1990; Allen, 1970) には記載されていないものである。実験 (遠藤他, 1995) によると, はじめ平らの状態のベッドから生じたばかりの“アッパーリップル”は波長3~5 cm, 波高4 mm 以下 (水深13cm, 平均流速47cm/s) で, その後10数分位かけてデューンへと成長する。“アッパーリップル”は, デューンからアッパープレーンベッドへ遷移する際にできる low relief bedwaves (Bridge and Best, 1988; Paora et al., 1989) や linguoid ripples からプレーンベッドに変わる途中にできる wash-out ripples (Baas and Koning, 1995) とは明らかに異なる。アッパーリップルは波高に対する波長が小さく, クレストは low relief bedwaves より, 尖っている。また, 通常の, より遅い流速でできるリップルよりリーサイド面の傾斜が緩い。アッパーリップルはアッパープレーンベッドの条件から流速が下がったときにできるので, アッパーリップル発生前からベッド表面の砂粒子は動いている。アッパーリップルは水を流し始めて移動限界速度を越えた直後に発生するリップル, incipient ripples (Harms, 1975) とも区別されるものである。

これまでの研究では, ベッドウェーブの波長, 波高は測定されてきたが, ベッドウェーブの移動速度やフラックスが測定されることは皆無といえる。今回これらの量についても測定を行った。これらの量の変化を通して, これまで定量的な議論の少ない同一フェイズ (本研究ではデューン領域) 内での平衡状態に達するまでのベッドの発達過程をみる。

なお, この論文ではアッパーリップルやデューンなどのうねりを持つベッドフォームを総称してベッドウェーブと呼ぶ。

実 験

測定方法:

実験の様子をビデオに撮影し, その画像をコンピュータに取り込み, ベッドフォームの大きさや移動速度を測定する。今回の撮影では30cm を205pixel で撮ったので長さの誤差は ± 0.15 cm である (観察領域の全幅は約87cm)。流速は超音波流速計を用いて計測する。

実験方法:

長さ10m, 幅10cm, 深さ50cm の実験水槽に平均

第1図 流速の時間変化. 砂床の準安定状態は平均流速65cm/sではアッパープレーンベッド, 平均流速47cm/sでは平均波長18cm, 平均波高19mmのデューンである。

Fig. 1 Time-development of flow velocity. Bed configuration at 65cm/s is upper plane bed and at 47cm/s is dunes of 18cm in length and 19mm in height.

粒径0.195mmの分級の良い砂を厚さ7 cmほど敷く。はじめに平均流速65cm/s (水深10cm) でアッパープレーンベッドができた状態から平均流速47cm/s (水深13cm) にし, ベッドフォームを調べる。平均流速47cm/s (水深13cm) におけるベッドフォームの安定状態は平均波長18cm, 平均波高19mmのデューンである。流速は第1図で見るように時刻5分以降一定である。時刻6分付近で多少の流速の乱れがあるが, これは流速を下げたときに生じた小さな段波 (bore) によるものである。ただし, このベッドフォームへの影響はなかった。

量の定義:

ベッドウェーブに関して測定した量はベッドウェーブの波長, 流れに平行に切った断面積, 換算波高, 移動速度およびフラックス (換算波高 $\times$ 移動速度) で, それぞれ以下のように定義する。

波長はベッドウェーブの嶺から隣の嶺までの距離である。

ベッドウェーブの断面積とは第2図の斜線部でトラフより高い部分である。

換算波高とは, ベッドウェーブの断面積を波長で

第2図 ベッドの概念図. ここではベッドウェーブの断面積を斜線で示したところ（トラフより高いところ）の面積と定義する. これを用いてフラックスを計算するということは, トラフより低い部分で砂は動いていないと仮定していることになる（本文参照）.

Fig. 2 Schematic illustration of bed. Cross section of bedwaves is defined as that displayed by diagonal lines. Calculating flux using this cross section means assuming that no sand grain below trough moves. (See context)

割った値である. ベッドウェーブの断面を面積の等しい長方形に置き換えて考えた際の長方形の高さである.

ベッドウェーブの移動速度とは, 個々の砂粒の動きを見るのではなく, ベッドウェーブで代表される砂の塊が進む速度である. 実際は, トラフやクレストがある時間内に移動した距離を, かかった時間で割って求める.

ベッドウェーブのフラックスとは, ベッドロードのフラックスとは違う. ベッドウェーブのフラックスを

(ベッドウェーブのフラックス) = (換算波高)
× (ベッドウェーブの移動速度)
で定義する.

この議論には, 暗黙の仮定がある. それは, トラフより低い（トラフより下の）場所で砂が, 上部の砂に引きずられて動いていないという仮定である. つまり, 第2図の斜線部だけが移動しているものとする. この仮定は実験水槽の窓ガラスから観察するかぎり正しい. また, 論理的に考えてもある一定の説得力がある. ある瞬間トラフであった場所は次の瞬間, 堆積が起きてリーサイド面となり, そのすぐ下流では, ストースサイド面であったところが侵食されてトラフとなる. つまり, トラフは瞬間的に堆積と侵食が釣り合っている場所と考えられる. であるから, トラフでは流れによる営力が実質的にゼロと仮定してよさそうである. 従って, トラフより低い（トラフより下の）場所で砂が動いていないと考えてよい. 因に, トラフより高いところでも, ある

瞬間実際に砂が動いているのは表面付近のみである. ベッドウェーブの内部の砂は, ストースサイド面の移動によって侵食されてはじめて, 動き出す. こうやってベッドウェーブの表面付近を動いている砂は, またすぐに堆積しベッドウェーブの一部を構成するのであるが, 移動中は特にベッドロードと呼ぶ. ベッドから離れて浮遊して移動するサスペンションロードとは違って, ベッドロードはベッドと接しながら移動している砂粒子群で, ベッドロードもベッドウェーブを形作っている一部とみなすことができる.

ところで, ベッドウェーブの断面積を用いることと, 「ベッドウェーブの内部の砂は動いていなくて, 表面付近でのみ動いている」ことが相容れないように思えるかもしれないが, そうではない. 考えやすいように, ベッドウェーブがちょうど空間的に1周期分移動する間の時間の中で考える. つまり, このときトラフが1波長分だけ移動する. よって, ひとつの山（ベッドウェーブ）を完全に削って, 隣に再び山（ベッドウェーブ）をこさえ直すわけである. 従って, 結局1周期分移動する間でベッドウェーブまるごと移動しているので, 断面積を用いてよい, というより, 用いるべきである.

また, この議論に関して, 今回実験に用いた水路の幅 (10m) では壁面での摩擦の影響は無視できる.

結 果

ベッドウェーブの波長, 断面積, 換算波高, 移動速度およびフラックス (換算波高×移動速度) の変化の様子は第3図及び第4図に示した通りである. グラフはプレーンベッドから流速を下げて, デューン発生条件にしてから (時刻5分) (第1図), アップーリップルを経て実際にデューンに成長するまで (時刻18分) の間の変化である. ただし, 初期のアップーリップルは小さ過ぎて大きさ等の測定が出来ないので, 時刻6分からプロットしている.

およその傾向は以下のようなものである. 波長, 換算波高および断面積は単調増加し, ベッドウェーブの移動速度は単調減少, ベッドウェーブのフラックスは途中で極小を持つ変化を示す. なお, 時刻18分以降全ての量が, 若干減少するものの, ほぼ一定値を取り, 平衡状態に達したと考えられる.

第3図 ベッドウェーブの波長，面積，換算波高の時間変化．換算波高については誤差が測定値に対してやや大きいのでエラーバーを付けた．元々は波長の測定に由来する誤差である．

Fig. 3 Time-development of length, cross section and reduced height of the bedwaves. Because the error is a little large to obtained value, error bars are denoted about reduced height.

第4図 ベッドウェーブの移動速度およびフラックス（換算波高×移動速度）の時間変化．なお，フラックスについては誤差が測定値に対してやや大きいのでエラーバーを付けた．

Fig. 4 Time-development of migration rate and flux (reduced height $\times$ migration rate). Because the error is a little large to obtained value, error bars are denoted about flux.

考 察

5つの量の中で、その時間発展がサチュレートしている（連続的に横ばいになって落ち着く）ように見えるのは、ベッドウェーブの移動速度だけである（第4図）。いま、平衡状態である波長18cmのデューンへと変化していく様子を見ているわけだが、平衡状態とは、ある物理量がそれ以上変化しない状態で、そのとき時間微分は0である。連続的に平衡状態に達するなら時間発展がサチュレートするはずである。このグラフだけ見ると移動速度が連続的に平衡状態に達し、他の量は、移動速度が変化しないことに伴って発展が阻害されたかのようにみえる（第3図、第4図）。つまり、移動速度が最も支配的な量で、他は従属的な量に見える。しかし、移動速度が何によって決定されるか分らない。移動速度がベッドウェーブの波長や波高（断面積）と無関係とは思えない。明かに片方が主、他が従になっているとは考えにくく、定式化すると連立式の解になっていることも考えられる。従って、そう単純に移動速度が支配的な量とは言いきれない。

ここで、重要なことは時刻16分でベッドフォームの不連続な遷移現象が見られることである。この時刻で、波長（平均値）は一旦小さくなったあと急激に増加し、また断面積、換算波高、ベッドウェーブのフラックスも急速に増加する（第3、4図）。フラックスについてはそれまで減少していたにもかかわらず増加している。これらの量がサチュレートして見えないのは、系全体が連続的に平衡状態に達する前に、ベッドの不連続な遷移現象が起きるためと考えられる。また、よく見ると、移動速度も時刻16分のところで多少増加に転じている。

ベッドの不連続な遷移現象が起きているとき、ベッドウェーブの空間的な規則性は低くなり、不揃いになる。その後すぐ、ほぼ同時に、2、3個ずつの小さなベッドウェーブが合体してひとつの大きなベッドウェーブになる。従って、この時点で波長、断面積が急に大きくなるのは自然のことに思える。また、ベッドウェーブの基本的な特徴として、波長が大きくなると波高も大きくなることが知られているので（Ashley, 1990）、波高の増大も理解ができる。移動速度も時刻16分で若干増加するが、これが有意か、誤差かの判断は現時点では出来ない。もしこの増加が有意だとしても、その割合が最初の減少に比べて小さいので、不連続な遷移以降増加するという

より、不連続な遷移の不安定さによって一旦減少してその後元に戻ると考えたほうが自然かもしれない。ベッドウェーブのフラックスについては、最初減少するのは、移動速度が急激に減少するため、その後増加するのは、ベッドの不連続な遷移によってアッパーリップルが合体することにより波高が急激に増大するためと考えてよさそうである。しかし、波高が高くなると、ベッドの粗度が大きくなり、ベッド付近の流速が低下しさらに移動速度が下がることが考えうる。したがって、アッパーリップルの合体にともなう波高の増大が即、ベッドウェーブのフラックスの増加の理由として片付けられない。先程も書いたように有意性の判断はできないが、ベッドの不連続な遷移後波高が増大し粗度が増しても、ベッドウェーブの移動速度はむしろ増加している。粗度の増加にもかかわらず移動速度が低下しないのはアッパーリップルからデューンに遷移することによって流体等に関する系全体の力学的性質が変わったと考えられるが、はっきりしたことはまだ分らない。この点について調べることは今後の課題である。

今議論している系はデューン発生条件のままなので、垂直平均流速は一定である。このとき、単純に考えればベッドウェーブのフラックスは、ベッドの発達にともなって多少変化することはあっても、そう変わらないと考えるのが普通であろう。いま、途中の遷移は見ずに、アッパーリップルのできはじめの状態とデューンができた状態とだけで比べるとフラックスの変化の割合は小さい。フラックスの、誤差を考慮した最小の変化は10%位である。こうして見ると、不連続な遷移に引きずられる部分を除いて、垂直平均流速が一定であることに対応して、ベッドウェーブのフラックスを一定に保とうとする作用があるように思える。すなわち、アッパープレーンベッドから流速の低下により出現しはじめた小規模なベッドウェーブ（アッパーリップル）は速く動くことによって、また、その後成長した、移動速度の遅いベッドウェーブは波高を大きくすることによってフラックスを一定に保っているようにみえる。ちなみに、フラックスの、誤差を考慮した最大の変化は50%位で、この場合フラックス一定とはいえないが、それでも移動速度が80%減少しているのに比べると小さい。

フラックスの、途中、極小に向かって減少し、その後増加する変化はかなりの有意性があると思われる

るが、これはベッドフォームの不連続な遷移に引きずられて生じていると考えられる。このベッドフォームの不連続な遷移が起きているときにベッドウェーブのフラックスが下がるのは系のエネルギーがベッドの形態を変化させることに使われるためではないかと考えられる。固体がとけて液体に相転移する際、エネルギーが潜熱として使われることの類推である。詳しいことは今後の研究が必要だが、ベッドフォームを力学的に理解するうえで、エネルギーという観点から捉えるならベッドウェーブのフラックスといった量が重要と考えられる。

ま と め

アッパープレーンベッドからデューン発生条件に変化させた後、垂直平均流速一定で、“アッパーリップル”からデューンへと成長する間の、ベッドウェーブに関する量を調べた。およそその傾向として、ベッドウェーブの移動速度は単調減少し、波長、断面積および換算波高は単調増加し、ベッドウェーブのフラックスは途中で極小を持つことがわかった。このことは、2, 3個の小さなベッドウェーブが合体して大きいベッドウェーブができる、不連続なベッドフォームの変化と関係があると考えられる。特にベッドウェーブのフラックスの変化から、このとき系の力学的性質が変わっていると推測される。詳しいことは今後の研究を要するが、ここでは特に、ベッドフォームの変化をベッドウェーブのフラックスという見地から捉える重要性を強調した。

文 献

- Allen, J. R. L., 1970: The sequence of structures in turbidites, with special reference to dunes. *Scott. J. Geol.*, **6**, 146-161.
- Ashley, G. M., 1990: Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *J. Sediment. Petrol.*, **60**, No.2, 160-172.
- Baas, J. H. and Koning, H. D., 1995: Washed-out ripples: their equilibrium dimensions, migration rate, and relation to suspended-sediment concentration in very fine sand. *Jour. Sediment. Res.*, **A65**, No2, 431-435.
- Bridge, J. S. and Best, J. L., 1988: Flow, sediment transport and bedform dynamics over the transition from dunes to upper-stage plane beds: implication for the formation of planar laminae. *Sedimentology*, **35**, 753-763.
- 遠藤徳孝・久保雄介・横川美和・酒井哲弥・小島出・増田富士雄, 1995: “Bouma Sequence”にDunesの痕跡はなぜ残らないか?, 堆積学研究会1995秋季研究集会講演要旨集, 84.
- 遠藤徳孝・横川美和・増田富士雄・久保雄介・酒井哲弥・小島出, 1996: Upper ripples: Dunes形成条件でのリップルとその堆積構造, 日本地質学会第103年学術大会講演要旨集, 178.
- Harms, J. C., 1975: Stratification produced by migrating bed forms. In Harms, J. C., Southard, J. B., Spearing, D. R. and Walker, R. G. eds., *Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences*, SEPM Short Course, No. 2, 45-61.
- Paola, C., Wiele, S. M. and Reinhart, M. A., 1989: Upper-regime parallel lamination as the result of turbulent sediment transport and low-amplitude bed forms. *Sedimentology*, **36** 47-59.