

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K01219

研究課題名(和文) 野外計測と風洞実験によるメガリップルの形態・動態特性と形成条件の解明

研究課題名(英文) Elucidation of formation conditions and morphological and dynamic characteristics of meg-ripples by field measurements and wind tunnel experiments

研究代表者

小玉 芳敬 (KODAMA, Yoshinori)

鳥取大学・農学部・教授

研究者番号：50263455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：鳥取砂丘では、2013年から2015年の3年間限定で、波長1mを超えるメガリップルが火山灰露出地の縁辺部に出現した。このことをヒントにして、風洞実験を実施し、火山灰の団粒粒子を模擬したポリプロピレン粗粒粒子の砂面への散布量がメガリップルの形成条件のひとつであることが明らかになった。また砂面が低下する区間に限られてメガリップルが出現しやすいことも、風洞実験で確認された。このことは、アメリカ合衆国のGreat Sand Dunesに見られるメガリップルの形態特性からも確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メガリップルを実験で形成模擬できた初めての研究となった。粗い粒子の共存がメガリップルの必要条件であることは、従来知られていたが、その量比の重要性は認識されていなかった。またメガリップルは砂面の低下傾向で出現しやすい砂床形であることが、実験で確認されたことより、現地でメガリップルに限られた区間にしか観察されない理由が解明された。つまり砂面が低下すると、必ず飛砂が発生し、その下流側では砂面が低下しにくくなるためである。公園や寺院の境内など多くの人が行き交う場所には、しばしばメガリップル類似地形が観察される。形成メカニズムの類似性を探る必要がある。

研究成果の概要(英文)： In the Tottori Sand Dunes, mega-ripples with a wavelength of more than 1 m appeared on the edge of the exposed volcanic ash layer for three years from 2013 to 2015. Taking this as a hint, a wind tunnel experiment was conducted, and it was clarified that the amount of polypropylene coarse-grained particles that simulated the aggregated particles of volcanic ash sprayed on the sand surface was one of the critical conditions for forming mega-ripples. In addition, it was confirmed by wind tunnel experiments that mega-ripples are likely to appear only in the area where the sand surface is lowered. This could be confirmed by the morphological characteristics of mega-ripples found in the Great Sand Dunes of the United States.

研究分野：地形学

キーワード：メガリップル 粗粒粒子 Great Sand Dunes 鳥取砂丘 風洞実験 凹面状断面形態 砂面低下 ポリプロピレン粒子

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

風成微地形の代表格に Wind Ripple (砂漣, 風紋) がある。風紋は風向きに直交する横列の微地形であり、風により時々刻々とその形を変える。風紋の亜種として、波長数 10cm~数 m に及ぶ「メガリップル (mega ripple, 図 1)」の存在が古くから知られている (たとえば, Cornish, 1897)。しかしその断面形態は、下に凸形 (凹面形) を示し、一般的な風紋の風上側と風下側とで非対称な形態とは明らかに異なる。Bagnold (1941) も指摘しているように、メガリップルの形成には粗粒な粒子の共在が不可欠である。いつ訪れてもアメリカ合衆国の Great Sand Dunes ではメガリップル群が散見される。径 2-3 mm の細礫がメガリップルの峰部下流側に集積している様子が観察された。砂丘の東~南を取り巻いて流れる Medano Creek が東方山脈より細礫を供給し続けていることが関連していると思われる。

いっぽう、鳥取砂丘ではメガリップルを観察することはこれまでにな

なかった。最大面線に成長した火山灰露出地の縁辺部にて、2013 年から毎年春先の南風でメガリップル群が観察されるようになった (図 2)。火山灰層が侵食されてローム質の団粒状粒子が砂表面に供給されたことでメガリップルが形成された。このことをきっかけにして本研究の申請に至った。ところが 2015 年の春を最後に、メガリップルは再び観察されなくなった。

2013 年から 2015 年にかけて鳥取砂丘ではメガリップルが出現したが、その背景をまず押さえておきたい。1990 年代より鳥取砂丘の草原化が激しくなり、機械除草が始まった。当時、比高 1 m 未満の植生域を除いて、トラクターによる機械除草が実施されていた。トラクターの横転を心配しての処置であった。この様なことを数年続けているうちに、植生域に砂が補足され植生は上方へと伸びるために、みるみるうちに比高のある植生マウンドへと成長していった。同時にマウンドに囲まれた凹地では、飛砂の連続性が絶たれたために風食が進行し、砂面の低下が著しく進行した。そして場所によっては伏在していた火山灰層が露出し、その面積を年々増大していった。最大面積を誇った火山灰露出地はまさにこの典型例であった。ここでは 2020 年には砂面の低下量は 1 m 以上に及び、植生マウンドの比高は 6 m を超えた。

以上のように植生マウンドの発達に伴って火山灰層露出域の拡大が見られた典型箇所では、2013 年~2015 年にメガリップルが観察されたのである。2013 年に突然メガリップルが出現した理由は、隣接する砂面表面に供給されるローム質火山灰の団粒状粒子の量が、ある閾値を超えたからと推察される。つまり火山灰層露出域の面積に応じて周辺砂面へ供給されるローム質団粒状粒子の量が増えるからである。逆に 2016 年以降メガリップルが観察されなくなったことは、今振り返って見ると、時系列で原因が異なる。2016 年当時は、団粒状粒子の量が多くなりすぎたためにメガリップルが形成されなくなった。

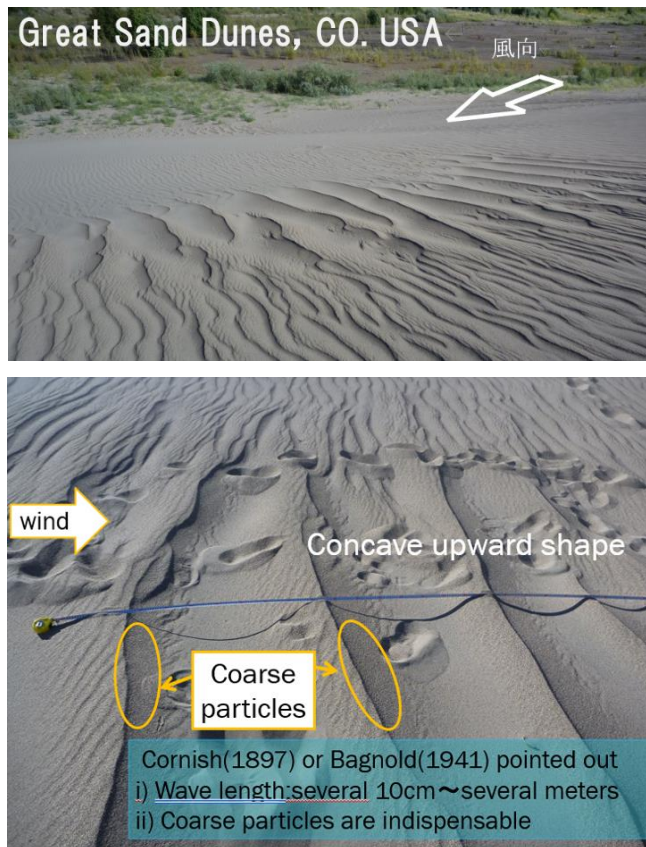


図 1 Great Sand Dunes で観察されたメガリップル群
上：手前に風紋が、中央にメガリップルが写る。
下：コンベックスの陰より下に凸形断面形がわかる。



図 2 鳥取砂丘で観察されたメガリップル群

さらに砂面の低下が進むと、2020年頃には火山灰層がさらに広く露出し、砂丘砂そのものがほとんどなくなった、あるいは火山灰層と混合された粘着性の砂へとかかわったためと考えられる。つまりメガリップルを形成する砂丘砂がなくなったのである。

2. 研究の目的

鳥取砂丘で数年のうちに観察したメガリップルの生成と消滅にヒントを得て、メガリップル形成に及ぼす粗粒粒子の役割を風洞実験で探ることとした。メガリップルを風洞実験で再現した研究は、西山(2014)以外みあたらない。西山(2014)は、最大波長55cmのメガリップルを報告したが、その形態は野外のメガリップルには類似していなかった。西山(2014)が用いた極粗砂は実験装置の最大風速(15m/sec)では、動きが悪かったことが課題であった。

そこで最大風速をより大きくするため幅が狭く深い風洞実験装置を新作し、実験に用いる粗い粒子を選定し直すことで、野外に酷似したメガリップルを模擬すること、そしてメガリップルの形成条件や形態・動態特性を解明することを本研究の第1の目的とした。また野外のメガリップルの形態特性を明らかにすることを第2の目的とした。

3. 研究の方法

全長7.28m、幅9cm、深さ60cmの透明アクリル製風洞実験装置を新たに作製した。細砂～中砂からなる風成砂を風洞床に10cmの厚さで敷き、表面に粗い粒子を散布した。鳥取砂丘のローム質団粒状粒子は砂丘砂より粒径が大きく、軽いという特徴がある。このことを考慮し、径4mmのやや扁平なポリプロピレン楕円体粒子(比重0.9)を粗い粒子として選定した。この粒子の散布量を変えた一連の実験を行い、その結果を受けて、風成砂を厚さ19cmで敷き、粗い粒子の散布量を45g/m、最大風速17.3m/secの条件で40分間の実験を実施した。なお、無給砂の実験を主としたが、参考までに給砂有りの実験も試みた。

実験中5台のデジタルカメラを風洞全体の縦断面が写るように設置し、インターバル撮影で1分おきに撮影して、断面形態の変化を記録した。また、もう1台のデジカメで1分おきに上流から下流に向かって14枚の平面写真を撮影し、ポリプロピレン粒子の分布状態を記録した。これらの写真を解析して、メガリップルへの形成過程を読み取り、砂床形の波長、波高などを計測した。

アメリカ合衆国のGreat Sand Dunes国立公園では、メガリップルの断面形態を巻き尺とコンベックスを用いて3測線において計測した。

4. 研究成果

(1) ポリプロピレン粒子の散布量を変えた一連の実験

風成砂を厚さ10cmで風洞床に敷き、風洞長1.82m(1間長の2×4材にあわせて作製した風洞1本の長さ)あたり、6.25g、12.5g、25g、50g、100g、200g、400gの7段階でポ

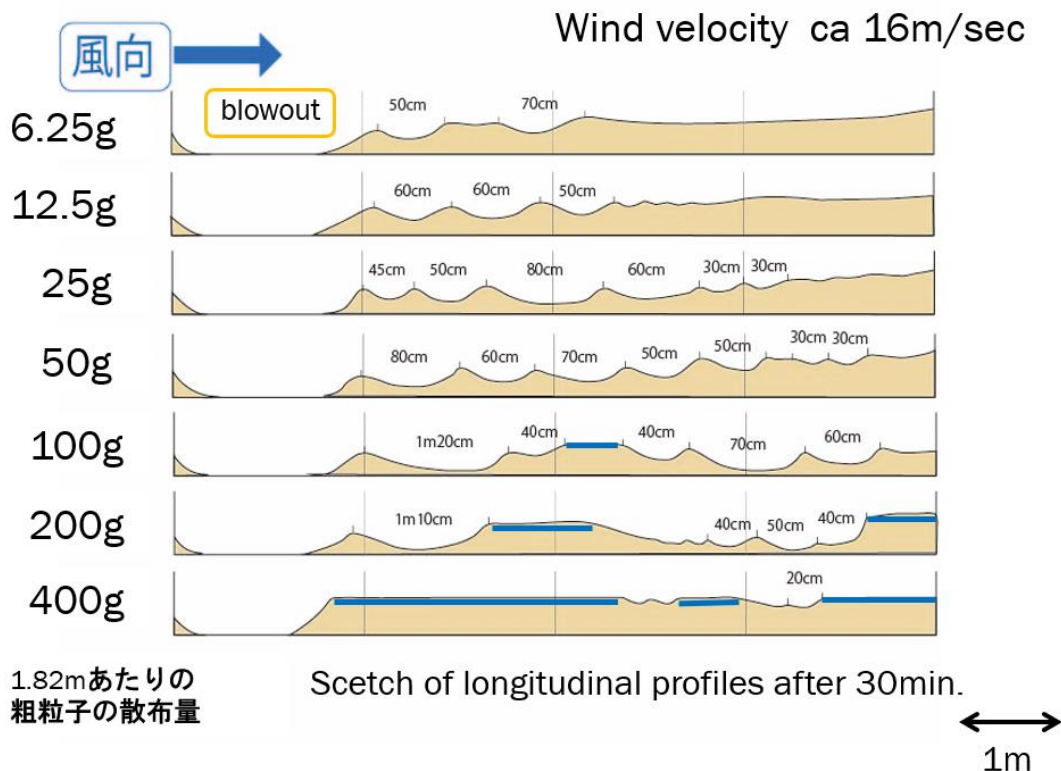


図3 ポリプロピレン粒子の散布量を変えた一連の実験の最終縦断面形
青いラインは、ポリプロピレン粒子が砂の表面を覆い尽くした区間を示す。

リプロピレン粒子を砂表面に均等に散布した一連の実験をそれぞれ 30 分間実施した。いずれも実験当初の風速は、16 m/s であった。またいずれの実験でも上流側 1.8 m 区間は、風食が進行して風洞床まで露出した。

30 分後の縦断面形をスケッチにまとめた (図 3)。ポリプロピレン粒子の散布量が少ないとき (6.25 g と 12.5 g) には、1.8~4.0 m 区間に 3 つほどの下に凸形砂床形 (メガリップル) が形成され、その波長は 50~70 cm であった。しかしさらに下流区間では、ポリプロピレン粒子が砂で埋もれ、表面は一面の砂の平滑床となった。散布量が 25 g、50 g と増えるにつれて、メガリップルの個数が増え、より下流側まで伝播した。波長も最大で 80 cm まで達した。さらに散布量を 100 g まで増やすと、最長波長は 1.2 m に達したものの、一部でポリプロピレン粒子が砂表面を覆い尽くした区間が出現した。散布量が 200 g、400 g と増えるにつれて、ポリプロピレン粒子が砂表面を覆い尽くした区間が増加し、400g ではメガリップルが形成されなかった。ポリプロピレン粒子が覆い尽くしてしまうと、それらは 16 m/s の風でも運搬されなくなり、desert pavement 状態になった。

(2) 本装置においてメガリップルを形成する最適条件の風洞実験

試行錯誤の結果、風成砂を厚さ 19 cm で風洞床に敷き、ポリプロピレン粒子の散布量を 45 g/m、無給砂で 40 分間の実験を実施した。このとき最大風速は 17.3 m/s となった。実験開始直後から形成が始まった砂床形の形態は、白いポリプロピレン粗粒子の集まり方の違いにより A 型と B 型の 2 種類に分けられた (図 4)。

A 型は 5cm~10cm 間隔で白い粒子の帯状集積 (幅 5cm~10cm 程) が出現し、この帯状集積区間は横列の縞模様をなし、その断面形態は風上側に急な侵食斜面を、粗粒子集積区間は風下側に緩く傾く斜面をなした。ちょうど風紋の上下流逆向き断面形に近かった。いっぽう B 型は粗粒子が上下流幅 20cm 程で集積して、砂床形の峰とその下流側傾斜をなし、峰と峰の間は下に凸の侵食形を示した。この波長は 25cm~1m ほどが多く認められた (図 5)。いずれの型も粗粒子の集積箇所が砂床形の峰部を形成していた。

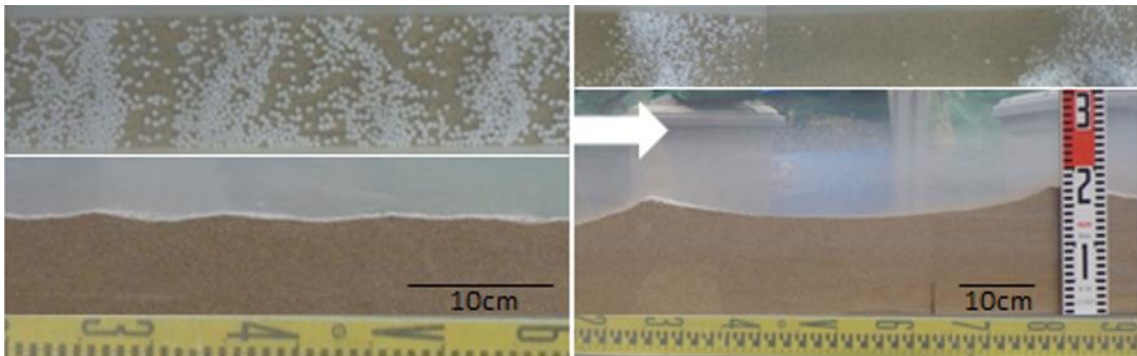


図 4 実験で形成された 2 種類の砂床形

それぞれ、上は平面写真、下は断面写真、矢印は風向を示す。

風洞内に形成された峰の位置の時間経過を走時曲線に描いた。実験開始当初は波長の短い A 型の砂床形が風洞全体に形成され、それらが互いに合体しながら波長を伸ばし、次第に B 型へと変化した。A 型で最も速く移動した砂床形は、30.8 cm /min ほどで流下した。実験開始から 20 分後には A 型の砂床形はほぼなくなり、その後 B 型の砂床形同士の合体が進行して波長を伸ばした。B 型の平均流下速度は、11.7 cm/min 前後とゆっくりであった。

40 分間の実験で、最大波長 115 cm、波高 7.4 cm のメガリップルが成長し、風洞全体にわたり平均波長 74.5 cm、平均波高 4.3 cm で下に凸形のメガリップルが形成された。粗い粒子が集積することでその下位の砂は風食を免れ、いっぽう粗粒子が流送通過する区間では、砂面の侵食が進み、

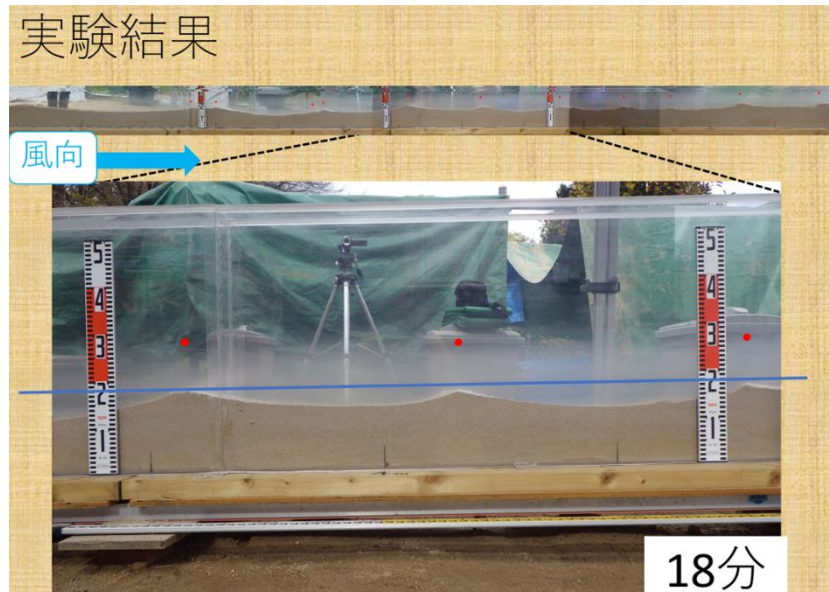


図 5 風洞実験形成されたメガリップルの一例 (実験開始 18 分後) 上が風洞全体写真、下が中央部の拡大写真である。

下に凸形円弧状のメガリップルが形成される様子が観察できた。

(3) Great Sand Dunes におけるメガリップル群の縦断測量

2016年09月05日～16日に、アメリカ合衆国カリフォルニア州北部にある Humboldt 湾周辺のメガリップルと海岸砂丘の調査 (09.06-10), ならびにコロラド州 Great Sand Dunes National Park におけるメガリップル調査 (09.12-14) を実施した。

Great Sand Dunes にてメガリップルの縦断面形を計測した3測線は、Site 1: N37° 31' 32.06", W105° 31' 24.02", 全長 40.3 m, ほぼ水平, Site 2: N37° 44' 41.03", W105° 31' 42.96", 全長 49.2 m, ほぼ水平, Site 3: N37° 44' 52.95", W105° 31' 27.95", 全長 23.5 m, 傾斜-3.5°, Site 3': N37° 44' 52.95", W105° 31' 27.95", 全長 49.7 m, 傾斜-10° であった。Site 3 を2つに分けたのは、メガリップルの峰の走行が途中で変化したためであった。いずれの断面も下に凸形の凹面形であったため、峰の位置の水平距離と、凹面最深部の水平距離ならびに深さを測り縦断面図を描いた (図6)。

メガリップルは50 mほどの区間で観察され、いずれも中央部で最大波長、最大波高を持つ形状であった。Site 1: 14.05 m 地点で波長 1.75 m, 波高 6 cm, Site 2: 20.2 m 地点で波長 3.55 m, 波高 20 cm, Site 3-3' では 32.5 m 地点で波長 7.1 m, 波高 20 cm であった。各測線毎に波長と波高の関係を調べた。波長は 0.1 m～7.1 m まであり、波長に応じて波高が数 cm～20 cm まで分布した。測線毎に波長と波高には弱い正の相関が認められたことから、メガリップルが観察される区間では、両端で小型のものが、中央部で大型のものが形成されていた。

この断面形態の特性は、メガリップルに限られたエリアにしか観察されないことにつながる。一般的に風紋が広く観察されるのに対して対照的である。本風洞実験でメガリップルが全域にわたり形成されたのは、無給砂の実験で砂面が低下傾向の時であった。給砂条件した実験では、メガリップルの形成に時間がかかると同時に、風洞内の一部に限られた。砂面が低下するとそこから飛砂が生じる。つまり、

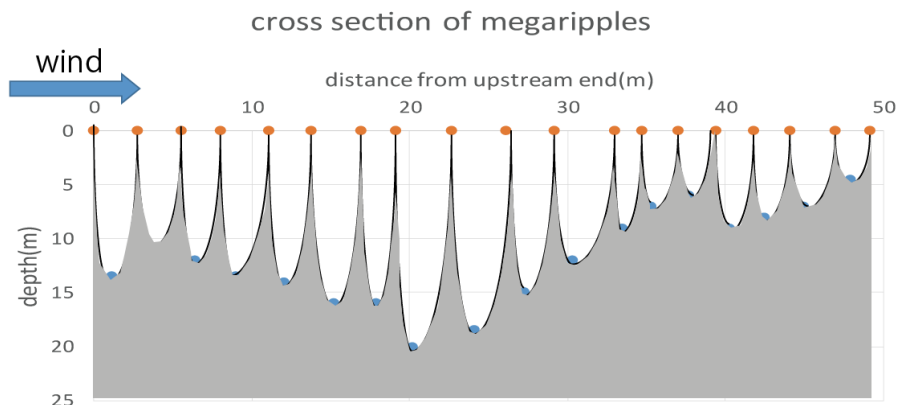


図6 Great Sand Dunes で計測したメガリップルの縦断面形の代表例
オレンジ点：峰の水平距離を、青点：下に凸の最深部の水平距離ならびに深さを計測。

Great Sand Dunes におけるメガリップルの断面は、中央部に向けて飛砂量が急激に増加することを意味する。このことが下流部での砂面低下速度を遅らせて、小型のメガリップルしか形成されなくなると考えられる。そしてさらに下流で消滅する。メガリップルの区域外では砂面が低下する条件にならない、あるいは堆積傾向にあるので、たとえ粗粒な粒子があったとしても、メガリップルへと成長しないものと推察される。

(4) まとめ

粗い粒子として径 4 mm のやや扁平なポリプロピレン楕円体粒子 (比重 0.9) を用いた 40 分間の風洞実験で、最大波長 115 cm, 波高 7.4 cm のメガリップルが形成され、風洞全体にわたり平均波長 74.5 cm, 平均波高 4.3 cm で下に凸形 (凹面円弧状) のメガリップルが模擬された。実験条件は風速 17.3 m/sec, 粗い粒子の散布量を 45 g/m とした無給砂実験であった。メガリップルは風により砂が侵食され砂面が低下する過程において、粗い粒子の集積区間で侵食が妨げられた結果、出現する砂床形である。粗粒子の集積区間が合体することで波長を伸ばし、本実験条件下では、11.7 cm/min 程で下流に移動した。

Great Sand Dunes におけるメガリップルの断面形態測量より、50 m 程の区間でメガリップルが観察され、その中央部に大型のものが両端部に小型のものが形成される特性が明らかになった。このことは飛砂量の観点からみて、砂面低下がメガリップル形成のもう一つの重要な要因であることを物語っており、本実験の結果と整合的であった。

<引用文献>

Bagnold, R.A. (1941) The physics of blown sand and desert dunes. London, Methuen, 265pp.

Cornish, V., (1897) On the formation of sand dunes, *Geographical Journal*, 9, 278-309

西山貴仁(2014)メガリップルの形成過程を探る風洞実験. 平成 25 年鳥取大学地域学部卒業論文, 18pp.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐藤善輝・小玉芳敬・鹿島 薫	4. 巻 24
2. 論文標題 珪藻化石群集および電気伝導度から推定される過去約1,300年間における湖山池の環境変化.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Laguna (汽水域研究)	6. 最初と最後の頁 27-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abulaiti, A., Kimura, R. and Kodama, Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of flexible and rigid roughness elements on aeolian sand transport.	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Arid Land Research and Management	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15324982.2016.1260665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉山弘晃・小玉芳敬
2. 発表標題 飛砂量に及ぼす給砂の影響に関する風洞実験.
3. 学会等名 鳥取地学会第22回総会・記念講演会・研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋 聖・小玉芳敬
2. 発表標題 ドーナツ型風洞風紋描画装置の実用に向けて ~排風状況と粒径混合比率の最適化~.
3. 学会等名 鳥取地学会第22回総会・記念講演会・研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小玉芳敬・高橋 聖
2. 発表標題 ドーナツ型風洞を用いた風紋描画装置の開発.
3. 学会等名 日本地形学連合
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉山弘晃・小玉芳敬
2. 発表標題 風洞実験における給砂量と飛砂量の関係～適切な給砂量の決定法～.
3. 学会等名 日本地形学連合
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮脇隼輔・小玉芳敬
2. 発表標題 鳥取砂丘海岸における海浜堆積物の粒径分布特性.
3. 学会等名 日本地形学連合
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小玉芳敬・竹野杏里
2. 発表標題 スーパースロービデオカメラを用いた飛砂粒子のreptation運動解析.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2016 地球人間圏科学Session H-GM地形学
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小玉芳敬・小出千晴
2. 発表標題 ドーナツ型風洞を用いた風紋描画装置の開発.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2016 領域外・複数領域Session M-ISジョイント ジオパーク
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮脇隼輔・小玉芳敬
2. 発表標題 鳥取砂丘海岸における沿岸砂州の地形断面形と堆積物粒度組成の特性.
3. 学会等名 鳥取地学会第21回総会記念講演回・研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岩淵博之・小玉芳敬
2. 発表標題 砂粒の鉱物組成よりみた鳥取県中部気高海岸の流域流砂系
3. 学会等名 鳥取地学会第21回総会記念講演回・研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岩淵博之・小玉芳敬
2. 発表標題 砂粒の鉱物組成よりみた鳥取県中部・気高海岸の流域流砂系.
3. 学会等名 日本地形学連合2016年秋季大会, 口頭発表
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮脇隼輔・小玉芳敬
2. 発表標題 鳥取砂丘海岸の粒径分布を千代川河口部・沿岸砂州の地形・堆積物から探る.
3. 学会等名 日本地形学連合2016年秋季大会, ポスター発表
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮脇隼輔・小玉芳敬
2. 発表標題 砂丘のことを海に訊く 浅海底～砂浜の砂の流れを探る.
3. 学会等名 鳥取砂丘再生会議 保全再生部会調査研究会 鳥取砂丘調査研究報告会 口頭発表
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小玉芳敬・永松大・高田健一（編）	4. 発行年 2017年
2. 出版社 古今書院	5. 総ページ数 102
3. 書名 鳥取砂丘学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関