

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：32657

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24656328

研究課題名(和文)自然地形の形成理論に基づく空間構造形態の創生

研究課題名(英文)Structural morphogenesis of space structures based on the theory of generating landform

研究代表者

朝山 秀一(Asayama, Shuichi)

東京電機大学・未来科学部・教授

研究者番号：50120100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：風紋と砂丘の形成理論および河床変動理論を用いて、凹凸のある曲面構造をラチスシェルの形式で生成して、形態の変化に対し、自動的に変形と応力を求めるシステムを作成した。風紋と砂丘の形成理論を用いた空間構造では、概ね上に凸な半周期分の正弦波に風紋の凹凸を加えた形態が構造的に優れており、それぞれの形状を正弦波に置換した規則的モデルを作成し、重力(自重と積載荷重2kN/m²)に対する変形と応力の特性を比較した結果、後者の方が、応力度比で30%程度性能が良いことが明らかになった。河床変動理論に基づく屋根構造の場合、形状の変化の大きいモデルほど最大曲げモーメントと変形が小さく、構造的に有利であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Computer systems of structural analysis for spatial structures with irregular surface were developed based on the theories generating wind ripple, sand dune and riverbed. The structure from wind ripple and sand dune is generated by adding coordinates of the ripple to those of the dune. The part of dune is an approximation using sinusoidal wave with a half wave length. Analytical results show the effect of wind ripple form to the stiffness of the dune can be thought to be large. When comparing this structure with one constituted of two regular sinusoidal waves instead of them, the stress and displacement of the later became 30% less than those of the former. As for the structure generated by a theory on the riverbed, the model with large fluctuation has a trend that the deflection and bending moment of the members decrease.

研究分野：建築分野へのコンピュータの応用

キーワード：構造形態創成 空間構造 風紋 砂丘 河床変動理論 構造デザイン アルゴリズムック・デザイン

1. 研究開始当初の背景

近代建築における構造は、三角、四角、円弧、立方体など数学的取り扱いが容易で単純明快なユークリッド幾何学的形態を基本に発展してきた。従って、現代の構造技術者は、単純で整形なものほど構造上の性質が優れていると考える傾向にあるが、地形、樹形、砂丘の風紋など自然界に存在する形には、単純で整形なものは殆どない。自然が一見複雑でバラバラな形を選択することには、自然科学上の合理的理由があるはずである。本研究では、こうした考え方にに基づき、自然地形を応用した建築の骨組設計の可能性について、風紋と砂丘¹⁾および河床²⁾³⁾などに着目し、物理学的な形態生成理論を用いて構造形態を作成して、コンピュータ骨組解析することで、その有用性の検証を計画した。

従来単純で明快であることを旨とした構造の対極にある複雑な自然界の形態を科学的に捉え、その基本ジオメトリーをもつ構造体を研究した事例は、国内外を問わず殆どないため⁴⁾⁵⁾、非線形物理学などを参考に手探りで研究を始めるような状況であった。

2. 研究の目的

自然地形の風紋と砂丘および河床に着目し、その生成理論¹⁾²⁾³⁾を用いて、線材で構成されるラチスシェルの空間構造の骨組モデルを作成して、鉛直荷重に対する基礎的力学性状を明らかにする。また、形態の変化に対する力学性状の変化を解析することで、それぞれのモデルにおける合理的な構造形態を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、Windows の COM の技術を用いて、自然地形を生成するプログラムと市販の 3 次元構造解析ソフトウェアが連動する構造解析システムを開発する。

(2) 風紋と砂丘および河床の生成理論¹⁾²⁾³⁾に基づく曲面構造について、鉛直荷重に対する応力と変形を求め、次にシステム上で形態を変化させ、繰返し応力と変形を計算するパラメタリック・スタディーを行い、空間構造として力学的に合理的な形態を探索する。

4. 研究成果

(1) 風紋を形成する砂の運動は、跳躍運動(saltation)と転がり運動(creep)に分けることができ、風紋が形成されるためには条件が存在する。その条件は、跳躍運動におけるパラメタ、高さ 0 における砂粒子の飛距離 L_0 と転がり運動の拡散係数 D の影響を受けるとされており¹⁾、このパラメタを変化させて図 1 のような風紋の安定したパターンを求め、それを構造形態に採用した。なお、図中の△および×印は、風紋が形成されなかったことを意味する。これらの形態に基づき、図 2 のような 30m×30m の平面を覆う空間構造を作成し、初期断面に φ300×30 を用いて、



図 1 風紋の安定したパターン

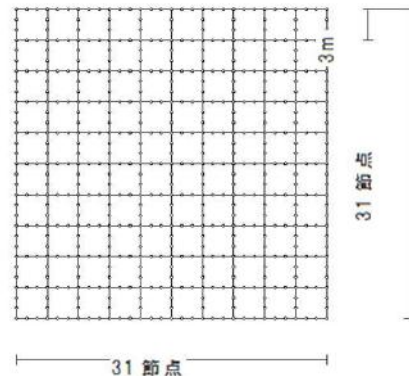


図 2 ラチスシェルの屋根伏図

形態の変化に対して、鋼材の全体積が一定になるよう径と厚さを調整して、変形と応力を解析した。最も変形と応力が少ないモデルは、図 1 の太枠で示された形態 ($L_0=6$ 、 $D=2.5$) になった。図 3 は、そのモデルで初期の形状に対して高さ方向に一律の倍率を乗じ、スパンに対し最大の高さを変化させ、 1kN/m^2 の鉛直積載荷重と自重に対して解析した結果である。縦軸は、許容変形比(スパン/300 に対する比)と許容応力度比を示している。支点は、正方形平面の向かい合う 2 辺をピン拘束した場合と、4 辺全てをピン拘束した場合について検討している。前者の場合、最大高さスパン比で 14% 程度の時、変形比と組合せ応力比が共に 0.8 となり、両者の余力が等しいという意味で合理性のあるモデルが得られた。

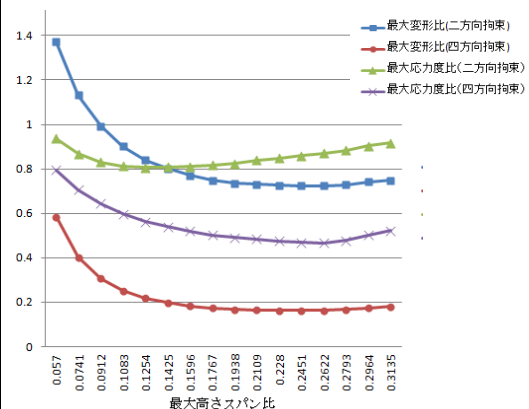


図 3 最大応力比及び最大変形比と最大高さスパン比(ブレースなし)

(2) 砂丘の形成過程も、風紋と同様に跳躍運動と転がり運動に分けることができるが、理論式には違いがある。数式は省略するが、生成された砂丘の断面は、振幅の異なる正弦波に近い形状なので、1周期分なら比較的良く正弦波で近似できる。そこで、半周期分の上に凸な正弦波を砂丘と考え、その上に風紋を加えられる形状を空間構造に用いることを考えた。この時、風紋の形状は、砂丘に対して小さ過ぎて、そのままでは構造体としての効果は期待できないので、 m 倍するものとした。すなわち、自然形態をそのまま再現して構造体にするのではなく、風紋の形状が力学的に影響するように工夫している。図4は、その過程を示している。

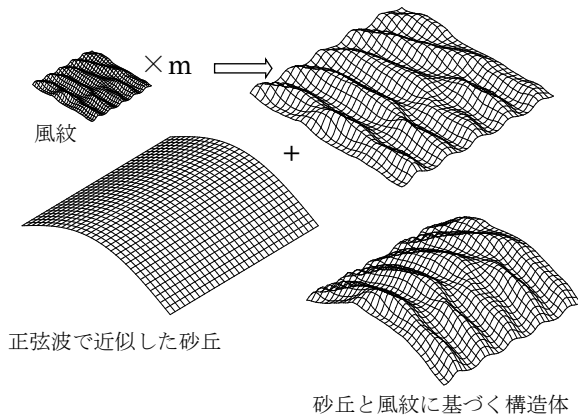


図4 風紋と砂丘に基づく構造モデル

次に、上記の図の全てのメッシュにブレースを配置し、 $60\text{m} \times 60\text{m}$ の平面を覆う空間構造を作成して、初期断面に $\phi 250 \times 30$ を用いて、前述同様、鋼材の全体積が一定になるよう径と厚さを調整して、 $1\text{kN}/\text{m}^2$ の鉛直積載荷重と自重に対して変形と応力を解析した。図5は、半周期分の正弦波を用いた砂丘に基づく構造モデルの最大組合せ応力度比と変形比を示したもので、ブレースの応力度比がフレームに小さく、ブレースが効いていないことが分かる。これに対して、風紋を砂丘に加えた形状に基づく構造モデルでは、図6のように

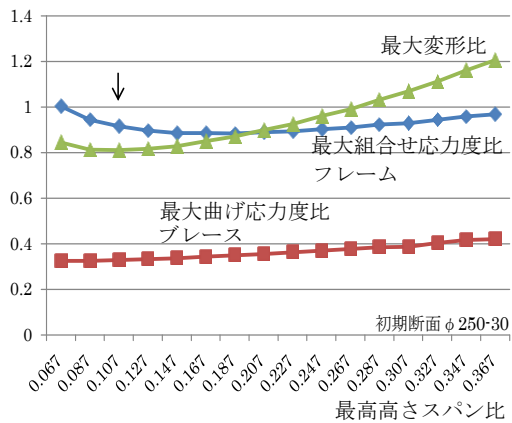


図5 正弦波による砂丘に基づく構造モデルの最大組合せ応力度比と変形比

ブレースの応力度比がフレームと同程度に高く、ブレースが効果的であることが分かる。また、変形比は前者(図5)の4.16倍低い値となっており、それが風紋の形態を加えた効果であると考えられる。

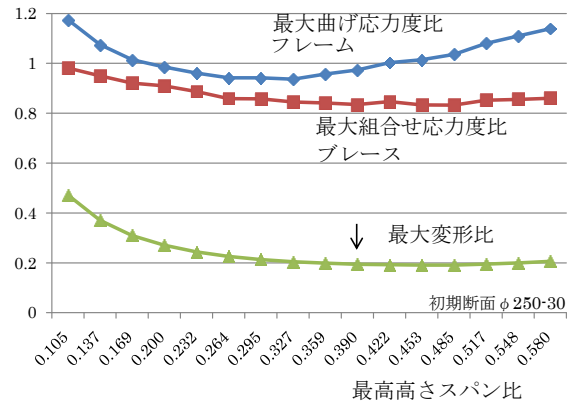


図6 風紋と砂丘に基づく構造モデルの最大組合せ応力度比と変形比

(3) 風紋と砂丘に基づく構造体をさらに2種類の正弦波で置き換えたモデルについて、同様な解析を行い、前述の結果と比較した。図7は、その構造モデルで、図8は変形比と組合せ応力度比を比較したものである。このモデルでは、風紋の不規則な部分を取り除いた結果、最大組合せ応力度比で30%程度性能が向上したことが分かる。言い換えれば、その程度の骨組の性能の差を許容すれば、風紋の不規則な形態を含んでも差し支えないと考えられる。



図7 正弦波で風紋と砂丘を単純化した構造モデル

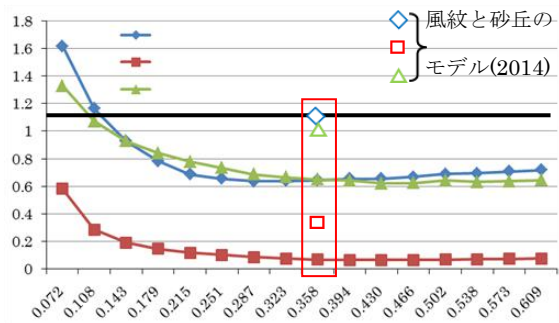


図8 正弦波で風紋と砂丘を単純化した構造モデルの最大組合せ応力度比と変形比

(4) 河床の変動理論²³⁾を用いて凹凸のある曲面を生成し、ラチスシェル形式の構造体を生成した。ここでは、河床の流砂で多くを占める掃流砂量に着目し、佐藤・吉川・芦田の式を用いている。初期条件として砂粒径 $d(\text{mm})$ 、初期流速 $v_0(\text{m/s})$ 、初期水深 $h_0(\text{m})$ 、初期勾配 I_0 、 y 座標点数 N_y 、繰り返し回数 m を設定し、これらの値を用いて掃流砂量および河床の変動量を求めた。モデルの大きさは、 $50\text{m} \times 50\text{m}$ で、 2m の格子全てにブレースを配置し、向かい合う 2 辺をピンローラー、両端ピン、固定ローラー、両端固定の 4 つの条件で支持している。部材は $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ ボックスの鋼材で、各節点には鉛直方向に 1kN の力を作用させた。河床の形状は、上記のパラメータに依存するが、図 9 のように 3 つのタイプに分かれた。

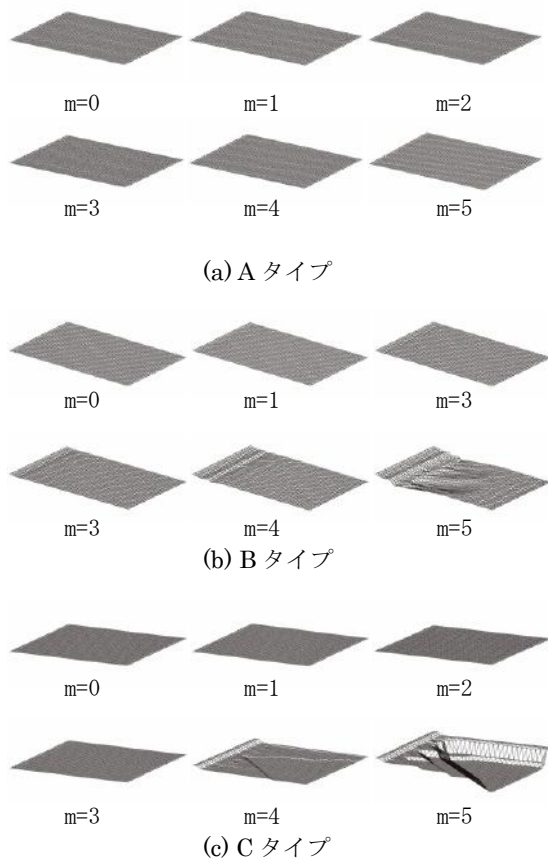


図 9 生成された各タイプのモデル

図 10 と図 11 は、それぞれ各タイプの変形図および曲げモーメント図で、その中では、流砂量が多いために形状が大きく変化する形状(C タイプ)に垂直に近い部材が得られることから、一定な勾配を持つ平面形状とは力の伝達機構が大きく違うことが分かった。また、現段階では、変化が大きい形状のほうが変形量や最大曲げモーメントも小さく、他に比べて有利な形状であると考えられる。

(5) 本研究の直接的な範囲ではないが、本研究により、自然の形態を構造に応用する視野

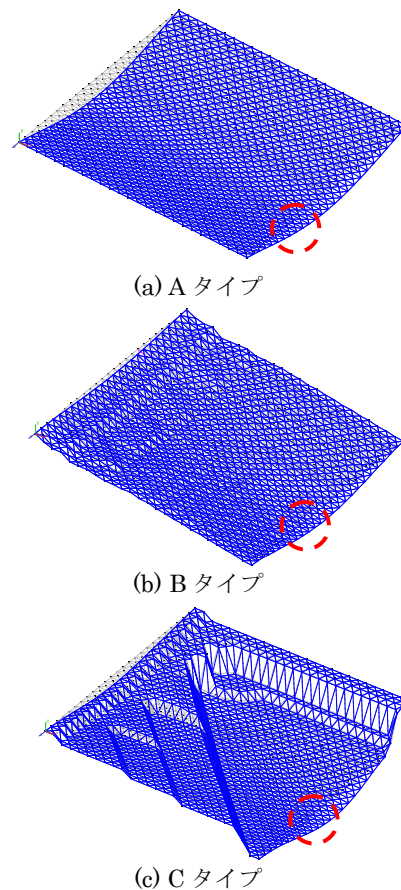


図 10 各モデルタイプの変形図

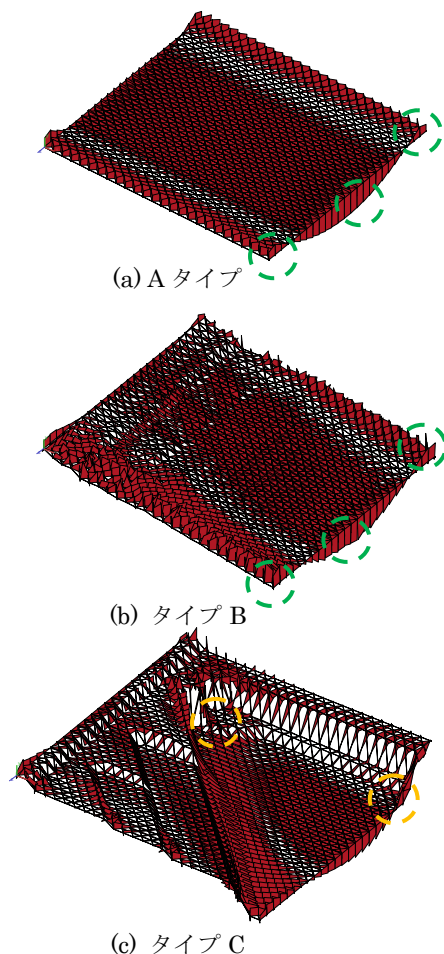


図 11 各モデルタイプの変形図

が広がり、フラクタル幾何学を用いて自然形態を建築構造に応用する研究が再活性化され、新たな展開が誘発された。その結果、Iasef MD Rian, Sharjah 大学(UAE)准教授、Mario Sassone Torino 工科大学教授(イタリア)らとの研究交流グループができ、その成果が国際ジャーナル *Automation in Construction*, ELSEVIER に掲載された(2016年6月)。予期しない研究の展開であったが、本研究がその成果誘発に極めて大きな貢献をしたと判断したため、付記します。

<引用文献>

- ① Nishimori H. and Ouchi N., *Formation of Wind Ripple Patterns and Dunes by Wind-blown Sand*, *Physical Review Letters*, 1993, 197-201
- ② 岩佐義郎、最新河川工学、森北出版、2005
- ③ 土木学会編、水理公式集、土木学会出版、1975
- ④ Iasef Md Rian and Mario Sassone, *Fractal-Based Generative Design of Structural Trusses Using Iterated Function System*, *International Journal of Space Structures*, Vol. 29, No. 4, 2014, 181-202
- ⑤ 前 稔文、朝山 秀一、フラクタル幾何学に基づく積層アーチの自動形状生成とその応用に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第557号、2002、181-188

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Iasef Md Rian and Shuichi Asayama, *Computational Design of a nature-inspired architectural structure using the concepts of self-similar and random fractals*, *Automation in Construction*, ELSEVIER, Volume 66, 2016, pp.43-58, 査読有
DOI:10.1016/j.autcon.2016.03.010

[学会発表] (計 10 件)

- ① Shuichi Aasyama and Toshifumi Mae, *Fractal Structures Based on the Geometry of Nature*, *Proceedings of the IASS WORKING GROUS 12 + 18, International Colloquium 2015, pap_15T-19*, 10 to 13 April 2015, pp.1-8 CDR, Tokyo Denki University (Tokyo Japan), 査読有
- ② Shuichi Aasyama, Toshifumi Mae and Kiyonori Takahashi, *Effect of Wind Ripple Form to Lattice Spatial Structure with Geometry from Sand Dune*, *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium, "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints" 15*

to 19 September 2014, Brasilia(Brazil)
査読有

- ③ 朝山 秀一、金井 龍一、さざ波の形状を曲面上にもつブレース付き空間構造の力学的性質、コロキウム構造形態の解析と創成 2015、日本建築学会、pp.137-142、2015年10月29日-30日、建築会館(東京都港区)
- ④ 清水 秀太郎、朝山 秀一、風紋と砂丘に基づく曲面をもつブレース付き空間構造について：風紋の形成システムに基づく空間構造の力学特性(その6)、日本建築学会 2014 年度大会学術講演梗概集、情報システム技術、pp.5-6、2014年9月12日-14日、神戸大学(兵庫県神戸市)
- ⑤ 金井 龍一、朝山 秀一、さざ波の形状がブレースを持つ空間構造の力学的性質に及ぼす影響：海洋波の生成アルゴリズムに基づく構造形態の創生(その6)、日本建築学会 2014 年度大会学術講演梗概集、情報システム技術、pp.7-8、2014年9月12日-14日、神戸大学(兵庫県神戸市)
- ⑥ 前 稔文、朝山 秀一、河床の変動理論に基づく屋根形状の基礎的力学特性、第37回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告)、日本建築学会、pp.239-242、2014年12月11日-12日、建築会館(東京都港区)
- ⑦ 朝山 秀一、金井 龍一、ブレースを持つ波形の空間構造の力学的性質、コロキウム構造形態の解析と創成 2013、日本建築学会、pp.51-5、2013年10月31日-11月1日、建築会館(東京都港区)
- ⑧ 高橋 清紀、朝山 秀一、一方向風で形成される風紋に基づく構面内にブレースを持つ構造体のモデル化と力学的性質：風紋の形成システムに基づく空間構造の力学特性(その4)、日本建築学会 2013 年度大会学術講演梗概集、情報システム技、pp.49-50、2013年8月30日-9月1日、北海道大学(北海道札幌市)
- ⑨ 綾部 将平、朝山 秀一、二方向風で形成される風紋に基づく構面内にブレースを持つ構造体の力学的性質：風紋の形成システムに基づく空間構造の力学特性(その5) 日本建築学会 2013 年度大会学術講演梗概集、情報システム技術、pp.51-52、2013年8月30日-9月1日、北海道大学(北海道札幌市)
- ⑩ 朝山 秀一、高橋 清紀、安定した風紋の形態に基づく構造形態の創成、コロキウム構造形態の解析と創成 2012、日本建築学会、pp.125-130、2012年10月26日-28日、奈良女子大学(奈良県奈良市)

[図書] (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東京電機大学・未来科学部・教授
朝山 秀一 (ASAYAMA, Shuichi)

研究者番号：50120100

(2) 研究分担者

大分工業高等専門学校・都市・環境工学
科・准教授
前 稔文 (MAE, Toshifumi)

研究者番号：90318171

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

有限会社 ミノル設計
村山 実 (MURAYAMA, Minoru)