

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月28日現在

機関番号：32657

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K14067

研究課題名(和文)自然界の流体が作る形に基づく空間構造の耐風性と形態創生

研究課題名(英文)Structural morphogenesis and wind resistance of space structures based on the form generated by fluid in nature

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、海洋波、風紋と砂丘、河床の形状に着目し、水や空気のような流体が自然界で作り出す形態を建築の空間構造に応用した場合に、その形が持つ耐風性を検討したものである。上記3つの形態に基づく空間構造モデルを流体解析した結果、いずれも山岳地形に風が吹きつけたような状況で、風圧力は屋根部分で大きく、谷部分では小さくなる傾向を示した。また、流体が作り出す形に基づく形態であっても、風圧分布が著しく低減されるような効果を見出すことはできなかった。しかし、風圧分布の最大値は、代表的な空間構造であるアーチと比較して、それほど大きな違いはなく、実際の設計にこうした構造形態を用いることが可能であるとの結論を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2020年東京オリンピックの国立競技場案(Zaha Hadid)やFrank O Gehryの作品のように、世界一流の建築家の作品でさえ、自由な空間造形もたらずものは、芸術的・文化的意義のみである。本研究の空間構造のジオメトリは、非線形物理学に基づく砂丘と風紋、河床、海洋物理学の波形に基づいており、自然科学各分野の成果を集積して建築工学に応用する点に科学・工学としての新しい意義を持っている。これらの構造体は、自然地形のように風を受ける性質があり、風圧分布もそれに近いことが分かった。この成果は建築による都市の風環境の変化を抑制するだけでなく、新しい科学を含む建築造形として社会に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：This research treats the wind resistance of the space structures based on the forms generated by fluid in nature such as ocean wave, wind ripple and sand dune and river bed variation. Fluid mechanical analysis was conducted on the above three types of structures and the results show that the maximum wind pressure becomes extremely large on the ridges of the roofs like a mountain subjected to the wind. It decreases on the dents like a valley. It is not recognized that these forms generated by fluid in nature may reduce the maximum values of the wind pressure. However those of the pressure are within a certain limit of usual wind loading when compared them with that of arch structure and the wind resistance design of these type of structures can be thought fully possible.

研究分野：建築構造

キーワード：構造デザイン 流体解析 耐風性 構造形態創生 風紋 海洋波 河床変動理論 ラチスシェル

1. 研究開始当初の背景

現代の建築では、2020年東京オリンピックの国立競技場案（設計：Zaha Hadid）やFrank O Gehryの作品のように、世界一流とされる建築家の作品に見られるfree formと呼ばれる自由な空間造形をもたらすものは、芸術的・文化的意義のみである。また、それを支える構造技術も、その意義の実現のために開発されることが多い。しかしながら、本研究の空間構造は、自然界の流体が形成する形状を建築のジオメトリに応用することで、自然科学的な意味を持つ新たな建築の創造に寄与するものと考えた。こうして開発した構造体は、非線形物理学に基づく砂丘と風紋¹⁾、河床²⁾、海洋物理学の波形³⁾に基づいており、自然科学各分野の成果を集積して建築学に応用する点に、技術としての新しい意義を持つと考えた。また、そうした作業は、自然科学と技術をシームレスにつないで行く役目もあると考えた。

2. 研究の目的

「研究当初の背景」で述べたように、砂丘と風紋¹⁾、河床²⁾、海洋物理学の波形³⁾に基づく空間構造については、既に研究に着手しており、特に、砂丘と風紋および河床の変動理論に基づく空間構造は、本会の助成基金^{注1)}の下、鉛直荷重に対しては十分な強度が確認されて、実際の空間構造に十分利用できるという知見を得ていた。また、海洋物理学の波形に基づく構造についても、同様な結論を得ていた。そこで本研究では、これらの構造物について、実際の設計で必要となる耐風性を、流体解析に基づき評価をすることを目的にした。

注1 独立行政法人日本学術振興会 学術研究助成基金助成金：自然地形の形成理論に基づく空間構造形態の創生（課題番号24656328）

3. 研究の方法

ワークステーション型コンピュータ（HP社Z230SFF）と流体解析ソフトウェア（FINE/Open with Labs）を購入して、砂丘と風紋、河床、海洋波の理論に基づく構造体に風速30m/sの風が作用した場合の風圧分布を求めた。なお、平面形状は、60m×60mを想定して、2k N/m²の鉛直荷重に対して高さをn倍に暫時変化させて、最も剛性が高くなる骨組モデルを選択し、その表面に面を作成して、流体解析用モデルとした。

4. 研究成果

(1) 流体解析のモデルの概要

本研究に用いた流体解析プログラムは、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用い、それを中心差分（2次精度）で解いている。解析には、k-εモデルを使用し、図1のように外形領域を示す壁には壁関数を用いず、解析モデルの表面にのみ壁関数を設定している。また、風向きや最高高さスパン比の異なるモデルによって、解析に用いるk、εを算出するためのパラメータは異なる。表1では、最高高さスパン比 $r_h=0.22$ の海洋波に基づくモデルの+X方向、-X方向に対するk、εの算出に用いたパラメータを示す。計算の収束判定には、Global Residual Fluid（解析中に解いているすべての方程式の残差の二乗平均平方根）が安定した値以下及び、収束カーブが安定した時点で収束と判定している。指定する値は、 $10^{-4.0} \sim 10^{-4.5}$ を目安とした。

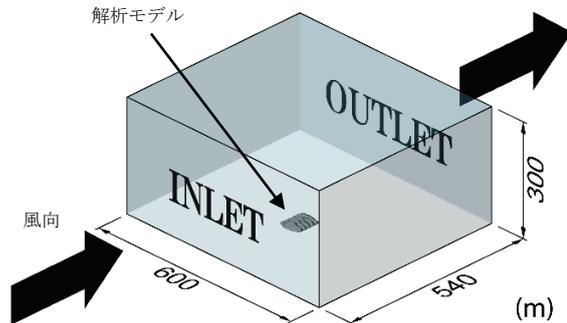


図1 流体解析の外形領域モデル

表1 海洋波に基づく構造モデルの流体解析に用いたk, εの値と計算に用いたパラメータ

長さ	風速	粘性係数	密度ρ	μT/μ
L(m)	U(m/s)	μ(Pa.s)	(kg/m ³)	
60	30	1.72E-05	1.2	1
Cμ	v(m ² /s)	k=7.94E-06	ε=3.97E-07	
0.09	0.0000143			

(2) 海洋波の生成理論に基づく空間構造の流体解析

① 形態生成の基本式

図2のように座標軸を定めると、うねりの運動方程式は、非圧縮性流体の基本式、

$$\text{div}V = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1-1)$$

の解として一般的に与えられ、積分定数等は、ベルヌーイの定理から導かれる下式、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + g \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (1-2)$$

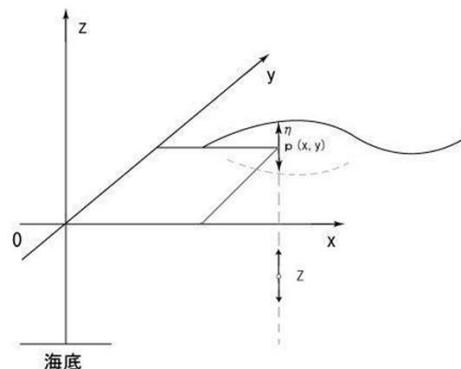


図2 平均水面Z=0における波の揺れ η

と波動方程式の境界条件から得られる³⁾。
解 η は、

$$\eta = \frac{A(1 - e^{-2kh})}{c} \sin \left(\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \left(\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} x + \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} y - \frac{\omega}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} t \right) \right) \quad (1-3)$$

$$\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} = l = \cos \theta, \quad \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} = m = \sin \theta \quad (1-4)$$

である。ここに、 c : 波の速度、 ω : 周波数、 h : 海底の深さである。なお、 θ は、波の進行方向と x 軸のなす角度である。

② 解析結果

図3は、 x 軸の正方向の風に対して海洋波に基づくモデルとアーチ構造の風圧を示したグラフである。このグラフは、風向と同方向で屋根の中央の位置(端部より30m)の断面における風圧を示したものである。グラフの横軸はスパン方向の距離(m)で、縦軸は風圧(N/m²)を示す。両モデル共に、25mの位置から風下側で風圧の低減がみられ、30mの位置ではアーチ構造の風圧は -225.85N/m^2 及び海洋波に基づくモデルは -100.80N/m^2 と小さくなった。50mの位置ではアーチ構造の風圧は、 -17.94N/m^2 、海洋波に基づくモデルは -131.83N/m^2 と大きくなった。

図4、 x 軸の正方向の風に対しての各モデルの最大の正圧と負圧を示したもので、アーチ構造の場合、正圧の最大値は 418.55N/m^2 、負圧の最大値 -533.81N/m^2 、屋根面全体の平均風圧は -156.47N/m^2 となり、海洋波に基づくモデルの正圧の最大値は 470.47N/m^2 、負圧の最大値 784.23N/m^2 、屋根面全体の平均風圧 -191.47N/m^2 となった。海洋波に基づくモデルはアーチ構造に対して、正圧の最大値では112.4%となり、負圧の最大値では146.9%、屋根面全体の平均風圧においては122.4%の値を示した。

図5は、 y 軸方向の風に対して、風向に対して同様な断面における風圧を示したものである。海洋波に基づくモデルの風圧は、アーチ構造のそれと類似した傾向を示す。30mの位置ではアーチ構造の風圧は -556.09N/m^2 、本モデルは -495.10N/m^2 で、アーチ構造の89.0%となった。

図6は y 軸方向の風に対しての各モデルの最大の正圧と負圧を示したもので、アーチ構造の場合、正圧の最大値 246.21N/m^2 、負圧の最大値 -3194N/m^2 、屋根面全体の平均風圧 155.54N/m^2 となった。本モデルの正圧の最大値 264.68N/m^2 、負圧の最大値 -1351.05N/m^2 、屋根面の平均風圧 -142.92N/m^2 となった。本モデルはアーチ構造に対して、正圧の最大値では107.5%となり、負圧の最大値では42.2%、屋根面全体の平均風圧においては91.9%の値を示した。

これ以外に、風向が x 軸と 30° および 60° をなす場合についても解析を行ったが、 x 軸と 30° の場合、中央の x 方向断面において、両者の差が著しかったが、それ以外では、概ね類似した傾向を示した。また、流体に基づく形態であっても、当初の予想に反して、風圧が小さくなるとは限らないことも分かった。

なお、流体解析に用いた海洋波に基づく空間構造の形態は、多数の構造モデルをケーススタディした中で最も鉛直剛性の高い架構造で、 x 方向の周期2.4秒、波高2.2mの波と y 方向の周期24秒、波高22mを組合せて得られたものである。この時、海洋波の速度は5m/sec、海底までの深さは4000mとして計算した波を用いている。

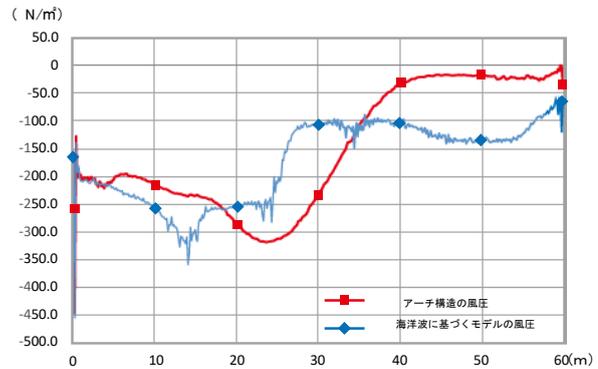


図3 x 軸の正方向の風に基づく風圧(x 方向断面)

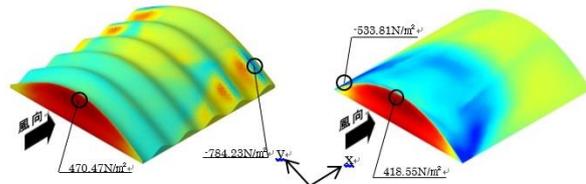


図4 x 軸の正方向の風に基づく風圧(x 方向断面)

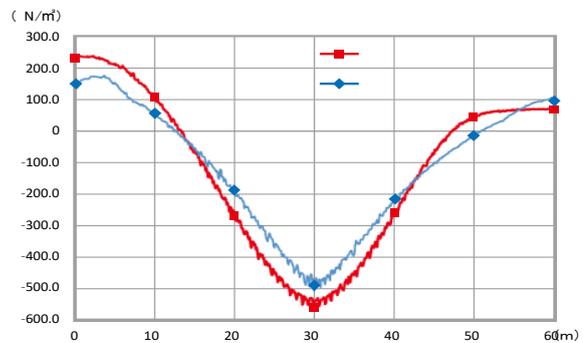


図5 y 軸の正方向の風に基づく風圧(y 方向断面)

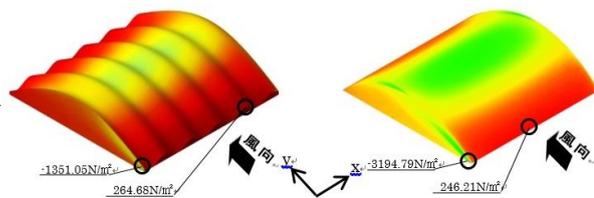


図6 y 軸方向の風に基づく構造モデルの風圧分布

(3) 風紋と砂丘の生成理論に基づく空間構造の流体解析

① 形態生成の基本式

風紋の形成理論は、既に知られているので¹⁾概略を記す。図7のように、風紋を形成する砂粒子の運動は、跳躍運動(saltation)と転がり運動(creep)に分けることができる。図のように跳躍運動では、風により高さに比例した飛距離Lを一定量qの砂が飛ぶものとする。計算の1ステップに跳躍と転がり運動が含まれるので、計算のnと(n+1)ステップの間において、跳躍が終了した時間ステップをn' とすると、位置P(x, y)における跳躍後の高さHn'(x, y)は、ステップnにおける高さHn(x, y)を用いて、以下のように示される。

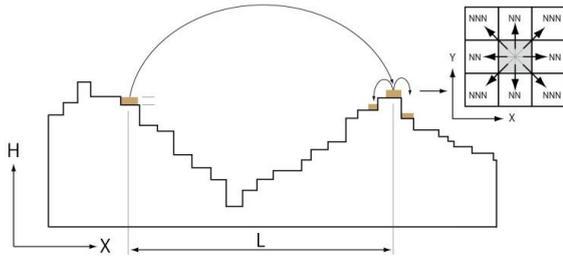


図7 y軸方向の風に基づく構造モデルの風圧分布

$$Hn'(x, y) = Hn(x, y) - q \quad (2-1)$$

$$Hn'(x + L(Hn(x, y)), y) = Hn(x + L(Hn(x, y)), y) + q \quad (2-2)$$

$$L = L_0 + b Hn(x, y) \quad (2-3)$$

なお、q：跳躍する砂の量、L₀：高さ0における砂の飛距離、b：飛距離のパラメータである。次の転がり運動は、次式のようにH(x, y)の各点P(x, y)における砂を周囲に重みを付けて等方的に分散させることで示されている。

$$H_{n+1}(x, y) = Hn'(x, y) + D(1/6 \sum Hn'(x, y) + 1/12 \sum Hn'(x, y) - Hn'(x, y)) \quad (2-4)$$

ここで、Dは拡散係数、NNはP(x, y)に縦横に隣接した点、NNNは斜めに隣接した点を表す。この二つの計算をハイトフィールド全体について繰り返し適用する。

砂丘形成の転がり運動は、風紋形成時と同じ式を用いる。跳躍運動は、風紋の場合より規模が大きくなるので斜面の傾斜や風向を考慮し、

$$q = q_0 (\nabla \cdot Hn(x, y)) = q_0 + b' \tanh(\nabla \cdot Hn(x, y)) \quad (2-5)$$

と記される¹⁾。この式のように、飛砂量qは砂丘の風上側では大きく、風下側では小さくする。但し、 $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y$ とする。ここで、q₀とb'は飛砂量のパラメータである。また、砂丘の風上側で跳躍した砂はすぐ斜面に衝突するので飛距離Lは小さく、風下側では大きくなり、下式

$$L = L(\nabla \cdot Hn(x, y)) = L_0 - b \tanh(\nabla \cdot Hn(x, y)) \quad (2-6)$$

で表わされる¹⁾。

② 解析結果

図8は、砂丘の形状に風紋を拡大して重ね重ね合わせて作成した構造体である。砂丘の形態を正弦波で近似し、その上にn倍した風紋の形状を重ねている。平面形は、60m×60mで砂丘の部分は、試行錯誤の結果、上に凸の部分に構造に利用すると剛性が高くなることが分かったので、それを砂丘の一部としてモデルに用いた。流体解析のパラメータとそれに基づくk、εの値は、1章の表1と同じである。また、外形領域、境界層の設定も同様である。

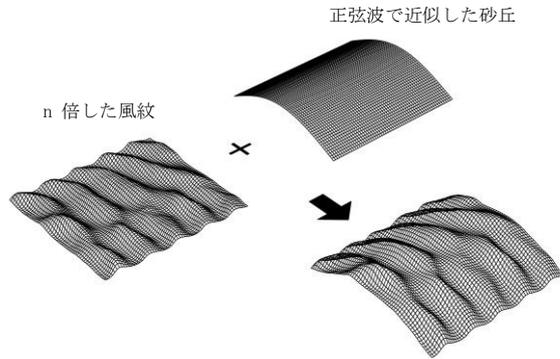


図8 砂丘と風紋の合成方法

ここでは、X方向の正負、Y方向の正負の風に対して、スパン60m×60m、最高高さ15.82m、最高高さスパン比r_h=0.32および0.39のモデル、スパン60m×60m、最高高さ13.25m、r_h=0.32のモデル、高さが14.80mのアーチ構造モデル(以下アーチ)の風圧を解析・比較した。

図9は、屋根の中央の断面における幅1m毎の風圧の平均値を示したもので、縦軸は風圧の平均値(N/m²)、横軸にスパン方向の位置(m)を示している。風上側5~8mの位置で、最大高さスパン比の大きいモデルほど、アーチに比べて局所的に強い負圧を受けている。しかし、それ以外の部分では山の尾根に相当する部分で負圧が高くなる傾向にある。

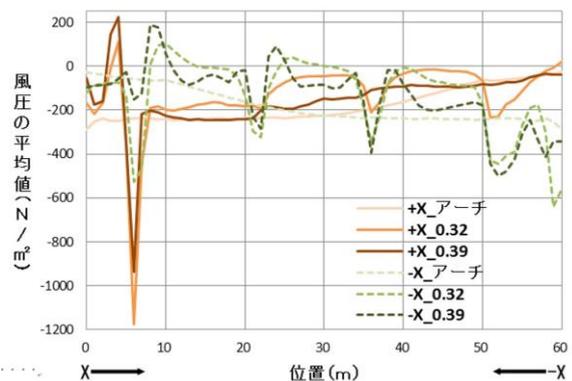


図9 X方向風による風圧の平均値

図10は、最高高さスパン比r_h=0.39のモデルがX方向の正の風向きを受けた場合の風圧分

布と Y 方向のそれを示したものである。モデル全体の最大、最小風圧は、前者で 416.70N/m²、-1589.38 N/m²、後者で、230.31 N/m²、-1222.66.38 N/m²となり、正方向からの風圧力が大きいことが分かった。また、それらの値は、エッジ近くの屋根で発生していることが分かった。

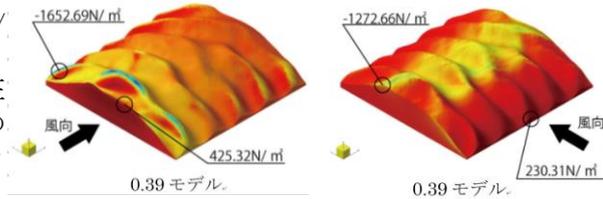


図10 X Y二方向の風に基づく構造モデルの風圧分布

(4) 河床の変動理論に基づく空間構造の流体解析

① 形態生成の基本式

河床変動の計算は、佐藤・吉川・芦田の式を用いており、以下にその概略を記す。ここでは、河床変動は、掃流砂量のみ考慮しており、その砂量は、以下の式で与えられる。

$$q_B = \frac{u_*^3}{sg} \cdot \varphi(n) \cdot F(\tau_0 / \tau_c) \quad (3-1)$$

ここで、 q_B は、単位幅足りの掃流砂量(m³/s)、 s 砂粒の水中比重、 g は重力加速度、 u_s は摩擦速度(m/s)で、以下の式で与えられる。

$$u_* = \sqrt{gRI} \quad (3-2) \quad R: \text{径深(m)}, I: \text{河床勾配、}$$

$$\varphi(n) = 0.623 \quad n \geq 0.025$$

$$\varphi(n) = 0.623 \left(\frac{1}{40n} \right)^{3.5} \quad n \leq 0.025 \quad (3-3) \quad n: \text{粗度係数}$$

となる。(3-1)式 $F(\tau_0 / \tau_c)$ は、掃流力 τ_0 (kg/m²)と限界掃流力 τ_c (kg/m²)の関数で近似的に、

$$F(\tau_0 / \tau_c) = \frac{1}{1 + 8 \left(\frac{\tau_c}{\tau_0} \right)^4} \quad (3-4)$$

$$\tau_0 = \rho \cdot u_*^2 \quad (3-5)$$

$$\tau_c = \rho \cdot u_{*c}^2 \quad (3-6) \quad \rho: \text{水の密度、}$$

さらに、限界摩擦速度 u_{*c} は、砂粒径 d (cm)を用いて、

$$\begin{aligned} u_{*c}^2 &= 80.9 d & d \geq 0.303 \text{ cm} \\ &= 134.6 d^{31/22} & 0.118 \leq d \leq 0.303 \text{ cm} \\ &= 55.0 d & 0.0565 \leq d \leq 0.118 \text{ cm} \\ &= 8.41 d^{11/32} & 0.0065 \leq d \leq 0.0565 \text{ cm} \\ &= 226 d & d \leq 0.0065 \text{ cm} \end{aligned} \quad (3-7)$$

となる。本研究では、これらの式を用いて、 Δt 時間内の河床の変動量 Δz を求めている。

$$\Delta z = z_{t_0 + \Delta t} - z_{t_0} = \frac{q_{B1} - q_{B2}}{B(1 - \lambda)\Delta x} \Delta t \quad (3-8)$$

ここに、 q_{B1} 、 q_{B2} : 上下流断面の通過流砂量(m³/s)、 B : 河川幅(m)、 λ : 河床材料の空隙率(≒0.4)、 Δx : 区間距離である。

② 解析結果

表2は、河床の変動理論に基づく構造の流体解析に用いた k 、 ε の値と関連する諸定数である。平面形は、50m×50mとしており、その結果、若干、前の2例と k 、 ε の値が違っている。

図11～13は、河床の変動が少ないType A、変動があるType B、著しい変動があるType Cについて流体解析を行い、風圧の分布を示したものである。風向は y 方向左手側が風上である。風を最初に受ける風上側壁面を除いた屋根面では、図11のType Aで、風上から屋根の中央部分までの間に、負圧が、-450N/m²～-350N/m²と減少し、その後、右端に至ると約-50N/m²まで低下する。図12のType Bでは、屋根面の風圧分布の変動は少なく、-250N/m²～-150N/m²くらいの値を示している。図13のType Cでは、屋根面全体で-200N/m²～-150N/m²くらいの負圧が生じているが、風上に近い

表2 河床の変動理論に基づく構造モデルの流体解析に用いた k 、 ε の値と計算に用いたパラメータ

長さ L(m)	風速 U(m/s)	粘性係数 μ (Pa.s)	密度 ρ (kg/m ³)	$\mu T / \mu$
50	30	1.72E-05	1.2	1
C μ	v (m ² /s)	k=9.53E-06	1.2	
0.09	0.0000143			

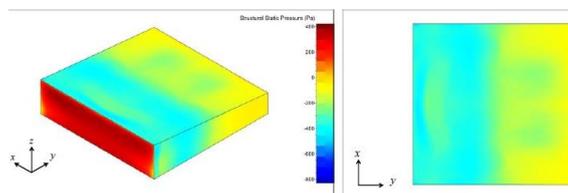


図11 Y 方向の風に基づく構造モデルの風圧分布(Type A)

部分の風圧が 0 に近い正圧が認められた。

図14は、Type Cの流線を描いたものである。風上側に尾根のように突出した部分で、風速が最も高く、風はそこから屋根の上を飛び越えて行くものと、屋根の谷部分に流れて行くものに分かれている。屋根の谷部分は、風速が5m/s以下の場所が現れている。

こうした傾向は、海洋波に基づく空間構造と風紋と砂丘に基づく空間構造にも存在した。

(5) 結論

本研究は、海洋波、風紋と砂丘、河床の形状に着目し、水や空気のような流体が自然界で作り出す形態を建築の空間構造に応用して、その形が持つ耐風性を検討したものである。この3つの形態に基づく空間構造モデルを流体解析した結果、いずれも山岳地形に風が吹きつけたような状況で、風圧力は尾根部分で大きく、谷部分では小さくなる傾向を示した。また、流体が作り出す形に基づく形態であっても、風圧分布が著しく低減されるような効果を見出すことはできなかった。しかし、風圧分布の最大値は、代表的な空間構造であるアーチと比較して、それほど大きな違いはなく、実際の設計にこうした構造形態を用いることが可能であるとの結論を得た。

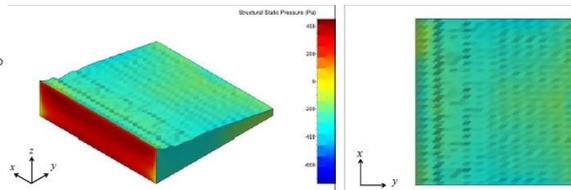


図12 Y方向の風に基づく構造モデルの風圧分布(Type B)

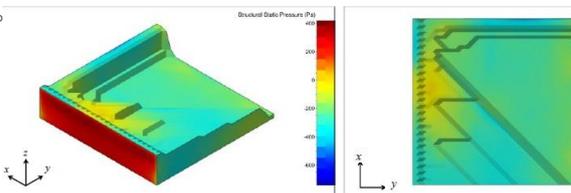


図13 Y方向の風に基づく構造モデルの風圧分布(Type C)

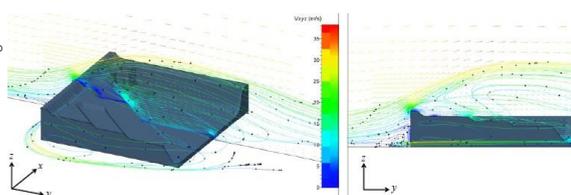


図14 Y方向の風に基づく構造モデルの流線分布(Type C)

<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 関根義彦、海洋物理学概論、成山堂書店、2003

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 朝山 秀一、前 稔文、海洋波の生成理論に基づく空間構造の風圧分布に関する研究 その2 軸対称性をもつブレース付き波形空間構造の風圧分布、日本建築学会大会学術講演集、2018、37-38
- ② Toshifumi MAE、Shuichi ASAYAMA、Wind pressure on spatial frame generated by quicksand phenomenon、Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 “Interfaces: architecture. engineering. science”、査読有、2017、pp.1-8
- ③ 朝山 秀一、海洋波の生成理論に基づく空間構造の風圧分布に関する研究 構造モデルと解析方法の概要、日本建築学会大会学術講演集、2017、97-98

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：前 稔文

ローマ字氏名：(MAE, Toshifumi)

所属研究機関名：大分工業高等専門学校

部局名：都市・環境工学科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：90318171

(2) 研究協力者

(3)

研究協力者氏名：村山 実

ローマ字氏名：(MURAYAMA, Minoru)