

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06109

研究課題名（和文）大スパン曲面軽量構造の強風時振動特性の解明及び連成解析手法に関する研究

研究課題名（英文）Study on Dynamic Characteristics and Coupling Analysis of Long-span Curved Structures in High Winds

研究代表者

張 景耀 (Zhang, Jingyao)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50546736

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,700,000 円

研究成果の概要（和文）：大スパン軽量構造の風振動には、その振動特性の特異性や、風荷重のレイノルズ(Re)数依存性や、計画外の開口部による荷重・応答変化や、既存連成解析手法の高コストなど多くの課題がある。その強風時構造性能を正しく評価するために、本研究では内圧・外圧・構造振動の連成問題に対して理論的基礎を築く。また、任意形状の大スパン軽量構造に適用できる強風・構造振動の連成解析に対して、渦法に基づいた数値的手法を開発することを目的とする。複雑な形状を有する大規模な曲面空間構造の形状計測および振動計測技術の確立も研究対象となる。更に、空間構造の強風による長時間振動を低減するための液体ダンパーを開発する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大スパン軽量構造の多くは、大型集客施設であり、災害時の避難所としても指定されるため、非常に重要な社会的存在でもある。また、これらの構造物は、通常の構造物より柔らかく、大変形が起こりやすいため、強風による被害は国内外でも数多く報告されている。本研究の成果により、風荷重が支配となる大スパン軽量構造に対して、低いコストと高い信頼性でパラメトリックスタディを行うことができるため、より高い経済性とより良い構造性能を有する新型大スパン構造の創生に繋がると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Study on wind-induced vibration of long-span light-weight structures has a number of difficulties: the wind load is sensitive to the Reynolds number; coupled vibration of flexible envelope and internal pressures due to unexpected openings is complicated; and fluid-structure interaction analysis is of high computational costs. In this study, we developed an analytical model for analysis of coupled vibration of the structural envelope and internal pressure; moreover, we developed vortex method for fluid-structure interaction analysis; for the structure with complex shape, we explored the SfM (Structure from Motion) technique for shape measurement, and also conducted vibration tests on a real shell structure; and finally, we presented a new composite liquid damper to mitigate long-term structural vibrations of these structures.

研究分野：建築構造

キーワード：大スパン構造 風振動 渦法 開口部 内圧 連成

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

日本には毎年平均4つほどの台風が上陸しており、ダウンバーストや竜巻などの局地的強風も頻発している。地球規模の気候変動に伴い、日本周辺の海水温が高くなり、台風などの強風の発生数および最大風速が年々増加する傾向にあるため、今後の強風による構造物被害も益々多くなると予想される。

軽量かつ効率的に大きな無柱空間を覆う大スパン軽量構造は、体育館やショッピングモールや大型倉庫など大きな内部空間が必要とする構造物によく利用されている。これらの構造物の多くは、大型集客施設であり、災害時の避難所としても指定されるため、非常に重要な社会的存在でもある。

大スパン軽量構造は、スパンのわりに非常に軽く、固有振動数が低いため、地震被害が少ない。一方で、通常の構造物より柔らかく、大変形が起こりやすいため、強風による被害は国内外でも数多く報告されている。しかし、大スパン軽量構造の風振動に関する研究が少なく、その振動特性の特異性や、風荷重のレイノルズ(Re)数依存性や、計画外の開口部による荷重・応答変化や、既存連成解析手法の高コストなど多くの課題がある。

### 2. 研究の目的

大スパン軽量構造の強風時構造性能を正しく評価するために、本研究では内圧・外圧・構造振動の連成問題に対して理論的基礎を築き、更に、任意形状の大スパン軽量構造に適用できる強風・構造振動の連成解析に対して渦法に基づいた数値的手法を開発することを目的とする。また、複雑な形状を有する大規模な曲面空間構造の形状計測および振動計測技術の確立も研究対象となる。更に、空間構造の強風による長時間長周期振動を低減するため、複合型液体ダンパーを開発する。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的の達成にあたり、本研究では以下の課題に取り組んだ。

1) 計画外の開口部を通じ、開口部両側の外圧と内圧の連動、更に屋上外圧および構造物の大変形との動的連成問題に関する理論を構築し、縮小実験によりその有効性を検証する。また、提案式を用いて空力減衰を評価する。

2) SfM 技術を利用して、複雑な曲面空間構造の形状を計測する。また、実大構造物の振動計測により、その振動特性を明らかにする。

3) メッシュ（再）分割を不要とする、流体解析と構造解析を一体化した渦法に基づいた数値的連成解析手法を提案する。

4) 異種類の液体ダンパーを融合して、振動数の変化にロバスト性をもつ新型液体ダンパーを開発する。

### 4. 研究成果

#### 1) 開口部を通じた内圧・外圧の連成

閉鎖型空間構造の風振動メカニズムを解明するため、その大変形と突然開口部を通じた外圧と内圧の連動に関する理論的手法を開発し、縮尺振動実験よりその有効性を検証した。

開口部の空気質点(air slug)の移動と、体積変化が伴う屋根の支配振動モードによる2自由度系(図1)として定義し、屋根の運動と(開口部と屋根の)外圧と内圧変動に関する支配方程式を誘導した。二自由度システムを忠実に再現できる振動模型(図2)を新たに提案・製作した。付加質量および開口部サイズを変更し、振動模型の自由振動実験によって、支配方程式の有効性を一部検証した(図3)。また、自由振動実験および支配方程式を用いて、開口部を通じた空気減衰効果(loss coefficient)を定量的に評価する方法を提案した(図4)。更に、風洞実験(図5、図6)によって、既存研究の結論とは異なり、内圧は開口部の外圧より小さいことを判明した。

提案手法により、剛体模型の実験またはシミュレーションによって得られた開口部および屋根の風圧を用いて、構造物の内圧およびその大変形を予測することができる。

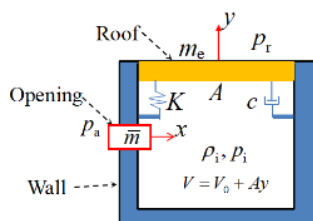


図1 解析モデル

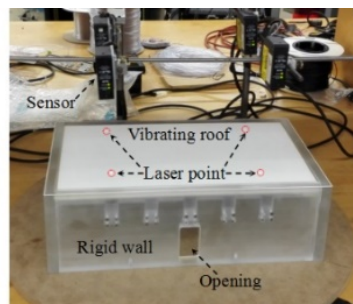


図2 模型の自由振動実験

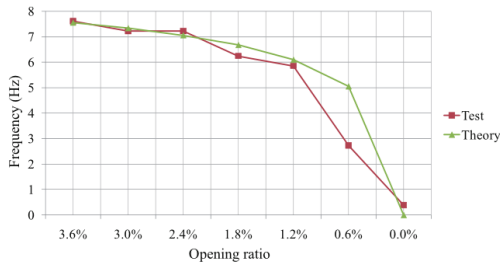


図3 固有振動数の検証

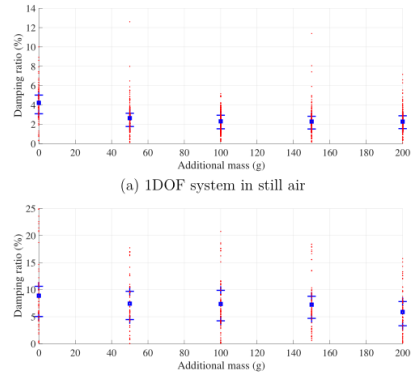


図4 減衰評価

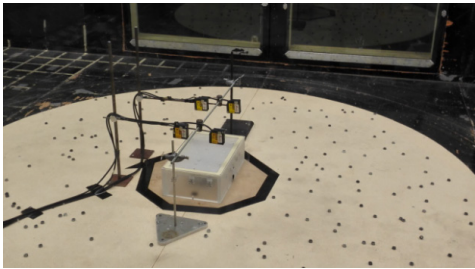


図5 風洞実験

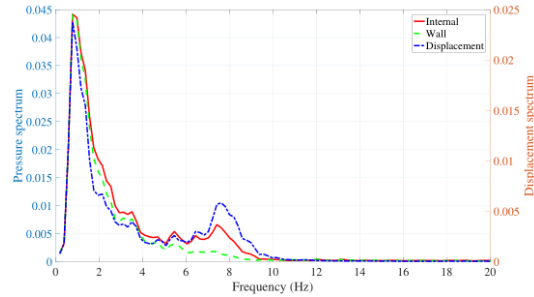


図6 構造と内圧との共振

## 2) 曲面（シェル）構造の実測

図7に示す鉄筋コンクリート造4枚組合せHPシェル屋根に対して、常時微動および人力加振実験を行った。加速度応答スペクトルより、多数のピーク値が密集していることと、人力加振の場合により多くの高次振動モードが同時に励起されることが分かった（図8）。配筋の等価的剛性を考慮した有限要素解析モデルの固有値解析結果（図9）は実測によく一致していることにより、配筋の簡易評価法を有効であることを検証した。

また、複雑な形状を有する大規模構造物に対して、ドローン写真などの2D画像により、3Dモデルを再構築（図7）するSfM（Structure from Motion）技術の有効性を確認した。

提案手法により、複雑で大規模な空間構造物に対しても、有限要素モデルを作成し、振動計測値との照合により、既存のモデリングアップデート法を用いて正しい剛性分布を同定することが可能である。



図7 SfMによる3Dモデル

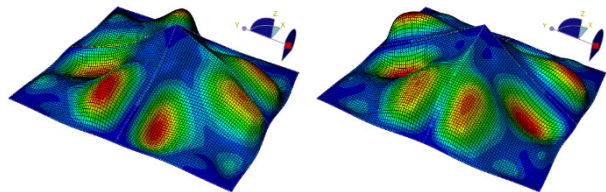


図8 振動モード ( $f_1 = 4.295 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 4.30 \text{ Hz}$ )

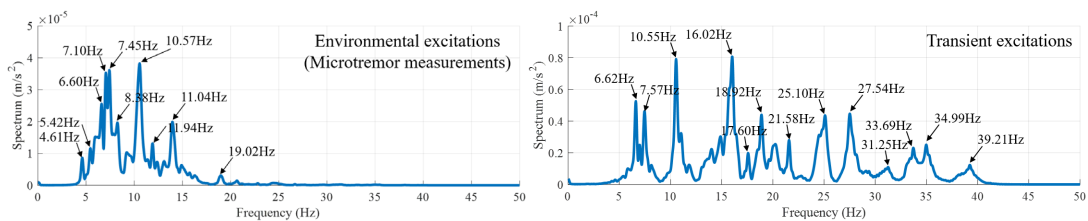


図9 常時微動計測（左）と人力加振（右）による鉛直方向の加速度応答スペクトル

### 3) 渦法による連成解析

渦度に関する厳密な数学理論に基づいて、計算格子を不要とする非圧縮流体のための渦法のアルゴリズムを実現した。ランダム・ウォーク戦略に基づいて、剥離を含めた乱流の数値シミュレーションができた (図 10)。境界要素法に基づいて、境界上の圧力を計算したため、圧力に関する圧力ポアソン方程式を解く従来手法より、計算コストを大幅に削減することができる。

また、流れ場の境界条件を満足するには、その境界の近傍に点渦を置くため、構造物の変形 (変位) を統一的に表現することもできた。その一例として、一様流による円形バリアの連成解析は、図 11 に示す。

提案手法により、低コストで曲面空間構造の風との連成解析が可能となる。

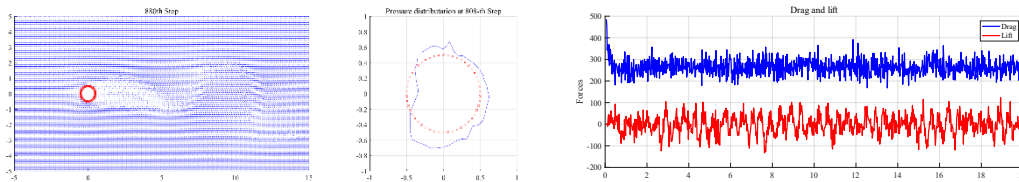


図 10 一様流れにおける速度分布 (左)、圧力 (中)、揚力・抗力 (右) ( $Re=10^5$ )

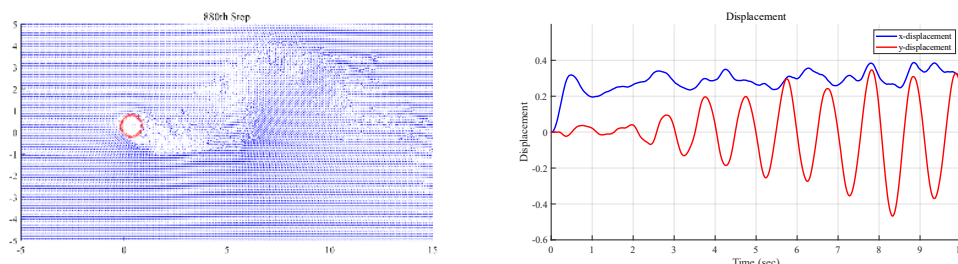


図 11 一様流れにおける速度分布 (左) と、円形バリアの剛体変位 (右) ( $Re=10^8$ )

### 4) 同調液体ダンパー

長周期を有する空間構造または超高層建物の風または地震による長時間長周期振動を低減するため、受水槽のスペースを最大限に利用した複合型同調液体ダンパーを開発した (図 12)。建物の固有周期変化に対する最大のロバスト性を持たせる寸法最適設計法を提案した。

画像処理技術を用いて、高速カメラで撮影した液体の運動を追跡する (図 14) ことにより、液体ダンパーの固有振動数を同定する方法を提案した。その有効性は、レーザー変位計の計測結果との比較により検証された (図 13)。また、構造との連成系に関わる支配方程式を誘導し、検証実験を行った。

提案のダンパーは、空間構造水平振動の低減への応用が可能である。

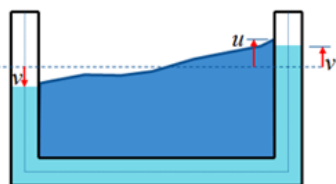


図 12 複合型同調液体ダンパー

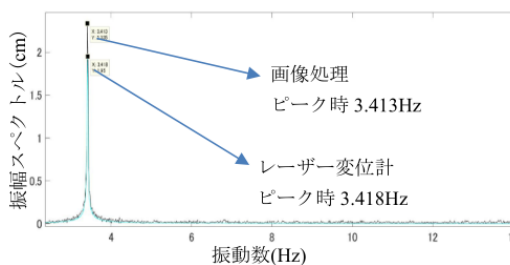


図 13 振動数での検証

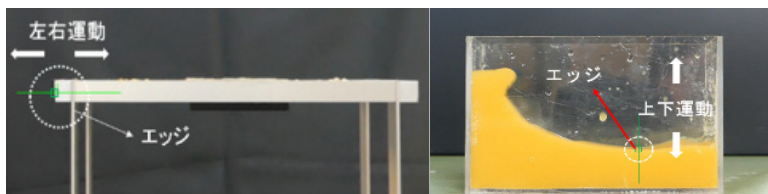


図 14 構造 (左) と液体 (右) の変位追跡

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zu Yunfei、Fan Wenliang、Zhang Jingyao、Li Zhengling、Ohsaki Makoto	4. 巻 36
2. 論文標題 Investigation of equivalent correlation coefficient based on the Mehler 's formula	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Computations	6. 最初と最後の頁 1169 ~ 1200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1108/EC-07-2018-0316	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
1. 著者名 X.Y. Wang, J.Y. Zhang, J.G. Cai, J. Feng	4. 巻 34(2)
2. 論文標題 Force-finding analysis of cable-net deployable antenna considering shape constraints	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Southeast University	6. 最初と最後の頁 213, 219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3969/j.issn.1003-7985.2018.02.011	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
1. 著者名 J.Y. Zhang	4. 巻 63B
2. 論文標題 Evaluation of damping properties of long-span structures with flexible envelope and a single dominant opening	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 107, 112
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 Zhang Jingyao、Aoki Takayoshi	4. 巻 35
2. 論文標題 A frequency domain noniterative algorithm for structural parameter identification of shear buildings subjected to frequent earthquakes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 615 ~ 627
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/mice.12502	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 Su Yan, Ohsaki Makoto, Wu Yue, Zhang Jingyao	4. 巻 198
2. 論文標題 A numerical method for form finding and shape optimization of reciprocal structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 109510 ~ 109510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2019.109510	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 J.Y. Zhang and T. Aoki
2. 発表標題 Dynamic experiments on an HP shell roof
3. 学会等名 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Aoki, J.Y. Zhang, H. Aoki, N. Takahashi, Y. Nakano, H. Choi
2. 発表標題 Vibration characteristics of airship hangar in Augusta, Italy
3. 学会等名 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C.P. Zhu and J.Y. Zhang
2. 発表標題 Study on a new type of composite tuned liquid damper
3. 学会等名 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朱シン鵬, 張景耀
2. 発表標題 同調液体ダンパーの振動特性に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J.Y. Zhang and G.A. Kopp
2. 発表標題 Evaluation of mass and damping effects for structures with flexible envelope and dominant opening
3. 学会等名 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J.Y. Zhang and G.A. Kopp
2. 発表標題 ests on a building model with a dominant opening and flexible roof
3. 学会等名 International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朱シン鵬, 張景耀
2. 発表標題 画像処理技術を用いた同調液体ダンパーの固有振動数推定に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会東海支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J.Y. Zhang and K.C.S. Kwok
2. 発表標題 Robust design of a new composite tuned liquid damper
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Structural Engineering (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 J.Y. Zhang and G.A. Kopp
2. 発表標題 A 2dof analysis model for vibration of flexible envelope with a dominant opening and its verification
3. 学会等名 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山下倉太郎, 張景耀
2. 発表標題 応急危険度判定支援システムのための建物3次元モデル再構築
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張景耀, 青木孝義
2. 発表標題 既存鉄筋コンクリート造4枚組合せHPシェル屋根の振動測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----