

令和 6 年 9 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2020～2023

課題番号：19KK0378

研究課題名（和文）大スパン片持ち屋根の局地的突風による連成振動メカニズム解明と最大応答評価法

研究課題名（英文）Mechanism of coupled vibration and evaluation of maximum response of long-span cantilever roof due to local storm

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） 11,400,000円

渡航期間： 3ヶ月

研究成果の概要（和文）：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、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。本国際共同研究では、気候の激変に先駆け、大スパン片持ち屋根に絞り、記録以上の局地的突風を考慮した大スパン構造の耐風設計法の確立に重要な基礎研究を行った。特に、以下の課題展開によって進められた：(1) 過去ダウンバーストの発生・被害事例調査を行った。(2) 大スパン構造の非線形大変形に伴う振動数変化を捉える高精度時間周波数解析法を開発した。(3) 計算流体力学に基づいたダウンバーストの再現シミュレーションを行った。(4) 大スパン片持ち屋根の風応答予測法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した時間周波数解析法は、建物の固有振動数およびその変動を効率よく抽出できる。この手法は、大スパン片持ち屋根の非線形非定常風応答において、大変形に伴う剛性・振動数の変化を定量的に追跡できる。ダウンバーストの再現シミュレーションでは、計算流体力学を用いて風荷重を算出し、様々なシナリオにおける構造応答を評価することができる。このシミュレーションは、大スパン片持ち屋根の風応答に関する連成解析を通じて、局地的突風による大振幅振動メカニズムを解明し、耐風設計法の確立に貢献する。本国際共同研究の成果は、地震・強風大国の日本において、大スパン構造の災害に対する強靱性を向上させることに寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Long-span lightweight structures covering large column-free spaces are of great social importance as they are also utilized as shelters during disasters. This international collaborative research focused on cantilevered long-span roofs, conducting fundamental research to establish their wind-resistant design methods considering extreme local gusts. Specifically, the research progressed through the following tasks: (1) Investigated past occurrences and damage cases of downbursts, (2) Developed a high-precision time-frequency analysis method to capture vibration frequency changes associated with nonlinear large deformations of long-span flexible structures, (3) Conducted downburst simulations based on computational fluid dynamics, and (4) Proposed a wind response prediction method for long-span cantilevered roofs.

研究分野：建築構造

キーワード：大スパン片持ち屋根 局地的突風 連成振動 応答評価 時間周波数解析

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

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などの大型集客施設によく使われ、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。

大スパン構造は大規模になるほど、その固有振動数が低いため、地震被害が少なくなる。一方で、建物の固有振動数が風の主要成分に近いため、大振幅振動が起りやすい。日本にはダウンバースなどの局地的突風が北海道から沖縄まで広く、高い確率で発生する。ダウンバースは局地的に発生し、その特定が難しいが、多くの被害例が報告されている。地球規模の気候急変に伴い、ダウンバースの発生数および最大風速が増加傾向にあるため、今後もそれによる被害が益々多くなると予想される。

### 2. 研究の目的

大規模な自然災害に備え、大量な避難者にも対応できるように、大スパン構造の災害に対する強靭性を向上することは、非常に重要かつ緊迫な課題である。特に、気候の激変に先駆け、記録以上の局地的突風を考慮した大スパン構造の耐風設計法は非常に重要である。本国際共同研究では、大スパン片持ち屋根に絞り、突風時の応答を予測する実務的手法の提案を目指す。

### 3. 研究の方法

1の背景のもとで、2の研究目的を達成するために、本国際共同研究では、以下の課題展開によって進められる：(1) 過去ダウンバースの発生・被害事例調査、(2) 大スパン構造の非線形大変形に伴う振動数変化を捉える高精度時間周波数解析法の開発、(3) 計算流体力学に基づいたダウンバースの再現シミュレーション、(4) 大スパン片持ち屋根の風応答予測法の提案。

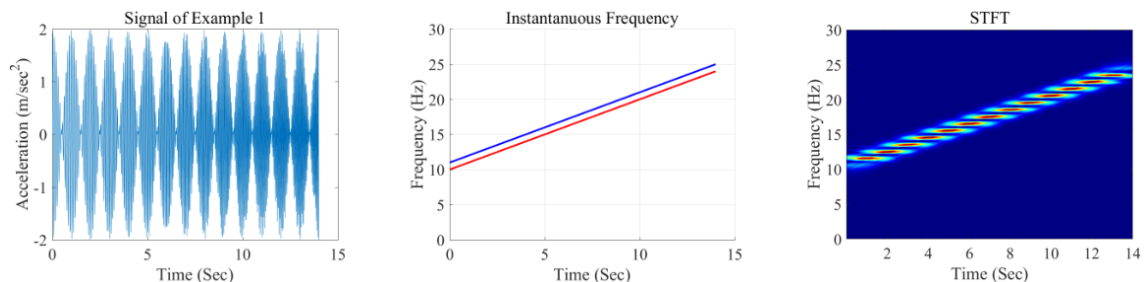
### 4. 研究成果

#### (1) 過去ダウンバースの発生・被害事例調査

世界中に発生したダウンバースなどの局地的突風に関する観測・実測事例を収集した。特に、突風による一般構造および大スパン軽量空間構造の被害例を精査し、その被害特徴を抽出して分析した。

#### (2) 非線形応答の時間周波数解析法

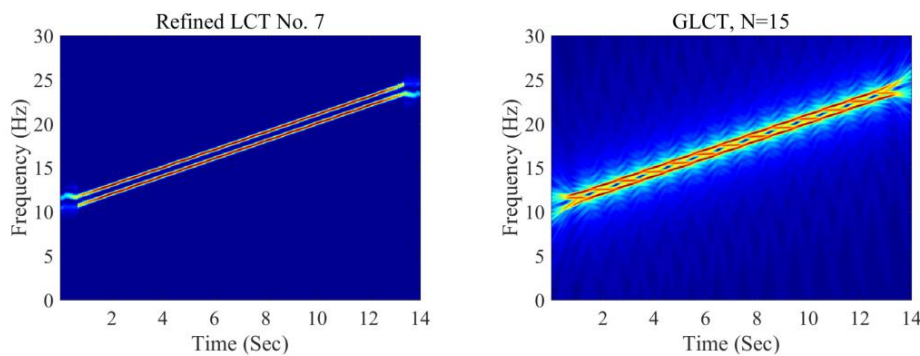
固有振動数は、構造物の振動特性を理解するのに重要な指標である。特に、強風や地震などの災害時、損傷を受けた構造物の剛性が低下するとともに、その固有振動数も低くなる。一方で、被災後に構造物の固有振動数が回復する場合もある。そのため、構造的損傷を検出するには、被災時の短時間内での瞬時固有振動数を特定する必要がある。さらに、大スパン構造を含め、建築構造物の低周波数成分が卓越しているが、既存の時間周波数解析法では、低周波数領域における精度が不足している。



(a) 非線形非定常信号

(b) 真の瞬時固有振動数

(c) 短時間フーリエ変換



(d) 提案手法

(e) 線形チャープレット変換

図1 非線形非定常信号と各種手法による時間周波数解析結果の比較

本国際共同研究では、非線形性と非定常性の高い大スパン片持ち屋根の風応答分析のために、逐次線形チャープレット変換法を開発した。具体的には、アルゴリズムが単純で高解像度と高信頼性のあるチャープレット変換に着目して、新たな局所探索戦略を導入することにより、探索範囲を狭めながら、各時刻における最適な回転角を探索できる手法を提案した。

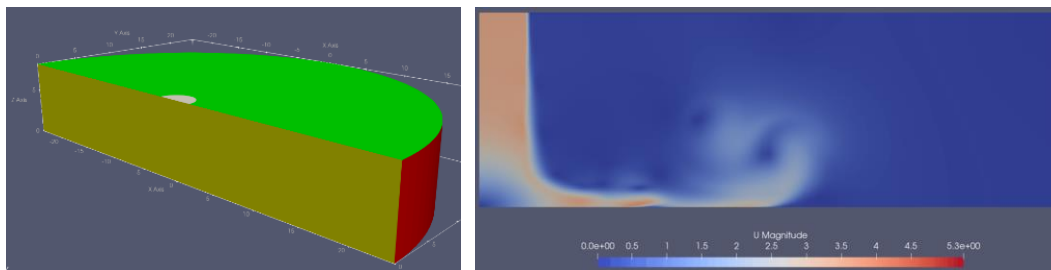
提案手法は、従来の線形あるチャープレット変換法と比べて、最適な回転角を探索する能力が大幅に向上している。そのため、図1の例に示すように、提案手法は、従来の時間周波数解析法と比べて、計算コストを増やせず、時間周波数平面におけるエネルギー分布の解像度を劇的に改善できた。また、提案手法はアルゴリズム的に簡単であるため、計算速度は極めて速いため、精度改善には計算コストの増加を伴わない。

提案手法により、建物の固有振動数成分およびその変動を効率よく抽出することが可能である。特に、提案手法によっては、大スパン片持ち屋根の非線形非定常風応答に対して、大変形にもなる剛性・振動数の定量的を効率よく追跡できる。

### (3) ダウンバーストの再現シミュレーション

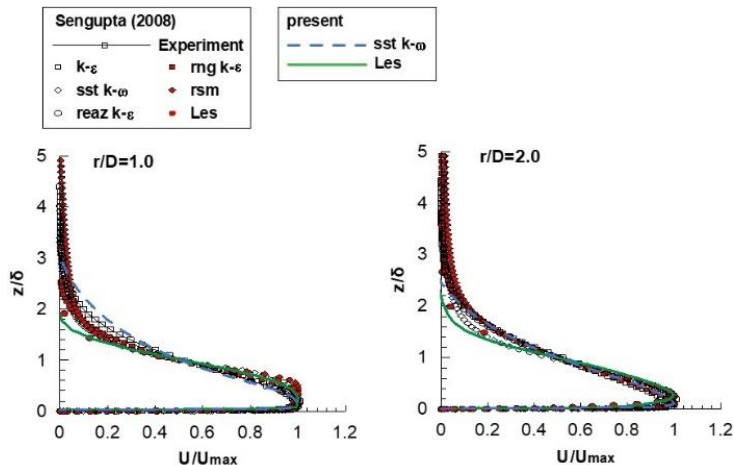
ダウンバーストによる大スパン片持ち屋根の構造的応答を計算するため、ダウンバーストの再現シミュレーションを行い、計算流体力学の解析精度を確認した。

具体的には、対称性を考慮した半分モデル(図2(a))の解析モデルを作成し、各異なる乱流モデルによる解析を行った。図2(b)には、ダウンバーストが着地した後の流れ場を示す。また、図2(c)には、ダウンバーストの半径より異なる距離における高さ方向での風速プロファイルを示し、既存実験結果[2]と比較してよく一致していることが分かる。



(a) 解析領域

(b) 解析結果の流れ場



(c) 高さ方向風速プロファイル

図2 異なる乱流モデルによる解析結果と既存研究との比較

### (4) 大スパン片持ち屋根の風応答予測

大スパン片持ち屋根の大変形によって、構造振動と風圧変動の連成効果を見逃すことができない。本国際共同研究では、計算流体力学に基づいて、既存研究の大スパン片持ち屋根の風連成振動を再現した。また、準定常理論に基づいて、片持ち屋根の平均応答およびRMS値に関する評価式を提案した。さらに、大スパン片持ち屋根の空力不安定にかかわる要因および条件について連成解析より検討を行った。

屋根・風の連成振動解析精度を検証するため、Kawai らが行った風洞試験[3]に対応した、スケールは1:100の1自由度屋根モデルを構築した(図3)。構造・風連成解析のためのモデルは図4(a)、異なるピッチ角に対応する流れ場は図4(b)に示す。

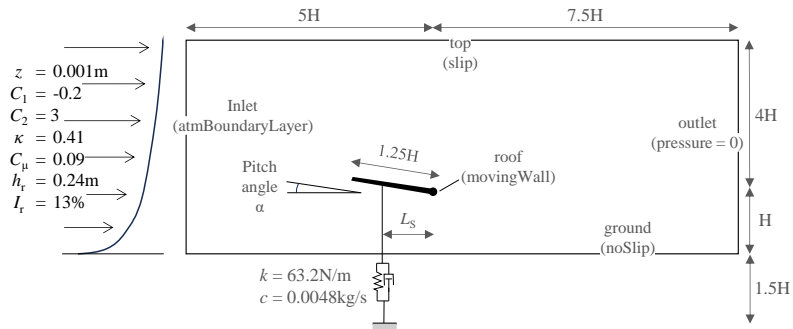
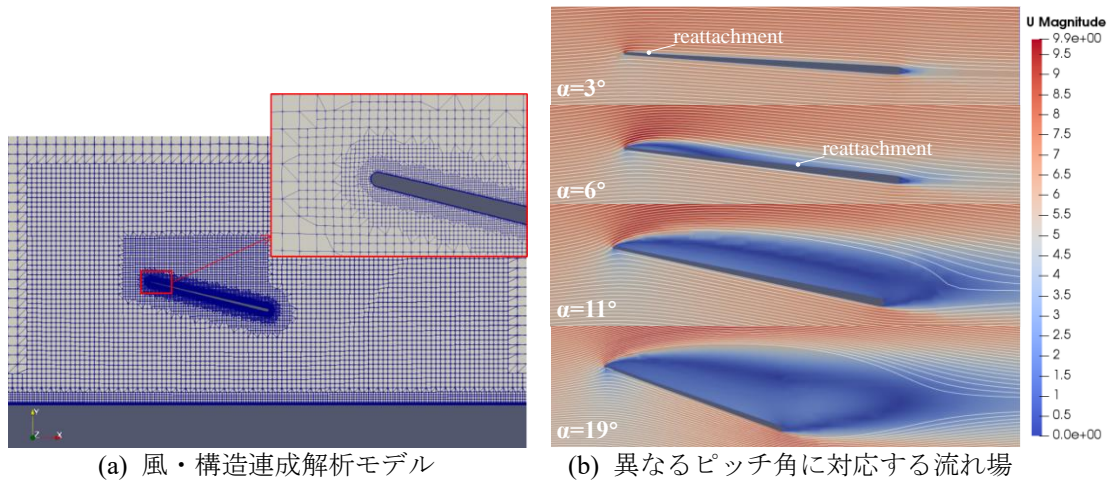


図3 片持ち屋根の解析モデル



(a) 風・構造連成解析モデル

(b) 異なるピッチ角に対応する流れ場

図4 流体解析モデルと流れ場

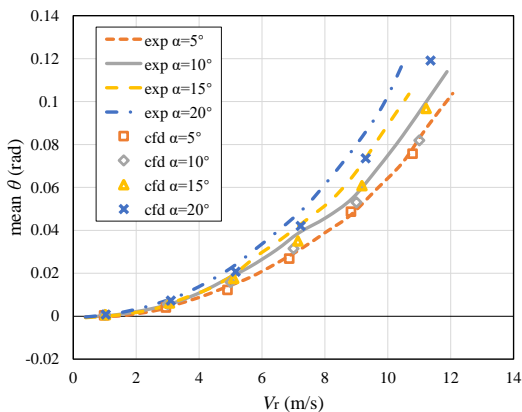


図5 回転角と流速の関係

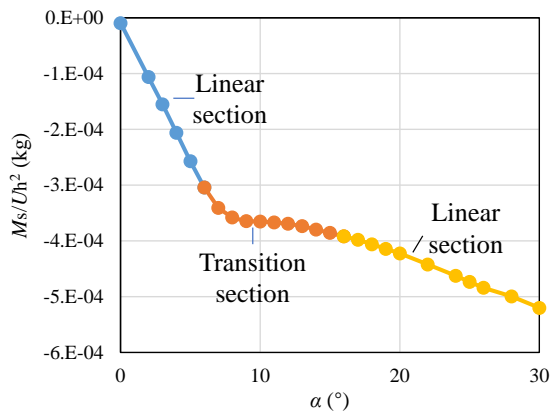


図6 モーメントとピッチ角の関係

図5により、ピッチ角  $\alpha = 5^\circ$  を除き、Kawaiらの試験結果と比較して定常状態シミュレーションでは変位応答が多少過小評価されていることが分かる。また、図6に示すように、モーメント荷重はピッチ角および風速に一定の関係があることが分かる。特に、その関係曲線は二つの直線部分と遷移部分に分けることができる。その違い、風の剥離および再付着に起因するものである(図4(b))。

図6の関係図によって、設計で与えられたピッチ角および設計風速に対する、モーメント荷重を推定できる。この荷重推定値に基づいて、大スパン片持ち屋根の回転角を予測する計算法を提案した。

<引用文献>

- [1] G. Yu, Y. Zhou, General linear chirplet transform. Mechanical Systems and Signal Processing, 70–71, 958–973, 2016.
- [2] A. Sengupta, P. P. Sarkar, Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 6(3), 345-365, 2008.
- [3] H. Kawai, R. Yoshie, et.al: Wind-induced response of a large cantilevered roof, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp. 263-275, 1999.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Zhang Jingyao, Bao Yuanfeng, Aoki Takayoshi, Yamashita Takuzo	4. 巻 223
2. 論文標題 Refined linear chirplet transform for time-frequency analysis of non-stationary signals	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 111785 ~ 111785
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ymsp.2024.111785	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 陳星宇, 張景耀
2. 発表標題 2D simulation of cantilevered roofs in ABL wind and downburst wind
3. 学会等名 第28 回風工学シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 陳星宇, 張景耀
2. 発表標題 流体解析による大スパン片持ち屋根の風応答予測
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 浮田 大地
2. 発表標題 ガンマトーンフィルタを用いた建物における非線形動的応答の時間周波数解析法に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浮田 大地
2. 発表標題 中低層建物の短時間フーリエ変換を用いた瞬間剛性同定手法に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 浮田大地
2. 発表標題 ガンマトーンフィルタを用いた建物における非線形動的応答の時間周波数解析法に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張景耀, 青木孝義
2. 発表標題 逐次線形チャープレット変換による灯台の強震時非線形挙動追跡
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)
4. 発表年 2022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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	クウォーク ケニー  (Kwok Kenny)	シドニー大学・School of Civil Engineering・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	張 宇  (Zhang Yu)	清華大学・School of Medicine・Professor	

	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
その他の研究協力者	陳 星宇  (Chen Xingyu)	京都大学・工学研究科建築学専攻・博士後期課程学生	
その他の研究協力者	浮田 大地  (Ukita Daichi)	京都大学・工学研究科建築学専攻・博士前期課程学生	

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
---------	---------

オーストラリア	The University of Sydney			
中国	清華大学			