

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360261

研究課題名（和文） 大空間構造に作用する非定常空気力の発生機構の解明と耐風設計への応用に関する研究

研究課題名（英文） Mechanism of unsteady aerodynamic forces on long-span curved roofs and application to the wind resistant design

研究代表者

植松 康 (UEMATSU YASUSHI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60151833

研究成果の概要（和文）：大空間構造の基本形として二次元円弧屋根を対象とし、境界層乱流中において逆対称 1 次モードで振動しているとき、屋根面に作用する非定常空気力の特徴を風洞実験と数値流体解析により把握し、空力剛性係数並びに空力減衰係数として評価した。次に、このようにして得られた空力剛性係数並びに空力減衰係数を、屋根に対して行われる通常の動的応答解析の中に組み入れる方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：The unsteady aerodynamic forces acting on a vaulted roof vibrating in the first anti-symmetric mode in a turbulent boundary layer have been investigated by a wind tunnel experiment and CFD analysis. The unsteady aerodynamic force is represented by the aerodynamic stiffness and damping coefficients and given by a function of the reduced frequency. A discussion is made of the application of these coefficients to the dynamic response analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	10,900,000	3,270,000	14,170,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：大空間構造，非定常空気力，空力剛性，空力減衰，風洞実験，数値流体解析，動的応答解析，耐風設計

## 1. 研究開始当初の背景

近年、スポーツ施設やイベント会場などの大空間構造物が各地で建設されている。屋根の大スパン化は一般に固有振動数の低下をもたらす。共振効果によって動的応答を増加させる。また、屋根の振動によって付加的な空気力、すなわち「非定常空気力」が発生し、大スパン構造に用いられるような軽い屋根

の場合、相対的にその影響が大きくなる。しかし、非定常空気力については、既往の研究は非常に少なく、不明な点が多い。現在の一般的な耐風設計では、その影響は考慮されていない。その特性を定量的に把握することができれば、屋根面と気流との相互作用を考慮した解析を行うことで、実現象に即したより合理的な応答予測、ひいては合理的な耐風設

計が可能となる。非定常空気力の特性を把握するためには、気流中で振動している屋根に作用する風圧を測定する必要があるため、風洞実験では強制振動実験が行われる。しかし、実験では、装置や技術的な制約から、パラメータを広範囲に変化させることは困難であるため、各パラメータをほぼ任意に設定できる方法として数値流体解析が有用であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、軽くて構造減衰の小さい大空間構造を対象とし、気流中での非定常空気力、すなわち構造物の振動に伴って発生する付加的な空気力の特性を、強制振動模型を用いた風洞実験と LES (Large Eddy Simulation) を用いた数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) により、空力剛性並びに空力減衰として評価し、無次元振幅 (あるいは無次元風速) をパラメータとするモデル化を行う。さらに、そのモデルを運動方程式に組み込むことで、気流と屋根との相互作用を考慮した動的応答解析および耐風設計手法を提案する。なお、本研究では大空間構造のうち最も基本的な形状である二次元円弧屋根を対象とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、風洞実験と数値流体解析 (CFD) の2つのアプローチを用いる。まず、精度のよい風洞実験を実施し、非定常空気力の特性を、実験の範囲内で把握する。これは、CFD 解析のモデルや手法の検証用データとしても利用される。次に、このようにして妥当性が検証された CFD 解析を用いて、広範囲なパラメータに対する解析を実用的な範囲内での非定常空気力の特性を詳細に把握する。最後に、実験並びに CFD 解析から得られた空力剛性ならびに空力減衰係数を一般的な動的応答解析に導入して応答を評価する手法を提案する。

### (1) 風洞実験

図1に示すように、逆対称1次モードで振動する強制加振装置 (スパン400mm, ライズ/スパン比0.15と0.20用の2台) を開発し、自然風を模擬した気流 (境界層乱流) 中において、一定振幅、一定振動数で加振し、屋根面の中心線上に取り付けられた12個の圧力測定孔に作用する風圧を、風速ならびに屋根面変位とともに同時測定し、屋根の振動に伴って発生する非定常空気力の変位同相成分 (空力剛性) と速度同相成分 (空力減衰) として捉えた。加振振幅  $a$  は0~4mm, 加振振動数  $f_m$  は0~25Hz, 屋根平均高さの風速  $U_H$  は5~10m/s の範囲で段階的に変えた。また、非定常空気力の発生メカニズムを解明するため、

屋根面の振動と屋根面周囲の気流性状との関係を PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて流れの可視化を行った (図2)。

### (2) 数値流体解析 (CFD)

汎用流体解析ソフト STAR-CD を用いて、風洞実験と同様、逆対称1次モードで屋根が振動しているときの非定常流れを解析した。非定常解析のため、乱流モデルは LES (Large Eddy Simulation) の標準 Smagorinsky モデル ( $C_s = 0.12$ ) を使用し、減衰関数は Lilly damping function を用いた。解析領域および屋根まわりのメッシュ分割を図3に示す。本計算では、別途作成した流入変動風を本解析領域に挿入する方法を用いた。なお、加振振動数は、実験よりかなり高い200Hzまで変化させた。

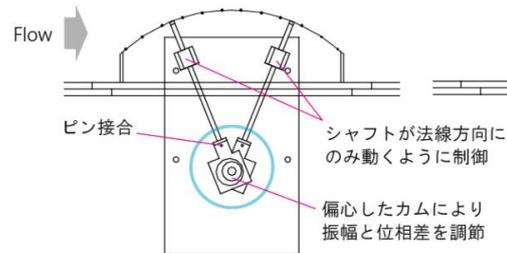


図1 強制加振装置

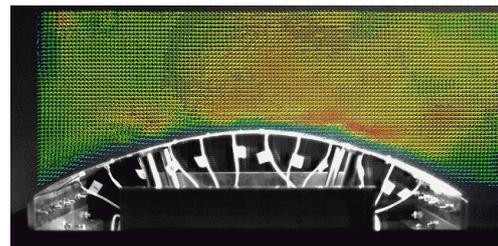


図2 振動する屋根まわりの流れの PIV 測定

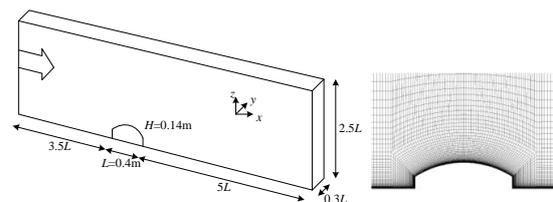


図3 解析領域とメッシュ分割

#### 4. 研究成果

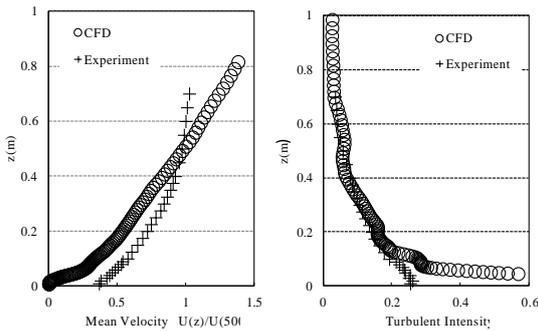
##### (1) 風洞実験

静止並びに振動中の屋根に作用する平均風圧係数分布や RMS 変動風圧係数分布, 変動風圧のパワースペクトル等を求めた。屋根の振動は, 平均風圧分布には殆ど影響を与えないが, 変動風圧には大きな影響を与える。パワースペクトルには, 屋根の振動に伴う鋭いピークが加振振動数に見られた。特に加振振動数が高い場合にその傾向は顕著である。次に, 多点風圧の時刻歴データを用いて, 非定常空気力の変位比例成分と速度比例成分を計算し, 振幅や加振震度数がそれらに及ぼす影響を把握した。すなわち, 非定常空気力を空力剛性係数と空力減衰係数に分解し, それらが無次元風速(あるいは, 無次元振動数)によってどのように変化するか把握した。

##### (2) 数値流体解析

###### ① 流入変動風の作成

作成した流入変動風のプロファイルを風洞実験結果と比較することで, 概ね妥当な流入変動風ができていることを確認した(図 4)。



(a) 平均風速

(b) 乱れの強さ

図 4 流入風のプロファイル

###### ② 振動時の風圧分布

CFD 解析で得られた気流は, 風洞実験結果を概ね再現していることが確認された(図 5)。ただし, 流れの平均的な剥離位置が風洞実験よりやや風上側に位置していることが示されたが, これは流入変動風の乱れが風洞気流よりやや小さいためと考えられる。

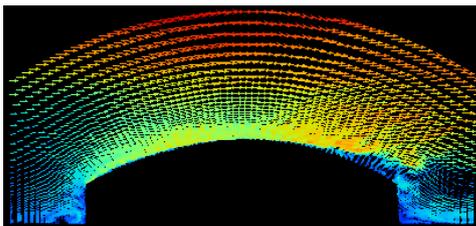


図 5 CFD 解析による気流分布

振動している屋根に作用する風圧の特性については, 風洞実験を行った加振振動数の範囲では, CFD 解析の結果と風洞実験結果は概ね一致したが, 加振振動数がさらに大きくなると, 低振動数時とは異なる性状を示す(図 6)。これは, 屋根の振動に伴う速度が気流の速度に比べて相対的に大きくなるためと考えられる。

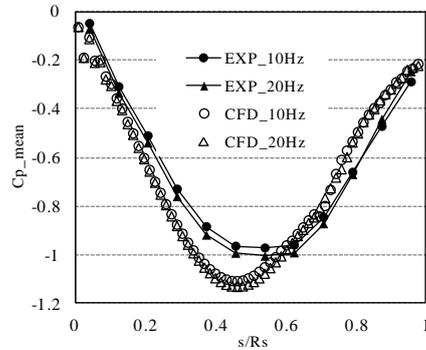
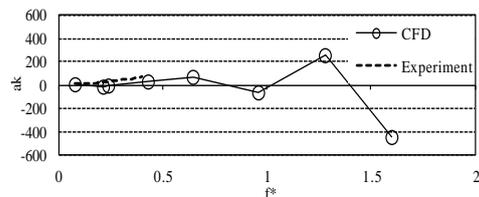


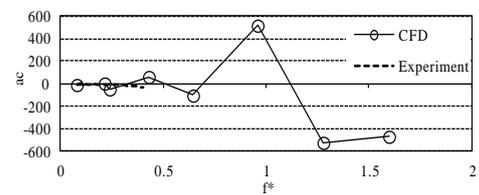
図 6 振動している屋根の平均風圧係数分布

###### ③ 空力剛性と空力減衰

加振振動数(結果として, 無次元振動数並びに無次元風速)を広範囲に変化させ, 空力剛性係数並びに空力減衰係数の無次元振動数による変化を把握した(図 7)。無次元振動数の小さい範囲では, これらの係数の大きさは小さく, CFD 解析結果は風洞実験結果の変化の傾向を捉えている。しかし, 無次元振動数が大きくなると, それらの値は大きく変化する。



(a) 空力剛性係数



(b) 空力減衰係数

図 7 非定常空気力特性

###### ④ 動的応答解析への応用

風洞実験と CFD 解析から得られた空力剛性係数並びに空力減衰係数を通常の周波数

領域での動的応答解析に応用する方法を提案した。これは、空力剛性や空力減衰の効果が固有振動数や減衰定数を介して応答に影響を与えるものである(図8)。

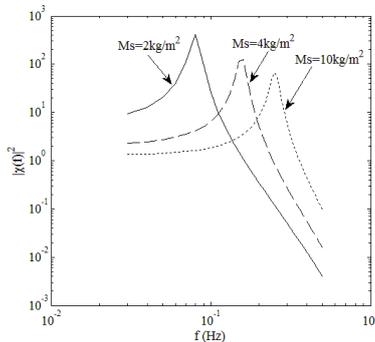


図8 非定常空気力の影響を考慮した振動数応答関数

#### 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0件)

[学会発表] (計6件)

1. Wei Ding, Mana Nakamura, Satoshi Tanaka, Yasushi Uematsu, Unsteady Aerodynamic Forces on Long-span Curved Roof, The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Application, Shanghai, China, September 2-6, 中国・上海, 2012 (確定)
2. 丁 威, 植松 康, 中村真奈, 大スパン曲面屋根に作用する非定常空気力の数値解析的検討, 日本建築学会大会, 名古屋, 2012年9月14日 (確定)
3. 中村真奈, 田中賢嗣, 植松 康, 奥田泰雄, 丁 威, 大スパン曲面屋根に作用する非定常空気力の特性に関する研究 (その1) 非定常空気力の定量評価, 日本建築学会大会, 東京, 2011年8月23日
4. 田中賢嗣, 中村真奈, 植松 康, 奥田泰雄, 丁 威, 大スパン曲面屋根に作用する非定常空気力の特性に関する研究 (その2) 流体解析による再現と流れの可視化, 日本建築学会大会, 東京, 2011年8月23日
5. 中村真奈, 田中賢嗣, 植松 康, 奥田泰雄, 大スパン曲面屋根の非定常空気力に関する研究, 日本建築学会大会, 富山, 2010年9月11日
6. 濱井美希, 植松 康, 田中賢嗣, 大スパン円弧屋根に作用する非定常空気力に関する基礎的研究, 日本建築学会大会, 仙台, 2009年8月27日

[図書] (計1件)

1. 植松 康ほか, INTECH, 「Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research」, 2011, 429-446 ページ

[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

<http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/adpe/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

植松 康 (UEMATSU YASUSHI)  
 東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60151833

##### (2) 研究分担者

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

持田 灯 (MOCHIDA AKASHI)  
 東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00183658

奥田 泰雄 (OKUDA YASUO)  
 独立行政法人建築研究所・上席研究員

研究者番号：70201994

喜々津 仁密 (KIKITSU HITOMITSU)  
 国土交通省国土技術政策総合研究所・主任研究官

研究者番号：10370694