

様々な形状の大スパン屋根に作用する非定常空気力に関する考察

その1：一般化風力に基づく非定常空気力について

高館 祐貴*1
植松 康*2

本研究では、3種類の大スパン屋根を対象に、振動する屋根における非定常空気力の特性を数値流体解析(CFD)に基づき明らかにし、屋根の空力安定性を考察する。非定常空気力の効果は空力剛性および空力減衰として表され、一方向屋根(二次元モデル)を対象として屋根中心線上の二次元的な流れ場に基づいて評価される。具体的には、屋根を対称一次モードあるいは逆対称一次モードで強制加振したとき屋根に作用する変動風圧を CFD で計算し、一般化風力に基づき空力剛性および空力減衰を評価する。非定常空気力は屋根の見かけの剛性や減衰を増加させる方向に作用する場合もあれば、逆に減少させる方向に作用する場合もある。まず本論文では、一般化風力に基づく屋根形状ごとの非定常空気力の性状を系統的に把握し、屋根振動の空力安定性を考察する。

1. はじめに

膜は透光性があり、軽量であるという特徴を活かしてスポーツ施設や空港および駅舎をはじめとした様々な大空間構造の屋根に用いられている。こうした膜構造による大スパン屋根は、一般に軽量で剛性が低くなることから、設計時には風荷重が支配的となることが多い。さらに、屋根が風によって柔軟に変形・振動するため、風による直接的な力だけでなく、屋根の変形や振動に伴って発生する付加的な空気力である「非定常空気力」が作用する。この非定常空気力が屋根を空力的に安定化させる場合もあれば、逆に不安定化させる場合もある。設計上特に重要なのは後者で、空力不安定振動発生の原因となる。

大スパン屋根の空力安定性についてはこれまで様々な研究が行われている。Kunieda¹⁾やKimoto and Kawamura²⁾は一方向吊屋根を対象とし、膜のフラッター振動に関する理論的検討を行っている。しかし、理論的な手法では流入風の乱れの影響を理論的に組み込むことは困難であり、解析において流体および構造体に対して様々な仮定が必要となる。理論的に扱うことが難しい課題については、実験的な手法がしばしば用いられる。その手法は、空力弾性模型を用いた「自由振動法」と強制加振模型を用いた「強制加振法」に大別される。

自由振動法による研究例として、Uematsu and Uchiyama³⁾は一方向吊屋根を対象とし、一様流中の吊屋根の動的挙動を空力弾性模型を用いた風洞実験によって明らかにし、屋根の振動が大きくなる条件として風圧場の移流速度に着目したクライテリアを示した。Matsumoto^{4),5)}は、大スパン一方向吊屋根

を対象とし、質量比の異なる屋根モデルを用いて一様流中で自由振動実験を行い、逆対称一次モードの空力不安定振動の発生条件を示した。三宅ら⁶⁾は一様流と境界層乱流を用いた風洞実験に基づき、剥離せん断層の不安定現象に関連させて大スパン陸屋根の励振特性を考察した。

強制加振法を用いた代表的な研究例として、Daw and Davenport⁷⁾は半円筒形屋根を逆対称一次モードで強制的に加振することで得た屋根の振動変位並びに振動速度に比例する非定常空気力成分を用いて屋根の動的応答を予測した。大熊ら^{8)~11)}は大スパン陸屋根を対象とし、逆対称一次モードでの強制加振実験を行い、屋根に作用する風圧性状および非定常空気力の特性を明らかにした。さらに、風洞実験で得られた非定常空気力を用いて屋根の動的応答を予測している。Ding et al.¹²⁾は、風洞実験並びに数値流体解析(CFD)で大スパン屋根を強制加振することで円弧屋根に作用する非定常空気力の特性を明らかにし、屋根の動的応答の予測並びに空力安定性を考察した。Li et al.¹³⁾は既往の研究で行われた風洞実験¹⁰⁾およびCFD¹²⁾による結果をベンチマークとしてCFDを行うことで、陸屋根と円弧屋根に作用する非定常空気力の特性がほぼ同様であるとして、大スパン屋根の風による動的応答を評価した。Takadate and Uematsu¹⁴⁾は、陸屋根、円弧屋根、吊屋根を有する大スパン構造を対象としてCFDを行い、それぞれの屋根の空力安定性を評価した。また、屋根形状やスパンの異なる陸屋根に対して、質量減衰パラメータを用いて空力不安定振動の発生風速を示した^{15), 16)}。

このように、大スパン屋根の空力安定性を扱った研究はい

*1 国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ 研究員・博士(工学)

*2 独立行政法人国立高等専門学校機構 秋田工業高等専門学校 校長・博士(工学)

くつか見られるものの、様々な形状を持つ大スパン屋根に作用する非定常空気力について系統的に検討した例はない。本論文では、CFDで強制加振法を用いることで、屋根の非定常空気力を求め、その特性に基づき屋根の空力安定性を考察する。CFDでは、風洞実験に比べてパラメータの変更が容易であることから風洞実験では装置の制約などにより実現することが困難な広範囲な加振振動数に対する検討も可能となる。また、風洞実験では振動モードの形状の再現が困難なケースでも、CFDでは容易に再現することができる。本研究ではこうしたCFDの利点を活かし、対称一次モードおよび逆対称一次モードで振動する大スパン屋根について、CFDでしか扱えないような高い加振振動数の範囲も含めた広範囲の解析を行うことで、振動モードや屋根形状によって変化する非定常空気力の特性を詳細に把握することを目的とする。

2. 数値流体解析

2.1. 対象とする建築物

本研究では軒高 H が 20 m、スパン L が 120 m の大スパン屋根を対象とする。図 1 に対象とする屋根形状と振動モードを示す。屋根形状は陸屋根、円弧屋根、吊屋根の 3 種類とし、円弧屋根のライズ・スパン比と吊屋根のサグ・スパン比はそれぞれ 0.1 とする。CFD は、風洞実験を模擬した縮小スケールでの解析とし、その幾何学的縮尺率は 1/400 と仮定する。

2.2. CFD の概要

CFD には、LES (Large Eddy Simulation) を用いることとし、次式で表される連続式と非圧縮性の Navier-Stokes 方程式に基づき計算する。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、添え字の i, j ($i=1\sim 3, j=1\sim 3$) は主流方向、主流直交方向および高さ方向を表す。 x_i (または x_j) は空間座標の 3 成分、 p は圧力、 ρ_a は空気密度を表す。 τ_{ij} はサブグリッドスケール応力であり、WALE モデル¹⁷⁾でモデル化するものとし、モデル定数 C_w は 0.325 とする。

解析ソフトには ANSYS Fluent (Ver 19.0) を用いる。時間項については 2 次精度陰解法を用い、空間項の離散化には 2 次精度中心差分を用いる。解析における無次元時間刻み Δt^* ($=\Delta t U_H/L$) は 4.0×10^{-3} とし、サンプリング周波数はいずれの解析においても 1000 Hz とする。ここで、 U_H は軒高風速、 Δt は時間刻みを表す。図 2 に解析領域と境界条件を示す。本研究においては、一方向屋根を仮定し建物は 2 次元モデルとするが CFD は 3 次元空間に対して行い、屋根に作用する風圧や非定常空気力はモデル中心線上の 2 次元的な流れ場に基づいて評価する。

既往の研究^{14), 15)}によれば、接近流の乱れによって非定常空気力特性が変化するので、本論文においても一様流と境界層

乱流を用いた解析を行う。境界層乱流については、日本建築学会の建築物荷重指針・同解説¹⁸⁾ (以下、「荷重指針」) に示される地表面粗度区分 III 相当の気流を目標とし、ANSYS Fluent に実装されている Spectral Synthesizer^{19), 20)} を用い、平均風速、乱流エネルギーおよび消散率を与えることで生成する。流入

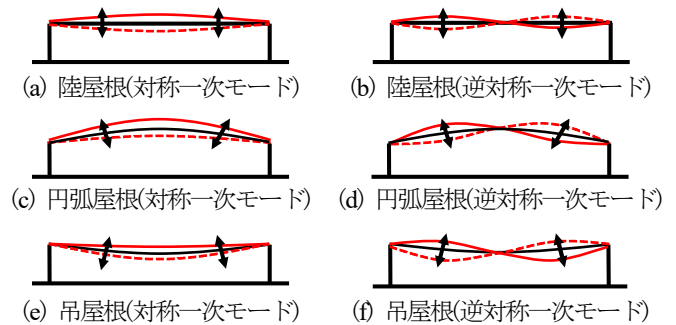


図 1 対象とする屋根形状と振動モード

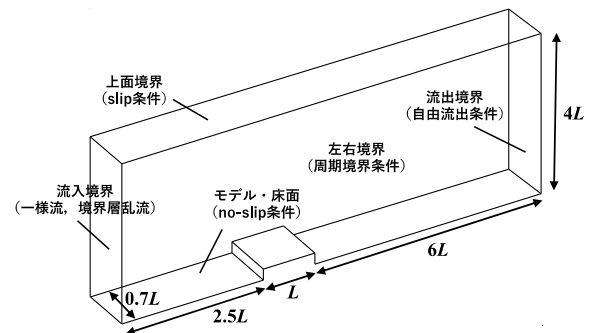
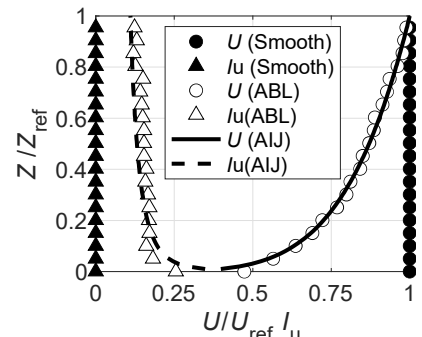
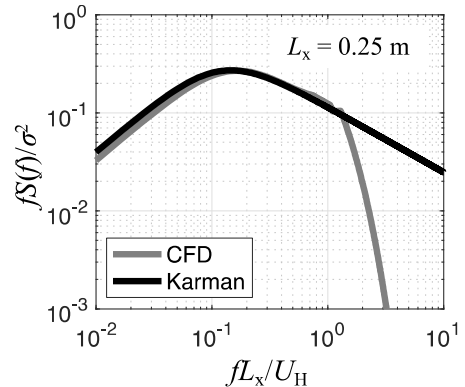


図 2 解析領域と境界条件



(a) 平均風速と気流の乱れ強さのプロファイル



(b) 変動風速のパワースペクトル密度

図 3 モデル位置における気流性状

風はモデルがない時のモデル中心位置における風速プロファイルが荷重指針の値に概ね一致するように各パラメータの値をチューニングして生成した。図3にモデルがない状態でのモデル中心位置における風速プロファイル(a)と建物モデルの軒高($H = 0.05$ m)における変動風速のパワースペクトル密度(b)を示す。ここで、 Z は高さ、 U は平均風速、 U_{ref} は基準高さ $Z_{ref}(= 1$ m)における平均風速、 I_u は気流の乱れ強さを表す。図2(b)の縦軸は変動風速のパワースペクトル密度 $S(f)$ を周波数 f と分散 α^2 で無次元化したもの、横軸は周波数 f を乱れの長さスケール L_x と軒高風速 U_H で無次元化したものを表す。モデルの軒高における L_x は 0.25 m である。変動風速のパワースペクトル密度は、LES のフィルタ効果によって $fL_x/U_H > 1$ の高周波領域でパワーが減衰しているものの、荷重評価で重要となる低周波領域では Karman 型に概ね対応している。

2.3. 屋根の強制加振

本研究では、屋根を強制的に加振したときの流れの解析を行う。屋根の強制加振には ANSYS Fluent に実装されている Spring smoothing 法を用いる。振動モードは、図1のように対称一次モードと既往の研究^{例えば 10~16}で多く検討されている逆対称一次モードの2つを対象とする。強制加振時の内圧の変動については考慮しないこととする。これらのモードでの屋根の変位 $z_k(s, t)$ は一般化変位 $x_z(t)$ と振動モード $\phi_k(s)$ を用いて次式で表される。

$$z_k(s, t) = x_z(t) \phi_k(s) \quad (3)$$

$$x_z(t) = z_0 \sin(k\pi f_m t) \quad (4)$$

$$\phi_k(s) = \sin\left(k\pi \frac{s}{L}\right) \quad (5)$$

ここで、 z_0 は加振振幅、 f_m は加振振動数、 s は風上端から屋根面に沿った距離、 s_{max} はその最大値を表す。式(4)および式(5)の k は振動モードを表し、 $k=1$ は対称一次モード、 $k=2$ は逆対称一次モードを表す。本研究では、屋根の加振振幅や加振振動数などを変化させるが、基本とするパラメータは、 $z_0 = 0.003$ m とし、 f_m は、 $10 \sim 50$ Hz の範囲を 10 Hz 刻みで、 $80 \sim 160$ Hz の範囲を 20 Hz 刻みで変化させる。なお、 f_m は無次元化して無次元加振振動数 $f_m^*(= f_m L/U_H)$ で表す。

3. 一般化風力に基づく非定常空気力

3.1. 非定常空気力の定義

屋根の運動方程式は屋根の変位 $z_k(s, t)$ を用いて、次式で表される。

$$[M]\{\ddot{z}_k(s, t)\} + [C]\{\dot{z}_k(s, t)\} + [K]\{z_k(s, t)\} = \{F_1(t)\} + \{F_2(t, z, \dot{z}, \ddot{z}, \dots)\} \quad (6)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ は減衰マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{F_1(t)\}$ は接近流や後流による風力ベクトル、 $\{F_2(t, z, \dot{z}, \ddot{z}, \dots)\}$ は非定常空気力ベクトルを表す。式(6)を一般化風力を用いた式に変換すると次のように表される。

$$M_k \ddot{x}_z(t) + C_k \dot{x}_z(t) + K_k x_z(t) = F_k(t, z, \dot{z}, \ddot{z}, \dots) \quad (7)$$

$$F_k(t, z, \dot{z}, \ddot{z}, \dots) = F_w(t) + F_A(t, z, \dot{z}, \ddot{z}, \dots) \quad (8)$$

ここで、 M_k は一般化質量、 C_k は一般化減衰、 K_k は一般化剛性、 F_w は接近流や後流による一般化風力、 F_A は非定常空気力を表す。

屋根に作用する一般化風力 F_k は屋根に作用する外圧 $p(s, t)$ とモード形 $\phi_k(s)$ を用いて次式で表される。

$$F_k(t) = \int_0^L p(s, t) \phi_k(s) ds \quad (9)$$

ここでは一般化風力をモデル中心線上の2次元な流れ場に基づいて評価するため、屋根の幅は単位幅としている。

屋根に作用する非定常空気力 F_A は、屋根の振動変位と同位相の成分である「空力剛性」と屋根の振動速度と同位相の成分である「空力減衰」の和によって、近似的に次式のように表すことができる。

$$F_A = K_a x_z + C_a \dot{x}_z \quad (10)$$

ここで、 $K_a x_z$ は空力剛性力、 $C_a \dot{x}_z$ は空力減衰力を表す。式(10)を式(6)に代入すると、非定常空気力を考慮した屋根の振動方程式が次のように得られる。

$$M_k \ddot{x}_z + (C_k - C_a) \dot{x}_z + (K_k - K_a) x_z = F_k \quad (11)$$

振動している屋根に作用する風力は屋根の振動に伴う非定常空気力によって非常に複雑なものとなる。式(11)によると、 $C_a < 0$ 、 $K_a < 0$ の場合、空力減衰や空力剛性が振動系全体の剛性や減衰を増大させるように作用するため、屋根の振動は非定常空気力によってより安定なものとなる。一方、 $C_a > 0$ 、 $K_a > 0$ の場合には、振動系全体の減衰や剛性が減少するように作用する。特に、 C_a が C_k を上回ると振動系全体の減衰が負となるため、発散的な振動が生じるようになる。以上のことより、大スパン屋根の応答や空力安定性の評価を行う上では、空力剛性および空力減衰が重要となる。強制加振法を用いる場合、式(5)のように振動モードを正弦関数で表すと、振動速度は振動変位の1階微分によって表されるため、非定常空気力(空力剛性力および空力減衰力)はフーリエ級数展開を用いて次式のように求めることができる。

$$F_A = F_R \sin 2\pi f_m t + F_I \cos 2\pi f_m t \quad (12)$$

$$F_R = \frac{1}{T} \int_{-T}^T F_k(t) \sin(2\pi f_m t) dt \quad (13)$$

$$F_I = \frac{1}{T} \int_{-T}^T F_k(t) \cos(2\pi f_m t) dt \quad (14)$$

ここで、 F_R は振動変位に比例する成分、 F_I は振動速度に比例する成分であり、それぞれ空力剛性力および空力減衰力に対応する。なお、 F_A 、 F_R 、 F_I はいずれもモード次数 k の関数であり、 F_{Ak} 、 F_{Rk} 、 F_{Ik} と表記すべきところであるが、煩雑さを避けるため添え字の k は省略している(以下同様)。本研究で

は、得られた空力剛性力、空力減衰力を速度圧 q_H と荷重負担面積 A_s 、無次元振幅 z_0/L を用いることで空力剛性係数 a_K と空力減衰係数 a_C として表す。

$$a_K = \frac{F_R}{q_H A_s (z_0/L)} \quad (15)$$

$$a_C = \frac{F_I}{q_H A_s (z_0/L)} \quad (16)$$

また、非定常空気力 F_A と屋根の振動変位との関係は次式のように表される。

$$F_A = \sqrt{F_R^2 + F_I^2} \sin(2\pi f_m t + \beta) \quad (17)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{F_I}{F_R} \right) \quad (18)$$

ここで、 β は屋根の振動に対する非定常空気力の位相差を表す。つまり、 $F_I > 0$ の時は $\beta > 0^\circ$ となり、非定常空気力が屋根の振動に先立って作用するため屋根の振動を大きくする方向に働くのに対して、 $F_I < 0$ の時は $\beta < 0^\circ$ となり、非定常空気力が屋根の振動変位に対して遅れて作用するため屋根の振動が抑制される方向に働くと考えられる。

3.2. 屋根形状と非定常空気力特性

まず、3.1 節で定義される空力剛性係数 a_K 、空力減衰係数 a_C 、位相差 β の屋根形状や接近流の性状、振動モードによる変化を明らかにする。図 4~7 は、 $z/L = 1.0 \times 10^{-2}$ 、 $U_H = 6 \text{ m/s}$ として f_m を変化させた時の一様流および境界層乱流中の陸屋根、円弧屋根、吊屋根について、強制加振解析から得られた a_K 、 a_C 、 β の無次元風速 $U_H^* (= U_H/f_m L)$ による変化である。図

4 および図 5 は対称一次モード、図 6 および図 7 は逆対称一次モードに対する結果である。これらより、 a_K は振動モードや接近流の性状、屋根形状によらず、 U_H^* が增大するにつれて減少するのに対し、 a_C は逆に増大している。 β については、 $U_H^* \leq 1$ の範囲で U_H^* が增大するにつれて増大しているが、 $U_H^* = 1 \sim 2$ の範囲では屋根形状や気流によって、 U_H^* が增大するにつれて増大する場合もあれば逆に減少する場合も見られる。 $U_H^* = 1 \sim 2$ の間の分布については、図 14~16 も参照されたい。振動モードに着目して非定常空気力を見ると、同じ U_H^* に対して、対称一次モードの a_K と a_C の大きさは逆対称一次モードでの a_K と a_C の大きさの数倍以上となっている。特に、 U_H^* が小さい範囲ではその差が大きく、逆対称一次モードよりも対称一次モードの方が屋根の振動に伴って発生する付加空気力の作用が大きいと考えられる。付加空気力のうち、空力減衰については屋根の空力安定性に影響を及ぼすが、その値が負 ($a_C < 0$) の場合は式(11)から分かるように振動系全体の見かけの減衰が大きくなるように作用する。今回解析した $U_H^* \leq 2$ の範囲において、対称一次モードはいずれのケースにおいても常に $a_C < 0$ であったため、対称一次モードは逆対称一次モードよりも空力的に安定した振動モードであると考えられる。

屋根形状の違いに着目すると、陸屋根と円弧屋根では逆対称一次モードで強制加振した場合、いずれの気流においても類似した結果になっている。一方、対称一次モードで強制加振した場合は、 a_K や a_C の大きさがやや異なっている。吊屋根では一様流中における逆対称モードの結果(図 5)を除き、 a_K や a_C の大きさは他の屋根形状とはかなり異なっている。Li et

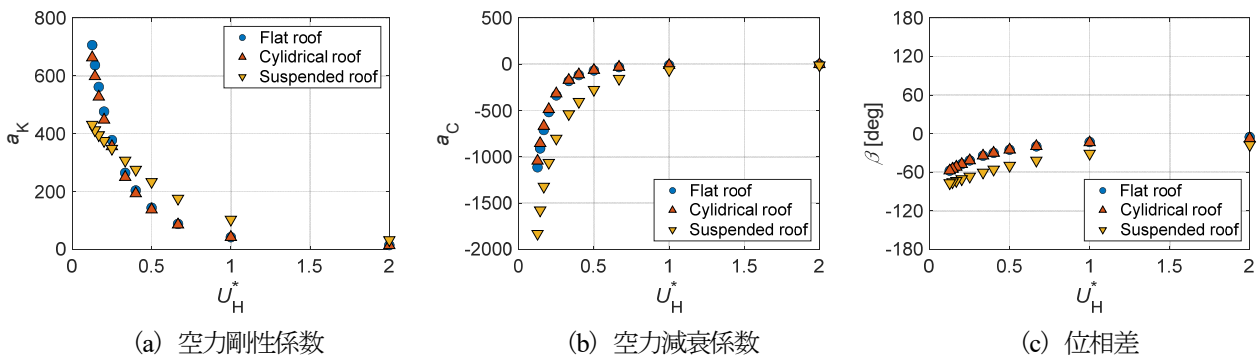


図 4 屋根に作用する非定常空気力 (一様流, 対称一次モード)

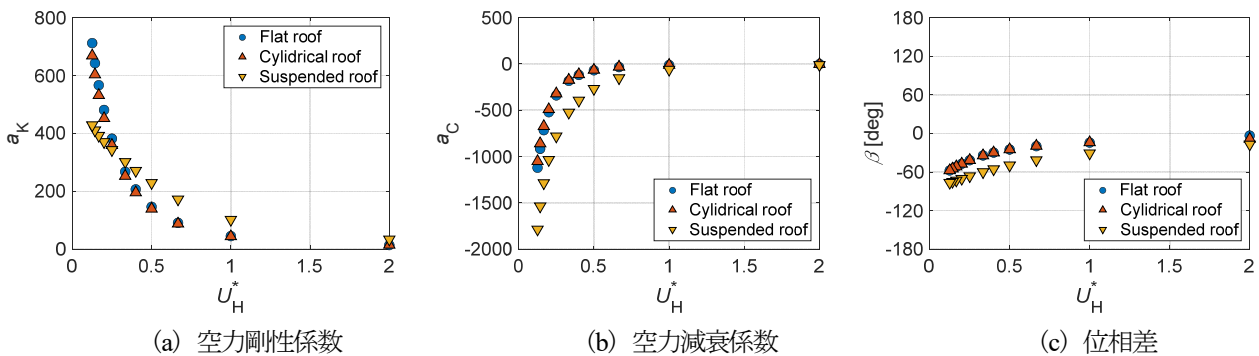


図 5 屋根に作用する非定常空気力 (境界層乱流, 対称一次モード)

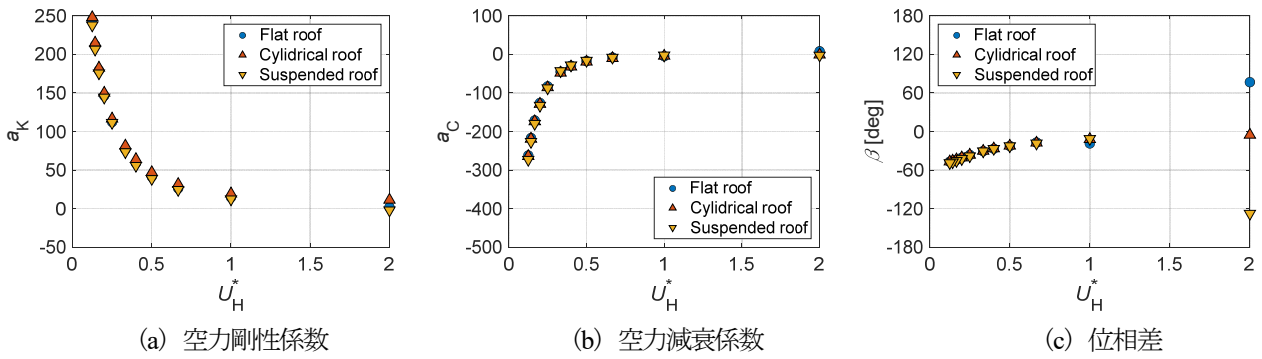


図 6 屋根に作用する非定常空気力（一様流，逆対称一次モード）

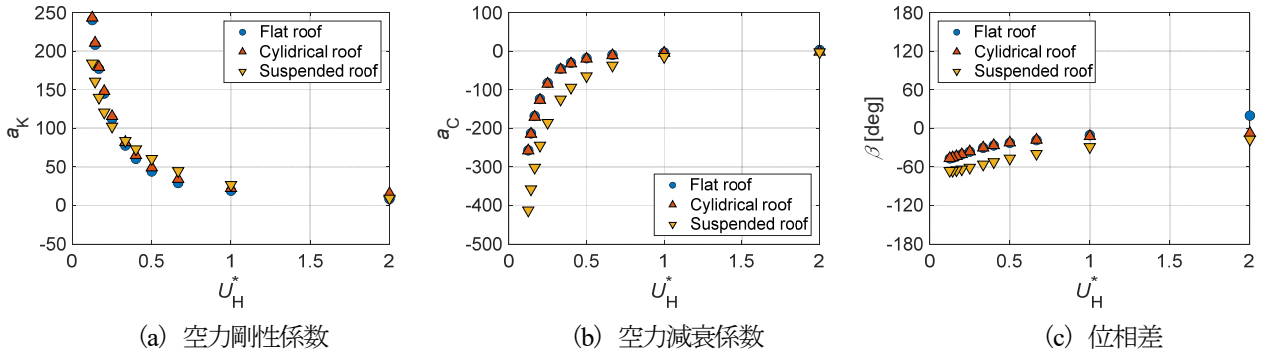


図 7 屋根に作用する非定常空気力（境界層乱流，逆対称一次モード）

al.¹³⁾によると、逆対称一次モードでの強制加振時、屋根の加振振動数を大きくすると平均的な流れの再付着点が風上側に移動する傾向があるため、本解析でも逆対称一次モードの陸屋根については、加振振動数が大きいほど再付着点が風上側に移動し、円弧屋根の結果に近づいたものと考えられる。一方、吊屋根や対称一次モードの陸屋根の結果と円弧屋根の結果との差は屋根が振動しても流れの再付着点が風上に移動せず、屋根周りの流れ場が振動する円弧屋根とは異なるものとなっていることがひとつの要因と考えられる。特に、吊屋根については屋根上に滞留する流れ場が非定常空気力特性に影響したものと考えられる。これらのデータのみでは屋根形状で変化する流れ場や風圧場が非定常空気力に及ぼす明確な理由を説明することはできないため、流れ場や風圧場とそれがもたらす屋根の振動の関係については、今後詳細に解析することが必要と考えられる。

以上の結果より、非定常空気力の性状は振動モードや屋根形状によってそれぞれ異なるが、今回の解析範囲では対称一次モードでは常に $a_C < 0$ となり、空力不安定振動が発生する可能性が低いことから、これ以降では、逆対称一次モードに着目して解析を行う。

3.3. 屋根の振動振幅と非定常空気力の特性

屋根の振動振幅が非定常空気力に及ぼす影響を把握するために逆対称一次モードについて、屋根の加振振幅 z_0 を変化させた解析を行った。図 8～13 に z_0 を変化させた時の a_K 、 a_C および β の無次元風速 U_H^* による変化を示す。なお、 z_0 は屋根のスパン L で無次元化した振幅 z_0/L として表されており、ここでは、 $z_0/L = 3.3 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-2}, 6.0 \times 10^{-2}$ の 3 種類を用いた。

図 8～13 によると、 a_K および a_C を式(15)および(16)で定義することで接近流や屋根形状が同じであれば、振動振幅の大きさによらずほぼ同様の結果となっている。大熊らの陸屋根に対する風洞実験の結果¹⁰⁾では、振幅の大きさによって空力剛性および空力減衰が異なっているが、大熊らの結果についても a_K や a_C の定義式の中に z_0/L を含めることで、全ての結果がほぼ重なることを確認している¹⁵⁾。加振振幅が大きくなると屋根まわりの流れ場が変化すると考えられるが、空力剛性と空力減衰を式(15)および(16)で定義することで、今回の解析範囲では接近流や屋根形状が同じであれば加振振幅に依存しない値として評価することができる。

3.4. 風速変化と非定常空気力特性

3.2 節で示した逆対称一次モードの a_K および a_C と U_H^* について、軒高風速が非定常空気力特性に及ぼす影響を把握するために、屋根の無次元加振振幅 z_0/L を 1.0×10^{-2} とし、軒高風速 U_H を 6, 9, 12, 15 m/s と 4 段階で変化させた解析を行った。図 14～19 に a_K 、 a_C および β の無次元風速 U_H^* による変化を示す。なお、 $U_H = 9 \sim 15$ m/s については、 f_m が 10～50 Hz の範囲では 10 Hz 刻みで、80～160 Hz の範囲では 20 Hz 刻みで変化させたが、 $U_H = 6$ m/s については、 $U_H^* = 1 \sim 2$ の結果を充実させるために、それに加えて f_m が 10～20 Hz の間を 1 Hz 刻みで変化させた結果もプロットしている。

これらの結果によると、いずれのケースにおいても a_K 、 a_C および β は、 U_H^* に対して一定の傾向で変化していることが分かる。すなわち、 U_H が変化すると屋根に作用する変動風圧の大きさや変動風圧の移流速度は変化するものの、振動によって生じる非定常空気力については、軒高風速 U_H と屋根の

振動数 f_m の関係によって整理される。

図 14~16 は一様流中の結果である。これらの図から a_K や a_C の符号の変化をグラフから直接読み取ることが困難であるため、ここでは変化の大きい位相差 β の変化に着目する。なお、空力減衰力と位相差 β の符号の関係は 3.1 節に示した通りである。陸屋根および吊屋根では、 β が U_H の増加に伴って徐々に増加し、 $U_H^* \approx 1$ で傾きが変わっている。 β の符号を見ると、陸屋根および吊屋根では $U_H^* \approx 1.25$ で負から正に変わっており、 a_C の符号が $U_H^* \approx 1.25$ 付近で負から正に変わっていることに対応している。 U_H^* が大きい範囲に着目すると、陸屋根では $U_H^* = 3 \sim 4$ の間で、吊屋根では $U_H^* \approx 2$ で β の符号が正から負へ変わっている。

円弧屋根では、陸屋根や吊屋根とは異なり、 U_H^* が増加するにつれて β が 0° に漸近している。 β が 0° であることは、屋根の振動変位と振動速度による非定常空気が同位相で作用することを意味している。 a_K 、 a_C については陸屋根や吊屋根と

は異なり、今回解析した U_H^* の範囲において円弧屋根では、常に $a_K > 0$ 、 $a_C < 0$ 、 $\beta < 0^\circ$ となっている。

図 17~19 は境界層乱流中の結果である。陸屋根の U_H^* に対する a_K および a_C の変化は一様流中と境界層乱流中で類似しているように見えるが、 U_H^* に対する β の変化を見ると $U_H^* \geq 1$ の範囲で異なる性状を示している。位相差 β は $U_H^* = 1.25$ 付近で負から正に変わっているが、一様流の結果とは異なり、 $U_H^* = 3$ をピークとし、 U_H^* の増大に伴い β の大きさは徐々に小さくなっている。つまり、境界層乱流中の場合、今回の解析範囲では高風速になるにつれて屋根の振動が安定していく可能性があることが読み取れる。

円弧屋根については一様流中の結果と同じく、 U_H^* が増加するにつれて β が 0° に近づいている。また、解析した全ての U_H^* において常に $a_K > 0$ 、 $a_C < 0$ となっていることも一様流中の結果と同様である。

吊屋根については、本解析の範囲では $U_H^* \approx 4$ の時のみで

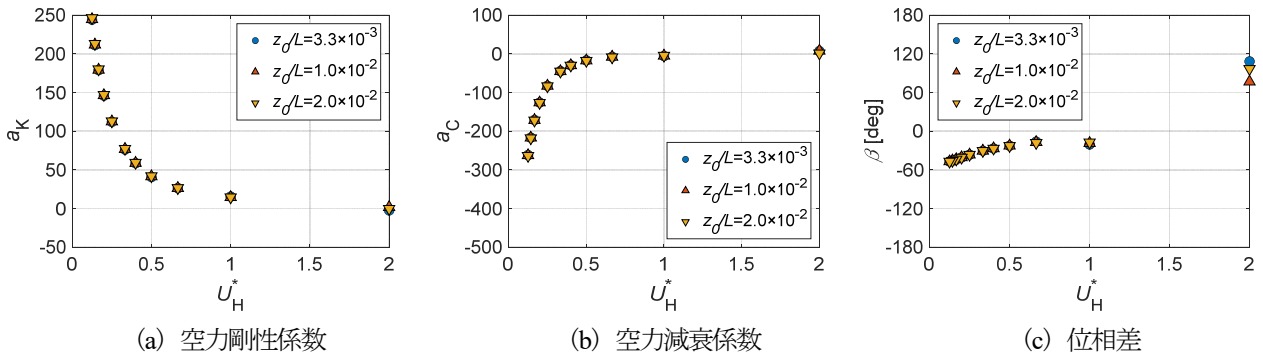


図 8 屋根に作用する非定常空気力（一様流，逆対称一次モード，陸屋根）

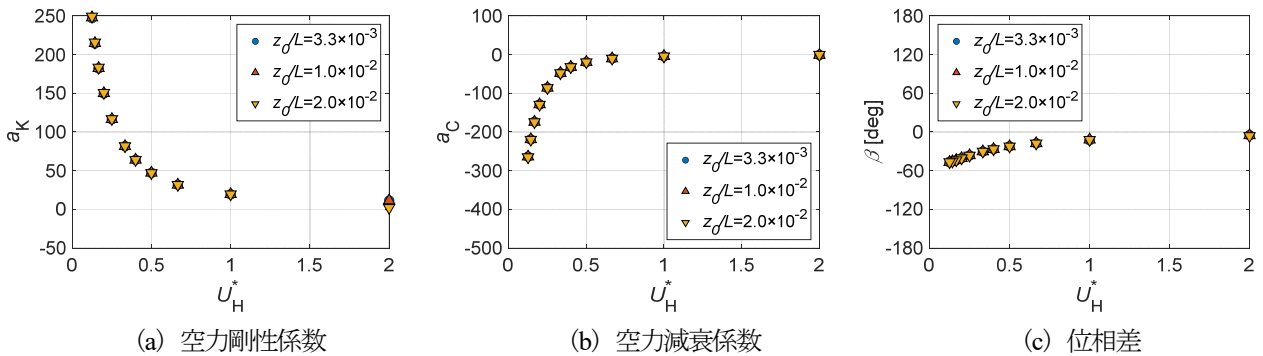


図 9 屋根に作用する非定常空気力（一様流，逆対称一次モード，円弧屋根）

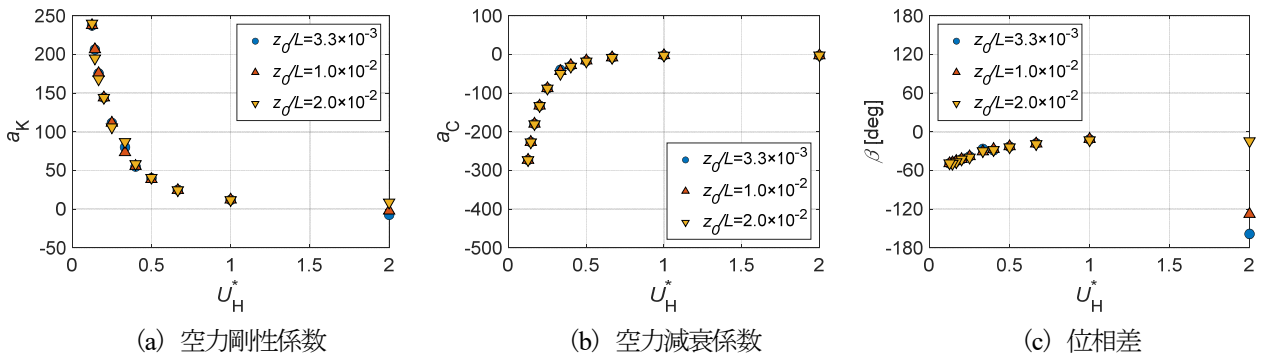


図 10 屋根に作用する非定常空気力（一様流，逆対称一次モード，吊屋根）

$>0^\circ$ となっているが、全体的な傾向としては U_H^* が增大するにつれて β も増大している。なお、 $U_H^* \approx 4$ の結果を外れ値と捉えるためには $U_H^* = 3 \sim 5$ の範囲についてさらに詳細な解析結果が必要であると考えられる。

最後に接近流の違いによる空力安定性の変化に着目すると、陸屋根と吊屋根では、 $\beta > 0^\circ$ となる U_H^* と $a_C > 0$ となる U_H^* が概ね対応するが、いずれも一様流の方が $a_C > 0$ となる U_H^* が小さい。したがって、既往の自由振動模型を用いた実験⁶⁾などでも示されているように、一様流中の方が境界層乱流中より低い風速で空力不安定振動が発生すると考えられる。

以上の結果より、逆対称一次モードで振動する屋根において風速や加振振動数を変化させた解析を行うと、風上端部で流れが剥離する陸屋根や吊屋根では $a_C > 0$ となる U_H^* の範囲が見られるが、風上端部で流れが剥離せず屋根に沿った流れが支配的となる円弧屋根では常に $a_C < 0$ であった。つまり、空力不安定振動の発生には風上端部での流れの剥離によって

生じる渦による影響が大きいと考えられる。

4. まとめ

本研究では、陸屋根、円弧屋根、吊屋根の3種類の屋根形状を対象とし、空力安定性並びに空力不安定振動の発生メカニズムを考察するため、系統的な数値流体解析を行った。屋根に作用する非定常空気力は、屋根を対称一次モードあるいは逆対称一次モードで強制加振し、様々な軒高風速や加振振動数、加振振幅に対して、空力剛性係数、空力減衰係数および位相差として評価した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ・対称一次モードと逆対称一次モードでは屋根に作用する非定常空気力の大きさが異なり、同じ無次元風速における非定常空気力の大きさは、逆対称一次モードよりも対称一次モードの方が大きい。
- ・一般化風力を用いて屋根全体に作用する非定常空気力を評

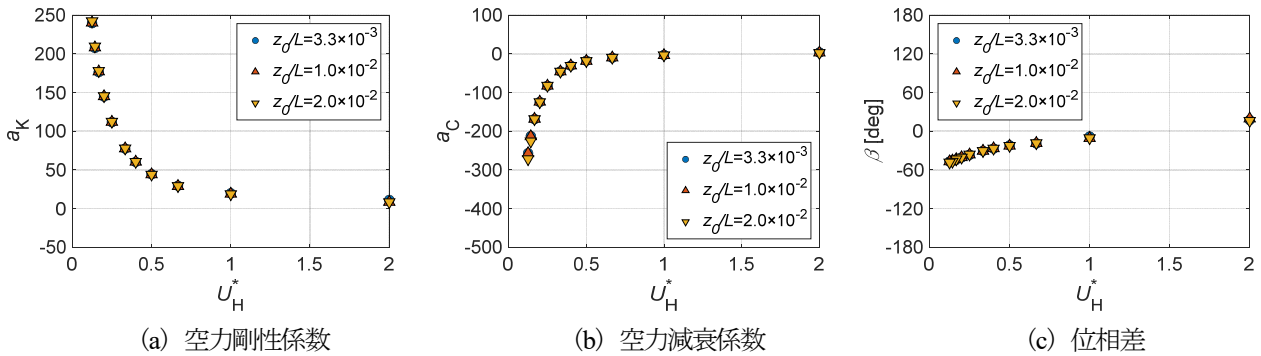


図 11 屋根に作用する非定常空気力 (境界層乱流, 逆対称一次モード, 陸屋根)

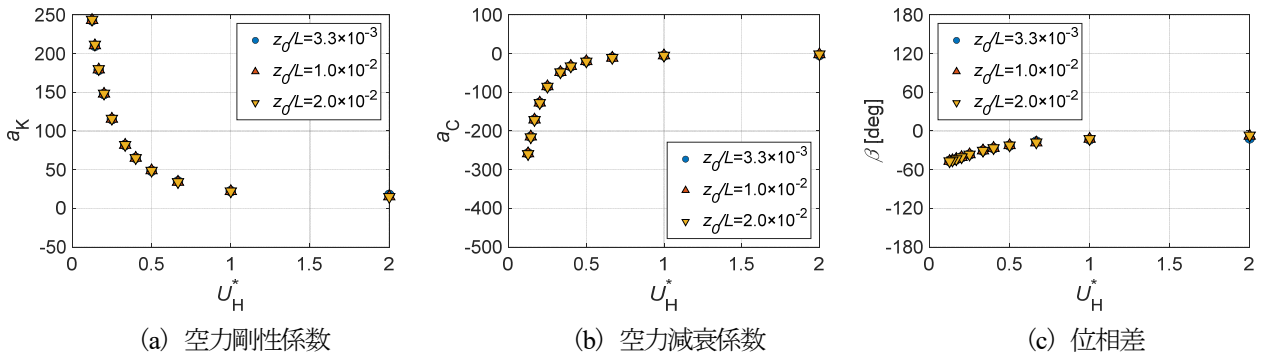


図 12 屋根に作用する非定常空気力 (境界層乱流, 逆対称一次モード, 円弧屋根)

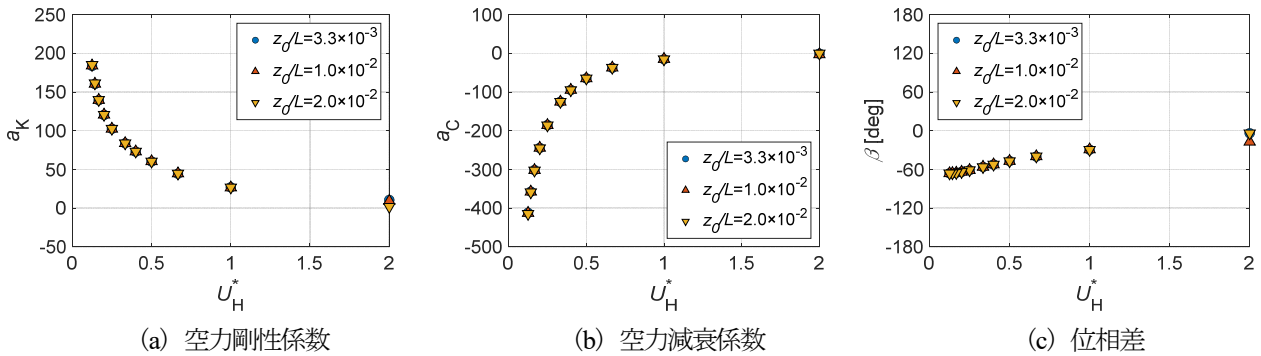


図 13 屋根に作用する非定常空気力 (境界層乱流, 逆対称一次モード, 吊屋根)

価すると、対称一次モードでは空力負減衰となる無次元風速の範囲は見られなかったが、逆対称一次モードでは空力負減衰となる無次元風速の範囲が見られたため、逆対称一次モードでは無次元風速がある値を超えると空力不安定振動が発生する可能性があるといえる。

- ・屋根の加振振幅によって空力剛性および空力減衰の大きさが変化するが、屋根の加振振幅を屋根のスパンで無次元化した無次元量を用いることで、空力剛性や空力減衰を振幅によらない値として評価することができる。
- ・軒高風速や屋根の加振振動数が変化した場合でも無次元風速を用いて評価することで、空力剛性係数および空力減衰係数を1つの変数で評価することができる。
- ・今回の解析範囲では、陸屋根や吊屋根では無次元風速によっては空力負減衰となるが、円弧屋根では常に空力的に安定となるため、大スパン屋根の空力不安定振動の発生には風上端部での流れの剥離によって生じる渦の影響が大きい

と考えられる。また、既往の研究例にもあるように、一様流の方が境界層乱流よりも低い無次元風速の範囲で空力負減衰となる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費(課題番号: 16J01789)および平成 28 年度公益財団法人能村膜構造技術振興財団の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) H. Kunieda: Flutter of hanging roofs and curved membrane roofs. International Journal of Solids and Structure, Vol. 11, No. 4, pp. 477 – 492, 1975.
- 2) E. Kimoto and S. Kawamura: Aerodynamic behaviour of one-way type hanging roofs, Vol. 13, No. 1 – 3, pp. 395 – 405, 1983.

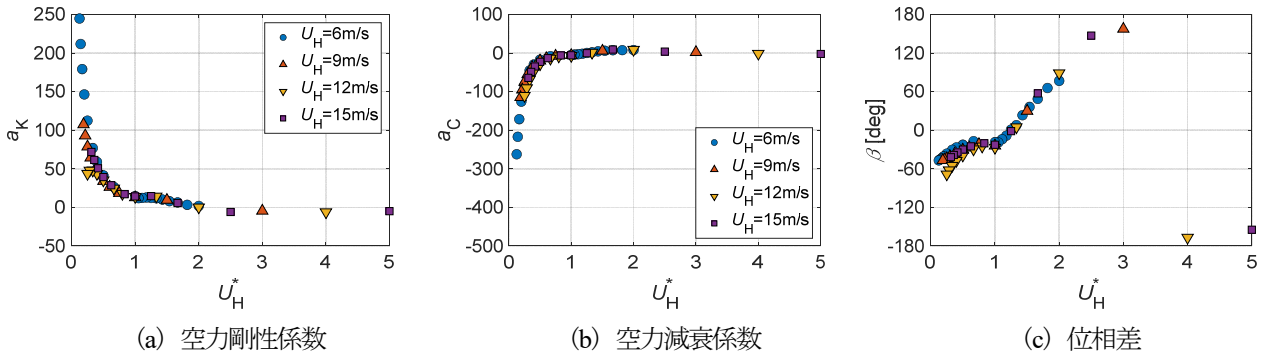


図 14 屋根に作用する非定常空気力(一様流, 逆対称一次モード, 陸屋根)

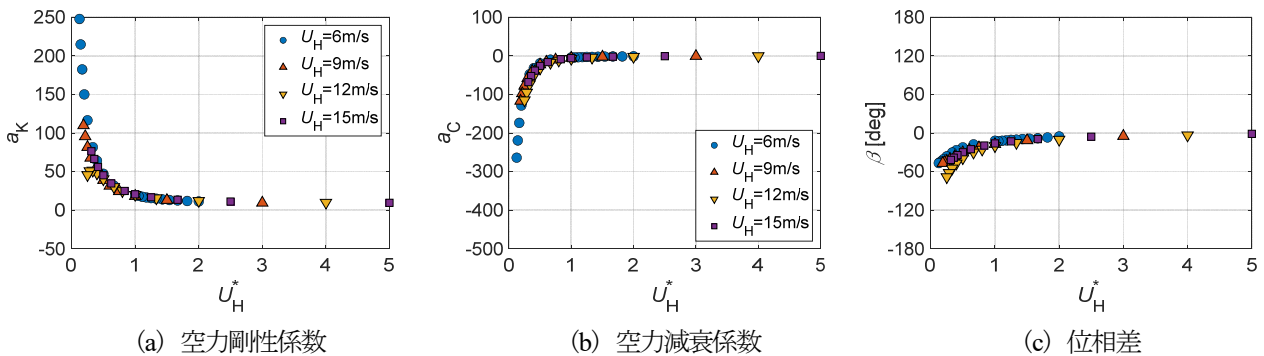


図 15 屋根に作用する非定常空気力(一様流, 逆対称一次モード, 円弧屋根)

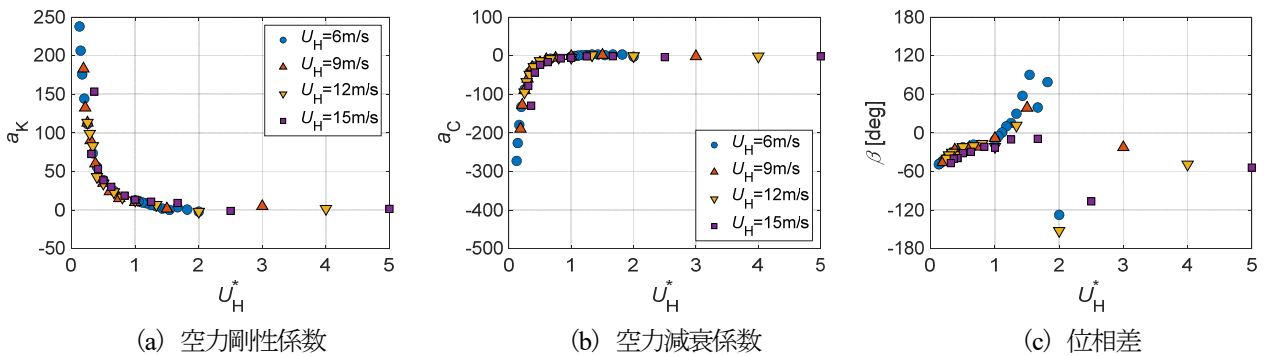


図 16 屋根に作用する非定常空気力(一様流, 逆対称一次モード, 吊屋根)

- 3) Y. Uematsu and K. Uchiyama: Wind-induced dynamic behavior of suspended roofs. The Technology Reports of the Tohoku University, Vol. 47, pp. 243–261, 1982.
- 4) Matsumoto, T., 1983. An investigation on the response of pretensioned one-way type suspension roofs to wind action. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 13(1–3), 383–394
- 5) Matsumoto, T. 1990. Self-excited oscillation of a pretensioned cable roof with single curvature in smooth flow. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 34(3), 304–318.
- 6) 三宅昭春, 吉村健: 吊屋根の空力弾性振動に関する基礎的研究 第2報 渦放出と励振発生の関係について, 日本建築学会構造系論文報告集, 第438号, pp.39–48, 1992.
- 7) D. J. Daw and A. G. Davenport: Aerodynamic damping and stiffness of a semi-circular roof in turbulent wind, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 32, pp. 83–92, 1989.
- 8) 大熊武司, 丸川比佐夫, 風間弘晴, 新堀喜則, 加藤信男: 大スパン構造物お屋根面に作用する風圧力の性質に関する基礎的研究, 第9回風工学シンポジウム論文集, pp. 97–102, 1986.
- 9) 大熊武司, 丸川比佐夫, 萩澤毅: 大スパン構造物の屋根面に作用する非定常風圧特性, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp. 73–78, 1988.
- 10) 大熊武司, 丸川比佐夫: 大スパン屋根の空力不安定振動の発生機構について, 日本風工学会誌, 第42号, pp.35–42, 1990.
- 11) 大熊武司, 丸川比佐夫, 萩澤毅: 振動依存風力を考慮した大スパン構造物の屋根の風応答解析に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造I, pp.25–26, 1990.
- 12) W. Ding, Y. Uematsu, M. Nakamura and S. Tanaka: Unsteady

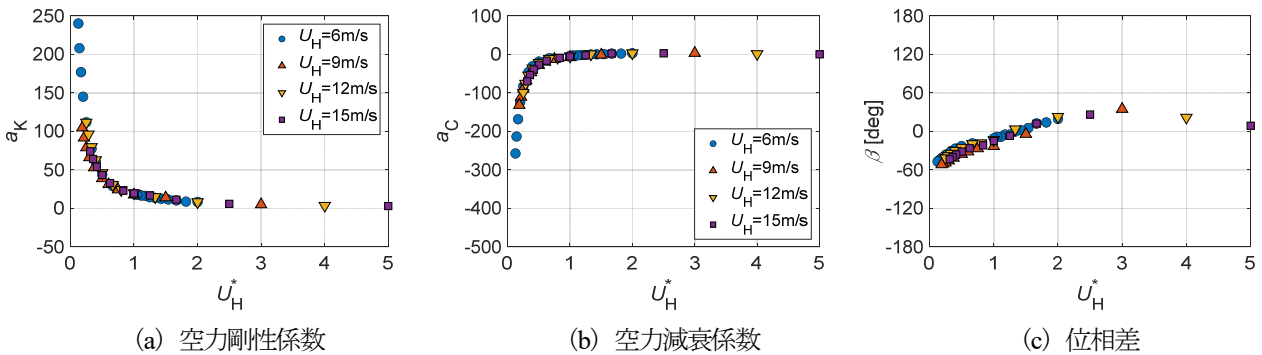


図 17 屋根に作用する非定常空気力 (境界層乱流, 逆対称一次モード, 陸屋根)

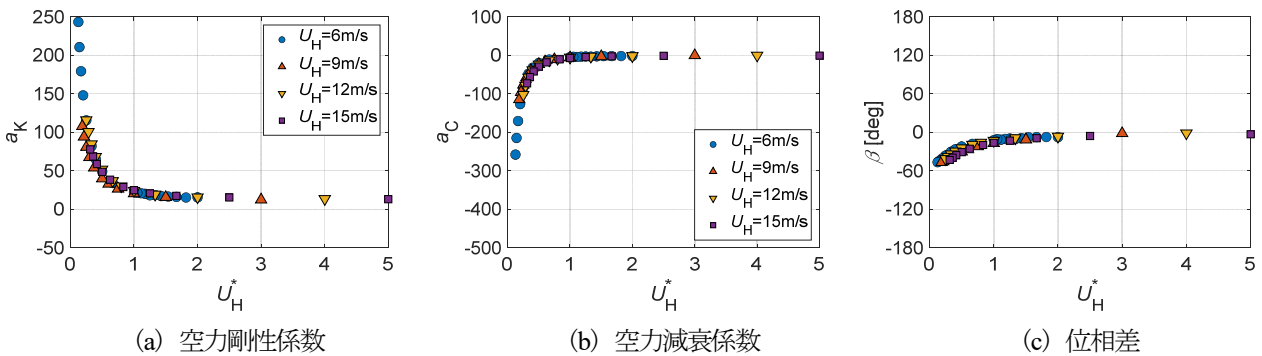


図 18 屋根に作用する非定常空気力 (境界層乱流, 逆対称一次モード, 円弧屋根)

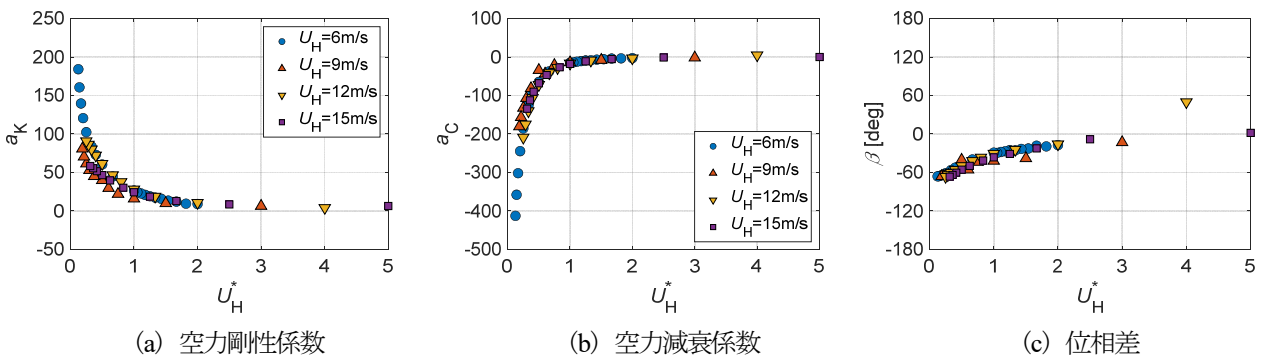


図 19 屋根に作用する非定常空気力 (境界層乱流, 逆対称一次モード, 吊屋根)

- aerodynamic forces on a vibrating long-span curved roof, *Wind and Structures*, Vol. 19, No. 6, pp. 649–663, 2014.
- 13) T. Li, Q. Yang, T. Ishihara : Unsteady aerodynamic characteristics of long-span roofs under forced excitation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 181, pp. 46–60, 2018.
 - 14) Y. Takadate and Y. Uematsu : Steady and unsteady aerodynamic forces on a long-span membrane structure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 193, 103946, 2019.
 - 15) 高館祐貴, 植松康 : 非定常空気力に基づく大スパン屋根の空力安定性評価, *日本風工学会論文集*, Vol.45, No. 2, pp. 16–27, 2020.
 - 16) 高館祐貴, 植松康 : スパン・軒高比が陸屋根の非定常空気力特性に及ぼす影響, *膜構造論文集*第 33 号, pp. 1–11, 2020.
 - 17) F. Nicoud and F. Ducros: Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 62, pp. 183–200, 1999.
 - 18) 日本建築学会 : 建築物荷重指針・同解説, 2014.
 - 19) R. Kraichnan: Diffusion by a random velocity field. *The Physics of Fluids*, Vol. 13 (1), pp. 22–31, 1970.
 - 20) R. Smirnov, S. Shi, I. Celik: Random flow generation technique for large eddy simulations and particle-dynamics modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, No. 2, pp. 359–371, 2001.

DISCUSSION OF AERODYNAMIC STIFFNESS AND DAMPING OF LONG-SPAN ROOFS WITH VARIOUS SHAPES BASED ON CFD SIMULATION

Part 1: Unsteady aerodynamic forces based on modal wind forces

Yuki TAKADATE ^{*1)}
Yasushi UEMATSU ^{*2)}

The present paper numerically investigates the unsteady aerodynamic forces of the first symmetric and anti-symmetric modes of vibration for three kinds of long-span roofs using a computational fluid dynamics (CFD) with large eddy simulation (LES). The aerodynamic stability of the roofs is discussed based on the characteristics of the unsteady aerodynamic forces, which are represented by the aerodynamic stiffness and damping. Although the building model is two-dimensional (one-way type), the CFD simulation is conducted for three-dimensional domain. The unsteady aerodynamic forces are evaluated based on the wind pressure distributions along the centerline of the roof which is forced to vibrate in the first symmetric and anti-symmetric mode. The vibration amplitude, the vibration frequency and the wind velocity at the mean roof height are varied over a wide range. The aerodynamic forces are investigated on the basis of the unsteady generalized wind forces. The magnitude of unsteady aerodynamic forces changes depending on the vibration amplitude. However, when the unsteady aerodynamic forces are normalized by velocity pressure, tributary area, and normalized amplitude, the normalized values are found to be independent of the vibration amplitude. According to the simulated results, the aerodynamically unstable vibration may occur when the roof vibrates in the anti-symmetric mode. In addition, aerodynamically unstable vibrations may occur on flat and suspended roofs, but may not occur on the cylindrical roof.

^{*1} Researcher, Dept. of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

^{*2} President, National Institute of Technology (KOSEN), Akita College, Dr. Eng.