振れ空力不安定振動の発生風速の予測式の提案

PREDICTION FORMULA OF CRITICAL WIND SPEED OF TORSIONAL AERODYNAMIC UNSTABLE VIBRATION

片桐純治 —*1
丸川比佐夫 —*3

大熊武司 —*2

Junji KATAGIRI —*1
Hisao MARUKAWA —*3

Takeshi OHKUMA —*2

キーワード：
振れ振動, 空力不安定振動, 空力減衰定数, 振動依存振りモーメント

Keywords:
Torsional vibration, Aerodynamic unstable vibration, Aerodynamic damping, Motion-induced torsional moment

In the present "AIJ Recommendations for Loads on buildings, 1993", the criterion for the aerodynamic unstable vibration in the across-wind vibration is proposed. However, the condition for the occurrence of self-excited vibration in the torsion was not regulated in the recommendations. In this report, the prediction formula of the critical wind speed of the torsional aerodynamic unstable vibration is proposed based on the results of resent researches.

1. はじめに

近年, 高層建築物における振れ空力不安定振動を対象とした研究が行われおり^{1~9)}, これらの研究において流れが再付着するような風方向に細長い矩形平面形状を有する高層建築物では, 質量減衰パラメーター($lh_s\theta/\rho_a D^2 B^2 H$, ここで, l : 一般化慣性モーメント, $h_s\theta$: 振れの構造減衰定数, ρ_a : 空気密度, B : 幅, D : 奥行, H : 高さ)が0.08以下の場合には, 無次元風速($U_H/n_\theta\sqrt{BD}$, ここで, U_H : 模型頂部高さの風速, n_θ : 振れの固有振動数)が4以上で振れ振動が急激に大きくなることが指摘されている。

1993年に改定された建築物荷重指針・同解説¹⁰⁾(以下, 荷重指針と呼ぶ)では, それまでの研究成果により建築物における風直角方向の空力不安定振動が生じる可能性の有る建築物の判別式が提案された。しかし, 建築物を対象とした振れ空力不安定振動に関する研究は当時ほとんど行われておらず, 荷重指針では, 振れ空力不安定振動のための判別式は提案されていない。

本報告は, 著者等が行った辺長比 D/B (D : 奥行き, B : 幅)が1, 2, および3の矩形平面を有する高層建築物を対象とする振れ空力不安定振動に関する研究により得られた成果に基づき, 振れ空力不安定振動が生じる可能性の有る建築物の判別のための振れ空力不安定振動の発生風速の予測式を提案するものである。

2. 振れ空力不安定振動に関する風洞実験方法および実験結果概要

2.1 空力振動実験^{5, 6, 7)}

空力振動実験は, 幅3.1m, 高さ2.0m, 風路長さ16mの回流式境界層風洞(株式会社風工学研究所所有)で行った。振れ振動を対象と

した高層建築物の空力振動実験では, 多質点系弾性模型を用いる必要があるため, 図1に示すような6質点系の弾性模型を用いた実験を行った。実験模型のアスペクト比 $H/\sqrt{BD}$ は辺長比1の場合4.2, 辺長比2の場合5.0, 辺長比3の場合4.3である。実験模型の振動モードは, 各方向(並進2方向および振れ)の1次振動は, 高さに比例する直線モードと見なせるものである。詳細については文献3)を参照されたい。弾性模型の構造減衰定数は, 無風時における自由振動より求めた。実験気流は, 図2に示すような2種類の気流である。こ

図1 空力振動実験模型

*1 ㈱泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所 主席研究員・工博
(〒299-0268 千葉県袖ヶ浦市南袖51)

*2 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

*3 ㈱泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所 所長・工博

*1 Chief Research Eng., ISEC, Urban Env. Research Center, Dr. Eng.

*2 Prof., Dep. of Arch., Faculty of Eng., Kanagawa Univ., Dr. Eng.

*3 Director, ISEC, Urban Env. Research Center, Dr. Eng.

ここで、 I_z は高さ z の乱れ強さ、 U_z は高さ z の平均風速、 L_z は高さ z の乱れのスケール、 B は模型見付幅である。平均風速の鉛直分布のべき指数 α が0.15の気流は荷重指針の地表面粗度区分IIに対応するものであり、 α が0.27の気流は地表面粗度区分IVに対応するものである。以下、それぞれ気流IIおよび気流IVと呼ぶ。

空力振動実験では、実験より得られた応答変位の時系列より、以下に示す方法によって空力減衰定数を求めた。なお詳細については文献5)を参照されたい。

- (1) 応答加速度の時系列を、応答変位のフーリエスペクトルに $-\omega^2$ を乗じてフーリエ逆変換することによって求める。
- (2) 応答加速度の時系列より自己相関関数 $R_{\ddot{\theta}}(\tau, U_H)$ を求め、(1)式に近似することによって構造減衰定数と空力減衰定数の和である見かけ上の減衰定数 $h_{a\theta}(U_H)$ を求める。
- (3) 空力減衰定数 $h_{a\theta}(U_H)$ は、(2)式に示すように見かけ上の減衰定数 $h_{a\theta}(U_H)$ より構造減衰定数 $h_{s\theta}$ を差し引くことにより求める。

$$\frac{R_{\ddot{\theta}}(\tau, U_H)}{\sigma_{\ddot{\theta}}^2(U_H)} = \kappa_{\theta} \exp[2\pi n_{\theta}'(U_H)h_{\theta}(U_H)\tau] \cos(2\pi n_{\theta}'(U_H)\tau) \quad (1)$$

$$h_{a\theta}(U_H) = h_{\theta}(U_H) - h_{s\theta} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{\ddot{\theta}}^2(U_H)$ は応答加速度の分散値、 $n_{\theta}'(U_H)$ は見かけ上の固有振動数であり、空力剛性を含んでいる。

図3に空力振動実験より求めた振れの空力減衰定数を示す。振れの空力減衰定数は、辺長比1の場合、風直角方向振動に急激な増加が生じ実験を打ち切ったため、負値はほとんど示されていない。辺長比2の場合、無次元風速6を超える風速において負減衰となり、無

次元風速6～10において-0.5%～-1%前後の値を示し、無次元風速10を超える風速付近よりさらに負減衰の値が増加する。実験気流による大きな空力減衰定数の変化は見られないが、無次元風速6の負減衰の値は、実験気流の乱れが小さい方が若干大きな値を示した。辺長比3の場合、辺長比2と同様に無次元風速6以上において空力減衰定数は負値を示し、無次元風速7以上において空力負減衰は急激に増加する。

なお、辺長比2および3の構造減衰定数が0.5%の場合、無次元風速5以上の領域で空力減衰定数はほぼ-0.5%の一定値を示している。この風速領域では、構造減衰定数と空力減衰定数の和、すなわち見かけ上の減衰定数が0になっており、これは、構造減衰力と非線形な空力減衰力が釣り合うような振幅で定常振動をしていることに対応するものである。

ここでは、構造減衰定数と空力減衰定数の和が0、すなわち見か

図2 空力振動実験気流

図3 空力振動実験からの振れ空力減衰定数の推定結果^{6,7)}

図4 振れの振動性状^{6,7)}

け上の減衰定数が0となり、風速の増加に伴い急激に振動振幅が大きくなることを空力不安定振動と定義し、図4に示す弾性模型の振れ応答性状を考察する。

辺長比1の場合、実験範囲の風速では不安定な振れ振動は生じな

図5 強制加振実験模型

図6 強制加振実験気流

図7 振動依存風力の測定結果^{8,9)}

い。辺長比2の場合、実験気流による若干の差は有るものの構造減衰定数が0.5%の場合、無次元風速4以上で急激な応答変位の増加を示し、構造減衰定数が1%の場合、無次元風速10付近より急激な応答変位の増加を示している。空力減衰定数は、これらの風速においてそれぞれ約-0.5%および約-1%を示している。辺長比3の場合も、空力減衰定数の負値と構造減衰定数が概ね同じ値になる風速付近において急激な応答変位の増加が生じている。

2.2 強制加振実験^{8,9)}

強制加振実験は、幅1.2m、高さ0.9m、風路長さ11.5mの吹出し型境界層風洞(神奈川大学所有)で行った。強制加振実験では、実験模型に強制的に正弦波振動を与え、建築物の振動に伴って生じる付加的空気力(以下、振動依存風力と呼ぶ)を測定した。実験模型は、図5に示す7質点系弾性模型を用いた。振れ振動は、弾性模型の柱を模型頂部に設置した鉄板に固定し、この鉄板を強制的に加振する事によって与えた。実験模型のアスペクト比は5.0である。実験模型の振動モードは、直線モードと見なせる⁸⁾。強制加振実験では、6レベルの層風力を測定し、層風力に振動モードを乗じて総和し一般化風力を求めた。実験気流は、図6に示すように空力振動実験と同様に辺長比2の場合、荷重指針の地表面粗度区分IIおよびIVに対応する気流であり、辺長比1および3の場合、地表粗度区分IVに対応する気流である。

振れ振動時の振動依存風力は、(3)式に示すように、測定した振りモーメント $M(t)$ と加振角変位および加振角速度 $\theta(t)$ 、 $\dot{\theta}(t)$ の共分散関数を求め、加振周波数 n_θ に同期した振動依存振りモーメント係数 $C_{M\theta}(n_\theta)$ を求めた。

$$C_{M\theta}(n_\theta) = \frac{1}{T q_H D^2 H} \int_0^T M(t) \frac{\theta(t)}{\theta_0} dt \quad (3.1)$$

$$C_{M\dot{\theta}}(n_\theta) = \frac{1}{T q_H D^2 H} \int_0^T M(t) \frac{\dot{\theta}(t)}{\dot{\theta}_0} dt \quad (3.2)$$

ここで、 q_H は模型頂部の速度圧、 D, H はそれぞれ模型の奥行きおよび高さ、 $\theta_0, \dot{\theta}_0$ はそれぞれ振れ角および振れ角速度の振幅、 T は測定時間である。

図7に振動依存振りモーメント係数の測定結果を示す。図7の $C_{M\theta}$ が振動依存振りモーメントの変位比例成分、 $C_{M\dot{\theta}}$ が速度比例成分を表す。模型頂部の振れ角振幅は、全ての模型で $\theta_0=2^\circ$ である。振動依存振りモーメントの変位比例成分は、空力剛性として作用し、正值の場合、見かけ上剛性を低下させる方向に作用する。速度比例成分は、空力減衰として作用し、正值の時、負減衰的に作用する。

振動依存振りモーメント係数の速度比例成分は、辺長比1では無次元風速10付近より正值を示し、辺長比2および3では無次元風速6以上において正值を示す。

図7の振動依存振りモーメントの速度比例成分が正值を示す風速、すなわち振動依存風力が負減衰的に作用する風速は、図3の空力減衰定数が負値を示す風速とほぼ一致している。

3. 空力不安定振動の発生風速の予測式の提案

3.1 空力不安定振動の発生風速の算定方法

振動時建築物に作用する振りモーメントは、静止時に作用する強制外力と、振動に伴って生じる振動依存振りモーメントにより表すことができる。したがって、振動時の高層建築物の周波数領域における振動方程式は、(4)式のように表される。

$$\omega_\theta^2 I \theta(n) + 2h_{s\theta} \omega_\theta I \dot{\theta}(n) + \omega_\theta^2 \theta(n) = q_H D^2 H \{C_{MW}(n) + C_{M\theta}(\theta, n)\} \quad (4)$$

ここで、 I は一般化慣性モーメント、 ω_θ は振れ角固有振動数($=2\pi n_\theta$)、 $C_{MW}(n)$ は静止時に作用する振りモーメント係数である。 $C_{M\theta}(\theta, n)$ は振動依存振りモーメント係数であり、振れ角振幅および振動数に依存する。

建築物では、質量が大きいため振動依存振りモーメントの変位比例成分による剛性変化は小さく、空力振動実験によれば、不安定振動が生じる風速付近において辺長比2の場合に最大2%程度⁵⁾、辺長比3の場合に最大4%程度⁶⁾の固有振動数の変化が見られる程度である。

ここで文献8)を参考にすると、振動依存振りモーメントは加振振幅に概ね比例した結果が得られており、振動依存振りモーメント係

数 $C_{M\theta}(\theta, n)$ を振れ角振幅 θ_0 に比例すると仮定することができる。したがって、 $C_{M\theta}(\theta, n)$ は(5)式のように表すことができる。

$$C_{M\theta}(\theta, n) = \theta_0 \tilde{C}_{M\theta}(n) \quad (5)$$

さらに、空力不安定振動が発生している場合には、共振成分が支配的であることを考えると、空力不安定振動は、(4)式より、固有振動に対応する振動依存振りモーメントの速度比例成分の正值と構造減衰力が一一致する時、すなわち(6)式が成立する時に生じると考えることができる。

$$2h_{s\theta} I \omega_\theta^2 = q_H D^2 H \tilde{C}_{M\theta}(n_\theta) \quad (6)$$

(6)式より、空力不安定振動の発生風速 U_{Tcr} と(7)式で表される質量減衰パラメーター δ_θ の関係を求めると、(8)式のようになる。

$$\delta_\theta = \frac{I h_{s\theta}}{\rho_a D^2 B^2 H} \quad (7)$$

$$\delta_\theta = \left(\frac{1}{16\pi^2} \right) \left(\frac{U_{Tcr}}{n_\theta \sqrt{BD}} \right)^2 \left(\frac{D}{B} \right) \tilde{C}_{M\theta}(n_\theta) \quad (8)$$

ここで、 ρ_a は空気密度、 U_{Tcr} は建物頂部高さにおける空力不安定振動の発生風速である。振動モードを直線モードとし、質量が一様に分布する場合、 δ_θ は密度 ρ_b を用いて(9)式のように求めることができる。

表1 アスペクト比5前後の振れ空力不安定振動の無次元発生風速 U_{Tcr}^* の予測式

辺長比	質量減衰パラメーター δ_θ	無次元発生風速 U_{Tcr}^*
$D/B=1$	$0.05 < \delta_\theta \leq 0.1$	11
$D/B=2$	$0.05 < \delta_\theta \leq 0.15$	$4+8\delta_\theta$
	$0.15 < \delta_\theta$	$8.6+7.4\delta_\theta$
$D/B=3$	$0.05 < \delta_\theta$	$5+10.5\delta_\theta$

$\delta_\theta \leq 0.05$ の場合、振動実験等による検討が必要である。

図8 質量減衰パラメーターと振れ空力不安定振動発生風速の関係 (□は空力不安定振動の発生する範囲を示す)

$$\delta_{\theta} = \frac{\rho_b (B^2 + D^2) h_{s\theta}}{\rho_a 36BD} \quad (9)$$

また、空力減衰定数 $h_{a\theta}(U_{Tcr})$ の負値が構造減衰定数 $h_{s\theta}$ と一致した時に空力不安定振動が生じると考えれば、(7)式の $h_{s\theta}$ を $h_{a\theta}(U_{Tcr})$ に置き換えることによって(10)式の様に δ_{θ} と U_{Tcr} の関係が求められる。

$$\delta_{\theta} = \frac{lh_{a\theta}(U_{Tcr})}{\rho_a D^2 B^2 H} \quad (10)$$

3.2 振れ空力不安定振動の予測式

図8に実験より得られた空力減衰定数 $h_{a\theta}(U_H)$ および振動依存振りモーメント係数 $C_{M\theta}$ を用いて(8)式および(10)式が成立する時の質量減衰パラメーター δ_{θ} と無次元風速 $U_H / n_{\theta} \sqrt{BD}$ の関係を示す。

辺長比1の場合、無次元風速11以上の風速の時、強制加振実験結果より δ_{θ} が0.1以下において空力不安定振動発生の可能性が示されている。辺長比2の場合、空力振動実験結果および強制加振実験結果ともに無次元風速5以上の風速において空力不安定振動発生の可能性を示している。無次元風速10を超える風速では、質量減衰パラメーターの増加に対して空力不安定振動の発生風速は単調に増加する。辺長比3では、無次元風速6以上において質量減衰パラメーターの増加に対して空力不安定振動の発生風速は単調に増加する。また、いずれの辺長比においても、 δ_{θ} が0.05以下の極めて小さい時、無次元風速2~4付近において空力不安定振動が発生する可能性が示されている。

以上の結果に基づき、本報告では、建築物の有する質量減衰パラメーターと振れ空力不安定振動の無次元発生風速 U_{Tcr}^* の関係を図8に示した直線のように単純化し、空力不安定振動の予測式を求めた。表1に振れ空力不安定振動の無次元発生風速 U_{Tcr}^* の予測式を示す。

なお、前述のように辺長比に関わらず無次元風速2~4において δ_{θ} が0.05より小さい時に空力不安定振動が生じる可能性が示されているが、弾性模型実験による空力減衰定数の推定値には誤差が大きいことより、 δ_{θ} が0.05以下については、予測式の適用範囲外とした。また、提案式の基とした風洞実験はアスペクト比 $H/\sqrt{BD}$ が5前後の実験模型を用いて行っていることより、アスペクト比の大きな細長い建築物では、本予測式より低風速において空力不安定振動が生じる可能性が有することに注意が必要である。

3.3 予測式による振れ空力不安定振動発生風速の推定結果と実験結果との比較

本項では、まず表1より求まる振れ空力不安定振動の発生風速と図4の弾性模型実験結果との比較を行い、本報告で提案する振れ空力不安定振動の予測式の妥当性を検討する。続いて、著者等以外の研究機関による振れの弾性模型実験結果との比較を行う。

表2に図4の弾性模型実験における質量減衰パラメーター δ_{θ} と表1より求めた振れ空力不安定振動の発生風速を示す。各辺長比における弾性模型の密度は、辺長比1は227kg/m³、辺長比2は203kg/m³、辺長比3は236kg/m³である。 δ_{θ} は質量が一様に分布するとして(9)式より求めた。

辺長比1の場合、弾性模型実験を途中で中断したため比較できないが、辺長比2および3では、 U_{Tcr}^* の予測結果は辺長比2の構造減衰定数1%の場合を除き、弾性模型実験結果の応答変位に急激な増加の生じる風速とほぼ一致している。辺長比2の構造減衰定数1%では、予測結果は無次元風速5程度であり、限定的な応答変位の増加が始まる風速に一致している。

図9に河井¹⁾、吉村他²⁾およびYoshie et.al⁴⁾による実験結果と提案する予測式による振れ空力不安定振動の発生風速の比較を示す。図中の実線あるいは破線は、各々の実験条件により表1の予測式より求めた U_{Tcr}^* である。各実験におけるアスペクト比および質量減衰

表2 振れ空力不安定振動の発生風速の予測結果

辺長比	δ_{θ}	0.089(0.5)	0.142(0.8)	0.301(1.7)	0.354(2.0)
	U_{Tcr}	11	-	-	-
辺長比2	δ_{θ}	0.070(0.5)	0.140(1.0)	0.238(1.7)	0.378(2.7)
	U_{Tcr}	4.6	5.1	10.4	11.4
辺長比3	δ_{θ}	0.105(0.5)	0.189(0.9)	0.336(1.6)	0.399(1.9)
	U_{Tcr}	6.1	7.0	8.5	9.2

()内は構造減衰定数%を示す。

表3 既往の実験における質量減衰パラメーター δ_{θ}

	$H/\sqrt{BD}$	δ_{θ}		
		辺長比1	辺長比2	辺長比3(4)
河井 ¹⁾	10	—	0.215	0.393
吉村他 ²⁾	5.4	0.760	—	—
Yoshie et.al ⁴⁾ *	8	0.073	0.091	0.121

* 構造減衰定数は1%として算定。

(a) 辺長比1

(b) 辺長比2

(c) 辺長比3(4)

図9 予測式による振れ空力不安定振動発生風速と既往の実験結果の比較

パラメーター δ_θ は表3に示すとおりである。なお、 δ_θ は吉村他²⁾の場合記載されている一般化慣性モーメントを用いて求めており、河井¹⁾およびYoshie et.al⁴⁾の場合それぞれに記載されている密度より質量分布が一樣として求めた。Yoshie et.al⁴⁾の構造減衰定数は、論文に記載されていないため、聞き取り調査により1%とした。河井¹⁾の実験模型の振動モードは、高さ方向に一樣なモードであり、質量および振動依存風力が高さ方向に一樣として(9)式より求まる δ_θ を1.5倍している。また、Yoshie et.al⁴⁾、河井¹⁾の用いた実験模型のアスペクト比はそれぞれ8および10であり、著者等のものに比べて大きい。河井¹⁾の実験は辺長比2と4について行われており、河井¹⁾の辺長比4の結果を予測式の辺長比3と比較した。

辺長比1の場合、吉村他²⁾では無次元風速11を超える風速まで不安定振動が生じておらず、予測式においても δ_θ が大きいこと不安定振動は生じない結果となっている。Yoshie et.al⁴⁾では、風直角方向振動成分に渦励振が生じたため無次元風速7付近において実験が打ち切られている。

辺長比2の場合、予測式による U_{Tcr}^* は、Yoshie et.al⁴⁾では4.7であり、実験結果に発散的な応答変位の増加の見られる無次元風速9付近より低風速となっている。河井¹⁾の場合 U_{Tcr}^* は10程度であるが、実験結果には発散的な応答変位の増加は見られない。

辺長比3の場合、予測式による U_{Tcr}^* は、河井¹⁾では9.1であり、実験結果に発散的な応答変位の増加が生じる風速と概ね一致する。Yoshie et.al⁴⁾の場合、 U_{Tcr}^* は6.3であり、実験による応答変位に急激な増加の生じる無次元風速9付近より低風速である。

4. 結論

既往の研究に基づき、高層建築物における振れ空力不安定振動の発生風速の簡易な予測式を提案し、提案した予測式と振れ空力不安定振動の実験結果との比較を行った。予測式による振れの空力不安定振動の発生風速は、著者等の弾性模型実験と比較した場合、振れの応答変位に急激な増加の見られる風速と良く一致した。他の研究機関による弾性模型実験と比較した場合、予測式による振れ空力不安定振動の発生風速は、実験結果に急激な変位増加の生じる風速と一致する場合も有るが、概して低風速側の予測結果となっている。

なお、本報告で提案した予測式は、辺長比が1～3、アスペクト比5前後の矩形平面の建物模型を用いた風洞実験結果に基いたものであり、この範囲から大きく外れる形状の建築物では弾性模型実験等による確認が必要である。また、偏心を有する建築物では、無偏心の場合に比べ空力不安定振動が生じやすい事¹¹⁾、偏心を有さない場合でも風直角方向と振れの固有振動数が接近した建築物では、風直角方向と振れの連成した空力不安定振動が生じる可能性の有る事が既往の研究^{2,5)}により指摘されており、この様な建築物に本報告で提案した予測式を用いる場合には注意が必要である。

高層建築物の風応答に対する安全性あるいは空力不安定振動の予測精度の向上のために、風直角方向空力不安定振動予測に関するデータ蓄積はもとより、振れ空力不安定振動および風直角方向振れ連成振動時の空力不安定振動予測のためのデータ蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 河井宏充, 高層建築物の渦励振, ギャロッピング, フラッター, 第12回風工学シンポジウム, 1992年, 267-272
- 2) 吉村直樹, 丸川比佐夫, 大熊武司, 高橋尚二, 高層建築物の風による並進・ねじれ振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1994年, 223-224
- 3) 丸川比佐夫, 片桐純治, 勝村章, 藤井邦雄, 多質点系弾性模型の開発と高層建築物の風応答評価についての検討, 日本建築学会構造系論文第484号, 1996年8月, 39-48
- 4) R.Yoshie, H.Kawai, M.Shimura, R.Wei, A study on wind-induced vibration of super high rise building by multi-degree-of freedom model, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn. 69-71 (1997) 745-755
- 5) 片桐純治, 丸川比佐夫, 大熊武司, 藤井邦雄, 高層建築物の風応答における風直角方向と振れの固有振動数比の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文第514号, 1998年12月, 21-27
- 6) 片桐純治, 勝村章, 丸川比佐夫, 藤井邦雄, 気流特性による辺長比2の高層建築物の振れ応答性状の変化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999年, 147-148
- 7) 片桐純治, 勝村章, 丸川比佐夫, 藤井邦雄, 辺長比による高層建築物の風直角方向および振れの風応答性状の変化に関する研究, 第15回風工学シンポジウム, 1998年, 473-479
- 8) 片桐純治, 大熊武司, 丸川比佐夫, 宮澤浩史, 辺長比2の高層建築物に作用する振動依存風力特性に関する研究—風直角方向および振れ振動時振動依存風力特性—, 日本建築学会構造系論文第543号, 2000年8月, 25-32
- 9) 廣川雅一, 片桐純治, 下村祥一, 大熊武司, 丸川比佐夫, 高層建築物に作用する振動依存風力特性に関する実験的研究 その5 辺長比1および辺長比3の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999年, 139-140
- 10) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 1993年改訂
- 11) 片桐純治, 丸川比佐夫, 大熊武司, 勝村章, 偏心を有する高層建築物の風応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文第514号, 1998年5月, 81-88
- 12) 片桐純治, 大熊武司, 丸川比佐夫, 鶴見俊雄, 風直角方向振れ連成時の振動依存風力特性—辺長比2の高層建築物に作用する振動依存風力特性に関する研究—, 日本建築学会構造系論文第543号, 2001年5月, 15-22

[2001年10月11日原稿受理 2002年2月18日採用決定]