PIV を用いた流れの可視化と風圧の同時測定による 細長い三次元柱周りの流れと空気力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON AERODYNAMIC FORCE AND WIND FLOW AROUND A THREE-DIMENSIONAL SLENDER CYLINDER BY SYNCHRONOUS WIND PRESSURE MEASUREMENTS WITH PIV

吉川 清峰^{*1}, 奥田 泰雄^{*2}, 伊藤 真二^{*3}, 大橋 征幹^{*4}, 佐々木 康人^{*5}

*Kiyomine YOSHIKAWA, Yasuo OKUDA, Shinji ITO,
Masamiki OHASHI and Yasuhito SASAKI*

The wind flows around a three-dimensional slender cylinder model and the wind pressures acting on it were measured synchronously by Particle Image Velocimetry (PIV) and simultaneous multi-pressure measurements. Symmetrical mean flow distributions were obtained from piles of instantaneous flow distributions. The relations between the separated shear layers and the wind pressures on the side of the model were shown by synchronous records between instantaneous flows and wind pressures. The correlations between the perpendicular components (V components) of the flow around the model and the lift forces on it were highest. The correlation on the centerline in the wake also had spatial periodic fluctuations like a sine wave. It can be considered that the spatial periodic fluctuations in the correlation were caused by the vortex shedding from the model, because of a high relationship between the spatial period of the fluctuations and the reciprocal Strouhal number.

Keywords: PIV, Wind pressure measurement, Synchronous measurement, Three-dimensional cylinder, Instantaneous flow, Lift force, Correlation

PIV, 風圧実験, 同時測定, 三次元柱, 瞬間流れ, 揚力, 相関

1. はじめに

超高層建築物や橋梁の主塔のようなアスペクト比の大きな構造物は、耐風設計において、その空力特性の把握が特に重要である。これらの構造物のような鈍い物体の空力特性は、剥離せん断層や後流のカルマン渦の挙動と密接に関連していることが知られており、物体の隅角部に隅切りを施したりするのも、剥離せん断層や後流の挙動を制御し、空気力を低減させるための工夫のひとつである。言い換えれば、後流の挙動をモデル化することができれば、その空力特性を耐風設計上有利な方向へ導くことも期待できる。しかし、鈍い物体周りの流れの構造と後流に伴う空気力の対応関係が、具体的に明らかになっているわけではない。また耐風設計において数値流体解析も応用されはじめているが、その検証には実験結果を参照する必要があり、物体周りの流れの構造と空気力の関係を実験的に明らかにする意義は大きい。

これまでも、建築物や土木構造物を模した柱状の鈍い物体周りの流れと空気力の関係については、様々な手法を用いて研究が進められてきている。溝田ら^{1,2)}は、タンデム型熱線流速計プローブにより一様流内の二次元矩形柱周りの流れを測定し、伴流淀み点位置と背圧係数や抗力係数との関係を明らかにし、また変動揚力と非定常

流速の位相関係から非定常流れを示した。田村ら³⁾は、三次元数値流体解析により二次元矩形柱周りの流れの構造を分析し、剥離せん断層と矩形柱側面の距離の周期的変化が揚力の発生に寄与するとしている。二次元柱の空気力特性については、西村ら^{4,5,6,7)}や野田ら⁸⁾が詳細に調べている。田村ら^{9,10)}は、角柱に隅切や隅丸を施した二次元および三次元の角柱を対象に、空気力については風洞実験、周辺流れについては数値流体解析の結果を用いて、その効果を確認している。流れの可視化によって流れと空気力の関係を調べた実験も数多くある。岡島¹¹⁾は、風洞実験ではスモークワイヤー法、水槽実験ではアルミ粉末法と電解沈殿法を併用して、Re 数や辺長比によって矩形柱の St 数や背圧係数が複雑に変化することを見いだした。また西村ら¹²⁾は、スモークワイヤー法による流れの可視化と風圧測定を同時に行い、亜臨界域での円柱周りの流れの変動から、揚力変動の発生機構について記述している。谷池ら¹³⁾と奥田ら^{14,15,16)}は、ドライアイスのミストや四塩化チタンを用いた流れの可視化と風圧測定を行って、三次元角柱周りの渦形成から放出の過程を定性的に述べている。河村ら¹⁷⁾は、二次元角柱を対象に、タフトを用いた可視化と数値流体解析、さらに天秤による空気力の測定と表面圧力の測定を行っている。

^{*1} 飛島建設技術研究所

^{*2} 建築研究所 工博

^{*3} 鴻池組技術研究所

^{*4} 国土交通省国土技術政策総合研究所

^{*5} フジタ技術センター

Research Institute of Technology, Tobishima Corporation

Building Research Institute, Dr. Eng.

Research Institute of Technology, Konoike Construction

National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT

Technology Development Division, Fujita Corporation

図1 実験模型

図2 座標系

図3 風洞風上から見た実験模式図

図4 粒子画像

図5 サンプルングの一例

表1 PIV 諸元

光源	Nd:YAG レーザー 50mJ 15Hz
画像記録手法	2 フレーム/単一露光
照明パルス持続時間	0.01μs
照明パルス時間間隔	50μs
カメラ	DANTEC HiSense Camera 80C60
カメラ解像度	1280pixel x 1024pixel, 12bit
サンプリング周波数	2Hz
測定領域	137.5mm x 110.0mm
検査領域	32pixel x 32pixel (3.4mm x 3.4mm)
オーバーラップ	無
トレーサー粒子	SAFEX® Normal Power Mix

表2 測定条件

	瞬間値		平均値	
	風圧	PIV	風圧	PIV
サンプリング周波数	1000Hz	2Hz	1000Hz	2Hz
サンプリング時間	8.192s		8.192s×5	180s
サンプル数	8192	最大 16	8192×5	360

図6 流速ベクトルの補間

このように物体周りの流れと空気力の関係については、流速測定、風圧測定、空気力測定、数値流体解析、流れの可視化などの様々な手法によって明らかにされつつある。しかし流れ全体や空気力との測定が同時でなかったり、定性的な流れの把握であったり、高度な条件設定が要求される数値流体解析であったりと、それぞれに一長一短があり、それらの手法が相補う形で研究が進められてきた。そのためこれまで、定量的な瞬時の流れの全体構造と、それと同時に刻の空気力を実験的に得ることができず、物体周りの流れと空気力の関係の解明には未だ不十分な点も多い。

一方、近年コンピュータの処理能力の向上やその他ハードウェアの進歩と共に、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry, 以下 PIV という) が普及してきた¹⁸⁾。PIV よりさらに空間分解能の高い、PTV (Particle Tracking Velocimetry) と呼ばれる計測手法も実用化の域にある^{例えは19)}。さらに現在、時間分解能を高めた高速度 PIV や、二次元断面内の面外速度を測定 (3 成分化) するステレオ PIV、三次元の流速を測定する三次元 PTV も開発が進められている^{例えは20), 21)}。

これら PIV による測定の利点は、空間分解能が高く、瞬時の流れの構造を定量的に捉えることが可能であるといった点等²²⁾にあり、また熱線流速計のようにプローブを流れの中に設置することがないため、測定対象付近の流れの構造を乱すこともない。そのため現在、有効な流体測定法としてこれらの PIV を用いた研究が進められており^{例えは19)}、筆者ら²³⁾も塔状構造物を対象とした PIV と数値計算の比較を行っている。また流れと空気力という観点からも、筆者ら^{24)~29)}は、立方体や細長い柱周りの流れの測定を行い、同時に行った多点風圧測定との比較から、物体周りの流れと物体に作用する空気力について研究を行ってきた。

以上のような既往の研究や近年の技術の進歩を踏まえた上で、本研究では、流れと空気力の関係を実験的に明らかにする目的で、細長い 3 種類の柱状模型を作製し、2 種類の気流を用いて、PIV による周辺流れの測定と多点風圧測定を同時に行った。2 つの測定結果から、平均流れと平均風圧、瞬間流れと瞬間風圧、また流れと空気力の相関を検討することにより、物体周りの流れと物体に作用する空気力の関係について述べる。実験では、二次元流れにおける関係の解明を試みたが、結果的に三次元流れについての議論としている。

2. 実験概要

風洞実験は、独立行政法人建築研究所内の回流型乱流境界層風洞 (測定胴長さ 25.0m×幅 3.0m×高さ 2.5m) にて実施した。

通常二次元的な流れの把握を目的とする実験では、流れの二次元性が損なわれないような配慮が必要であるが、本研究ではカメラ撮影が必要であるため、模型の両端に端板などを設けることが難しい。そこで実験模型は、図 1 に示すような一辺が 30mm、高さが 500mm の、アスペクト比 16.7 の形状とした。模型は 3 体作製し、一辺が 30mm の正方形角柱 (以下角柱)、一辺が 30mm の角柱の各頂点に 3mm の隅切りを施した隅切り角柱 (以下隅切)、さらに直径が 30mm の円柱である。いずれも 400mm の高さに角柱 28 点、隅切 28 点、円柱 24 点の圧力測定孔を設けた。この圧力測定孔高さを基準高さ H とし、流れの測定と風圧測定はこの高さで行う。PIV のカメラによる撮影は、測定高さを自由端から十分に離すと、模型の見込みによって模型近傍まで測定することができない。一方田村³⁰⁾は、アスペクト比の大きい円柱の場合、二次元的な流れになっていると思われるのは、自由端から 3D~4D 以上としている。この測定高さはこ

図7 平均流速ベクトル（平均温度）－平均風圧係数分布

れらを勘案して決められた。実験気流は $I_H=1.0\%$ の一様流と $I_H=6.0\%$ の乱流を用いた。基準風速 U_H はどちらの気流も約 12m/s で、 Re 数は概ね 2.5×10^4 である。実験は模型が3種、気流が2種の、計6ケースとなる。

また図2に示すように座標軸を定め、模型最前面中央から風の主流方向に X 軸、主流方向から見て左方向に Y 軸とする。また X 軸、 Y 軸方向の速度をそれぞれ U, V とする。風向は変化させないので、抗力、揚力はそれぞれ X 軸、 Y 軸方向の力である。

この実験の模式図を図3に示す。PIVの流れの被写体となるトレーサー粒子は、粒径 $1 \sim 6\mu\text{m}$ 程度の液滴で、風洞風上の床面で熱によって気化させ、送風機を回した状態で十分な時間をおくことにより、風洞内にトレーサー粒子を充満させておく。PIVの測定は、模型の圧力測定孔部分に模型側面からレーザー光を照射し、カメラを模型の真上に設置して平面的な流れを撮影した。このとき模型自身の影となる部分については、粒子画像を得ることができず、流速ベクトルを求めることができない。このPIVにより撮影した粒子画像の一例を図4に示す。PIVはDANTEC社製PIVシステム(FlowMap, FlowManager)³¹⁾を使用した。諸元を表1に示す。全測定領域と1検査領域の関係から、 X 軸方向40点、 Y 軸方向32点の、計1280点の流速ベクトルを出力する。なお本システムは、2枚の粒子画像の濃度分布パターンを解析する相互相関法PIVである。事前にX型熱線流速計やLDVとの比較により、平均流れについて精度の確認を行い、良い一致を得ている。

模型周りの流れはこのPIVにより、また模型に作用する風圧は多点風圧測定装置により測定した。表2に測定条件を示す。瞬間値の場合は、多点風圧測定はサンプリング周波数 1000Hz 、サンプリング

時間は約8秒とした。PIVカメラからの同期信号を風圧実験からの圧力信号と同じ多点風圧測定装置に入力することにより、両者の同期を図った。つまり、PIVカメラからの同期信号も 1000Hz でサンプリングされている。しかしPIVの撮影のサンプリング周波数は 2Hz であるので、図5に示すように、PIVのサンプル数は最大16である。この実験を5回行った。PIVからの同期信号が記録された時刻の風圧測定結果を、同時刻の記録として扱った。この同時刻として扱った風圧測定記録とその前後の記録を比較して、大きな差異がないことを確認している。平均風圧は上記の 8192×5 回の記録を平均したものとした。平均流れは、上記とは別に、180秒間に得られる360の瞬間流速ベクトルの記録を平均した。基準静圧は風洞風上の高さ 1m に設置したピトー管により測定した。また導圧チューブの伝達特性の補正を行った。

PIVは極めて短い時間間隔(表1より $50\mu\text{s}$) で撮影された2枚の粒子画像の相互相関から流速ベクトルを求めるが、トレーサー粒子の濃度分布の抽出や相関の計算ができずに、過誤ベクトルを出力する場合がある。そこで図6に示すように、任意の点の流速ベクトルが過誤ベクトルと評価された場合、その点の周囲3点以上が有意であれば線形補間を行った。周囲の有意な点が2点以下の時には欠測とし、その後の解析からは除外した。

3. 実験結果

3.1 風圧実験

風圧実験の結果を表3に示す。風力係数は風圧係数から求めている。すべての風力係数で角柱、隅切、円柱の順に小さくなり、平均抗力係数 C_D は、一様流の方が乱流より大きく、変動抗力係数 C_D' と

表3 風圧実験の結果

	角柱		隅切		円柱	
	一様流	乱流	一様流	乱流	一様流	乱流
C_D	1.534	1.159	1.085	0.857	0.789	0.593
C_D'	0.149	0.193	0.087	0.144	0.062	0.092
C_L'	0.372	0.397	0.211	0.269	0.075	0.092
St	0.106	0.102	0.124	0.122	0.161	0.158

図8 X座標とU成分の関係(角柱)

表4 同時刻の記録数

	角柱		隅切		円柱	
	一様流	乱流	一様流	乱流	一様流	乱流
	73	61	74	64	68	71

表5 条件抽出された風圧係数

	a)			b)			c)			d)		
	C_{sL}	C_{sR}	C_{sL}	C_{sR}	C_{sL}	C_{sR}	C_{sL}	C_{sR}	C_{sL}	C_{sR}	C_{sL}	C_{sR}
1)	-1.78	-0.75	-0.68	-1.44	-1.11	-1.08	-0.76	-0.57				
2)	-1.50	-0.59	-0.70	-1.43	-1.06	-1.04	-0.72	-0.63				
3)	-1.37	-0.51	-0.72	-1.38	-0.97	-1.01	-0.65	-0.73				
4)	-1.29	-0.60	-0.91	-1.23	-1.07	-0.96	-0.69	-0.70				
5)	-1.28	-0.70	-0.60	-1.19	-0.95	-1.07	-0.67	-0.74				
平均	-1.44	-0.63	-0.72	-1.33	-1.03	-1.03	-0.70	-0.67

図12 X座標とV成分の関係

図13 X座標とU成分の関係

図14 後方淀み点と背圧・抗力係数の関係

図15 相関係数の絶対値の平均値と相関係数の標準偏差

図9 揚力の時刻歴波形とPIVの測定時刻

図10 条件抽出された測定時刻近傍の揚力の時刻歴波形

変動揚力係数 C_L' は乱流の方が一様流より大きい。また変動揚力のパワースペクトル密度より求めた St 数は、角柱、隅切、円柱の順に大きな値となっている。しかし二次元柱について行われた既往の実験

結果^{4),5),9)}と比較すると、二次元流れの性状は示していない。

3.2 平均流れと平均風圧

6 ケースの実験について、時間平均の、流速ベクトル、渦度、風圧係数を求めた。図 7a~7f に平均流速ベクトル・平均風圧係数分布を示す。また流速ベクトルから求めた渦度も色の濃淡で示している。模型内外の細実線はそれぞれ風圧係数+1.0と-1.0を示している。

PIV のサンプリング周波数は 2Hz であり、渦放出周波数(角柱一様流で 42.8Hz)に比較して大幅に不足しているが、360 の瞬間流速ベクトルをアンサンブル平均することによって得られた流速ベクトルと渦度の分布は、ほぼ左右対称に現れ、平均流れ場が求められていると考えられる。渦度の分布から角柱、隅切、円柱と角が滑らかなるに従って後流幅が狭くなっていることが確認できる。一様流と乱流を比較すると、どの形状を見ても、一様流の方が平均風圧係数の絶対値が大きくなっており、流れの特徴がより顕著に現れていると言える。しかし図 7 の流速ベクトル分布や渦度分布からは、一様流と乱流の明確な差異は認められない。

図 7a, 図 7b について、X 軸上で見た模型前面からの距離と流速ベクトルの U 成分の関係を図 8 に示す。接近流の流速が模型の直前で減少し、模型の背後では逆流の部分が存在した後、再び主流方向の流れとなっている。模型の背後で U/U_H が負から正に符号が変わる点を後方淀み点と見なすと、一様流中の角柱では後方淀み点は $X/D=3.0$ で、背圧係数は $C_b=-0.76$ である。また乱流中の角柱では後方淀み点は $X/D=2.8$ で、 $C_b=-0.55$ である。Laneville et al.³²⁾は、辺長比 $D/B=1$ 程度の二次元角柱周りの流れは、一様流より乱流の方が後流域が長くなり背面の負圧が弱くなるとしているが、本研究の後方淀み点は乱流の方が若干近い。これは気流の三次元性が現れているためと考えられる。

3.3 瞬間流れと瞬間風圧

5 回の実験により、同時刻の流速ベクトル分布と風圧分布が得ら

図 11a L面の負圧が強い記録

図 11c L面, R面とも負圧が強い記録

図 16 U成分と揚力の相関係数

図 11b R面の負圧が強い記録

図 11d L面, R面とも負圧が弱い記録

図 17 V成分と揚力の相関係数

図 11 流速ベクトル (渦度) - 風圧係数分布

-1.0 0.0 1.0

れている記録数は表 4 に示す通りである。ここでは風圧係数の絶対値も大きく、強いカルマン渦が発生しやすい、一様流中の角柱についての検討を行う。瞬間の流れの構造と空気力の関係調べるために、73 の同時刻の記録から、模型側面の風圧係数 C_{sL} と C_{sR} (図 2 参照) に着目して、a)~d) の条件で記録の抽出を行った。

- a) $\min(C_{sL})$ L面の負圧が強い記録
- b) $\min(C_{sR})$ R面の負圧が強い記録
- c) $\min(\max(C_{sL}, C_{sR}))$ L面, R面とも負圧が強い記録
- d) $\max(C_{sL} + C_{sR})$ L面, R面とも負圧が弱い記録

上記のそれぞれの条件で、上位から順に 5 記録ずつ抽出した。

抽出した記録を表 5 に示す。最左列の括弧付きの数字は抽出順位を示している。抽出されたそれぞれの記録が時刻歴上でどのような位相にあるかを確認するために、図 9 に 5 回の実験の揚力の時刻歴波形と、PIV の測定時刻を示す。また条件抽出をした測定時刻近傍 (St 数の逆数から求めた渦放出周期の 10 周期分) の揚力の時刻歴波形を図 10 に示す。a), b) については、揚力変動のそれぞれ正負のピークに近い位相を示している。c), d) については、測定時刻近傍 (図中網掛け, 同 5 周期分) の変動揚力係数 C_L' を比較すると、全時間平均の 0.372 (表 3) と比較して明らかな差があり、c), d) はそれぞれ、揚力変動の大振幅または小振幅中のゼロクロスであることが解る。

このような 4 つの条件時の物理的な現象を浮き立たせるために、抽出したそれぞれ 5 つの記録のアンサンブル平均を行った。図 11a ~ 11d に、a)~d) でのアンサンブル平均後の流速ベクトル-風圧係数分布を示す。図 7 同様に濃淡で渦度を示し、さらに同符号の渦度分

布を実線で囲った。符号は渦度の符号を示している。アンサンブル平均後の両側面の風圧係数は、表 5 の最下段に示している。

図 11a より、L 面の負圧が強いときには L 面側からの剥離せん断層が背面直近で巻き込み、背圧も L 面から R 面に向かうにしたがって圧力回復している。このとき R 面側からの剥離せん断層は L 面側からの剥離せん断層を取り囲むように現れている。図 11b には、R 面の負圧が強いときを示したが、図 11a とは左右逆転して同様の結果となっている。

X 軸上で見た、図 11a, 図 11b の流速ベクトルの V 成分の値を図 12 に示す。同様に、図 11c, 図 11d の流速ベクトルの U 成分の値を図 13 に示す。図 12 では $X/D=2\sim3$ にかけての広い範囲で、a) では負方向、b) では正方向に強い流れが生じている。 $X/D=3\sim3.5$ 前後で V の符号が逆転し、 $X/D=3.5\sim4$ にかけては再び絶対値が大きくなっていることから、この図からも後流域で交替的な渦が現れていることが解る。

図 11c では L 面, R 面とも負圧が強いが、このとき両側からの剥離せん断層は背面からあまり離れていないところで勢力が拮抗している。このとき $C_b=0.86$ となっている。図 13 の c) より後方淀み点は $X/D=2.5$ である。図 11d は L 面, R 面とも負圧が弱いときを示している。両側から剥離したせん断層が背面近傍に回り込まずに後流域が長くなっている。模型背面付近の渦度の絶対値は小さく、 $C_b=0.62$ である。このときの後方淀み点は、図 13 の d) より $X/D=4$ 付近である。

図 11c, 図 11d は共に左右対称に近い剥離せん断層の様子である。図 11c は、図 10 の c) からカルマン渦が交互に形成される間の状態で

図 18a V 成分と揚力の相関係数 (角柱)

図 18b V 成分と揚力の相関係数 (隅切)

図 18c V 成分と揚力の相関係数 (円柱)

図 19 相関係数の周期と St 数の逆数の関係

図 20 後方淀み点と相関係数 0 の点の位置関係

図 21 V 成分変動係数と変動揚力係数の関係

1. ある点ある時刻の流速ベクトルを z とすると、 z の X 軸からの偏角 θ 方向の大きさ $|z_{(\theta)}|$ は、 $|z_{(\theta)}| = |z| \cos(\arg(z) - \theta)$ となる。
2. $|z_{(\theta)}|$ と揚力係数 C_L の相関 $\rho_{(\theta)}$ を計算し、 $\rho_{(\theta)}$ の正の最大値 r とそのときの θ を求める。
3. 長さ r 、偏角 θ のベクトルを描く。ただし $\theta = 0, 5, 10, \dots, 355 \text{ deg}$ である (図 23)。

図 22 揚力と正の相関が最も強くなる方向の求め方

図 23 揚力と正の相関が最も強くなる方向

あると考えることができる。しかし、溝田ら²⁾が示した二次元角柱まわりの非常流線図では位相角 30° に近似している。一方図 11d は、溝田ら²⁾の示したカルマン渦の変動過程に現れていない。これは図 10 の d) から明らかなように、明瞭なカルマン渦が形成されていない状態と考えられる。野津ら³³⁾は $Re = 3 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$ の範囲で行った三次元角柱の流体計算によって、アスペクト比が大きく Re 数が大きいほど、角柱上面の自由端から剥離した流れが角柱背面に近づくように下降する強いダウンウォッシュが発生し、それによって角柱の背面に近い上層ではカルマン渦が破壊されるとしている。二次元柱においても、西村³⁴⁾は揚力変動に不規則なビート現象が存在することを示している。このようなダウンウォッシュやビート現象によって、カルマン渦の不明瞭な状態が存在すると考えられる。

図 7a, 図 11c, 図 11d から、後方淀み点と背圧係数、抗力係数の関係を図 14 に示す。後方淀み点が背面に近くなるにつれ、背面の負圧が強くなり、抗力も大きくなっている。参考までに、溝田ら¹⁾による二次元角柱の結果も示すが、同じ時間平均を比較しても、その値は大きく異なっている。

3.4 流れと空気力の相関

1) 相関係数の分布

流れと空気力の関係を調べるために、流速ベクトルと風力係数(風圧係数)の相関係数を求めた。PIV の全測定点 1280 点について、流速ベクトルの U 成分、 V 成分、絶対値 R と、風力係数の抗力 C_D 、揚力 C_L 、背圧 C_b の、計 9 つの相関係数 ρ を求めた。相関を求めた

データ数は、流れと風圧の同時刻の記録数分であるので、表 4 の通りである。このデータ数の範囲で一定の傾向が得られたため、検討を加える。

図 15 に相関係数の絶対値の平均値 $\text{avg}|\rho|$ と相関係数の標準偏差 $\text{rms}\rho$ を示す。図中、同一の 6 つの印は、それぞれ 6 ケースの実験を示している。また横軸上と縦軸上にあるプロットは、6 ケースの実験の平均値を示している。 V 成分-揚力の相関は、6 ケースの平均で、 $\text{avg}|\rho|$ 、 $\text{rms}\rho$ とも 9 つの相関の中で卓越して大きい値を示している。これは V 成分-揚力の相関が強く、また相関係数の値が空間的に大きく変動していることを示している。一方同じ V 成分でも、背圧や抗力との相関は非常に弱い。 V 成分-揚力の相関の次に $\text{avg}|\rho|$ が大きいのは、 U 成分-抗力や絶対値 R -抗力であるが、これは風が強い瞬間には風方向の力が強いことを示している。 $\text{rms}\rho$ が 2 番目に大きいのは U 成分-揚力の相関で、この関係も相関係数の空間変動が大きいことが判る。実験ケースごとの比較では、揚力に関係する値は $\text{avg}|\rho|$ 、 $\text{rms}\rho$ とも角柱一様流の値が卓越して大きい。これは剥離点や気流の性状から、カルマン渦が形成されやすい条件が重なっているためと考えられる。そこで実験結果を明確に捉えやすい角柱一様流について、空間変動が大きいとの結果が得られた U 成分-揚力と V 成分-揚力の、相関係数の空間的な分布を示す。

2) U 成分と揚力の相関

図 16 に角柱一様流における流速ベクトルの U 成分と揚力の相関係数分布を示す。模型の後縁付近に強い相関があり、その後方には

後縁付近とは逆符号の相関の強い領域がある。正方向揚力の大きい図 11a と比較してみると（図 11a は表 5 の a）列で示したような、 C_{sL} の負圧が強い 5 記録から成るが、 C_L が大きい 5 記録を抽出しても同一の 5 記録であったため、ここでは揚力が大きい記録として扱う）、L 面側の後縁では U 成分が大きく、R 面側の後縁では、U 成分の絶対値が小さいか逆符号が見られる。またそれら後方の、相関係数の符号が逆転する領域においても、図 11a の流速ベクトル分布と対応していることが確認できる。

3) V 成分と揚力の相関

図 17 に角柱一様流における流速ベクトルの V 成分と揚力の相関係数分布を示す。濃い縦縞が現れており、V 成分と揚力の間には、一見して強い相関があることが判る。V 成分と揚力の相関は、背面に最も近いところに小さな正の相関を持つ領域があり、後方に行くに従い負の相関が強い領域、さらに正の相関が強い領域と、正負の相関の強い領域が交互に存在している。図 12 の a) と比較すると、相関係数の絶対値が大きい領域では、その符号と等しい方向の V 成分の強い流れが確認できる。

角柱一様流以外の 5 ケースについても図 17 に相当する図を描き、X 軸上で見た V 成分と揚力の相関係数を図 18a~18c に示す。形状によって相関係数の大小はあるものの、いずれも正弦関数のような値を示している。相関係数の振幅は角柱が最も大きく、続いて円柱、隅切の順であり、角柱の隅を切ることによる剥離せん断層制御の効果が現れている。

相関係数が極値を取る位置から得られる波長（極小値と極大値の距離の 2 倍）と、 St 数の逆数の関係を図 19 に示す。それぞれの実験ケースがほぼ直線上に位置することから、後流の相関係数が極大または極小となる周期は、渦の放出周期と密接な関係があると考えられる。

相関係数が負から正に符号が変わる位置の X 座標と後方旋み点の X 座標の関係を図 20 に示す。ほぼ同じ位置となっていることから、平均的に U 成分が 0 となる後方旋み点においては、V 成分の揚力との相関も無相関に近いと言える。

図 15 で見たように、V 成分と揚力の相関は他の相関に比べて強い相関関係にあることから、その変動係数と変動揚力係数の相関も強くなっていると考えられる。図 21 に V 成分の変動係数 $m_V V/U_H$ と変動揚力係数 C_L' の関係を示す。ここで選択する V 成分の変動係数は、図 18a~18c に示した、X 軸上で揚力との相関が最も強い（負の相関係数が最大）点とした。それぞれの実験ケースはほぼ直線上に並び、揚力変動の大きさは後流域の V 成分の変動に関係が深いと考えられる。

4) 揚力との相関が最大となる方向

2), 3) では揚力との相関を U 成分、V 成分とで検討した。しかし例えば揚力との相関が、U 成分は正の相関が強く V 成分は負の相関が強い点がある点とすると、この点で最も強い相関を持つ方向は X 軸正方向と Y 軸負方向の間の方向にあると考えられる。そこで図 22 のような方法を用いて、各測定点における揚力との正の相関が最も強くなる方向 θ と、そのときの相関係数 r を求めた。図 23 はこの r 、 θ を用いて、長さ r 、偏角 θ のベクトルを描いた図を示している。また相関係数 r は色の濃淡でも示した。この図は、ベクトルの向きを反転させれば、揚力と負の相関が最も強い方向を表すことになる。

図 23 から、 $X/D=3.0$ 、 $Y/D=0$ の後方旋み点付近は、流れのどの方向成分とも無相関に近いと言える。後方旋み点を中心に、同心円上に相関が強くなる。図 17 と同様に、 $X/D=1.0\sim 1.6$ 、 $Y/D=0$ 付近では相関が弱く、 $X/D=1.8\sim 2.5$ 、 $Y/D=0$ 付近で揚力と反対方向の V 成分との相関が強い。また角柱の側面後方に当たる $X/D=0.9\sim 1.8$ 、 $Y/D=\pm 0.9\sim$ 周辺は後流域から外れ、流れの大部分を U 成分が占めるが、揚力との関係においては V 成分が大きく関係している。これらの領域のベクトルは揚力と逆方向を示している。

図 23 と共に図 11a を参照すると、L 面側の剥離せん断層が小さく背面直近で巻き込んでいることから、図 11a の L 面付近においては V 成分の値が小さい。R 面側は、巻き込んだ L 面側の剥離せん断層に押される形で剥離せん断層が離れ、その結果 V 成分の値が小さくなっている。この図 11a は正方向の揚力を生じていることから、剥離せん断層の側面からの距離が近い方向に揚力が生じることになる。

4. まとめ

PIV を用いた流れの測定と多点風圧測定装置を用いた風圧の測定を同時に行い、細長い三次元柱周りの流れとこの柱に作用する空気力の関係について述べた。

本研究で用いた、現在実用化されている PIV は、撮影時の光量やコンピュータの処理能力の点から、十分な大きさの撮影領域と時間分解能を確保することができないという欠点がある。また粒子画像の解析ができずに、エラーを出す点もある。しかし、可視化技術全般に言える測定領域の情報を同時に得られる点や、計測器の挿入に比べ流れを乱すことがない点、空間分解能が高いといった利点があり、応用範囲の広い技術と言える。本研究では、PIV を物体周りの流れの構造と空気力の関係の解明に応用した。以下に本研究により得られた知見を示す。

1. PIV のサンプリングでは、十分な数の瞬間流速ベクトルを重ね合わせることで、対称な平均流れの様子を捉えた。また平均渦度の分布より、物体の角が滑らかなほど後流幅が狭くなることを確認した。
2. 瞬間流れと瞬間風圧の同時刻の記録から、側面風圧に着目した条件抽出を行った。その結果、側面風圧の条件によって、剥離せん断層が交番的に巻き込んでいる様子や、左右対称の剥離せん断層の様子を捉えた。また後方旋み点が背面に近いほど、背面の負圧が強くなる傾向を確認した。
3. 流速ベクトルと風力係数の相関を求めた結果、流速ベクトルの V 成分と揚力の相関が最も強く、また相関係数の空間変動も最大であった。
4. 流速ベクトルの V 成分と揚力の相関係数は、後流域において空間的に正弦関数のような変動がある。この空間変動の周期は St 数の逆数と強い相関があり、渦放出に関連していると考えられる。
5. 変動揚力係数は、揚力との相関が強い点における流速ベクトルの V 成分の変動係数との相関が強い。また揚力との相関が最も弱い点は、後方旋み点にほぼ一致する。
6. 流れと揚力との関係においては、後流内はもちろん後流外においても、流速ベクトルの V 成分の関わりが大きく、剥離せん断層が近い方の側面の方向に揚力が生じる。

本研究は、筑波建築研究機関協議会(BRIC)の「数値シミュレーション技術を応用した建築物の耐風性能設計」に関する共同研究によるものである。

謝辞

本研究を行うにあたり、財団法人つくば科学万博記念財団より補助金の交付を受けました。ここに感謝の意を表します。また査読委員には非常に有益なご意見をいただきました。最後に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 溝田武人, 岡島厚: 角柱まわりの時間平均流れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第312号, pp.39-47, 1981.8
- 2) 溝田武人, 岡島厚: 角柱まわりの非定常流れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第312号, pp.49-57, 1981.8
- 3) 田村哲郎, 伊藤嘉晃: 角柱まわりの流れと空力特性の辺長比による変化, 日本建築学会構造系論文集, 第486号, pp.153-162, 1996.8
- 4) 西村宏昭, 谷池義人: 2次元静止円柱に作用する変動風圧性状, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.269-274, 1998.12
- 5) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元長方形角柱の変動風圧特性, 日本建築学会構造系論文集, 第533号, pp.37-43, 2000.7
- 6) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元静止正方形角柱の変動空気力特性, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp.255-260, 2000.11
- 7) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元長方形角柱の変動風圧特性, 日本建築学会構造系論文集, 第538号, pp.49-55, 2000.12
- 8) 野田博, 中山昭彦: 一様流中ならびに一様乱流中における角柱の風圧特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第668号, I-54, pp.117-130, 2001.1
- 9) 田村哲郎, 宮城哲矢: 正方形角柱の空力特性に与える隅角部形状効果の物理機構に関する系統的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.51-58, 1998.12
- 10) 田村哲郎, 宮城哲矢: 正方形角柱の隅角部形状に基づく空力低減機構に関する研究—風圧力特性による研究—, 日本建築学会構造系論文集, 第521号, pp.17-24, 1999.7
- 11) 岡島厚: 種々な断面辺長比の矩形断面柱周りの流れ, 日本風工学会誌, 第17号, pp.1-19, 1983.9
- 12) 西村宏昭, 谷池義人: 2次元静止円柱の変動風力発生機構, 日本風工学会誌, No.74, pp.47-58, 1998.1
- 13) 谷池義人, 奥田泰雄: 3次元角柱周りの渦構造(その1)渦放出の強さ, 第11回風工学シンポジウム論文集, pp.119-124, 1990.12
- 14) 奥田泰雄, 谷池義人: 3次元角柱周りの渦構造(その2)側面上に形成される渦, 第11回風工学シンポジウム論文集, pp.125-130, 1990.12
- 15) 奥田泰雄, 谷池義人: 3次元角柱側面上に形成される逆円錐状渦, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.167-172, 1992.12
- 16) Okuda, Y. and Taniike, Y.: Flow Visualization Around a Three Dimensional Square Prism, 日本風工学会誌, 第37号, pp.25-132, 1988.10
- 17) 河村進一, 久保喜延, 山口栄輝: 前縁隅角部に曲率を有する断面の空力特性に関する風洞実験および数値流体解析, 土木学会論文集, 第619号 I-47, pp.67-74, 1999.4
- 18) 小林敏雄, 岡本孝司, 佐賀徹雄: Particle Image Velocimetry の展開, 可視化情報, Vol.20, No.77, pp.1-6, 2000.4
- 19) 可視化情報学会: PIV ハンドブック, 森北出版, 2002.7
- 20) 平工良三, 鈴木敏夫: 高速度ビデオカメラを用いた連続画像データ処理による三次元流速測定法の開発, 可視化情報, Vol.19, Suppl.No.2, pp.149-152, 1999
- 21) 西野耕一: 3次元PIVの実用化に向けて, 可視化情報, Vol.20, No.77, pp.7-13, 2000.4
- 22) M.ラッフェル, C.E.ヴィラート, J.コンペンハンス: PIVの基礎と応用—粒子画像流速測定法—, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000.6
- 23) 大橋征幹, 登柳正夫, 佐々木康人, 伊藤真二, 吉村直樹, 長井信夫, 渡壁守正, 奥田泰雄, 岡田恒: 塔状構造物周りの平均流れ(その2)PIVによる実験と数値計算の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.111-112, 2001.9
- 24) 奥田泰雄, 大橋征幹, 佐々木康人, 伊藤真二, 松山哲雄: 物体まわりの流れと風圧の同時計測—PIVと多点同時計測, 京都大学防災研究所研究集会, 最新の風洞実験法に関する比較研究, pp.35-36, 2001.12
- 25) 喜々津仁密, 奥田泰雄, 伊藤真二, 大橋征幹, 佐々木康人, 松山哲雄: 建築物周りの流れと建築物に作用する風圧との同時測定(その1)立方体, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.153-154, 2002.8
- 26) 吉川清峰, 奥田泰雄, 伊藤真二, 大橋征幹, 佐々木康人, 中村豊: 建築物周りの流れと建築物に作用する風圧との同時測定(その2)角柱, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.155-156, 2002.8
- 27) 伊藤真二, 奥田泰雄, 大橋征幹, 佐々木康人, 松山哲雄, 喜々津仁密: 立方体周りの流れと風圧の同時測定—屋根面の瞬間的な再付着について—, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.267-272, 2002.12
- 28) 吉川清峰, 奥田泰雄, 伊藤真二, 大橋征幹, 佐々木康人: アスペクト比の大きい柱周りの風直角方向の流れと揚力の相関, 日本風工学会誌, 第95号, pp.141-142, 2003.4
- 29) 吉川清峰, 奥田泰雄, 伊藤真二, 大橋征幹, 佐々木康人: アスペクト比の大きい柱周りの流れと空気力の相関, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, 2003.9(投稿中)
- 30) 田村幸雄: 構造基本断面の空力特性(その3)8.3次元円筒の空気力, 日本風工学会誌, 第39号, pp.36-47, 1989.4
- 31) 富岡清, 山下真佐美: 技1 DANTEC社のリアルタイムPIVシステム"FlowMap"を用いた測定の最適化と統計ベクトル処理, 可視化情報, Vol.18, Suppl.No.1, pp.233-236, 1998.7
- 32) Laneville, A., Gartshore, I. S. and Parkinson, G. V.: An explanation of some effects of turbulence on bluff bodies, Proc. Fourth International Conference on Wind Effects on Building and Structures, Heathrow, 1975
- 33) 野津剛, 田村哲郎: 高精度・保存的流体計算法の耐風問題への適用性について(その2)地面上の3次元角柱まわりの渦構造と空力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第503号, pp.37-43, 1998.1
- 34) 西村宏昭: Bluff Bodyの空力特性に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 2001.5

(2003年2月5日原稿受理, 2003年8月19日採用決定)