

# ビル風を利用した小型風車の運転性能について

第1報 ビル風の性状解析

## Small size wind turbine performance using city wind 1<sup>st</sup> rep. City wind analysis

小野寺 英輝<sup>1)</sup>, 甲地 悠<sup>2)</sup>, 川村 岳晴<sup>2)</sup>  
ONODERA H., KA-CHI Y., KAWAMURA T.

### 1. はじめに

近年、化石燃料の枯渇や環境問題の顕在化に伴い、風力エネルギーの活用が注目されている。現在主流となっている風力発電には、売電を目的とする大型風力発電施設と、独立型電源利用を目的とする小型風力発電設備の二つの利用形態がある。このうち小型風力発電設備は、ライフスポット整備の観点から近年、公共施設などでの導入例が増えている。

さて、都市空間では、建築物の配置条件により発生する強風域（ビル風）の問題があるが、一方で風車出力は風速の三乗に比例するので、この風の局所集中効果を利用できれば、出力は大幅に増加し、発電可能地点も拡大することが期待される。とはいえ、一般にビル風は風向風速の変動が激しく、風力発電には向かないとされて来たため、実測からビル風の平均的性状を調べる研究<sup>1)2)</sup>や高層建物屋上などでの風速計測の報告<sup>3)</sup>など、土木・建築工学的視点に立った調査研究は多数行われているものの、ビル風の微視的性状の解析とその活用の面からの研究はほとんど行われていない。

建物前面における風速変動に伴い、建物壁面上で高まった高圧力領域が解放され、低圧部へと流れ込めば、風向・風速変動の平滑化が図られ、地点によっては風向・風速の安定に繋がると考えられる。したがって、都市空間内での小型風車運転が注目されつつある今日、このようなビル風の利用方法研究も進めていくべきである。

本報では、第一段階として、建物周囲の風の性状を調査し数値計算結果と対照することで、ビル風を利用した小型風車の運転可能性について検討した結果を報告する。

### 2. 建築物周辺気流の観測

#### 2.1 水平方向の気流性状

本報では、岩手大学構内で最も高層である工学部7号館（7階建：最高部の地上高約30m）周辺を観測対象とした。周辺は北西方に中層の3号館、西側に幅約14mの道路を挟んで中層の2号館がある他は全体的に開けている。なお、7号館と隣接する2号館は連絡路を通して行き交うことができ、この連絡路は双方の建物3階を結んでいる。7号館は北側に高さ4m程度の機器室張り出し部、西側には2号館との連絡路があるほかは、ほぼ直方

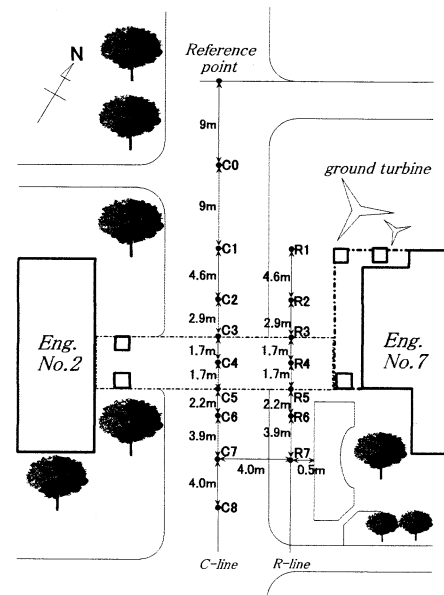


Fig.1 Observation points

体形状である。

図1に地上風の観測地点を示す。測定高さは車両等の影響を考慮し地上高2mとした。測定には小型のプロペラ型風速計を用い、10分間平均風速および最大瞬間風速を記録した。また、観測区間北端から北へ18m地点の風速を基準風速とし、地上高さ20mの風向を基準風向とする。風向は3秒ごとに計測し角度データとしてデータロガーに記録した。以下、岩手大学工学部付近における卓越風向（±22.5°の範囲で年間約35%）であり、最も多くのデータの得られた北西(NW)風についての観測結果について考察を行う。なお、測定装置の個数上の制限から全ての点を同時に計測することは出来なかったが、各点での計測を繰り返すことにより、考察に耐える確度と考えられるデータを得るように務めた。なお、各測定点のデータ数がばらついているのは、データ取得のローテーションと時間的制限によるものである。

表1(a)にC-line上、表1(b)にR-line上の実測結果を示す。計測は2005年10月～11月にかけての、風向が安定している日を選んで行なった。表の最右列は計測中風向がNW±45度以内であった割合を示している。表から明らかなように風向は80%以上がNW±45°以内に収まっており、十分に一定方向と見なせる。さて、この表から、

平成16年11月 第26回風力利用シンポジウムにて講演

1) 会員 岩手大学工学部

〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

2) 非会員 元岩手大学大学院生

Table.1 Measured data

(a) along the C-line

point	10 min. averaged wind speed(m/s)		Acceleration ratio	Wind direction NW±45deg.
	Reference point	Measuring point		
C0	2.7	2.8	1.04	0.96
	2.9	3.0	1.03	0.95
	2.1	2.3	1.10	0.80
	3.1	3.7	1.19	0.85
	2.5	3.1	1.24	0.92
C1	1.5	1.9	1.27	0.95
	2.0	2.7	1.35	0.93
	1.7	2.2	1.29	0.92
	2.3	2.9	1.26	0.98
	2.3	2.6	1.13	0.99
C2	2.6	2.4	0.92	0.87
	2.7	2.6	0.96	0.89
	3.5	3.5	1.00	0.96
C3	1.3	1.6	1.23	0.94
	2.2	2.6	1.18	0.91
	2.6	3.1	1.19	0.96
	2.3	2.9	1.26	0.98
	2.3	2.7	1.17	0.99
C4	2.1	2.5	1.19	0.98
	3.0	3.3	1.10	0.80
	3.0	4.1	1.37	0.85
	2.4	3.0	1.25	0.96
	2.2	2.8	1.27	0.88
C5	1.9	2.8	1.47	0.90
	2.3	3.4	1.48	0.81
	1.1	2.0	1.82	0.89
	1.2	1.8	1.50	0.93
	1.6	2.1	1.31	0.83
C6	1.4	2.2	1.57	0.96
	1.1	2.1	1.91	0.94
	2.6	3.1	1.19	0.97
	2.7	3.3	1.22	0.99
	3.3	4.2	1.27	0.95
C7	2.6	3.6	1.38	0.86
	2.7	3.7	1.37	0.90
	1.1	2.1	1.91	0.89
	1.2	1.8	1.50	0.93
	1.6	2.0	1.25	0.83
C8	1.4	2.2	1.57	0.96
	1.1	2.1	1.91	0.94
	2.6	3.2	1.23	0.97
	2.7	3.3	1.22	0.99
	3.3	4.3	1.30	0.95
C9	1.9	1.7	0.89	0.94
	1.0	1.1	1.10	0.86
	1.7	2.0	1.18	0.80
	2.2	2.9	1.32	0.91
C10	2.6	3.3	1.27	0.96
	2.7	3.8	1.41	0.87
	3.2	4.4	1.38	0.85
	1.6	1.9	1.19	0.83

(b) along the R-line

point	10 min. averaged wind speed		Acceleration ratio	Wind direction NW±45deg.
	Reference point	Measuring point		
R1	2.3	3.4	1.48	0.98
	2.3	3.4	1.48	0.99
	2.1	3.0	1.43	0.98
R2	1.9	1.7	0.89	1.00
	2.2	2.0	0.91	0.97
	1.3	1.1	0.85	0.94
	2.9	2.7	0.93	0.89
R3	2.8	2.6	0.93	0.99
	1.9	1.8	0.95	1.00
	2.2	2.1	0.95	0.97
	1.5	1.5	1.00	0.94
	1.5	1.3	0.87	0.95
	1.3	1.5	1.15	0.99
	1.3	0.9	0.69	0.94
	3.0	2.1	0.70	0.93
	3.1	2.9	0.94	0.88
	2.5	2.3	0.92	0.95
R4	3.5	2.4	0.69	0.96
	2.5	2.1	0.84	0.89
	2.1	1.7	0.81	1.00
	3.4	3.5	1.03	0.96
	2.7	2.7	1.00	0.89
R5	3.4	3.5	1.03	0.93
	1.9	1.5	0.79	1.00
	2.2	2.0	0.91	0.97
	1.4	1.2	0.86	0.85
	1.5	1.4	0.93	0.94
	1.5	1.0	0.67	0.95
	1.3	1.1	0.85	0.99
	3.0	2.1	0.70	0.93
	3.1	2.4	0.77	0.88
	2.6	2.6	1.00	0.97
R6	2.7	2.5	0.93	0.99
	3.3	2.9	0.88	0.95
	2.5	2.6	1.04	0.95
	3.5	3.0	0.86	0.96
	2.5	2.8	1.12	0.99
	1.5	1.6	1.07	0.94
	1.5	1.2	0.80	0.95
R7	1.3	1.2	0.92	0.99
	3.0	2.2	0.73	0.93
	3.1	2.4	0.77	0.88
	2.5	2.8	1.12	0.95
	3.5	3.4	0.97	0.96
	2.5	3.1	1.24	0.89
	1.7	2.0	1.18	0.82
R8	1.7	2.2	1.29	0.88
	1.4	2.5	1.79	0.94
	2.9	3.0	1.03	0.98
	2.8	2.9	1.04	0.99

測定点 C1 と R1 に関しては基準点と比べた増速率がそれぞれ 1.19~1.35, 1.43~1.48 と比較的風速が増加しており, 更に C-line に沿って増速率の高い位置が分布しており, R-line 上では流入あるいは流出部の R1 及び R7 以外の測定点では若干の風速の減速傾向が見られる. この原因は 7 号館北側壁面に衝突した風が壁面に沿って流れ, 建物角部分で剥離し, 測定点 C1 と R1 に到達し, もとの気流と合流するためと考えられるが, 具体的な流れの考察は後述の CFD の結果をもとに行うこととする.

## 2.2 鉛直方向の気流性状

次に, この 7 号館北側壁面に衝突した風の性状を調べるため, 図 2 に示す 7 号館北側壁面からそれぞれ 1m, 2m, 3m 離れた地上高さ 1.05m~24.7m の各点で風速の

変化に関する観測を行った. 計測は 2005 年 12 月 10 日及び 11 日に各位置個別に行った. 装置の関係で同時刻に全ての観測を行うことは出来なかったが, 各位置と基準位置の風速変動の傾向比較と言う観点からは有効なデータと考えることが出来よう. 観測には, 三杯型風向風速計を用い, 10 分間の時系列風速を記録した. 基準点は前述の場合と同じ地点とし, 同じく 10 分間の時系列風速を記録した.

図 3 に基準点と測定点⑥の壁面から 3m 離れた地点で計測した時系列風速の一例を示す. 7 号館北側壁面に作用する風速は, ピーク値は低いものの基準点での風速に比べ変動幅が小さくなっていることがわかる. この傾向は他の測定地点でも同様であった (末尾の付録参考図参照). この測定値を FFT により周波数解析したものを図

4 に示す。基準点のデータに比してパワーレベルが一部に集中しており、特に 0.05～0.1Hz の周波数域で大きな減少傾向が見られ、基準点のものに比べ、長周期成分が増加するとともに、その分布範囲も狭くなっていることが裏付けられた。

この風速変動幅の減少には、建物前面でせき止められた風により壁面近傍の圧力が上昇して高圧部を形成し、風が弱まった場合に低圧部となった地上付近や建物角部へ解放されて、風速が平均化されたものではないかと考えられるが、詳しい考察は CFD の結果を用いて 4.1 項において行うこととする。さて、風速自体は屋上と比べると壁面効果のため風速自体は減少しているが、より高層の建物の上層部や、吹き下ろし風が有効に利用できる地点であれば増速の可能性も十分にある。図 5 に、建物に当たった風の挙動を模式的に示す。風は上下・左右方向のそれぞれよどみ線を境にして二方向に分かれるほか、下側へ向かう流れは左右方向への流れと建物角部で合流し、強風域を形成することになる。図 2 ①～⑦の測定点は図 5 に示す合流点(flow merging)に相当し、図 3・4 及び参考図に示す観測結果から、建築物周辺に形成される強風域、特に建物角部分近傍では風速が上昇する一方、風速変動が少なくなるという傾向が確認されたことになる。今回の計測では、孤立建物への風の衝突のみによる風速変動について調べたが、ビルとビルとの間の空間への流入等のある都市空間内では更に増速が図られることにもなるので、十分に高風速の場所で風速変動が少なくなることも考えられることから、このような状況の調査も今後の課題であると言える。

3. 建築物周辺の気流解析

前節では、建築物周辺で形成される強風域では風速変動が小さい領域が存在することを観測結果から示したが、刻々変化する自然風の限られた観測からは、壁面近傍の流れの全体的傾向については十分に把握できない。そこで、風向を含め建築物周辺に形成される流れ場の構造を知るために、数値計算を用いて観測対象区域の詳細な解析を行う。

Table 2 Basic equations

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \langle p \rangle + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu + \nu_t \right) \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu + \nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - C_k \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu + \nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

3.1 数値解法

二次元の基礎方程式を表 2 の(1)～(3)に示す。この式を不等間隔の直角スタッガード格子を用い、SIMPLE 法により解いた。離散化は計算格子上にコントロール・ボリュームをとり、有限体積法で行い、運動方程式の対流項と拡散項に HYBRID 法を、その他全ての項には二次の中心差分を用いた。乱流モデルには Launder - Spalding

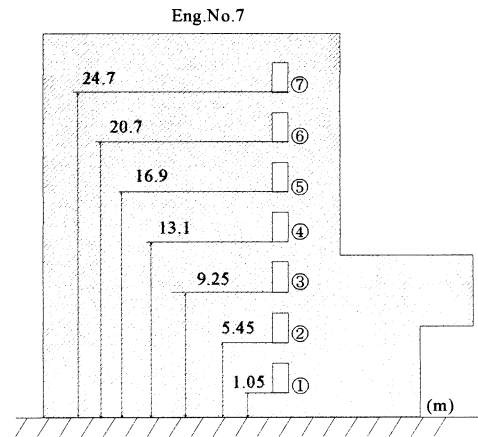


Fig.2 Measuring points along the Eng.No.7

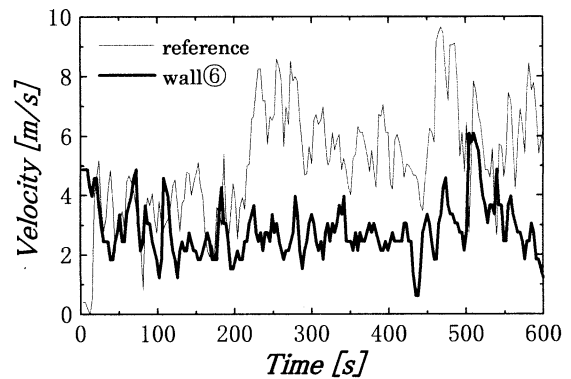


Fig.3 Wind velocity of the two points

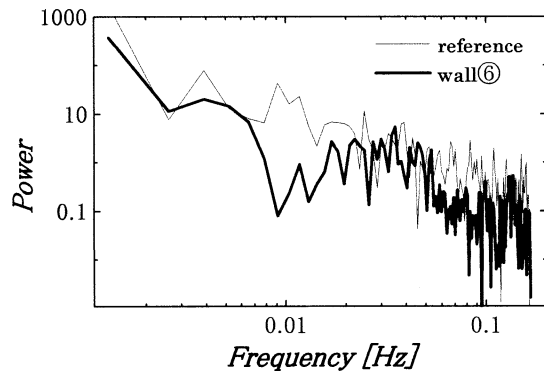


Fig.4 Power spectrum of the two points

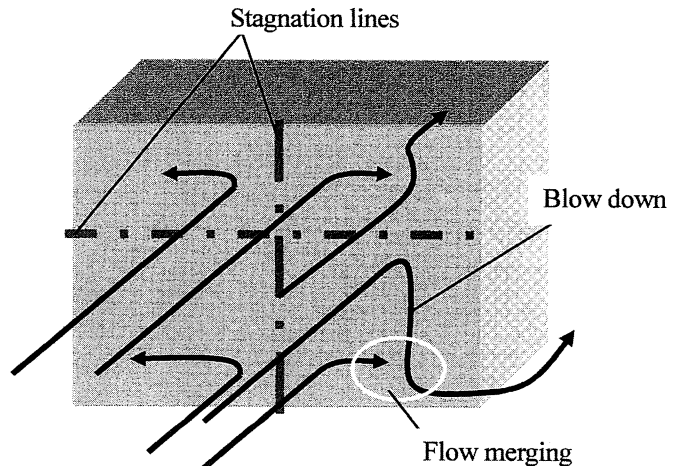


Fig.5 Schematic of several kinds of wind around a building

の標準  $k-\epsilon$  モデルを採用した。

本報ではまず、流入境界条件に定常流れを用いて、結果の正当性の評価を行い、次いで自然風を模擬するため主流方向速度成分にランダムな変動を与えて解析を行う。境界条件は、上方、側方、出口の各境界ではゼロ勾配条件、壁面および地表には速度成分に  $1/7$  乗則、乱流エネルギーにゼロ勾配条件、散逸率には壁関数を用いた。

### 3.2 数値計算結果と風速実測値の比較

まず、数値計算結果の妥当性を検証するため、定常流れの条件で、前項に示した2号館と7号館の間で行った風速測定結果と比較を行う。図6に C-line 上、図7に R-line 上の CFD 結果と実測結果を比較したものを示す。計測結果は平均風速比を点で示し、細直線は計測データのばらつきの範囲を表している。これらの図より、実際の流れ場では吹き下ろしなどの流れの強い三次元性の影響を受ける  $X=-0.6$  付近の点を除けば、数値計算結果は実験値と定性的に一致しており、ビル風の性質を数值的に解析するのに足るレベルの精度を有すると言えることができる。

### 4 変動風の流入条件

さて、ここまでの数値計算では、流入境界条件として定常風を与えているため、前項で明らかにした風速変動幅の減少傾向について、確認することができない。そこで、変動する自然風を何らかの形で模擬する必要がある。

この項では、非常常の流入境界条件を導入し、建物周りの風向風速変動について調べる。以下、発生させた乱数に対してワイブル関数を用いた逆関数法により盛岡における自然風の速度域(velocity bin)ごとの発生頻度を模擬し、これを主流方向速度成分として用いることで、擬似的に自然風を模擬した流入境界条件を与え、その結果をもとに考察を行う。

#### 4.1 風速変動と渦の発生

流入境界として変動風を与えた結果を図8および9に示す。図8は風速が大きくなって行く場合の風速ベクトル図である。流入境界での速度の増大に伴い、壁面に衝突する風の速度も大きくなる(図中円内)ため壁面前面部の圧力が上昇する。一方で、図9に示すように、流入境界での速度が小さくなって行く時には、壁面上の高圧部の空気塊は周囲に存在する低圧部との圧力差を解消するために低圧部へ流出する(図中A円内)ので、結果として建物から離れた位置に大きな渦(図中B点線)が形成されていることが分かる。

渦の影響が大きい地点(例えば図中Cの領域)は、風速変動だけでなく風向変動も激しくなるため、風力発電装置を設置するには適さないことになる。特に中高層の建物が多い都市空間内では、建物周りで風力発電を行う際には、この風速と風向の安定性を考慮しなければならない。

以上の CFD の結果より、変動する風速がビル壁面での蓄圧効果により風速変動幅を減ずる(風速の平均化)という効果が確認されたが、このことは、他のビルであっても壁面近傍には風速の安定領域が存在すること示唆し

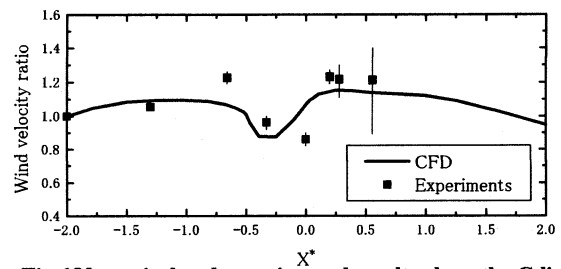


Fig.6 Numerical and experimental results along the C-line

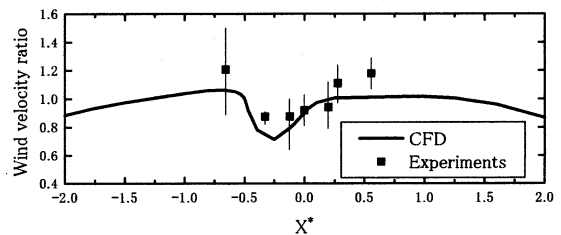


Fig.7 Numerical and experimental results along the R-line

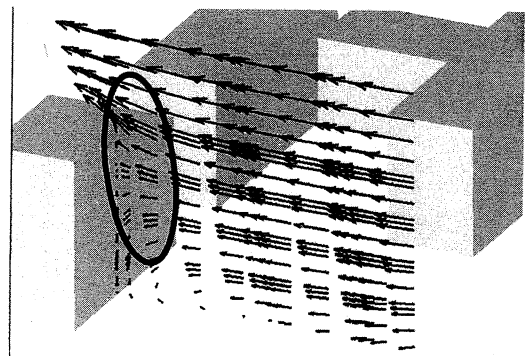


Fig.8 Velocity vectors (high wind velocity)

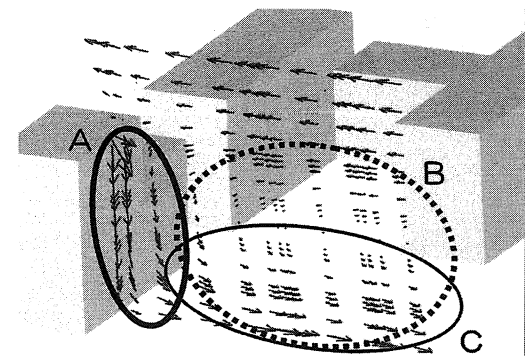


Fig.9 Velocity vectors (changed to low velocity)

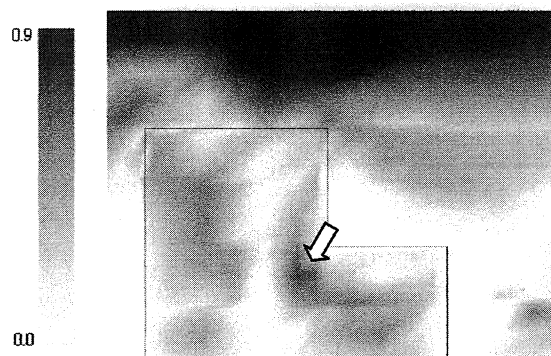


Fig.10 Rate of prevailing wind

ている。

#### 4.2 発電に適する地点の推定

このように建物から少し離れた場所には風速変動に伴う渦（逆流領域）が出現する。しかし、前述した観測結果の通り、建築物周辺に形成される強風域の中には、風向風速変動が大きい場所と共に小さい場所も存在する事がわかっている。そこで、次に風車運転にとって好ましい風向および風速変動の少ない場所の存在に関し、数値解析の結果から検討を行う。

図10に風向の安定性を評価するために、数値解析結果から得られた建物壁面近傍の主風向出現頻度を示す。風向は、水平方向の速度成分により16方位に分類した。濃色になる程、風向が安定していることを意味する。

建物の壁面前面のよどみ線（破線）と建物角部の間に、明確にある一定風向の出現頻度が高い領域（矢印）が存在していることがわかる。この場所では風速が大きい時は、よどみ線から建物角部へと向かう流れが生じ、風速が小さくなったときは高圧力領域であるよどみ線の圧力が解放され低圧力領域である建物角部へと風が流れ込むので、風向が安定することになるわけである。

図11に建物前面に対して吹いていた風が弱まってく場合の風速ベクトル図を示す。図3でも示したように、実測により風速変動が少ないという結果を得た建物角部では、風速が大きい場合、よどみ線から分岐した風と、吹き降ろしの風が地面付近で合流することで強い風となって、建物角部へ向かう流れが生じているが、この図の状況のように、風速が小さくなると、上流側が低圧力領域となり、吹き降ろし風が地面付近で分岐した後、上流側にも流出するため、結果として建物壁面の中央部に上流側へ向かう逆流領域を形成する（図11太矢印）。そのため、建物角部に向かう流れは、吹き降ろし風が相対的に弱くなるため、風速は低下するものの安定性は向上する。また、風向に関しては、風速が大きい場合、連絡路下部へ向かう流れが生じるが、風速が小さくなると連絡路下部よりも上流側が低圧になるため、高圧域から解放された圧力に起因する風が各方向に向かうことにより、風向変動が大きくなることが分かった。

次に、乱れ強さ（平均風速と標準偏差の比）と風向の出現頻度との比をとることで、総合的に風向・風速が安定化する地点について評価する。図12は、乱れ強さの比と主風向の出現頻度の比の等分布線図である。濃色側が、風向風速が安定することを意味する。図より、よどみ線と建物角部の間（太矢印）は、風向だけでなく、風速も比較的安定しており、安定した風車の運転が期待できると考えられる。

#### 5. 小型風車運転試験

以上の結果を踏まえ、実際に小型風車を設置し、運転試験を行った。学内交通の都合で数値計算結果から得られた最適地点とは位置が若干異なるが、吹き降ろし風を利用した発電が可能である図1のR1より北へ3.5mの場所に風車を設置した。また、参照点を近隣の建物屋上（地上高16m）に取り、そこにも同形式の小型風車を設置した。図13は北風時に観測した20分間の出力電圧の一例

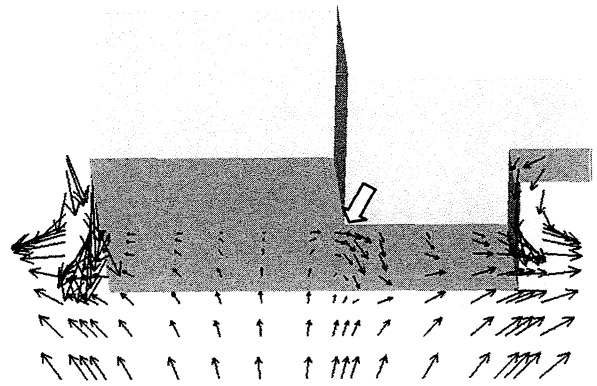


Fig.11 Velocity vectors at low wind velocity (10m from ground level)

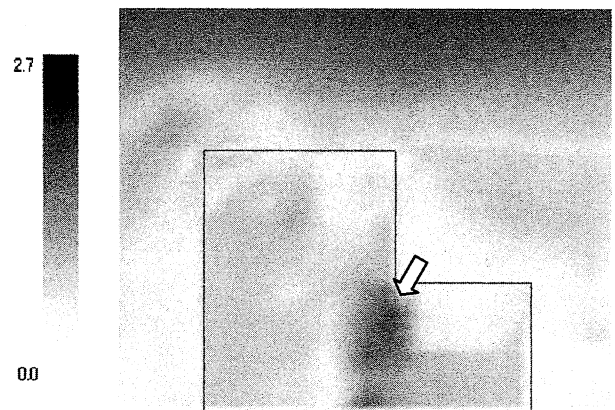


Fig.12 Ratio of turbulence intensity and rate of prevailing wind direction

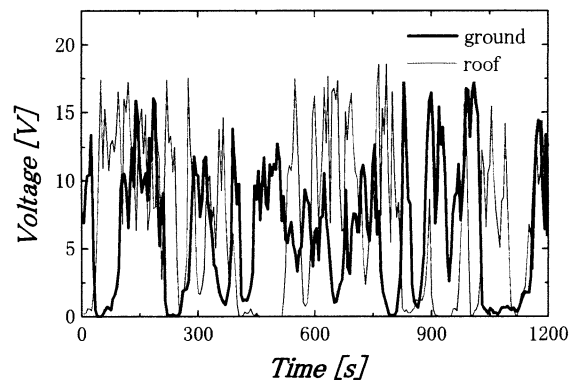


Fig.13 Time variation of the output voltage

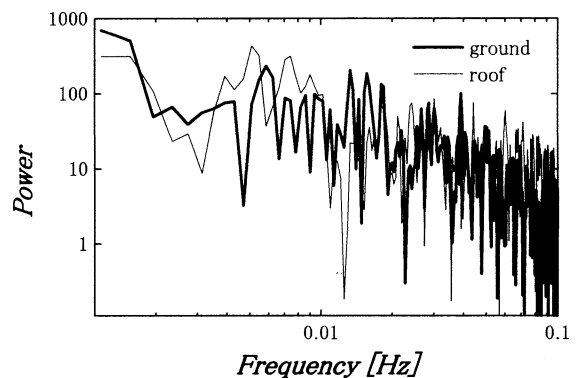


Fig.14 Power spectrum of the turbine outputs

であり、roofが屋上に設置した風車、groundが地上の強風域に設置した風車のデータを示す。groundの風車は地上高がわずか2mであるにもかかわらずroofと殆ど出力の最高値は変わらないことがわかる。また、乱高下するroofの出力に対してgroundの変動は平滑化され、少なくなっている。図14にこの結果のパワースペクトルを示す。地表では0.02Hzおよび0.1Hz付近の値が大きくなり、このほかの領域ではパワーレベルが減衰し、風速の場合とほぼ同様なパワースペクトルの分布傾向を見せている。

以上、実機運転結果から、建物からの吹き降ろし風を併せて利用することによる、より安定した発電の可能性が示された。更に、この位置では風向も建物に沿った向きを主風向として安定するので、風向追従機構が不要となり、シュラウド型<sup>4,5)</sup>などの風車を用いることで高効率の運転が期待できる。ここでは、実験装置設置上の制限から地上高2mでの実験結果の紹介に留まっているが、実際には吹き降ろしや風の合流を利用することができるような、より高所に風車を設置することによって、十分実用的に風速・風向が安定化したビル風を利用することが可能であると考えられる。

また、本報では、ひとつの建物のまわりでの特定風向の場合の風の性状について検討したが、他の建物であっても、上記の吹きおろしや風速・風向の安定に関する議論は同様に成立する。地域ごとの風配や建物の向き、建物の高さなどを総合的に考えれば、それぞれの建物に関して、発電量の増加を期待できる、風向や風速が安定する場所を特定する事が可能である。

6. おわりに

都市空間内での風力利用適地調査に関する基礎的研究として、建築物周辺に形成される強風域の特性の計測および数値解析を行ない、以下の結論を得た。

- (1) 建物周囲での自然風の変動に伴う風速を CFD により定性的に模擬できた。
- (2) 建築物の近傍には風の吹き下ろし等により風向風速ともに安定する領域が存在する。
- (3) 安定風向の特性を生かしシュラウド型等の風車により流れを更に集めて利用すれば、大幅な出力増加が期待される。

参考文献

- 1) 須田ほか2名, 風工学シンポジウム予稿集, (1986),79-84
- 2) 村上ほか4名, 日本建築学会論文報告集, No.314(1982), 112-120
- 3) 野々村ほか2名, 日本建築学会関東支部研究報告集(2000), 497-508
- 4) O.Igra, J.Energy, 4・4(1980),190-192
- 5) 大屋ら, 第23回風力エネルギー・利用シンポジウム講演集,4(2001)

付録 建物近傍の風速変化

図Aに工学部7号館から3m北側の位置における風速の時系列変化の様子を図2の②～⑦各測定点ごとに示す本文中でも述べた通り、屋上への吹き抜けの影響が大きい最上部の⑦の結果を除きいずれの高さにおいても基準

点に比して風速の変動が少ない事がわかる。従って、本文中で述べた通り、シュラウド型等の風車により増速を図ればこれらの点の周囲は風向の変動も少ないことから、変動による風車構造への負荷の少ない比較的安定した運転が可能ではないかと考えられる。

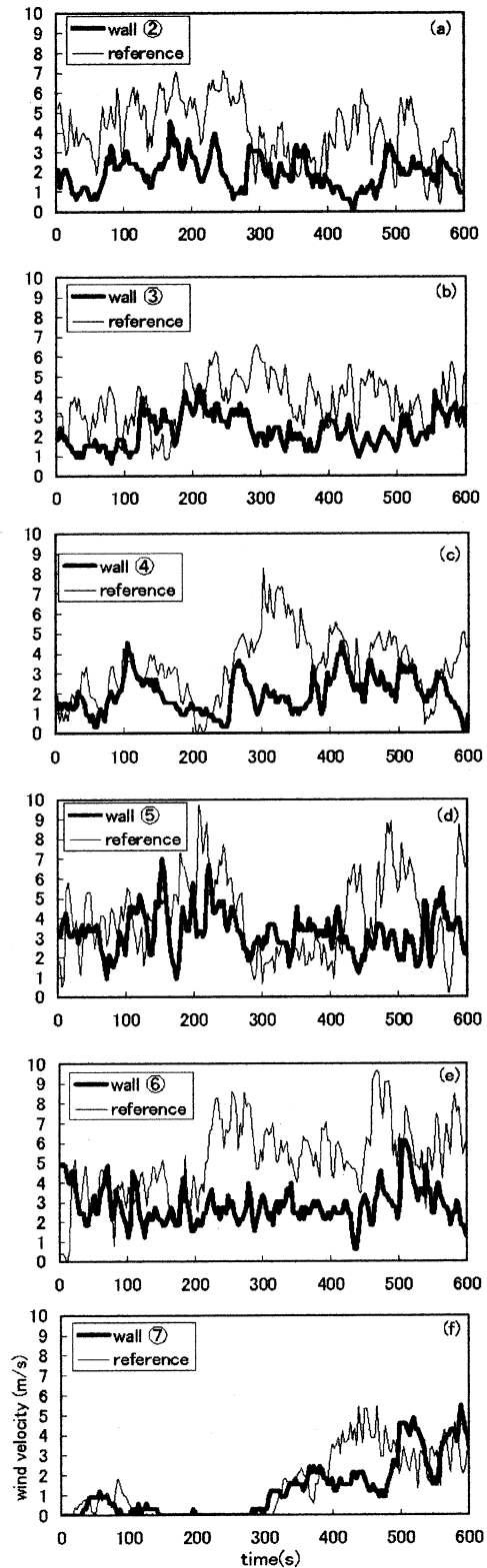


Fig. A Wind velocity profile (3m apart from build.No.7)