

ドップラーライダを用いた東京都心部の高高度風況の長期観測

佐々木 澄 野津 剛 酒井 佑樹
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Long-Term Observation of Wind Conditions at High Altitude over Central Tokyo Using Doppler Lidar

Kiyoshi Sasaki, Tsuyoshi Nozu and Yuki Sakai

本社屋上に設置したドップラーライダにより、本社上空の高高度の風況を長期間観測している。得られた観測データを整理し、大気安定度、周辺の高層建築物、風速レベルの違いが風況に与える影響について検討した。得られるデータ数は高度や季節、大気の状態によって偏りが見られ、特定の高度や冬季には少なくなっていることから、観測データだけで風況を統計的に把握することは困難であることが分かった。十分に取得できたと考えられるデータに基づき検討した結果、周辺の高層建築物の影響が大きく、風向によって高高度の風況が大きく異なることが分かった。

Long-term observation of wind conditions at high altitude over central Tokyo have been conducted using Doppler lidar. The measured data were used to examine the influence of varying atmospheric stability, nearby high-rise buildings and wind strength. Variations in data acquisition rate, i.e. decrease at some altitude and in winter due to atmospheric conditions were shown, and it is difficult to gain an understanding of these statistical characteristics of wind conditions using only measured data. Based on the reliable lidar data, wind conditions were found to differ greatly depending on wind direction and the influence of surrounding buildings.

1. はじめに

耐風設計や風環境評価等、都市の風況を予測・評価するために用いる基準風速として、日本建築学会荷重指針・同解説¹⁾に示されている、地表面の状態を考慮した地表面粗度区分別の鉛直分布が用いられることが一般的である。但し、2015年版では、「高さ 250 m 以上の高高度における風速は観測を行うなど慎重に検討すべき」という記載があり、高さ 300m 以上は図示されていない。地表付近の風況予測においては、従来の指針に従った手法を用いた鉛直分布に基づき予測・評価することは可能であるが、近年増加している超高層建築物の耐風設計の評価のためには、高高度の風況を把握することが必要となってくる。都市の上空風の観測例として、「大気境界層研究会」の活動により実施されたドップラーソーダを用いた都心部や神奈川県内での一連の観測^{例えば 2),3)}や、ドップラーライダによる東京 23 区の東部と東京都郊外での実施した例がある⁴⁾。近年でも都心部周辺での観測^{例えば 5),6)}や地方都市における観測⁷⁾も見ら

れ、都市上空風の風況の把握が進められている。本研究では、超高層建築物の耐風設計のための設計風速評価に向けた高高度の風況を把握することを目的とし、一部の方向に高さ 200m 前後の超高層建築物が建つ東京都心部の建物屋上にドップラーライダを設置し、長期間の観測を行った。本報では観測概要や観測地域において取得されたデータの特徴をまとめるとともに、上空の風況に影響を与えると思われる様々な要因について、風速の鉛直分布や上空での風向の変化を分析した結果についてまとめる。

2. 観測概要

東京都中央区京橋にある建物(北緯 35° 41'、東経 139° 46'、高さ 106.25m)の屋上にドップラーライダ(Leosphere社 WLS200S)を設置し観測した。設置した建物の周囲は、北～北西側の1km以内に東京駅八重洲側のツインタワーやその東側にある日本橋地区の高層建築物等、当該建物より高い建物が建ち、南側は1km以上離れた南東側に晴海の高

層マンション、南西側に汐留地区の高層ビル群等、東京湾沿岸部に高層建築物が林立している。

観測機器の主な仕様を表-1に示す。本機器はヘッド部を水平・鉛直方向に回転させビームを射出し、それぞれの方向の視線風速を計測する仕組みとなっている。観測は、仰角62°でレーザーを射出する、高さ方向に25m分解能・100高度（設置位置から50m～2,550m）のDBS（Doppler Beam Sharpening）モードで実施し、毎正時及び毎30分の前10分間のデータを取得している。DBSモードは、上空に設定した仰角で東西南北の4方向と真上への計5本のビームを約4～5秒間隔で逐次発射し、その直線状の視線風速から各成分の風速を算出している。水平方向風速は4方位の視線風速を用いて算出し、鉛直方向の視線風速から鉛直方向風速を算出している。データのサンプリング周期は測定器のヘッドの回転速度に依存するため4～5秒であり、1回の計測（10分間）で最大140個程度のデータを取得することができる。

観測は2017年5月に開始し、現在も継続中である。本報では2020年4月末までの約3年分のデータを整理した結果を示す。

3. 観測結果

データの高度については機器の設置高さを100mとし、地上からの高度で表記するものとする。結果は全データのうち地上から1,000mまでの結果を示

し、取り扱うデータについては10分間で取得可能なデータ数（最大140個程度）のうち、半分（70個）以上のデータが取得できた時刻、高度のみとしている。データの有効性については、大気の状態等の影響を受ける射出されたレーザーの反射強度に閾値を設けて判断している。また、風速の算出のためには5本全てのレーザー上の視線速度が必要となり、エアロゾル粒子の減少や降雨の影響等の理由により、ある方位角の1本のレーザー上の視線速度が取得できない場合、次にその方位角のデータが取得できるまでは風速のデータは無し、という扱いとなる。

風速は10分間平均した結果を示す。また、以下で示すデータ取得率とは、本報で扱う全観測期間の観測時刻（1時間に2回）のうち、上記の判定基準でデータが得られた時刻の割合を示すものである。

3.1 観測データ概要

データ取得率について、高度別を図-1に、高さ150m、300m、500mの月別の結果を図-2に示す。なお、地上から1,000mまでのいずれかの高度においてデータが取得できていたのは、全データ（52,080個）のうち約84%（43,746個）である。最低高度である150mでは75%程度であるが、高度が上がるにつれてデータ取得率が下がり、500mで60%程度、750mを超えると取得率は50%以下となっている。月別で見ると、春季～夏季、特に7、8月の低高度（150m）において取得率は高くなっている。一方、冬季、特に12月や1月は取得率が極端に低い。これは、冬季には

表-1 機器の仕様

計測範囲	データサンプリング時間	測定点数 (レーザー直線上)	測定分解能 [m]	計測範囲	風速の精度
0.1～6km (大気の状態に依存)	1～8秒 (選択可能)	100点	25/50/75 /100/200	風向：0～360° 風速：±55m/s	0.5m/s

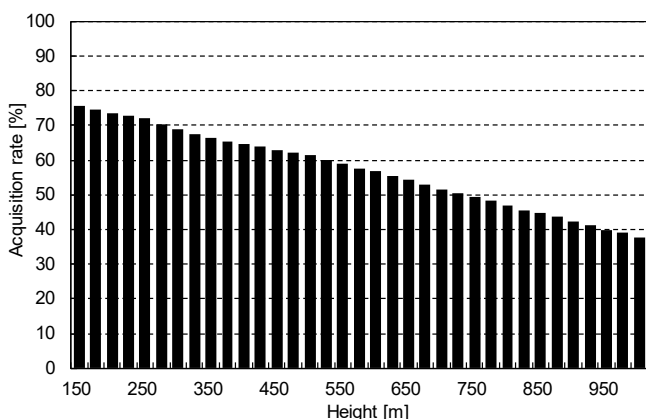


図-1 高度別データ取得率

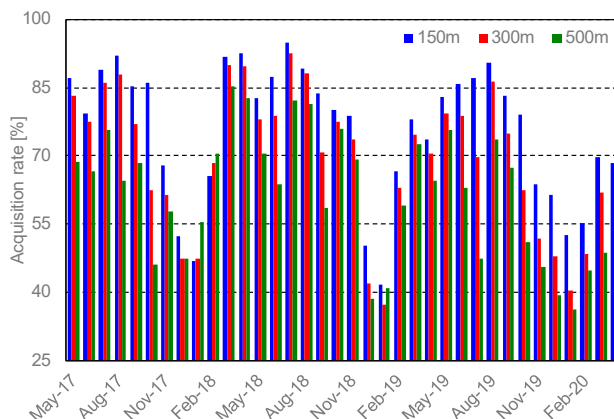


図-2 月別データ取得率（高さ150、300、500m）

空気が乾燥することでレーザーを反射させるエアロゾルの成長に必要な大気中の水蒸気が減ることや、エアロゾル量の低下等、様々な要因によりレーザーの反射強度が弱まることでデータが取得できなくなっていることが考えられる。同じく、データ取得を妨げるものとして降雨があるが、年によって異なるものの、梅雨や秋雨の時期に明確な取得率の減少傾向は見られない。また、高高度（500m）の方が低高度（150m）よりも取得率が高くなっている月も見られた。以上のように高度別、季節別に欠測となる高度等が異なり、データのばらつきが非常に大きいことから、上空における風況に関して観測データのみからワイブルパラメータ算出等の統計的に処理、検討することが難しいことが分かる。

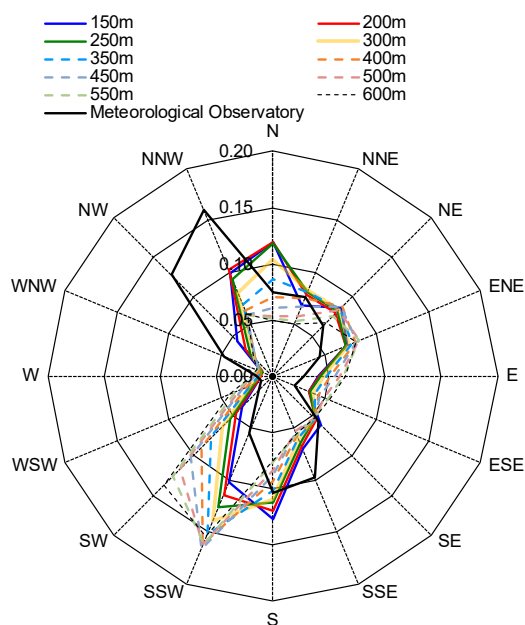


図-3 高度別風配図

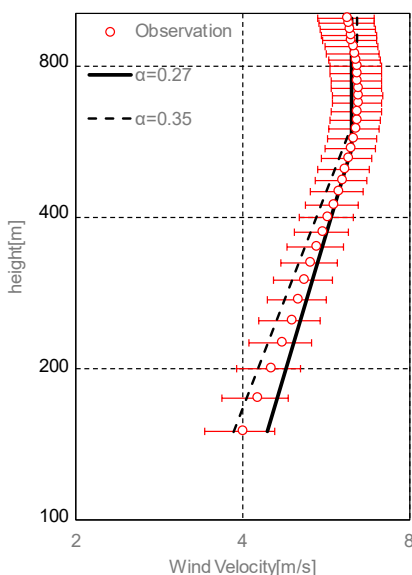


図-4 平均風速の鉛直分布

3.2 観測期間全体の風向・風速

期間全体の風配図を図-3に、風速の鉛直分布を図-4に、高度別の平均風速の累積頻度分布を図-5に示す。風配図には本観測と同じ時刻のみ(30分毎)のデータを抽出した東京管区气象台(東京都千代田区北の丸公園、高さ35.1m)の同期間の測定結果も併せて示す。風速の鉛直分布は両対数軸で書いており、プロットは平均風速、誤差範囲は標準偏差を示し、日本建築学会荷重指針・同解説¹⁾に示されているべき乗則に基づく風速の鉛直分布の上空風高度における風速を観測結果に合わせた地表面粗度区分IV(べき指数 α : $\alpha=0.27$)とV($\alpha=0.35$)の線も併せて示す。また、図-5には図-1で示した高度別取得率で、全期間のうち60%以上データが取得できていた150m~500mまで平均風速の風速頻度分布も併せて示している。

風配図(図-3)を見ると、冬におけるデータ取得率の低さから北寄りの風向頻度が東京管区气象台の測定結果と大きく異なり、特に高高度において南寄りの風向に比べて頻度が低くなっていること分かる。また、コリオリ力の影響と思われる、高度が上がるにつれて頻度が高くなる風向が右向きに曲がっている傾向が見られた。東京管区气象台の結果と同様、いずれの高度においても西からの風が吹いていないことが分かる。風速の鉛直分布(図-4)は、600m以下の高度では地表面粗度区分Vのグラフの傾き($\alpha=0.35$)とよく一致しており、高度600mを超えると風速が減速する傾向が見られた。また、対数軸表記のため分かりづらいが、高度が上がるにつれてデータのバラつきが大きくなっていた。累積頻度分布(図-5)を見ると、最も高い500mにお

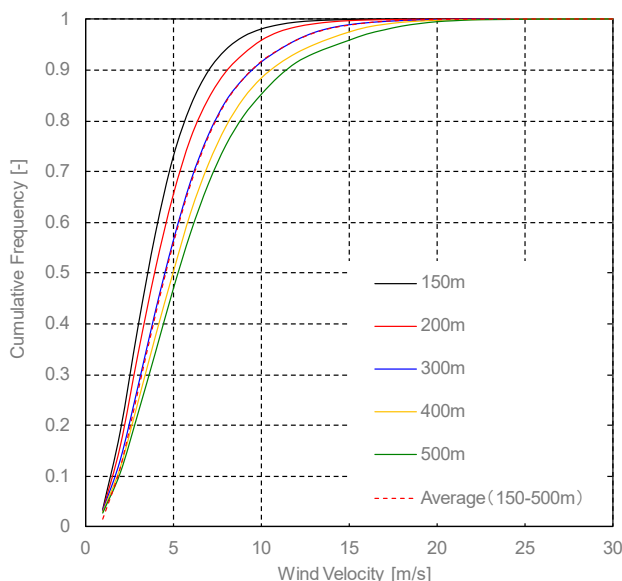


図-5 高度別平均風速の累積頻度分布

いては全データの90%以上が12m/s以下となっている。但し、全高度で25m/s以上の高風速が観測されていた。150m～500mまでの平均風速の累積頻度は、300mのものとはよく一致する結果となった。

4. 風況に影響を与える要因の分析

前章までは10分間の取得データ数に基づく判定条件を満たしたデータを全て使った結果を示したが、この中に特定の高度のみデータが取得できている時刻があることや、データ取得率の影響による季節差、種々の気象場等の影響が含まれていると考えられる。本節では観測結果に与えると思われる様々な要因に関して、観測データおよび公開されている各種データ

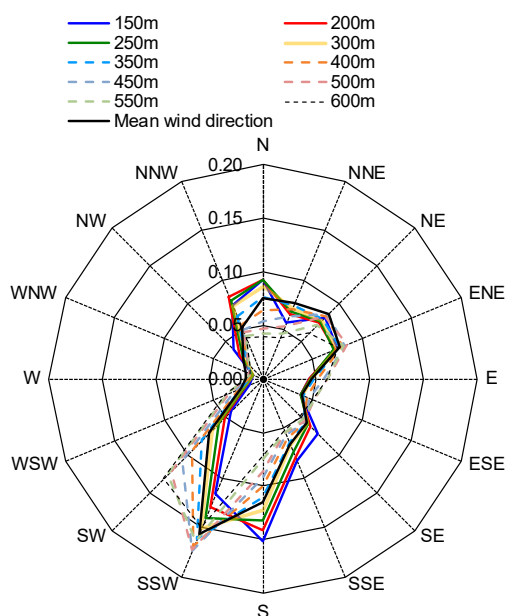


図-6 高度別風配図 (抽出)

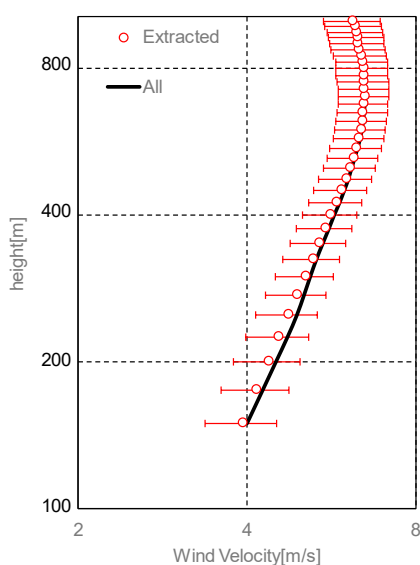


図-7 平均風速の鉛直分布 (抽出)

を用いて分析する。

4.1 データ取得状況の影響

安定してデータが取得できた時刻として、地上から150m～500mの高さにおけるデータが全て揃った時刻のみを抽出し、全データの結果と比較した。この抽出により、取り扱うデータは全データの約54% (28,330 個) となる。抽出されたデータに基づく各高度及び150m～500mまでの平均風向の風配図を図-6に、平均風速の鉛直分布を図-7、高度別平均風速の累積頻度分布を図-8に示す。風向の出現頻度は図-3に示した全データの場合に比べ、北寄りの風向の頻度がさらに減少したものの全体の傾向に大きな変化は見られない。150m～500mの平均風向は、北側の場合は東より、南側の場合は西よりの頻度が高い。平均風速の鉛直分布は、抽出したデータで風速がわずかに低下している(図-7)。これは、降雨の影響等により一部の高度でしかデータが取得できない台風のような強風時のデータ等が除かれた影響であると考えられ、高度別平均風速の累積頻度分布(図-8)を見ても頻度が90%に達する風速が各高度で全データの場合(図-5)に比べて1m/s程度低くなっている。データのバラつきは全データの場合に比べ、300mまでは若干小さくなっているが、それ以上の高度では殆ど差が見られない。本項の判定条件により抽出された安定していた時刻のみのデータの場合、高風速のデータが若干減ってしまうが、長期にわたり多くのデータ取得したことで全体の傾向は捉えられていると考え、以下では本節に示した抽出されたデータに基づく分析を進める。

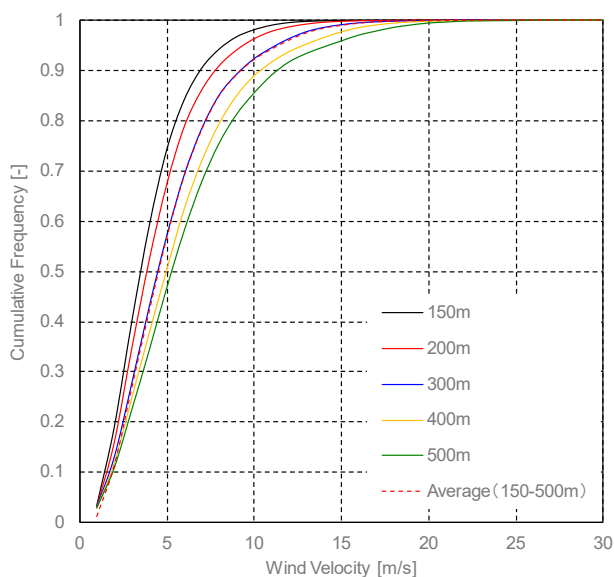


図-8 高度別平均風速の累積頻度分布 (抽出)

4.2 大気安定度の影響

大気安定度は東京管区気象台の観測データを用い、パスキル大気安定度階級を用いて算出した^{注1)}。大気安定度階級別に抽出された全時刻のうち、高さ500mまでのデータが前節で示した判定条件で取得できている割合と個数を図-9に示す。なお、東京管区気象台の観測データ数の関係からデータは間引かれ、全階級で高さ500mまで全て取得できているのは全データの24% (12,506個)となる。階級別の取得の割合を見ると、不安定側の値が高く、中立、安定条件では低くなっている。また、不安定側でも中立に近いほど割合が下がっている。これは、取得率の高い夏季においては不安定条件となる場合が多く、逆に取得率の低い冬季には中立や安定条件となる場合が多いためである。また、降雨の影響等でデータ取得率が下がることの多い台風通過時及びその前後は、日中の時刻において不安定側の条件がわずかに見られたが、殆どの時刻で中立条件であり、このことも中立条件における割合の低下の要因の一つであると考えられる。個数では、割合は高くないものの中立(D)が半数以上を占めており、安定(E-G)が非常に少ない。不安定条件では中立に近い条件の個数は少ないが強不安定(A)に近い条件は中立に次ぐ個数であった。

次に、150m~500mまでの平均風速と大気安定度階級の関係を図-10に、安定度別の平均風速の鉛直分布を図-11に示す。150m~500mまでの平均風速が10m/s以下の場合はいずれの大気安定度階級の条件も含まれているが、本研究ではパスキル大気安定度階級を用いているため、15m/sを超える風速は中立に近い条件でのみ観測されており、強風条件下では殆どが中立条件ないしはそれに近い条件であったことが分かる(図-10)。風速の鉛直分布(図-11)を見ると、前項で示した抽出データのグラフの傾きは中立条件と安定条件の間となっている。安定条件では下層部の平均風速が低減していた。グラフの傾きの大きさは安定>中立>不安定



図-9 大気安定度階級別データ取得率と個数

条件の順となり、既往の観測^{例えば 8)}や理論の結果を上空へ延ばした場合と一致している。参考として、それぞれの条件のグラフの傾きからおおよそのべき指数を推定すると、それぞれ一定ではないものの、安定：0.49、中立：0.42、不安定：0.21であった。

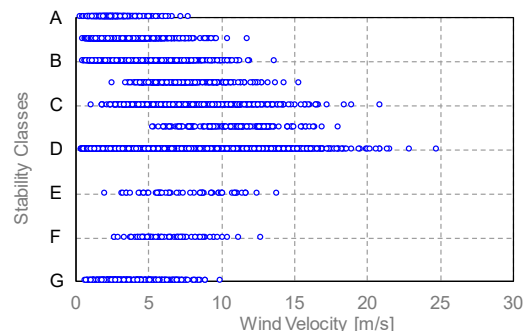


図-10 大気安定度階級と平均風速

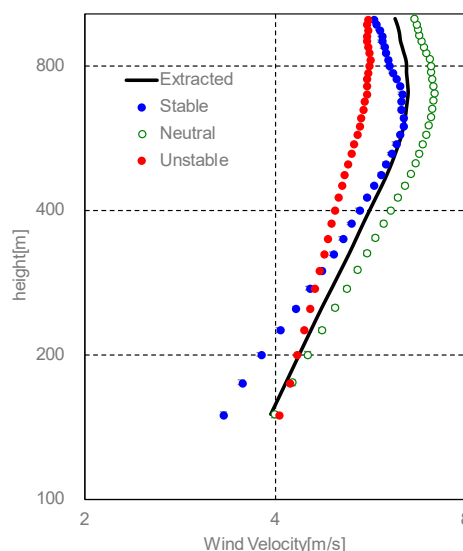


図-11 平均風速の鉛直分布 (安定度別)

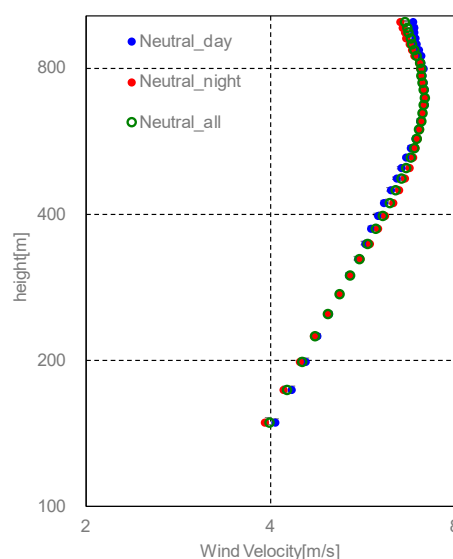


図-12 平均風速の鉛直分布 (中立時、日夜別)

いずれの条件でも、高さ 600m あたりまでは一定に近い傾きを示しており、それ以上の高度での風速は低下、もしくは変化が小さかった。また、図には示さないがデータのバラつきを比較すると、高度 250m 以下では中立条件のバラつきが大きくなっていたが、それ以上の高度では不安定>中立>安定の順にバラつきが大きくなっていた。参考として、中立条件のデータを日中と夜間に分けて風速の鉛直プロファイルと比較した結果を図-12に示す。全中立のデータ数(6,900)のうち、日中は2,739、夜間は4,161時刻であった。全体のデータと比較していずれも差は非常に小さいが、グラフの傾きを見ると日中のデータは小さくなり、夜間のデータは若干ではあるが大きくなっている。これは今回用いたパスキル安定度階級を求めるときに含まれていない、全天日射量の1~2割程度と言われる⁹⁾都市部の人工排熱の影響が一つの要因と考えられ、人工排熱量の多い日中において中立と判定されたデータの中に傾きが小さくなる不安定側のデータが含まれている可能性が考えられる。パスキルの安定度階級で求めた大気安定度により全体の傾向は把握できているが、着目する事象において詳細な分類が必要な場合には安定度の分類に補正が必要になると考えられる。

4.3 風速レベルの影響

安定度別に 150m~500m までの平均風速が 5m/s 以下、5~10m/s、10~15m/s、15m/s 以上の4段階に分けた、それぞれの場合における平均

風速の鉛直分布を図-13に示す。図ではそれぞれの風速レベルが異なるため、日本建築学会荷重指針・同解説に記載された地表面粗度区分Vの上空風高さである650mの風速で基準化している。各安定度でのそれぞれの風速レベル別のデータ個数を低風速条件から示すと、安定：260、178、18、0、中立：3,604、2,633、566、97、不安定：3,240、1,601、283、26、である。安定条件には15m/s以上のデータはないものの、各大気安定度の条件下では10m/s以上では類似した風速の鉛直プロファイルを示しており、グラフの傾きも図-11の安定度別の比較で示したものと同様、安定>中立>不安定条件の順となっている。また、5m/s以下では各大気安定度の条件下で他の風速レベルと異なる傾向を示しており、特に不安定時には高度400m以下で風速変化が殆ど見られなかった。図には示さないが時々刻々のデータを見ると、低風速の場合は高高度ほど風速が低下する等、風速の鉛直分布の形は崩れている場合が多く、風向の鉛直分布のバラつきも非常に大きくなり、他の観測例¹⁰⁾と同様、風況の鉛直分布が安定しない傾向を確認している。バラつきの大きいデータを平均した結果、低風速の条件では鉛直分布が他の風速レベルと異なる結果になったと思われる。

4.4 周辺建物の影響

周辺建物の影響を検討するために、周辺地域の地表面性状の異なる風向が北側、南側それぞれの平均風速の鉛直プロファイルと比較した結果を

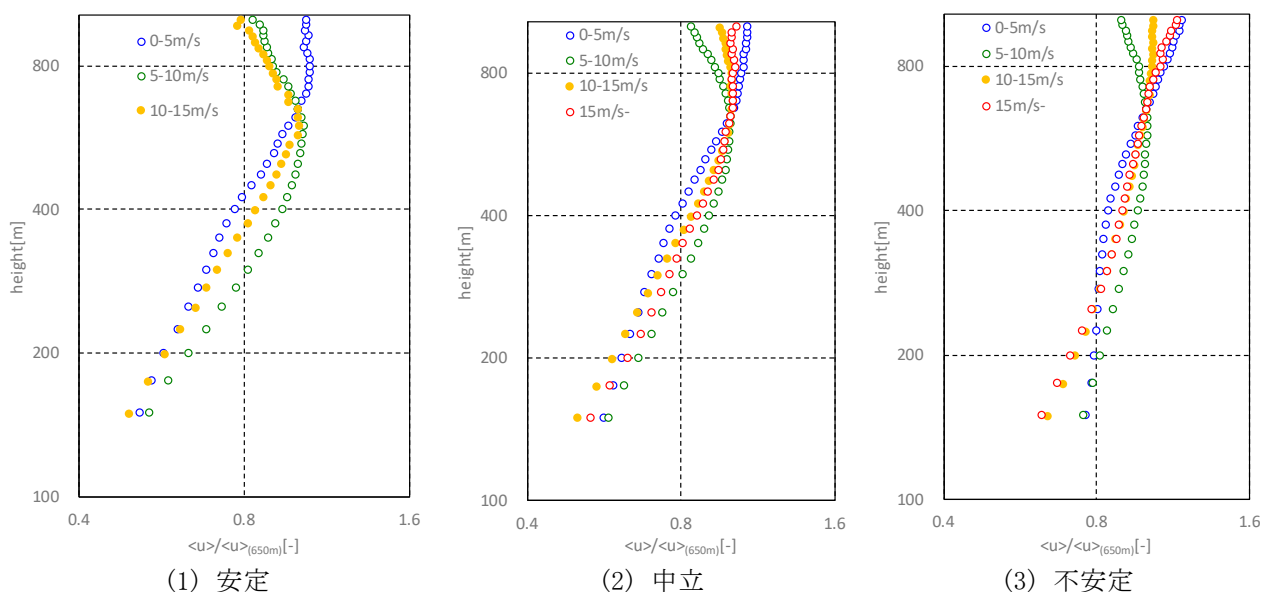


図-13 平均風速の鉛直分布 (大気安定度別・風速レベル別)

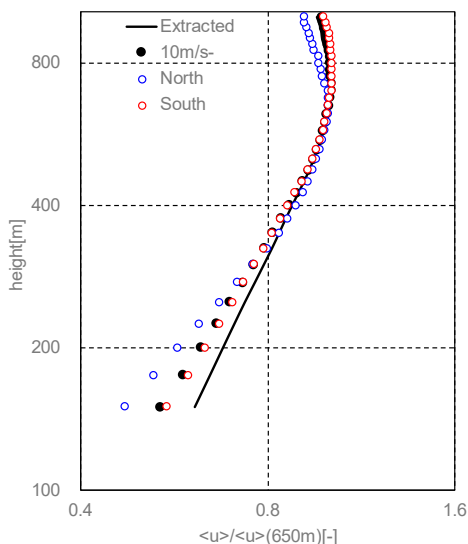


図-14 平均風速の鉛直分布（方位別）

図-14 に示す。なお、安定した鉛直プロファイルの結果を比較するために、前項で示した強風条件（150m～500mまでの平均風速が10m/s以上）のデータを用い、風向の判定は図-6 に示した150m～500m の平均風向に基づき行った。それぞれのデータ数は、北側：346 個、南側：1,884 個である。また、地表面粗度区分Vの上空風高さである650mの風速で基準化している。高層建築物が立ち並ぶ地域を含む北側の風向の場合、全データのグラフの傾きよりも大きくなっている10m/s以上の高風速条件の結果や、南側の風向の場合に比べて下層部（150m～300m）の速度欠損が明確になっている。その影響と思われる300mよりやや上空の増速も見られるなど、数百m～1km程度の範囲内にある周辺の高層建築物が上空の風況に非常に大きな影響を与えていることが分かる。グラフ傾きから推定されるべき指数は、南側は0.46程度、北側は300m以下の高度で0.67程度であった。

5. まとめ

本研究では高高度の風況把握を目的とし、ドップラーライダーを用いた長期間の観測結果を行った。本報告では取得されたデータの特徴を把握し、観測結果に影響を与える可能性のある要因を検討した。

- 1) 観測されたデータは高度別、季節別の取得率のバラつきが大きく、風向別のデータ数などに偏りが見られることから、観測データのみからワイブルパラメータ算出等の統計的に検討することは難しい
- 2) 全体の傾向に与える影響としては、データ取得状況の影響は比較的小さく、大気安定度や風速レベル、周辺建物の平均風速の鉛直分布に与える影響は大きい
- 3) 高風速条件のみを抽出した場合でも周辺建物群の影響は顕著に見られ、都市上空の風況を正しく把握するためにはその影響度合いを正確に把握する必要がある

謝辞

本研究は、東京工芸大学 工学部建築学系 松井正宏教授との共同研究の成果の一部である。ここに記して謝意を表する。

<注>

- 1) 東京管区気象台で観測されている、全天日射量、風速、雲量のデータを用い、表-2のパスキル大気安定度階級から大気安定度を求めている。風速に関しては、気象台の観測データから日本建築学会荷重指針・同解説の地表面粗度区分IVのべき指数を用いたべき乗則により地上10m高さの風速を算出した。また、雲量については前後1時間は同じであると仮定した。日中、夜間の判定は全天日射量の値を用いた。本報では、A～C・Dを不安定、Dを中立、E～Gを安定として分類した。

表-2 パスキル大気安定度階級分類表¹⁾

風速 (U) [m/s]	日中 日射量 (T) [kW/m ²]				夜間 雲量		
	T ≥ 0.60	0.60 > T ≥ 0.30	0.30 > T ≥ 0.15	0.15 > T	8-10	5-7	0-4
U < 2	A	A-B	B	D	D	G	G
2 ≤ U < 3	A-B	B	C	D	D	E	F
3 ≤ U < 4	B	B-C	C	D	D	D	E
4 ≤ U < 6	C	C-D	D	D	D	D	D
6 ≤ U	C	D	D	D	D	D	D

<参考文献>

- 1) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2015
- 2) 須田健一, 佐々木淳, 石橋龍吉, 藤井邦雄, 日比一喜, 丸山敬, 岩谷祥美, 田村幸雄: “ドップラーソーダを用いた都心部の自然風観測”, 第16回 風工学シンポジウム, pp.13-18, 2000
- 3) 岩谷祥美, 田村幸雄, 日比一喜, 須田健一, 中村修, 丸山敬, 石橋龍吉: “ドップラーソーダによる海岸と内陸部における平均風速と風速鉛直成分の乱れの強さの鉛直分布に関する研究”, 日本建築学会構造系論文集, 第70巻, 第598号, pp.27-34, 2005
- 4) 後藤暁, 大塚清敏: “小型ドップラーライダー観測に基づく東京上空の風の鉛直分布特性”, 第22回 風工学シンポジウム, pp.7-12, 2012
- 5) Hideki Kikumoto, Ryozo Ooka, Hirofumi Sugawara, Jongyeon Lim: “Observational study of power-law approximation of wind profiles within an urban boundary layer for various wind conditions”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 164, pp.13-21, 2017
- 6) 小野田真帆, 石田泰之, 渡辺浩文, 山本ミゲイル, 上田裕洋, 持田灯: “ドップラーライダー計測と温湿度の多点同時測定に基づく仙台の気候特性の把握”, 第25回風工学シンポジウム, pp.145-150, 2018
- 7) 森脇亮, 神田学, 木本由花: “都市接地層における乱流プロファイルの気安定度依存性”, 水工学論文集, 第47巻, pp.1-6, 2003
- 8) 日本学術会議 社会環境工学研究連絡委員会 ヒートアイランド現象専門委員会: “ヒートアイランド現象の解明に当たって建築・都市環境学からの提言”, 2003
- 9) 菊本英紀, 大岡龍三, 菅原広史: “都市境界層内の風速プロファイルのモデル化における風速と気安定度の影響”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2分冊, pp.713-716, 2015
- 10) 窒素酸化物総量規制マニュアル〔新版〕, 公害研究対策センター, 2000