

千葉マリンスタジアム内に特徴的な風系と強風の要因

神田 敬^{*1}・杉本 孝公^{*2}・上野 健一^{*3}
萩野谷 成徳^{*4}・堀 晃浩^{*5}・川島 儀英^{*5}

要 旨

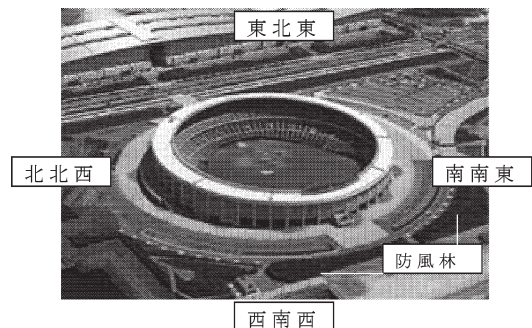
プロ野球球場として有名な千葉マリンスタジアム(千葉県千葉市)では他球場に比べて強風が頻発する。本研究では、千葉アメダスデータを解析し、暖候期に卓越する強風の原因は、関東以北に位置する低気圧や寒冷前線通過時に吹き込む南西風が、粗度の小さい東京湾上から直接千葉市沿岸に侵入するためである事を特定した。また、現地観測により、海側から吹き込む風系は千葉アメダスと幕張で良く一致している事を確認した。次に、スタジアムのようなドーナツ型の建築物周辺で発生する気流系の特徴を、大型風洞を利用した実験により明らかにした。作成したスタジアム模型の内部には明瞭な逆流が発生し、順流との境界およびスタジアム後面で乱れの大きな領域が発生した。逆流域の範囲は模型前方の粗度や屋根の高さに依存していた。現地観測により、スタジアム内では実際に逆流が発生している事を確認した。

1. はじめに

千葉マリンスタジアム(以後、スタジアム)は千葉県の北西部に位置し、千葉ロッテマリーンズが本拠地としている野球場である(第1図)。同スタジアムは千葉市美浜区(通称、幕張)に位置し、東京湾に面した海岸から北東へ約200mの内陸に建設されている。強風が野球に与える影響はかねてから指摘されており、2002年4月17日には強風のためにプロ野球の試合が中止になったこともある(毎日新聞 2002)。そのため、野球場としては珍しく、風速・風向計がバックスクリーン上に設置されており、試合時は電光掲示板により測定値が表示される。一方で、グラウンド上で

表示風向と異なった風を感じることも多々あるらしく、野手にとってはフライを捕ることが難題だということである。

このようなスタジアム周辺で特異的な風況に関しては、表面粗度が小さい東京湾に面した立地条件と、特徴的なドーナツ型構造物が生み出す収束発散場や乱流構造の2つの側面から要因を考える必要がある。一般に、太平洋岸沿いでの風系を支配する気象要因とし



第1図 千葉マリンスタジアムの概観。海岸は図の右下に位置する(千葉県企業庁ホームページより引用)。

^{*1} 筑波大学第一学群自然科学類(現:株式会社メタルワン)。

^{*2} 筑波大学第一学群自然科学類。

^{*3} 筑波大学生命環境科学研究科。

^{*4} 気象研究所物理気象研究部。

^{*5} (有)気象環境計測。

—2007年5月28日受領—

—2008年1月23日受理—

て海陸風の影響が考えられるが、海陸風は一般風が弱い総観場で発達し風速も殆どが 10 ms^{-1} 以下であり(浅井 1996),このような局地循環の発生が幕張周辺での頻繁な強風を説明できるとは考えにくい。一方、建築物周辺の風系の特徴に関しては、直方体・円柱の構造物や陸橋を対象とした研究は多く見られるが(日本風工学会 2007),スタジアムのような中空円筒形の構造物を対象とした風系調査の事例は非常に少ない。そこで本研究では、スタジアムで卓越する風況に関して以下の3つの観点から総合的に分析した。第一に、千葉県東京湾沿岸部で強風が発生する天気概要を、アメダスデータおよび天気図解析により明らかにした。第二に、スタジアムが立地する幕張沿岸付近の風況の代表性を、現地観測値と千葉アメダスデータとの比較解析により明らかにした。第三に、スタジアムの模型を作成し、風洞実験により建築物の影響を受けた気流系の特性を明らかにした。

2. 研究手法

2.1 データおよび気象観測

スタジアムに一番近いアメダス観測地点である千葉アメダスは、東経 140.103 度、北緯 35.769 度に位置し、地上高 47.8 m にて風向風速が測定されている。同地点の風速はビルの屋上に設置されたタワーで測定されており、南～西側は 1 km 程度先まで低層の建築物や緑地があり、その先は埋め立て地の混在する東京湾となっている。また、北～東側は市街地が広がっている。本研究では同データに、幕張を囲む船橋(風速計地上高度 7.9 m)および佐倉(同 7.9 m)を合わせた3地点での1996年1月1日から2005年12月31日のデータを使用し、千葉県沿岸の風況を分析した。強風日の気圧配置は、気象庁発表地上天気図により判別した。

千葉アメダス地点と幕張での風況を比較するために、スタジアムから北西約 500 m の海岸沿いに位置する千葉県精神科医療センターの屋上(地上高 10.28 m)に風向・風速計を設置し、2006年5月から2007年5月まで自動観測を実施した。同センターも、海岸から約 200 m 程度内陸に立地し、測器から南～南西の方角には防風林が無く、建物と海岸の間は裸地が広がっている。観測では5分間の平均風速と5分間隔の瞬時風向を測定した。さらに、風洞実験で測定されたスタジアム内の風況を検証するために、2006年12月9日の午前中にスタジアム内で実際に集中観測を行った。観測項目は簡易風向風速計によるグラウンド上の地上風



第2図 係留気球による球場内の卓越風向観測。グラウンド中央からバックスクリーン側を望む。

系と係留気球(第2図)およびパイボールによる鉛直方向の卓越風向の変化である。

スタジアムでは電光掲示板に表示された風向・風速が一部の試合に限って筆記により記録されている。本研究では、気象データの解析で明らかになった卓越風向が実際のスタジアムでも発生していることを確認するために、これらの資料も利用した。

2.2 風洞実験

スタジアムは外径 196 m のドーナツ型の建築物で、高さ 22.5 m のバックスクリーンが海側の南方向に位置し(第1図の右下)、北のバックスタンド側(第1図の左上)に向けて幅 9.7 m の屋根が徐々に高くなる構造となっている。バックスタンド側の屋根の高さは 33.3 m に達する。スタジアム内外の風の流れを再現するために、模型を作成し、気象研究所(つくば市長峰)の大型気象風洞装置を利用した風洞実験を行った。同風洞装置は、幅 3 m 、高さ 2 m 、長さ 18 m の風洞内に速度成層を発生させることが可能である。本実験では、送風装置の前面に粗度ブロックを配置し、海洋上とほぼ同じベキ指数 0.1 となる鉛直風速分布(日本建築センター 1994)を持つ接地乱流境界層を発生させた。送風の風下 15 m にスタジアムの模型を置き、レーザードップラー流速計によって任意の格子点における1分毎の平均風ベクトルおよび風速の標

準偏差 (σ) を測定した。同流速計は、フォグジェネレータにより発生させた霧の粒子が、センサーの焦点に任意時間 (60秒程度) を通過する際に発生する干渉縞に対応した変調を持つ光信号から、風ベクトルを算出している。実験の座標系は、模型の中心を原点として送風方向を X 軸、それに直交する横断面方向を Y 軸 (風上に向かって右を正)、鉛直上向き方向を Z 軸とする。実験で得られた気流の特性は、(X, Y) 座標または (X, Z) 座標上における風ベクトルの分布、(u, v) 成分または (u, w) 成分、で示している。実験風速は 5 ms^{-1} に設定した。

建築物の風洞実験を行う場合、数百分の1程度の縮尺模型で流れの相似に関するパラメータであるレイノルズ数 (Re) を一致させようとすると、風速を数百倍にしなければならず、 Re を一致させることは不可能である (日本建築センター 1994)。しかし、風洞気流のレイノルズ数を臨界レイノルズ数 (約 2×10^5) 以上に設定し、風速鉛直分布を実風速分布に一致させることで、大気中と似たような乱流が再現できるとされている (加藤 1994)。一方、円柱のような物体の場合、 Re の臨界域で抗力係数が大きく変化することが知られている (Schewe 1983)。今回は、風洞装置の幅を考慮したうえで極力大きな模型を作ることで Re を大きくした。マリスタジアムの模型は縮尺が $1/196$ の発泡スチロールにて作成し、外形は直径 1 m の円型とした。その結果、風洞実験の Re は 10^6 程度、実際のスタジアム周辺の Re は風速を弱風時の 1 ms^{-1} や強風時の 10 ms^{-1} と想定した場合に $10^7 \sim 10^8$ 程度となる (空気の運動粘性率は $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ とする)。何れもレイノルズ数は臨界域以上で、風洞実験が実際の乱れの状態を再現する状態であると考えた。なお、模型は送風方向に対する左右対称性や屋根の傾斜角は再現しているが、実際のスタジアムに存在する屋根とスタンドの間の空間や球場の外側に張り出している入り口部など、模型スケールで 10 mm 以下の細部は再現できていない。本論文では、実寸で 10 m 以上のスケールに関する風場を議論する。

計測格子点は、球場全体の外周付近および内部への風の進入状況を把握するために、鉛直方向は 250 mm まで、水平方向には球場中心から 1000 mm の範囲内に分布させた。格子点間隔は 50 mm を原則とし、センサーと建築物との壁面間隔および重視したい領域に応じて実験毎に間隔を微調整した。

実験は主に強風時の卓越風向である南西および南風

の事例を対象とした。海岸とスタジアムとの間にある防風林は、 3 cm の立方体ブロックをスタジアム模型風上側の外壁から 20 cm 離して弧を描くように内径の幅まで並べて再現し、内部境界層を発生させた。さらに、ブロックを2重に積んだり風上側に付加して幅を変化させたり、ブロックの密度を粗くする事により風系がどのように変化するかも実験した。卓越風向に対する屋根の傾きの影響を把握するために球場を 180 度反転させる実験や、風速を 7.5 ms^{-1} に増加する実験も行った。

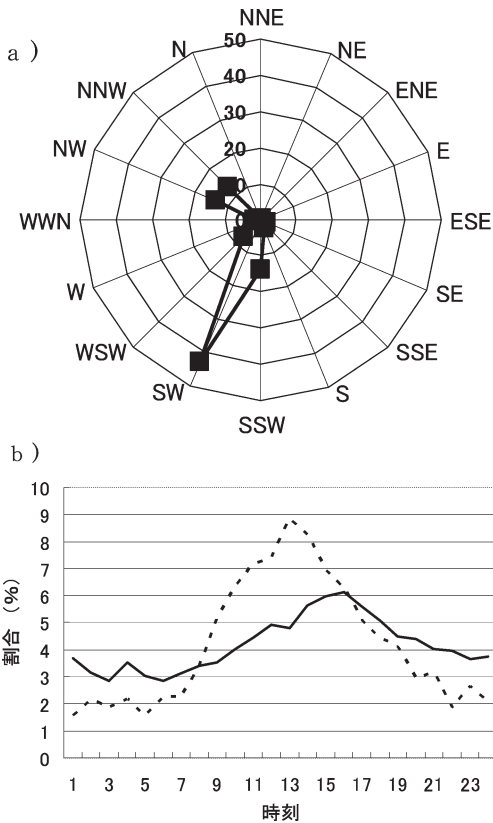
3. 結果

3.1 強風発生時の天候

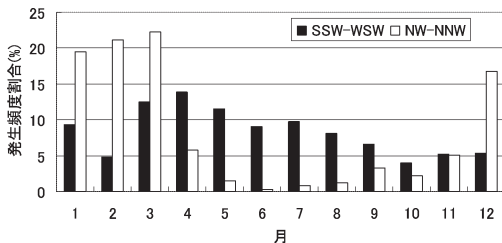
強風を 10 ms^{-1} 以上と定義し、幕張を囲むアメダス3地点 (千葉・船橋・佐倉) で、データが揃った2001—2005年で毎時風速が強風となった頻度を調べた。各地点の頻度は、千葉が1948回、船橋が2回、佐倉が287回となった。千葉アメダスは特に強風が観測されやすい地点であるがわかる。この一要因は、千葉地点の風速計設置高度が他の2箇所に比べて高い事、桑形・近藤 (1990) による粗度推定が示すように千葉地点の南方が比較的開けたアメダス地点であること、が考えられる。しかし、設置高度の違いのみが千葉の地点で強風が出現しやすい原因であるとは考えにくい。そこで、同地点で1996—2005年の10年間に強風が発生した時の風向と季節を調べ、気象要因を分析した。16方位で強風が発生した頻度は、北北西と北西が26%、西南西から南南西が63%を占め、この2方向から強風が卓越することが明らかとなった (第3図a)。強風の発生頻度を時刻別に調べたところ、北北西～北西成分の場合は13時に、西南西～南南西成分の場合は16時に極大が出現し、日変化傾向は前者の方が顕著であった (第3図b)。強風が卓越する季節を月ごとの頻度で調べたところ (第4図)、北西よりの強風は殆どが12—3月に卓越し、強風日の天気図および同風向卓越時の地上風系を調べた結果、冬季季節風により発生することが分かった (図省略)。一方、南西よりの強風は春季をピークとして通年で卓越した。吉野 (2004) は温帯低気圧が日本列島を横断する時期は春季に多いとしており、一方で、同地点の南西方向には東京湾が位置し地表面粗度が非常に小さいことが明らかとなっている (桑形・近藤 1990)。南西風の強風が出現した日の気圧配置を地上天気図で確認したところ、殆どの事例が日本列島付近を低気圧が通過して

いる時に発生していた。つまり、低気圧に向かって粗度の小さい東京湾側から風が吹き込む総観場において強風が発生する事が示唆される。

南南西～西南西方向からの強風が卓越した日に、原因と考えられる総観規模擾乱を9時の地上天気図から判定したところ、温帯低気圧が65.6%、台風が9.9%

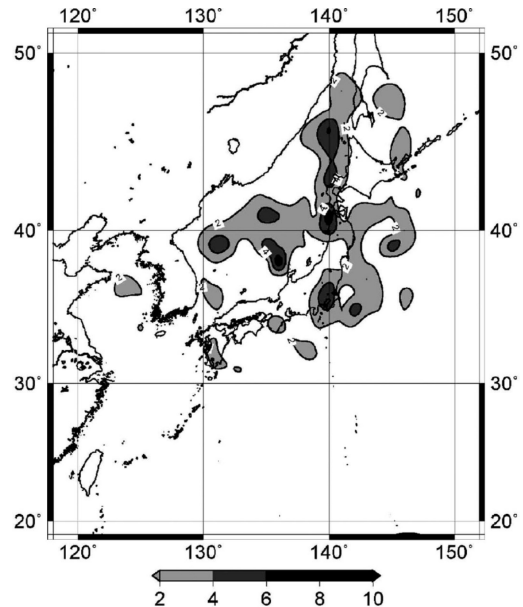


第3図 a) 千葉アメダスにおける強風 (10 m/s 以上) の風向別出現頻度割合, b) 卓越風向が NNW-NW (破線) および WSW-SSW (実線) の場合の時刻別出現頻度割合。



第4図 千葉アメダスにおける2方向での月別強風発生頻度の割合。

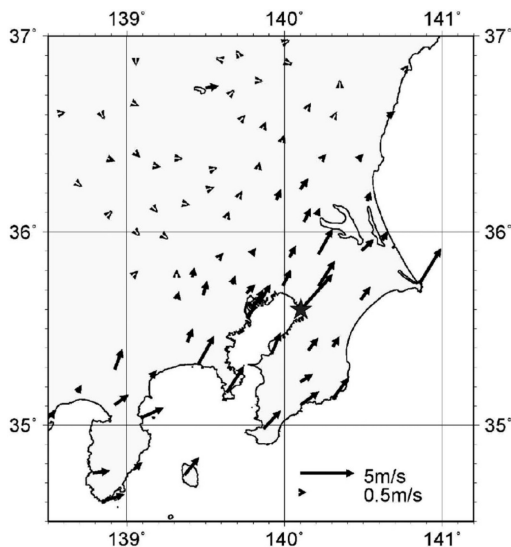
と、圧倒的に温帯低気圧が強風をもたらした総観規模擾乱であった。この時の低気圧の中心位置を天気図から読み取り、頻度分布を第5図に示す。集計期間は風速データと同じ10年間である。図より、低気圧の殆どは関東以北に分布していた。分布の極大域は主に、A) 関東平野近傍, B) 北緯40°N 付近に沿って東西帯状, C) 青森県から北海道の西側140°E 付近、に発生している様子が見られた。それぞれの極大域に低気圧が出現した日の総観場の特性を天気図より判読した結果、A) では南岸低気圧の通過、梅雨前線を伴う温帯低気圧が本州を横断、台風が温帯低気圧化し南岸を北上、の事例が卓越した。B) では、東北を温帯低気圧が横断、急激に発達した低気圧が東北を縦断、台風が温帯低気圧化し日本海沿岸を北上、の事例が卓越した。C) では、低気圧本体から南北に伸びる寒冷前線が関東地方を通過している事例が多く見られた。このように、千葉で南西からの強風が卓越する総観場には、近傍を移動する温帯低気圧に直接吹き込む事例以外に、東北や北海道付近を非常に発達した低気圧や熱帯低気圧から変化した低気圧が北上する事例や、発達した南北に伸びる寒冷前線が西から到達する事例も見



第5図 千葉アメダスで SSW-WSW からの強風が観測された日の低気圧の中心位置の頻度分布。対象期間は1996-2005年の10年間で、1度格子点内の頻度を集計した。

られた。

千葉で南西からの強風が発生した2465時間分の関東周辺におけるアメダス風向・風速データを、ベクトル平均して第6図に示した。測定高度が特に高い八王子・千葉・東京の地点に関しては、ベクトル平均された風速を対数則により他の多くの地点の測定高(6.5 m)に補正している。粗度は桑形・近藤(1990)における南西方向の値を採用した。図より、関東平野では伊豆半島から北東に向けた境界線の東側で顕著に風速が強い事が分かる。低気圧の中心が北日本を通過する際にこのような風の不連続線が関東平野に形成される事は藤部(1994)、Seino *et al.*(2003)などでも指摘されており、風上側での中部山岳の力学的影響が一要因と考えられている。一方で、図では特に風上が相模湾、東京湾、房総半島沖といった海上となる沿岸地点(例えば辻堂、千葉、銚子)で平均風速が大きい。また、南西-北東方向に伸びる東京湾の延長上内陸では風速が強くなっている地点(例えば佐倉、龍ヶ崎)が存在する。このように、千葉は、総観場で南西風が卓越する時に、中部山岳や伊豆半島の影響を受け形成される風の不連続性以東で、地上風が粗度の小さい東京湾を経て内陸に直接進入しやすい地点に位置するため、強風が頻発すると考えられる。



第6図 千葉にて風速10 m/s以上の南西風が出現した時刻の関東平野における地上風ベクトル合成図。解析期間は第5図と同様。

3.2 千葉アメダスとスタジアム付近の風況比較

スタジアムが位置する幕張は千葉アメダス地点から直線距離で約8 kmほど西に離れている。千葉アメダスでの風系特性が幕張にあてはまるかを確認するために、千葉県精神科医療センターの屋上での観測期間のうち2006年6月16日から7月15日まで1ヶ月分の風向風速観測値を千葉アメダスのデータと比較した。風速は海側からのみの風を比較するために幕張で南東-西-南西の風向時のみを抜き出し、両地点の測定高度による風速差を統一するために、以下のベキ法則に従って観測値をアメダス測定高度(47.8 m)に補正した。

$$\frac{V_z}{V_R} = \left(\frac{Z}{Z_R}\right)^\alpha$$

ここで、 V_R は基準風速(アメダスの風速)、 V_z は Z における風速、 Z_R はアメダスの測定高(47.8 m)、 Z は幕張での観測高(10.28 m)である。 α は風速分布の形状を決めるべき指数で、ここでは田園地帯を代表する0.15とした(日本建築学会 1993)。なお、幕張の観測値はアメダス観測と風速の平均化時間を統一するために、1時間毎の10分平均値を再計算している。

毎正時の風速と風向を比較した結果を第7図に示す。風向風速とも、両地点間に明瞭な相関関係が見られた。相関関係は風速が大きいほど明らかで、 6 ms^{-1} 以上では幕張における推定風速が強くなる傾向であった。この傾向は風速の補正前から検出されており、べき指数を海洋上や住宅地のものに変更しても変わらなかった。幕張の風速の方がやや強い原因として、千葉アメダスの海洋側の粗度が大きい事が想定された。また、幕張観測地点で北-北東の風向時にアメダスデータと食い違う事例が検出された。これは、測器設置場所の北東側に、屋上より高い突起施設が存在し、その風下の影響により幕張での観測値が乱された結果であると考えられる。このように、局所的には風向風速の差異はあるものの、基本的な風速の強弱と南西からの卓越風向に関しては千葉アメダスと幕張での観測値に大きな食い違いは見られなかった。スタジアムの2005年の風況資料(588データ)によると、試合中の風向はバックスクリーン(南西)よりの風が4割を占め、次にレフトスタンド(南)と三塁側(東)の風がそれぞれ2割であった。風速 6 ms^{-1} 以上の場合に記録された風向は南西および南風のみで、三塁側からの風はナイトゲームの弱風時に発生していた。以上から、3.1章にて千葉アメダスデータにより明らかにされた

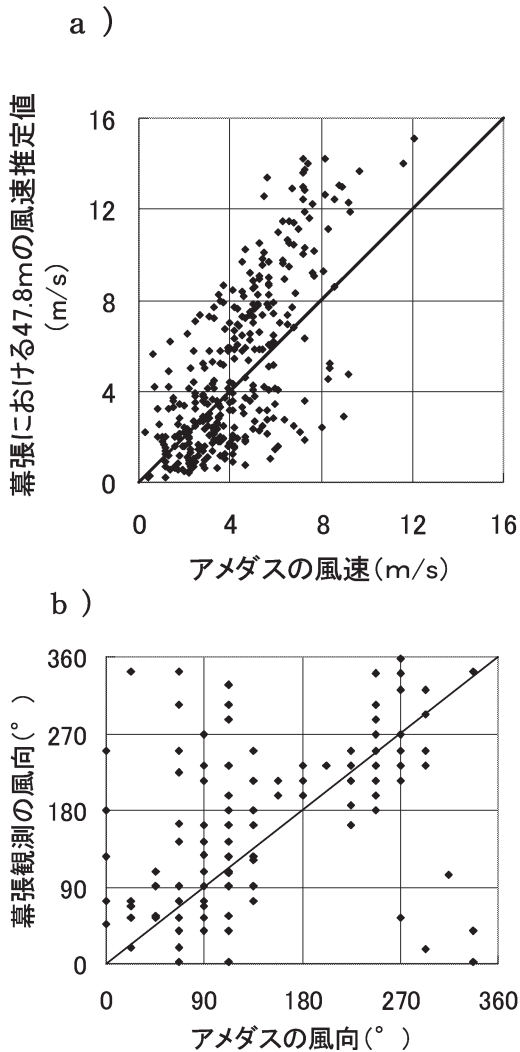
低気圧通過時の南西風がスタジアムにも強風をもたらしている」と結論付けた。

3.3 風洞実験による風の3次元構造

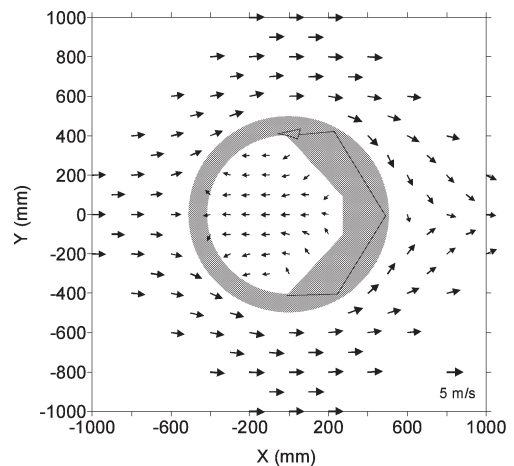
気象観測およびスタジアムの資料により明らかになった幕張周辺で特徴的な南西～南からの風がスタジアムの建物内外にどのような気流系を生み出すかを風洞実験により明らかにした。実験では、まず南西風を想定してスタジアム模型のバックスクリーン方向（屋根根が低い方向）から 5.0 ms^{-1} の風を流した。50 mm

高で測定された水平風ベクトルを第8図に示す。スタジアム外側の気流はドーナツ型の建築物に沿って迂回し、剝離せずに球場後面で収束している様相がわかる。一方、球場内部では風速は弱いものの、卓越風向とは逆の気流が発生している。X=100 mm付近で見られる内部気流の収束は、スタジアム内のスタンドの形状に沿って上空から吹き降りた風による。Y=0 mmにおけるX-Z断面に沿った鉛直風ベクトルとu成分およびw成分での乱れの指標となる標準偏差分布を第9図に示す。第9図aにより、バックスクリーン前面では上昇気流が発生し、球場内部では下層に逆流域を持つ渦が明瞭に出現している。一般風と逆流の境目は高度100 mm付近に存在する。また、球場の後面でも下層に上昇気流領域が発生しており、第8図にて観測された下層の収束域が上昇気流を生じ、150 mm付近で上空の一般流と合流して風下に流れ出ている事が分かる。このような気流系の特性は、実験風速を 7.5 ms^{-1} に増加させても変化しなかった。

uおよびw成分の標準偏差(σ)に見られる乱れの特性を見ると(第9図b, c), σ は球場内部で屋根の高さと同様高さの順流と逆流の境界付近が極大となる。例えば第9図aの(X, Z)=(0, 100)で風速がほとんどない(0.7 ms^{-1})にも関わらずu成分の σ は 1.1 ms^{-1} となった。最大瞬間風速を平均風速+ 3σ と仮定すると、突発的には 4.0 ms^{-1} の逆流が吹く事になる。つまり、球場内の逆流の発生は、同時に強い乱れも伴っている事になる。また、球場後面では200 mm



第7図 幕張と千葉アメダスでの風速 (a) および風向 (b) の比較、幕張の風速はベキ法則で補正し幕張で南東～西南西の風向時のみを選択している。風向は北を0度とし、東回りで360度表示となっている。



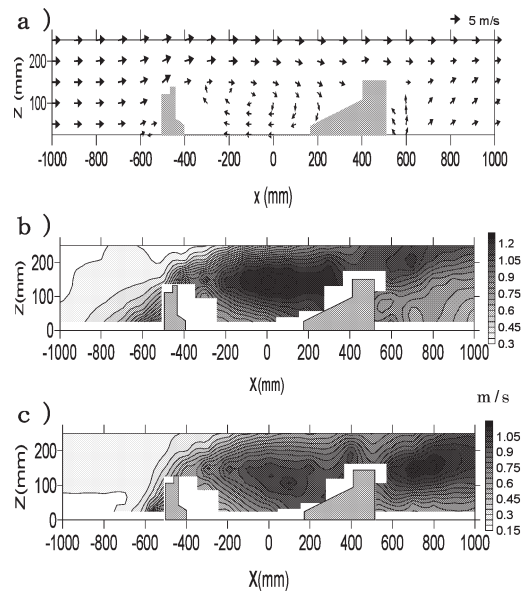
第8図 測定高50 mm における水平ベクトル分布。陰影部はスタジアム模型底面の横断面を示す。

より上層に u 成分の σ が大きくなる領域が出現しているが、 w 成分の σ は屋根と同標高付近が極大である。このような乱れの発生高度や球場内での渦の発生構造は、Kim and Baik (2003) によるビルの谷間での2次元流の数値実験結果と酷似している。

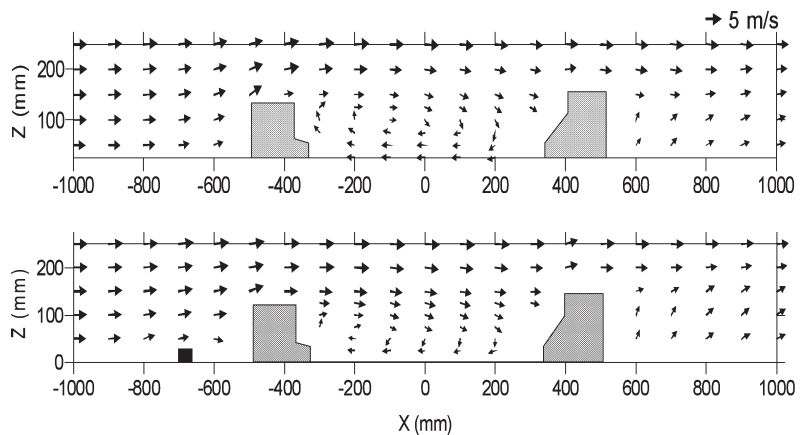
さらに一般流に対するスタジアムの方向依存性を調べる実験を行った。南風が吹いた場合を想定して水平に45度回転させる実験と、屋根の高さの影響を調べるために180度回転させる実験である。45度回転させた実験は、スタジアム資料により明らかとなったレフトスタンド(南)からの風を想定している。この場合、スタンドの形状の影響で、球場内の逆流域の分布は Y 方向に対して非対称となった。また、ホーム側から気流を吹かせた場合、バックスタンド側の屋根の高さ分だけ反流との境界位置が上昇した。しかし、鉛直断面図で見る逆流域の発生と乱れの強い領域の分布傾向は両者の実験とも回転させない実験にくらべて殆ど変化は見られなかった(図省略)。

南からの風を想定すると、実際にはスタジアムと海岸との間に防風林が存在する(第1図)。そこで、防風林の効果を把握するために、模型を45度回転させたままで3cm四方の粗度ブロックをバックスクリーン前面($X = -700$ mm付近)に設置した実験を行った。 Y 方向の設置幅は ± 400 mmの範囲でスタジアムの外形に沿って、位置は四分円を描く形とした。第10図にブロックを置く前と置いた後のベクトル分布を比較する。ブロックを置くことにより、逆流と一般流の境界が下がり、渦の中心はバックスクリーン側に移動した事が分かる。150 mm 高度における風速は強くなり、スタジアム内の標準偏差の極大域も低下した(図省略)。スタジアムの風上に粗度が発生した事で内部境界層が生じ、ブロック後面では σ の増加から乱流が生成されていることが分かった。同時に観測点(X, Z) = (-500, 150) 付近での吹き上げの角度(仰角)は小さくなった。つまり、バックスクリーンの外壁にぶつかって吹き上げる上昇流が弱体化し、その

下流で球場内に吹き降りる一般流の成分が増大した。さらに、ブロックを X 方向に幅を2倍(6 cm)とした場合、高さを2倍とした場合、1つ間隔に配置した場合の実験を行った。ブロックの幅を変化させても様相にあまり変化は見られなかった。高さを増やした場合、バックスクリーン上の吹き上げの角度は小さく



第9図 第8図の $Y = 0$ mm に沿った風ベクトル鉛直断面 (a), および u, w 成分の標準偏差分布 (b, c). 陰影部左はバックスクリーン, 右はバックスタンド側断面を示す。

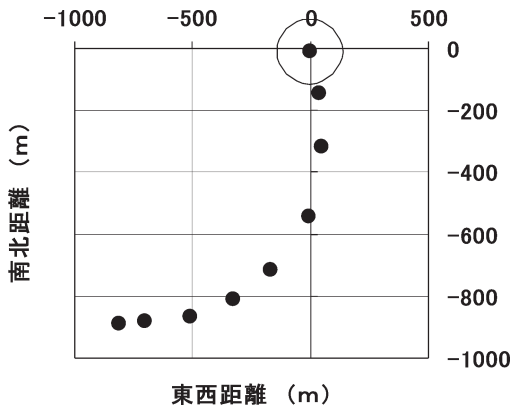


第10図 模型を45度回転させ、 $X = -700$ mm 付近に高さ30 mmの粗度ブロックを置く前(上)とおいた後(下)の $Y = 0$ mm に沿った風ベクトル鉛直断面図。

なったが渦の位置は変化しなかった。ブロックの置き方を粗にした場合、ブロックを抜かなかった場合（第10図）に比べてスタジアム内の渦の中心位置がやや上昇した。以上より、マリスタジアム内の気流系は、スタジアムより海側の粗度（例えば防風林）の有無や粗密により大きな影響を受ける可能性が風洞実験により明らかとなった。

3.4 マリスタジアム内での風況観測

風洞実験では模型スタジアム内に逆流域が発生し、この境界面では乱れが大きい事が明らかとなった。この特性を検証するために2006年12月19日の9時50分から1時間、実際にマリスタジアムのグラウンドを利用して風況の観測を行った。12月19日の関東地方の天気は下層雲が広がり肌寒い曇り空であった。グラウンドから放球した気球の追尾観測（第11図）によると、



第11図 午前10時50分にスタジアム内より放球した気球の高度800 m までの航跡図。●は100 m 高度毎の位置を示す。円はスタジアムの外形を示す。

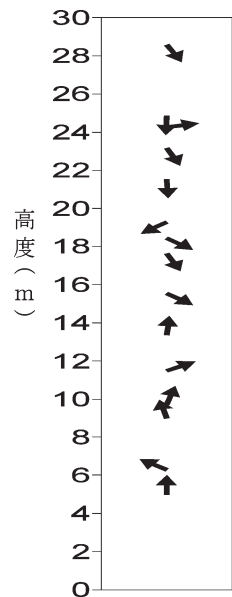
第1表 スタジアム中央に設置した自動気象観測システムによる地上風の変化。

	9 : 50	10 : 00	10 : 10	10 : 20	10 : 30	10 : 40
10分間平均風速 (m/s)	0.9	1.3	0.9	1.3	1.3	0.9
10分間卓越風向	SSE	SE	SSE	SE	SE	SE
最大瞬間風速 (m/s)	3.1	3.1	2.2	2.7	3.6	3.1
最大瞬間風速時の風向	SSE	SE	SE	E	SE	ESE

高度600 m 付近までは北風が卓越し、その上層では東風が卓越していた。電光掲示板は、同時間帯のバックスクリーン上の風が風速3~4 ms⁻¹で北風であることを示し、千葉アメダスおよび幕張での風向も北風であった。一方、同時間帯のスタジアム中央の地上風は3 ms⁻¹以下の南~南東であった（第1表）。同時に測定されたショート裏とセカンド裏2地点の地上風向は南よりであった。グラウンド中央にて屋根の高さ（30 m）付近まで係留した気球を上昇させ、気球の流される方向と、紐の長さおよびデジタル測距離儀から測定した傾きにより算出した高度における卓越風向を判断した（第12図）。その結果、地上高15 m 付近まで南成分の気流が卓越し、その上空では北風成分に反転する様子が明確に確認された。10~15 m 付近では気球が1方向に傾かず、不定期に向きを変えていた（第12図には目視により頻度の多かった方向を記載している）。つまりこの領域では風が乱れていたと考えられる。以上から、スタジアム内では下層で反流が発生しており、境界の高さや乱れの様相が風洞実験の結果と極めて類似する事が明らかとなった。

4. まとめ

千葉北東部の東京湾に面して立地するマリスタジ



第12図 12月9日10時に係留気球により測定した球場内での高度別卓越風向。矢印は東西南北風が左右上下に相当する風向を示している。

ム周辺にて発生する強風の要因とスタジアム自体の影響を受けた狭域での風況を把握する事を目的とし、気象データの解析・現地観測・風洞実験を組み合わせた研究を実施した。千葉で暖候期に強風が発生する時の卓越風向は主に南西である。これは、関東以北を通過する移動性の温帯低気圧や寒冷前線に吹き込む気流がちょうど南西から卓越するときに、伊豆半島の影響を受けず粗度の小さい東京湾上から直接内陸に侵入する事が要因であると考えられた。スタジアム近傍での現地観測と千葉アメダスデータを比較することで、スタジアムの位置する幕張での風況は千葉アメダス地点での風況とほぼ同じであることが確認された。東京湾に面した千葉沿岸の強風は鉄道輸送の障害を頻発しており、本研究で特定した総観場の発生が関係していることが示唆される。地域代表風速(近藤ほか 1991)と土地利用調査による粗度を考慮した強風発生可能域を湾岸沿いで特定する必要がある。

ドーナツ型のスタジアムの模型を作成し、風洞実験により気流系の3次元の様相を把握した。模型内では、下層で一般卓越風向に対して逆向きの気流が発生し、一般流との境界付近では風速の乱れが大きくなった。さらに、模型の前面に粗度ブロックを設置することにより、反流渦の位置や強さが変化した。実際にマリスタジアムで簡易風況観測を実施し、この反流の発生を確認した。これらの知見は、今後スタジアム内の風系を調整するためには重要な情報となると考える。一方で、風洞実験の定量的な検証という意味では今回の現地観測は簡易的であり、より精密な風速鉛直分布観測が必要であろう。

本来想定される海側からの強風進入時にスタジアム内でのどのような風系が卓越するかは未知の部分が多く、乱れの発生域・時間帯の把握は球場運営や選手にとって大変有用であると考えられる。残念ながら、風洞実験では野外で観測される強風に適合した相似則を再現することは難しく、大規模商用施設での理想的な気象条件下の観測も難しい。数値シミュレーションやスタジアム近傍での継続した気象観測により、強風時の風況を把握していく努力が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究は、第一・第二著者が卒業研究にて取り組んだ内容を加筆修正したものである。風洞実験は、筑波

大学・生命環境科学研究科と気象研究所との共同研究の一環として実施した。

風洞実験を実施するにあたり、毛利英明氏(気象研究所)には各種ご助言をいただきました。マリスタジアムでの集中観測に関しては檀浦健作氏・立松俊夫氏(千葉ロッテマリーンズ興行部)に多大な便宜を図っていただきました。千葉県精神科医療センターにおける長期気象観測に関しては、浅野 誠氏(同センター長)と千代田優基氏(事務局主事)に大変なご協力いただきました。第1図のスタジアム写真は千葉県企業庁ホームページより引用いたしました。紙上にて改めてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 浅井富雄, 1996: ローカル気象学. 東京大学出版会, 233 pp.
- 藤部文昭, 1994: 冬の日本海低気圧通過時における関東平野の地上風の日変化性. 天気, **41**, 321-330.
- 加藤真規子, 1994: 複雑地形上の乱れの構造の風洞内再現. 日本風工学会誌, (59), 89-92.
- Kim, J. and J. Baik, 2003: Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon. J. Wind Engineering, **91**, 309-329.
- 近藤純正, 桑形恒男, 中園 信, 1991: 地域代表風速の推定法. 自然災害科学, **10**, 171-185.
- 桑形恒男, 近藤純正, 1990: 東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定. 天気, **37**, 197-201.
- 毎日新聞, 2002: 2002年4月18日, 東京朝刊.
- 日本建築センター, 1994: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック. 財団法人日本建築センター, 137pp.
- 日本風工学会, 2007: 風工学ハンドブック. 朝倉書店, 419pp.
- 日本建築学会, 2004: 建築物荷重指針・同解説. 第4版, 丸善, 654pp.
- Schewe, G., 1983: On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers. J. Fluid Mech., **133**, 265-285.
- Seino, N., H. Yoshikado, F. Kobayashi, J. Sato and Members of Tsukuba Area Precipitation Studies, 2003: Vertical structure of local fronts observed in Kanto, Japan. J. Meteor. Soc. Japan, **81**, 367-391.
- 吉野正敏, 2004: 日本の気候 I. 二宮書店, 気候影響・利用研究会編, 275pp.

Wind Structure in the Chiba Marine Stadium and Synoptic Factor Causing Strong Winds

Takashi KANDA^{*1}, Takafumi SUGIMOTO^{*1}, Kenichi UENO^{*2},
Shigenori HAGINOYA^{*3}, Akihiro HORI^{*4} and Yoshihide KAWASHIMA^{*4}

^{*1} *First Cluster of Colleges, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan.*

^{*2} *Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba,
Tsukuba 305-8572, Japan.*

^{*3} *Physical Meteorology Research Department, Meteorological Research Institute,
Tsukuba 305-0052, Japan.*

^{*4} *Meteorological & Environmental Sensing Technology Inc., Tsukuba 305-0052, Japan.*

(Received 28 May 2007 ; Accepted 23 January 2008)

Abstract

Strong winds frequently occur at Chiba Marine Stadium in Chiba Prefecture. Data analysis at Chiba AMeDAS station revealed that the strong winds during the warm season were caused by the intrusion from the southwest through the Tokyo Bay associated with extratropical cyclones passing to the north of the Kanto area or cold fronts. Field observation confirmed that wind variability at Chiba AMeDAS and the Makuhari area with the stadium showed good agreement in cases of south-southwesterly winds. Three-dimensional wind field in and around a doughnut-shaped building, imitating the Marine Stadium, was simulated by wind tunnel experiments. In the stadium, wind below was in the opposite direction of the general flows above the model, and there was a boundary between the flows with larger turbulence. The height of the boundary changed depending on the roughness on the windward side of the stadium and roof height facing the general flows. The occurrence of the reverse flows with the boundary between the general flows was confirmed by observation conducted in the Marine Stadium.
