

高德院国宝銅像阿弥陀如来坐像の気象調査 主に風況について

三浦 定俊・青木 繁夫・川野邊 渉・中村 修*・宮下 康一*

1. はじめに

屋外にある遺跡や建造物は屋内の文化財にくらべ、日照や雨風の影響をより強く受けて風化が速く進む。特に近年は、車や工場などの排気が引き起こす大気汚染による文化財の劣化が心配されている。大気汚染による文化財の腐食を解明するためには、周辺の気象調査が不可欠で、中でも風向、風速などの風の特徴は、汚染源との関係を調べるために重要な検討項目である。しかしこれまでの文化財に関する調査で、風の特徴との関係を定量的に検討した事例は見られない。本論はこのような観点から、神奈川県鎌倉市の高徳院国宝銅像阿弥陀如来坐像（以下、鎌倉大仏と略称）における調査結果を報告する。

鎌倉大仏での気象観測は平成4年（1992年）に開始した。当初は大仏の東側にある二階建ての寺務所の屋上で観測していたが、平成7年（1995年）から大仏南側の2地点で主な観測を行っている。

2. 気象概況

2-1. 鎌倉市内の気象概況

鶴岡八幡宮、高德院、帰源院および永福寺（図1）において、平成7年1月から10月の間、観測した気温、湿度、風速、降雨量記録をもとに解析を行った。気温測定には白金測温抵抗体（Pt100Ω）、相対湿度測定には高分子薄膜型湿度計、風速測定には三杯型自記風速計、降雨量測定には転倒杓型雨量計を用いた。測定は15分ごとに行い、データロガー（LS-3000 PtV型、白山工業）に記録して後にコンピュータで読み出して解析した。

結果は図2に示すとおりである。図中の気温、湿度、風速は月平均値、降雨量は月の合計値である。気温はいずれの地点もほとんど差はなく、1、2月に低く、8月に最高気温が示されている。

湿度についてみると、砂利敷の境内に設置されている鶴岡八幡宮の湿度が、他に比べ15%程度低い値が示されている。ただし、湿度の月ごとの変化は観測地点による差はなく、冬季に低く、夏季に高い傾向が示されている。

風速は観測地点による差はみられるが、月変化の様子は類似している。観測点間の差については、風速が気温、湿度、降雨量に比べて局地的な影響（例えば、風上側にある樹木など）を受けやすいため、ここでの数値が必ずしもその地域を代表するものとはいえない。

降雨量も観測地点による差はほとんどみられないが、鶴岡八幡宮の5、6月の数値が低い。観測ステーションの背後（北東）が樹木に覆われているためではないかと考えられるが、正確な原因については、今後、新しい記録などを含めて検討したい。

* 風工学研究所

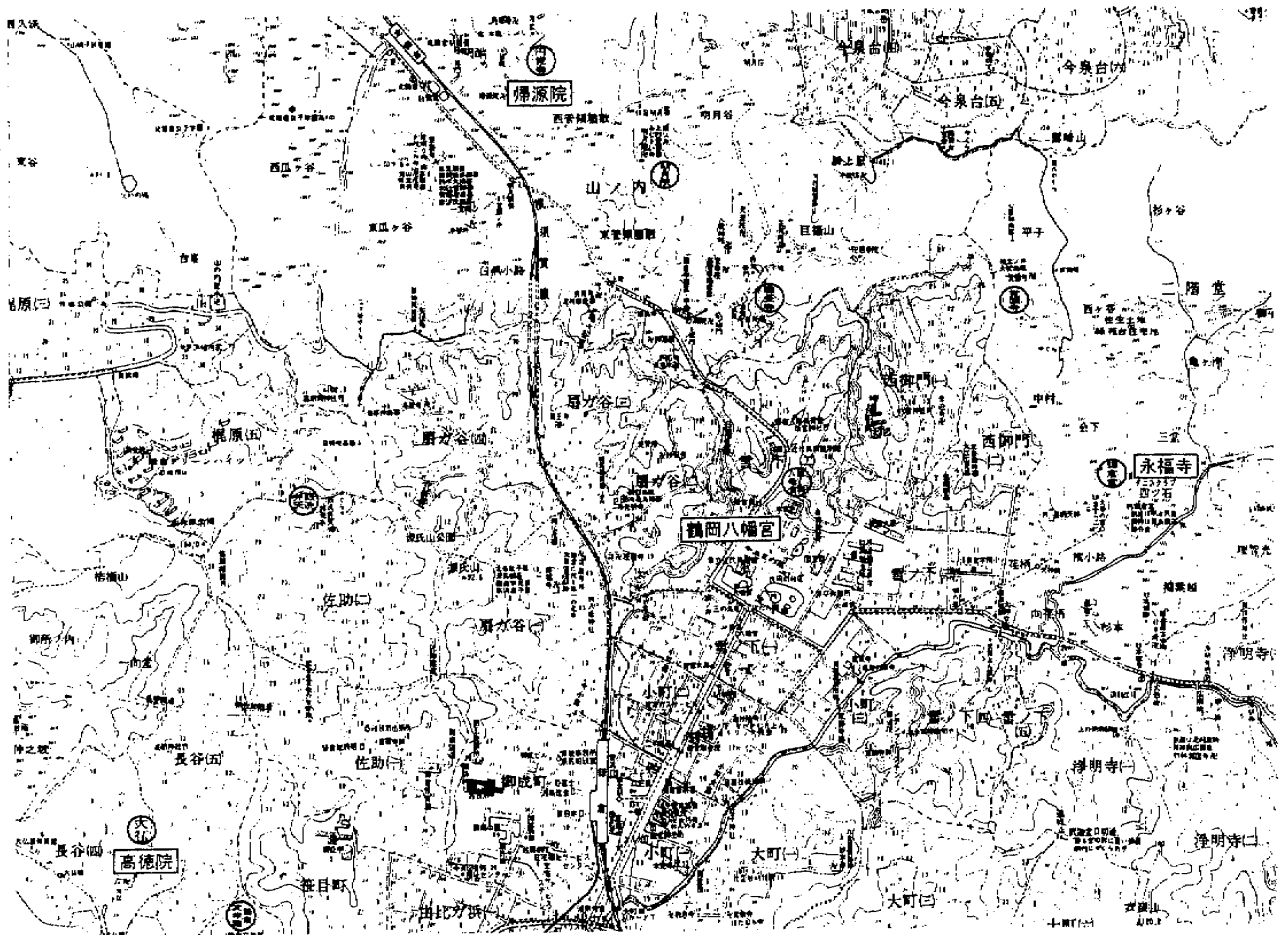


図1 鎌倉市内の気象観測点

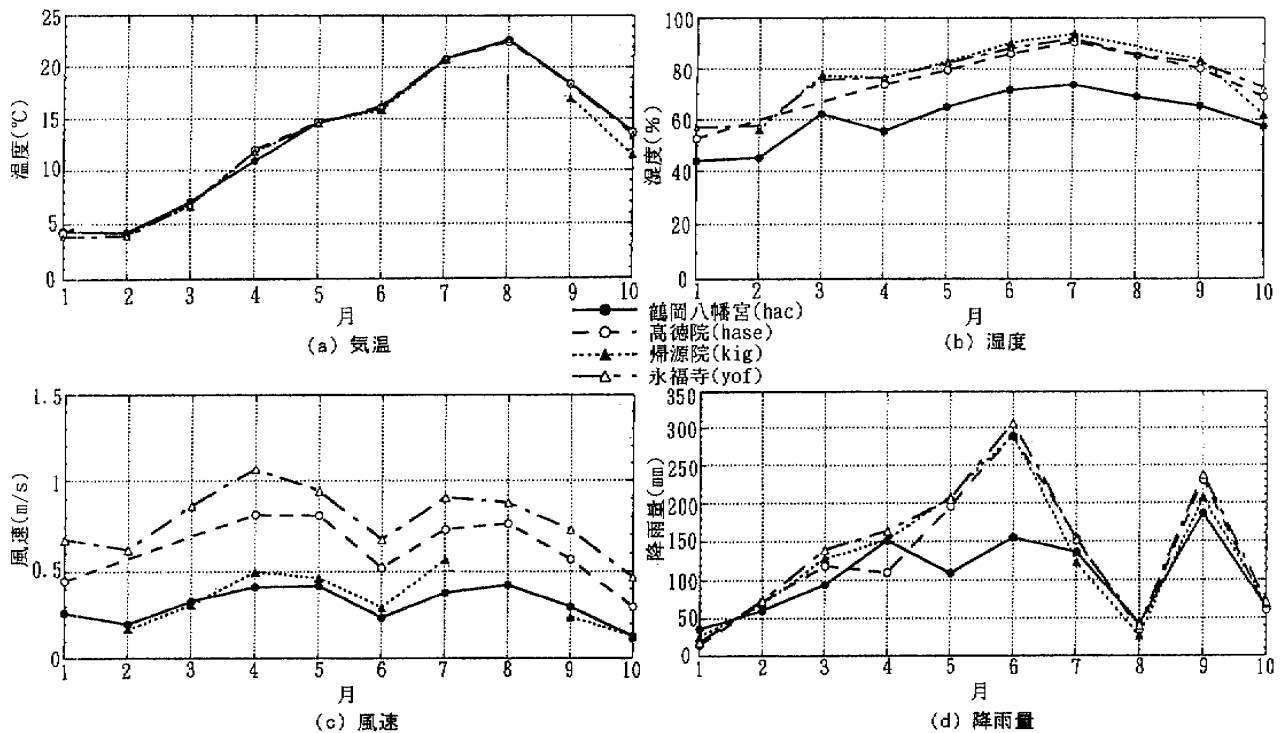


図2 鎌倉市内の気象の月変化

2-2. 鎌倉大仏の気象概況

大仏の東側にある二階建ての寺務所の屋上で観測した、平成5年(1993年)1年間の結果を表1に示す。風向測定は矢羽式風向計を用い、他の測定器は前節と同じである。風向と風速の測定は、寺務所屋上に約4.5mの高さのポールをたてて行った。全体の傾向は前節で示した平成7年の結果とほぼ同じである。特に風速についてみると、両者とも春に風が強く、秋に弱くなる傾向が示されている。また大仏周辺の風向を検討すると、年間を通じて北よりの風が卓越しているが、風の強い春から初夏にかけては西から南よりの風が卓越している傾向が見られる。すなわち汚染物質との関連で述べるなら、鎌倉大仏は北側から吹く風に乗って降る酸性雨と、南西側からの比較的強い風に乗って飛んでくる海塩粒子からの影響を受けているのではないかと考えられる。この推測は、大仏表面に生成した錆の解析結果¹⁾—像の背面(北側)にS(硫黄)が多く、像の正面(南側)にCl(塩素)が多いという元素分布—と符合する。なお表1に示された南よりの風向が、鎌倉大仏正面の南西方向でなく西に偏っている理由は、測定点の風が周辺の建物や立木の影響を受けているためと思われる。以上の結果をもとに鎌倉大仏周辺の風の特性的について、さらに詳細な調査を行うこととした。

表1 鎌倉大仏気象観測結果(1993年)

	温度(°C)	相対湿度(%)	最多風向	平均風速(m/s)	雨量(mm)
1月	5.4	69	北	0.4	129
2月	7.1	57	北	0.7	62.5
3月	8.2	66	北	0.6	111
4月	12.6	68	西南西	0.9	56
5月	16.7	81	西南西	1.0	79.5
6月	20.5	90	西南西	0.9	181.5
7月	21.4	95	北	0.7	377.5
8月	24.0	94	西南西	0.8	278.5
9月	21.9	93	北	0.6	158
10月	16.6	85	北	0.6	184.5
11月	12.9	84	北	0.4	190
12月	8.0	75	北	0.6	83
年平均	15.4	80	北*	0.7	1891

(年降水量)

*) 1.0 m/s以上の日のみについて統計をとると、最多風向は西南西から南西となる。

3. 風観測

3-1. 観測点および観測方法

鎌倉市は図3に示すように三浦半島の西側の付け根に位置する。解析は次に示す神奈川県内の6観測点の記録をもとに行なった。

表2 鎌倉大仏に関連した観測点

観測点	横浜	海老名	辻堂	三浦	大仏1	大仏2
海拔(m)	39	18	5	42	42	11
地上高さ(m)	19.6	6.5	9.5	6.5	10	15

観測点の横浜は横浜地方気象台、海老名、辻堂、三浦はアメダスの観測点で、いずれも気象庁の管轄で観測されているものである。観測点大仏1、2は、鎌倉大仏の大気汚染調査の一環として筆者らが行っているもので、図3に示す鎌倉大仏近くの観測点である。観測状況を図4に示す。鎌倉大仏の南側は海岸まで約1 kmの距離で、大仏から300 mほどは谷筋、それ以降は海岸まで開けているが、その他の方向は山に囲まれている。

観測点大仏の観測システムは図5に示すとおりである。風向風速はそれぞれピックアップ部である矢羽式風向計および三杯型風速計を通じ、パルス信号として記録部にはいる。電気信号は2秒間隔で読みとられ、次の内容を10分ごとに解析する。

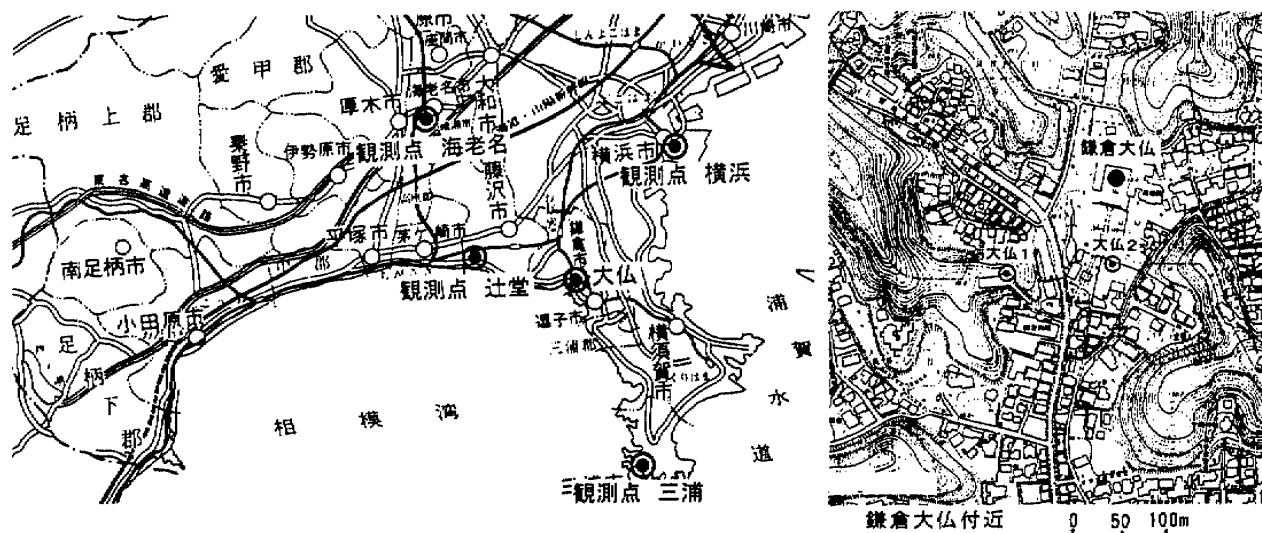


図3 鎌倉周辺で解析の対象とした風観測地点

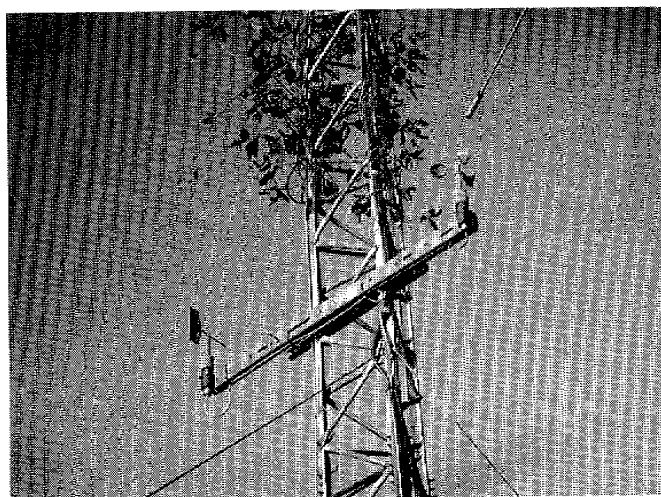


図4 観測状況(観測点 大仏2)

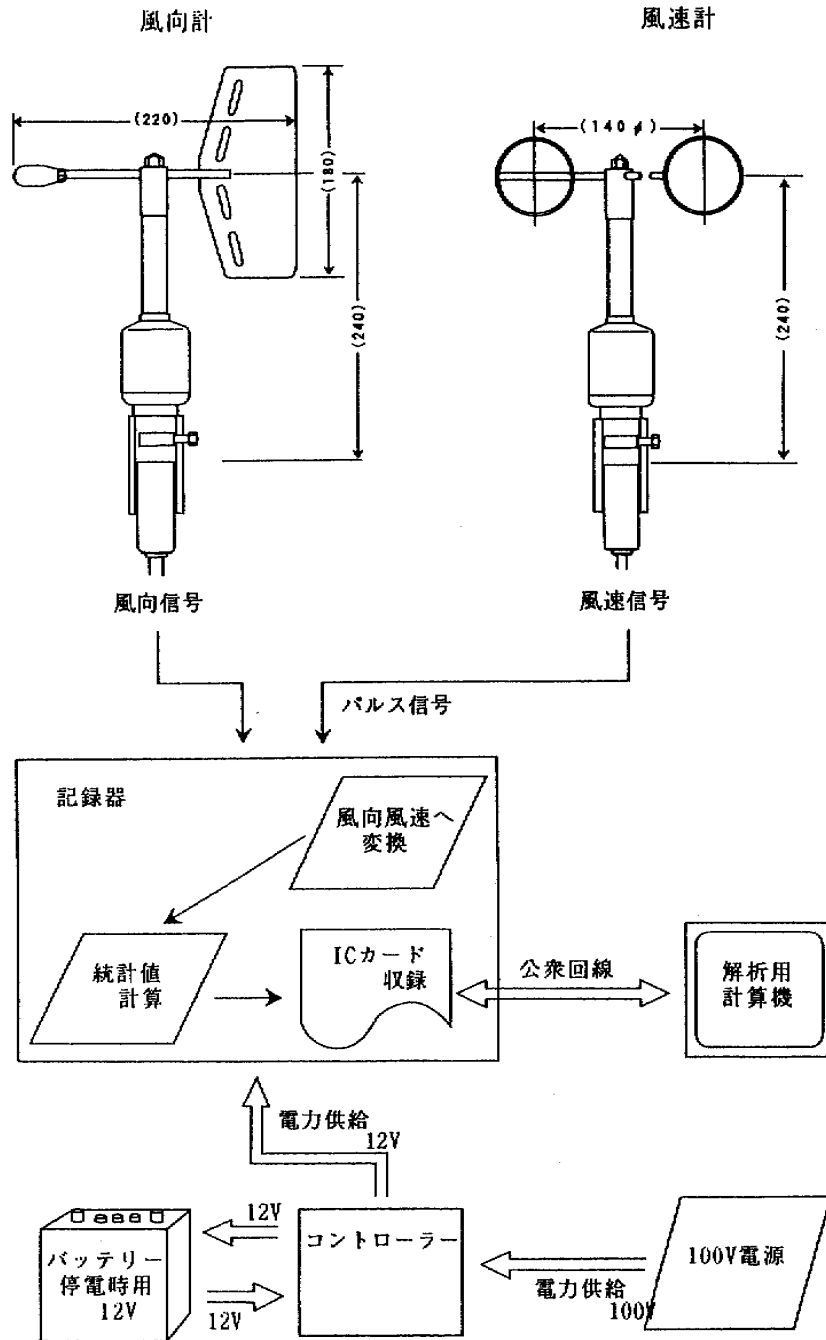


図5 風観測システムの概要

- (a) 10 分間平均風速
- (b) 10 分間中の最多風向とその頻度
- (c) 10 分間中の最大瞬間風速とその風向
- (d) 10 分間中の変動風速の標準偏差

解析された諸量は IC カードに収録され、このデータは NTT の公衆電話回線を通じホストコンピュータに転送される。なお、今回は上の(d) 10 分間の変動風速の標準偏差については解析の対象外とした。

3-2. 結果および考察

図6に各観測点の風向出現頻度を示す。解析の期間は、観測点大仏1, 2が平成6年(1994年)12月~平成7年(1995年)8月, その他の観測点は平成5~7年(1993~1995年)の3年間である。観測点大仏1は高台に位置し、西より以外の風はこの付近の代表的な風として考えることができる。この観測点での観測期間中の最大の平均風速は、南の風12.6 m/sであった。図6の全観測点とも、北よりの風として北あるいは北北東の風が卓越し、南よりの風として南あるいは南南西の風が卓越するという傾向が示される。ただし観測点横浜の風向頻度は、南よりの卓越風向が明瞭でないこと、および東よりの風の頻度が若干高いことで他の観測点の性状と異なる。風向別風向比を解析した結果からも、横浜だけが他の観測点と異なっていて、他は同じような傾向にあることがわかった。これは、観測点横浜は西から南にかけて比較的高い山があること、および東側に海があるための海風の影響が原因していると考えられる。観測点大仏1と大仏2の差をみると、卓越風向の軸が大仏1では南北、大仏2では北北東-南南西軸と、観測点大仏1が近くの地形にあまり影響されない傾向を示しているのに対し、大仏2は地形から明らかに推測される傾向が示されている。

図7は、観測点横浜での降水量が1 mm以上となるときの観測点横浜、大仏1、大仏2の風向発生頻度を示したものである。両観測点とも降水量1 mm以上の場合に、南よりの風の頻度が明らかに減少していることがわかる。この原因として降雨時の海風の減少が考えられるが、海陸風の影響をあまり受けないと考えられる5 m/s以上の風の解析結果も同様の傾向を示し、海風による影響は少ないものと推測される。同図には風速8 m/s以上の風の風向発生頻度も示した。この風速となると、南よりの風の頻度が非常に高くなる。以上から、鎌倉大仏付近では雨の日は北よりの風が極めて多く、風が強まると南よりの風の頻度が高まることがわかる。すなわち、この測定からも前章で述べたとおり、北よりの風によって京浜工業地帯などからの汚染物質が運ばれ、南よりの強風により海からの海塩粒子等が運ばれて、それぞれ鎌倉大仏に影響を与えているもの

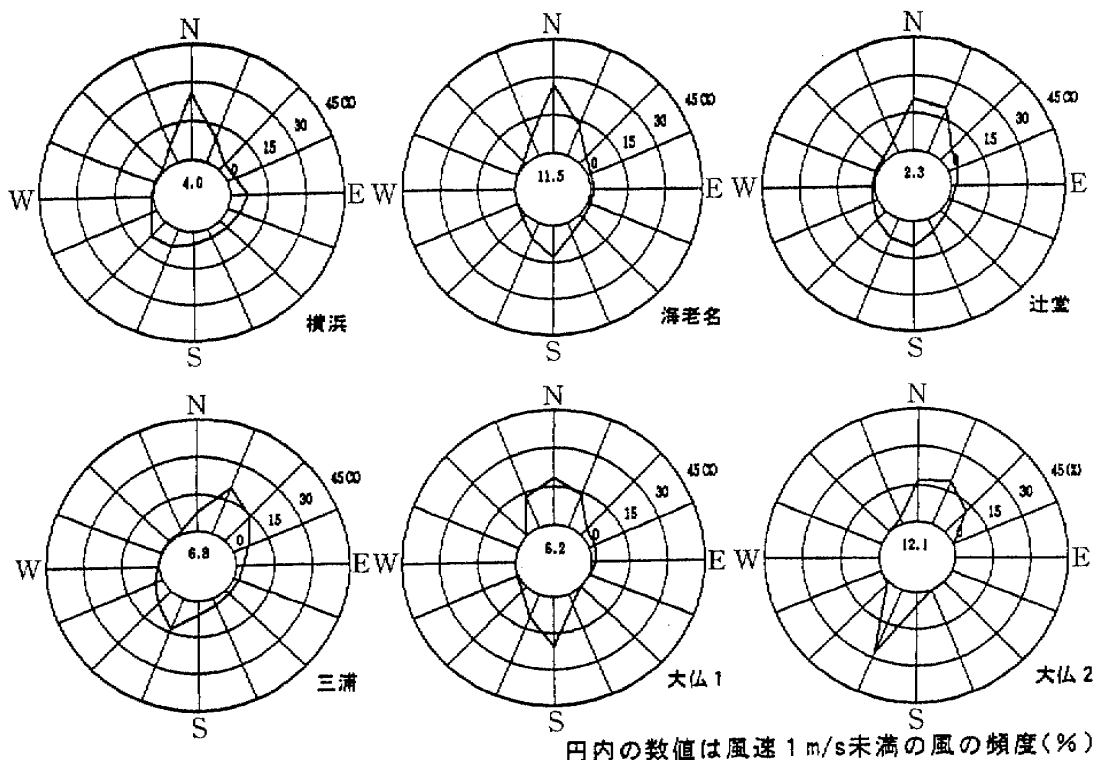


図6 風速1 m/s以上の風の風向出現頻度

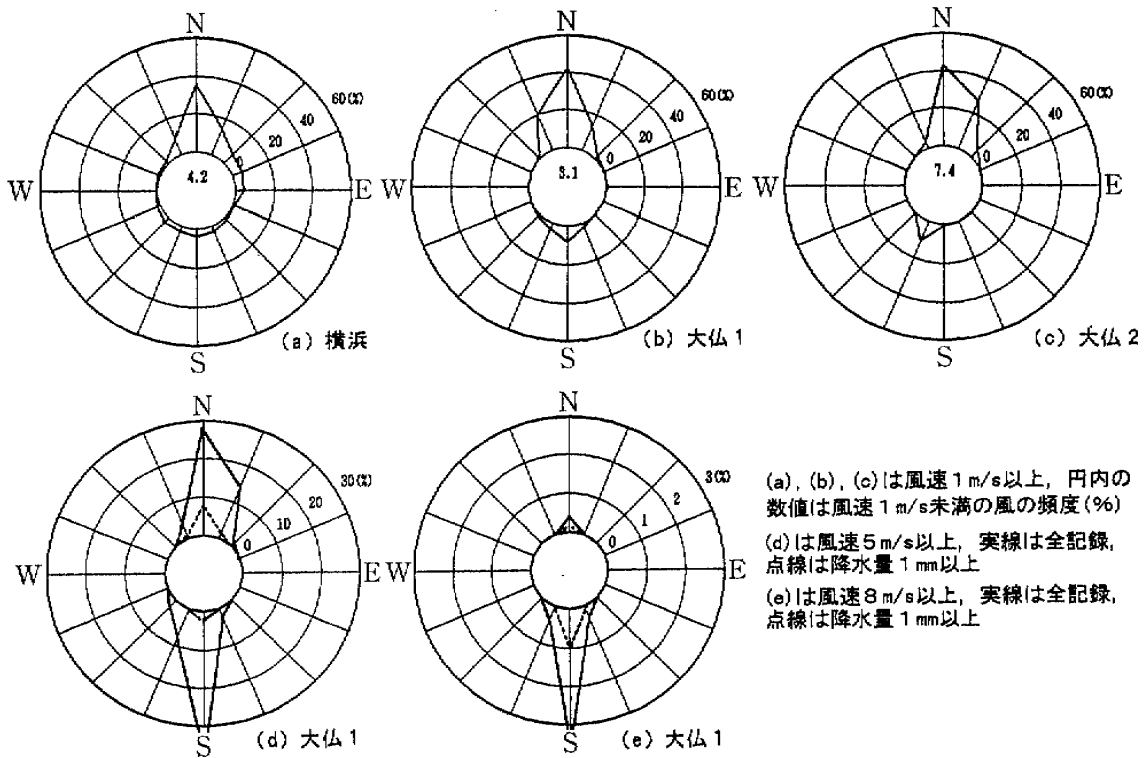


図7 降水量1 mm以上の時の風向出現頻度

と推測される。

4. 風洞実験

これまで述べてきた調査結果をもとに、さらに詳しく鎌倉大仏周りの風の流れの様子および鎌倉大仏壁面に作用する風圧力の分布を調べるための風洞実験を行った。本来、これらは実際に現地で計る方がよいが、実際の測定は困難なために風洞実験により行った。

4-1. 実験方法

(1) 使用風洞

実験に使用した風洞は、図8に示した境界層風洞（風工学研究所所有）である。風洞の断面は、幅3.1 m、高さ2.0 m、境界層長さ16 mである。

(2) 実験模型

実験に用いた模型は、図9, 10に示すような範囲を縮尺1/100で作製したものである。同図の半径100 mの範囲は家屋など詳細に再現しているが、その範囲外については、今回の実験結果に与える影響は少ないものと判断し、地形のみを再現した。風圧測定用の大仏本体は図13に示すようにポリウレタン樹脂によって作製したもので、風圧測定用内径1 mmφの風圧孔を設けている。

(3) 風洞内気流

風洞内気流は、計画地周辺の状況から想定される自然風の特徴をもつものとした。気流作成には、模型の風上にラフネスおよびスパイヤーを設置することによった。ちなみに平均風速の鉛直分布は次式で表される指数0.2のべき指数分布とした。図14に風洞内気流の平均風速と乱れ強さの鉛直分布を示す。

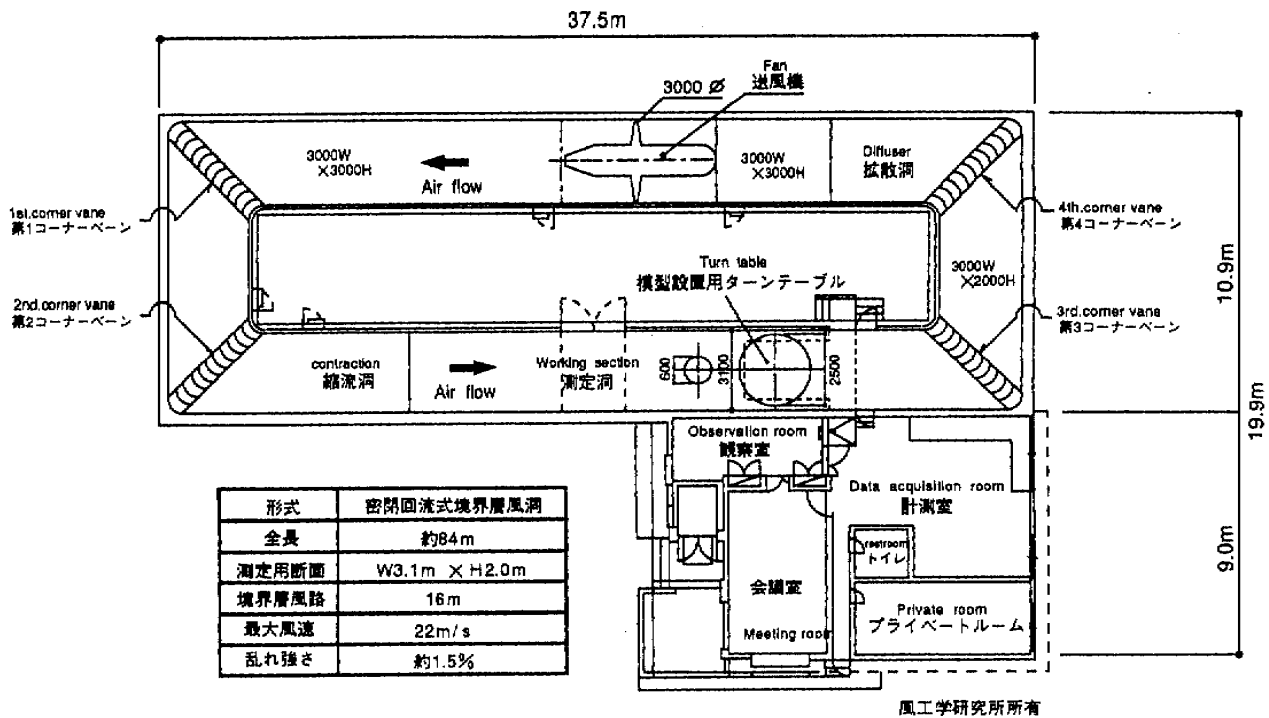


図8 使用風洞

$$U_z = U_{z_r} (Z/Z_r)^{0.2}$$

U_z : 高さ Z での風速

U_{z_r} : 高さ Z_r での風速

(4) 実験風向

実験風向は、北北西、北北東、北東、東北東、東、東南東、南東、南南東、南、南南西、南西、西南西、西、西北西、北西、北北西、北の正 16 方位である。実験模型は半径 100 m の範囲内は全ての風向に用いているが、当該地域で風向頻度の高い北北西、北、北北東、南の 4 風向については、その範囲以遠も風洞内に設置できるように作製した (図 10)。

(5) 測定点

風圧分布測定用の測定点は大仏表面に設けた 171 点とした。

(6) 測定方法

風圧測定は、模型の測定点からビニールチューブを介して風圧計により行った。測定概要を図 13 に示す。このほか流れのおおまかな様子をとらえるため、煙を用いて流れの可視化実験も行った。

4-2. 結果

各測定点で測定された風圧をもとに、次式を用いて平均風圧係数 C_{pe} を求めた。

$$C_{pe} = (p_e - p_s)_{MEAN} / q_r$$

$(p_e - p_s)_{MEAN}$: 平均風圧 (kgf/m^2)

q_r : 基準点 (大仏頂部高さ 12 m) での速度圧 (kgf/m^2)

この平均風圧は大仏外壁面に作用するもので、同一時刻に大仏内部に作用する風圧との差 (差圧) が大仏壁面に作用する力となる。すなわち、

$$W_p = q_r C$$

ただし、



図9 実験模型の再現範囲

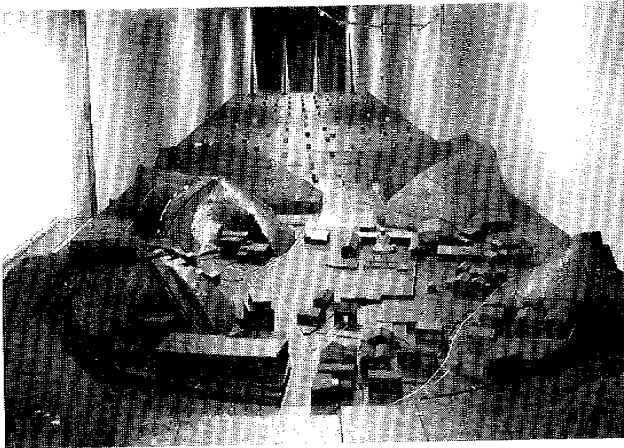


図 10 実験模型の全景および模型風上側の状況

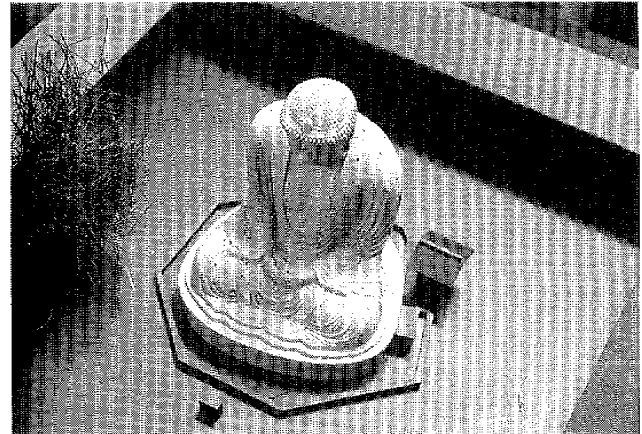


図 11 実験用風圧模型

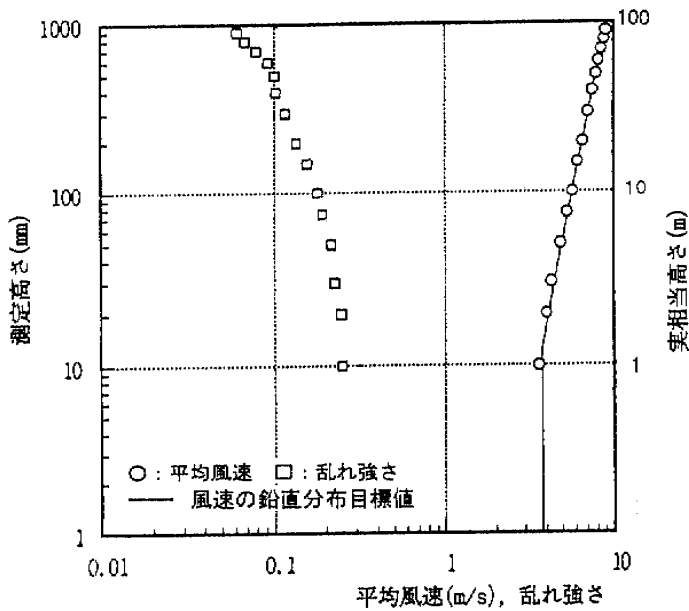


図 12 実験気流の平均風速および乱れ強さの鉛直分布

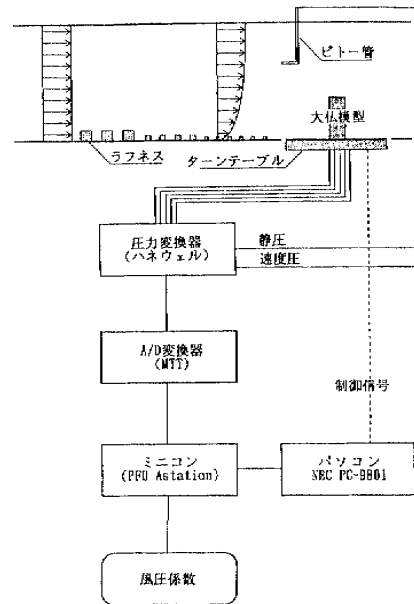


図 13 風圧の測定概要

$$q_r = \frac{\rho V_r^2}{2}$$

$$C = C_{pe} - C_{pi}$$

ここで、

W_p : 壁面に加わる風力 (kgf/m^2)

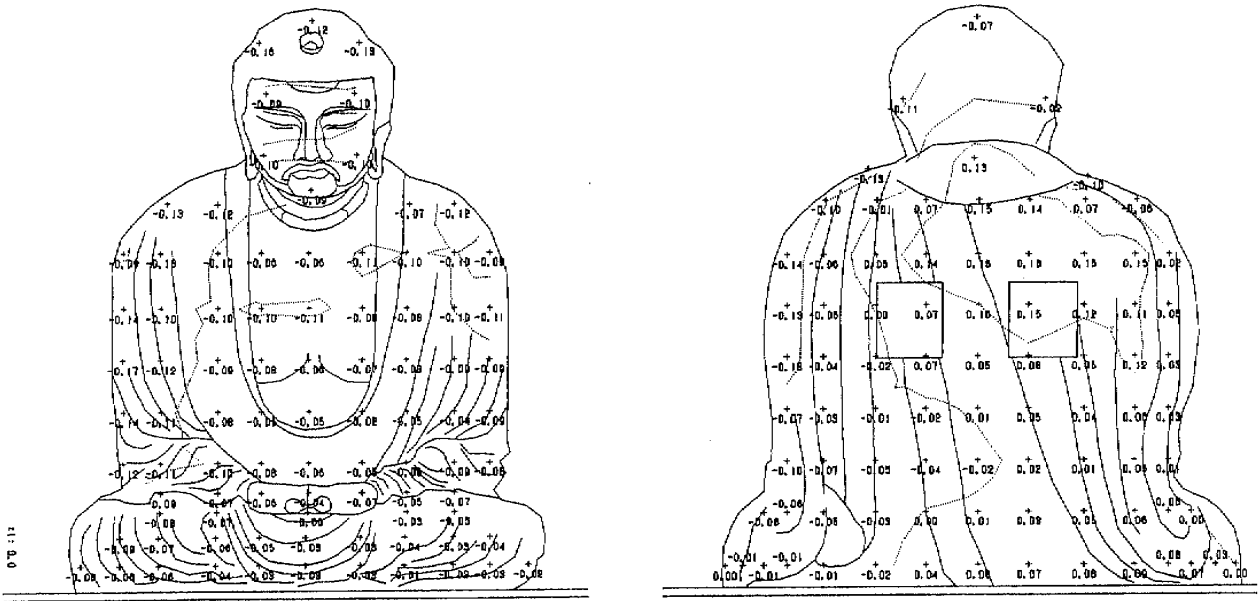
C : 風力係数

ρ : 空気密度 ($\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$)

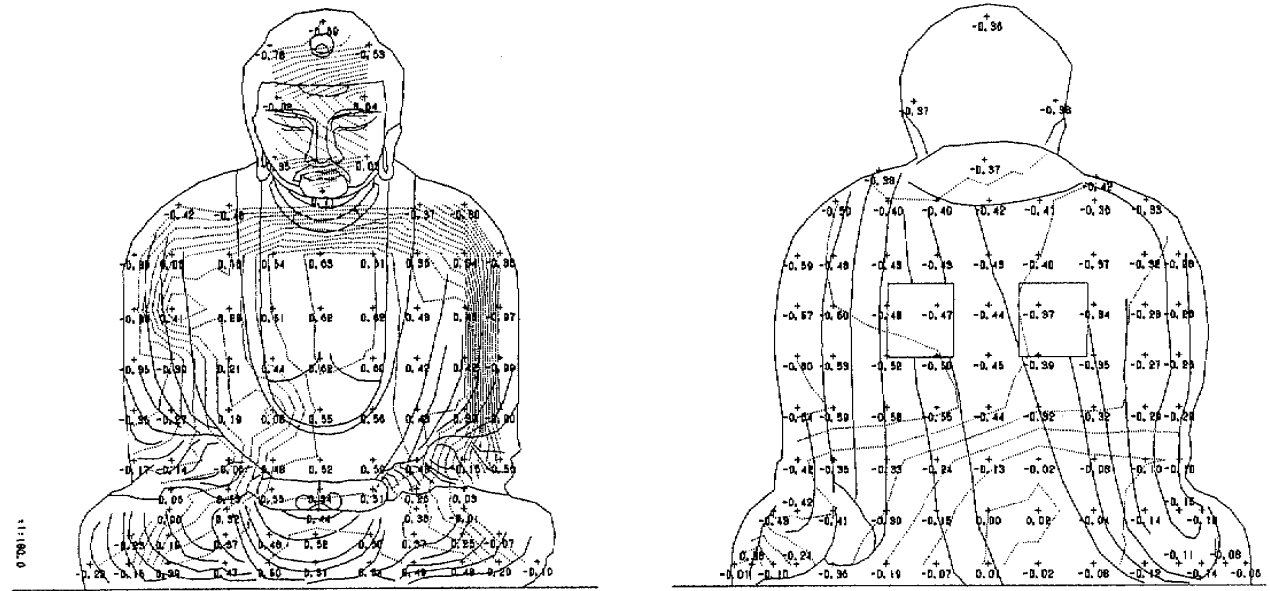
V_r : 基準点 (大仏頂部高さ 12 m) での風速 (m/s)

C_{pi} : 内圧係数

内圧係数は、今回のように大仏内部で強制的な給排気など行っていない場合には、開口部や隙



(a)北風



(b)南風

図 14 風圧分布

間などの風圧に応じた値となる。大仏には大きな開口部として、大仏東側にある出入り口と背面の窓があるが、ここでは常時開放されている出入り口付近の値に支配されるものとし、その付近の平均的な風圧を内圧とした。

実験結果をもとに風力係数を計算した結果は、図 14 に示すとおりである。図 14 には北風の場合(a)および南風の場合(b)の、2 風向についてのみ風力係数の分布を示してあるが、北よりの風で頻度の高い北北西、北、北北東の風の場合でも、流れの様子はほぼ同様である。

ここで示した風力係数は、比較的強風の場合、風速によって変化しない性質がある。したがって風力係数が 0.4 の点では、基準点での風速が 10 m/s の場合、2.5 kgf/m²の力が大仏壁面に作用していることとなる。図 14 では、内圧が出入り口付近のみの開口に支配されることとしたが、背面の窓も同時に開いているものとする、図 14 の風力係数は北風の場合 -0.09、南風の場合

+0.34だけ大きくなる。すなわち、北風の0.15の風力係数は0.06、南風の0.61は0.95になることとなる。

図15に煙の可視化実験の結果の例を示す。これを見ると北の風の場合、大仏風上側で風が淀んでいる様子、それに対し南の風の場合風上側であまり淀むことなく、大仏両サイドから吹き去る様子が窺える。

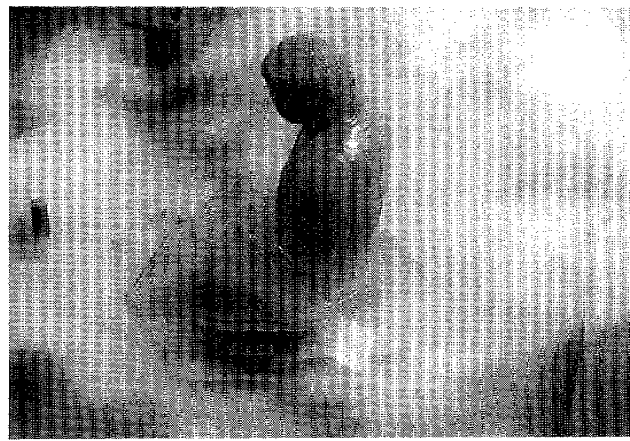
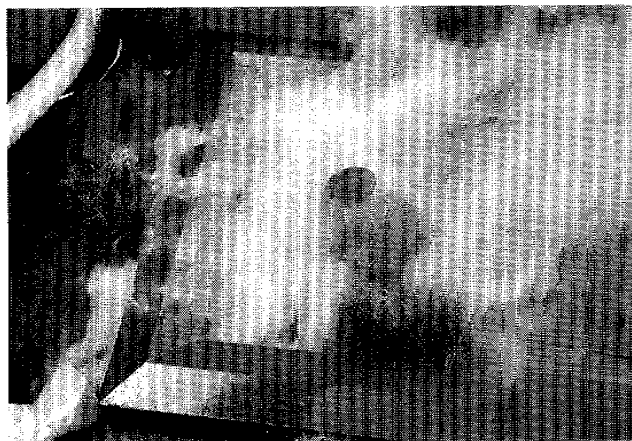
4-3. 考察

図14で風力係数が正の値は壁面の外側から内側への力、負の値はその逆を示す。このことは、壁面に開口部や隙間があると、正の値の部分では外側から内側に向かって風が吹き込むことも意味する。また数値が大きいものほどこの傾向が強まる。図14をみると北風の場合、風上面となる大仏背面の大部分で風圧は正の値となり、正面は負の値が示されている。南風も同様で、風上の正面で正の値、背面は負の値が示されている。北風に比べ南風の方が大きな数値が示されているのは、北風の場合風上側に山があるのに対し、南風の場合、風上側が開けているためである。

以上の結果から、次のように考えられる。北よりの風の場合、風上となる大仏背面に比較的穏やかに風が吹き付け、風下側へと流れ去る。この場合、大仏の高さの1/4程度以下の低い部分での流れは遅く、空気が淀む傾向がある。一方南風の場合には、風上側となる大仏正面に風が強く吹き付け、側面から強い風となって風下側へ巻き込む。

5. まとめ

- (1) 鎌倉市内の気温、湿度、風速、降雨量の場所による違いについては、定量的な面で差は若干見られるが、定性的な月変化は類似している。
- (2) 鎌倉大仏の周辺における風向の発生頻度は、三浦半島の西側ではほぼ同様な傾向が示され、北よりの風と南よりの風が卓越する傾向にある。北よりの風として、北と北北東、南よりの風として南、南南西の頻度が高い。大仏近くの風は谷筋に沿った風が多く、北北東と南南西を軸とした風向の風が卓越する。また、雨の日は北よりの風、強風時は南よりの風の頻度が高くなる。この測定結果は先の大仏表面の鏽の分析結果によって得られた、硫黄と塩素の分布と符合する。
- (3) 風向頻度の高い北よりおよび南よりの風について、風洞実験を行って鎌倉大仏直近の流れの



(a)風向：北(b)風向：南

図15 風洞実験での煙による可視化

状況を推測した。北よりの風の場合、風上となる大仏背面に比較的穏やかに風が吹き付け、風下側へとゆっくり流れ去る。この時、下層部で空気が淀む傾向がある。一方南よりの風の場合、風上となる大仏正面に風が強く吹き付け、側面から強い風となって風下側へ巻き込む。この時、大仏壁面に作用する風圧力は、北より、南よりの風ともに、風上面が正圧（外側から内側へ向かっての力）、風下面は負圧（内側から外側へ向かっての力）となる。また大仏風上側に障害物の少ない南よりの風の場合、強い風圧力となる。

謝 辞

測定を行うにあたって多くのお世話をいただいた佐藤住職始め、高德院の方々にお礼申し上げます。また研究を進めるについてご協力いただいた、文化庁美術工芸課、神奈川県教育委員会、鎌倉市教育委員会、その他、多くの関係の方々に感謝申し上げます。

引 用 文 献

- 1) 松田史朗・青木繁夫：高德院国宝銅像阿弥陀如来坐像の表面に生成する腐食生成物の解析，保存科学，35，1-20（1996）

Climate of the Great Buddha Image of Kotokuin Temple in Kamakura

Sadatoshi MIURA, Shigeo AOKI, Wataru KAWANOBE,
Osamu NAKAMURA* and Koichi MIYASHITA*

Climate has been measured at Kotokuin Temple and at three other places in Kamakura City from 1992. There were similar monthly changes of temperature, relative humidity, wind speed and rainfall. North and south winds are prominent at Kotokuin Temple: north wind from an industrial area is more frequent on a rainy day and south wind from the seaside on a windy day. The result corresponds to that of a former analysis of rust on the Great Buddha: sulfate was found on the back and chloride on the front. An experiment using a model of the Great Buddha was conducted in a wind tunnel. The result showed that north wind tended to stay at the lower part of the Great Buddha and that south wind gave stronger pressure to the front because the valley of the temple is open to the south.

* Wind Technology Laboratory