

設計基本風速の新しい評価手法の提案と測器補正

A NEW METHOD FOR EVALUATING DESIGN WIND SPEED AND CORRECTIONS FOR ANEMOMETERS

石原 孟¹⁾ 由田秀俊²⁾ 久保悠也³⁾ 藤野陽三⁴⁾

Takeshi ISHIHARA, Hidetoshi YOSHIDA, Yuya KUBO and Yozo FUJINO

ABSTRACT

The correction factors for various anemometers are proposed and their accuracy was examined. As a result, the change in the averaged annual maximum speeds almost disappears and the variation of 100-year wind with the statistical period decreases. Comparing the sampling errors in 100-year wind, it was found that the proposed correction factors are more accurate than conventional ones. In this study, a new method for estimating design wind speed is proposed to account for effect of unsteadiness in the natural wind. Design wind speeds evaluated by this method are consistent with those obtained by the conventional method at the meteorological stations where wind observation started before 1948, and give larger values at the stations where observation started after 1961.

Key Words: Corrections for anemometers, Unsteadiness of natural wind, Design wind speed

1. はじめに

構造物の風荷重の算定において、設計風速の見積もりは最も重要な作業の一つである。建設地点における設計風速(例えば、年最大風速の100年再現期待値)を現地観測から直接に求めるには少なくとも数10年の風観測データが必要である。しかし、このような長期にわたる現地観測を実施することはほとんど不可能であり、建設地点における短期風観測データと近くの気象官署で得られた長期風観測データを用いた相関解析により、間接的に建設地点における設計風速を推定する方法が用いられている。

ここで問題となるのは日本における風観測方法や測器は1929年以降4回にわたって変更され、気象官署における長期風観測資料を用いる場合には観測データに対して何らかの補正を行う必要があることである。しかし、このような観測方法および測器の変更による補正係数を系統的に調べた例がこれまでに少なく、測器補正係数の違いが年最大風速の極値分布に与える影響は不明である。一般に、風観測データに不均質なデータが含まれると、年平均風速の極値分布やそれに基づいて作られた基本風速の全国マップには不連続が生じる。

例えば、時間軸上に生じる不連続としては期間により再現期待値が変化してしまうことが挙げられる。本来、年最大風速の再現期待値を求める際には、統計年数が十分長ければ、どの期間のデータを用いても求められる再現期待値は理論上一致するはずである。しかし、不均質なデータが含まれる場合、対象期間内にそのデータを含むかによって再現期待値が変化してしまう。また空間上の不連続は風観測の開始時期が異なる全国の気象官署の風観測データにより基本風速のマップを作成する時に生じる。古い気象官署ほど測器変遷の影響を大きく受け、すべての期間における測器補正を行わないと、年最大風速の極値が過大または過小に評価されてしまう。一方、新しい気象官署は測器変遷の影響を殆ど受けない。このように、各気象官署における風観測の開始時期によりそれぞれ異なる割合で不均質なデータが含まれることになり、これにより作成された基本風速マップには空間的な不連続を含む。このような不連続性は結果的に設計風

1),2),3),4) 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 助教授, 大学院生, 大学院生, 教授

(〒113-8656

文京区本郷 7-3-1)

速にも含まれ、構造物の耐風安全性は場所によって変化してしまう。

そこで、本研究では、まず観測方法及び測器の変更が平均風速に与える影響を調べた過去の文献を調査し、観測方法及び測器ごとの補正係数を求めた。そして、これらの補正係数を用いて長期風観測データの均質化を行い、補正係数の違いが年最大風速の極値分布に与える影響を調べた。最後に、風の非定常性を着目し、設計基本風速に関する新しい評価方法を提案し、荷重指針と比較することにより、その有効性を明らかにする。本研究は日本風工学会・強風マップ研究会の一環として行ったものであり、強風マップ研究会が作成した日本各地の年最大風速のデータベースを使用した¹⁾。

2. 観測方法及び測器の補正

2.1 平均風速観測方法及び測器の変遷

表1は日本における風観測方法及び測器の変遷を示し、観測方法及び測器の変更は1929年以降4回にわたって行われていることが分かる。ここで、風観測データをこれらの変更に対応して5つの期間に分け、それぞれの期間における年最大風速の全国平均値を求めた。

観測方法及び測器の変更による平均風速の観測値への影響をまったく考慮せず、年最大風速の全国平均値を求めた場合、図1に示すように年最大風速の全国平均値は期間によって大きく変化する。図中の実線は5つの各期間の平均値を示す。地表面粗度の経年変化による平均風速の減少傾向と測器高度の上昇による平均風速値の増大が相殺しあう例もあることを考えると、年最大風速の全国平均値の経年変化は観測方法及び測器の変更による部分が大きい可能性がある。

表1 観測方法及び測器の変遷

期間	風速計	評価時間	備考
1929-1939	4杯型風程式風速計(ロビンソン風速計)	20分間	倉石公式の適用
1940-1948		10分間	
1949-1960		10分間	
1961-1974	3杯型風速計	10分間	
1975-	風車型風向風速計	10分間	

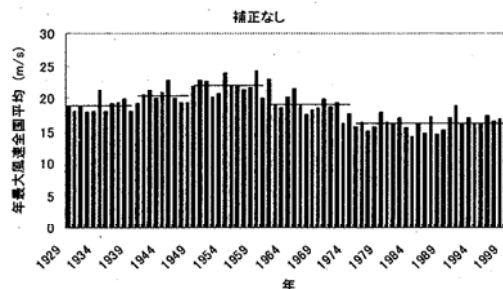


図1 年最大風速の全国平均値の経年変化

2.2 評価時間の補正

1929年～1939年は平均風速の評価時間が現行の10分と異なり、20分である(表1)。そのため、この期間における平均風速は小さく評価されている可能性がある。実際、この期間における年最大風速の全国平均値は10分評価時間を用いた1940年～1948年における年最大風速の全国平均値より小さくなっている(図1)。評価時間の変更が平均風速に与える影響を調べた研究がある^{2),3)}。斉藤²⁾は東京の1953年3月1日から3月30日までの30日間の10分平均風速と20分平均風速との関係を回帰直線より近似し、20分平均風速は6%程度低くなることを示した。その後、斉藤、檀上³⁾が全国76地点において10分間平均風速の累年平均値と20分間平均風速のそれとの比を求め、全国平均で1.1という値を示した。本研究はこの値を採用する。

2.3 測器の特性

表1に示すように日本における風観測に用いた風速計は年代とともに4杯型風程式風速計(以下4杯型)、3杯風速計(以下3杯型)、風車型風向風速計(以下風車型)と変わってきた。これらの風速計は、それぞれ異なった特性を持ち、観測された平均風速値にも大きな差がある。風観測用測器の特性に関する研究報告が多くある^{4)~9)}。4杯型と3杯型は構造が簡単で、安定して風速を測定できるという特徴を持ち、長年に渡って用いられてきた。しかし、風杯型風速計により測定された値は、ベクトル風速ではないため、風速の風方向成分の平均値を測定する超音波風速計から得られる風速値と異なり、また風直角成分の乱れの大きさによって変化する⁴⁾。風杯型風速計の欠点を是正するために開発された風車型風速計は、乱れの強さが非常に大きい場合を除いて、風杯型風速計より良い性能を示し、超音波風速計に近い平均値を示す^{5),6)}。

以上から、風観測に用いられてきた風速計は計測技術の進歩に伴い、4杯型から3杯型、そして風車型へと変化し、その性能も向上してきた。現時点では風車型風速計が最も信頼でき、その観測値を基準値とするのが妥当と言えよう。

表2 測器補正係数の一覧表

	評価時間の補正係数	風洞実験係数 C の除去	4 杯から 3 杯への補正係数	3 杯から風車型への補正係数	本研究	荷重指針
1929~1939	1.10		0.95	0.90	0.94	1.10
1940~1948					0.86	1.00
1949~1960		1/C			0.86/C	1/C
1961~1974					0.90	1.00
1975~					1.00	1.00

2.4 測器の補正

まず3杯型から風車型風速計への補正係数について調べる。3杯型風速計と風車型風速計の同時計測に関する論文は幾つかある。例えば、光田⁷⁾は3杯型と風車型風速計による同時観測を行い、1969年の台風時の平均風速比（風車型/3杯型）は約0.9であることを明らかにした。また風の測器変更に伴う統計の接続問題を詳しく調査した気象庁観測部統計課の資料⁸⁾によると、風車型による平均風速は3杯型による値に比べ全国平均で約10%小さい。以上から、3杯型から風車型風速計への補正係数を0.9とするのは妥当である。

次に4杯型から3杯型風速計への補正係数について考える。篠原⁹⁾は、4杯型と3杯型風速計により測定された平均風速の違いを観測と風洞実験により調べた。その結果、日平均風速が4m/sを越えると、4杯型による風速値は3杯型より10%程度大きい値を示し、風洞実験も同じ値を示した。同様な結論は光田⁷⁾による同時観測からも得られている。

4杯型風速計の補正は3杯型風速計に比べ、すこし複雑である。4杯型風速計による観測方法は年代によって異なる。1940年～1948年の観測データは風速計の測定値であるのに対して、1949年～1960年の観測データは以下に示すように風速計の測定値に倉石公式と呼ばれる風洞実験係数Cを掛けた値となっている。

$$V = CV' \quad (1)$$

$$\log_{10} C = 0.3411 - 0.2151 \log_{10}(V' + 10)$$

ここで、 V' は1940年～1948年の期間の風速値に対応し、風速計による観測値である。一方、 V は1949年～1960年の風速記録値に対応し、風速計による測定値の修正値である。風洞実験係数Cを除去すると、年最大風速の全国平均値が約5%下がる¹⁰⁾。この結果と篠原⁹⁾の結果とをあわせて考えると、風洞実験係数Cを取り除いた後の4杯型風速計による風速値を3杯型風速計の値に変換する時には補正係数0.95とするのが妥当である。

本研究で得られた測器の補正値を、荷重指針のものと共に表2に示す。これらの補正係数を用いて算出された年最大風速の全国平均値を図2と図3に示す。本研究で採用した測器補正係数を用いる場合、観測方法及び測器の変更による年最大風速への影響をほぼ取り除けることが分かる。

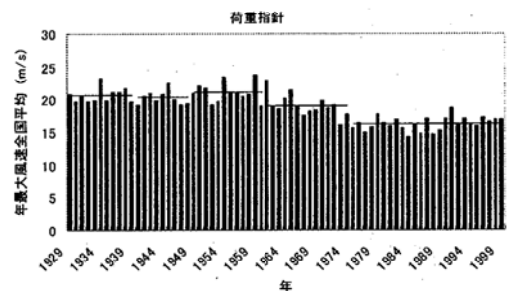


図2 荷重指針から求めた年最大風速の全国平均値

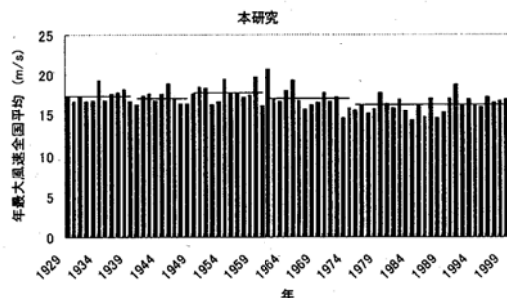


図3 本研究から求めた年最大風速の全国平均値

3. 測器補正の年最大風速の極値分布への影響

本研究で提案した測器補正係数の有効性を調べるために、全国150ヶ所の気象官署における年最大風速の極値分布を求めた。地表面粗度や小地形の影響に対する評価は荷重指針に採用された方法に準じた¹¹⁾。風速の鉛直分布は地表面粗度の状況に応じてべき法則に従い、上空高での風速に変換し、地表面粗度区分Ⅱにおける地上10mの風速に変換し、基準状態での風速を求めた。この風速を用いて、積率法により各地点のt年再現期待値 U_t と標本誤差 D_t を求めた。

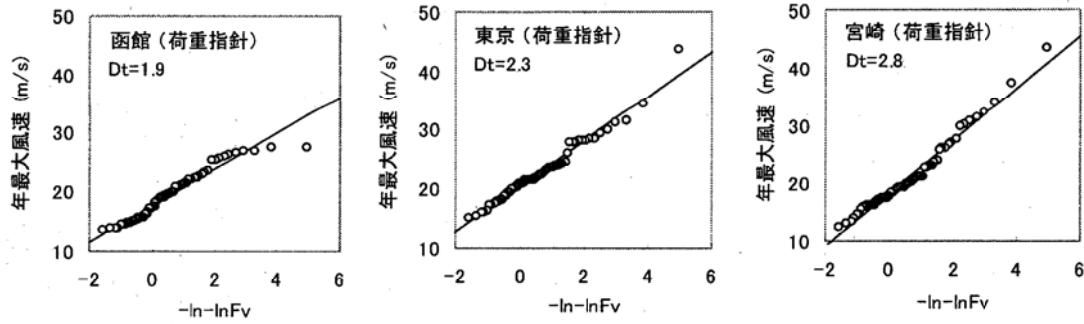


図4 荷重指針採用の測器補正による年最大風速の極値分布

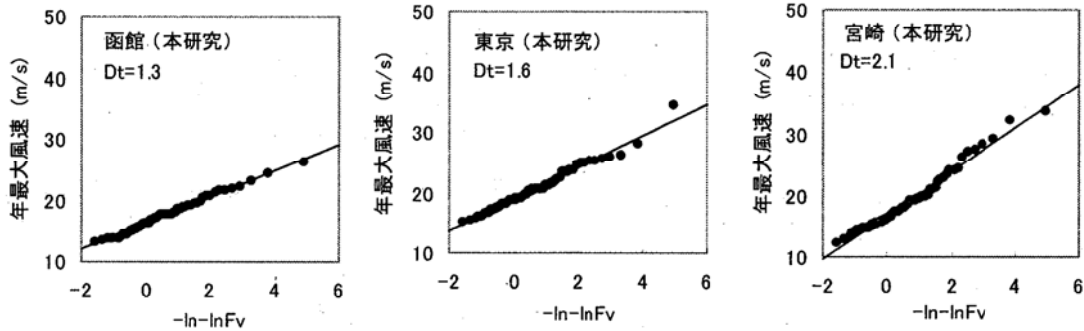


図5 本研究提案の測器補正による年最大風速の極値分布

$$\frac{U_i - U_{10}''}{\sigma_{10}''} = \frac{y_i - 0.5772}{1.2825} = y_{st} \quad (2)$$

$$y_i = -\ln(-\ln F_v), \quad F_v = 1 - \frac{1}{t} \quad (3)$$

$$D_i = \sigma_{10}'' \sqrt{C_i / N} \quad (4)$$

$$C_i = 1.1y_{st}^2 + 1.1396y_{st} + 1.0 \quad (5)$$

表3 100年再現期待値の統計年数による変化

	1929～1999年 (m/s)	1961～1999年 (m/s)	両期間の差 (m/s)
荷重指針	34.12	29.70	4.42
本研究	29.65	28.37	1.28

ここで、 U_{10}'' 、 σ_{10}'' はそれぞれ地表面粗度区分Ⅱの地上10m高さに換算された年最大風速の標本平均値と標本標準偏差、 N はデータ数、 t は再現期間である。

図4には荷重指針に採用された測器補正係数により求めた年最大風速の極値分布の例を示し、図中の実線は年最大風速の Gumbel 分布を示す。図5には本研究で提案された測器補正係数により求めた年最大風速の極値分布を示す。本研究で提案された補正係数を用いる場合は年最大風速の Gumbel 分布への適合性がよくなり、100年再現期待値の標本誤差も下がる。100年再現期待値の標本誤差の全国平均値は荷重指針の2.3から本研究の1.8まで下がっている。同様の傾向が田村ら¹²⁾の論文にも見られる。

次に、測器補正係数の違いが年最大風速の極値分布に与える影響を調べるために、1929年～1999年の全データと4杯型を含まない1961年～1999年のデータを用いて、全国150ヶ所の気象官署における年最大風速の極値分布を求め、図6、図7に示す。従来の荷重指針の補正係数を用いる場合、年最大風速の極値分布は統計期間によって大きく変化する。一方、本研究で採用された補正係数を用いる場合、統計期間による極値分布の変化がかなり小さくなる。

100年再現期待値の統計年数による変化を表3に示す。従来の補正係数を用いる場合、100年再現期待値の差は4.42m/sで、統計年数の増大に伴い大きくなることが分かる。これは統計年数が長くなると、不均質なデータが多く含まれることによる。一方、本研究で採用された補正係数を用いる場合、その差が1.28m/sとなり、統計年数による100年再現期待値の変化がかなり小さくなる。

以上から分かるように、測器補正が年最大風速の極値分布に大きな影響を与える。本研究で提案した測器補正係数を用いる場合は100年再現期待値の標本誤差が小さくなり、また統計期間の違いによる100年再現期待値の差も小さい。

4. 設計基本風速の新しい評価方法の提案

上述したように、均質な風観測データを得るためには本研究で提案した測器補正係数を用いる必要がある。しかし、この測器補正係数を用いて求めた年最大風速の100年再現期待値をそのまま設計基本風速として採用してよいかどうかについては慎重に議論する必要がある。なぜならば、表3から分かるように、荷重指針に採用された測器補正係数を用いた場合に比べ、本研究で求めた年最大風速の100年再現期待値は全国平均で約4.5m/sが下がる。

第2章に述べたように、4杯風速計や3杯風速計は、風車型風速計と比べ、風速を大きく評価している。本研究のように、風車型風速計をベースに測器補正を行うと、年最大風速の100年再現期待値が下がるのは当然のことである。ここで、本研究で求めた年最大風速の100年再現期待値を基準値とすれば、荷重指針の方法で求めた年最大風速の100年再現期待値は基準値に対して、1より大きい係数、すなわち、安全係数を乗じていることを意味する。ここで問題となるのはこの安全係数の物理的な解釈が不明であり、また気象官署における風観測の開始時期によって変化してしまう点である。そこで、本研究では風の非定常効果を表す係数を導入し、設計基本風速の新しい評価方法を提案する。

4.1 自然風の非定常性の風荷重への影響

構造物に作用する風荷重は、平均風速、乱れの強さの他に、風速のピークファクタにも依存する。規模効果や動的効果が無視できる小規模な構造物に作用する最大風荷重は次式により表される。

$$F = (1 + 2gI_u) \frac{1}{2} \rho U^2 A C_D \quad (6)$$

ここで、 g はピークファクタ、 I_u は乱れの強さ、 ρ は空気密度、 A は受風

面積、 C_D は空気力係数、 U は設計風速である。現行の荷重指針では変動風速が定常過程にあると仮定し、 $g=3.5$ を採用している。しかし、北川ら¹³⁾の最近の研究によると、平均風速(33m/s)、乱れのスケール L_u (193m)を固定し、乱れの強さ I_u を3~15%の範囲で変化させた場合、構造物のガスト応答のピークファクタは風の性質によって大きく変化する。非定常な風の場合にはピークファクタの平均値が4.55となり、6を超えるケースもある。勿論固有振動数との絡みがあり、ガスト応答のピークファクタと風速のそれとは若干異なるが、同様な結論は風速のピークファクタについても言える。

4.2 自然風の非定常性を考慮した設計基本風速の提案

以上のことから、従来の設計基本風速に含まれている安全係数を外した場合には、自然風の非定常効果を考慮する必要がある。自然風の非定常効果を考慮する方法は二つある。一つはピークファクタの値を解析または観測に基づき大きな値を設定する方法、もう一つは非定常効果を設計基本風速に含ませる方法である。一番目の方法では非定常性を直接に取り扱うことで、物理的な意味が明確であるが、実際には使いにくい面がある。例えば、大規模な地形や台風時の積乱雲による非定常的な風を風洞実験の中に再現することが極めて難しい。二番目の方法では自然風の非定常効果を設計基本風速のみに反映させることで、従来の理論と風洞実験手法がそのまま用いることができる。本研究では二番目の方法を示す。問題を簡単化するために、設計基本風速を評価する時に用いた粗度区分IIの地上10mの風を対象とする。ここで、非定常な風のピークファクタを g_{uns} とし、風の非定常効果を表す係数を E_{uns} とする。構造物に作用する最大風荷重が評価方法によらず一定であることを考えると、次式が得られる。

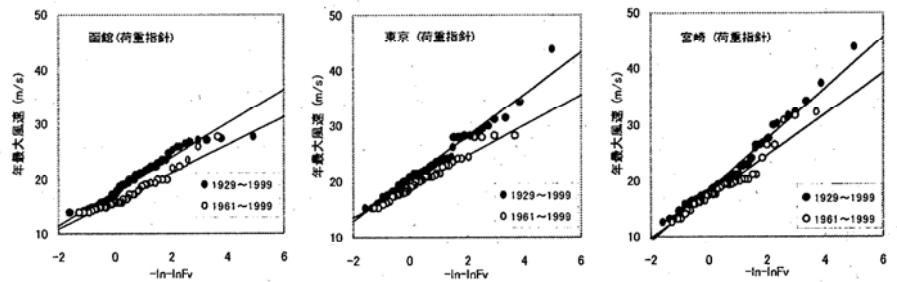


図6 年最大風速の極値分布の統計期間による変化

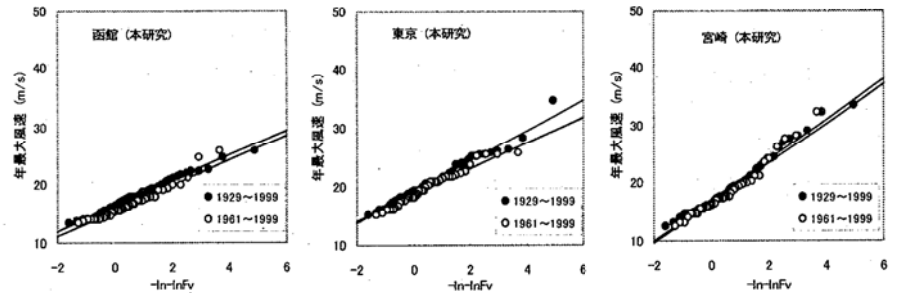


図7 年最大風速の極値分布の統計期間による変化

$$(1+2g_{\text{uns}}I_{10})\frac{1}{2}\rho(U_{10}(100))^2AC_D$$

$$=(1+2gI_{10})\frac{1}{2}\rho(E_{\text{uns}}U_{10}(100))^2AC_D$$

式(7)の左辺は非定常風のピークファクタを直接用いて最大風荷重を評価する式であり、右辺は非定常効果係数を用いた最大風荷重の評価式である。式(7)を変形すると、風の非定常効果係数 E_{uns} は次のように表される。

$$E_{\text{uns}} = \sqrt{\frac{1+2g_{\text{uns}}I_{10}}{1+2gI_{10}}} \quad (8)$$

ここで、 I_{10} は粗度区分 II の地上 10m の乱れの強さを表

し、荷重指針では 0.204 となる。更に $g_{\text{uns}}=5.5$ と仮定すると、 $E_{\text{uns}}=1.16$ が得られる。本研究で提案された測器補正係数により求めた年最大風速の 100 期待値 $U_{10}(100)$ に、非定常効果係数 E_{uns} を乗じて、設計基本風速を評価する。

最後に、本研究で提案した設計基準風速と荷重指針の方法により求めた設計基準風速との関係を調べる。二つの評価方法により求めた設計基本風速の差を気象官署の風観測の開始年代順に図 8 に示した。図中の細い実線の折れ線は気象官署の数、縦の棒はその年の平均値、太い横の棒は表 1 に示す各期間における平均値を表す。各期間における気象官署の個数も図に併記した。この図から分かるように、本研究で提案した方法で得られた設計基準風速は風観測が 1948 年以前から開始された気象官署においては荷重指針の方法で得られた設計基準風速と同じ値を示す。一方、風観測が 1961 年以後に開始された気象官署では荷重指針の値より平均で 3.44m/s 大きくなっていることが分かる。言い換えれば、1961 年以後に風観測が開始された気象官署では荷重指針の方法により求められた設計基準風速が過小評価されている。

5. まとめ

本研究では気象官署における風観測方法及び測器の変更を調査し、測器補正係数の違いが年最大風速の極値分布に与える影響を明らかにした。更に自然風の非定常性を着目し、自然風の非定常効果を考慮した設計基本風速の評価方法を提案した。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 観測方法及び測器の変更が平均風速に与える影響を調査し、新しい測器補正係数を提案した。これらの補正係数を用いる場合、観測方法及び測器の変更による年最大風速の経年変化が殆どなくなることが分かった。
- 2) 新しい測器補正係数により均質化された年最大風速は Gumbel 分布への適合性がよくなり、100 年再現期待値の標準誤差が約 28% 下がると共に、統計期間の違いによる 100 年再現期待値の差が小さくなることが分かった。
- 3) 本研究では風の非定常効果係数を導入し、設計基本風速の新しい評価方法を提案した。これにより、安全係数が統計年数により変化する従来の評価方法の問題点を解決し、全国で同一な安全率を確保することが可能となった。

参考文献

- 1) 石原孟, 他: 日本各地の年最大風速のデータベースの構築と測器補正, 日本風工学会誌, 第 92 号, pp. 5-54, 2002.
- 2) 斉藤鍊一: 観測法の変更が風速観測値に及ぼした影響, 研究時報 7, pp. 770-778, 1956.
- 3) 斉藤鍊一, 壇上得爾: 日本各地の年最大風速, 災害科学研究会, 1962.
- 4) L. Kristensen: Cap anemometer behavior in turbulent environment, J. of Atmos. and Oceanic Tech, Vol. 15, pp. 5-17, 1998.
- 5) N. G. Mortensen: Wind measurements for wind energy applications - a review, Proc. of the 16th British wind energy association conference, pp. 353-360, 1994.
- 6) 井上典久, 広田充伸, 吉川永子: 測器補正係数算出のための風向風速計の比較試験, 平成 11 年電気学会全国大会, pp. 7-19, 1999.
- 7) 光田寧: 種々の風速計の比較について, 京大防災研究所年報, 第 13A, pp. 441-448, 1970.
- 8) 観測部統計課: 風の測器変更に伴う統計の接続問題について, 測候時報, 46, pp. 139-142, 1979.
- 9) 篠原武次: 三杯風速計の実用試験結果について, 研究時報, 10, pp. 587-590, 1958.
- 10) 久保悠也: 長期地上気象観測による設計基本風速の評価手法の構築, 東京大学卒業論文, 2002.
- 11) 中村修, 他: 建築物設計用の基本風速分布図, 日本建築学会技術報告集, 第 1 号, pp. 120-125, 1995.
- 12) 田村幸雄, 大竹和夫, 中村修, 鈴木雅靖: 風速の鉛直分布の年変化を考慮した再現期待値, 第 12 回風工学シンポジウム, pp. 43-48, 1992.
- 13) 北川徹哉, 野村卓史, 橋本雅俊: 非定常風速変動におけるガスト応答特性に関する解析的検討, 第 16 回風工学シンポジウム, pp. 393-398, 2000.

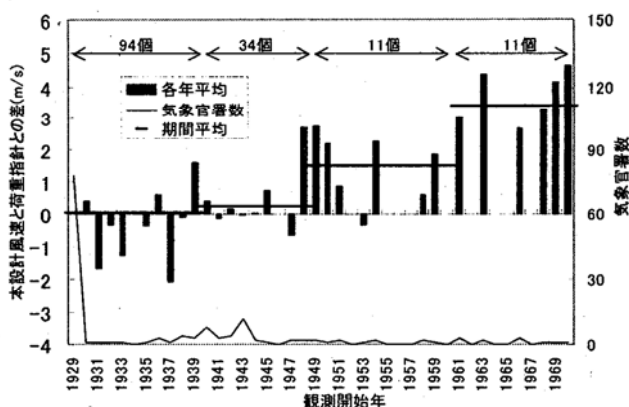


図 8 風観測の開始年代別設計基本風速の差