

大型台風にもなった気象官署の突風率の長期変化*

桑 形 恒 男**

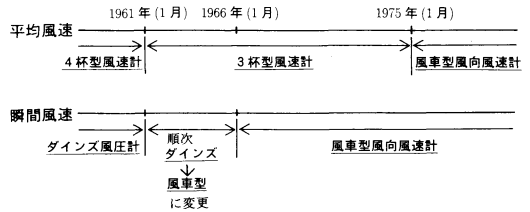
要 旨

過去 40 年間に日本に襲った主要な大型台風時の気象データを用いて、全国気象官署における突風率(=最大瞬間風速/最大風速)の長期変化を調べた。その結果、突風率はここ 40 年間で 1.4 前後から 2.0 前後の値へと大きく増加していることがわかった。風速の測定方法はこの 40 年間で大きく変化しており、それが突風率の見かけ上の増加を引き起こしていたことが明らかになった。またその一方で、都市化にともなう地表面粗度 z_0 の増加も突風率増加の原因の 1 つになっている可能性が理論と解析の両面から示唆された。

1. はじめに

災害科学や構造工学などの分野では、強風時に気象官署で実測される突風率(=最大瞬間風速/10 分間平均最大風速)の値がよく利用される。突風率の値は測器の特性や地表面の空気力学的粗度 z_0 の大きさによって変化する。ところが風速の測定方法はこの 40 年間で大きく変化しており、気象台周辺の都市化にともなう z_0 の値も大きくなってきている。本論文ではそれら要因にともなう強風時の突風率がここ 40 年間でどのように変化してきたかを、日本に上陸した主要な 8 個の大型台風時の風速データを用いて解析し、同時に現在の気象官署において突風率のとりうる値の範囲を理論的に考察する。

一般に風工学の分野では、突風率は 10 分間平均風速とその 10 分内の最大瞬間風速の比として定義される。それに対して本研究では、台風通過時に各気象官署で記録された 10 分間平均最大風速 u_{10max} と最大瞬間風速 u_{max} の比 u_{max}/u_{10max} をあらためて突風率として定義した。 u_{10max} と u_{max} の出現時刻が近ければ、両者の突風率はほぼ同一の値をとるが、出現時刻が離れている場合にはその値が違ってくる可能性がある。そこで、今回解析する 8 個の台風に対し、各台風ごとに風速



第 1 図 風速計測器の変遷。

データを調べてみたところ、 u_{10max} と u_{max} が同一時刻に出現した地点が全体の 4~5 割となり、1 時間以内に出現した地点までを含めると 7~8 割にまで達することがわかった。したがって、今回定義した突風率は数値的には従来から風工学の分野で定義されている突風率と近似的に同一視してよいと判断して話を進める。

2. 測器の変遷

過去 40 年間の気象官署における風速計測器の変遷を第 1 図に示した。従来、平均風速と瞬間風速はそれぞれ異なった測器で観測されていたが、最近共通の測器で観測されるようになった。瞬間風速は 1960 年以前はダインス風圧計で観測されてきたが、1961 年から徐々に北から風車型風向風速計(プロペラ型)に切り替えられはじめ、1965 年までには全気象官署で風車型風向風速計で観測されるようになった。一方、平均風速は 1960 年までは 4 杯ロビンソン型風速計で観測されていたが、1961 年 1 月からは 3 杯型風速計に移行し、1975 年 1 月からは瞬間風速と同様に風車型風向風速計で観測されるようになった。

* Long term variation of gust factor at the Japanese meteorological station under wind storm condition of strong Typhoon.

** Tsuneo Kuwagata, 東北大学理学部地球物理学教室。現 東北農業試験場。

—1992 年 5 月 25 日受領—

—1992 年 9 月 11 日受理—

第1表 本論文で設定した、測器間の観測値の違いを換算するためのファクター。各測器の測定値にそれぞれのファクターをかけることによって、風車型風向風速計の測定値に換算する。

| | 測器 | ファクター |
|--------|----------|-------|
| 最大風速 | 4杯風速計 | 0.82 |
| | 3杯風速計 | 0.90 |
| | 風車型風向風速計 | 1.00 |
| 最大瞬間風速 | ダイズ風圧計 | 1.05 |
| 風速 | 風車型風向風速計 | 1.00 |

測器の特性や検定方法などの問題で、異なる2つの測器で風速を観測しても必ずしも同一の値を示すとは限らない。これら測器間の器差に関しては気象庁などを中心に種々の調査が行われている（例えば気象庁観測部統計課，1967，1979；和田と大谷，1982；藤谷，1990）。このうちはじめの3つの文献では、測器が変更になった前後の風速データを統計的に比較することによって、異なる測器間の器差の定量化を試みている。本研究ではこれら3つの論文の結果を参考にして、各測器間の測定値の違いを換算するためのファクターを第1表のように設定した。この表によれば、特に平均風速において測器間の測定値の違いが大きいがわかる。ただしこれらファクターは気象庁として正式に決められたものではないことに注意しなければいけない。現実には測器間の観測値の違いを厳密に補正することは難しく、これら換算ファクターはあくまでも、本論文中で測器間の器差を大まかに補正するために設定されたものである。

3. 理論的な関係

本章では突風率のとり得る値の範囲、およびに地衡風速（厳密には傾度風速のことを指す）と最大風速または最大瞬間風速との関係を大気境界層の理論的關係を用いて評価する。なおここでは中立な境界層を仮定し、近藤と桑形（1984）の解析方法にしたがう。また最大風速と最大瞬間風速は同時刻に記録したものと想定する。

中立な接地境界層内（地上約100 m以下）では、次式で示される風速の対数分布が成り立つ。

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z_A}{z_0} \right) \quad (1)$$

ここで u_* は摩擦速度、 $k (= 0.4)$ はカルマン定数、 z_0 は地表面粗度、 u は地上高度 z_A における風速をそれぞれ

表している。一方、主風向方向の風速の乱れの標準偏差 σ_u と摩擦速度のあいだには次の関係が成り立っている。

$$\sigma_u / u_* = f_u \quad (2)$$

ここで f_u は大気安定度の関数であり、中立な条件下では2.5～3程度の値をとる。

最大瞬間風速 u_{max} は風速の乱れによって生じるので、次のように表すことができる。

$$u_{max} = u + \alpha \sigma_u \quad (3)$$

ここで α は風速計の追従性および風速の乱れの状態などに依存する定数である。

(1)～(3)式から σ_u と u_* を消去して整理すると、

$$u_{max} / u = 1 + k f_u \alpha / \ln \left(\frac{z_A}{z_0} \right) \quad (4)$$

となる。ここでは最大風速と最大瞬間風速が同時刻に出現した場合を想定しているため、平均風速 u は10分平均最大風速 u_{10max} とみなすことができる。したがって u_{max} / u は u_{max} / u_{10max} となり、(4)式は突風率の理論的な関係式と見なすことができる。すなわち接地境界層内における突風率は、風速計設置高度が変わらなければ z_0 と共に増加することがわかる。

次に地衡風速と最大風速または最大瞬間風速との関係について考える。地衡風速 G と摩擦速度 u_* との関係は、次に示すロスビー数相似側によって表される。

$$\ln \left(\frac{G}{f z_0} \right) = A - \ln C_g + \left[\frac{k^2}{C_g^2} - B^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

ここで $C_g \equiv (u_* / G)$ は地衡風抵抗係数、 f はコリオリパラメータであり、パラメータ A と B は実験的に求められる係数である。この関係式はもともと中立かつ定常で地衡風の関係が成り立つ条件下で導出されたものであるが、パラメータ A と B を大気安定度や温度風（地衡風の高さによる変化）および非定常性などの関数で表すことによって、一般の気象条件にも近似的に適用できる。本研究では台風内の風速分布として、静力学的に中立でかつ高さ方向に一定な地衡風（傾度風）の場を想定したときの値、 $A \approx 1.5$ および $B \approx 4.0$ （近藤，1982）を用いることにする。

一方、(1)式に地衡風抵抗係数を代入すると、地上風と地衡風の比は

第2表 過去40年間に日本に大きな強風被害を出した8個の大型台風における全国の気象官署の突風率の比較
ここで u_{10max} は10分平均最大風速を, u_{max} は最大瞬間風速を表す. 各風速の値は全観測点の平均値を意味し, カッコ内は最大値(風速値)または標準偏差(突風率)を表している. この解析では実測風をそのまま使用している.

| Case | 西暦 | 台風名 | 上陸後の 最低気圧 (mb) | 観測 地点数 | $\overline{u_{10max}}$ (ms^{-1}) | $\overline{u_{max}}$ | $\overline{u_{max}/u_{10max}}$ |
|------|------|-----------------|-------------------|-----------|---|----------------------|--------------------------------|
| 1 | 1954 | T5415 (洞爺丸) | 956 | 148 | 22.5 (57.8) | 31.0 (>57.8) | 1.44 (0.20) |
| 2 | 1959 | T5915 (伊勢湾) | 930 | 140 | 20.9 (53.9) | 29.4 (55.6) | 1.44 (0.19) |
| 3 | 1961 | T6118 (第2室戸) | 925 | 150 | 21.8 (66.7) | 32.2 (>84.5) | 1.58 (0.22) |
| 4 | 1966 | T6624 -26 | 960 | 138 | 13.9 (37.3) | 22.5 (55.6) | 1.66 (0.35) |
| 5 | 1976 | T7617 | 960 | 105 | 14.1 (35.9) | 25.0 (51.6) | 1.83 (0.26) |
| 6 | 1979 | T7920 | 950 | 155 | 15.2 (37.0) | 28.7 (51.1) | 1.98 (0.37) |
| 7 | 1990 | T9019 | 945 | 154 | 15.1 (50.3) | 27.9 (63.5) | 1.95 (0.34) |
| 8 | 1991 | T9119 | 935 | 154 | 17.8 (43.4) | 34.5 (60.9) | 2.01 (0.35) |

$$\frac{u}{G} = \frac{C_g}{k} \ln \frac{z_A}{z_0} \quad (6)$$

となる. G と z_A と z_0 が与えられれば, (5), (6)式から中立時の地上風と地衡風の比 u/G を求めることができる. ここでも同様にして u/G を u_{10max}/G とみなすことにする. 一方, 最大瞬間風速と地衡風速との比 u_{max}/G は, この結果と(4)式を組み合わせることによって得られる.

4. 突風率の長期変化

ここでは過去40年間に日本に大きな強風被害を出した8個の大型台風について, 全国の気象官署における突風率の値を比較する. この8つの台風における10分平均最大風速 u_{10max} と最大瞬間風速 u_{max} , および突風率の実測値の比較を第2表に示した. ここで表中の数値は全観測点の平均値を意味し, u_{10max} と u_{max} のカッコ内は最大値, 突風率 ($\equiv u_{max}/u_{10max}$) のカッコ内は標準偏差を表している. この表を見て明らかとなり, 突風率はここ40年間で1.4前後の値から2.0へと大きく増加している. Case 1, 3, 5, 8の4例に対する各気象官署の10分平均最大風速と最大瞬間風速の関係を第2図に示すが, 近年の突風率の増加は明らかである.

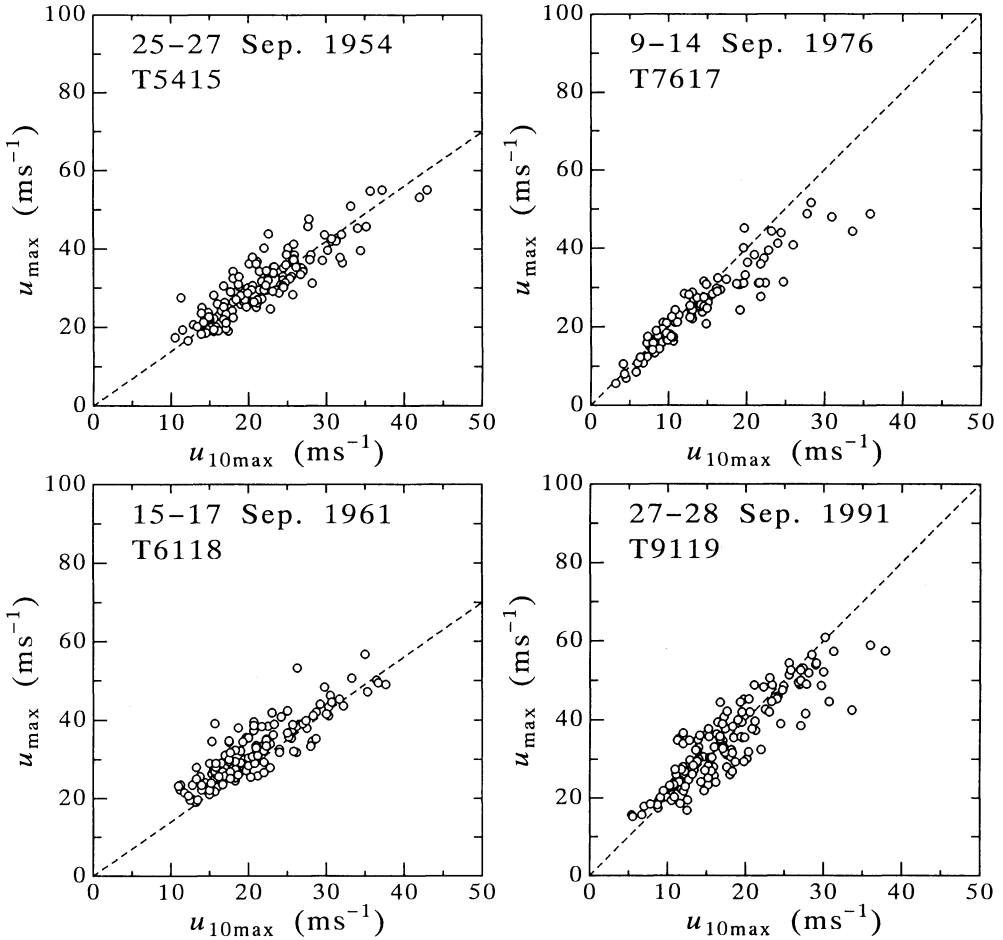
突風率の増加は主に測器の違いが原因であると考えられるので, 第1表に示した換算ファクターを用いて

第3表 第2表と同様, ただし測器の違いによる補正を施してある(第1表を参照). なおCase3については, 瞬間風速が全地点ダイズ風圧計で観測されていたとして補正した.

| Case | $\overline{u_{10max}}$ | $\overline{u_{max}}$ | $\overline{u_{max}/u_{10max}}$ |
|------|------------------------|----------------------|--------------------------------|
| | (ms ⁻¹) | | |
| 1 | 18.4 | 32.6 | 1.84 |
| 2 | 17.1 | 30.9 | 1.85 |
| 3 | 19.6 | 33.9 | 1.84 |
| 4 | 12.5 | 22.5 | 1.85 |
| 5 | 14.1 | 25.0 | 1.83 |
| 6 | 15.2 | 28.7 | 1.98 |
| 7 | 15.1 | 27.9 | 1.95 |
| 8 | 17.8 | 34.5 | 2.01 |

測器の特性の相違を補正した結果を第3表に示した. これを見ると, 測器間の特性の違いを補正することによって突風率の経年変化がかなり小さくなったことがわかる. しかし近年の突風率の増加傾向はまだ残っており, 統計的にみても有為な増加量となっている.

第3表で示された突風率の増加には, 都市化にともなう気象官署周辺の z_0 の増加が関係している可能性がある. 田村ほかの研究(1984, 1989)によれば, 気象官署周辺の建物密度は1960年頃から増加してきており, それにともなって地上風速の年平均値も徐々に減少していることが確かめられている. 建物密度の増

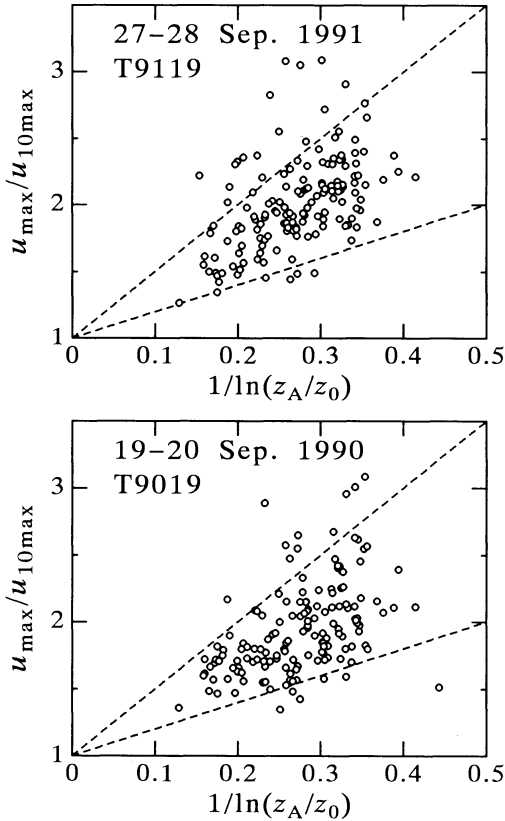


第2図 気象官署における10分平均最大風速と最大瞬間風速の関係 (Case 1, 3, 5, 8 の4例).

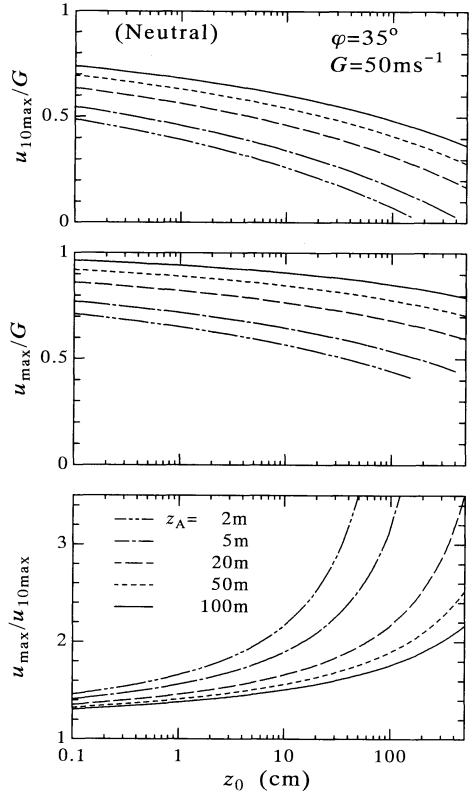
加にもなう地上風速の減少が1960年頃から現れてきているのに対して、今回の解析によって得られた突風率は1979年以降になってはじめて増加傾向を示している(第2表)。都市化にもなう突風率の増加が最大風速や平均風速の減少より多少時期が遅れて出現する可能性があることは、理論的な関係からも示すことができるが(5章参考)、本研究で示したデータのみから突風率が増加し始めた時期までを特定するのは難しい。

z_0 の増加と突風率の増加の因果関係を確かめるために、全国気象官署における突風率と z_0 との関係を Case7 と 8 について解析して、第3図に示した。ここで z_A は風速計地上高度を表し、 z_0 は国土数値情報の土地利用データより求めた地表面粗度である(桑形と近藤, 1990, 1991; 近藤ほか, 1991)。図中の破線は(4)

式で示される突風率の理論的な範囲であり、ここでは風速計の追従性に依存する定数 α を観測値のばらつきが説明できるように、2~4の範囲に設定した。なお α を一定値に固定しなかったのは、同一な測器でも風速の乱れの状況によって α が変化するためである。観測値は理論曲線に従って z_0 と共に増大しており、 z_0 の小さな観測点では突風率は1.5程度であるが、 z_0 の大きな地点では2~3にもなっている。これらの結果は、都市化にもなう z_0 の増加が、突風率の増加の原因の1つになっている可能性を支持している。なお理論的な範囲を超える大きな突風率を記録した地点では、なにか別の原因で突風率が増大した可能性がある。例えば、非定常性の強い突風が吹くと突風率は増加することがある。いずれにせよ、これらの結果は都市化にもなう z_0 の増加が、突風率の増加の原因の1つに



第3図 全国気象官署における突風率 (=最大瞬間風速/最大風速) と地表面粗度 z_0 との関係 (下図: Case 7, T9019号, 上図: Case 8, T9119号). z_A は風速計地上高度を表し, 図中の破線は突風率の理論値のとりうる値の範囲 ((4)式において $kf_u\alpha \sim 2 \sim 5$) を表している. z_0 が大きな地点ほど突風率が大きく, 2以上にもなっていることがわかる.



第4図 地衡風速 G (厳密には傾度風速のことを指す) と10分平均最大風速 u_{10max} または最大瞬間風速 u_{max} との関係および突風率を, 地表面粗度 z_0 と風速計地上高度 z_A の関数としてプロットしたもの ($kf_u\alpha = 3.5$ を仮定). ここで緯度は 35° とし, 地衡風速 G は 50 ms^{-1} とおいた.

なっている可能性を支持している.

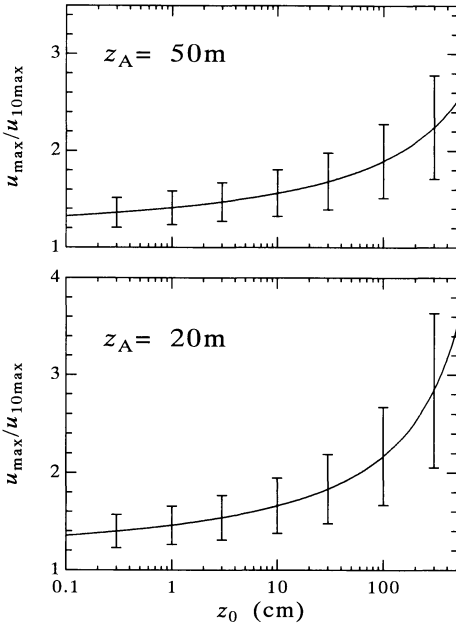
ところで, 第3表の結果は測器変更にもなう器差補正の方法に大きく依存している. また都市化にもなって各気象官署における風速計高度 z_A も引き上げられてきているので, そのことが逆に突風率の増加を緩和している可能性もある. いずれにせよ, ここで示された最近の突風率の増加傾向とそれに対する z_0 の寄与を確かめるためには, さらにくわしい調査が必要であると考えている.

5. 突風率のとりうる範囲

最後に3章で示した理論的な関係を用いて, 中立時

において突風率のとり得る値の範囲, および地衡風速 G と最大風速 u_{10max} または最大瞬間風速 u_{max} との関係を示す. なお測器としては, 現在気象官署で使用している風車型風向風速計を想定する. そのため第3図の結果を参考にして風速計の追従性に依存する定数 α は $2 \sim 4$ の範囲に設定し, f_u は中立な条件下での値 $2.5 \sim 3$ の範囲を考えた. なおこのとき(4)式の右辺第2項にかかるファクターは $kf_u\alpha \sim 2 \sim 5$ の範囲となる.

第4図は u_{10max}/G , u_{max}/G および突風率 u_{max}/u_{10max} を粗度 z_0 と風速計地上高度 z_A の関数としてプロットしたものである ($kf_u\alpha = 3.5$ を仮定). ここで緯度は 35° とし, 地衡風速 G は 50 ms^{-1} とおいた. u_{10max} と u_{max} は z_0 の増大と共に減少するが, 突風率 u_{max}/u_{10max} は逆に増加していることがわかる. また風速計



第5図 風速計地上高度 z_A が 20 m と 50 m のときの突風率を z_0 の関数として示したもの. 図中の縦棒は $kf_u\alpha$ の値が 2~5 のときの突風率の範囲を示している.

地上高度が低いほど、突風率は大きな値をとっている。なおこれらの結果は地衡風速の大きさにはあまり依存せず、近似的には $G=30\sim 70\text{ ms}^{-1}$ の範囲の結果を代表していると見なせる。

第5図は z_A が 20 m と 50 m のときの突風率を z_0 の関数として示したものであり、図中の縦棒は $kf_u\alpha$ の値が 2~5 のときの突風率の範囲を示している。ファクター $kf_u\alpha$ の値は風速計の追従性や大気の流れ強度に依存して変化するが、風速計地上高度が低く z_0 が大きい地点ほど、突風率のとりうる値の範囲が広がっている。第4~5図の結果より、 z_0 が 1 m 以上の都市部では、突風率の値が 2~3 になることがわかる。さらにここで特徴的なことは、 u_{10max} と u_{max} が z_0 の増大にもなって連続的にゆっくりと減少しているのに対して、突風率は (z_A が 20 m 以上の範囲で)、 $z_0 = 1\text{ m}$ 以上になったところで急激に増加している点である。すなわち観測点周辺の都市化にもなう突風率の増加は、都市化にもなう最大風速や平均風速の減少よりも時代が遅れて急激に現れる可能性があるといえる。

ところで本研究では、ロスビー数相似則に出てくる

地上風速 u が 10 分間平均最大風速 u_{10max} に等しいと仮定して(5)式を応用した。一般にロスビー数相似則によって求まる地上風速 u は 1 時間程度の平均値を代表している。したがって長周期の風速の乱れが大きく、 u_{10max} が大きく u を上回る場合には、 u_{10max}/G と u_{max}/G の値は第4図で示した結果よりも大きな値をとる可能性がある。

6. まとめ

過去 40 年間に日本に来襲した主要な 8 個の大型台風時の気象データをもちいて、全国気象官署における突風率 (= 最大瞬間風速/最大風速) の長期変化を調べた結果、突風率はここ 40 年間で 1.4 前後から 2.0 前後の値へと大きく増加していることがわかった。解析の結果、風速の測定方法の変化が突風率の見かけ上の増加を引き起こしていたことが明らかになった。またその一方で、都市化にもなう z_0 の増加も突風率増加の原因の 1 つになっている可能性が示唆された。

大気境界層の理論的考察によれば、中立条件下での最大風速と最大瞬間風速は z_0 の増加と共に減少するが、突風率は逆に増加し、 z_0 が 1 m 以上の都市部では、突風率の値が 2~3 にもなることがわかった。また突風率は風速計地上高度 z_A にも依在するので、気象官署における z_A の変更についても注意を払う必要がある。

謝 辞

本論文をまとめるにあたっては東北大学理学部の近藤純正教授から適切な助言を受け、気象研究所の藤谷徳之助氏からも有用なコメントを受けた。また資料の収集にあたって東北大学理学部の木村富士男助教授と仙台管区気象台調査課の高橋章氏の協力を得た。一方、作図に際しては東北大学工学部の枝松圭一氏が作成した 2 次元グラフプロットツール (GP) を使わせていただいた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 藤谷徳之助, 1990: 構造工学における風観測資料の利用について—気象庁観測資料を中心に—, 日本風工学会誌 44, 85-97.
- 気象庁観測部統計課, 1967: 日最大瞬間風速と日最大風速の比からみた測器変更の影響について, 測候時報, 34, 95-100.
- 気象庁観測部統計課, 1979: 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, 139-142.
- 近藤純正, 1982: 大気境界層の科学, 東京堂出版, 219pp.
- , 桑形恒男, 1984: 東北地方多地点一斉大規模山林火災を誘発した1983年4月27日の異常乾燥強風(2), 天気, 31, 37-44(52).
- , 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, No. 3, 171-185.
- 桑形恒男・近藤純正, 1990: 東南北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.
- , 近藤純正, 1991: 西日本アメダス地点におけ

- る地表面粗度の推定, 天気, 38, 491-494.
- 田村幸雄・須田健一・松井源吾, 1984: 建物密度の永年変化を考慮した年最大風速の均質化, 第8回風工学シンポジウム論文集, 47-54.
- , 須田健一・松井源吾, 1989: 設計基準風速についての一考察—建物密度の経年変化を考慮した年最大風速の均質化—, 日本建築学会構造系論文報告集, 400, 101-111.
- 和田徳弘・大谷芳一, 1982: 測器変更に伴う風速観測値の検討, 研究時報, 34, No. 1, 49-53.

地球惑星関連学会合同大会のお知らせ

地球惑星関連学会のうち地震学会, 日本火山学会, 日本測地学会, 日本地球化学会, 日本惑星科学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会の6学会が主催する合同大会は, 3回の試行を経て, 今回は4回目を迎えています. 我が日本気象学会は従来通り, 関心のあるテーマについてシンポジウムを共催するという形で参加します.

日時: 1993年3月19日(金)~22日(月)

場所: 東京都立大学教養部

東京都八王子市南大沢1-1(京王相模原線南大沢駅から徒歩数分)

共催シンポジウム: 「生物圏から大気圏への化学物質の移動とその物質の大気中での振舞」

日時: 3月20日(土)午後1時~5時

内容: 座長, 深尾昌一郎・岩坂泰信

1300-1305 コンビーナからのあいさつ

1305-1330 和田英太郎(京大・生態系センター)

現在の地球大気の組成を決めた要因:
生物の活動

1330-1355 森山 茂(日大・生産工学)

比較惑星学的に見た大気組成: 生物の
役目は何か

1355-1420 松永捷司(名大・STE研)

硫黄の循環の歴史 —大気への影響—

1420-1445 岩坂泰信(名大・STE研)

成層圏エアロゾルの形成と硫黄循環:
生物起源の硫黄の寄与はどのようなものか?

1445-1510 中澤浩清(東北大・理)

大気中の炭酸ガスI(濃度増加と人間活動)

1510-1535 及川武久(筑波大・生物科学)

大気中の炭酸ガスII(生物圏の変遷)

1535-1550 休憩

1550-1615 松浦延夫(名大・STE研)

中層・超高層大気圏でのイオン化学過程と水蒸気循環

1615-1640 鶴田浩一郎(国立宇宙研)

磁気嵐時の磁気圏の酸素の存在

1640-1650 総合討論

問い合わせ先: 木田秀次(地球惑星関連学会連絡会担当委員)

気象研究所, 〒305 つくば市長峰1-1

電話 (0298) 51-7111

Fax (0298) 55-7240