

強風下における作業の安全限界に関する実験的研究

Acceptable Wind Speed for Windy Working Environment High Above Ground

村 上 周 三*・出 口 清 孝**・高 橋 岳 生*

Shuzo MURAKAMI, Kiyotaka DEGUCHI and Takeo TAKAHASHI

1. はじめに

建物周辺に発生する強風による歩行者への影響について筆者らは被験者に風洞内で強風を作用させてこれを調べ、すでに強風による歩行障害の評価尺度等を提案してきた。

高層ビルの建設増加に伴い、建設現場や鉄塔等、高所でしかも強風下における作業の機会が増えているが、強風下の作業に関する安全確保については、限界風速設定のための資料が極めて少ないことから、具体的な限界値が基準化されていないのが現状である。

このようなことから、本研究は実際に風洞内で被験者に強風を曝露させて人間の耐風限界を明らかにすることによって、高所作業等強風下での作業の安全限界設定の

ための資料を得ることを目的とするものである。

2. 実験概要

2.1 風洞

使用風洞は(財)日本自動車研究所所属の風洞で、測定部寸法が幅4.0m×高3.0m×長9.8m、風速範囲は1~57m/sである。図1に測定部の平面図を示す。

2.2 抗力測定装置

抗力(水平力)測定には、風洞床面に設置された4個ロードセルを使用。図1中 [] 部分に被験者が乗れば点線で示したアタッチメントにより、各ロードセルで抗力の分力が測定できる。なお、各ロードセルの精度は測定レンジ±50kgの±1%以内である。図2に測定状況写真を示す。

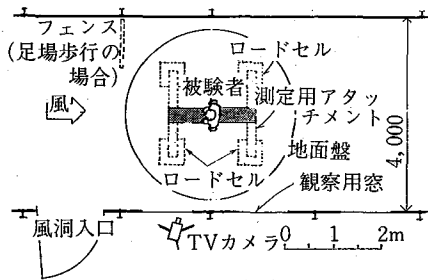


図1 風洞測定部平面

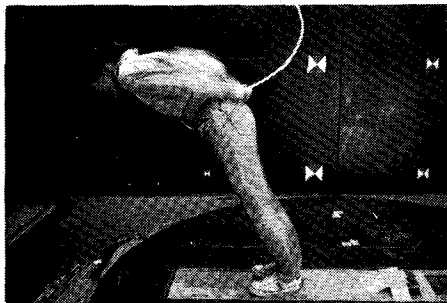


図2 測定状況写真 (U=32~34 m/s)

表1 被験者

被験者	性別	年齢	身長	体重
A	○	男	21	169cm 62kg
B	△	〃	22	167 53
C	□	〃	24	178 60
D	▽	〃	29	172 62
E	●	女	20	155 48
F	▲	〃	21	158 50
G	■	〃	20	163 53

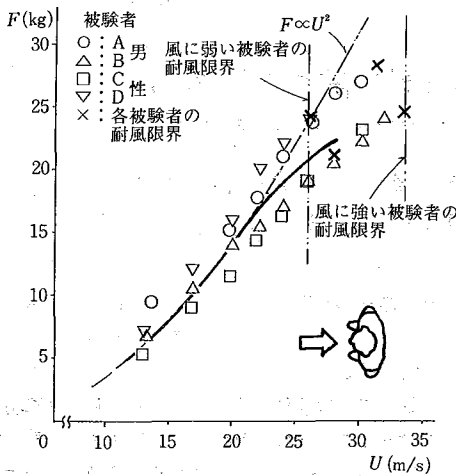
表2 実験種類

実験項目	気流
1. 立位静止*1	向風・横風・追風 一様流
2. 姿勢変化	持物無 持物有*4 一様流
3. 足場歩行*2	横風・斜風 横風・斜風 一様流 非一様流*5
4. 簡易作業*3	一様流

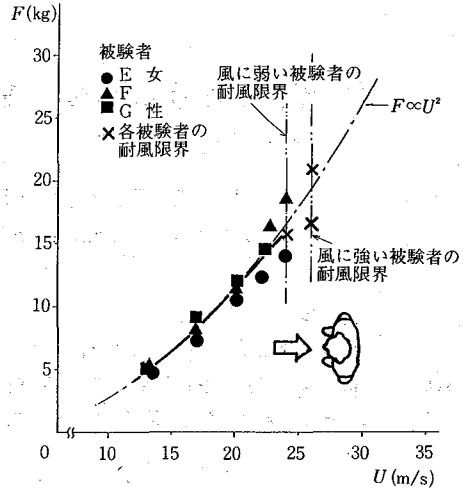
- *1. 立位姿勢で風に対する向きを変える実験
- *2. 幅24cm・長152cm・高40cmの足場を往復歩行する実験
- *3. ロープを頼って風洞を横断し、壁に設置されたフックにロープを結ぶ実験
- *4. 60cm×90cmのベニヤ板(厚9mm)
- *5. フェンスを設置することにより風速分布に変化をつけた場合

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター 第5部
** 東京大学大学院

研 究 速 報



(1) 男性



(2) 女性

図 3 抗力 F と風速 U の関係 (向風立位静止)

2.3 被験者

表 1 に示す年齢 20~29 才の健康な男女計 7 名, 服装は男性が作業服, 女性がスカート+ブラウス。ともにヘルメットを着用。高所で作業する機会の少ない女性を被験者に加えているのは, 青年男性のみを被験者とした実験では, 風に強い者のデータだけしか得られないため, 一般に風に弱いと考えられる女性のデータも加えようとしていることによる。

2.4 実験種類

実験種類は表 2 に示すように 1) 立位静止, 2) 姿勢変化, 3) 足場歩行, 4) 簡易作業の各実験項目からなる。

2.5 実験方法

被験者を風洞内に配置し, 風洞風を 9 m/s (あるいは 13 m/s) から 2~4 m/s の段階ごとに約 30 秒間, 被験者に作用させ, 表 3 に示した実験を, 被験者が耐えられなくなるまで行う。各風速では, 1) 被験者の抗力を測定, 2) 受風面積 A を求めるための写真撮影, 3) ビデオによる観察記録, 4) 実験内容の難易に関し被験者に質問, 等を行う。なお, 受風面積算出にはプランメーターを使用。

3. 実験結果

3.1 「立位静止」実験結果

(1) 抗力と風速との関係

図 3 (1), (2) に向風の場合, 抗力 F と風速 U の関係を示す。図中, 一・一線は 2 次曲線 ($F \propto U^2$) を示し, \times 印は各被験者の耐風限界を示す。

男性の場合 (図 3 (1)), 抗力は風速 $U = 23$ m/s 程度まで図中の 2 次曲線沿っており, 風速 U の 2 乗に比例して増加するが, $U \geq 23$ m/s では 2 次曲線よりやや下回る。女性の場合も (図 3 (2)), 抗力はほぼ風速の 2 乗に

比例して増え, 男性の約 8 割の値を示す。

図 4 に被験者の受風面積 A と風速 U の関係を示す。受風面積 A は $U < 23$ では風速によってあまり変化しないが, $U \geq 23$ m/s では急に減少する。特に男性において著しい。ビデオ記録を再生して被験者の前傾角度 (上半身) を求めると, $U \geq 23$ m/s では $70 \sim 80^\circ$ にも及ぶ被験者がいる (たとえば図 2 参照)。このため受風面積 A が極端に減少し, 図 3 において抗力が高風速で 2 次曲線より下回るものと考えられる。

(2) 耐風限界

図 3 中, 各被験者の限界値 (\times 印) から, 風に弱い被験者の限界値に基づき向風の場合の耐風限界を求めると, 男性 $U = 26$ m/s, 女性 $U = 24$ m/s となり, そのときの抗力は男性が $F = 23$ kg, 女性が $F = 15$ kg である。

なお, 横風の場合 (図は省略), 耐風限界は, 男性 $U = 27$ m/s, 女性 26 m/s となり, 抗力 F は U^2 にほぼ比例し, 耐風限界時の値が $F = 15$ kg (男性), 14 kg (女性) である。

(3) 抗力係数

抗力係数は, $C_D = F / 1/2\rho U^2 \cdot A$ で定義され, 測定から求めた F および A を代入することによって得られ (ただし, ρ : 空気密度), 向風の場合の結果を図 5 に示す。これによると, 村上・出口¹⁾ (1979 年), 相馬²⁾ (1977 年) に見られるような風速による C_D の変化はほとんど認められず, 多少のパラッキはあるが男性平均が $C_D = 1.1$, 女性平均 $C_D = 0.98$ で, 男女差がある。同様の傾向は Penwarden ら³⁾ による結果にも見られる。Penwarden らは数種の服装条件の違いによる C_D の変化を求めており, これによると服装がスカートの女性の C_D は, ズ

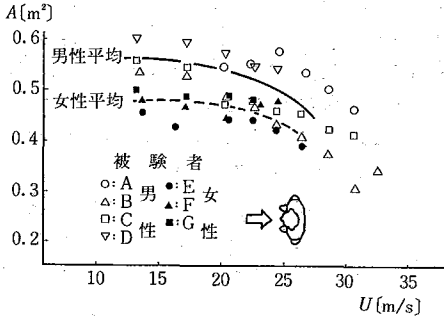


図 4 受風面積 A と風速 U の関係 (向風立位静止)

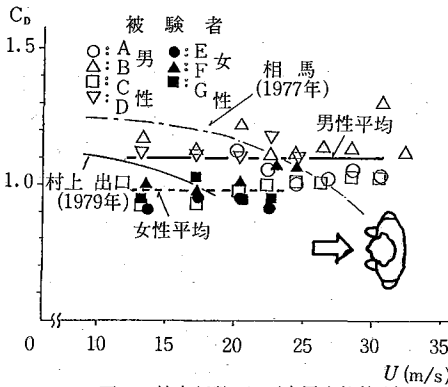


図 5 抗力係数 C_D (向風立位静止)

ポンの男性の値に比べて約 1 割低い値になっている (ただし、 $U=5$ および 8 m/s での実験値)。したがって本実験における C_D の男女差は服装の違いに原因しているものと推察される。なお、横風では男女ともおおむね $C_D=0.85$ の値をとる。

3.2 「姿勢変化」実験結果

(1) 所要時間について

風に対し正面を向いた立位姿勢から横向きに姿勢変化をした実験で、開始から完了までの所要時間 t を求めたものが図 6、図 7 である。持物無の場合(図 6)、風速が 20 m/s 以上では、それ未満の風速に比べて所要時間 t はやや増加する。ただし、後述の持物有の場合に比較し風速による t の変化は比較的小さい。

持物 (60 cm × 90 cm の合板) がある場合 (図 7)、 $U=15\sim 17\text{ m/s}$ で所要時間 t の増加は極端に増え、被験者も「板を持つことが相当困難である」と訴えている。

(2) 耐風限界について

持物無の場合、姿勢変化をスムーズに行うことができる耐風限界は $U=22\text{ m/s}$ 、持物有の場合 $U=17\text{ m/s}$ である (男性の場合)。

3.3 「足場歩行」実験結果

(1) 所要時間について

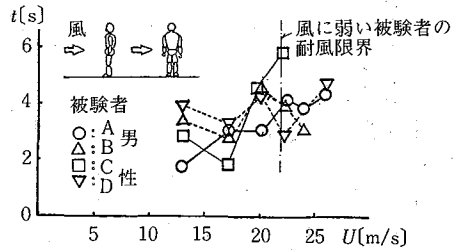


図 6 「姿勢変化」に要する時間 t (風に対し正面向きから横向きに姿勢を変化するのに要する時間、持物無・男性の場合)

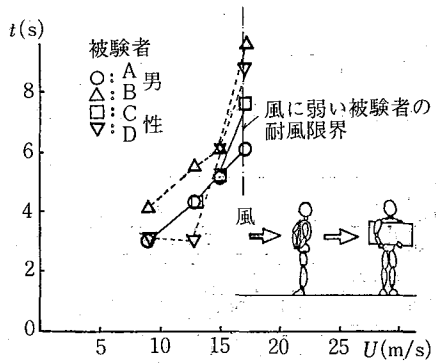


図 7 「姿勢変化」に要する時間 t (持物有、男性の場合)

図 8 に足場歩行の場合、歩行に要する時間と風速との関係を示す。これはフェンスを設置した非一様流における結果である。なお、所要時間は、無風時の歩行所要時間 t_0 に対する比を用いて表されている。これより、所要時間のあまり変化しない被験者、風速増加に対し急に増える被験者等、所要時間 t/t_0 にはかなりのバラツキがある。前者は男性に多く、後者は女性に多い。影響の大きい被験者の場合 $U \geq 13\text{ m/s}$ で無風時の 2 倍の時間を要し ($t/t_0=2$)、かなりの歩行困難さを訴えている。

(2) 耐風限界について

非一様流中では、男女とも $U=15\text{ m/s}$ がスムーズに足場歩行できる耐風限界となっている。なお、一様流では、男性が $U=17\text{ m/s}$ 、女性は時間をかけ慎重に歩行するため $U=20\text{ m/s}$ が耐風限界となっている。

3.4 「簡易作業」実験結果

「簡易作業」はロープを頼って移動し、ロープを結ぶという内容である。この場合 $U=36\text{ m/s}$ 前後が耐風限界となる。

4. 結 論

図 9 に各実験項目の耐風限界をまとめて示す。これより、作業に関する耐風限界案を次のように要約できる(カッコ内が女性の値である)。

I. 足場歩行や荷物を持った行動をスムーズに行うこ

研究速報

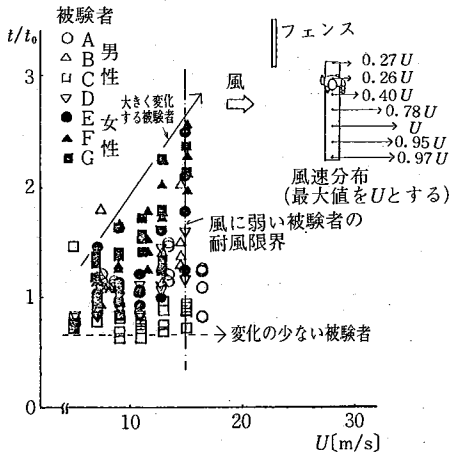


図8 「足場歩行」に要する時間 t/t_0 (非一様流の場合)

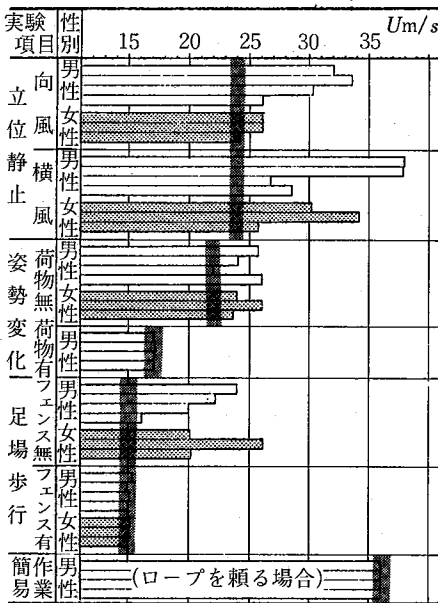


図9 耐風限界

とができる限界風速

..... $U = 15 \sim 17 \text{ m/s}$ (15 m/s)

II. 姿勢変化をスムーズに行うことができる限界風速 (持物無) $U = 22 \text{ m/s}$

III. 立位静止できる限界風速 $U = 26 \text{ m/s}$ (24 m/s)

IV. ロープに頼った簡易作業のできる限界風速 $U = 36 \text{ m/s}$

これらの耐風限界から、自然風の平均風速に基づいた作業の安全限界に関する風速値を以下に提案してみる。

人間が強風により飛ばされたりする事故は、風速の最大値に深く関連するものである。風洞風速は一定で、この種の実験において、この値は自然風では最大値に対応するとみなすのが妥当であると考えている。したがって、耐風限界を自然風の平均値で表示するには、風洞風の耐風限界値をガストファクターで割る必要がある。次に、高所作業の場合、作業場の行動は、ここに示す風洞実験の場合より不安定になると想定されるので、実験値に対し安全率を見込んで限界値を設定しなければならない。そこで、仮に自然風のガストファクターを2.0、安全率を0.7とすれば、自然風の平均風速で表示される作業安全限界風速は、風洞風速 $\div 2.0 \times 0.7$ によって求められ、表3に示すような試案が考えられる。ただし、小数点以下の端数は切り捨てられている。なお、実際の現場を体験した人から聞き込んだ情報により表3に示した限界風速がほぼ妥当な値であろうということを確認している。

表3 平均風速に基づいた作業の安全限界 (試案)

- I. 足場歩行や荷物を持った行動をスムーズに行うことができる限界風速 平均風速 $5 \sim 6 \text{ m/s}$
- II. 姿勢変化をスムーズに行うことができる限界風速 (持物無) 7 m/s
- III. 立位静止できる限界風速 9 m/s
- IV. ロープに頼った簡易作業のできる限界風速 12 m/s

- 限界風速 (平均風速) = 風洞風速 $\times \frac{1}{2.0 (\text{G.F.})} \times 0.7$ (安全率) によって求めた試案である。
- 作業内容や作業場の高さ等の条件に関して、現場における観測を含めてさらに検討を加えていきたいと考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり、(財)日本自動車研究所巨理所長、同研究所第8研究室武藤氏・湊氏、並びに東大生研第2部小林助教授の各氏からご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。(1982年1月25日受理)

参 考 文 献

- 1) 出口清孝・村上周三・小峯裕己: 抗力測定からみた風の人間に与える影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1980年9月。
- 2) 相馬清二: 建物・地物の影響を受けた強風の極値の研究一6, ビル強風の実験的研究, 文部省科学研員補助金, 自然災害特別研究, 研究成果, 1977年2月。
- 3) Penwarden et al., Measurements of wind drag on people standing in a wind tunnel, Building and Environment, 13 (2), 1978, pp. 75-84.