

強風による歩行障害に関する実験的研究

—大型風洞における歩行実験—

Experimental Studies about Strong Wind Effects on Pedestrians
—Walking Test in Large Wind Tunnel—

勝田 高司*・村上 周三*・後藤 剛史*・上原 清*

Takashi SHODA, Shuzo MURAKAMI, Takeshi GOTO and Kiyoshi UEHARA

序

巨大建築物周辺の強風は、風害とかビル風と呼ばれて、近年顕著な公害の1つとなっているが、風害の発生自体が比較的新しいこともあって現象の解析や対処の仕方など、この問題への対応は遅れがちである。この風害問題の主なる被害者の1つは街の歩行者であるが、歩行者を保護するための対策を考える場合次の2点が判っていないなければならない。

1. ビル周辺でどの程度の風が吹くのか。
2. 歩行者はどの程度の風で、どのような被害を受けるのか。

このうち、前者については昨年度の本特集号^{文献1}をはじめとして、いくつかの報告²⁻⁵⁾を行って市街地風の实测、風洞模型実験による予測の方法やその精度、並びに各種建物周辺に発生する強風の分布等について多くの結果を明らかにした。

今年度は後者の問題について実物の人間による歩行実験を行い、強風が人体にどのような影響を及ぼすかについていくつかの知見を得。歩行障害風速あるいは歩行限界風速を提示するための基礎資料を得たのでこれについて報告する。

Symbols.

- U_{∞} = wind tunnel speed m/s
- l = distance between windbreaks m
- O. R. = opening ratio of windbreak %
- x_s = length of one step, walking against-wind, under $U_{\infty}=5$ m
- \bar{x}_s = mean of x_s m
- x_i = length of one step, walking against-wind, under $U_{\infty}=i$ m
- y_s = length of side step due to cross-wind, under $U_{\infty}=5$ m
- \bar{y}_s = mean of y_s m
- y_i = length of side step due to cross-wind, under $U_{\infty}=i$ m

$D_i(\text{against-wind})$ = deviation of steps from walking line, under against-wind

$D_i(\text{cross-wind})$ = deviation of steps from walking line, under cross-wind

1. 実験方法

1・1 歩行実験の方法

大型風洞内で男女数名の被験者の歩行状態を調べ、歩行の難易度並びに不快感の度合を調べた。被験者は Fig.1, Photo 1 に示すような線の上を各種条件(例えば風速, 着衣, 持ち物)の下で歩行した。歩行状態の解析は以下の3種類の方法による。

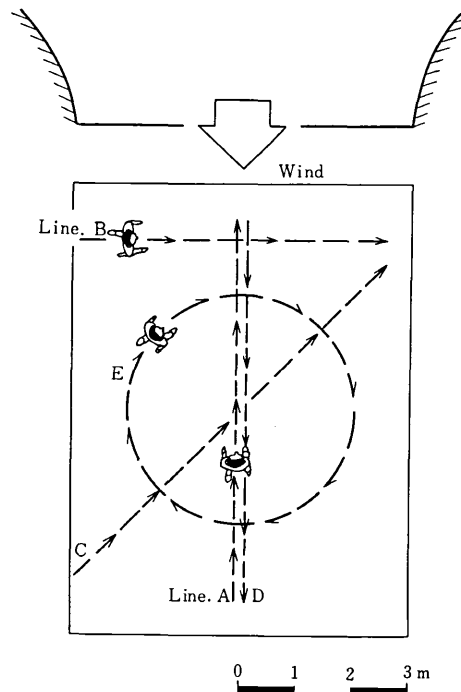


Fig.1 Walking line for pedestrians on wind tunnel test floor.

* 東京大学生産技術研究所 第5部

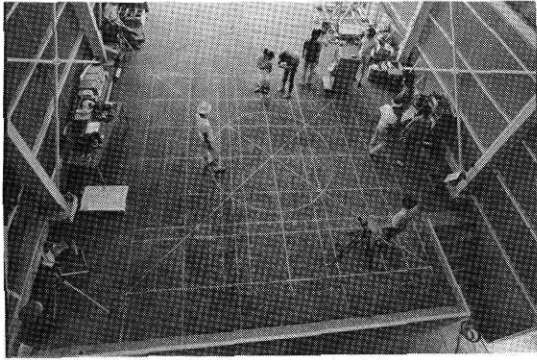


Photo 1. Walking line for pedestrians on wind tunnel test floor

a. 被験者の歩行を風洞上方から16mmカメラで撮影し、モーションアナライザ^(註1)を用いて歩行軌跡を解析する。

b. 歩行の状態及び着衣の乱れなどに注目して観察記録を行う。

c. 歩行の難易度及び歩行中に受けた印象について被験者のアンケートをとる。

1・2 風速分布の種類

実験は次の2種類の風速分布について行った。

1) 一様な気流中を歩行する場合。(実験1)

実験種類をTable 1に示す。歩行内容は持物なしの場合、かさ、荷物を持っている場合、乳母車を押している場合、帽子をかぶっている場合、和服の場合の6種類、風速は原則として、5、10、15、20m/sの4段階である。

2) フェンスにより風速分布を作った場合。(実験2)

実験種類をTable 2に示す。歩行内容及び風速は実験1とはほぼ同様である。歩行線上の風速分布は風洞内に防風フェンスを設置することにより作成した。防風フェンスは(高さ, 1.8m) × (巾, 1.5m) と(高さ, 1.8m) × (巾, 1.0m) の2種類を使用し、その間隔 l の変化あるいはフェンスの空隙率O. R. を変化させることにより強弱の風速分布を作成した。

1・3 実験装置

1) 風洞

実験に使用した風洞^(註2)は、Open-Jet型、測定部寸法、(高さ, 5m) × (巾, 6m) × (長さ, 13m)。風速範囲、1~22m/sである。風洞をPhoto. 2に示す。

2) 風速計

注1) 物体の運動を記録した16mmフィルムを座標を目盛ったパネルに投影し運動軌跡の定量的データを求めるための解析装置

注2) 財団法人、日本自動車研究所所属の中型風洞。

Table 1. Variation in experimental conditions, in uniform flow without windbreaks

実験番号	歩行内容	風速 (m/s)	歩行線				
			A	B	C	D	E
1-1	•持物なし*1	5	○	○			
		10	○	○		○	
		15	○	○	○	○	○
		20	○	○	○	○	○
1-2	•かさ	5	○	○		○	○
		10	○	○		○	○
		12.5					○
1-3	•荷物*2	10	○	○			
		15	○	○			○
1-4	•乳母車	10	○	○			
		15	○	○			
1-5	•帽子 •ハイヒール	5			○		○
		10			○		○
		15	○	○			○
1-6	•和服 •ぞうり	5	○	○			○
		10	○	○			○
		15	○	○			○

*1 特記なしは普段着

*2 男性は40×40×50cm, 4kgのダンボール箱
女性は2kgの手さげ袋をもつ。

Table 2. As. table 1. but in disturbed flow behind windbreaks.

実験番号	歩行内容	フェンス種類	風速			備考
			5	10	15 20 (m/s)	
2-1	•持物なし	O.R.=0%	○	○	○	防風フェンスを1台だけ使用した場合。
2-2		O.R.=50%	○	○	○	
2-3	•かさ	O.R.=0%	○	○		
2-4	•持物なし	$l=0.5m$		○	○	•フェンスを2台同時に使用した場合 •この場合のフェンスはすべて、O.R.=0%である。
2-5		$l=1.0m$		○	○	
2-6		$l=1.5m$		○	○	
2-7	•かさ	$l=1.0m$	○	○		
2-8	•帽子		○	○	○	

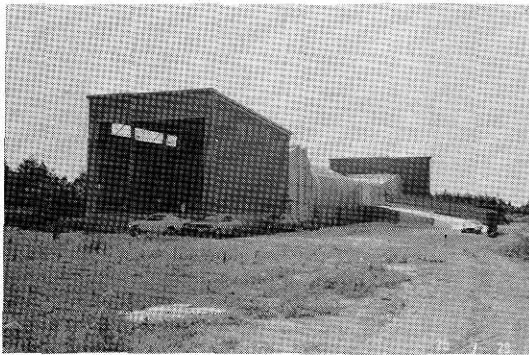


Photo 2. Wind tunnel.

風洞測定部における風速分布並びに各フェンス後方の風速分布は、指向性の少ないサーミスタ風速計を2台用いて、移動測定した。風洞基準風速は吹出口中央上端に取り付けたピトー管により測定した。

3) 歩行状態の観察記録

歩行軌跡解析用に16mmカメラ及び、モータドライブカメラ、生理変化測定用に医用テレメータを用いて、心拍、発汗、呼吸数などの生理変化に関するデータを採取した。

1.4 被験者

歩行実験に参加した被験者は身長、体重ともに中程度の成人であり、原則として男性5人、女性3人とした。

1.5 歩行軌跡の解析方法

被験者の歩行状態を撮影した16mmフィルムより、モーションアナライザを用い被験者の歩行軌跡図を得る。風速5m/sの時には歩行者はほとんど風の影響を受けていないことが判ったので、この風速の歩行状態を基準とした。

足調の乱れ具合を解析する時には、向い風の場合と横風の場合で異なる方法を使った。

1) 向い風の場合 (Fig. 2 参照)

風速5m/sの時の歩巾を x_s としその平均値 \bar{x}_s に対する平均偏差 $|\bar{x}_s - x_s|$ を求める。任意風速時の歩巾 x_i の乱れ度 D_i は $|\bar{x}_s - x_s|$ を基準にして次式により定義する。

$$D_i (\text{向い風}) = \frac{|\bar{x}_s - x_i|}{|\bar{x}_s - x_s|}$$

2) 横風の場合 (Fig. 3 参照)

向い風の場合と考え方は同じであるが、風速5m/sの時の右足と左足の歩行線からのずれを $y_{s右}$, $y_{s左}$ とし

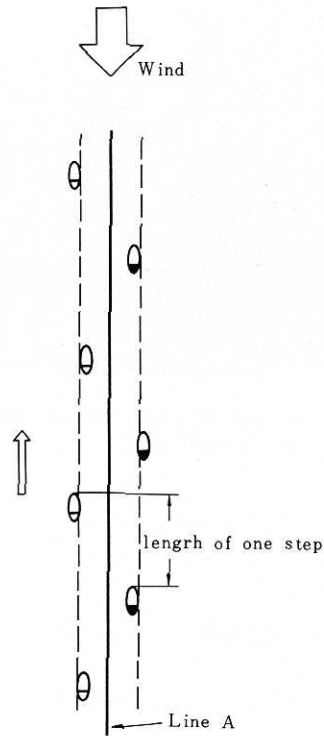


Fig. 2 Method for calculating deviations of steps from walking line, in against-wind

その平均値 $\bar{y}_{s右}$, $\bar{y}_{s左}$ を別々に求め、右足と左足の乱れの平均偏差 $|\bar{y}_s - y_s|_{右} + |\bar{y}_s - y_s|_{左}$ を求める。任意風速時の歩調の乱れ D_i は $|\bar{y}_s - y_s|_{右} + |\bar{y}_s - y_s|_{左}$ を基準にして次式により定義する。

$$D_i (\text{横風}) = \frac{|\bar{y}_s - y_i|_{右} + |\bar{y}_s - y_i|_{左}}{|\bar{y}_s - y_s|_{右} + |\bar{y}_s - y_s|_{左}}$$

Fig. 3から判るように D_i は歩調の乱れと同時に、横風による流れ方も含んでいる。

2. 実験結果

2.1 一様気流中における歩行実験 (実験1)

実験1における歩行状態の観察及びアンケート調査の結果をまとめるとTable 3のようになる。表より男性、女性とも風速10m/s以上になると歩きにくいと感じる人がはじめ、15m/s以上になると意志通りに歩けず人によっては歩行困難を訴える。歩行中に受ける不快感は髪やスカートの乱れのために、男性よりも女性の方が大きい。又、風に対して最も弱いのは目で15m/s以上になるとその不快感は耐え難いものとなる。目に当たる風は顔の真正面より、45°方向から吹いてく

Table. 3 Observations and questionnaires on walking in uniform flow

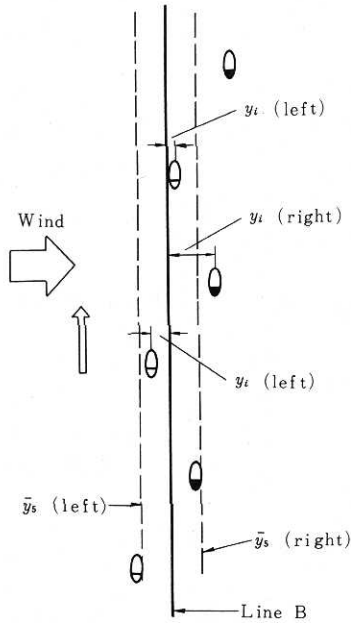


Fig. 3 As Fig. 2, but in cross-wind

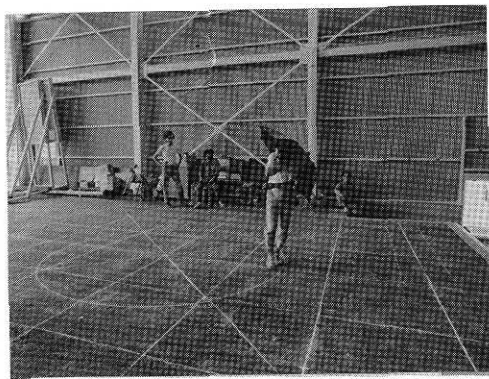


Photo 3. Walking with umbrella, under $U_w = 12.5\text{m/s}$.

る方がはるかに苦痛を感じる。また、かさをさしている場合 (Photo 3 参照) 及び、女性が和服を着用している場合 (Photo 4 参照) には風速10m/s程度から歩行困難を訴える。女性の和服は右前であるため、左側から風に対してはすそが大きく乱れるが、右側からの風に対してはそれ程乱れない。いずれにしてもここで述べている観察や印象は風速が一樣な場合のもので、フェンスにより風速分布をつけた場合の歩行に比較して、大変容易であることに留意されたい。Photo 5, 6, 7, 8, に女性被験者の向い風の場合 (歩行線A) の、各風速時における歩行状態を示す。写真より、風速が増加す

性別	風速 (m/s)	歩行状態に関する		着衣やかさなどの状態に関する	
		観察者の記録	被験者の印象	観察者の記録	被験者の印象
男性 (カッターシャツ+ズボン)	5	・正常	・正常	・髪がゆれる ・服がゆれる	・肌に風を感じる。
	10	・人によっては歩調が乱れ、身体のバランスがくずれる。	・ほぼ正常に歩けるが歩きにくいと感じる人もいる。	・髪が乱れる。 ・服のすそが乱れる。 ・かさは傾けないと持てない。人によっては両手で支える。 ・かさがこわれる場合もある。	・まばたきが多くなる。 ・風音が耳障りである。
	15	・身体のバランスがくずれる。 ・上体が風上側に傾く。 ・荷物をかっいでいる人は非常に足きにくい。	・意志通りに歩けない。 ・人によっては歩行困難と感じる。	・かさはさしていられない (12.5 m/s)	・目をあけていられない。 ・涙が出る。
	20	・身体のバランスがくずれる。 ・歩行困難 ・身体全体が傾く ・上を向いていられない。	・歩行困難	・アロハシャツのようにスポンの外に出したシャツがはたきまきま上る。	・呼吸しにくい。 ・頭がいたくなりそう。
女性 (スカート)	5	・正常	・正常	・髪や服がゆれる。 ・つば広の帽子がゆれる。	・肌に風を感じる。
	10	・人によっては歩調が乱れ、身体のバランスがくずれる。 ・かさをさしている場合は歩きにくい。	・ほぼ正常に歩けるが歩きにくいと感じる人もいる。	・髪や服のすそが乱れる。 ・髪が流れる。 ・人は、かさをささきえきれず裏返しになる。 ・つば広の帽子が飛ぶ。	・まばたきが多くなる。 ・風音が耳障りである。
	15	・身体のバランスがくずれ、倒れそうになる。 ・歩行困難	・意志通り歩けず、人によっては歩行困難と感じる。		・目がいたくてあけていられない。 ・呼吸しにくい。
	20	・身体のバランスがくずれ、風に流される。 ・歩行困難	・歩行困難	・スカートの前面が密着し、後側が舞い上る。 ・スカートが上ったままになる。	・耳がいたい。 ・風を痛く感じる。
女性 (和服)	5	・正常	・正常	・だもどがゆれる。 ・すそが乱れる。 ・じゅばんが見える。	
	10	・すそが足にまとわりついて歩きにくいそう	・すそに足をとられて歩きにくい。	・じゅばんが見えたままになる。	
	15	・すそが足に密着する。 ・歩行不可能に近い。	・非常に歩きにくい。	・すそが開いたままになる。	

ると身体全体が前傾し、歩きにくくなる様子がわかる。

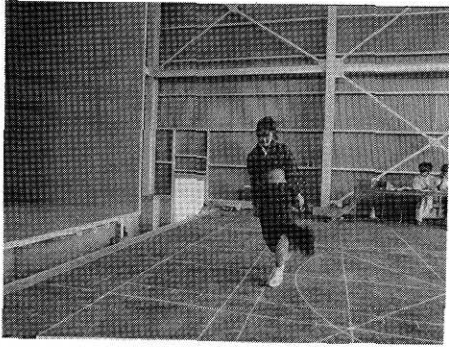


Photo 4. Walking with kimono under $U_{\infty}=10\text{m/s}$.

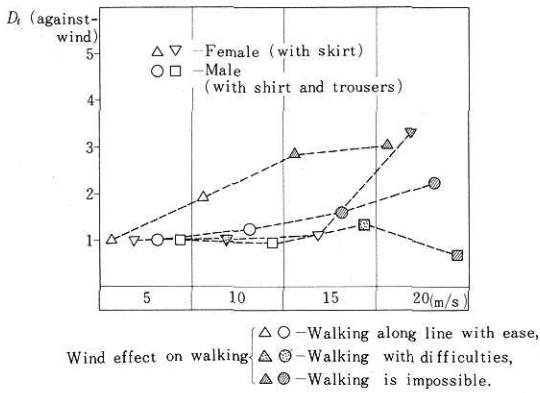


Fig. 4. Relation between D_i (against-wind) and U_{∞} .

Fig. 4 に向い風の場合の歩調乱れ度 D_i と風速の関係を示す。図より、被験者による差はかなり大きい。風速と歩調の乱れ度は正の相関を示し、被験者に対するアンケート調査の結果もこれに対応している。

Fig. 5 に女性被験者の横風の場合 (歩行線B) の、各風速時における歩行軌跡を示す。図より風速が増加すると風による身体の流され方が大きくなる。横風による身体の流され方は個人差が大きく、特に男性と女性にその差が大きい。横風が極端に大きい場合には身体を風上に傾けてバランスをとるのが非常に困難となり、これに失敗すれば歩行線から風下側に流されてしまうことになる。実際の市街地の強風の場合にはその変動が極めて大きいためバランスを取りながら歩くことはほとんど不可能になると考えられる。

Fig. 6 に横風の場合の歩調乱れ度 D_i と風速の関係

○: Right foot
●: Left foot

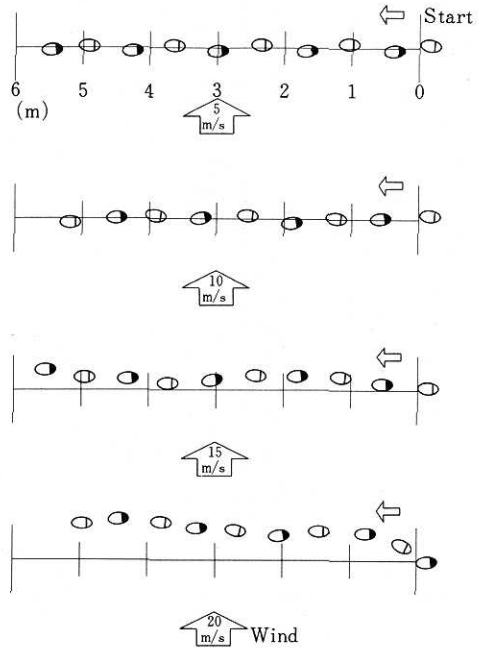


Fig. 5. Footsteps of pedestrian in cross-wind in case of female

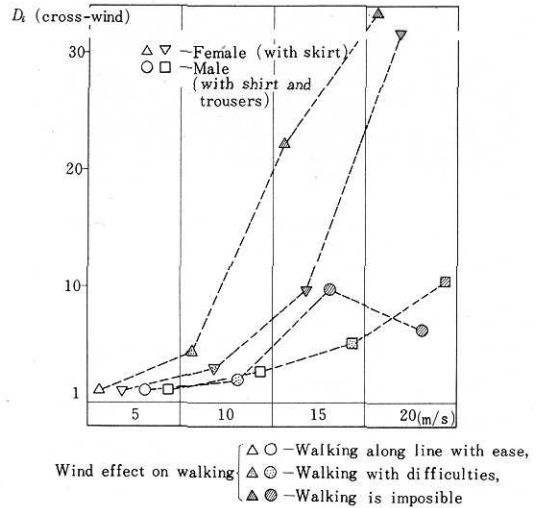


Fig. 6. As Fig. 4, but in cross-wind

を示す。図において○印 (男性被験者) の示す乱れ度

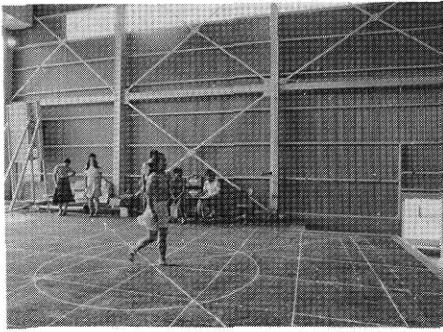


Photo. 5. Walking in against-wind, under $U_{\infty} = 5 \text{ m/s}$.

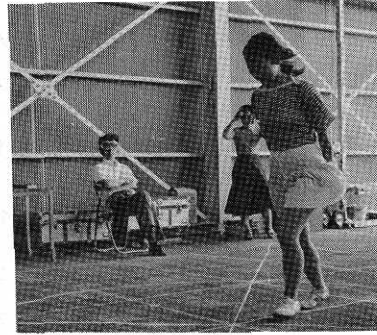


Photo. 7. As Photo 5, but under $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$.

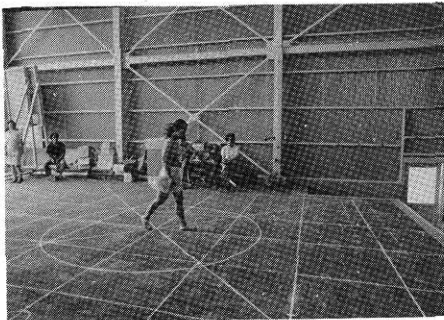


Photo. 6. As Photo 5, but under $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$

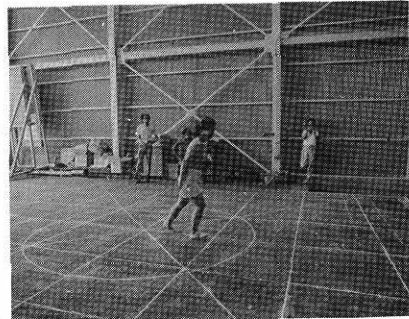
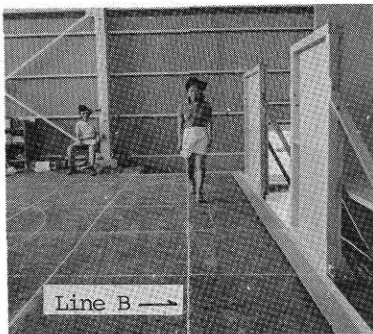
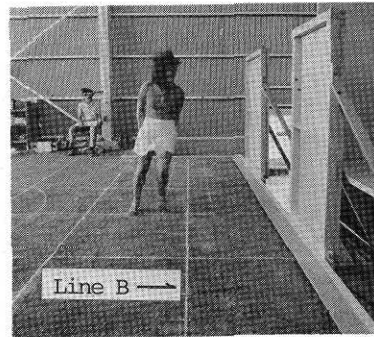


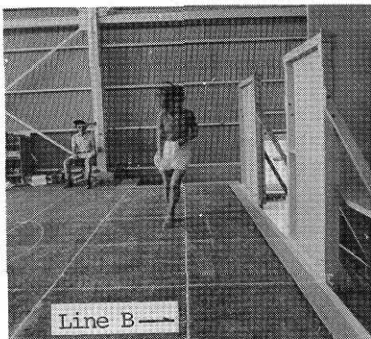
Photo. 8. As Photo 5, but under $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$



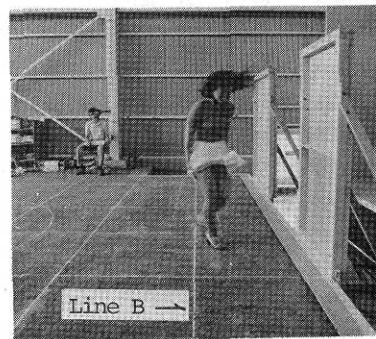
(1)



(3)



(2)



(4)

Photo. 9. Serial photos of walking by time interval 1 second, in disturbed flow behind windbreaks, under $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$, female

は風速20m/sの場合の方が風速15m/sの場合よりも小さくなるにもかかわらず、被験者が歩行困難を訴えているのは身体を傾けてバランスをとりながら歩くのに大変な努力を要しているからである。

2・2 フェンスにより風速分布をつけた場所を歩行する場合 (実験2)

アンケート調査の結果をまとめてTable. 4に示す。歩行状態の観察及び実験はフェンスの間隔を変える等、5種類の風速分布によって行ったが観察及びアンケートの結果には大した差がなかったため1つにまとめて示した。表において風速10m/sの場合の結果は実験1とほとんど差がみられないが、風速15m/s以上になるとほとんどの被験者がバランスをくずし、歩行困難となつて、一様な気流中よりもはるかに歩行の困難さは増す。

Table. 4. As table 3, but in disturbed flow behind windbreaks

風速	男		女	
	観察	被験者の主感	観察	被験者の主感
10	・ほぼ正常	・歩きにくい。	・ほぼ正常	・ほぼ正常
15	・身体のバランスがくずれ。急激な風速変化のある場所です。	・歩行困難である。	・身体のバランスがくずれ。急激な風速変化のある場所です。	・歩きにくい。
20	・歩行困難 ・倒れそうになる。	・歩行困難である。 ・危険である。	・歩行困難	・意志通り歩けない。 ・歩行困難である。

Fig. 7に女性被験者の各風速時における歩行軌跡を、Photo. 9 (1)~(4)にその歩行状態を示す。写真は風速20m/s時のものである。図及び写真からわかるように急激な風速変化のある場所の歩行は風速変化のない場合に比較すると非常に困難である。

Fig. 8に歩調乱れ度 D_i と風速の関係を示す。図においてフェンスの間隔 l は1.5mである。Fig. 8とFig. 6を比較するとわかるように風速分布がある場合の D_i はない場合に比べるとかなり大きな値を示している。

フェンスの背後から風の強い場所に出るとその逆の場合とでは、前者の方がはるかにバランスをとりやすい。後者の場合には充分予想していてもフェンスの背後に入ると、強く風上側に引き込まれてバランスを

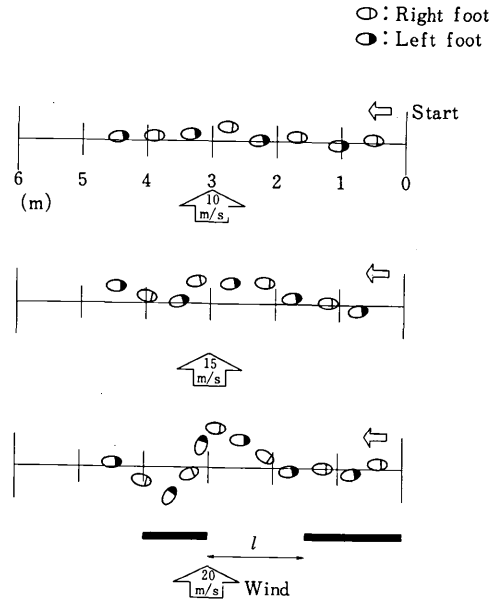
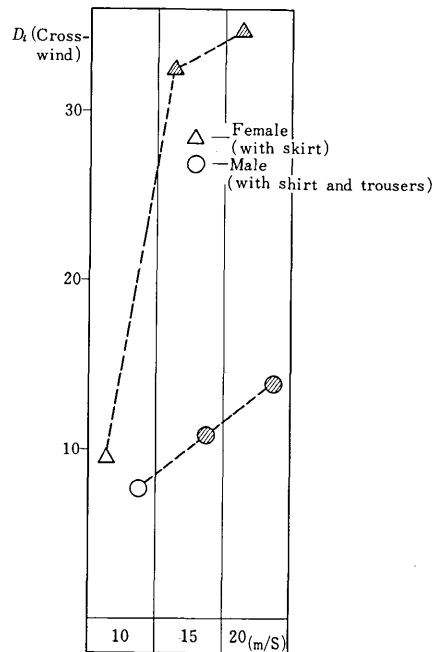


Fig. 7. As Fig. 5, but in disturbed flow behind windbreaks



Wind effect on walking.
 △ ○ — Walking along line with ease,
 ⊙ ⊗ — Walking with difficulties,
 ⊕ ⊖ — Walking is impossible.

Fig. 8. As Fig. 6, but in disturbed flow behind windbreaks.

くずしてしまう。

3. 歩きにくさからみた市街地風と風洞風の関連について

実際の市街地における強風中の歩行は、風洞内のそれに比べてはるかに困難であると考えられる。

この第1の理由は市街地風の風速の時間的、空間的変動の予測困難さにある。風洞内では、フェンス背後の風といえども風向風速は定常で、風速変化による衝撃の強さも予備実験により何度か体験済みである。

第2の理由は、ちり、ほこりによる目に対する障害である。前述したように風に最も弱いのは目であるが、ちり、ほこりの類は市街地風の方がはるかに多い。

なお、文献(2)によれば、市街地風のガストファクター $\left(\frac{\text{最大瞬間風速}}{\text{10分間平均風速}}\right)$ は安全側にみれば約2である。前述した実験結果から判断して風洞内の一様な気流中における歩行限界風速を15~20m/s、歩行障害風速を10~15m/sと考えれば、市街地では平均風速7.5~10m/sと5~7.5m/sがそれぞれ歩行限界風速、歩行障害風速に相当すると考えられる。かさをさした場合や、ちり、ほこりの多い場合はこれらの値はもっと低くなる可能性がある。

4. 結論

4・1 一様な気流中の歩行について

1) 男性、女性とも風速10m/s以上になると歩きにくいと感じる人が出はじめ、15m/s以上になると意志通りに歩けず、人によっては歩行困難を訴える。

2) かさをさしている場合及び女性が和服を着ている場合には10m/s以上で歩行困難になる。

3) 歩行中に受ける不快感は髪やスカートの乱れのために男性よりも女性の方が大い。又、目が風に対して最も弱い。一般に風速10m/s以上になると不快感を訴えはじめ、15m/s以上になるとその不快感は耐え難いものになる。

4・2 フェンスにより風速分布を作った場所の歩行について

1) 風速10m/sの場合には一様な気流中の歩行との

差はほとんどみられないが、風速が大きくなる程この差は増加する。また、着衣の乱れは防風フェンスの風下にいる方が大きい。これはフェンス背後の逆流により、風速の上向き成分が大きくなるためである。

2) 身体のバランスをくずしやすいのは、フェンスの背後から風の強い所に出た場合より風の強い場所から弱い場所(フェンスの背後)に入った時である。

3) 風速15m/s以上になるとほとんどの被験者が歩行困難を訴え、20m/sでは歩行中に危険を感じるようになる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、大型風洞の使用に際しては、東京大学生産技術研究所第2部 小林敏雄助教授、日本自動車研究所研究第5部 伊藤俊彦部長、武藤真理氏、吉田泰氏にお世話頂いた。

また実験に際しては、法政大学工学部建築学科 山田水城教授、同大学院生 出口清孝氏をはじめとし卒論生諸氏、並びに東京大学生産技術研究所技官、杉山栄次氏の御協力を得た。

ここに記して感謝の意を表します。

(1976年1月19日受理)

参考文献

- 1) 勝田, 村上, 池田, 上原: "建物周辺に発生する強風に関する研究" 生産研究, 昭和50年3月.
- 2) 勝田, 村上, 上原: "市街地低層部における風の観測", 日本建築学会論文報告集第231号, 昭和50年5月.
- 3) 勝田, 村上, 上原: "建物周辺気流に関する風洞実験の測定器, 模型寸法及び再現性について", 日本建築学会論文報告集第232号, 昭和50年6月.
- 4) 勝田, 村上, 池田, 上原: "建物周辺に発生する強風ならびに防風垣による強風の遮蔽に関する風洞実験, その1", 日本建築学会論文報告集第233号, 昭和50年7月.
- 5) 勝田, 村上, 池田, 上原: "建物周辺に発生する強風ならびに防風垣による強風の遮蔽に関する風洞実験, その2", 日本建築学会論文報告集第234号, 昭和50年8月.