

風洞気流に対する模型の Blocking-Effect に関する実験的研究

An Experimental Study on the Blocking-Effect of the Model in the Wind Tunnel

勝田 高司*・村上 周三*
 鎌田 元康*・池田 耕一*
 Takashi SHODA, Shuzo MURAKAMI
 Motoyasu KAMATA and Koichi IKEDA

目 的

従来、建物の風圧係数に関して多くの風洞実験が行なわれてきたが、それらの実験結果には、ばらつきがある。その原因の1つに、風洞気流に対する模型の Blocking-Effect に関する考察が不足していた事が考えられる。

ところで測定や模型製作の立場からは模型は大きい方が便利であるが、Blocking-Effect を小さくするためには模型が小さい程良い事は明らかである。本論文では壁面における圧力を指標として、模型の大きさとBlocking-Effect の間の関係を求め、実用上障害を起さない模型の大きさの限界を知ることを目的としている。この問題については Jensen ら¹⁾が N. P. L. 型風洞で家屋型模型を用いて実験を行ない「使用できる模型の大きさの限界は、風洞断面積に対する模型の投影面積の比が5%以下である」という結果を得ている。われわれは風洞形式の違い、模型形状の違い等を考慮して、より広範な実験を行ない、Jensen らの行なった実験を確認すると共に、種々の新しい結論を得た。

実 験 概 要

1. 風洞形式の違いによる Blocking-Effect の差

図1に示すような境界層型（以下 N. P. L. 型と略す）風洞と、図2に示すような自由噴流型（以下 O. J. 型と略す）風洞を用いて実験を行なった。

2. 模型の形状の違いによる Blocking-Effect の差

図3に示すような2次元板状模型、2次元柱状模型、3次元板状模型、3次元立方体模型を用いた。設置方法は図4に示す。

3. 模型の大きさによる Blocking-Effect の差

使用した模型の大きさを表1に示す。測定位置における垂直風速分布を図5に示す。これによると、N. P. L. 型風洞では、境界層厚は6cm、O. J. 型風洞では3cmである。3次元模型（立方体および板状）の場合の模型

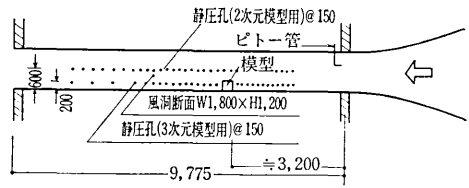


図1 N. P. L. 型風洞

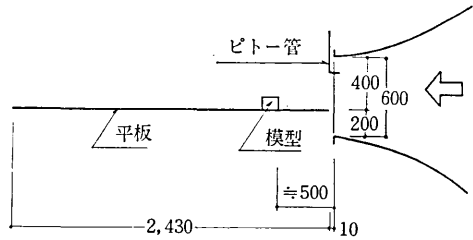


図2 OPEN JET 型風洞

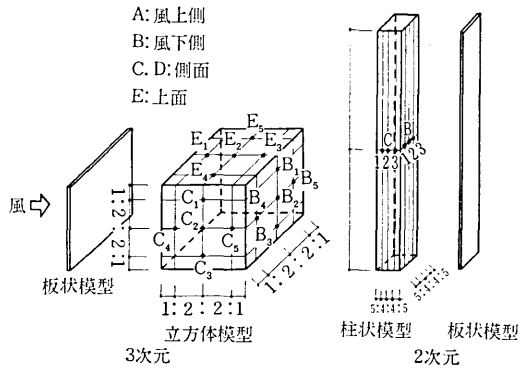


図3 使用模型図

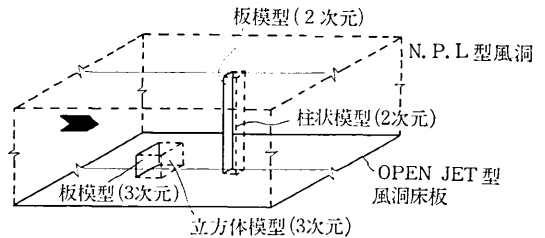


図4 模型取付図

* 東京大学生産技術研究所 第5部

表 1 模型の寸法

模型種類			寸法 (cm)	
二次元模型	2.5%	N.P.L.	柱状	4.5×4.5×120
			板柱	
		O.J.	柱状	
	5%	N.P.L.	柱状	9×9×120
			板状	9×120
		O.J.	柱状	3×3×100
	10%	N.P.L.	柱状	18×18×120
			板状	18×120
		O.J.	柱状	6×6×100
	20%	N.P.L.	柱状	36×36×120
			板柱	36×120
		O.J.	柱状	12×12×100
三次元模型	2.5%	N.P.L.	立方体	23.2×23.2×23.2
			板状	23.2×23.2
		O.J.	立方体	
	5%	N.P.L.	立方体	32.8×32.8×32.8
			板状	32.8×32.8
		O.J.	立方体	13.4×13.4×13.4
	10%	N.P.L.	立方体	46.5×46.5×46.5
			板状	46.5×46.5
		O.J.	立方体	19.0×19.0×19.0
	20%	N.P.L.	立方体	65.8×65.8×65.8
			板状	65.8×65.8
		O.J.	立方体	26.8×26.8×26.8

(板厚はすべて 1.2 cm)

高さに対する境界層厚の比を表 2 に示す。表よりわかるように、各大きさの模型高さと同境界層厚の比は、N.P.L. 型風洞の場合と、O.J. 型風洞の場合ではほぼ等しくなっている。

4. 基準風速と基準静圧の測定

O.J. 型風洞では、吹出口付近 (模型上流 50cm) の風速を基準風速とし、大気圧を基準静圧とした。N.P.L. 型風洞では、模型上流約 3m の風速を基準風速とし、その点の静圧を基準静圧とした。

5. 測定位置における乱れの強さ

乱れの強さ $\sqrt{u'^2}/U_0$ は、N.P.L. 型、O.J. 型ともに、約 1% であった。

実験結果とその考察

1. N.P.L. 型風洞

(1) 2 次元模型の場合

表 2 模型高さに対する境界層厚の比

	模型の高さ h [cm]		境界層の厚さ δ [cm]		h/δ	
	N.P.L.	O.J.	N.P.L.	O.J.	N.P.L.	O.J.
2.5%	23.2	—	6	3	3.9	—
5%	32.8	13.4	6	3	5.5	4.5
10%	46.5	19.0	6	3	7.8	6.3
20%	65.8	26.8	6	3	11.0	8.9

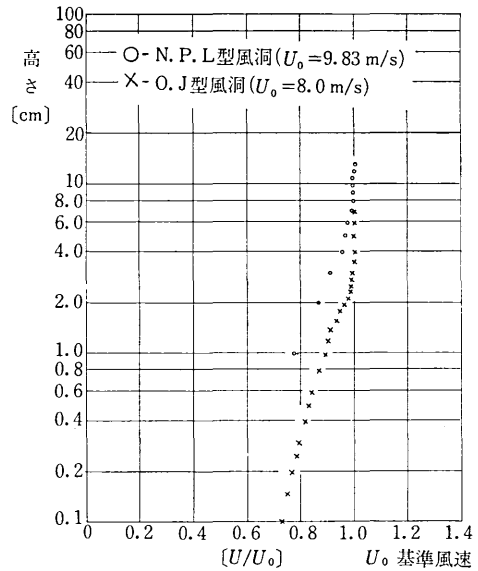
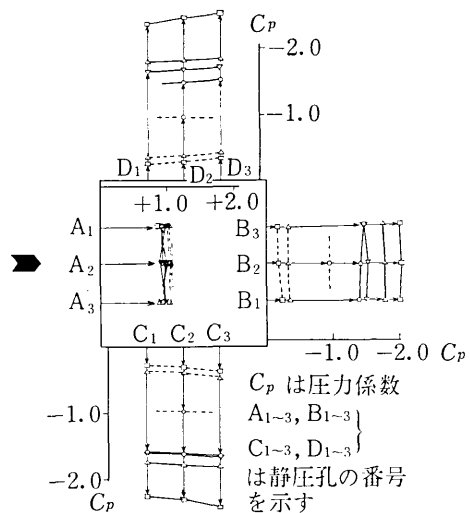


図 5 測定位置における垂直風速分布



大きさ	N.P.L. 型風洞	O.J. 型風洞
2.5%	○	○
5%	○	○
10%	△	△
20%	□	□

図 6 模型表面圧力係数 (2 次元柱状模型)

研究速報

表3 模型表面圧力係数

		風洞	前面	側面	後面	上面
二次元模型	2.5%	N.P.L.	+0.93	-1.66	-1.47	
		O.J.				
	5%	N.P.L.	+0.91	-1.56	-1.42	
		O.J.	+1.06	-0.97	-0.95	
	10%	N.P.L.	+0.92	-1.80	-1.75	
		O.J.	+1.03	-0.39	-0.33	
	20%	N.P.L.	+0.92	-2.39	-1.99	
		O.J.	+1.02	-0.31	-0.22	
三次元模型	2.5%	N.P.L.	+0.91	-0.74	-0.50	-0.69
		O.J.				
	5%	N.P.L.	+0.88	-0.86	-0.60	-0.81
		O.J.	+0.97	-0.58	-0.35	-0.51
	10%	N.P.L.	+0.90	-1.14	-0.85	-1.10
		O.J.	+0.97	-0.48	-0.31	-0.43
	20%	N.P.L.	+0.87	-2.00	-1.41	-2.00
		O.J.	+0.96	-0.42	-0.25	-0.42

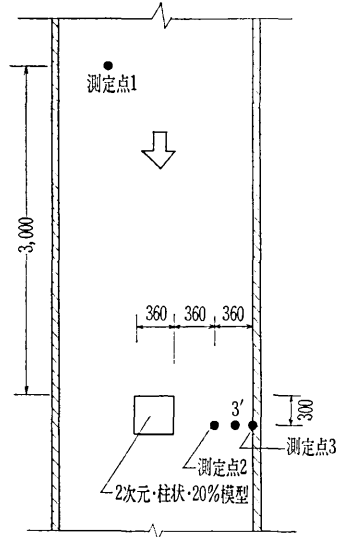


図8 測定位置

風洞壁面圧力係数は図7からわかるように、
 ・2.5% 模型と5% 模型は一致し、極小値がそのまま定常値となり、その値も -0.06 と小さい。また柱状模型と板状模型の差もほとんどない。

・10% 模型は2.5% および5% 模型に比べて極小値で2.5倍、定常値で、2倍絶対値が大きい。板状模型と柱状模型とを比べると、板状模型が極小値では絶対値で15% 大きいですが、定常値ではほとんど差はみられない。

・20% 模型は、2.5% および5% 模型に比べて7.5~15倍程度絶対値が大きい。また、板状模型と柱状模型を比べると、板状模型の圧力係数は柱状模型より極小値で10%、定常値で30% 絶対値が大きくなっている。

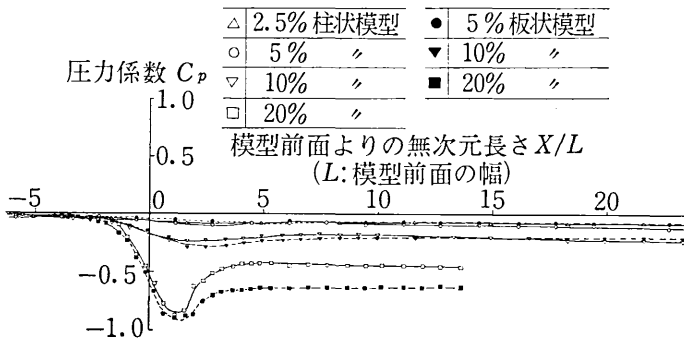


図7 風洞壁面圧力係数 (N.P.L. 型, 2次元模型)

柱状模型の模型表面圧力係数は図6、表3からわかるように、

- ・模型前面において、すべての大きさの模型について、約 $+1.0$ である。
- ・2.5% 模型と5% 模型との値は前面はもちろん、側面、後面でもほぼ一致し、その値は側面で -1.7 、後面では -1.5 である。
- ・10% 模型では、2.5% および5% 模型と比べると、前面では、一致するが、その他の面では、絶対値で、10%前後大きい。すなわち負圧が大きい。
- ・20% 模型では、2.5% および5% 模型に比べると、前面では一致するが、側面では絶対値で40%、後面では絶対値で25% 程度大きい。

図8において測定点1 (基準点) では、

$$\text{静圧 } P_{s1} = 0.0 \text{ mmAq}$$

$$\text{動圧 } P_{d1} = 6.3 \text{ mmAq}$$

したがって、全圧 $P_{T1} = P_{s1} + P_{d1} = 0.0 + 6.3 \text{ mmAq} = +6.3 \text{ mmAq}$ となる。測定点3 (極小値を示した風洞壁面) の静圧は $P_{s3} = -5.1 \text{ mmAq}$ である。測定点3の近くで、境界層の外側の点を3' とすれば、その静圧 $P_{s3'}$ は P_{s3} と同じと考えてよい。

測定点1と3'の間でベルヌイの定理が成り立つと仮定すれば、3'の動圧は、

$$P_{d3'} = P_{T1} - P_{s3} = 6.3 - (-5.1) = 11.4$$

したがって、風速 $U_{3'}$ は、 13.6 m/sec となる。一方、測定点2 (測定点3と同じだけ模型前面より下流で、模

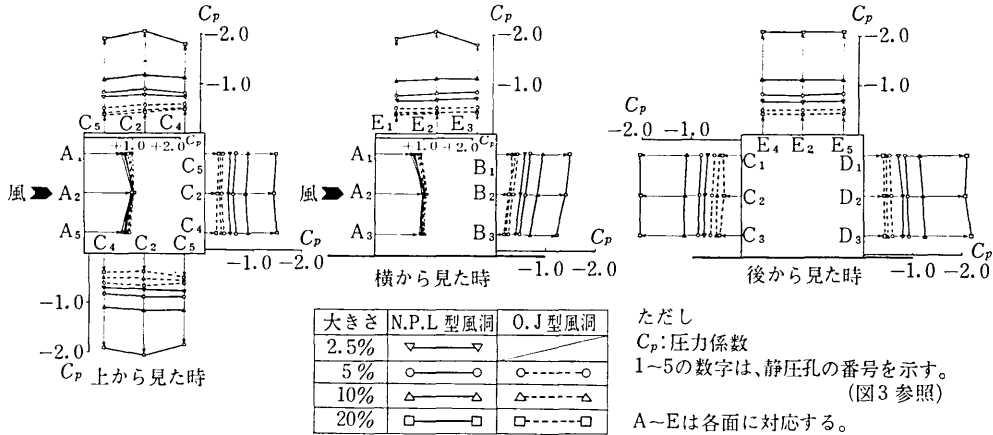


図9 模型表面圧力係数分布(3次元, 立方体模型)

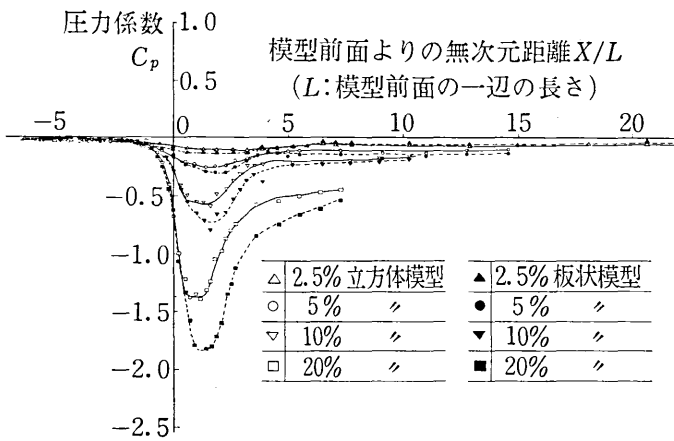


図10 風洞壁面圧力係数(N.P.L.型, 3次元模型)

型の側面と風洞壁面との中間点)において、ピトー管で風速 U_3 を測定すると、14.4m/sec となった。点2では、模型の Blocking-Effect による風速上昇が、点3'より大きいと考えられる。

(2) 3次元模型の場合

立方体模型の模型表面圧力係数は図9, 表3からわかるように、模型前面においては、すべての大きさの模型に対してはほぼ +1.0 である。2.5% 模型と5% 模型は前面では +1.0 と完全に一致し、その他の面でもほぼ一致し、その値は上面および側面で -0.7、後面で -0.5 である。10% 模型は2.5% および5% 模型と比べると、前面では一致するが、その他の面では30% 程度大きい。

20% 模型では、2.5% および5% 模型と比べると前面では一致するが、その他の面では絶対値で2倍程度大きい。

風洞壁面圧力係数は図10に示すように、2.5% 模型では、極小値が -0.11 と小さく定常値も -0.05 と小さい。また板状模型と立方体模型の差も全般に小さい。

5% 模型では、極小値が -0.25~-0.30 と比較的小さく、定常値も -0.12 と小さいが、板状模型は立方体模型より極小値で、15% 絶対値が大きい。しかし、定常値ではほぼ等しくなっている。

10% および20% 模型は2.5% 模型に比べて極小値で6.5~16倍大きい。板状模型は立方体模型より極小値で特に大きくなっているが、その後方に行く程両者の差は小さくなる。また測定した範囲内では定常になっていない。なお、垂直方向の風洞壁面の圧力係数は高さに関係なく、ほぼ一定であった。

(3) 2次元模型と3次元模型の Blocking-Effect の特徴

模型表面圧力係数は、2次元模型では、2.5% 模型と5% 模型がほぼ一致した値をすべての面において示し、10% 模型および20% 模型は、それらに比べて前面以外で10~40% 絶対値で大きい。3次元模型の場合には、2.5% 模型と5% 模型はすべての面において大体一致し10% 模型および20% 模型は、それらに比べて前面を除いた面で、30~100% 絶対値が大きくなっている。ただし、前面では模型形状、模型の大きさにかかわらず、常に約 +1.0 である。

風洞壁面圧力係数は、2次元模型では、2.5% 模型と5% 模型がほぼ一致し、10% 模型、20% 模型はそれらより絶対値で2~15倍大きく、5% 模型と10% 模型にはっきりした差があるが、3次元模型では、模型の大きさに比例して、圧力係数の絶対値も大きくなる。また、3次元の10% および20% 模型では、測定した範囲内で定常に達しないのに、2次元の場合は定常に達している。

風洞壁面圧力係数の、板状模型のように薄い模型と柱

研究速報

状模型あるいは立方体模型のように厚味のある模型との差は、3次元模型においては極小値を示す点で最大となり、後方では次第に小さくなるのに対し、2次元模型では逆に、極小値を示す点ではあまり差がないのに、後方で差が大きくなっている。

(4) N. P. L. 型風洞における模型の大きさの限界

・模型の形状、大きさに関係なく、模型表面圧力係数は模型の前面においてはほぼ +1.0 である。したがって模型の前面の圧力係数だけを問題とするなら、20% 以下の大きさであればよい。

・2次元模型では、模型表面圧力係数および、風洞壁面圧力係数において、5% 以下の模型と 10% 以上の模型の間に、はっきりした Blocking-Effect の差がある。したがって、2次元模型における大きさの限界は 5% とする。

・3次元模型では、風洞壁面圧力係数においては、図 9 からわかるように、20% 模型から 2.5% 模型まで連続的に変化している。模型表面圧力係数においても、図 11 からわかるように、20% 模型から 2.5% 模型まで、連続的に変化しているが、その変化の仕方は、模型の大きさが小さくなる程、緩慢になる。また、図 9、表 3 よりわかるように、2.5% 模型と 5% 模型の圧力係数の数値の差は、比較的小さい。したがって厳密には、模型の大きさは、小さい程良いが、一応 5% 以下の大きさならば、それ程、誤差のない実験ができると考えられる。

2. O. J. 型風洞

(1) 2次元模型の場合

模型表面圧力係数は図 6、表 3 からわかるように、前面では模型の大きさに関係なく約 +1.0 である。5% 模型と 10% 模型とに前面を除いて大きな差がみられる。

10% 模型と 20% 模型にはどの面でもそれ程大きな差がない。

(2) 3次元模型の場合

模型表面の圧力係数は図 9、表 3 からわかるように、5%、10%、20% 模型の間に前面はもちろん他の面でもそれ程大きな差がない。

(3) 2次元模型と 3次元模型の Blocking-Effect の特徴

模型前面における表面圧力係数は、模型の大きさおよび形状に関係なくほぼ +1.0 である。2次元模型では 5% 模型と 10% 模型との間にはっきりした差が、前面以外で認められる。しかしこのような差は 3次元模型では認められない。

(4) O. J. 型風洞における模型の大きさの限界

模型の大きさや形状に関係なく、模型前面では、表面圧力係数が約 +1.0 であるから、前面の圧力係数だけを問題とするならば、20% 以下の大きさなら良い。2次

元模型においては、5% 模型と、10% 模型との間に大きな差があった。よってこの場合、使用できる模型の大きさの限界は 5% と言える。3次元模型においては 5%~20% 模型の間に大きな差が認められなかった。したがってこの場合は、使用できる模型の大きさの限界は、20% と言える。

3. N. P. L. 型風洞と O. J. 型風洞の比較

① 模型前面 (風上側) では、風洞形式、模型寸法、模型形状にかかわらず、表面圧力係数が、約 +1.0 である。

② 実験した範囲 (模型大きさを、20%~5%) では、前面を除いて、N. P. L. 型風洞の場合には、O. J. 型風洞の場合より、模型表面圧力係数が、絶対値で、大きな値を示す。しかし、図 11 からわかるように、両者は、模型が小さくなると共に一致する傾向にある。しかしながら 5% のところでは、両者の間にまだかなりの差がある。

③ N. P. L. 型風洞では、模型が大きくなると、模型表面圧力係数の絶対値が大きくなる傾向が顕著に現われるが、O. J. 型風洞では、全く逆に、絶対値が小さくなる傾向にある。しかし、その傾向は、N. P. L. 型の方が顕著である。

④ N. P. L. 型風洞において、5% 模型と 10% 模型とでは、前面以外の面で、模型表面圧力係数に、はっきりした差がある。それに対して、O. J. 型風洞における 3次元模型では、ほとんど差がない。

4. 本実験と M. Jensen, N. Frank の実験との比較

Jensen らの行なった実験とわれわれの行なった実験は用いた模型の形状や実験条件が多少異なるので全く同列の比較はできないが、Jensen らの行なった家屋模型の実験結果とわれわれの行なった立方体模型の実験結果を同じグラフの上にプロットすれば図 11 のようになる。

M. Jensen らの実験との比較には、N. P. L. 型風洞における 3次元立方体模型の模型表面圧力係数を用いた。

図 11 からわかるように、どちらの実験結果も模型前面 (風上側) において、表面圧力係数が、模型の大きさに

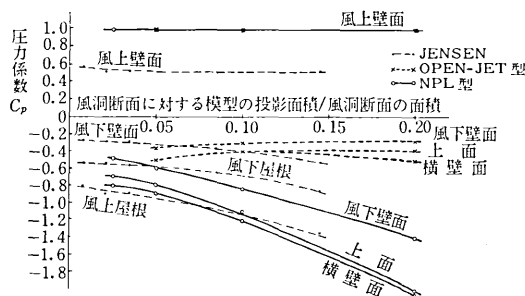


図 11 本実験と JENSEN らの実験の Blocking-Effect の比較

かかわらず、ほぼ一定であるが、その値は、Jensen らの結果が +0.6 であるのに対し、本実験結果は +1.0 である。模型後面(風下側)および上面、側面(屋根面)において Jensen らの実験では、圧力係数を結んだ線の傾きが 5% 付近で、はっきり変っているが、本実験では、それほどはっきりした変化がない。したがって、Jensen らの実験結果からは、模型の大きさの限界が、5% であると言っているが、われわれの実験結果からは、厳密には、5% が、模型の大きさの限界であるとは言えない。しかし、2.5% 模型と 5% 模型の、模型表面圧力係数は、かなり近い値を示しているので、一応、大きさの限界を 5% とする。

Jensen らの実験では、N. P. L. 型風洞の 3 次元模型に限られているが、われわれの実験では、さらに N. P. L. 型 2 次元、O. J. 型風洞の 2 次元、および 3 次元模型についても行なった。その結果、N. P. L. 型風洞の 2 次元模型と、O. J. 型風洞の 2 次元模型の、模型表面圧力係数は 5% 以下の模型と 10% 以上の模型とでは、大きな差が認められるので、模型の大きさの限界は、5% とする(ただし、前面は除く)。

O. J. 型風洞の 3 次元模型では、5%~20% 模型の模型表面圧力係数に大きな差がなく、20% 以下の大きさならばさしつかえない。ただし、模型前面の表面圧力係数は模型形状、模型の大きさに関係なく、約 +1.0 である。

結 論

1. 模型前面(風上側)では、模型表面圧力係数は、風洞型式、模型の大きさおよび形状に関係なく、ほぼ +1.0 である。

2. O. J. 型風洞の表面圧力係数は、N. P. L. 型風洞の表面圧力係数より常に絶対値で小さな値を示す。ただし、模型前面は除く。

3. N. P. L. 型風洞では、模型が大きくなると、模型表面圧力係数の絶対値が大きくなるが、O. J. 型風洞では、逆に絶対値が小さくなる。ただし前面は除く。

4. N. P. L. 型風洞の 2 次元模型と 3 次元模型および O. J. 型風洞の 2 次元模型では、模型表面圧力係数が、5% 以下の模型と 10% 以上の模型とに前面以外でかなりはっきりした差が認められるが、O. J. 型風洞の 3 次元模型では、5%、10%、20% 模型の間に大きな差が認められない。

5. 実験した範囲内(模型の大きさを 20%~5%)では前面を除いて N. P. L. 型風洞の場合には、O. J. 型風洞の場合より、模型表面圧力係数が、絶対値で大きな値を示す。しかし、両者は、模型が小さくなるとともに一致する傾向にある。しかしながら、5% のところでは、両者の間には、まだかなりの差がある。

6. 以上より、模型の大きさの限界に関し、一応、次のような結論が得られた。

- N. P. L. 型風洞の 2 次元模型 5%
- N. P. L. 型風洞の 3 次元模型 5%
- (厳密には小さい程良い)
- O. J. 型風洞の 2 次元模型 5%
- O. J. 型風洞の 3 次元模型 20%

ただし、模型前面(風上側)の模型表面圧力係数だけを問題にするならば、風洞型式、模型の大きさおよび形状に関係なく、20% 以下の大きさであれば差し支えない。

謝辞 本実験を行なうに当っては、上原 清君(建設工学会勤務) 森 幸司君(三菱建設勤務)の全面的な協力にあづかった。ここに記して深く感謝の意を表します。

(1971 年 4 月 26 日 受理)

参 考 文 献

1) Martin Jensen, Niels Frank; Model Scale Tests in Turbulent Wind II: 1965.

正 誤 表 (6 月号)

ページ	段	行	種 別	正	誤
28	左	27	本文	楕円とはかぎらず	楕円とはならず
表紙⑧	右	15	ニュース	「引張加熱装置を用いた転位高温運動の動的透過電顕観察」に対して、昭和 46 年度風戸研究奨励金を受賞した。	これまでの業績に対して、昭和 46 年度風戸研究奨励金を受賞した。