

自然風中での模型内圧と大気静圧について

奥田泰雄・桂 順治・河井宏允*

*東京電機大学理工学部

要 旨

野外に置かれた模型内圧と大気静圧との関係について調べたところ、角柱模型内圧の変動成分の大半は大気静圧の変動である、大気静圧の低周波数成分は上空の大きなスケールでの風速変化によるもので、高周波数成分は周期の短いガストに伴う特徴的な圧力変化を示す、周辺の建物の影響により大気静圧が変動する場合がある、大気静圧の空間スケールは風速の空間スケールよりも大きい、といったことが分かった。

キーワード：大気静圧，模型内圧，自然風

1. はじめに

自然風中での大気静圧を計測する研究では、これまでいろいろな形状の大気静圧検出器が製作されて、これによって変動成分まで含めた大気静圧の計測が行われている (Elliott, 1972; Kataoka et al., 1989)。一方、建物に作用する風圧力の実測では、建物内外の圧力差を計測するのが一般的であり、そのため建物内圧を正確に計測することが重要とされてきた (上田ら, 1992; 桂, 1988; 加藤ら, 1996)。建物内の空調や温度変化による圧を除けば、この建物内圧は大気静圧と室内圧の和で表される。室内圧は建物まわりに発生する風圧が開口部から建物内に伝播したもので、建物内のみに発生する圧であり建物の形状や接近流の速度圧に関係する量となる。それに対し大気静圧は建物の形状や建物に作用する接近流の速度圧には無関係に建物内外にほぼ等しく作用するもので、室内圧や風圧を評価する場合これを基準圧とする。これまでの定説では、大気静圧はきわめて長い周期で変化するものなので建物内圧を評価する上ではほぼ一定であるとされ、建物内圧の変動成分はほぼ室内圧であると考えられてきた。

奥田ら (1994; 1996a; 1996b) は潮岬風力実験所において大きさの異なる 3 つの角柱模型を設置しこれに作用する風圧力の計測を行っている。この観測結果から 3 つの模型内圧の変動成分が互いに非常に良く似ていることを見出した。これは建物内圧の変動成分はほぼ室内圧であるというこれまでの定説とは異なる結果である。そこで今回の実験では、新たに観測フィールドに堅穴を掘って大気静圧溜とし、この内圧と角柱模型の内圧を比較検討した。

2. 観測方法

実験は京都大学防災研究所潮岬風力実験所において行った。Fig.1 に示すように潮岬は紀伊半島の南端に位置し、高さ約 50m~70m、東西約 4km、南北約 3km の高台であり、潮岬風力実験所は潮岬の南西端に位置する。風力実験所の観測フィールドはほぼ水平に整地されており、東西約 50m 南北約 60m の広さがある。観測フィールドの北側と西側はグラウンドや畑に隣接し、東側と南側は崖に面している。また、南西方向に約 40m 離れて高さ約 15m の実験所本館あり、北側には平屋の家屋・倉庫、東側には

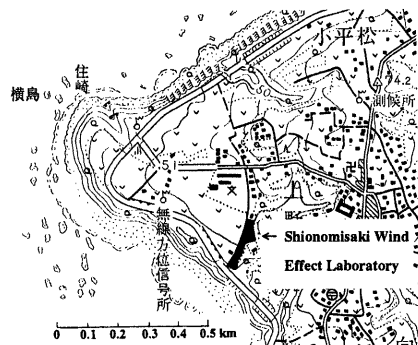
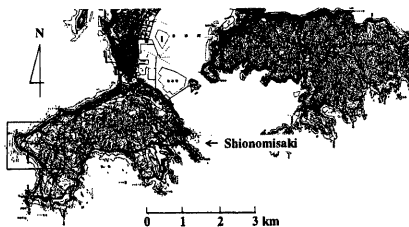


Fig.1 Location of Shionomisaki Wind Effect Laboratory

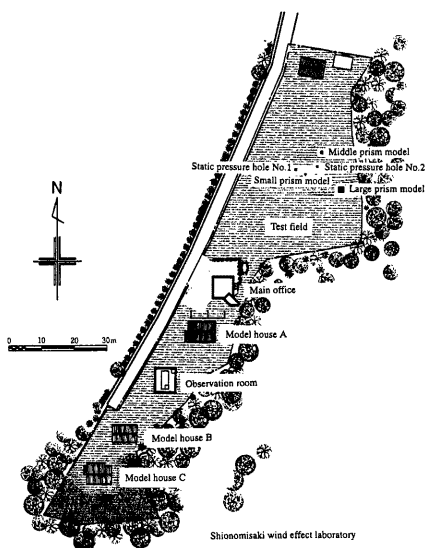


Fig.2 Arrangement of prism models and static pressure holes on test field of Shionomisaki wind effect Laboratory

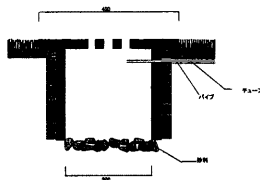


Fig.3 Section of static pressure hole

高さ約 5m の林が隣接している。観測フィールドに Fig.2 に示す大きさの異なる 3 つの角柱模型と 2 つの大气静圧溜を配置した。大气静圧溜は Fig.3 に示すように地面に 30cm 角の竖穴を掘り、これに直径 10mmφの穴が 9 つ付いた上蓋を地面と凹凸のないように被せて固定した。大气静圧溜の内圧には室内圧の成分は小さくほぼ地面上の大气静圧が作用していると考えられる。角柱模型や大气静圧溜の内圧は各種の絶対圧型圧力変換器 (Paroscientific 6016B(水晶発振式), Copal P-3000S-351A(半導体拡散式), Multur BA-90(静電容量式)) 等で計測を行い、角柱模型や大气静圧溜まわりの風は 6 台の超音波風向風速計 (Kaijo DA-600, WA-200 他) で計測した。また基準風速として実験所本館屋上 (地上高約 21m の位置) にも超音波風向風速計を設置した。全ての計測器の出力電圧は AD 変換 (Canopus ADJW-98) されパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801DA) で途切れなく多点同時計測された。なお、大气静圧溜は長さ 20m, 内径 4mmφの硬質ポリウレタンチューブを介して絶対圧計に繋がれているが、チューブの固有振動数は解析対象周波数よりも十分高いので圧力伝達系の補正は行っていない。

3. 観測結果

Fig.4 は平成 10 年 1 月 15 日に計測された模型内圧と速度圧の一例である。実験所本館屋上での風向は北東から東北東でほぼ安定しており、平均風速は約 17m/sec で最大風速が 30m/sec 前後の周期の長いガスト (周期は数分から 30 分) が含まれている。このときは低気圧の接近によって大气静圧が減少傾向にあるが、この長い周期のガストに伴う圧力変化が 300~400Pa 以上もあり、大气静圧がほぼ一定であるとは言えない。また大气静圧溜と角柱模型の内圧はお互いに非常に良く似ている。大气静圧溜の内圧はほぼ地表面上の大气静圧と考えられるので、角柱模型の内外を問わずほぼ同じような大气静圧が作用していることになる。

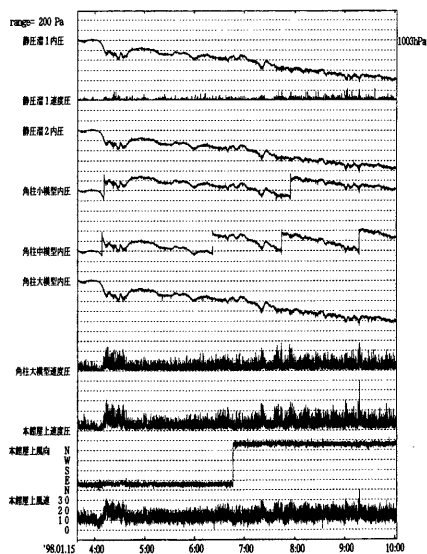


Fig.4 Sample of inner pressures of prism models, inner pressure of static pressure holes and velocity pressures (01/15/1998)

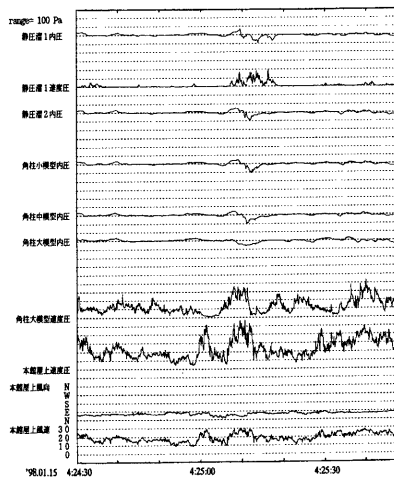


Fig.5 Sample of inner pressures of prism models, inner pressure of static pressure holes and velocity pressures (01/15/1998)

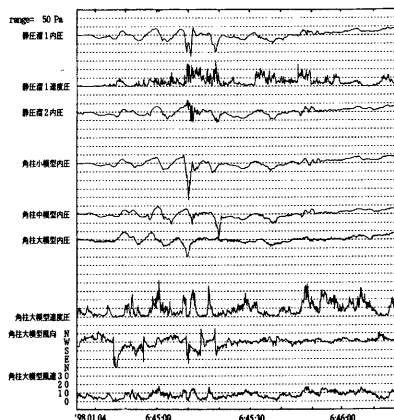


Fig.6 Sample of inner pressures of prism models, inner pressure of static pressure holes and velocity pressures (01/04/1998)

Fig.5 は Fig.4 の一部を横軸の時間をさらに引き伸ばしたものである。10 秒程度の短い周期のガストが来る前に一度大気静圧溜や角柱模型の内圧が上昇しその後低下しているのが確認できる。また、この現象が大気静圧溜や角柱模型の設置場所によって位相のずれをもっているのが特徴的である。即ちこの圧力変化は短い周期のガストに伴って地表面上を移動しているものであることが分かる。桂 (1990) が多面体形静圧検出装置を用いて計測した圧力データにもこれと同様の性状が示されている。

Fig.6 は平成 10 年 1 月 4 日に計測された例である。風向は南西で観測フィールドは実験所本館の後流にあたるため、実験所本館の Karman 渦によるとみられる周期的な変動が速度圧だけでなく大気静圧溜や角柱模型の内圧にも見られる。このときの内圧変動の平均周期は約 8sec、振幅は最大で 100Pa を超える。このように周囲の建物などの影響を受けても大気静圧は大きく変動することが分かった。これは建物が連立して存在する場合、風下側建物は風上側建物の後流の影響で、建物まわりの大気静圧が周期的に変動する場合があることを示している。この場合風下側建物の内圧にも同様の変動が発生し、外装材の風圧力を測定するとこの成分は相殺されることになる。ところがこのようなケースで風洞実験を行う場合、基準圧を模型の影響のないところで計測するためにこのような圧力変動が相殺されずに残ってしまうことになり問題である。

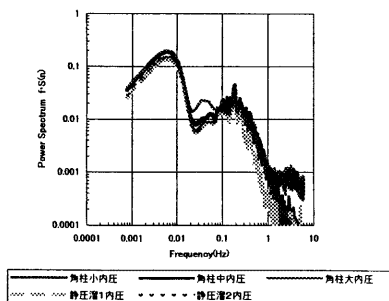


Fig.7 Power spectra of inner pressures of prism models and static pressure hole (01/15/1998)

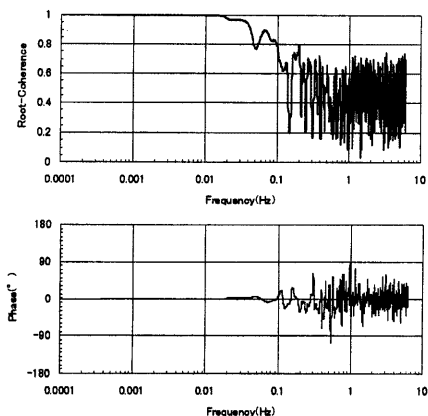


Fig.8(a) Cross spectra between inner pressures of static pressure hole and large prism model

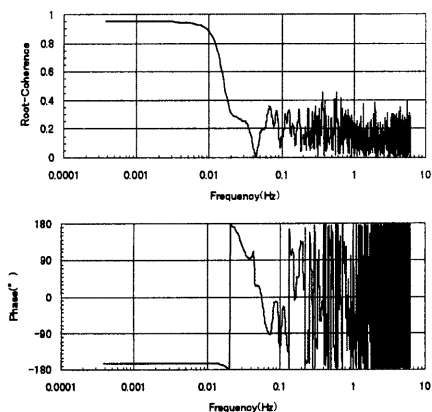


Fig.8(b) Cross spectra between velocity pressure at top of main office and inner pressures of static pressure hole

Fig.7 は大気静圧溜と角柱模型の内圧と速度圧のパワースペクトルである。速度圧パワースペクトルの高周波数側が $-5/3$ 乗に比例するのに対し、内圧のパワースペクトルの高周波数側が約 $-5/2$ 乗に比例している。これは角柱模型内の容積による高周波数成分の減衰とも考えられるが、一番低い角柱大模型の固有振動数が約 2.5Hz あり (Holmes, 1979), また容積や形状の異なる大気静圧溜の内圧のパワースペクトルでもほぼ同じ勾配であることから、この地表面上の大気静圧の高周波数成分は小さいと考えられる。Elliott (1972), Kataoka et al. (1989) による観測結果では、大気静圧のパワースペクトルは $-5/3$ 乗に比例するという報告がある。Kataoka et al. (1989) の大気静圧検出器は、球形のブロープに作用する表面圧を平均することで、速度圧に比例する成分を相殺するように工夫されている。しかしこれは一様流を用いた風洞気流中での検定によるものであり、自然風のような乱流の場合には速度圧の変動成分が混入するのではないかと考えられる。パワースペクトルの低周波数成分は、大気圧の非定常な変動成分のために解析データによってそのパワーが大きく変化するが、大気静圧溜と角柱模型の内圧のパワーはほぼ同じである。

Fig.8(a)は大気静圧溜と角柱大模型の内圧同士の相関、Fig.8(b)は実験所本館屋上での速度圧と大気静圧溜の内圧との相関である。Fig.8(a)では、Fig.4でも分かるように大気静圧溜と角柱模型の内圧はほとんど似たような波形を示しているため、0.02Hz 以下の低周波数側ではルートコヒーレンスがほぼ 1.0 となり位相もほぼ 0° で極めて強い正の相関がある。他の内圧との相関についても同じ性状を示し、また内圧の低周波数成分のパワーがほぼ同じことから、大気静圧溜と角柱模型の内圧の低周波数成分はほとんど同じものであることが分かる。つまり、観測フィールドにわたってほぼ同じ大気静圧の低周波数成分が作用していることになる。また、高周波数側では 0.1Hz 前後でルートコヒーレンスが少し高くなる場所があるが、解析したデータによってもその性状が異なる場合があり、また圧力伝達系による信号の歪の問題もあることから、本研究ではその性質について正確な評価はできない。一方 Fig.8(b)に示す実験所本館屋上の速度圧と大気静圧溜の内圧の相関は、0.01Hz 以下の低周波数側でルートコヒーレンスが 0.9 以上と高くかつ位相が約 -180° となり負の強い相関をもっている。また、大気静圧溜の上方約 2.2m の位置に設置した超音波風速計から求めた速度圧と大気静圧溜の内圧との相関を Fig.8(c)に示す。0.01Hz 以下の低周波数側のコヒーレンスは 0.5-0.8

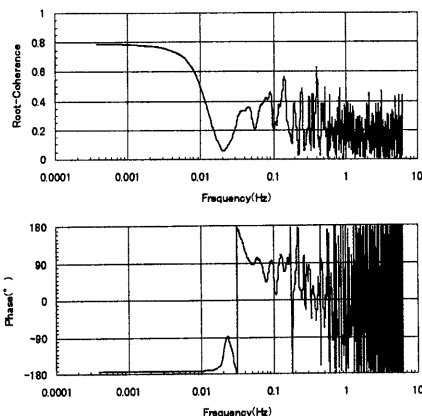


Fig.8(c) Cross spectra between velocity pressure above static pressure hole and inner pressures of static pressure hole

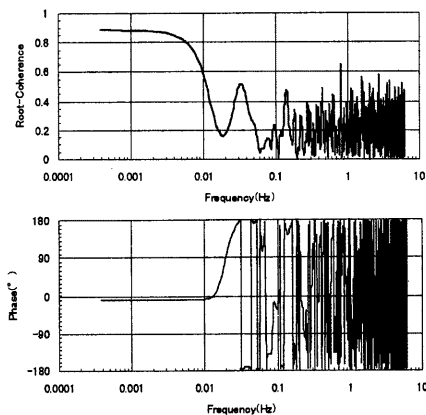


Fig.8(d) Cross spectra between velocity above static pressure hole and velocity at top of large prism model

と Fig.8(b)にくらべて小さいことを示している。実験所本館屋上と大気静圧溜との距離は約 45m もあるにもかかわらず、実験所本館屋上の速度圧と大気静圧溜の内圧が非常に強い相関をもつのに対し、大気静圧溜近傍の風との相関が実験所本館屋上の風との相関よりも小さくなることは興味深い結果である。解析データにより相関の大きさが変わるものの、Fig.2 に示す別の大気静圧溜や角柱模型の内圧を使っても同じ傾向が得られた。つまり、観測フィールドの地表面付近での大気静圧の低周波数成分は上空の速度圧と非常に強い相関をもち、それは地表面上の速度圧との相関よりも強いことが分かった。

Kataoka et al. (1989) の観測結果では、0.005 Hz-0.1Hz の高周波数側の大気静圧と水平方向の位相差は 20° 以内で大気静圧は風速とほぼ同位相で変動しているが、0.004Hz 以下の低周波数側ではほぼ逆位相になっている。この大気静圧検出器は毛細管を付けた恒圧空気溜を使用しておりこれの時定数が約 27 分程度になるため、このような低周波数成分の信頼性は低いとしているが、筆者らの結果とは異なる結果となった。Fig.8 (d)に大気静圧溜と角柱大模型の風速同士の相関を示す。Fig.8 (a)と Fig.8 (d)との比較から、地表面付近の模型内圧同士の相関は 0.1Hz 以下の全周波数帯域にわたって風速同士の相関よりも 0.1-0.4 程度高い。つまり大気静圧の空間スケールが風速の空間スケールよりも大きいことが分かった。

Fig.9 は Fig.4 中の実験所本館屋上の速度圧と大気静圧溜の内圧を取り出して、その圧力比を求めたものである。大気静圧溜の内圧は大気圧の長周期のトレンドがあるために、0.0002Hz のハイパスフィルタを通してこのトレンドを除去した。Fig.9(a)はハイパスフィルタのみを通したもので、Fig.9(b)は 0.0002Hz-0.001Hz のバンドパスフィルタを通したもので、Fig.9(c)は Fig.9(b)から求めた圧力比である。Fig.9(a)(b)ともに上側の圧力波形が速度圧で下側の圧力波形が大気静圧溜の内圧である。図中で前半の部分で実験所本館屋上の速度圧と大気静圧溜の内圧が準定常的に変化することがあり、このときの圧力比が-0.8 でほぼ一定している。またこのときの大気静圧溜の内圧は実験所本館屋上の速度圧よりも位相が約 50sec 程度進んでいる。この傾向は他の風向においても観測され、実験所本館屋上の速度圧が地表面上の大気静圧の変化よりも後に生じていることを示している。一方、図中の後半の部分では速度圧がほぼ一定であるのに対し、大気静圧溜の内圧には-150Pa を超える圧力低下があり、必ずしも実験所本館屋上の速度圧と大気静圧溜の内圧が準定常的に変化するとは限らないことも示している。これについては実験所本館屋上の速度圧がその流れ場を代表した基準となっていないこと、上空の風の流れとは無関係な大気圧自身の変化、などの要因が考えられる。

4. 考察

実験所本館屋上の速度圧と地表面上の大気静圧との間の相関が低周波数成分で高いことについてその要因を考察してみる。風力実験所観測フィールドまわりの状況については 2 章で述べたように、北東から東にわたって約 5m の林があり、また潮岬全体

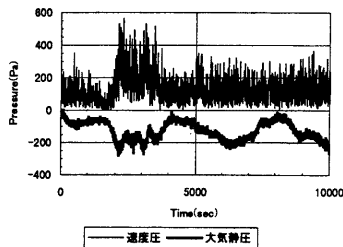


Fig.9(a) Velocity pressure at top of office building and inner pressure of static pressure hole through high-pass filter; cut off frequency:0.0002Hz

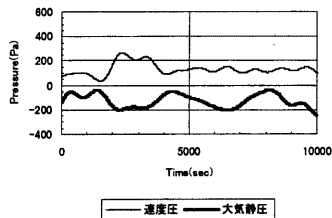


Fig.9(b) Velocity pressure at top of office building and inner pressure of static pressure hole through band-pass filter; cut off frequency:0.0002Hz and 0.001Hz

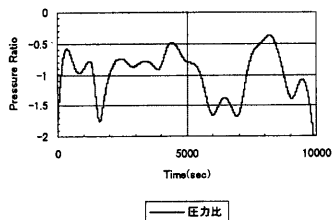


Fig.9(c) Pressure ratio of velocity pressure at top of office building and inner pressure of static pressure hole

が約 50m の高台である。北東の風向のときにはこの観測フィールドが林の後流域に入り、このような負圧がフィールド全体にわたって発生することが考えられる。しかし、この林の後流域のスケールは高々 50m 程度の大きさであるのに対し大気静圧の低周波数成分の波長は数 km にも及び、また林の影響の無い別の風向においても同様な結果が得られたことから、林の後流によるとは考え難い。また潮岬が約 50m

の高台であるために、高台を吹き上げる風によって高台上では負圧になるとも考えられる。ところが Fig.4 の風向は北東から東北東であり風力実験所はこの高台の風下端に位置することになる。そのため Fig.9 で示した -0.8 のような大きな負圧がこの高台によって発生するとは考え難い。そこで、筆者らは風を渦無しの完全流体とみなして、風が断面変化をせずに一様に流れるとすると、圧力方程式の関係から速度圧の時間的変化と等しい圧力（大気静圧）の空間的変化が得られることに着目した。つまり風力実験所上空のある層での風は、地表面の凹凸を無視できるくらい大きいスケールで常にほぼ水平に吹いており、この風の風速変化によって大気静圧の変化が生み出され地表面上に伝播すると考えた。この大気静圧変化の成分は定常流の場合の流水圧（今井, 1973）や運動圧（日野, 1992）に相当するものと考えられる。一方、地表面付近での風は地表面の凹凸によって乱されて、上記のような大きいスケールでは圧力方程式が成り立つような状況にならないので、地表面付近の速度圧と大気静圧との相関は低周波数側で悪くなる。さらに、地表面上の大気静圧の方が地表面付近の速度圧よりも位相が進むのは、上空で発生した大気静圧の変化はほとんど瞬時に地表面に伝わるのに対し、風速の変化は時間遅れをもって地表面に伝わっていることを示しており、上空で生じた強風が下降し地表面に到達するという現象を表している。

これらの観測結果は模型実験結果であり、実際の建物についてもこれと同様のことが言えるのかどうか、これだけでは分からない。例えば実際の建物の容積はこの角柱大模型の容積の 100-1000 倍はあり、建物の外でこのような大気静圧の変化があったとしても建物内までに伝わらないかもしれない。加藤ら（1996）は比較的開けた市街地にたつ高層建物の内圧の実測を行い、10 分間平均された建物各階での平均内圧と建物の外に設けた百葉箱の平均内圧の時刻歴変化を示している。この時刻歴では台風の接近により大気圧が減少する長周期の変化だけでなく、より短周期の変動まで建物の内外の圧はお互いに非常に良く似ている。加藤らはこれを全て大気圧の変化と考えているようであるが、建物屋上の風速変動に対応して建物内外の圧がほぼ同時に変動している箇所がいくつかあり、本論で示した大気静圧変動の低周波数成分と思われる。このように、ここで示した大気静圧変動の現象は実建物においても建物内に伝播しており、建物の室内圧を評価する場合にはこの大気静圧を正確に評価する必要があることを示している。

今後ドップラーソーダやドップラーレーダといった風速計測システムを使って上空の風を空間的に捉えることができれば、上空の風速変化と地表面上の大気静圧との関係をより明確に調べることができると思われる。

5. おわりに

潮岬風力実験所において模型内圧と大気静圧の観測を行った結果以下のことが分かった。

1. 観測に用いた角柱模型内圧の変動成分の大半は大気静圧の変動であった。
2. 大気静圧の変動成分は低周波数成分と高周波数成分の2つに大きく分けられ、低周波数成分は上空の大きなスケールでの風速変化によるもので、高周波数成分は短いガストに伴う特徴的な圧力変化を示す。
3. 周辺の建物の影響により大気静圧が変動する場合もある。
4. 大気静圧の高周波数成分は速度圧の高周波数成分に比べて小さい。また、大気静圧の空間スケールは風速の空間スケールよりも大きい。

謝辞

この研究は、京都大学防災研究所特定共同研究(研究代表者：東京電機大学 河井宏允教授)の一環として行ってきたものであり共同研究者の方々にも多くのご助言を頂いた。また実験を行うにあたり日本大学講師神田 亮氏、同卒業生中野 忍君、潮岬風力実験所技官尾崎壽秀・河内伸治氏にご協力頂いた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

今井 功 (1973)：流体力学(前編)，装華房，428 pp.

- 上田 宏・桂 順治・藤澤一善・藤井邦夫 (1992)：強風中における低層建築物の室内圧に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 434 号，pp. 51-58.
- 奥田泰雄・桂 順治・塚原康平 (1996)：自然風中に置かれた角柱模型に加わる風圧力の計測，京都大学防災研究所年報，第 39 号 B-1，pp. 95-105.
- 奥田泰雄・桂 順治・川村純夫 (1994)：自然風中に置かれた 3 次元角柱に加わる風圧力（側面上に発生する局所的な負圧），第 13 回風工学シンポジウム論文集，pp. 155-160.
- 奥田泰雄・桂 順治・塚原康平 (1996)：自然風中に置かれた 3 次元角柱に加わる風圧力（その 2．流形成による風圧力の発生条件），第 14 回風工学シンポジウム論文集，pp. 275-280.
- 桂 順治 (1988)：室内圧計測用擬似恒圧空気溜の試作，京都大学防災研究所年報，第 31 号 B-1，pp. 393-398.
- 桂 順治 (1990)：大気乱流中における多面体形静圧検出装置の試作について，京都大学防災研究所年報，第 33 号 B-1，pp. 345-352.
- 加藤信男・大熊武司・新堀善則・栗田 剛 (1996)：高層建築物の外装材を対象とした風力に関する研究（その 1）平均室内圧の性状について，日本建築学会構造系論文集，第 489 号，pp. 25-32.
- 日野幹男 (1992)：流体力学，朝倉書店，469 pp.
- Elliott, J. A. (1972)：Microscale pressure fluctuations measured within the lower atmospheric boundary layer, Journal of Fluid Mechanics, Vol.53, pp.351-383.
- Holmes, J. D. (1979)：Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, Proceedings of 5th International Conference on Wind Engineering, Fort Collins, pp. IV-8-1-16.
- Kataoka T., Mitsuta, Y. and Tsukamoto, O. (1989)：The development of a fast response static pressure, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 67, No.3, pp.351-357.

On Inner Pressures of Building Models and Static Pressures in the Atmospheric Boundary Layer

Yasuo OKUDA, Junji KATSURA and Hiromasa KAWAI*

* Faculty of Science and Engineering, Tokyo Denki University, Japan

Synopsis

The inner pressure of a building is shown as the sum of atmospheric static pressure and indoor pressure without the influence of air-conditioners or fluctuations of room temperatures. The atmospheric static pressure is regarded as nearly fixed on estimating the inner pressure of the building. The authors found out that the fluctuations of the inner pressures of prism models were very similar to each other in natural wind. We also detected that most components of the fluctuations of the inner pressures of models were the fluctuations of atmospheric static pressures.

Keywords: atmospheric static pressure; inner pressure; building model; natural wind