

室内圧計測用擬似恒圧空気溜の試作

桂 順 治

A PSEUDO-CONSTANT PRESSURE RESERVOIR FOR INDOOR PRESSURE MEASUREMENTS

By Junji KATSURA

Synopsis

Using an ordinary pressure transducer of difference pressure type and a thermos bottle, an absolute pressure in a room was detected with aid of the thermal data simaltenously recorded. The difference of outputs from two apparatuses which had the same pressure sensibility and the different thermal characteristics was utilized to obtain the indicial responses of temperature regardless of the variation of barometric pressure. Under a cold front with strong winds whose maximum speed was 17.5 m/sec an indoor pressure was measured in a laboratry hall $54 \times 12 \times 12$ m³ by one of the apparatuses. The absolute pressure record amended with thermal data fitted well on the readings of a mercury barometer, but was poorly correlated to the dynamic pressure over the roof top.

1. はじめに

室内圧を検出する作業をする前に、室内圧に対するきちんとした定義をする必要があると思われる。常識的には室内の絶対圧を指すことにしておけば問題がないように思われるが、温度変化のない気密性の保たれた建物内部での絶対圧は変化しないにもかかわらず、外部の大気圧が変化すれば、室内圧が不変かどうかは意見の分かれるところであろう。現実に気密性の完全な建物などは存在しないため、風のないところでは室内圧と大気圧は一致するという暗黙の了解があるからである。そのように考えると室内圧は絶対圧ではなく、風のない場合の大気圧を基準にすればよいことになる。このようにすれば胃や腸が外皮と同じ組織になっているのと似て、室内圧は建築外面に作用する圧と同じ定義になる。しかし、問題は風のない場合ではなく、風のある場合でないと意味がない。しかるに、風の有無にかかわらず大気圧は不変であるという保証はない。結局のところ建物に作用する風圧を明確にするためには、外面圧も室内圧も絶対圧計測するよりほか、仕方がないというのが筆者の主張である。

これまで建物に作用する風圧の設定には風洞実験が主に用いられてきている。風洞でも基準静圧を厳密に定めることは容易ではないが、よほどの非常識を犯さないかぎり、ほぼ一致した結果が得られるものである。一方、完成建物の風圧計測については公表されているものは少なく代表的なものをあげると、Rathbun¹⁾の Empire State ビルの実験、Newberry²⁾等の Royex house の実験、Dalglish³⁾の Commerce Court Tower の実験が有名であるが、基準静圧についてはそれほど明確にされているとは考えられない。また変った例として2階建住宅を扱った Eaton⁴⁾等の実験では地中のマンホールを基準圧にしているが、それがはたして風の影響を受けないといえるのか疑問である。Lee⁵⁾等が行った実験では外表面間の差圧を計測した例もあるが、不確定な基準静圧を避ける意味では面白い反面、出力がどちらの面の寄与によるものかの判定が難かし

い。また田中⁶⁾等は外装材や窓ガラスに作用する力として風によるものの他、室内気温分布による煙突効果や空調機械による圧なども考慮した計測を行っており、実用面で有用であることは間違いないことであるが、それだけでなく不確定要素が多い風荷重としての室内圧を明確にする必要があると考える。

おそらく、これまででも絶対圧計測の必要性は誰も考えたところであろうが、技術的な困難さがあったことも事実である。最近では水晶体の固有振動変化を利用した動作領域の広いセンサーが開発されており、同様のものを利用した絶対圧計の実用化も進んでいるようである。しかし、本格的な計測に利用するにはまだまだ経費を要するものである。したがってここでは通常の差圧変換器を用い、その背圧を既知として、絶対圧の変動を検出する装置を考えた。そして1点でも計測値として意味のある室内圧を取上げた次第である。

2. 実験方法

静圧の検出方法は Fig. 1 に示すように、圧力変換器の基準圧として魔法瓶によって温度遮蔽された空気溜めの圧を用いたものである。もとよりこのような装置では恒圧を期することは無理で、魔法瓶周辺の温度を同時に計測して、温度補正をしなければならない。そのためには装置の正確な温度特性を求める必要があり、その方法自体が本研究の目的でもある。したがって、その詳細は次節で述べ、ここでは考え方のみを示すこととする。

この装置の出力は大気圧である静圧と温度とによるものであるから、圧力感度が等しく、温度特性が大きく異なるもう1つの装置を利用して、静圧の効果を除いてしまおうということである。つまり、ある状態での両装置の出力電圧の差には静圧の影響はなく、温度変化のみ追従するものであると考えることができる。そこで装置に作用させる温度変化としては、自然のものでも分析が不可能ではないのだが、既知であるに越したことはないため、温度変化を制御できる恒温槽を用いることにし、次節に示すようなインディシャル応答をもとめた。別の方の装置として、Fig. 1 に示されたものから外側の発泡スチロールを除いた裸の魔法瓶を用いたものとした。そして、そのようにすれば、かなり温度特性の異なる装置が得られるであろうと考えた。これら2つの装置を容積 $50\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 39\text{ cm}$ の恒温槽に入れて実験を行った。

3. 実験結果と考察

測定を開始する約12時間前から恒温槽の温度を調節して、圧力センサーの出力がその動作域に留まるように調節操作をくりかえした。ただし、3時間前からは恒温槽の指示温度を 24°C にして一定に保った。その後、両装置の出力波形が似てきたと思ったところで、指示温度を 23°C に落とし、そのときに得られたデータを Fig. 2 に示す。温度が低下すれば、瓶のなかの空気は凝縮し、変換器のダイヤフラムのたわみは大気圧が上昇するのと同方向の出力を生じさせる。したがって、温度低下の影響は、まず、裸の瓶の方に強く現れ、発泡スチロールで保温した瓶の方がそれに追従している様子がわかる。温度計の出力が激しい変化を繰り返しているのは、恒温槽の温度センサーによる帰還調節機構が作動しているためである。温度計出力がやや右下がりになったのは、装置に取り付けた白金線温度計と、恒温槽のセンサーとの出力の差異によるものと考えられ、槽内の温度分布の非一様性に起因しているのかも知れない。ここではあまり精度は追求せず、段状の温度変化が与えられたものとみなすことにする。

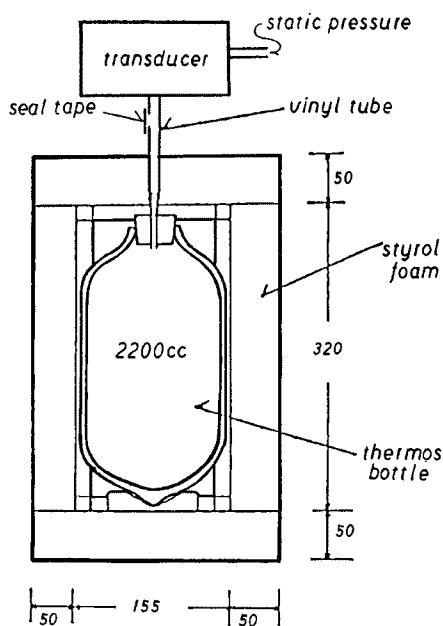


Fig. 1. Apparatus covered with styrol foam.

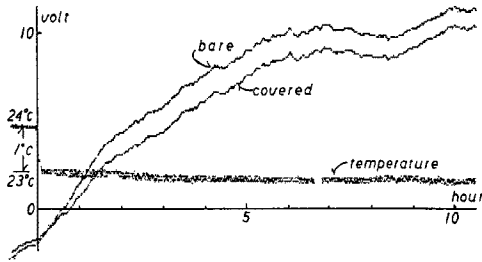


Fig. 2. Outputs of apparatuses for step change of temperature.

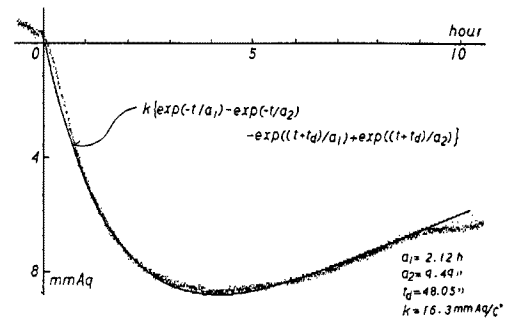


Fig. 3. Output difference of both apparatuses and curve fitting.

Fig. 3 は圧力感度を等しく調節した両装置の出力の差をとったものである。したがって、ここでは同じ大気圧中に解放された圧力導入部の大気圧による成分は相殺されており、図に現れた曲線は温度変化によるもののみであるとみなすことができる。曲線の終わりの方に少し異常な部分が見られるが、これは Fig. 2 で裸の装置の方の出力が動作域である 10 V を越えたためであると思われる。なお、この図では縦軸を拡大し、圧力単位で示したため、増幅器の熱雑音で曲線がぼやけている。

ここで、それぞれの装置の出力における温度による成分が瓶の内部と装置周辺部との温度差に比例すると仮定することは自然である。そのようにすれば、温度差 t とインディシャル応答 $r(t)$ とは 1 次系で表すことができ、

$$r(t) = k(1 - \exp(-t/a)) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 k は瓶内の温度が 1 度変化するときの出力変化、 a は時定数である。
また、インパルス応答は上式を微分して、

$$s(t) = (k/a)\exp(-t/a) \dots \dots \dots (2)$$

となる。そこで、裸の装置と発泡スチロールで覆った装置についての添字を 1, 2 とし、それぞれの出力を V_1, V_2 とすれば、

$$V_1 = p_a + \int_{-\infty}^t s_1(t-t')T(t')dt' \dots \dots \dots (3)$$

$$V_2 = p_a + \int_{-\infty}^t s_2(t-t')T(t')dt' \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 p_a は大気圧で、 $T(t)$ は温度変化、両式の差をとれば、

$$V_2 - V_1 = \int_{-\infty}^t s_2(t-t')T(t')dt' - \int_{-\infty}^t s_1(t-t')T(t')dt'$$

$T(t) \equiv 1, t > 0$ とみなせば、

$$\begin{aligned} V_2 - V_1 &= r_1(t) - r_2(t) \\ &= k(\exp(-t/a_1) - \exp(-t/a_2)) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

Fig. 3 では、遠い過去に行った温度調節の影響を 1 回のインディシャル変化に置き換え、 $k(\exp(-(t+td)/a_1) - \exp(-(t+td)/a_2))$ の項を付加している。そして実験から得られたデータとの 2 乗誤差が最小となるように a_1, a_2, t_d を定め、大きさが合うように k を定めた。それらの値はそれぞれ 2.12, 9.48, 48.05 時間、および 16.25 mmAq/°C となった。

このようにして、両装置のインディシャル応答特性が求まったので、それらを微分して、インパルス応答に直し、温度データとのコンボリューションをとることによって、温度による影響を分離することができる。Fig. 4 の上半分はこのような手法で得た両装置の測定結果である。図面では波形の比較を容易にするため間隔をあけて示したが、特別な意味はない。注意ぶかくみると、中央部で両端部に比べて、間隔が狭くなっていることがわかるが、その差は0.5 mmAq 程度である。なお、Fig. 4 の下半分は補正に用いた温度による成分である。2つの波形を完全に合同にすることは容易ではないが、この程度で妥協するならば、どちらの装置もほぼ正しい結果を示しているものと解釈することができる。

この方法の操作上の欠点は測定開始時点よりかなり以前からの温度データを必要とすることである。しかしながら、現実には設置場所として温度変化があまり急激でなく、開始時点以前までは、瓶内の空気は室内に解放されているのが普通であるから、それまでの温度が一定であったものと仮定しても、それほど大きい誤差にならないことも考えられる。

なお、圧力変換器を介した Helmholtz 形の共振周波数は約 15 Hz であり⁷⁾、自然風を対象とした計測には十分であろう。

4. 実 測 例

前節で述べた装置がどの程度正確に気圧変動に追従するかを試すために、当研究所に所属する風洞実験室内で、冬期に行った水銀気圧計との比較結果を示すことにする。実測例では、計測以前の温度履歴の影響が短かく補正の効果をわかりやすくする意味で、裸の方の装置を用いることとした。この実験室の容積は 54 m×12 m×12 m で、周壁はほぼ気密性が保たれており、天井には2基の換気扇があって、直接的な外気との接触はその部分で生じている。風速計はそのうちの1基のそば、屋根スラブの上 5.6 m のところに設置した。

Fig. 5 は1988年2月21日に計測したもので、午前中からの空調による計測前の暖房の影響がもっともよく現れた例である。計測開始後、装置の時定数の約3倍に相当する6時間を経過して、水銀気圧計との観測値が一するようになる様子がわかる。したがって、本装置を用いて長時間の絶対圧変化を追跡しようとする

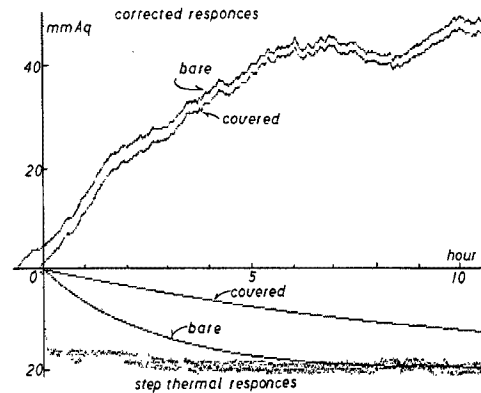


Fig. 4. Corrected barometric variations and step thermal responses for correction.

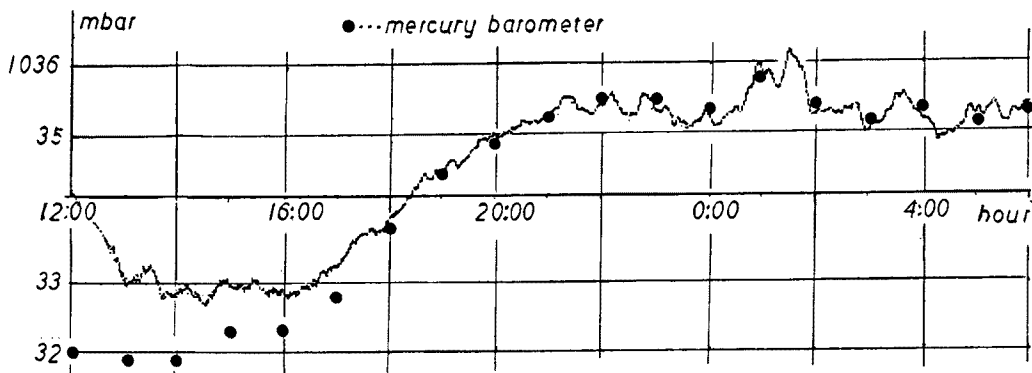


Fig. 5. Comparison of measured data with barometer readings for large thermal change.

と、計測開始6時間前の温度変化の記録が必要だということになる。なお、当日はほとんど風はなく、室内圧は大気圧と一致していると考えられる。

つぎの例は、1987年12月30日の寒冷前線通過前から通過後にかけての実測で、その結果を Fig. 6 に示す。このときは運よく室内空調が止められており、測定開始以前から温度はほぼ一定であったものと思われる。したがって水銀気圧計との観測値は最初から計測を終るまで6時間にわたって、よく一致している。当日は期待通り、強風が吹き、14時過ぎには最大瞬間風速 17.5 m/sec. を観測した。図には、風速を速度圧に直し、室内圧と同じスケールの mbar 単位で記入した。6時間という時間スケールで見ると速度圧の強さが、室内圧変化に対してどの程度のものであるかがよくわかる。また詳しくみると、前線通過直前には、風はさほど吹かないのに気圧にのみ約10分周期の変動が現れていること、一口に寒冷前線といっても強風になるのは何段階かになっており、強い気圧勾配の通過と強風発生とが対応していること、このスケールで見ると速度

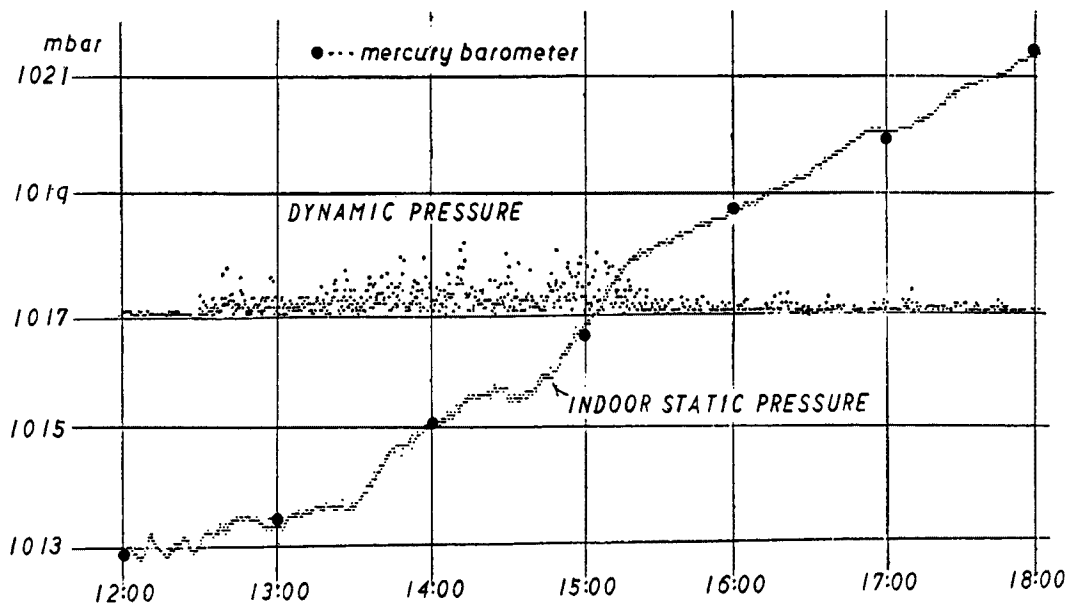


Fig. 6. Variations of indoor pressure and dynamic pressure under a cold front.

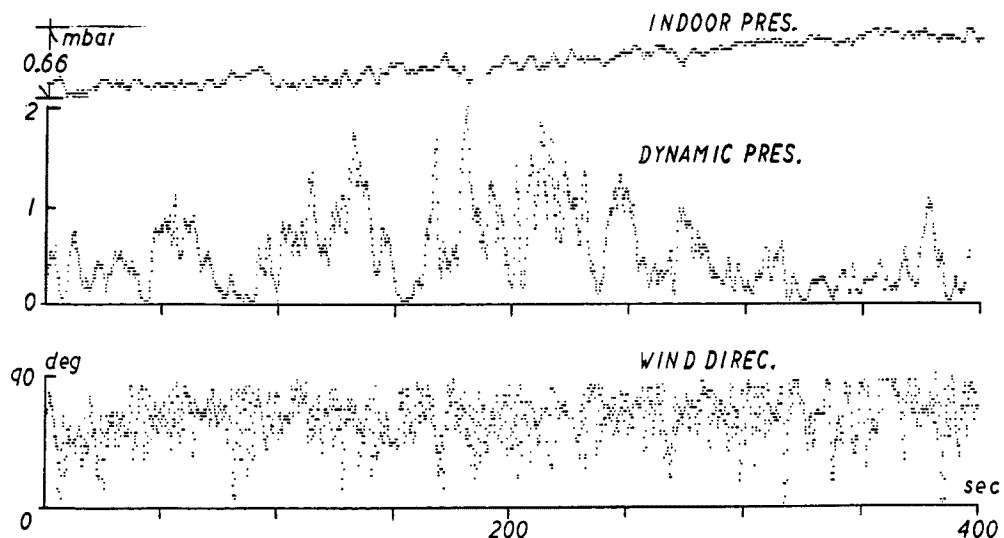


Fig. 7. Detail of strong wind duration in Fig. 6. and variation of wind direction.

圧と室内圧との対応はまったく不明であることがわかる。そこで同じ記録の風のもっとも強い部分の時間スケールを約100倍に引伸したものが Fig. 7 である。より詳しい解析をしないと断言することはできないが、室内圧と速度圧とはあまり相関があるとはいえない。図の下端の風向で 0° というのは建物の長手方向とほぼ一致させており、このときの平均風向は建物の辺に対して 45° よりもやや長辺寄から風が当たっていることを示している。それにしても風速、風向ともに変動が激しく、このような低層建物で、準定常性を期待することが無理なのかも知れない。高層建物でもこのような性状は存在し、Dalglish³⁾は風速が25 mm/sec 以上にならないと風圧係数を定めることは難かしいと述べている。したがって、この場合もより風が強いときには室内圧との対応性がみられるようになるかも知れない。ただこのような短時間にも大気圧は確実に上昇していることがわかる。したがって建物の気密性がよくなれば大気圧による圧が強くなることは考えられる。ただ、風が強くなれば室内圧の変動が強くなるということはいえそうである。これが風の変動に基づくものか、Liu⁸⁾等がいう音響的現象に基づくものかは今の段階では不明である。

5. ま と め

通常の差圧型圧力変換器の基準圧側に魔法瓶を接続して、ある時点の気圧を基準にした絶対圧計測装置を考案した。このような装置では温度変化によって生じる魔法瓶内部の圧の変化が問題となるのだが、温度調節が可能な恒温槽で、ステップ状の温度変化を与え、温度特性の異なる2つの装置の出力差を利用してそれぞれの温度応答特性を求める方法を示した。空調器の断続による数度の温度差を生じるようなところで長時間にわたる正確なデータを得ようとすれば、計測開始前かなり長い時間温度記録を必要とするという短所をもつが、温度変化の小さいところ、または構造物への風による作用力を問題にするような短時間記録でよいのならば、温度履歴によるドリフトよりも大気圧の変化が大きくなり、実質的には支障のないことを実測例をもって示した。実測の結果、いくつかの新しい知見につながる現象を見出したが、それらの検討については今後の研究に委ねることとする。

本実験は恒温槽が大事な役割を果し、その使用を許していただいた大和ハウス工業株式会社、とりわけデータ採取にいろいろとお世話下さった総合技術研究所の皆様には厚く御礼申し上げます。また本実験の端緒は休業半ばにして急逝された山田浩之⁷⁾君が修士論文の一部として手懸けて下さったものであり、ここにこのような形で一応の完成をみたことを霊前に慎んで御報告します。

参 考 文 献

- 1) Rathbun, J. C.: Wind Force on a Tall Building, Trans. ASCE, Paper No. 2056, 1940, pp. 1-41.
- 2) Newberry, C. W., K. J. Eaton and J. R. Mayne: The Nature of Gust Loading on Tall Building, Proc. 2nd International Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, 1967, pp. 399-428.
- 3) Dalglish, W. A.: Comparison of Model/Full-Scale Wind Pressure on a High-Rise Building, J. Ind. Aerodyn., Vol. 1, 1975, pp. 55-66.
- 4) Eaton, K. J. and J. R. Mayne: The Measurement of Wind Pressure on Two-Story House at Aylesbury, J. Ind. Aerodyn., Vol. 1, 1975, pp. 67-109.
- 5) Lee, Y., H. Tanaka and C. Y. Shaw: Distribution Wind- and Temperature-Induced Pressure Difference Across the Walls of a Twenty Story Compartmentalized Building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 10, 1982, pp. 287-301.
- 6) Tanaka, H. and Y. Lee: Scale Model Verification of Pressure Differential and Infiltration Induced Across the Walls of a High-Rise Building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 25, 1986, pp. 1-14.
- 7) 山田浩之・桂順治: 室内圧計測用恒圧空気溜の試作, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986, pp. 115-116.
- 8) Liu, H. and P. J. Saathoff: Internal Pressure and Building Safety, Proc. ASCE, Vol. 108, ST10, 1982, pp. 2223-2234.