Meteorological Society of Japan

〔論　文〕　　109：501（微気圧変動；気圧計）

局地気象観測のための微気圧計の開発

梅　谷　和　弘*・酒　井　　敏*

要　旨

通常数十分程度までの短い周期の圧力変動を計測するために用いられる微気圧計を利用して，数分程度から1日程度までの気圧変動を手軽に広帯域で測定する手法を開発し性能を評価した．この手法では振幅の大きな長周期の圧力変動の感度を下げ，短周期の変動と同程度の振幅に均して計測することで，広い周波帯でほぼ同じS/N比となるため，大気圧変動の計測では絶対圧計よりも利点が多い．同時に記録した絶対圧計と微気圧計の出力比較によって性能評価を行った結果，温度変化が小さい場所では誤差が周波数によらず振幅の2％程度となることが分かった．

この精度は，ヒートアイランド現象によって駆動されるヒートアイランド循環に伴う熱的な圧力差を分解できるものであり，従来の微気圧計で観測されてきた重力波の観測からより長周期の現象である局地循環まで幅広い現象を一つの測定器で測定できる見通しが立った．

1．はじめに

大気の微気圧変動は，Yamamoto（1954）が核実験に伴う変動を捕らえて以来，60年代を中心に盛んに研究され，核実験以外にも大規模な火山の噴火による大気の共振（Tahira, 1995）など自然現象との関連が調べられてきた．このような微気圧変動は周期が短く，振幅も小さいので，これを計測するためには通常の気圧計ではなく，専用の微気圧計が用いられる．これは一定時間で外界の気圧と平衡する空気チャンバーを持ち，このチャンバーの気圧と大気圧との差を取ることで長周期変動成分を押さえ相対的に短周期変動成分に対する感度を上げるものである．

一方，近年の計算機環境の進歩や数値モデルの高度化により，メソスケールの気象モデルを利用した研究を多く行われており，そのシミュレーションにより現実的な小規模な気圧構造が見られるようになっている．しかし，その検証や考察は十分行われておらず（室井ちあし，2006，私信），今後のメソスケール現象の観測や数値的研究を総合的に発展させるためには，このような圧力構造の検証に耐える実測は有意義である．

数値モデル的研究から示される圧力構造は，その空間的な規模から，シノプティックな気象よりは局地的な気象と関係があるものと考えられる．都市気象のような局地気象では，地面を被覆する材質の違いや地形が気象現象を大きく支配する要因であると考えられている．このような要因によって周囲と比べて温度や圧力が異なることになり大気の運動が起こるが，都市部でこのような気象要素の観測を高密度に行うことは極めて困難である．特に地表付近の風速は観測地点の周りの起伏による影響が大きく，この情報から局地循環の様子を切り出すことは容易ではない．また，気温に関しても風速同様に地点代表性の問題がある上に，地上気温の測定は出来ても，局地循環全体にかかわる上空の気温の測定は都市部ではほとんど不可能である．ウィンドプロファイラに代表されるように，地形の影響を受けにくい上空の風速のプロファイルを直接得る方法もあるが，現状では設備が大きく容易に高密度な設置や運営ができるものではない．次善の方法の1つは，その場の物理量を地点ごとに測定するのではな

* 京都大学大学院人間環境学研究科．

—2006年6月26日受領—
—2007年1月18日受理—

© 2007　日本気象学会

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

く，それらの積分量に関係する量を測定することである．この点で気圧は，温度の鉛直積分に関係し，風速の水平積分に関係するので，温度や風速に比べて測定点のごく近傍だけでなく，より広い範囲の状態を反映しているものと考えられ，観測点近傍の状況に左右されにくい．したがって，局地的な圧力構造の測定が高密度に出来れば局地気象の実態を捉える上でも有効であると思われる．

しかしながら，このような目的で気圧を測るためには技術的な問題がある．局地的な気象に関わる気圧変動の要因は，日射や都市部での人間の活動など周期1日の変動から，Brunt-Väisälä 振動数の数分程度の周期まで，時間スケールに10^3程度の幅がある．さらに，この程度の時間スケールの気圧変動の振幅はほぼ周期に比例している（Gossard, 1960）．すなわち，振幅が3桁違う変動を同時に記録しなければならない．最も振幅の小さい現象を1桁の分解能で測定するためには，4桁の精度が必要になる．一般に測定に使われる電子部品単体では1％程度の誤差があるのが普通であるが，それらを組み合わせ，何らかの調整を施して0.1%（3桁）の精度を確保することは比較的容易である．しかし，この精度をもう1桁上げることは相当の困難を伴う．精度の高い測定器が極めて高価である所以である．

ここで，前述の伝統的な微気圧計の特性に着目すると，もともと微気圧測定に対しては1日程度の気圧変動はノイズであり，これを減衰させるために空気チャンバーとの差圧を測る方法が取られてきた．このメカニズムで空気チャンバーの時間スケールより長い時間スケールの変動に対する出力は，その周期に反比例して小さくなる．しかし，もともとの気圧変動の振幅が周期に比例しているとすれば，長周期の変動の出力が短周期の信号より小さくなることはない．つまり，微気圧計は長周期の信号を除去しているのではなく，短周期の信号と同じ程度の振幅で記録していることになる．長周期の信号を記録する上でも，短周期の信号と同じ程度の振幅で記録できるということは，計測記録系のダイナミックレンジが広くなくても，短周期から長周期まで広い帯域にわたって高いS/N比で記録が可能であることを意味する．もちろん，長周期の信号は変形されて記録されるため，そのままでは気圧変動を読み取ることは難しいが，微気圧計の応答特性がわかれば，長周期の信号を復元することは原理的に可能である．

このように考えると，空気チャンバーの周期より長い時間スケールの記録も従来のようにノイズとして扱うのではなく，むしろ積極的に信号として扱うことで，局地気象における気圧変動に適した測定ができると考えられる．

問題は，シノプティックスケールより小さなスケールの気圧変動は小さいので，記録するためには高精度の測定が要求されることである．そこで，目標とする精度を具体的な圧力変動の大きさから見積もることにする．短周期の内部重力波を考えると，対流圏の一般的なBrunt-Väisälä 振動数である周期10分程度での圧力振幅は±0.02 hPa程度であり，これを1桁の分解能で記録するためには，±0.002 hPa程度の精度が必要になる．一方，長周期側では1日周期の気圧変動は約±2 hPa程度であるので，同様に1桁の分解能で記録するためには±0.2 hPa程度の精度が必要となる．

さらに，具体的な現象例として日射によって駆動される熱的な高低気圧を考慮する．1日の地上気温変化量を10°C（p-p）程度（振幅5°C）とし，約500 mの高度で昼夜の温度差がなくなるとした上で，単純に気温減率は高度500 mまで一定であると考えると，この温度の違いによって生み出される圧力差は約1 hPa程度になることが予想される（近藤ほか，1994）．この振幅を短周期変動と同様，1桁の分解能で記録することを目標とすると必要な精度は，周期1日で±0.05 hPaとなる．また，昼夜で都市と郊外に温度差が生まれることによって起こるヒートアイランド循環によって駆動される圧力変動についても，単純に昼間で都市と郊外の温度差がほとんどなく，夜間で温度差が5°C程度あると考え，先と同様の計算を行うと，昼夜の圧力差は0.5 hPa程度となり，これを分解する精度は±0.03 hPa程度となる．

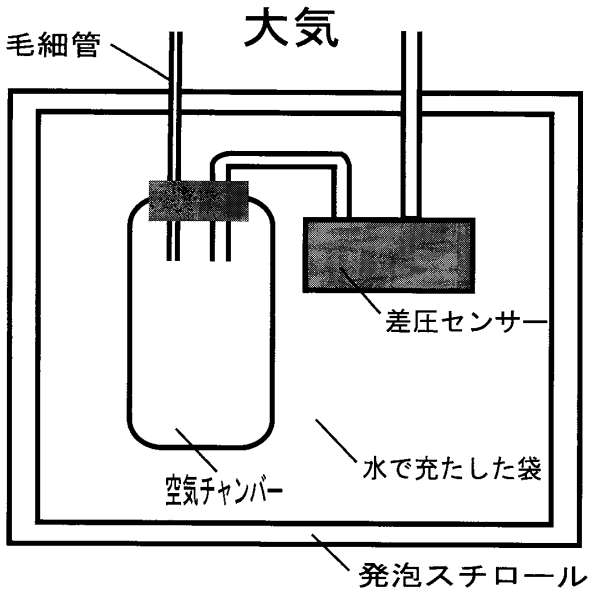
本研究では以上のことを念頭に微気圧計を設計製作し，高精度の気圧計との比較観測を行って，上記の必要な精度を確保できるかどうか検証を行った．

2．微気圧計の仕様

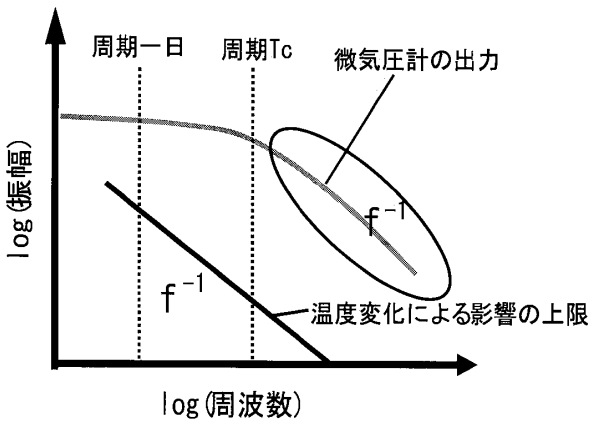
本研究で用いた微気圧計の概略を第1図に示す．微気圧計は一定時間基準圧力を保持する空気チャンバーと，その基準圧力と大気圧の差を検知する半導体センサーからなる．空気チャンバーはごく細い管で外気につながるようになっているため，チャンバー内の基準圧力は長い時間スケールにおいては大気圧と平衡する

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第1図　微気圧計の原理.



第2図　微気圧計の出力と温度の影響.

が，短い時間スケールの圧力変動には追随できないようになっている．このチャンバーの気圧緩和時間をT_cとすると，T_cより短い大気圧の変動は，チャンバー内の基準気圧の差として検知することができ，T_cより長周期の気圧変動はその変化速度に比例した振幅で記録されることになる．ただし，空気チャンバーの気圧はその温度にも依存するので，温度を一定に保つため保温箱にチャンバーを入れておく必要がある．

これまでの微気圧計では，短い周期の信号を記録するため，T_cより長い周期の信号はノイズとして考えて設計されてきたが，本研究ではこの長周期成分も信号として扱えるように設計するところが，これまでの設計と異なるところである．前述のように，気圧変動の振幅がほぼ周期に比例すると考えると，T_cより長周期側では，振幅がほぼ周期に依存しないため，T_cをなるべく小さくする方が，信号のダイナミックレンジを小さく出来て記録はしやすくなる．つまり，従来ノイズとして扱われてきた領域のほうが信号として扱いやすい．しかし，T_cを小さくすると，気圧センサーの出力が小さくなりすぎてセンサーの誤差が問題になる．気圧センサーとしてシリコンダイアフラム型のセンサーを考えると，センサーの誤差要因として最も大きなものが温度特性である．センサーを空気チャンバーの近くに設置して温度変化を小さく保ったとしても，この温度変化の影響は無視できない．したがって，現実の設計ではこの2つの要素を考慮して適当なT_cを決める必要がある．

まず，大きな振幅を持つ1日の温度変化が保温箱によってどの程度減衰されるかを見積もる．ここでは，発泡スチロールの箱に，大きな熱容量を得るために水を入れたものを保温箱とした．水の熱伝達係数が断熱材の熱伝達係数より十分に大きく，水の熱伝達が温度変化の周期より十分短い時間で伝わる場合には，保温箱の熱的な緩和時間T_bを定義することができる．このとき，T_bよりも短い周期の温度変化は周期に比例して減衰されて保温箱の内部に伝わるため，通常T_bはT_cよりも大きくとる．T_bは大きいほどよいが，現実的な保温箱の大きさを考慮して，T_bを170時間程度とする．このとき，1日の気温変化の1/7程度の振幅で保温箱の内部の温度が変化することになる．1日の温度変化を大きく見積もり20°C（p-p）とすると，保温箱内部の温度変化は3°C（p-p）となり，本研究で採用した微気圧センサー（ADP1101，松下電工）の温度変化による誤差は0.06 hPa程度となる．

一方，空気チャンバーの時定数T_cを1日より短くとった場合，1日の気圧変動に対する微気圧センサーの出力（空気チャンバーとの差圧）は，T_cより長周期側でほぼ周期に反比例して減衰を受ける．したがって，大気圧の振幅は周期に比例することから，微気圧計の出力の振幅と周波数の関係は第2図の灰線のようになる．この減衰された出力が上記の温度変化による誤差0.06 hPaより少なくとも1桁大きくなるようにT_cを決めなければならない．実際の1日周期の気圧変動は先に述べたように2 hPa程度とすると，1日周期の微気圧計出力の振幅A[hPa]は次の式のようになる．

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

$$A = 2 \times \frac{T_c}{24 \times 3600} \qquad (1)$$

したがって，これが0.6 hPa より大きくなるためには T_cは 7 時間程度より大きくなければならないことになる．

この条件で，短周期の変動に関する特性を考慮する．実際の気圧変動の振幅がほぼ周期に比例すると考えると，T_cを 7 時間程度とした時，内部重力波の周期である数分の変動の振幅は長周期の変動の振幅より 2 桁程度小さくなる．これは，3 桁以上の分解能を持つ記録系であれば，長周期変動から数分の周期までの記録が可能である事を意味する．また，外気の温度変動の振幅が周期によらないとしても，内部の温度変化は周期に比例して小さくなるため，それに伴う誤差も周期に比例する（第 2 図の黒線）．実際の温度変動は，1 日の周期にピークがありそれより短い周期の変動は比較的小さいと考えられるので，これは温度変化に対する誤差の上限である．微気圧計の出力である第 2 図の灰線と温度変化による誤差の上限を示す同図の黒線を比べると，短周期における温度変化による誤差は 1 日周期における誤差に比べて小さく，問題にはならない．

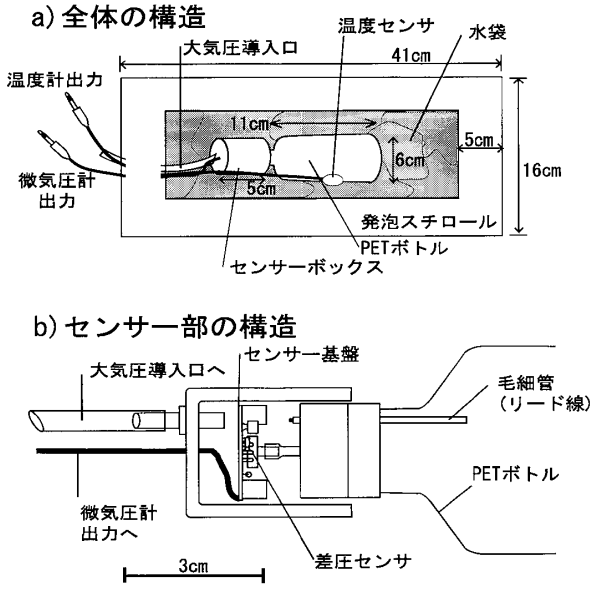
以上のことから，T_bを約170時間，T_cを約 7 時間として微気圧計を製作した．

3．微気圧計の設計

本研究で開発した微気圧計の構造を第 3 図 a に示す．

空気チャンバーには，市販のペットボトルを使用した．空気チャンバーの温度変化によって起こる誤差を補正する目的で，空気チャンバーの底面に接触するように温度計を配置した．この温度計については，酒井ほか（2007）によって紹介されたものを使用した．

微気圧計は空気チャンバー内の気圧を基準気圧としているため，空気チャンバーの温度変化ができるだけ小さくなる配慮をしなくてはならない．このため，測定器の熱容量を高める目的で，気圧センサを格納したセンサボックスおよび気圧チャンバーからなる測定器本体を，水を含ませた高分子吸収ポリマーを収めたビニール袋によってくるみ，さらに装置全体を厚さ約 5 cm の発泡スチロールの容器に格納した．このようにすることでどの程度温度変化を小さくすることができるか調べるため，1 日の温度変化が15℃程度の屋外で



第 3 図　微気圧計の構造．

風が直接通らず直射日光が当たらないような場所に微気圧計を静置したところ，空気チャンバーの温度変化は約 3 ℃程度であった．

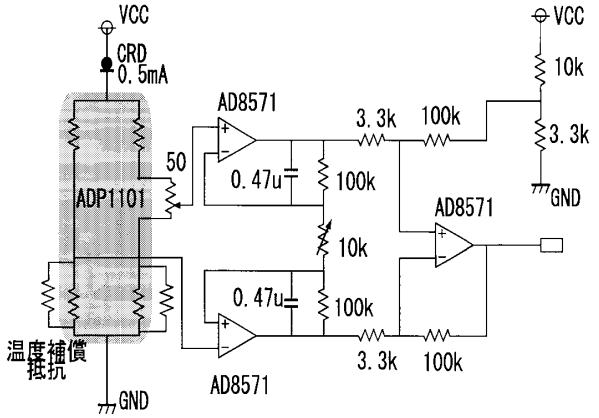
センサーボックスには，空気チャンバーと外気を結ぶ毛細管と差圧センサ等回路が納められている．その内部構造は第 3 図 b に示す．センサーボックスに使用したのは継手キャップである．その内部に，測定の要となる差圧センサーの基盤を格納した．差圧センサーには，2 つの圧力導入口がある．1 つは，センサーから煙突状に伸びる筒であり，これにはペットボトルの内部から伸びるビニールチューブを繋ぎ，空気チャンバー内の圧力を導入した．もう 1 つの，圧力導入口はセンサーの表面の穴となっており，センサーボックスの内部の空気圧が導入されることになる．センサーボックスの内部と測定器外部とはビニールチューブで繋ぎ，センサーボックス内の圧力が大気圧となるように配慮した．

センサー回路の回路図を第 4 図に示す．使用したセンサーADP1101（松下電工）はシリコンダイアフラム方式の差圧センサーで，ブリッジの形をした 4 つの抵抗体によって構成されている．センサーは温度によって抵抗値が若干変動するため，それを補償する抵抗を入れる必要がある．個別のセンサーについてオフセット電圧の温度変化がなくなるように，温度補償抵抗をセンサーのいずれかの傍らに入れた．

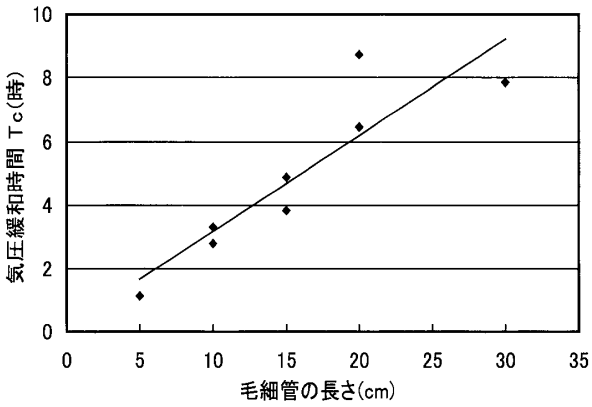
回路に用いた抵抗器は温度補償抵抗を除いて金属皮膜抵抗を用い，高周波のノイズを除去する目的でオペ

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第4図　センサーの回路図.



第5図　毛細管の長さと時定数.

レーションアンプの帰還回路に入れてあるコンデンサには積層セラミックコンデンサを使用した．このコンデンサーにより100 kΩ の抵抗との間でローパスフィルタを形成することで，高周波のノイズは除去される．このローパスフィルタの時定数は約50 m 秒程度であり，これ以上小さい周期の圧力変動は計測することができない．回路は DC 5 V の単電源によって動作し，差圧センサーの出力は差動増幅回路によって増幅されアナログの電圧値として出力されるように作った．増幅率は10 k の半固定抵抗によって任意に調節できるが，今回製作した微気圧計では2.5 hPa の圧力差が 1 V ほどの電圧に対応するように調整した．

空気チャンバーには，差圧センサーに圧力を導入するビニールチューブのほかに，空気チャンバーであるペットボトルと大気圧とを結ぶ毛細管が取り付けられている．これらの管はペットボトルの蓋に取り付けており，管を取り付けた箇所から空気が漏れるのを防ぐため，充填財で密閉している．空気チャンバーに用いた毛細管として，電子機器で用いられるより線のリード線 KV の0.5 SQ を使用した．リード線の芯線は抜かず，芯線同士の隙間を利用して毛細管として用いた．

毛細管としてビニール皮膜線を使用した場合には温度変化によって芯線が膨張・収縮し，T_cが変動する恐れがある．毛細管を通る空気の流量（後述する（3）式の定数 A）は半径の 4 乗に比例するため，温度によって変化する割合は芯線の材質である銅の線膨張率の 4 倍程度となる．これによって計算したところ，定数 A の温度変化率は 1 ℃あたりにつき 8×10^{-3}%程度であるため，後述する（5）式と（6）式から温度変化による T_cの変化率は十分小さいと評価した．リード線の切断方法によって T_cが変化しないよう，リード線は切断した後切断面から 2，3 ミリ程度ビニール皮膜を剥き，むき出しになった芯線の切断面を軽くほぐして使用した．第 5 図は，リード線の長さと得られた T_cとの関係を示したものである．図から読み取れるようにリード線の長さと T_cの間には，ほぼ比例関係がある．

以上，製作された微気圧計は外寸41 cm×16 cm×22 cm，重量3.5 kg 程度であり，持ち運びも容易である．

4．微気圧計の出力特性

前述のように，この微気圧計の特徴は空気チャンバーの時定数 T_cを観測対象の周期レンジ内部にとることで，信号のダイナミックレンジを圧縮して記録しやすくしていることである．しかしながら，T_cの長周期側と短周期側では微気圧計の応答特性が大きく異なるため，この記録を解析するためにはまず，圧力変動の記録から応答特性を考慮して実際の圧力変動を復元する必要がある．以下では，微気圧計の特性について理論的に考察し，復元に必要な式を導出することにする．

微気圧計の空気チャンバー内の圧力 p_iの変動は，チャンバーの温度 T と空気の密度 ρ が変動することを考慮すると以下の式に従う．

$$\frac{\partial p_i}{\partial t}=\frac{\partial \rho}{\partial t}\mathrm{R}T+\frac{\partial T}{\partial t}\rho\mathrm{R} \qquad (2)$$

ここで，R は気体定数である．この気圧チャンバーは毛細管で外の大気と繋がっている．毛細管を通る空気の流量は，毛細管の両端の気圧差に比例するので，

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

空気の圧縮性を無視すると上式の$\frac{\partial \rho}{\partial t}$は次のようにあらわすことができる．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}=\frac{\rho Q}{V}=\frac{\rho A(p_e-p_i)}{V} \tag{3}$$

ここで，p_eは大気圧，Qは毛細管から流入する空気の流量，Vは空気チャンバーの容積，Aは毛細管の形状で決まる圧力差と流量の比例定数である．この(3)式を(2)式に代入することで，空気チャンバー内の気圧変動を表す式が導き出せる．

$$\frac{\partial p_i}{\partial t}=\frac{\rho AR T}{V}(p_e-p_i)+\frac{\partial T}{\partial t}\rho R \tag{4}$$

ここで温度Tの変化や密度ρの変化はその絶対値に比べて小さいので，右辺第一項の$\rho ART/V$を定数とみなし次の値を導入する．

$$k=V/\rho ART \tag{5}$$

これは秒の次元を持つ値で，圧力が緩和する時定数を表し，次の式でT_cと対応している．

$$k=T_c/2\pi \tag{6}$$

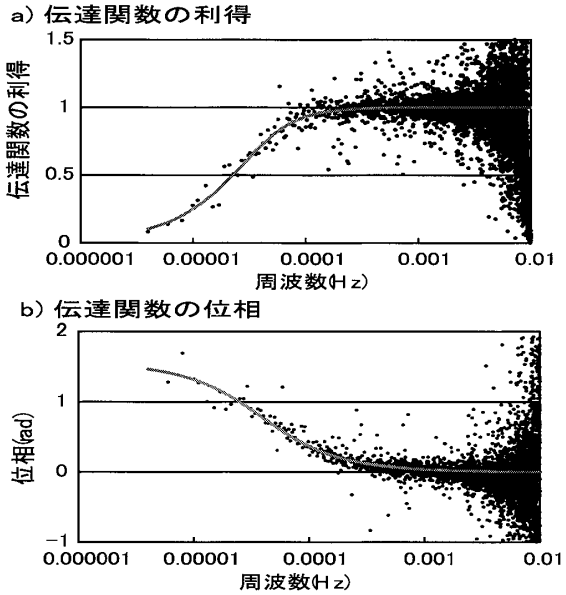
微気圧計の出力は気圧チャンバー内の気圧p_iと大気圧p_eの差を示しているので，右辺第二項のρの変化が小さくほぼ一定であると近似して線形化したとき，大気圧p_eの変動は微気圧計の出力p_e-p_iのフーリエ関数$Y(\omega)$を用いて次のように表される．

$$p_e=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1+ik\omega}{ik\omega}Y(\omega)e^{i\omega t}d\omega+\rho RT \tag{7}$$

(7)式の右辺第1項は，毛細管による圧力緩和の効果を，右辺第2項は測定器の温度変化による空気チャンバーの圧力変化の効果を表している．この式から，微気圧計内部の温度変化Tと時定数kがわかれば，微気圧計の出力から復元して大気圧p_eを求めることができる．ただし，現実の微気圧波形の信号は時間的に有限であるため，(7)式から信号の長さを超える周期の成分の圧力変動を復元することはできない．

5．時定数の検定

今回，微気圧計の毛細管として電気配線用のビニールコードを流用したため，その空気抵抗は不明である．したがって，簡単な実験でT_cがおよそ7時間になるように毛細管の長さを調整したあと，絶対圧計の出力と比較することでT_cを正確に求めた．



第6図　伝達関数の実測（黒点）と理論値（実線）

使用した絶対圧計は横河ウェザックのDigital Barometer F-452で分解能は0.001 hPaである．この絶対圧計は地下室に設置されており，この傍らに今回製作した微気圧計を置いて，2005年7月8日から1週間程度，1秒間隔で時系列データを得た．微気圧計の出力はアナログ出力であるが，この出力を自作のデータロガー（酒井ほか，2007）で記録した．このデータロガーの分解能は12bitで圧力変動に対する分解能は約0.003 hPaとなる．また，微気圧計の温度補正のために，空気チャンバーの温度変化についても同様に1秒間隔で計測した．温度計の分解能は約0.04℃である．

前項での考察から，測定器の内部温度の効果を引いた大気圧$p_e-\rho RT$に対する微気圧計出力p_e-p_iの伝達関数$\sigma(\omega)$は次のような関数になる．

$$\sigma(\omega)=\frac{ik\omega}{1+ik\omega} \tag{8}$$

実際のデータから求めた伝達関数を第6図に示す．図から伝達関数は周波数4×10^{-5}Hz近辺で変曲点を持つことがわかる．この近辺の周波数では時定数の値の変化に対して伝達関数が敏感であるため，変曲点を中心とする4×10^{-6}～4×10^{-4}の周波数領域で実測の

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

伝達関数に最もよく合う時定数を最小二乗法で求めた結果，k=4100を得た．この値を（8）式に適用した曲線を第6図の実線で示す．この図から微気圧計の周波数特性は0.001 Hz以下の領域でほぼ理論と一致していることがわかる．

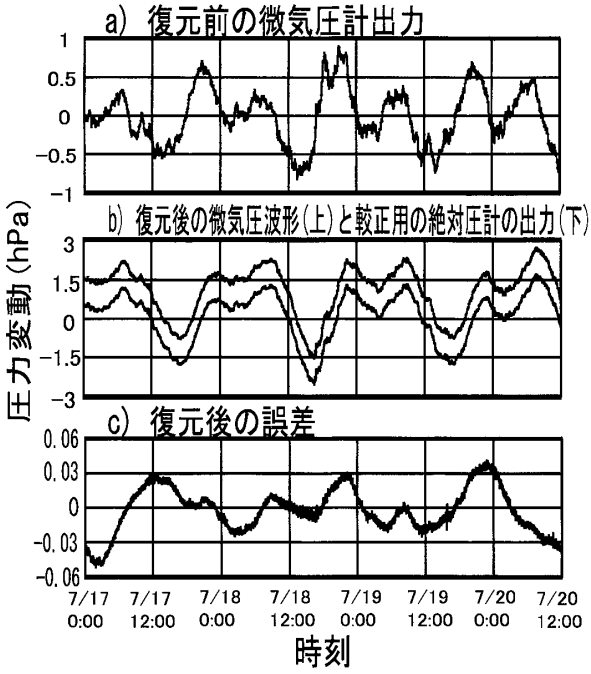
一方，短周期の領域では伝達関数は理論的な特性から大きくばらついている．気圧変動は短周期の領域では非常に小さく，周期15分以下の微気圧計出力と較正用の絶対圧計との出力の差が±0.0015 hPa程度で，AD変換の分解能0.003 hPaとほぼ等しいことから，このばらつきは微気圧計の出力をAD変換する際の量子化誤差であると思われる．したがって，このあたりがこの測定システムの限界である．

6．復元

微気圧計の出力を（7）式に従って復元したデータの精度を確かめるために，上記の時定数を求めるのに使用した記録とは独立に，2005年7月15日から約1週間の記録を使って，微気圧計の記録と絶対圧計の記録を比較した．

（7）式から明らかなように，信号の直流成分を微気圧計出力から求めることはできない．そのため絶対圧計の出力と微気圧計出力から復元した圧力変動を比較するためには復元する帯域を制限する必要がある．そのため，絶対圧計，微気圧計および空気チャンバー温度のデータに数値演算的にハイパスフィルタを適用してから復元を行い，長周期成分を除去した上で絶対圧計出力と微気圧計の両者を比較し復元の評価を行った．

今回開発された微気圧計は1日周期程度までの圧力変動を復元することを念頭に設計しているため，まずハイパスフィルタの遮断周期として30時間を採用し，周期30時間以上の圧力変動を除去したデータを作成した．このデータに復元を行った結果を第7図に示す．第7図aは復元を行う前の微気圧計の出力波形，第7図bは微気圧計の出力を復元した波形と絶対圧計の出力である．復元波形と絶対圧計の出力は非常に似通っているため，見易さのために第7図bでは，2つの波形を縦にずらして表示する．また，第7図cでは，誤差として復元波形と絶対圧計の差を示す．第7図bから微気圧計の出力を復元することで，周期30時間以下の圧力変動についてほぼ絶対圧計と等しい出力が得られていることが分かる．第7図cから，30時間までの周期について絶対圧計の出力と微気圧計から



第7図　微気圧出力の復元，及び絶対圧計の出力．データには30時間のハイパスフィルタを適用している．a）は復元を行う前の微気圧波形を，b）は微気圧計出力を復元した波形と絶対圧計の出力を，c）は復元した波形と絶対圧計の出力との差を誤差として表示した．なお，b）では見易さのため2つの時系列を縦にずらして並べた．

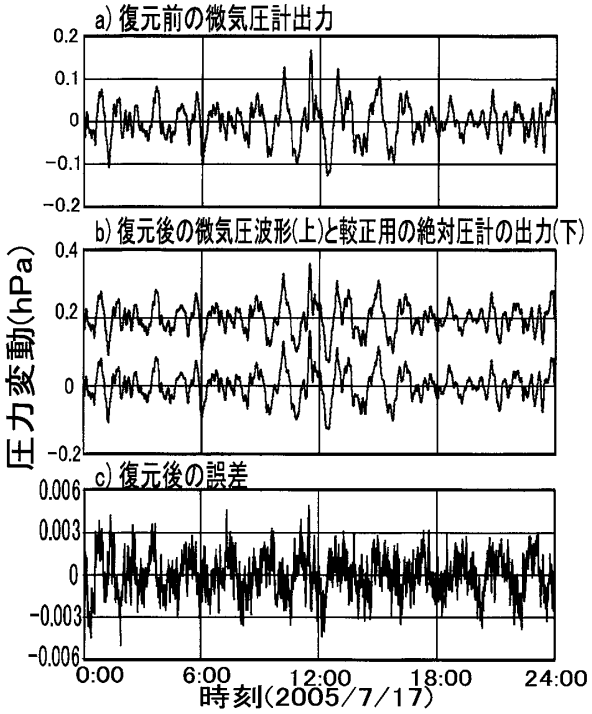
復元した大気圧を比較したところ，誤差は約±0.03 hPa程度であることが分かった．第7図bから読み取れる気圧変動の振幅が約±1.5 hPa程度であることを考慮すると，誤差は振幅に対して約2％程度であることがわかる．

次に，比較的短い周期の振動に対しては，微気圧計は気圧変動をほぼそのまま記録することになるが，短い周期の変動に対する復元の精度を確かめるため，元の時系列データに2時間の遮断周期のハイパスフィルタをかけて周期2時間以上の圧力変動を除去したデータを作成し，上記同様の比較を行った．

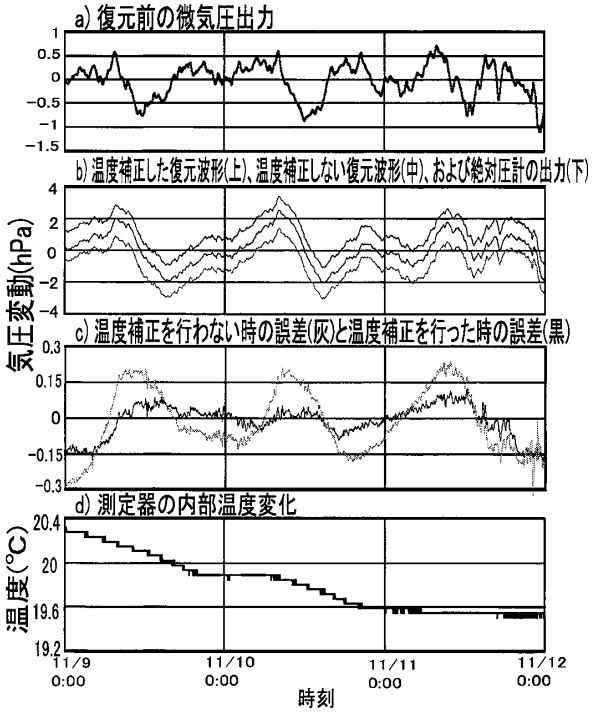
第8図は周期2時間までの圧力変動に復元を行った結果である．第8図aは復元を行う前の微気圧計の出力波形，第8図bは微気圧計の出力を復元した波形と絶対圧計の出力である．第8図bと同様に復元波形と絶対圧計の出力は非常に似通っているため，見易さのために2つの波形を縦にずらして表示する．また，第8図cでは，誤差として復元波形と絶対圧計の差を示す．第8図cに示すように誤差は約±0.003

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第８図　第７図と同様に微気圧計出力の復元の結果を示す．ただし，データには２時間のハイパスフィルタを適用している．ａ）は復元を行う前の微気圧波形を，ｂ）は微気圧計出力を復元した波形と絶対圧計の出力を，ｃ）は復元した波形と絶対圧計の出力との差を誤差として表示した．なお，ｂ）では見易さのため２つの時系列を縦にずらして並べた．



第９図　温度変化の補正の効果．ただし，データには27時間のハイパスフィルタを適用した．ａ）は復元を行う前の微気圧波形を，ｂ）は温度補正を行った復元波形，温度補正を行わない復元波形，および絶対圧計の出力を表示した．ｃ）は温度補正を行った復元波形と絶対圧計の出力との差（黒線），および温度補正を行わない復元波形と絶対圧計の出力との差（灰線）を誤差として表示した．ｄ）は，測定器内部の空気チャンバーの温度変化を示したものである．なお，第７図と同様にｂ）では見易さのため３つの時系列を縦にずらして並べた．

hPa 程度である．２時間以内の周期を持つ気圧振動の振幅が約±0.1 hPa 程度であることを考慮すると，誤差は振幅にたいして約３％程度であることがわかる．この誤差の値は微気圧計の分解能とほぼ同程度であり，これがこの測定系の限界と考えられる．

７．温度補正の効果

前記の地下室内の計測では温度変化が非常に小さいため，(7) 式の右辺第２項 ρRT の値が小さく，温度変化はほとんど問題にならない．しかし，実際には常にこのような好条件で観測ができるわけではない．そこで，絶対圧計がおかれた地下室から水平距離800 m ほど離れた通常の屋内の地点に微気圧計を設置し，絶対圧計と微気圧計の出力を比較した．同時に温度計を空気チャンバーの下に接触するように配置し，空気チャンバーの温度を計測した．先の実験と異なり，測定器や温度計のサンプリング周期は１分である．微気圧計と絶対圧計の高度差は数 m 以内に収まる．気温の日周変化によって空気の密度が変化するため，１日の気温変化10°C程度・高度差10 m に対し約0.03 hPa 程度の圧力差が生まれることになるが，十分小さいとみなしこの効果をキャンセルする補正は行わなかった．

前項同様，今回開発された微気圧計は１日周期程度までの圧力変動を復元することを念頭に設計しているため，絶対圧計，微気圧計および空気チャンバー温度のデータに，27時間の遮断周期を持つハイパスフィルタを適用し，周期27時間以上の圧力変動を除去したデータを作成した．このデータを復元した結果を第９図に示す．第９図ｂの「温度補正した復元波形」は (7) 式の右辺第２項 ρRT まで含めて計算し復元した出力を，「温度補正しない復元波形」は右辺第２項を

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

含めないで第1項のみで計算したものを示した．温度補正を行わない復元波形と温度補正を行った復元波形，および絶対圧計の出力は互いに似通っているため，見易さのために第9図bでは第7図bと同様に3つの波形を縦にずらして表示する．温度補正した復元波形と絶対圧計の出力との差を「温度補正を行った時の誤差」として，また同様に温度補正しない復元波形と絶対圧計の出力との差を「温度補正を行わないときの誤差」として第9図cにプロットすると，測定器の温度変化を補正することによって誤差の改善が認められた．このときの，誤差の振幅は約±0.1 hPa程度であった．

8．まとめ

微気圧計を使って，1日周期程度までの気圧変動を復元した結果，温度変化の非常に小さい環境では約±0.02 hPa程度の精度で測定できることが分かった．また，復元する周期の上限を変えても精度は最大振幅の約2-3%程度とほぼ一定であり，上限を周期2時間以下にすることで，±0.003 hPaまでの精度が見られた．一方，温度変化の多少ある環境においては温度補正を用いて約±0.1 hPa程度の精度であった．

この精度は一般的な気圧変動を記録する上では充分なものである．また，特定の現象に対して，熱的な高・低気圧を観測するのに必要な精度±0.05 hPa，ヒートアイランド現象を観測するのに必要な精度±0.03 hPaも，地下室のような気温変化が非常に小さい環境ではすべてクリアした．ただし，温度変化が多少ある環境でこの目標を達成するには更なる改良が必要である．

もちろん，このような観測を行うために高精度の絶対圧計を使うことも考えられるが，このような精度の絶対圧計は高価であり，多数配置することは困難である．これに対して，この測定器は非常に低いコストで製作できる．今回の微気圧計は民生品に用いられている部品を積極的に用いたことにより，測定器の原材料をセンサーも含めて2000円前後に抑えることができた．多くの観測点を要する気象観測においては，測定器の低コスト化は大きなメリットになる．この程度のコストであれば，2次元的に観測機を高密度に配置し，局地的な圧力分布を求めることも可能である．また，局地気象を形成する広い周波帯の現象に対して1つの微気圧計で測定できるため，観測システムの簡便化に貢献することが期待できる．

謝　辞

微気圧計の性能評価のために，京都大学大学院理学研究科の福田洋一先生，東　敏博先生には絶対圧計のデータを提供していただき，また絶対圧計の傍らで微気圧計の測定をさせていただいた．この場を借りて深謝する．

参　考　文　献

Gossard, E. E., 1960：Spectra of atmospheric scalars, J. Geophys. Res., **65**, 3339-3351.

近藤純正，三枝信子，渡辺　力，山崎　剛，桑形恒男，木村富士夫，1994：水環境の気象学，朝倉書店，276pp.

酒井　敏，梅谷和弘，飯沢　功，伊藤　文，小野耕作，矢島　新，飴村尚起，森永修司，2007：機動的気象観測実験システムの開発研究，天気，投稿中.

Tahira, M, 1995：Acoustic Resonance of the Atmosphere at 3.7 mHz, J. Atmos. Sci., **52**, 2670-2674.

Yamamoto, R, 1954：The microbarographic oscillations produced by the explosions of hydrogen-bombs, Bull. Inst. Chemical Res., Kyoto Univ., Suppl. Issue on the Radioactive Dust from Nuclear Detonation., 120-133.

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

Microbarograph Development with a View of Local Meteorology

Kazuhiro UMETANI* and Satoshi SAKAI*

* *Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Yoshidanihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501, Japan.*

(Received 26 June 2006 ; Accepted 18 January 2007)

2007年度東レ科学技術賞および東レ科学技術研究助成の候補者推薦募集

標記の賞・助成は東レ科学振興会が運営しているものです.

1．東レ科学技術賞

(1) 候補者の対象

①学術上の業績が顕著なもの

②学術上重要な発見をしたもの

③重要な発明をして，その効果が大きいもの

④技術上重要な問題を解決して，技術の進歩に大きく貢献したもの

(2) 表彰の内容

全体で2件前後．1件につき賞状・金メダルおよび賞金500万円

この賞の応募には学会の推薦が必要です．今後の参考のため，気象学会から推薦するにふさわしい方をご存じでしたら気象学会あてお知らせ下さい.

2．東レ科学技術研究助成

(1) 候補者の対象

国内の研究機関において自らのアイディアで萌芽的基礎研究に従事しており，今後の研究の成果が科学技術の進歩，発展に貢献するところが大きいと考えられる若手研究者（原則として推薦時45歳以下).

(2) 助成の内容

総額1億3千万円，1件3千万円程度まで10件程度

(3) 推薦件数制限

1学協会から2件以内

この助成の応募には学会の推薦が必要です．気象学会の推薦を希望する方は，2007年9月18日（火）必着で気象学会（下記）あて申請して下さい．応募用紙等はhttp://www.toray.co.jp/tsf/index.htmlからダウンロードできます（6月中旬以降)．応募件数が上記(3) の制限を超えた場合の扱いは学会に一任して下さい.

連絡先：〒100-0004　東京都千代田区大手町1-3-4
気象庁内　日本気象学会
学会外各賞候補者推薦委員会

NII-Electronic Library Service