

渦相関法フラックス算出の手引き ～プログラミングと実行～

1 はじめに

渦相関法でのフラックス観測では、30 分程度毎に、その間の超音波風速計やガスアナライザーの出力を 10Hz 程度の周期で記録し、データファイルを作る。例えば、測定インターバルを 30 分、測定周期 10Hz、チャンネル数 6ch とすれば、1 ファイル当たり、108,000 個のデータ(数値)が収録されており、このデータから、その 30 分間のフラックスを算出する。1 日分なら 48 個、1 ヶ月分なら約 1500 個、1 年分なら約 2 万個のファイル(それぞれのファイルが 10 万個以上のデータを含む)を処理し、フラックスを算出することになる。これらのデータを蓄えておく物理的な記憶容量、計算に要する時間の問題もさることながら、それらのファイルを同時あるいは連続的に処理するためのコンピュータ操作上の技術を身につける必要がある。

フラックス算出のそのものの原理は単純であるため、データファイルの形式や処理するコンピュータ環境、あるいは嗜好の違いなどから、それぞれの研究者が各自で操作しやすいように、あるいは、その後の解析に使いやすいように工夫している。

本手引きでは、渦相関法によるフラックス算出の一例として、Fortran およびシェルスクリプト(バッチファイル)を用いた処理の手順を紹介する。

2 データの確認 データの形式への対応

実際の観測では、用いられるシステムおよびソフトによって、収録されるデータの形式が異なる。大きく分けて、ascii(テキスト)形式と binary 形式の違いがあるが、ここでは ascii 形式のものを取り扱う。binary 形式の場合は、それぞれのソフトに固有の変換法に従って、ascii 形式に変換すればよい。ascii 形式とは、notepad や wordpad などのテキストエディタで開き数値が文字化けせずに解読できる形式である。

計算をするためのプログラムを組む時には、テキストエディタ等でデータファイルを開き、十分にデータの順序や形式について把握しておく必要がある。

ascii 形式のデータファイルでは、第一にヘッダーの有無および行数を確認する。ヘッダーとは、ファイルの先頭にあるデータ群を指し、データ収録の日時、測定周期、チャンネル数などの情報が記録されているのが一般的である(図-1 参照)。ヘッダーは、フラックス計算には直接必要のないものが多いので、例えば、ヘッダーが 2 行の場合は、

```
character dummy
read(*,*) dummy
read(*,*) dummy
```

などとして、ヘッダーの行数分だけ読み飛ばしてしまっても良い場合が多い。

次に確認するのは、データそのものである。つまり、なにが、どんな単位で、どの順序で、どれだけの数記録されているかを確認する。本来、これらの情報はヘッダーに記載されているべきであるが、実際と食い違う場合や、記載されていない場合も多いので、実際にデータを見て確認すべきである。

データは、X 風速、Y 風速、Z 風速、温度、CO2 濃度、H2O 濃度の順で記録されていることが多い。それぞれの値は、メートル毎秒などの物理量であったり、mV などの電圧出力値であったりするので注意する。また、先頭に行番号がつく場合もありうるし、チャンネル数をもっと多い場合もありうる。

例えば、先頭に行番号が付く、電圧出力値のデータを読み込む場合は、

```
read(*,*,end=199) n,vx,vy,vz,vt,vc,vh
if(flag.eq.0) then
  x(i)=vx*0.010
  y(i)=vy*0.010
  z(i)=vz*0.002
else
  x(i)=vx*0.020
  y(i)=vy*0.020
  z(i)=vz*0.005
end if
t(i)=vt*0.050
c(i)=vc*0.080
h(i)=vh*0.004
```

などとして、必要な物理量に応じて、係数をかける必要がある。途中で測定レンジを変更した場合は、例のように、x,y,z の係数を場合分けする必要がある。

3 渦相関法の計算プログラムの実際

3.1 変数名のつけ方

プログラムでは、データは変数に格納される。変数名はそのデータがなんであるかを類推できるものにしておくことが望ましい。各変動要素の 30 分間の時系列データなどは、配列を用いるとよい。使う変数は、例えば、

```
real x(36000),y(36000),z(36000),t(36000),c(36000),h(36000)
real ax,ay,az,at,ac,ah
real xx,yy,zz,tt,cc,hh
real u(36000),w(36000)
real a1,a2,au,aw,uu,ww
real wu,wt,wc,wh
```

のようにプログラムの先頭で明示的に宣言しておくとうかりやすい。x は X 風速、y は Y 風速、z は Z 風速、t は温度、c は CO₂ 濃度、h は H₂O 濃度、u は水平風速、w は鉛直風速である。ax は x の平均、xx は x の分散、wu は w と u の共分散というように、自分なりのルールを決めておくとうい。 (以下では、ここに挙げたルールにのっとって、意味を明示せずに、変数名で記述する。)

3.2 平均値の算出

```
imax=35900
ax=0
ay=0
az=0
at=0
ac=0
ah=0
do 200 i=1,imax,1
  read(*,*) x(i),y(i),z(i),t(i),c(i),h(i)
  ax=ax+x(i)
  ay=ay+y(i)
  az=az+z(i)
  at=at+t(i)
  ac=ac+c(i)
  ah=ah+h(i)
200 continue
ax=ax/real(imax)
ay=ay/real(imax)
az=az/real(imax)
at=at/real(imax)
ac=ac/real(imax)
ah=ah/real(imax)
```

3.3 風速ベクトルの回転 (水平・鉛直風速の算出)

渦相関法では、鉛直風速の平均がゼロであるという仮定が成り立たねばならない。しかしながら、実際に出力される Z 風速は、測器の設置角度や地形の影響のため、ゼロとならない。鉛直風速をゼロとするように、主風風向向きに座標を回転させる必要がある。ax,ay,az から角度を算出し、三角関数を用いて、計算できる。例では、ベクトル計算で、水平風速(近似値)と鉛直風速を算出している。

```
au=0
aw=0
a1=ax*ax+ay*ay
if(a1.gt.0.) a1=a1**0.5
a2=a1*a1+az*az
if(a2.gt.0.) a2=a2**0.5
do 300 i=1,imax,1
  if(a1.eq.0.) then
    u(i)=0.
  else
    u(i)=(ax*x(i)+ay*y(i))/a1
```

```

        end if
        if(a2.eq.0.) then
            w(i)=0.
        else
            w(i)=(a1*z(i)-az*u(i))/a2
        end if
        au=au+u(i)
        aw=aw+w(i)
300    continue
        au=au/real(imax)
        aw=aw/real(imax)

```

例の中で、しばしば if 文が出現するのは、ゼロで割り算するなどの際のエラーを防ぐためである。

3.4 共分散(フラックス)の算出

基本は、平均値の計算と同じである。

```
ax=ax+x
```

のような式を、

```
wu=wu+(w(i)-aw)*(u(i)-au)
```

に置きかえればよい。

結局、ここまでで、平均値算出、座標回転、共分散算出と 3 回の DO ループをまわすことになる。従って、処理にかかる時間は、それなりにかかる。aw をゼロとし、au を a1 で代用すれば、座標回転と共分散算出が同時にでき、DO ループがひとつ減り、高速化できる。

```

au=0
aw=0
wu=0
wt=0
wc=0
wh=0
a1=ax*ax+ay*ay
if(a1.gt.0.) a1=a1**0.5
a2=a1*a1+az*az
if(a2.gt.0.) a2=a2**0.5
do 300 i=1,imax,1
    if(a1.eq.0.) then
        u(i)=0.
    else
        u(i)=(ax*x(i)+ay*y(i))/a1
    end if
    if(a2.eq.0.) then
        w(i)=0.
    else
        w(i)=(a1*z(i)-az*u(i))/a2
    end if
    au=au+u(i)
    aw=aw+w(i)
    wu=wu+w(i)*(u(i)-a1)
    wt=wt+w(i)*(t(i)-at)
    wc=wc+w(i)*(c(i)-ac)
    wh=wh+w(i)*(h(i)-ah)
300    continue
    au=au/real(imax)
    aw=aw/real(imax)
    wu=wu/real(imax)
    wt=wt/real(imax)
    wc=wc/real(imax)

```

```
wh=wh/real(imax)
```

3.5 計算結果の出力

フォーマット文で、十分に桁をとって出力するのが無難である。

```
write(*,1030) ax,ay,az,at,ac,ah,au,aw,  
&                xx,yy,zz,tt,cc,hh,uu,ww,  
&                wu,wt,wc,wh  
1030 format(20f20.10)
```

4 計算実行のためのシェルスクリプト

上記では、プログラムに汎用性を持たせるために、

```
read(*,*) x(i),y(i),z(i),t(i),c(i),h(i)
```

のように、データを標準入力から読みこむようにしている。また、出力も標準出力である。したがって、このプログラムを実行するには、コンパイルした実行ファイル名を cal_flux、データファイル名を 00102712.m30 として、

```
cal_flux < 00102712.m30
```

というように、リダイレクトを用いて、データファイルと連結する。また、

```
cal_flux < 00102712.m30 >> flux.prn
```

のようにすれば、計算結果は、flux.prn というファイルに随時追加される。

このような処理を大量のデータ処理にあたって、連続的に行う場合は、シェルスクリプト(MS 系ではバッチファイル)を利用するのが便利である。具体的には、

```
rm flag.dat  
echo 0 > flag.dat  
rm result.dat  
touch result.dat  
echo 00 04 17 15 30 >> result.dat  
./flux < data/000430/00041715.M30 >> result.dat  
echo 00 04 17 16 00 >> result.dat  
./flux < data/000430/00041716.M00 >> result.dat  
echo 00 04 17 16 25 >> result.dat  
./flux < data/000430/00041716.M25 >> result.dat  
echo 00 04 17 17 00 >> result.dat  
./flux < data/000430/00041717.M00 >> result.dat  
echo 00 04 17 18 00 >> result.dat  
./flux < data/000430/00041718.M00 >> result.dat  
echo 00 04 17 19 00 >> result.dat  
./flux < data/000430/00041719.M00 >> result.dat
```

のような内容のファイルを作成し、実行する。この種のファイルは、データファイルのリストを DOS コマンドなどを用いて、ファイルに格納し、MS-EXCEL で編集する(テキスト形式で保存すること!)と比較的簡単に作れる。

```
cd %data  
dir > c:\list.txt
```

上記の例の echo 文は、計算プログラムでヘッダーをスキップしてしまい、日付などの情報を考慮していないために、便宜的に追加してある。作成される result.dat では、日付時刻と計算結果が1行ずつ、交互に記録されるため、MS-EXCELなどでソートするなど、出力後の工夫が必要である。

シェルスクリプトの利用の他にも、データファイルのリストを格納したファイルを用意し、それを読みこみながら、cal_fluxを実行するプログラムを別に作成する方法もありうる。

5 フラックス値への単位変換

計算され、出力されたデータは、各自が自分の解析のために好きなように処理すれば良いが、算出されたのは、それぞれの共分散に過ぎず、フラックスの一般的な単位にはなっていないことに注意する必要がある。

渦相関法フラックス算出の手引き ～プログラミングと実行～

その2： タイムラグの決定

1 はじめに

LI-6262 などの閉光路式ガスアナライザーでは、測定対象空気がチューブを通過し、アナライザーまで到達するのに一定の時間がかかるため、測定された濃度の時間変動は源位置での濃度変動に対して時間遅れをもつ。鉛直風速との共分散としてフラックスを算出する場合、時間遅れの修正が必要となる。CO₂ および H₂O フラックスが十分に大きい時には、CO₂ および H₂O は乱流渦によって輸送されていることから、これらの濃度変動は鉛直風速の変動と相関がある。濃度変動の位相を 0.1 秒ずつ遅らせて、その都度、濃度変動と鉛直風速変動の相関係数を算出し、それが最大となる延滞時間を特定する。エアポンプの流量を一定とみなし、CO₂ および H₂O フラックスが十分に大きいと考えられる晴天日の日中の平均的な時間遅れを観測での CO₂ および H₂O データ記録の時間遅れとみなす。以下では、その具体的な計算手順を示す。

なお、濃度変動は鉛直風速の変動と相関があるということは、論理的根拠が薄く、より正確に時間遅れを見積もるためには、オープンパスの測器を併用して、オープンパスの出力との相関を算出し比較する方法がある。簡便な方法として、温度変動との相関を比較する場合も多い。また、ポンプ流量に変化がある場合や、サンプル孔と超音波風速計の位置関係と風向によっては、時間遅れは一定ではない場合もありうる。

2 各ラン毎の見積り

実際のフラックス観測では、前回にも述べたように、例えば、測定インターバルを 30 分とすれば、1 日分なら 48 個、1 ヶ月分なら約 1500 個、1 年分なら約 2 万個のファイル(それぞれのファイルが 10 万個以上のデータを含む)が得られる。これらの全てのデータについて、その時間遅れを見積るべきであるが、ここでは、そのうちの 1 個のデータから、その時の時間遅れを見積もる方法について述べる。

下記のプログラムでは、z と t, c, h のデータを、-50 ~ 100(dsec) づつずらして、それぞれの共分散を算出し、151 行 × 4 列のデータとして、出力している。(t との相関は参考のために計算している)

```

real x,y,z(17000),t(17000),c(17000),h(17000)
real az,at,ac,ah,zt(0:300),zc(0:300),zh(0:300)
1030 format(i4,3f12.6)
az=0.
at=0.
ac=0.
ah=0.
do 100 i=1,16800,1
  read(*,*) x,y,z(i),t(i),c(i),h(i)
  az=az+z(i)/16800.
  at=at+t(i)/16800.
  ac=ac+c(i)/16800.
  ah=ah+h(i)/16800.
100 continue
do 110 j=0,150,1
  zt(j)=0.
  zc(j)=0.
  zh(j)=0.
  do 120 i=1,16500,1
    zt(j)=zt(j)+(z(i+50)-az)*(t(i+j)-at)/16500.
    zc(j)=zc(j)+(z(i+50)-az)*(c(i+j)-ac)/16500.
    zh(j)=zh(j)+(z(i+50)-az)*(h(i+j)-ah)/16500.
120 continue
  write(*,1030) j-50,zt(j),zc(j),zh(j)
110 continue
end
```

出力されるデータは、MS-EXCEL などで開いて処理する。z と t の時間遅れはないはずなので、時間遅れゼロの時の共分散 zt が極大(極小、フラックスが負の場合には、z と負の相関となるため、共分散はマイナス値)となるはずである。z と c, h の共分散 zc, zh の極大(極小)値は、プラス側に現れるはずである。共分散の極大値の出現位置が時間遅れとなる。

3 一括処理

多くのデータを扱う場合、上述のように、ひとつひとつのデータファイルについて時間遅れを見積るのは困難なので、その処理を自動化する。また、処理を高速化するために取り得る時間遅れの幅を限定する。

```
      real x,y,z(17000),t,c(17000),h(17000)
      real az,ac,ah,zc,zh
      real zcmax,zhmax,izc,izh
1030  format(2i4,2f12.6)
      az=0.
      ac=0.
      ah=0.
      do 100 i=1,16800,1
          read(*,*) x,y,z(i),t,c(i),h(i)
          az=az+z(i)/16800.
          ac=ac+c(i)/16800.
          ah=ah+h(i)/16800.
100  continue
      zcmax=0.
      zhmax=0.
      do 110 j=50,100,1
          zc=0.
          zh=0.
          do 120 i=1,16500,1
              zc=zc+(z(i)-az)*(c(i+j)-ac)/16500.
              zh=zh+(z(i)-az)*(h(i+j)-ah)/16500.
120  continue
          if(abs(zc).gt.abs(zcmax)) then
              zcmax=zc
              izc=j
          end if
          if(abs(zh).gt.abs(zhmax)) then
              zhmax=zh
              izh=j
          end if
110  continue
      write(*,1030) izc,izh,zcmax,zhmax
      end
```

上記のプログラムでは、50～100(dsec)の時間遅れでのzc,zhを計算し、その絶対値が最大となる時の遅れをそれぞれ共分散値とともに1行出力する。汎用性を持たせるために、入力標準入力から、出力は標準出力へとしてあるので、前回述べたようなシェルスクリプトを利用することによって、複数のデータファイルを順次処理し、それぞれの時間遅れを算定することができる。

4 タイムラグの決定

本手引きで示した方法は、CO₂ および H₂O が乱流渦によって輸送されており、これらの濃度変動が鉛直風速の変動と相関があるはずであるということを仮定した方法である。従って、この仮定に反する場合、すなわちフラックス(それぞれの共分散の絶対値)が小さい時には、時間遅れは算定することができない。上述のプログラムで、3,4列に共分散値が出力されているのは、それらの場合を検知するためである。

共分散の絶対値がある一定の値以下のものを除外し、タイムラグの時間変化を観察する。タイムラグに系統的变化がみられなければ、そのまま平均値、メジアンなど、平均的な値をタイムラグとして採用する。タイムラグに系統的变化、あるいは、風向依存性などがある場合は、それらの関数などとして処理する方法がある。

渦相関法フラックス算出の手引き ～プログラミングと実行～

付録： 風速の座標変換

1 はじめに

渦相関法では、鉛直風速の平均がゼロであるという仮定が成り立たねばならない。しかしながら、実際に出力されるZ風速は、測器の設置角度や地形の影響のため、ゼロとならない。鉛直風速をゼロとするように、主風風向向きに座標を回転させる必要がある。

超音波風速計から出力される風速の3成分を x , y , z とし、水平風速を u 、鉛直風速を w とし、それぞれの平均値をバーで示すと、その回転は、例えば次式のように表される。以下では、この式の導出方法を紹介する。

$$u = \frac{\bar{xx} + \bar{yy}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}}$$

$$w = \frac{\bar{uz} - \bar{zu}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{z}^2}}$$

2 水平風速の算出

摩擦速度 u^* の算出、すなわち、運動量フラックスの算出のためには、鉛直風速とともに水平風速の変動を知る必要がある。大気を持つ運動量は、大気の質量(密度)にその運動速度(風速)を乗じたものである。運動量は地表面において摩擦によって失われるため、常に下向きに輸送されている。この輸送量が運動量フラックスであり、大気の状態と地表面の状態を表す重要な変数である。

運動量は、その時の風向に応じた向きを持つベクトル量であるが、ある平均時間(例えば 30 分間)での平均の運動量フラックスは、一方向への風の流れを仮定して算出しなければならない。すなわち、平均時間における平均風向の風速を算定する必要がある。ここでい水平風速とは、平均風向の風速のことである。超音波風速計が概ね水平に設置され、地形の影響も概ね無視できるとすれば、水平風速の議論は、 x と y のみで可能である。

X-Y 平面において、原点を $O(0,0)$ とし、平均風速のベクトルを $\vec{OA} = (\bar{x}, \bar{y})$ 、ある一瞬の風速ベクトルを $\vec{OB} = (x, y)$ とすると、 \vec{OB} の \vec{OA} に平行な成分が、求める水平風速ベクトルである。これを \vec{OC} とすると、点 C は、直線 OA 上にあり、直線 OA と直線 BC は直交する。したがって、点 C(X,Y) は次の連立方程式を満たす。

$$\begin{cases} Y = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} X \\ Y - \bar{y} = -\frac{\bar{x}}{\bar{y}} (X - \bar{x}) \end{cases}$$

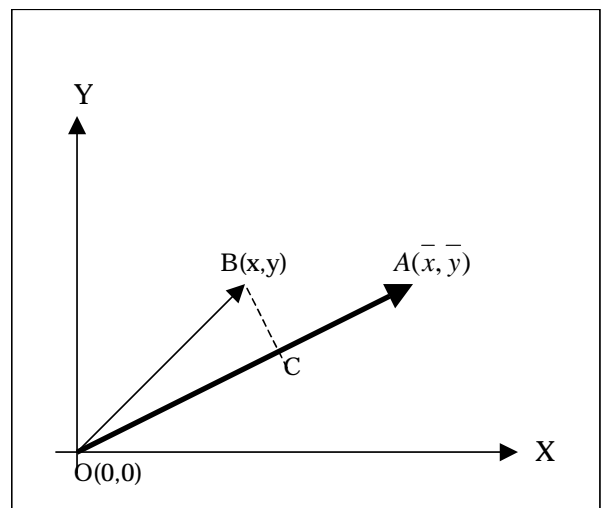
これを解くと以下になる。

$$\begin{cases} X = \frac{\bar{xx} + \bar{yy} - \bar{x}^2}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \bar{x} \\ Y = \frac{\bar{xx} + \bar{yy} - \bar{x}^2}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \bar{y} \end{cases}$$

したがって、 \vec{OC} の大きさは、

$$|\vec{OC}| = \frac{\bar{xx} + \bar{yy}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}} = u \quad \left(|\vec{CB}| = \frac{\bar{xy} - \bar{yz}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}} = v \right)$$

となり、これが水平風速である。(v の分散が大きい場合は、平均時間に問題がある)



3 鉛直風速の算出

上記の各点を 3 次元(X-Y-Z)空間に拡張すると、 $O(0,0,0)$ 、 $A(\bar{x}, \bar{y}, 0)$ 、 $B(x, y, 0)$ 、 $C(X, Y, 0)$ であり、実際の平均風速は $\vec{OA}' = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 、瞬間風速は $\vec{OB}' = (x, y, z)$ とかける。 O, A, C, A' が載る平面(U-Z)を考え、 $A(u, 0)$ 、

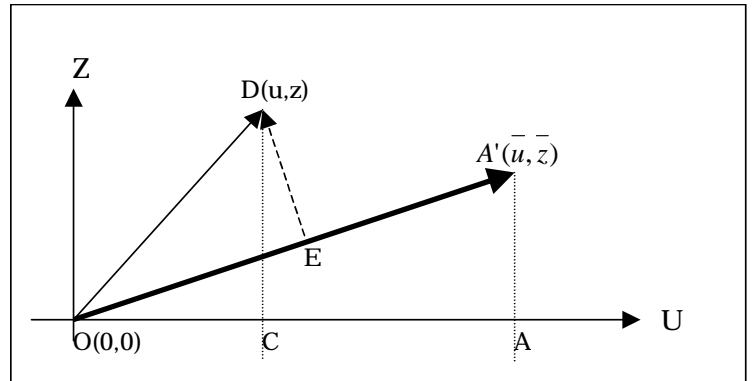
$C(u,0)$ 、 $A'(\bar{u}, \bar{z})$ と定義しなおす(点Bはこの平面には載らない)と、この平面における瞬間風速は $\overrightarrow{OD} = (u, z)$ とかける。ここで、点Dから直線 OA' への垂線の足を点 $E(U, Z)$ とすると、ベクトル \overrightarrow{ED} が求めるべき鉛直風速となる。点Eの座標は、Cの座標と同様にして、

$$\begin{cases} U = \frac{\bar{u}u + \bar{z}z}{\bar{u} + \bar{z}} \\ Z = \frac{\bar{u}u + \bar{z}z}{\bar{u} + \bar{z}} \end{cases}$$

として求まり、

$$|\overrightarrow{OE}| = \frac{\bar{u}u + \bar{z}z}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{z}^2}} (= u')$$

$$|\overrightarrow{ED}| = \frac{\bar{u}z - \bar{z}u}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{z}^2}} = w$$



と求まる。なお、 w が非常に大きい場合には、運動量フラックス算定には、この u' を使うべきである。

4 プログラムの実際

実際のプログラムでは、ゼロで除したり、ゼロのべき乗を計算するとエラーとなる場合が多いので、風速がゼロの場合の処理をいれる必要がある。

```

au=0
aw=0
a1=ax*ax+ay*ay
if(a1.gt.0.) a1=a1**0.5
a2=a1*a1+az*az
if(a2.gt.0.) a2=a2**0.5
do 300 i=1,imax,1
  if(a1.eq.0.) then
    u(i)=0.
  else
    u(i)=(ax*x(i)+ay*y(i))/a1
  end if
  if(a2.eq.0.) then
    w(i)=0.
  else
    w(i)=(a1*z(i)-az*u(i))/a2
  end if
  au=au+u(i)
  aw=aw+w(i)
301 continue
au=au/real(imax)
aw=aw/real(imax)

```