３　温度移流の解析

発達する温帯低気圧は、以下のような特徴を持っていることが知られている。

１．上空の気圧の谷が、地上の低気圧より西にずれている。
（地上天気図と 500hPa 天気図）
２．低気圧の前面（東側）で暖気移流、後面（西側）で寒気移流が生じている。
（850hPa 天気図）
３．低気圧の前面（東側）で上昇流、後面（西側）で下降流が生じている。
（700hPa 天気図）

ここでは、これらのうち 2 番目の条件である、850hPa 面での**温度移流**(temperature advection)に注目して、温帯低気圧の発達に伴う気象場の特徴を解析したい。格子点データとして与えられている客観解析データを用いて、指定された気圧面での水平温度移流を計算することを考える。

非断熱加熱のない状況下では、熱力学方程式は、温位θを用いて、

$$\frac{D}{Dt}\theta = \frac{\partial}{\partial t}\theta + \vec{u}\cdot\nabla_p\theta + \omega\frac{\partial}{\partial p}\theta = 0 \tag{1}$$

と書けた。両辺に$\frac{T}{\theta} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{R/C_p}$をかけると、

$$\frac{\partial}{\partial t}T + \vec{u}\cdot\nabla_p T + \omega\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{R}{C_p}}\frac{\partial}{\partial p}\theta = 0 \tag{2}$$

となるので、温度のオイラー微分（局所微分）は、

$$\frac{\partial}{\partial t}T = -\vec{u}\cdot\nabla_p T - \omega\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{R}{C_p}}\frac{\partial}{\partial p}\theta \tag{3}$$

と書ける。右辺第 1 項は水平温度移流、第 2 項は鉛直温度移流を表している。右辺第 1 項を x － y 平面上で成分に分けて書けば、

$$-\vec{u}\cdot\nabla_p T = -u\frac{\partial}{\partial x}T - v\frac{\partial}{\partial y}T \tag{4}$$

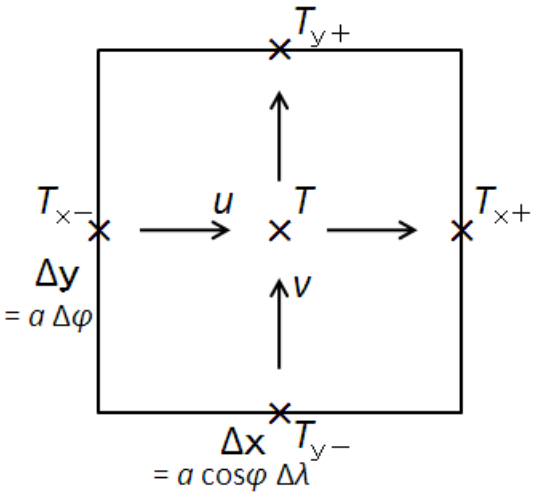
となる。半径aの球面上で定義された球面座標系においては、緯度ϕと経度λを用いて、

$$-\vec{u}\cdot\nabla_p T = -u\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\lambda}T - v\frac{1}{a}\frac{\partial}{\partial\phi}T \tag{5}$$

と書ける。微小な領域における差分に置き換えると、

$$-\vec{u}\cdot\nabla_p T = -u\frac{T_{x+} - T_{x-}}{a\cos\phi\Delta\lambda} - v\frac{T_{y+} - T_{y-}}{a\Delta\phi} \tag{6}$$

となる。



課題５：SLP_200905.dat、Z500_200905.dat、T850_200905.dat、U850_200905.dat、V850_200905.dat はそれぞれ、2009 年 5 月の各時刻における海面気圧、500hPa 面高度、850hPa 面気温、850hPa 面東西風、850hPa 面南北風の客観解析データである。データファイルの書式は、対応するコントロールファイルに記述されている。これらのデータを用いて以下の問いに答えよ。

①2009 年 5 月 17 日 0 時（UTC）における海面気圧と 500hPa 面高度、850hPa 面気温の分布を作図せよ。

②2009 年 5 月 17 日 0 時（UTC）における 850hPa 面での水平温度移流を計算せよ。水平温度移流は、気温と東西風、南北風から算出せよ。単位は K/day とする。北極と南極では計算が難しいので欠損値を代入してよい。地球の半径は$a = 6.368 \times 10^6$mとする。

水平温度移流の計算に用いたプログラム（prog03.f[.c]）と、海面気圧（SLP.ps）、500hPa 面高度（Z500.ps）、850hPa 面気温（T850.ps）、850hPa 面水平温度移流（Tadv850.ps）を作図した図を提出せよ。なお、作図する領域は、緯度経度座標で北緯 20～50 度、東経 110～160 度とする。

注意：
✓　北極、南極においては南北移流を計算できないので、欠損値を代入する。

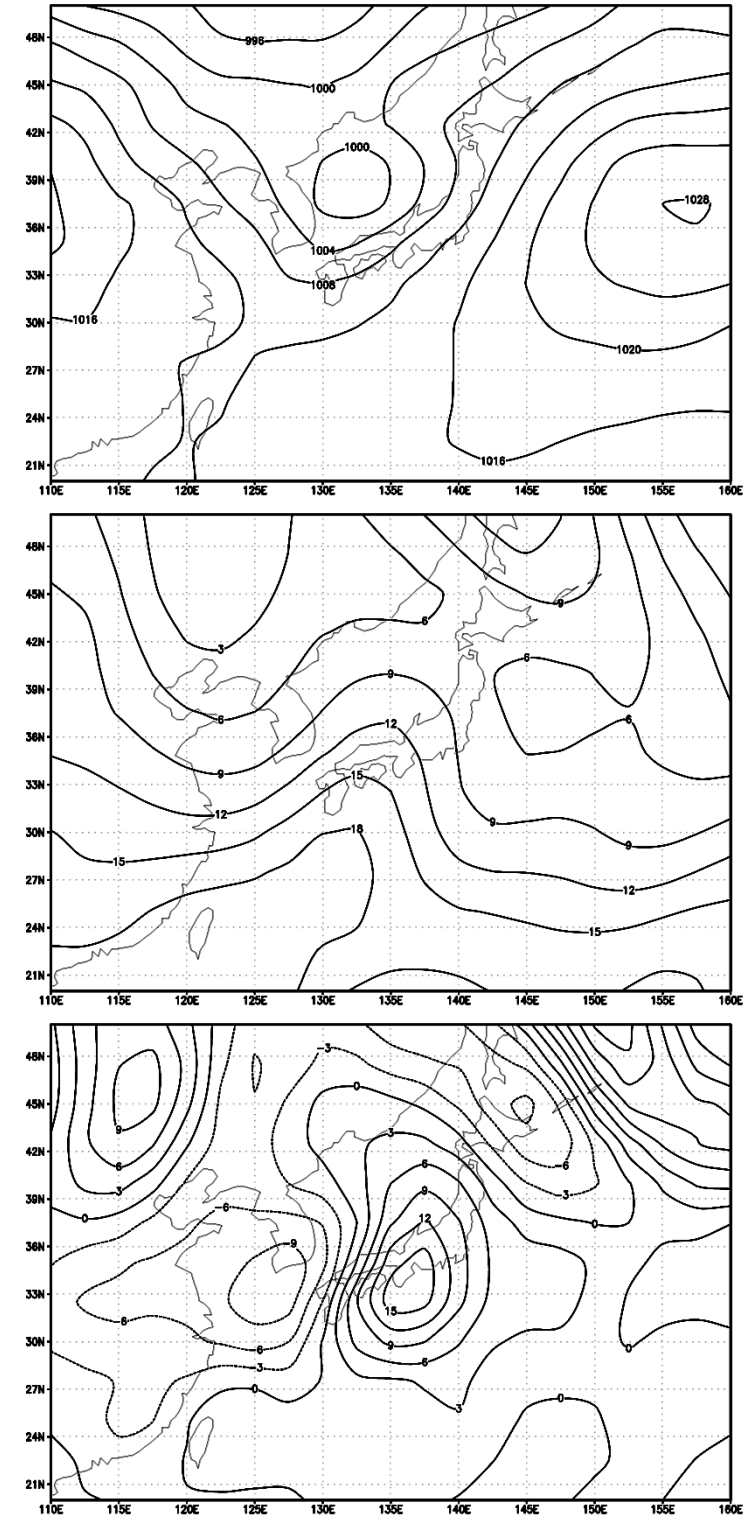


図 3.1　2009 年 5 月 17 日 0 時（UTC）における海面気圧（上）と 850hPa 気温（中）、水平温度移流（下）。等値線間隔はそれぞれ 4 hPa、3 K、3 K/day。

※この演習では NCEP/NCAR（米国環境予測センター/米国大気研究センター）による客観解析データを用いている。