

1. はじめに

スカラー(温度・水蒸気・二酸化炭素など)同士の相似 = 乱流場で「同じ」振る舞いをする
不安定条件下の接地層では実用上、頻繁に使用される仮定である。

例: モデル(渦相関係数が同一)、観測(ポーエン比法)

過去の観測事実:
・平均場では比較的成立しやすい。
・2次モーメント(特に水蒸気など)では、成立しない。

これまで考えられている相似性が成立しない原因(Katul and Hsieh, 1997, DeBruin et al., 1999):

- ・観測誤差(!)
- ・地表面の不均一性(境界条件)
- ・混合層上端でのエントレインメント
- ・温度(能動スカラー)と比湿(受動スカラー)の乱流場での役割の違い

本研究の目的:

温度と比湿間の(非)相似性を、フーリエ空間およびフェーズ(ウェーブレット)空間で検証する。

- ・温度と比湿の(非)相似性は、どのような空間(時間)スケール(=波数)で生じるか
- ・温度と比湿の(非)相似性は、どのような条件下で生じるか

を調べることによって、上記のいずれの原因が卓越するかを明らかにする。

4. フーリエ空間における検証

(a) コヒーレンススペクトル

フーリエ空間における相似性(相関)の指標として、コヒーレンススペクトルを使用する。

$$R_{Tq}(f) = \frac{S_{Tq}(f)}{\sqrt{S_{TT}(f)S_{qq}(f)}}$$

すべてのデータに対して表示したのが右の図である。

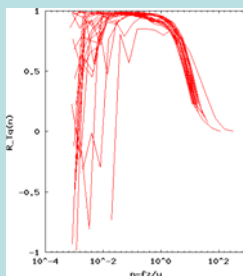
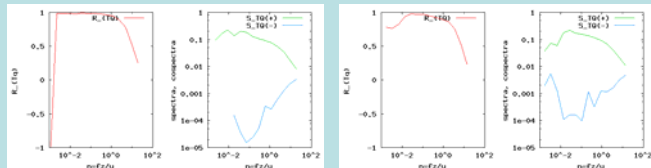


図 すべてのデータに対するコヒーレンススペクトルのプロット

(b) 符号別コスペクトル



相関の良いRun (7/28 11:30-12:00)

相関の悪いRun (7/28 12:00-12:30)

図 コヒーレンススペクトルと符号別コスペクトルの例

2. ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は、時系列 $x(t)$ を時刻 t とスケール λ の関数として変換する。

$$Wx(\lambda, t) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} x(u) \psi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right) du$$

直交ウェーブレットは、以下のように時刻とスケールを離散化することで得られる。本研究では、Haar関数を用いる

$$\lambda = 2^m, \quad t = i2^m, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, N = 2^M$$

これにより、 N 個の時系列が、 $N-1$ 個のウェーブレット係数に展開される。

$$Wx(2^m, i2^m) = Wx^m(i)$$

展開されたウェーブレット係数は、分散を保存する。

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^{2^m-1} [Wx^m(i)]^2$$

すなわち、各スケール毎の変動エネルギーは、以下の通りとなる。

$$T_E = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2^M-1} [Wx^m(i)]^2$$

よってスペクトル(周波数あたりのエネルギー)は、以下のように計算出来る。これをここではウェーブレットスペクトルと呼ぶ。

$$f_m S_{xx}(f_m) = \frac{1}{\ln 2 N} \sum_{i=0}^{2^M-1} [Wx^m(i)]^2 \quad f_m = 2^m df$$

同様に、コスペクトルも定義可能である。特にコスペクトルの場合は、正のコンポーネントと負のコンポーネントについて、定義することが出来る。

$$f_m S_{Tq}^+(f_m) = \frac{1}{\ln 2 N} \sum_{W T^m(i) W q^m(i) > 0} W T^m(i) W q^m(i)$$

$$f_m S_{Tq}^-(f_m) = \frac{1}{\ln 2 N} \sum_{W T^m(i) W q^m(i) < 0} W T^m(i) W q^m(i)$$

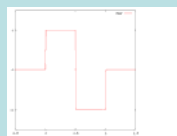


図 Haar関数

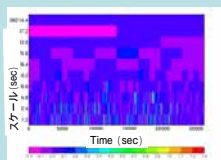


図 直交ウェーブレットの変換結果の表示例

6. まとめ

不安定接地層での温度と水蒸気の相似則について、以下のような結論を得た。

< フーリエ空間 >

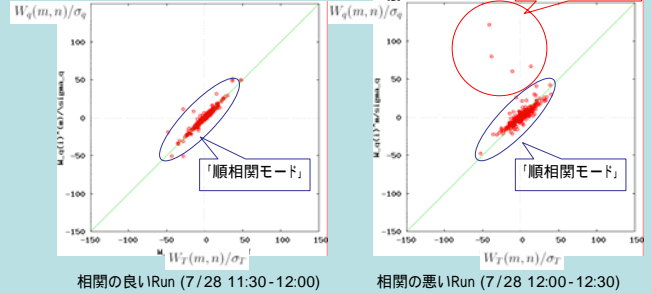
1. 相似性は、エネルギー保有領域で最も強く維持される。その一方で、大きなスケール(低周波)領域($\sim 10^3$)で相似則が崩壊することが確かめられた。
2. 低周波における相似則の崩壊は、30分Run間のばらつきとして現れ、非相似性を生じる現象の平均再現時間が30分と同じオーダーであることが予想される。

< フェーズ(ウェーブレット)空間 >

1. 直交ウェーブレット変換を用いた象限解析によって、スカラー間の相関モードと逆相関モードに明確にかつ客観的に分離できることが示された。
 2. 逆相関モードは大きなスケール(低周波)領域に位置し、フェーズ空間においてごく少数であるが、温度・比湿共に絶対値の大きな変動成分である。また、その殆どが $WT < 0, Wq > 0$ の象限に属する。
 3. 逆ウェーブレット変換によって実空間に戻すと、逆相関モードは昇温と乾燥が同時に起こるトレンドであることが見いだされた。これは、Mahrt(1991)の境界層水蒸気の乾燥レジームに相当する。
- 以上の結果から、エントレインメントでのフラックスの方向の違いから、**境界層内の発達に伴う温度・比湿の長い時間スケールでの変動の違い**が両者の相似則の崩壊につながるメカニズムが明らかになった。

5. フェーズ(ウェーブレット)空間における検証

(a) ウェーブレット象限解析

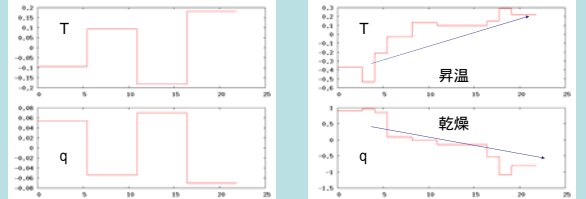


相関の良いRun (7/28 11:30-12:00)

相関の悪いRun (7/28 12:00-12:30)

図 ウェーブレット係数を用いた象限解析

(b) ウェーブレット逆変換による「逆相関モード」の再構成



相関の良いRun (7/28 11:30-12:00)

相関の悪いRun (7/28 12:00-12:30)

図 再構成された「逆相関モード」

図 コスベクトル S_{Tq} の4象限成分の時間変化



3. 解析データ

解析データは、RAISE(The Rangeland Atmosphere-Hydrosphere -Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia)

プロジェクトによるモンゴルの半乾燥草原における乱流観測データである

期間: 2003年7月25-28日

4日間の日中のデータ(完全晴天日)

場所: モンゴル国ヘルレン川流域Kherlenbayan-Ulaan

使用測器: カイジョー SAT550

ライカ LI-7500

データ: 50Hz, 30分データ

地形、植生など: 平坦、ほぼ均一



参考文献

- DeBruin, et al., 1999: On the Temperature-Humidity Correlation and Similarity, BLM, 93(3).
- Katul, G and Hsieh, C, 1997: Note on the Flux-Variance Similarity Relationship for Heat and Water Vapour in the Unstable Atmospheric Surface Layer, BLM, 80(3).
- Katul, G, Albertson, J.D., Chia R. C., Parlange, M.B., 1994, Intermittency in Atmospheric Surface Layer Turbulence: The Orthogonal Wavelet Representation, in "Wavelets in Geophysics" edited by E Fourfourla-Georgiou and P. Kumar, pp. 81-105, Academic. Press.
- Mahrt, L, 1991: Boundary-Layer Moisture Regime, Quart. J. Roy. Met., 117.

謝辞

本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業「水の循環系モデリングと利用システム」によるRAISE プロジェクト(代表:杉田倫明)、およびアサヒビル術振興財団研究助成(代表:浅沼)の研究成果である。G. Katul教授(デューク大学)のコメントに感謝します。