

構造計画研究所 青木幸子
筑波大学陸域環境研究センター 浅沼 順
長岡技術科学大学環境・建設系 早川典生
GAME-Tibet 境界層グループ

1. はじめに

地表面と大気間の水や熱、運動量、微量気体などの輸送は、特徴的な時間あるいは長さスケール(周波数)が数オーダーにわたる現象である。大まかには、積分スケールと分子粘性のスケールであるコルモゴロフの微少スケールの間では、コルモゴロフの $-5/3$ 乗則が成立するが、その一方で積分スケールよりも長いスケール(低周波数)においては、確立した法則に事欠くのが現状である。このスケール範囲は、いわゆる乱流のエネルギー保有領域から日周期に相当するスケールに渡り、乱流とそれよりも大きなスケールの現象の橋渡しに当たるスケールである。実用的な観点からすると、渦相関法によるフラックス観測でのレイノルズ平均化時間/距離がこのスケール範囲内に設定されることが多く、不十分に短く設定されるとフラックス観測値が過小評価されることがわかっている(例えば Lenschow et al., 1994)。そのため、近年地表面熱収支観測の問題として微気象学や水文学において話題になっている「熱収支の不均衡問題」においては、このスケール領域での乱流輸送のスペクトルを調べることが重要である。

本研究の目的は、近年工学的にも注目されている手法であるウェーブレット変換をチベット高原上における乱流観測データに応用し、乱流による熱/物質輸送に関わる時間/空間スケールを求め、さらに熱収支の不均衡問題の解決の糸口を探ることにある。

2. 解析データ

解析に用いたデータは、GAME-Tibet の1998年集中観測の一環として、東チベット高原のナチュ市付近において日中韓共同観測として行われた熱収支観測のうち、渦相関システムによる乱流観測データである。観測地点は、丘陵に囲まれた疎らな草地であり、周囲は微気象観測に十分なフェッチが確保できる平坦でほぼ水平な草地が広がっている。観測サイトおよび観測に用いた測器の詳細な説明は、Choi et al. (2001)を参照されたい。観測データから渦相関法によって評価された熱収支解析によれば、 $R_n - G$ の約20-30%に及ぶエネルギーの不均衡が指摘されている。この乱流データから、本研究では表1に挙げる9つの約7時間の連続データを解析対象とする。

表 1: 解析に用いた Run. 時間は北京標準時.

Run	Date	start time	end time
1	07/28	10:00:10	17:17:04
2	08/03	10:06:59	17:23:54
3	08/16	10:08:31	17:25:26
4	08/22	10:08:30	17:25:24
5	08/30	09:59:17	17:16:11
6	09/06	10:00:50	17:17:44
7	09/12	08:00:38	15:17:32
8	09/13	10:08:31	17:25:25
9	09/14	10:06:51	17:23:45

3. ウェーブレット変換

ウェーブレット変換が乱流解析において用いられるようになったのは、1980年代後半であり、フーリエ変換よりも的確な乱流現象の解析ツールではないかという期待とともに、その応用が広がった。ウェーブレット変換の数学的な基礎やその地球科学や工学への応用に関しては、すでに様々な書籍が出版されており (Daubechies, 1992; Foufoula-Georgiou and Kumar, 1994, 例えば), ここでは簡単なウェーブレット変換の解説にとどめることとする。

時系列 $f(t)$ のウェーブレット変換は、以下の式で表される。

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

ここで、 $\psi(t)$ はマザーウェーブレットと呼ばれ、フーリエ変換の三角関数と同じ積分核であるが、ウェーブレット変換の場合は通常有限においてゼロとなるコンパクトなサポートを持つ関数を用いる。 a と b はそれぞれ、スケールとトランスレートと呼ばれるが、式(1)は、ウェーブレット変換がもとの時系列をスケール a と時刻 b で表される一種のパケットに分解することを表している。

2つの時系列 $f(t)$ と $g(t)$ のウェーブレット変換の積 $W_f(a, b)W_g(a, b)$ は、スケール a を持つ時刻 b での $f(t)$ と $g(t)$ の共分散の成分を表す。その時間積分、すなわち

$$E_{fg}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a, b)W_g(a, b)db \quad (2)$$

は、ウェーブレット共分散あるいはウェーブレットコスペクトルと呼ばれ、共分散のスケール a を持つ

表 2: 全体の熱輸送に対する 30 分スケール以上の熱輸送の割合.(%).

Run	$w-\theta$	$w-q$
1	1.4	0.7
2	-1.8	2.3
3	11.6	-5.5
4	-9.2	4.1
5	-13.0	3.4
6	3.4	1.3
7	-17.0	11.7
8	-3.9	3.4
9	-6.1	2.4

成分を表し、フーリエ変換におけるコスペクトルのウェーブレット版に当たる.

本研究では、顕熱フラックス、潜熱フラックスに対するウェーブレット共分散 $E_{w\theta}, E_{wq}$ を、表 1 の各 run に対して計算し、これらのフラックスのスケール分布を調べる. 簡単で単純であることから、Howell and Mahrt (1994) に習ってハー (Haar) ウェーブレットを用いた直交ウェーブレット変換を用いる.

4. 解析結果と考察

図 1 は、Run6 に対して計算した、顕熱／潜熱フラックスのウェーブレット共分散である. レイノルズ平均としてフラックスを求める折りに用いている 30 分の平均時間を点線で表している. これらの図からまず明らかなのは、ほとんどの熱が 1 から 100 秒オーダーのスケールで輸送されているということであり、一般に用いられる 10 分から 1 時間の平均化時間は、このスケールで起こる熱輸送を捉えるには、ほぼ十分であることがわかる. その一方で、特に大きな顕熱輸送が 3〜5 時間以上のスケールにおいて起こっている. この大きなスケールでの顕熱輸送は、各 Run 毎に大きく様相を異にしており、Run によっては 3〜5 時間以上のスケールにおいて大きな負 (地表面方向) の熱輸送が見られた.

このような 3〜5 時間以上のスケールでの熱輸送の全体の熱輸送への寄与を定量化する目的で、ウェーブレット共分散をスケール方向に積分し、3〜5 時間以上のスケールと全体の積分の比を計算したのが、表 2 である. この結果が示すのは、30 分以上の時間スケールで行われる熱輸送は無視できない程大きい、いわゆる「熱収支不均衡」を解決するほど大きくは無いいということである. また、3〜5 時間以上のスケールの成分を逆ウェーブレット変換によって、時系列に再構成したところ、これらの成分は気温や湿度の 1 日周期の変動に関連しているらしいことがわかった.

謝辞 本研究は GAME-Tibet プロジェクトの成果の一部であり、プロジェクトを主導した筑波大学安成哲三、東京大学小池俊雄両教授および、チベット高

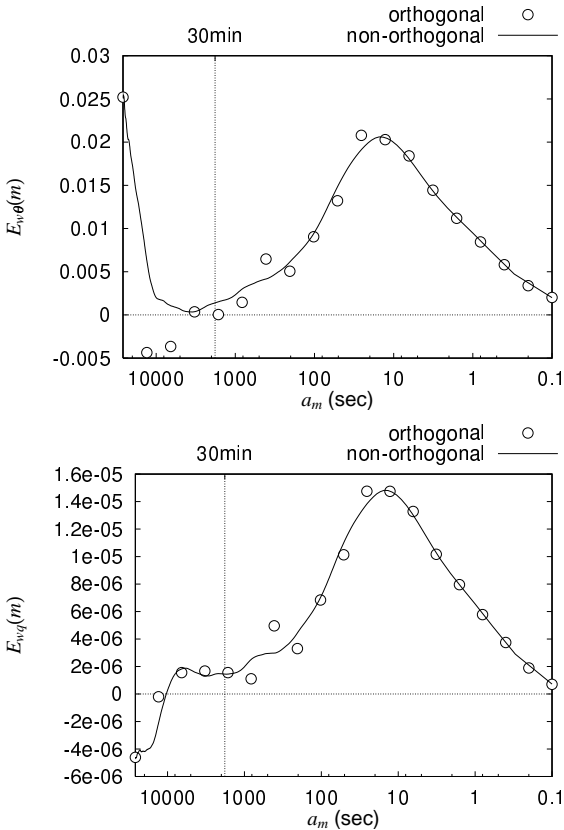


図 1: 計算されたウェーブレット共分散 (Run 6). 上図: 顕熱フラックス, 下図: 潜熱フラックス.

原上における観測において多大な助力を頂いた方々に感謝する.

参考文献

Choi T., Kim J., Lee H., Asanuma J. and Wang J. (2001): Boundary-Layer Meteorol., **submitted**

Daubechies I. (1992): Ten Lectures on Wavelets. SIAM

Foufoula-Georgiou E. and Kumar P. (editors) (1994): Wavelets in Geophysics, volume 4 of *Wavelet Analysis and Its Application*. Academic Press

Howell J. and Mahrt L. (1994): An adaptive decomposition: Application to turbulence. In Foufoula-Georgiou and Kumar (1994), pp. 107–128

Lenschow D.H., Mann J. and Kristensen L. (1994): J. Atmos. Oceanic Technol., **11**, pp. 661–673

キーワード 蒸発散, 大気境界層, アジアモンスーン