平成 23 年度　卒業論文

大気中の極向きエネルギー輸送の長期的変動

北海道大学　理学部　地球惑星科学科
大気海洋物理学グループ　山崎研究室所属

学籍番号 22080099 光岡　昇平

平成 24 年 2 月 3 日提出

要旨

「地球温暖化」という話題は世間一般的にもよく取り上げられる話題ではあるが、ここ数十年の北極域における気温上昇が全球平均のほぼ 2 倍となっていると言われており、「温暖化増幅(Arctic amplification)」と呼ばれる現象である。先に出版されている論文の中には、その現象の原因として「極域の海氷の減少」、「極向きのエネルギー輸送」があげられているものがあり、今回は後者の方に非常に興味を持ち、詳しくデータ解析を行って調べてみようと思ったのが、本研究のきっかけである。

今回は、Rune G. Graversen et al. (2007)の METHODS の項目を参考にして、4 つのエネルギー輸送成分の数式で定義される大気中のエネルギー輸送について調べる。使用するデータは ERA-Interim である。

まず、各エネルギーの項のオーダーを比較していったが、大小関係としてはエンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱輸送、運動エネルギー輸送の順であるという結果が得られた。

次に、各エネルギー輸送成分の対流圏下層と対流圏上層における時系列線形トレンドの有無を 20 年間 (1989 年～2008 年)の長期変動から探っていった。その実験の中で、特にエンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱輸送の 3 つの成分の線形トレンドが顕著であり、どの成分も類似したような線形トレンドを呈していた。10°Ｓの 850hPa では正のトレンドを示し、このことから南半球低緯度帯における対流圏下層の赤道向きエネルギー輸送が年々強まっているということが分かった。また、10°Ｎの 250hPa では正のトレンド、10°Ｓの 250hPa では負のトレンドを示し、このことから両半球低緯度帯における対流圏上層の極向きエネルギー輸送が年々強まっているという結果が得られた。特に 250hPa の対流圏上層におけるトレンドについては、かなり明瞭なものである。

次に、各線形トレンドの原因究明の実験を行った。その中で、調査対象のどの高度、緯度帯においても南北風が、一部 10°Ｎの 250hPa で潜熱にエネルギー輸送成分と同じような線形トレンドが認められた。このことから、南北風と一部潜熱にエネルギー輸送のトレンドの原因があるということが伺える。この原因として、南北風については低緯度帯における大気の大循環 (ハドレー循環)が年々強まっているのではないかということが考えられる。

次に、4 つの成分の和の,トータルのエネルギー輸送の長期変動における線形トレンドの有無を調べる実験を行った。どちらの高度もトレンドの見られた 3 つのエネルギー

輸送成分と同じ緯度帯で類似した線形トレンドを示していた。それら 3 つの成分の関与が強いことが伺える結果である。

以上の結果を鑑みると、両半球の対流圏上層で極向きのエネルギー輸送が顕著に強まっており、南半球の対流圏下層で赤道向きのエネルギー輸送が年々強まっていることが分かる。

今回取り上げた温暖化増幅という話題については、現在様々な議論がなされており、その決定的な原因は明らかにされていない。本研究で取り上げた「極向きのエネルギー輸送」も現在は候補となっている原因に過ぎず、まだ他に調べるべき事象はたくさんある。今後の研究の方針としては今回の極向きエネルギー輸送に関する実験結果の温暖化増幅との関連性について調べる他、ERA-40 (1979 年～2001 年) を用いた先行研究 Rune G. Graversen et al. (2007)と同等の実験を ERA - Interim (1989 年～2008 年)で行うとどうなるのかを調べる再現実験も実施していきたい。また、エネルギー輸送のみに固執せず、様々な角度、アプローチでこの温暖化増幅の原因についてさらなる研究を重ねていきたい。

目次

要旨.....2
第 1 章　はじめに.....5
1.1 研究背景.....5
1.2 先行研究.....5
第 2 章　研究内容.....10
2.1 研究の目的.....10
2.2 使用したデータ.....10
2.3 基本事項の確認.....11
第 3 章　研究結果.....15
3.1 各エネルギー輸送成分のオーダーの比較.....15
3.2 各エネルギー輸送成分の時系列線形トレンド.....17
3.2.1 第一項 (運動エネルギー輸送).....18
3.2.2 第二項 (エンタルピー輸送).....21
3.2.3 第三項 (ジオポテンシャル輸送).....25
3.2.4 第四項 (潜熱輸送).....28
3.2.5 本節のまとめ.....31
3.3 線形トレンドの原因究明.....31
3.3.1 10°S の対流圏下層 (850hPa).....31
3.3.2 10°N の対流圏上層 (250hPa).....34
3.3.3 10°S の対流圏上層(250hPa) 36
3.3.4 本節のまとめ.....38
3.4 エネルギー輸送全体の長期変動.....38
3.4.1 対流圏下層 (850hPa).....38
3.4.2 対流圏上層 (250hPa).....40
3.4.3 先行研究との比較.....42
3.4.4 本節のまとめ.....45
第 4 章　総括.....46
4.1 研究結果のまとめと考察.....46
4.2 今後の展望.....47
謝辞.....48
参考文献.....49

第 1 章　はじめに

1.1 研究背景

「地球温暖化」という話題は世間一般的にもよく取り上げられる話題ではあるが、ここ数十年の北極域における気温上昇が全球平均のほぼ 2 倍となっていると言われており、「温暖化増幅(Arctic amplification)」と呼ばれる現象である。

この温暖化増幅の原因はまだ明らかにされておらず、様々な議論がなされており、気象学の世界では重要な研究題材の 1 つとして注目されている。大気、海洋の挙動もしくは地球環境がどのように作用してこのような現象が起きているのかを明らかにしていく必要がある。先に出版されている論文の中には、その現象の原因として「極域の海氷の減少」、「極向きのエネルギー輸送」があげられているもの (1.2 節参照) があり、今回は後者の方に非常に興味を持ち、詳しくデータ解析を行って調べてみようと思ったのが、本研究のきっかけである。

1.2 先行研究

ここで、温暖化増幅の原因が何であるかを考察した過去の研究を 2 つ紹介する。

1 つ目は、James A. Screen & Ian Simmonds (2010)の論文で、「The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification」である。
当論文では、極域の温暖化増幅の原因は「極域の海氷の減少」であると述べられている。ERA-Interim のデータを使用している。

図 1.1 は 1989～2008 年の東西平均場における平均気温のトレンドを示した図である。残っている海氷の融解や海洋表層を暖めることにエネルギーが使われる夏の季節を除けば、地表面付近において気温上昇のトレンドが強く出ており、更に大気全体よりも下層大気の方が気温上昇速度が著しく速いことが分かる。

図 1.2 は図 1.1 と同期間の東西平均場における海氷の減少に関連した気温のトレンドを示した図である。季節ごとの平均気温のトレンドは図 1.1 のそれとかなり類似したも

のであることが分かる。日射や、低気圧活動の風などの影響で極域の海氷が減少してしまうと、地表面のアルベドが低下し、上空からの短波及び長波放射が反射されにくくなる。すると、地表面付近の気温が上昇し、さらに海氷が溶けてアルベドが低下し更なる気温上昇が起こる、といったフィードバック機構が成立するのである。この機構を根拠に温暖化増幅と極域の海氷の減少を関連付けている。

以上のことから、当論文では極域の温暖化増幅の原因は「極域の海氷の減少」であるとされている。

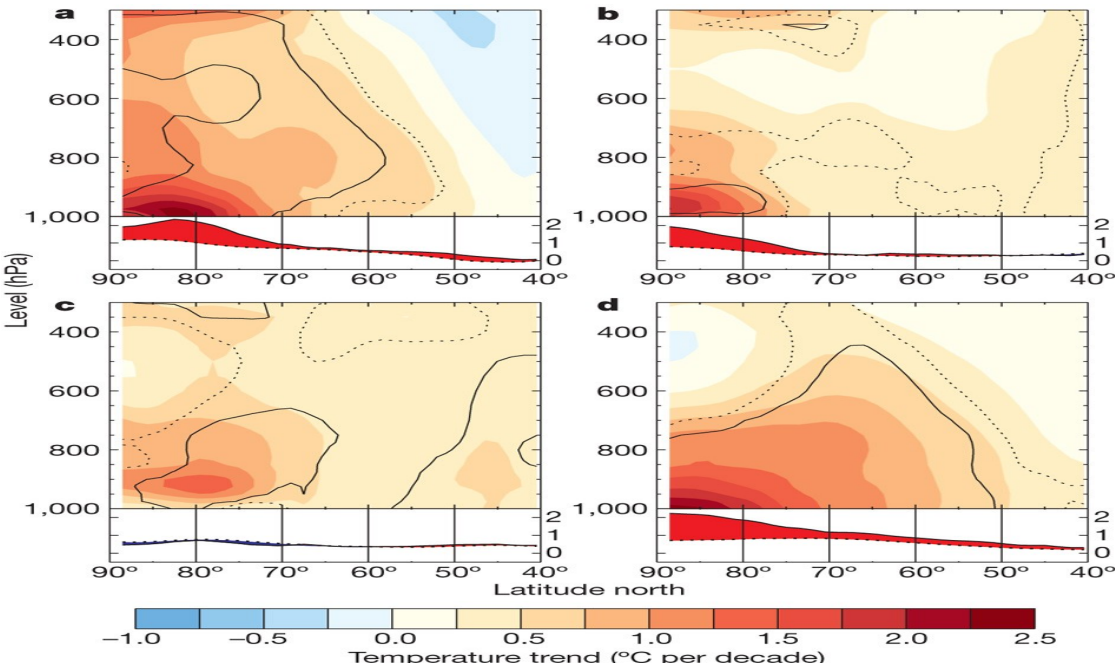

図 1.1 東西平均場における 1989 年～2008 年の冬 (a) 、春 (b) 、夏(c) 、秋 (d) 、の平均気温のトレンドを示した図。横軸は緯度、縦軸は高度(hPa)。下のグラフは大気下層（実線）と大気全体（破線）の平均気温のトレンドを示しており、赤色のシェイドは「大気全体より下層の方が温暖化速度が速い」、青色のシェイドはその逆を表す。横軸は緯度、縦軸は温度(℃)。

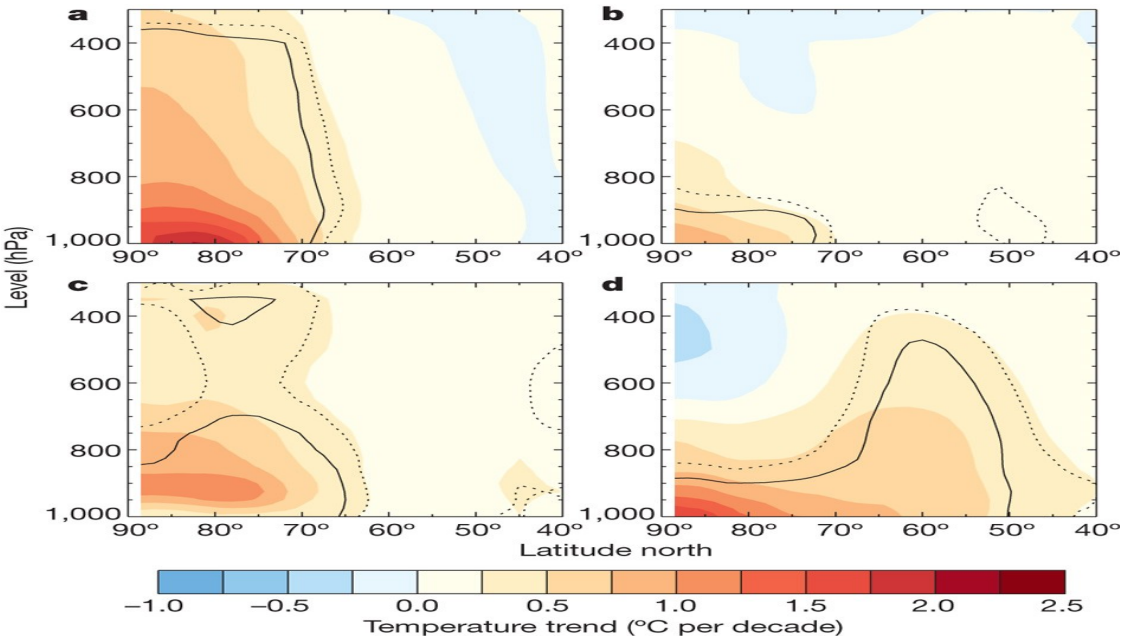

図 1.2 東西平均場における 1989 年～2008 年の冬 (a) 、春 (b) 、夏(c) 、秋 (d) 、の平均気温のトレンドを示した図（海氷の減少に関連したトレンド）。横軸は緯度、縦軸は高度 (hPa)。

2 つ目は、Rune G. Graversen et al. (2007) の論文で「Vertical structure of recent Arctic warming」である。当論文では、極域の温暖化増幅の原因は「極向きのエネルギー輸送」であると述べられている。ERA40 の再解析データを使用している。

図 1.3 は 1979 年～2001 年の東西平均場における平均気温のトレンドを示した図 である。先の 2 つの図と比べると、冬と春は同じように北極域の地表面付近に気温上昇のトレンドが表れているが、大気中層の辺りまでそのトレンドが出ている。夏に関しては北極域の大気中層のみ、秋に関しては北極域の下層から上層にかけてほぼ一様にそのトレンドが出ているのが分かる。これらの結果は先の「極域の海氷の減少」では説明することのできないものである。

この地表面付近以外の高度のトレンドの原因は何なのかを示したのが図 1.4 であり、この図は、500hPa の気温場と 60° N における極向きエネルギー輸送との回帰分布図である。左の a が東西平均場の図で右の b が北極域を中心とした図である。a を見ると、60° N より北側かつ正のタイムラグ、60° N より南側かつ負のタイムラグの部分で正の回帰係数、その点対称の部分で負の回帰係数が分布している。b は 5 日間のタイムラグで評価された回帰分布図であり、北極域では正の回帰係数が、中緯度域では負の

回帰係数が分布している。これらは60°Nにおける極向きのエネルギー輸送と500hPaの気温上昇の間に顕著な比例関係があることを示している。

以上のことから、当論文では温暖化増幅の原因は「極向きのエネルギー輸送」であるとされている。

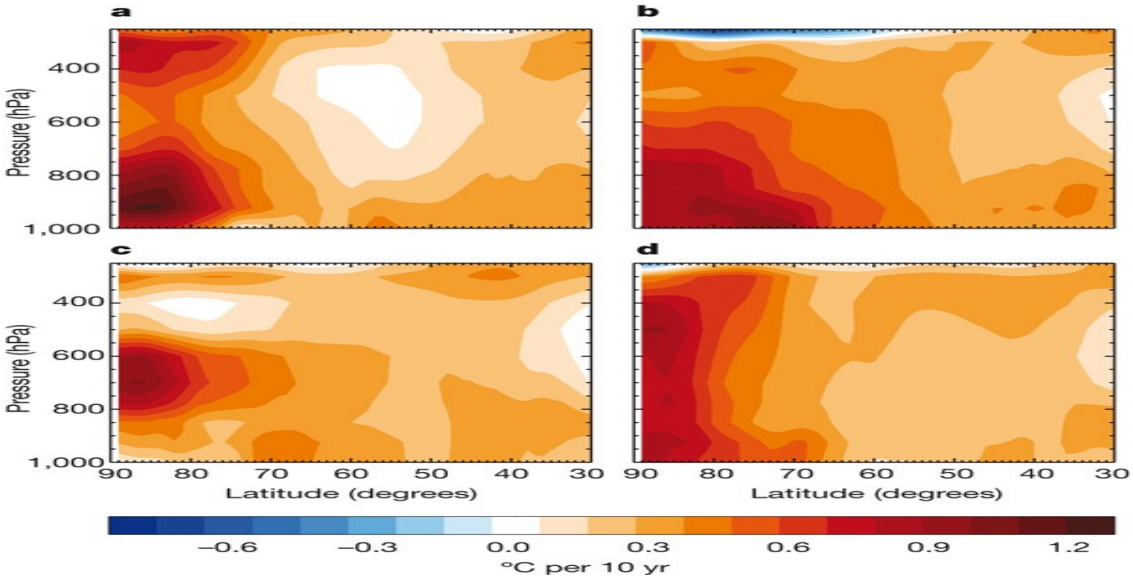

図1.3 東西平均場における1979年～2001年の冬(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)、の平均気温のトレンドを示した図。横軸は緯度、縦軸は高度(hPa)。

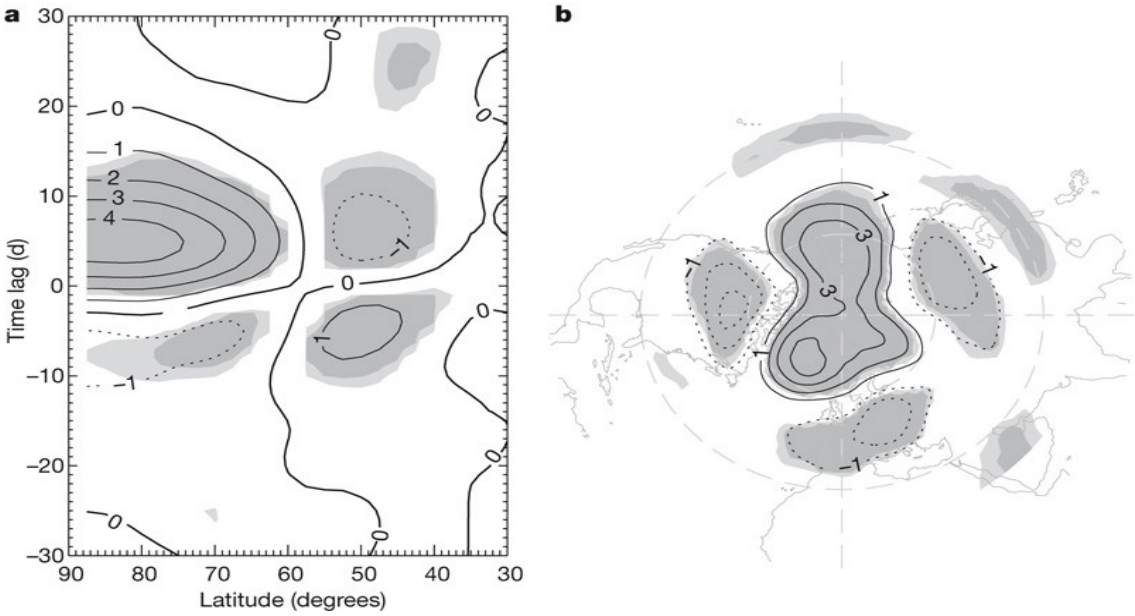

図 1.4 500hPa の気温場と 60° N の極向きエネルギー輸送の回帰分布図。a は、横軸に緯度、縦軸にタイムラグ(日)を取っている。(極向きエネルギー輸送に対して、どのくらい遅れて 500hPa の気温が上下するのかを示す。)b は、北極域を中心とした図。各図の実線は正の回帰係数、破線は負の回帰係数。

第 2 章　研究内容

2.1 研究の目的

上記の先行研究を踏まえ、温暖化増幅の原因を探る第一歩として、本研究では「極向きエネルギー輸送の長期的変動」について考察することにした。今回は、Rune G. Graversen et al. (2007)の METHODS の項目を参考にして、以下の 4 つの成分の数式で定義される大気のエネルギー輸送について調べる。

$$\int_{P_s}^{0} [\frac{1}{2}(u^2+v^2)+C_p T+gz+Lq]v\frac{dp}{g} \qquad (1)$$

z:高度　g:重力加速度　C_p :定圧比熱　T:絶対温度　L:凝結熱　q:比湿

P_s :地上気圧　u:東西風の速さ　v:南北風の速さ

第 1 項は運動エネルギー輸送、第 2 項はエンタルピー輸送、第 3 項はジオポテンシャル輸送、第 4 項は潜熱輸送をそれぞれ表している。

4 つの成分の中でどの項がトータルのエネルギー輸送 (4 つの成分の和) に対する寄与が大きいのか、また過去 20 年間の再解析データから、対流圏各高度において各エネルギー輸送の値のトレンドはあるのか、またそのトレンドはどのようなものなのか、さらにその要因を調べることで最近の温暖化増幅の原因ともなり得る「極向きのエネルギー輸送」の様相を明らかにしていく。

2.2 使用したデータ

本研究では、現実における気象場のデータとして European Centre for Medium-

Range Weather Forecasts (ECMWF) により作成された再解析データである ERA-Interim を使用する。

使用データ：ERA-Interim
時間分解能：6 時間毎(4thdaily data)
水平分解能：1.5°　×1.5°
鉛直　　：37 層(1000hPa～1hPa)
使用期間　：1989 年 1 月 1 日～2008 年 12 月 31 日

この再解析データの中の絶対温度、ジオポテンシャル、比湿、南北風、または前者 3 つが源となるエネルギーと南北風の積に東西平均の演算を施したデータを用いることとする。

2.3 基本事項の確認

まず、研究の本題に入る前に、今回取り上げる 4 種類のエネルギー (運動エネルギー、エンタルピー、ジオポテンシャル、潜熱)と、南北風の 20 年間の気候値を用いて、どのような空間分布をする変数であるのかを明らかにしておく。

図 2.1 ~ 2.5 は、それぞれ運動エネルギー、エンタルピー、ジオポテンシャル、潜熱、南北風の気候値の東西平均場の空間分布図であり、横軸は緯度、縦軸は高度 (hPa) である。運動エネルギーについては、中緯度帯でピークが見られ、偏西風ジェットの強さ及び高低気圧の活動が原因であると思われる。エンタルピーについては、気温の関数であるから、鉛直方向と水平方向に勾配があり (特に水平方向に大きい)、低緯度帯から中緯度帯の中層までの高度で極大、南極域で極小の分布をしている。地表付近で値が小さいのは地表面以下で値が 0 である効果である。ジオポテンシャルについては、高度の関数であるから、どの緯度帯でもほぼ均一に鉛直方向の勾配があるが、低緯度帯で分布がくぼんだ形をしているのは、層厚の関係で、気温の高い低緯度帯の方が、気温の低い高緯度帯よりも高度が高くなるからである。潜熱については、比湿の関数であるから、気温の高い低緯度帯下層で極大、上層においては飽和水蒸気量は気温の指数関数であるため、値はほぼゼロである。南北風については、北半球低緯度帯の下層で負、上層で正の値である。負の値は北風、正の値は南風を表しており、この分布から低緯度帯の大気の大循環 (ハドレー循環) の存在が確認できる。

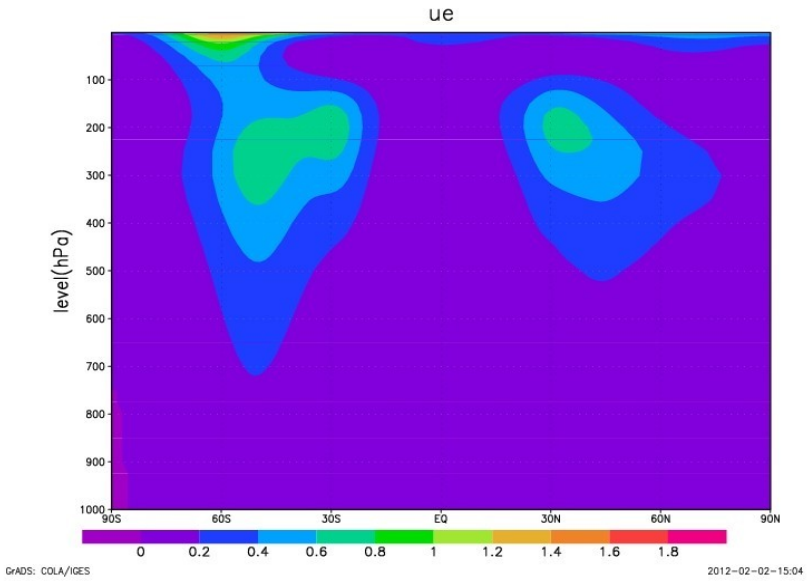

図 2.1 運動エネルギーの気候値の空間分布図

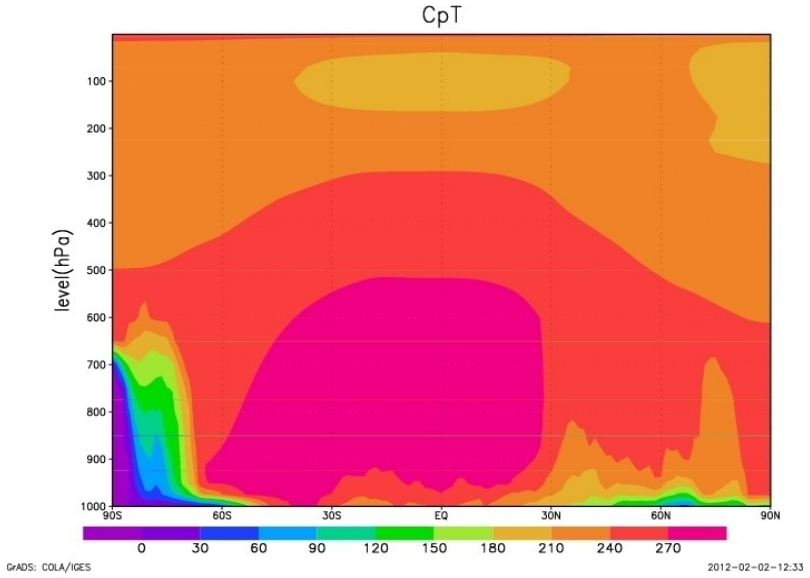

図 2.2 エンタルピーの気候値の空間分布図

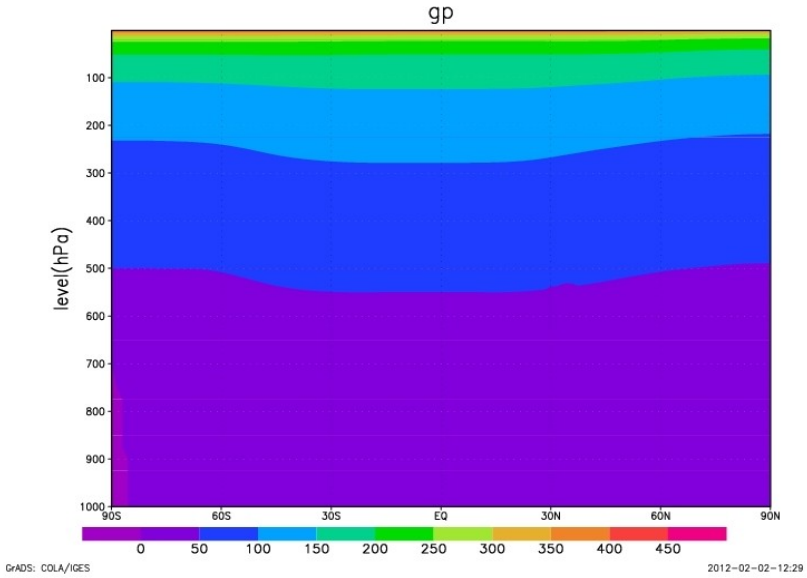

図 2.3 ジオポテンシャルの気候値の空間分布図

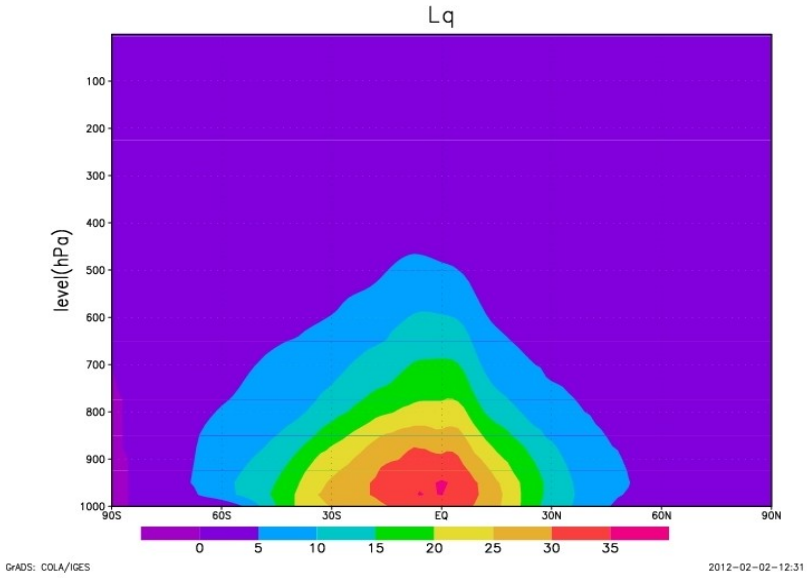

図 2.4 潜熱の気候値の空間分布図

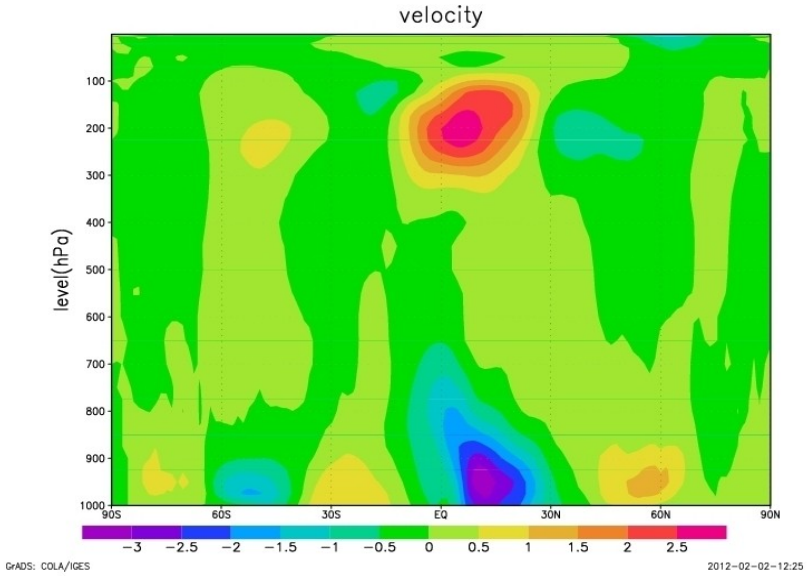

図 2.5 南北風の気候値の空間分布図

第 3 章　研究結果

3.1 各エネルギー輸送成分のオーダーの比較

まず 4 つの成分のうち、どの成分がどの程度トータルのエネルギー輸送に寄与しているのかを明確にするために、ERA-Interim の使用期間 20 年分の気候値を用いて、(1) 式中の各エネルギー輸送成分のオーダーを比較していく必要がある。

図 3.1 は東西平均場における運動エネルギー輸送の 20 年間の気候値を示したものである。エネルギー輸送の単位は (J・m/s) である。横軸に緯度、縦軸に高度 (1000hPa～100hPa) を取っている。値は約 1000 で 10^3 のオーダーであることが分かる。

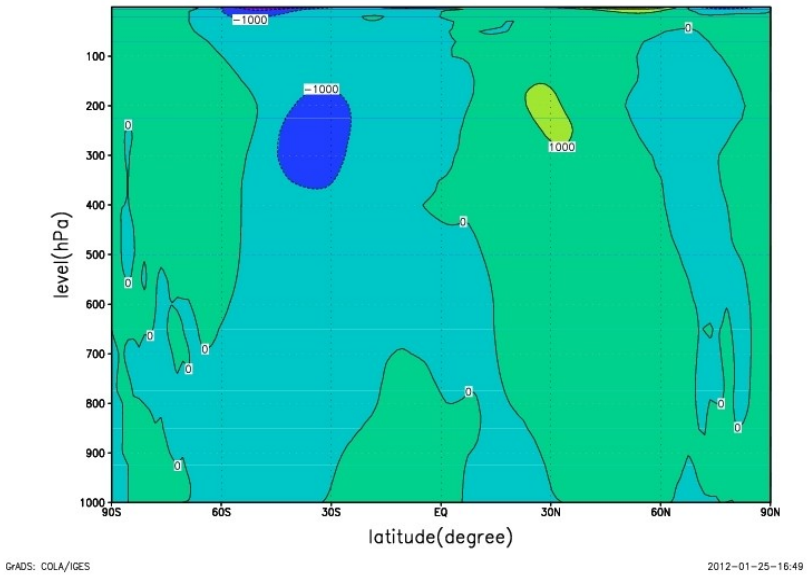

図 3.1 運動エネルギー輸送の気候値の空間分布図

図 3.2 は同じくエンタルピー輸送についての図である。値は約 100000～300000 で、10^5 のオーダーであることが分かる。気温と南北風の積であるから、低緯度帯の大気の大循環であるハドレー循環に沿って、値の正負が分布している。

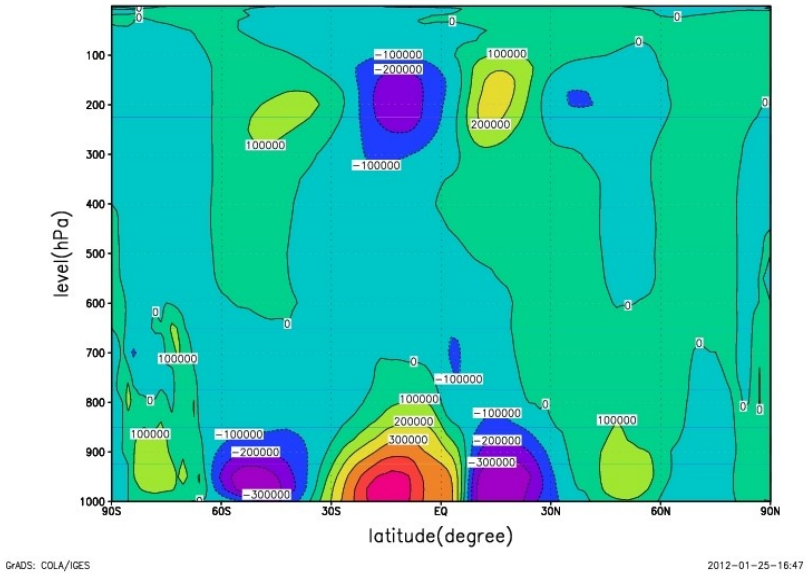

図 3.2 エンタルピー輸送の気候値の空間分布図

図 3.3 は同じくジオポテンシャル輸送についての図である。値は約 50000～150000 で、 10^4 ~ 10^5 のオーダーであることが分かる。高度の関数なので、上層のあたりにピークが見られる。

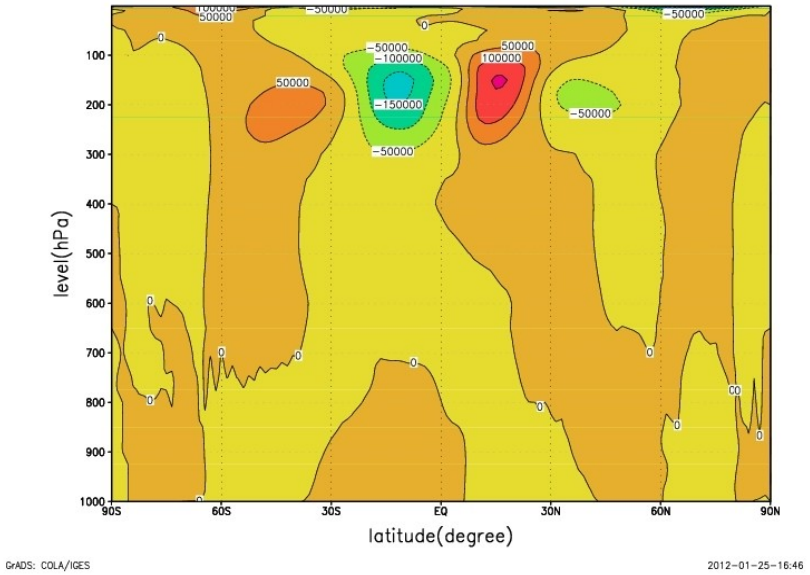

図 3.3 ジオポテンシャル輸送の気候値 の空間分布図

図 3.4 は同じく潜熱輸送についての図である。値は約 10000～40000 で、 10^4 の

オーダーであることが分かる。比湿の関数なので、下層のあたりにピークが見られる。

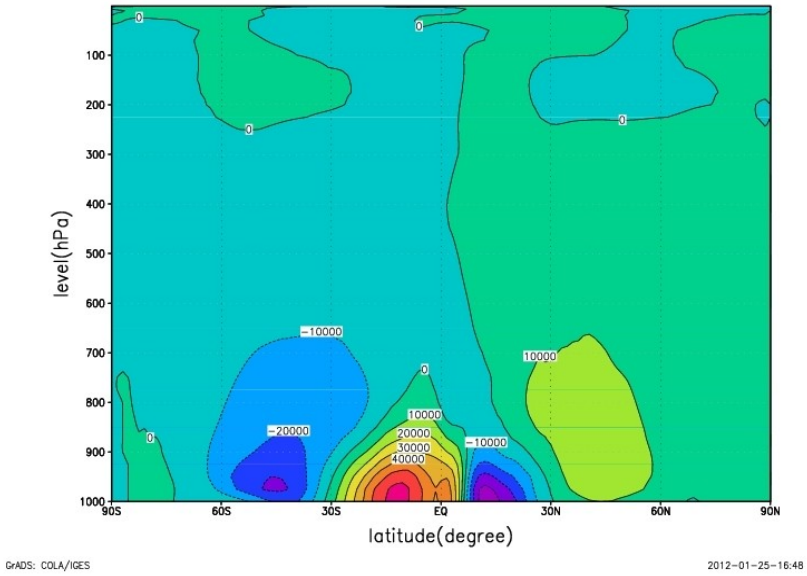

図 3.4 潜熱輸送の気候値の空間分布図

以上の結果より、オーダーの大小関係としては、

エンタルピー輸送 > ジオポテンシャル輸送 > 潜熱輸送 > 運動エネルギー輸送

であることが結論付けられる。

3.2 各エネルギー輸送成分の時系列線形トレンド

次に、各年のエネルギー輸送の月平均値から月ごとの 20 年間の気候値を引いた値(以下、anomaly と呼ぶ) を用いて、各エネルギー項の 20 年間のトレンドの有無を対流圏下層 (850hPa) と対流圏上層 (250hPa) の 2 つの高度に分けて調べていく。まずは緯度 − 時間分布図を示し、その結果から、各エネルギー輸送の変動の大きい緯度帯を探し、その緯度帯におけるエネルギー輸送の値の時系列図を示すという方法を取る。特に線形トレンドの顕著なものを探し出す。

3.2.1 第一項 (運動エネルギー輸送)

(a) 850hPa

図 3.5 は 850hPa の高度における運動エネルギー輸送の分布図であり、横軸は緯度 (左半分が南半球、右半分が北半球)、縦軸は年 (1989 年～2008 年) で、エネルギー輸送の値の単位は (×1000 J･m/s)である。この図における値のピークは 60° N 付近と 60° S 付近にあるので、この緯度帯の時系列図を図 3.6～3.7 に示す。

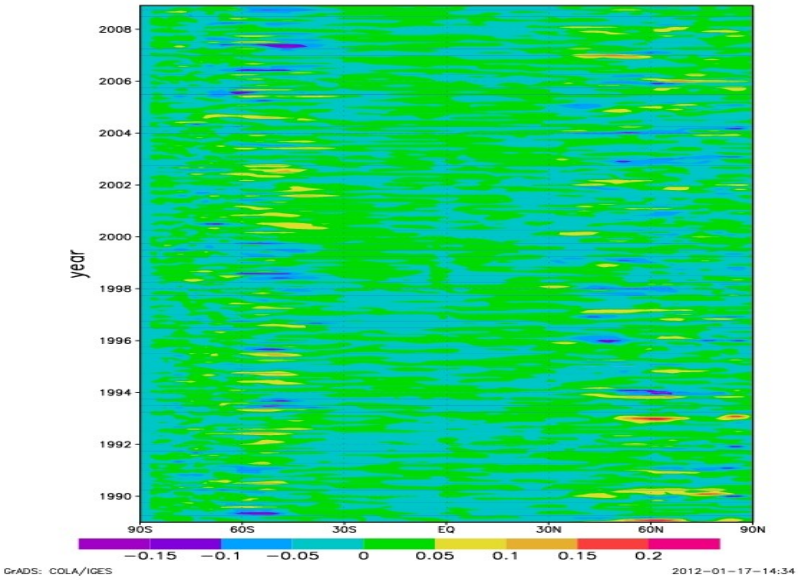

図 3.5 850hPa の運動エネルギー輸送の緯度 – 時間分布図

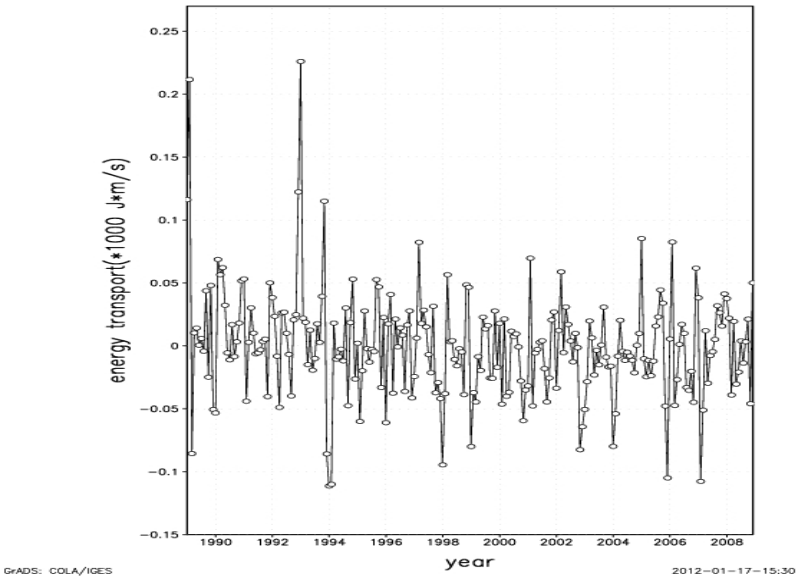

図 3.6 図 3.5 の 60° N の時系列図
横軸は年、縦軸はエネルギー輸送（×1000 J･m/s）

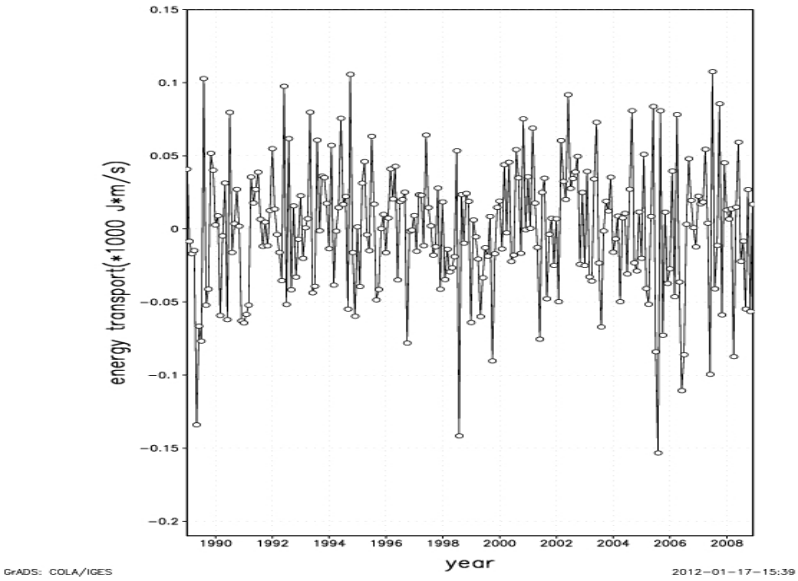

図 3.7 図 3.5 の 60° S の時系列図

上記の時系列図より、目立ったピークは見られるものの、線形トレンドはほぼ見られない。

(b) 250hPa

次に、250hPa の高度について同様に以下の図 3.8～図 3.10 に示す。値のピークは 45° N 付近と 45° S 付近にある。

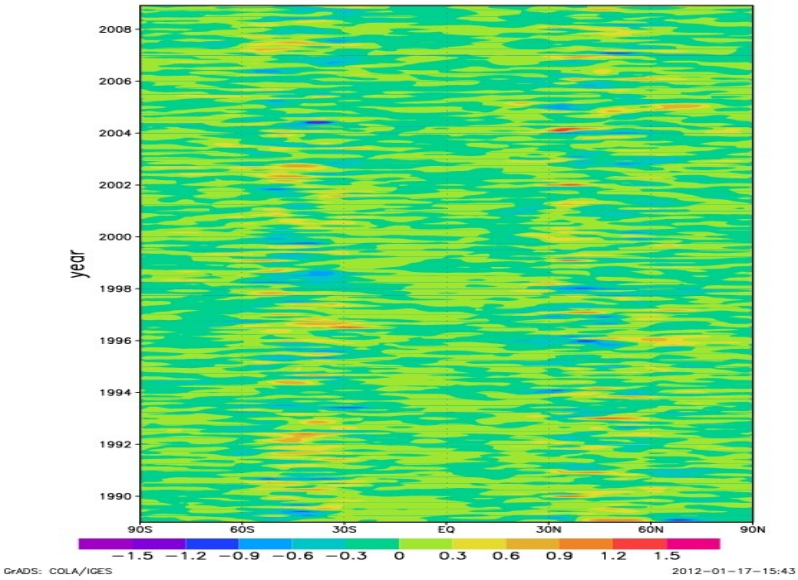

図 3.8 250hPa の運動エネルギー輸送の緯度 – 時間分布図

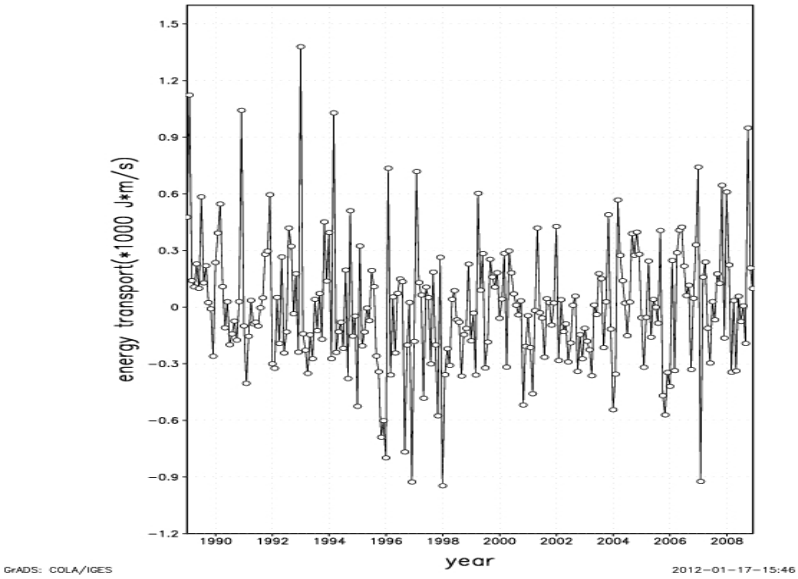

図 3.9 図 3.8 の 45° N の時系列図

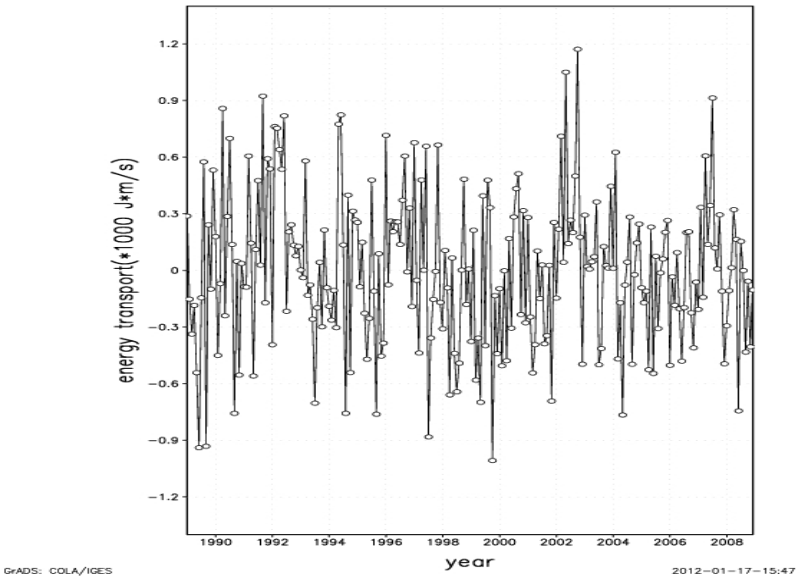

図 3.10 図 3.8 の 45° S の時系列図

こちらも、ピークは幾らかあるものの、線形トレンドは顕著ではない。

3.2.2 第二項 (エンタルピー輸送)

(a) 850hPa

次に、850hPa におけるエンタルピー輸送について、同様に図 3.11～図 3.13 に示す。顕著な値のピークは 10° N 付近と 10° S 付近にある。

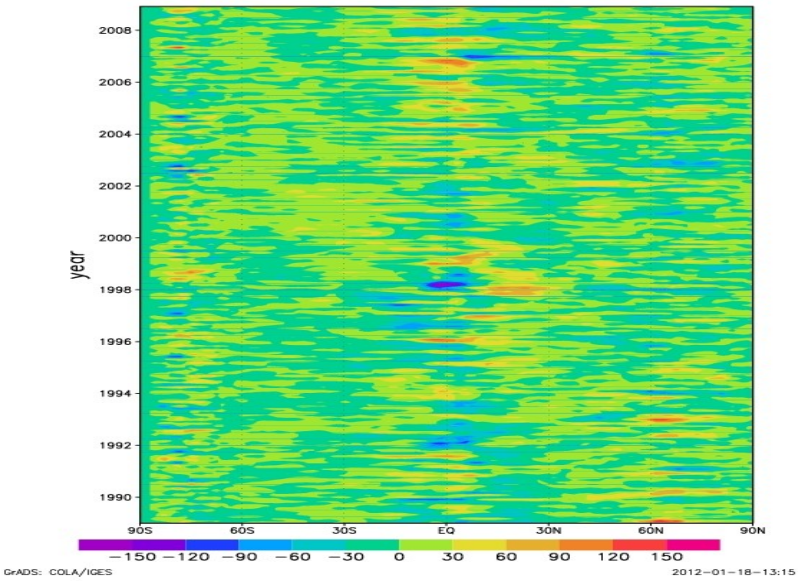

図 3.11 850hPa のエンタルピー輸送の緯度 – 時間分布図

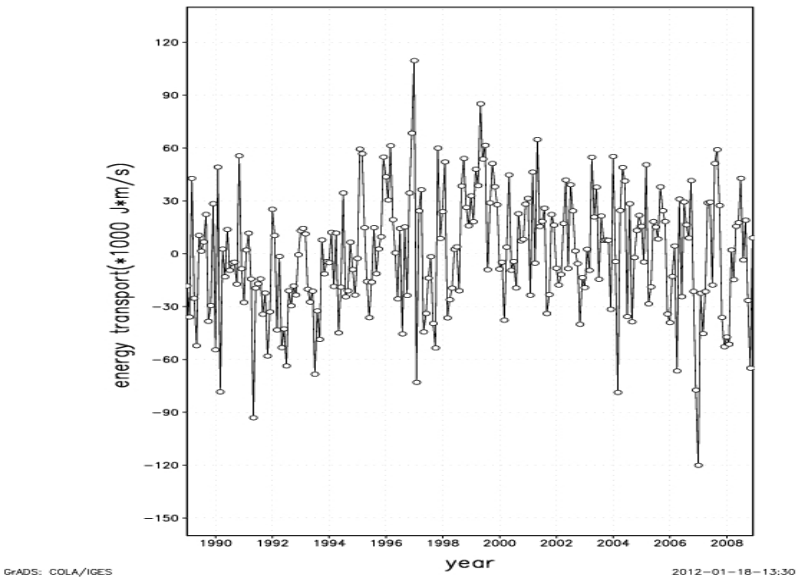

図 3.12 図 3.11 の 10° N の時系列図

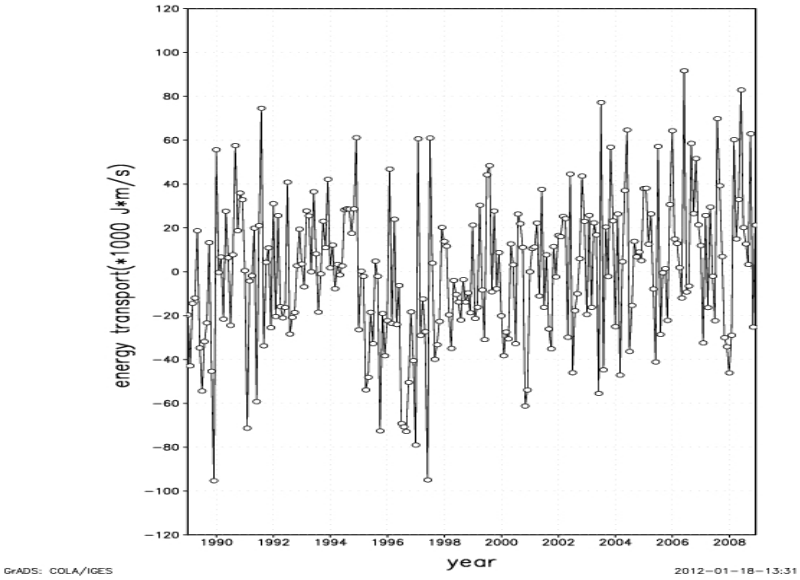

図 3.13 図 3.11 の 10° S の時系列図

10° N については、線形トレンドはほぼ見られない。10° S については弱冠の正の線形トレンドが見られる。

(b) 250hPa

次に、250hPa の高度についての結果を図 3.14 ～3.15 に示す。ピークは 10° N 付近と 10° S 付近にある。

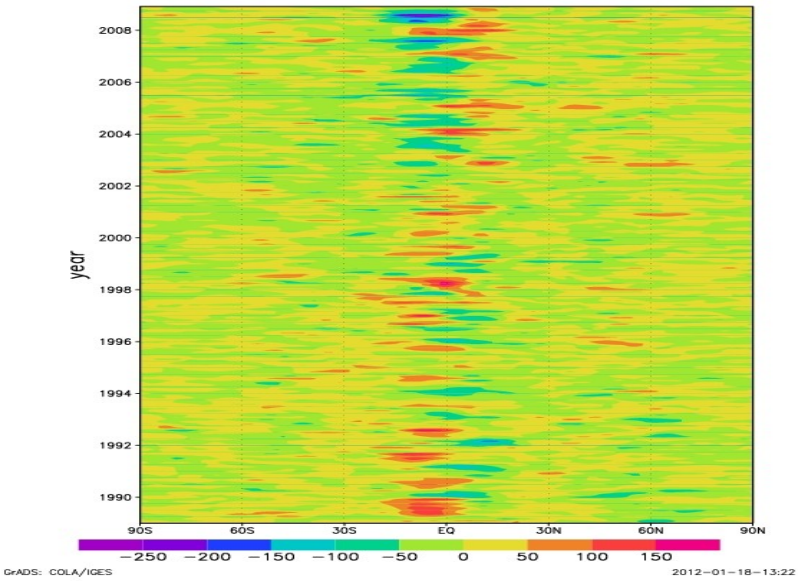

図 3.14 250hPa のエンタルピー輸送の緯度 - 時間分布図

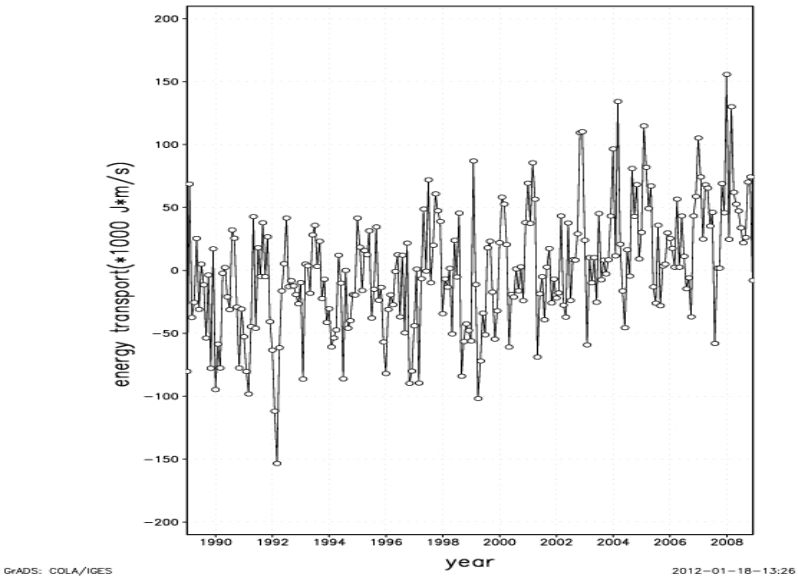

図 3.15 図 3.14 の 10° N の時系列図

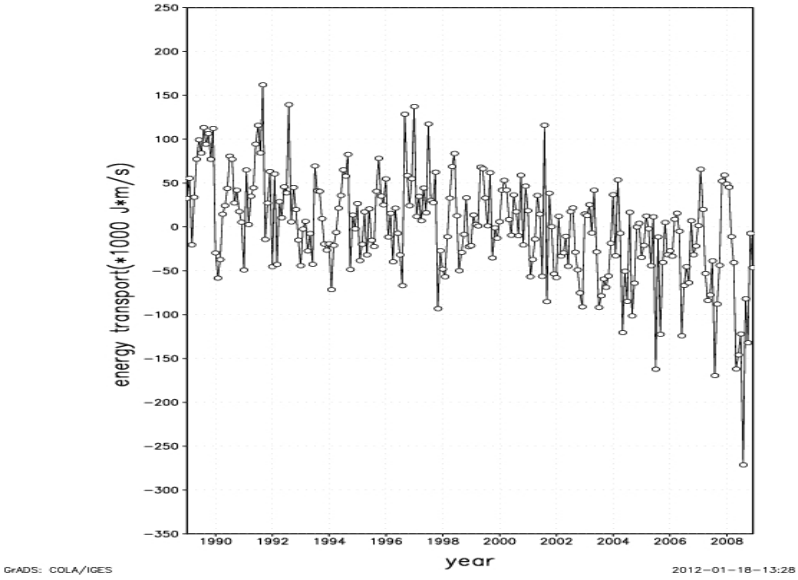

図 3.16 図 3.14 の 10° S の時系列図

10° N については正のトレンド、10° S については負のトレンドが見られ、850hPa よりも顕著なトレンドである。

3.2.3 第三項 (ジオポテンシャル輸送)

(a)850hPa

次に、850hPa におけるジオポテンシャル輸送についての結果を図 3.17～図 3.19 に示す。ピークは 10° N と 10° S 付近にある。

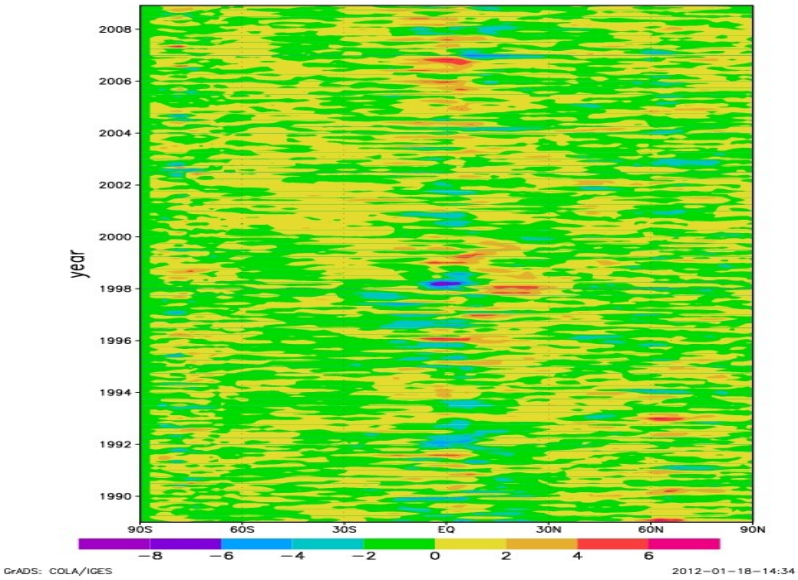

図 3.17 850hPa のジオポテンシャル輸送の緯度 − 時間分布図

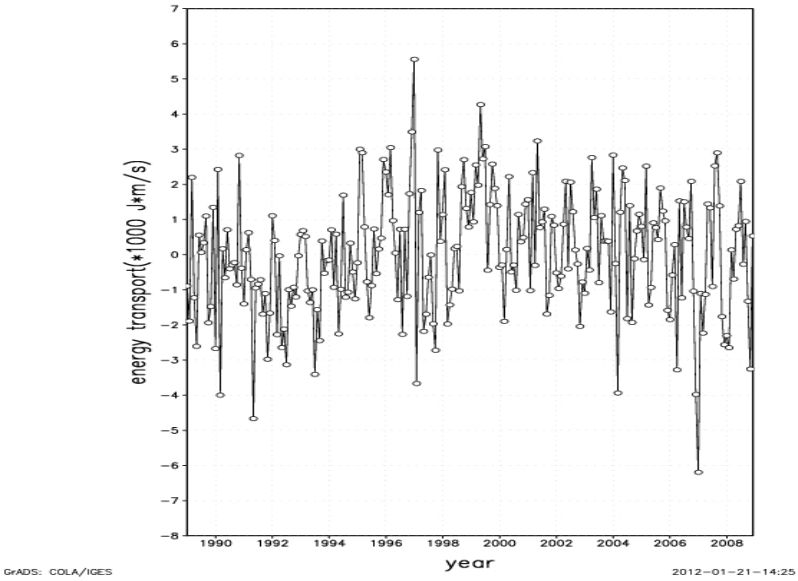

図 3.18 図 3.17 の 10° N の時系列図

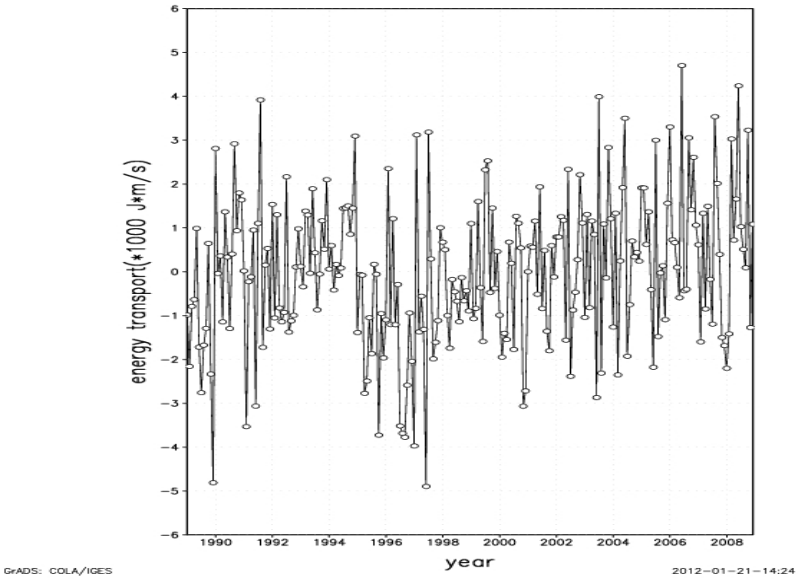

図 3.19 図 3.17 の 10° S の時系列図

エンタルピー輸送の 850hPa の結果に類似したトレンドの結果が得られた。

(b)250hPa

次に、250hPa におけるジオポテンシャル輸送についての結果を図 3.20～図 3.22 に示す。

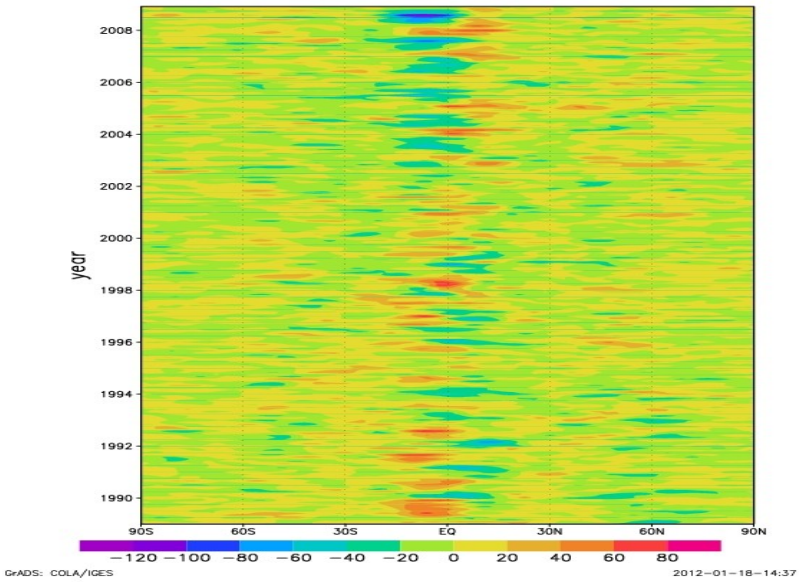

図 3.20 250hPa のジオポテンシャル輸送の緯度－時間分布図

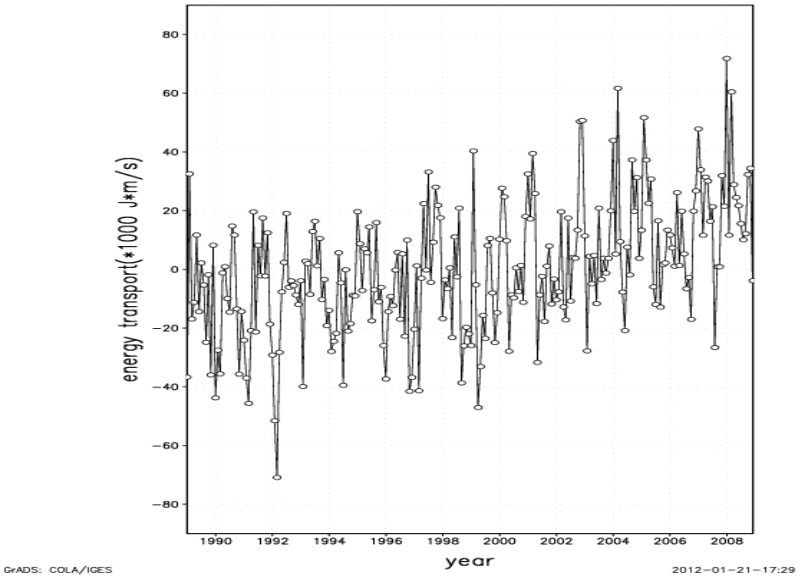

図 3.21 図 3.20 の 10° N の時系列図

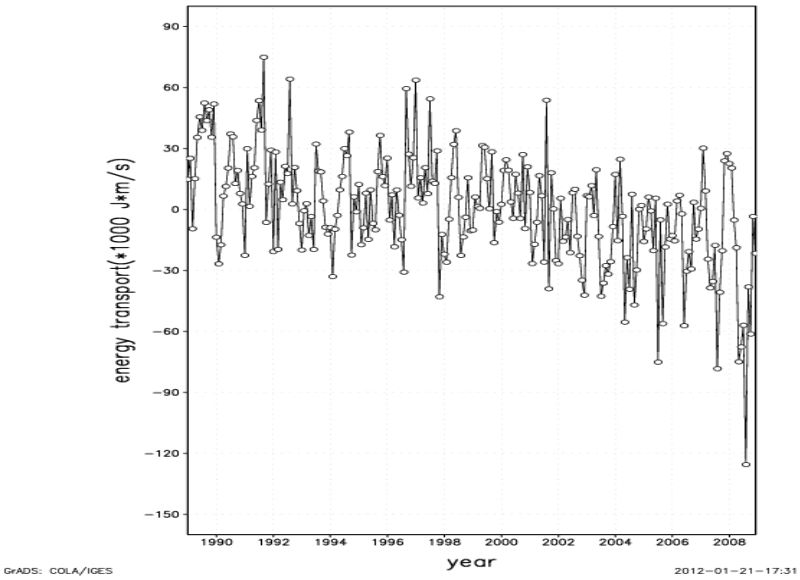

図 3.22 図 3.20 の 10° S の時系列図

こちらも、エンタルピー輸送の 250hPa の結果に類似した結果が得られた。

3.2.4 第四項 (潜熱輸送)

(a) 850hPa

次に、850hPa における潜熱輸送について同様に結果を図 3.23～図 3.25 に示す。ピークは、10° N 付近と 10° S 付近にある。

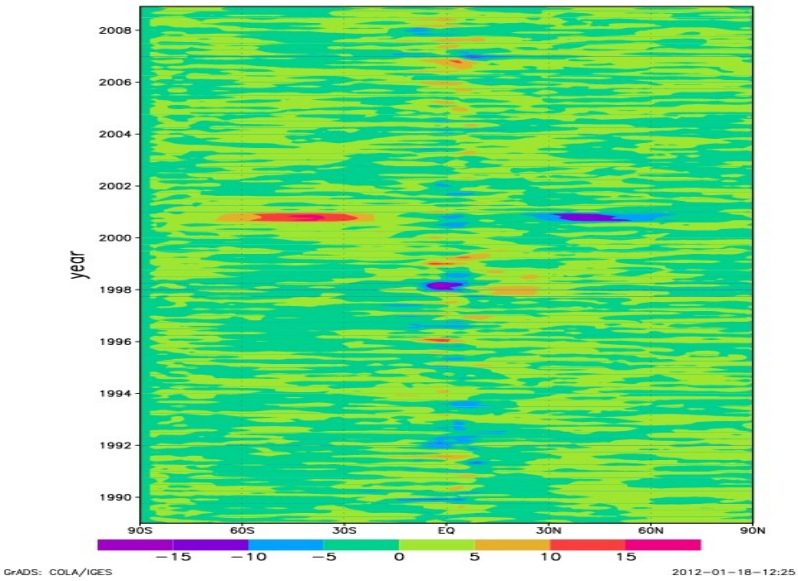

図 3.23 850hPa の潜熱輸送の緯度 - 時間分布図

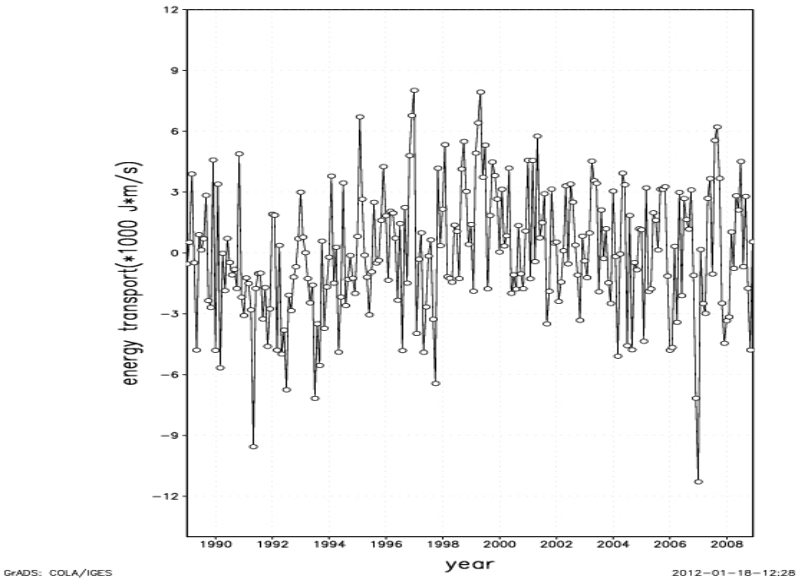

図 3.24 図 3.23 の 10° N の時系列図

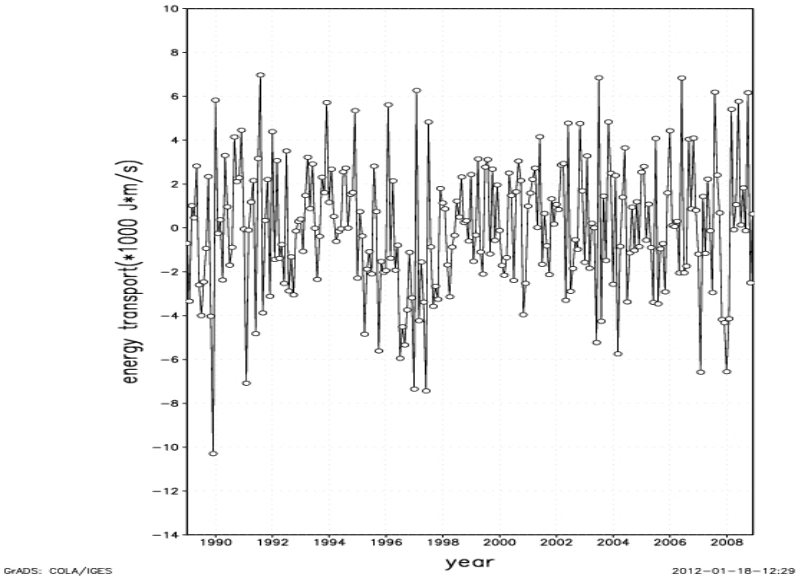

図 3.25 図 3.23 の 10° S の時系列図

エンタルピー輸送の 850hPa の結果に類似したトレンドの結果が得られた。また、2000 年 8 月～11 月の辺りに、北半球では負、南半球では正のピークが見られる。

(b) 250hPa

次に、250hPa における潜熱輸送についての結果を図 3.26～図 3.28 に示す。

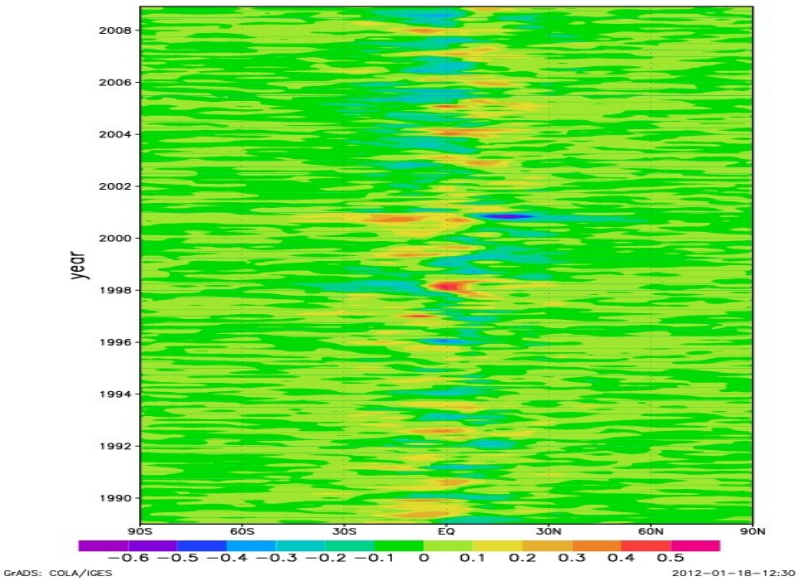

図 3.26 250hPa の潜熱輸送の緯度 − 時間分布図

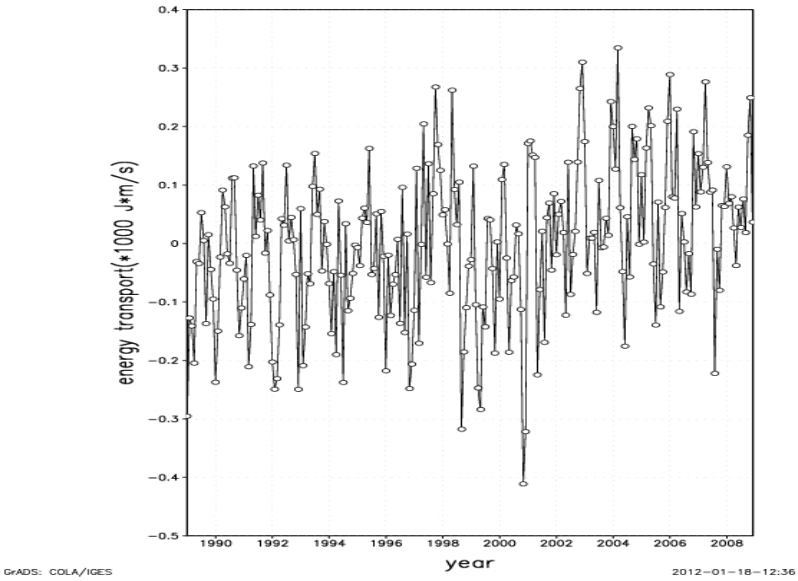

図 3.27 図 3.26 の 10° N の時系列図

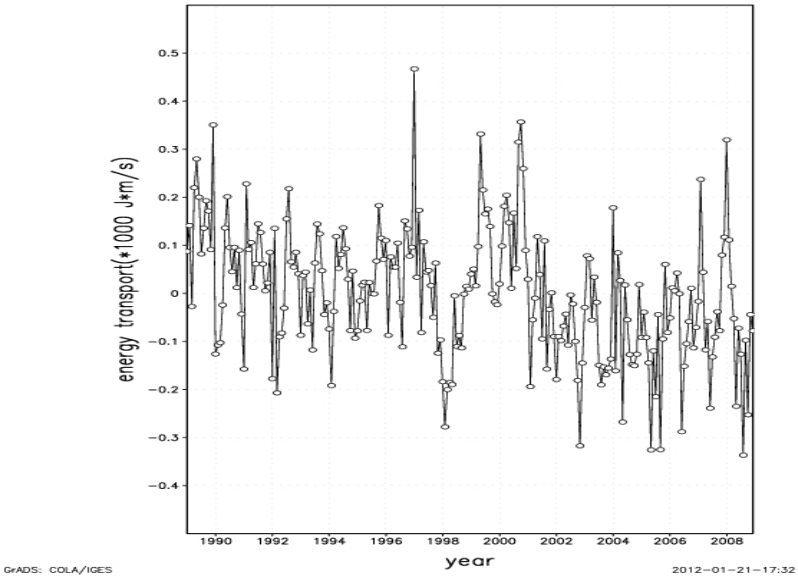

図 3.28 図 3.26 の 10° S の時系列図

こちらも、エンタルピー輸送の 250hPa の結果に類似した結果が得られた。

3.2.5 本節のまとめ

以上の結果をまとめると、運動エネルギーに関しては線形トレンドはほぼ見られず、他の 3 つのエネルギー輸送に関しては 850hPa においては、10° S で正のトレンドが見られることから、その緯度帯で赤道向きのエネルギー輸送が年々強まっていることが分かる。また、250hPa においては、10° N で正、10° S で負のトレンドが見られることから、北半球で正のトレンド、南半球で負のトレンドを呈している事から、近年極向きのエネルギー輸送が強まっていることが伺える。特に 250hPa の対流圏上層におけるトレンドについては、かなり明瞭なものである。

また、図 3.23 に見られる 2000 年 8 ～11 月のピークについて調べてみたところ、比湿の 4thdaily のデータに不連続な部分が見られ、それが原因ではないかと考えられるが、詳しいことは不明なままである。

3.3 線形トレンドの原因究明

各エネルギー輸送の長期変動の様子が分かったので、次にその線形トレンドの原因を追究していく。まず前提として、極向きのエネルギー輸送とはエネルギー自身と南北風の積であるから、具体的には、南北風と各エネルギー（エンタルピー、ジオポテンシャル、潜熱)の長期変動を個別に調べるという方法を取る。その際に、前節で線形トレンドの見られた高度、緯度帯に焦点を当てて、線形トレンドの原因は南北風と各エネルギーのどちらに主な原因があるのか、あるいは両方に原因があるのかを明らかにしていく。

3.3.1 10° S の対流圏下層 (850hPa)

まずは、10° S の 850hPa について調べる。図 3.29 ～図 3.32 はそれぞれエンタル

ピー、ジオポテンシャル、潜熱、南北風の anomaly の 20 年間の長期変動を示した図である。

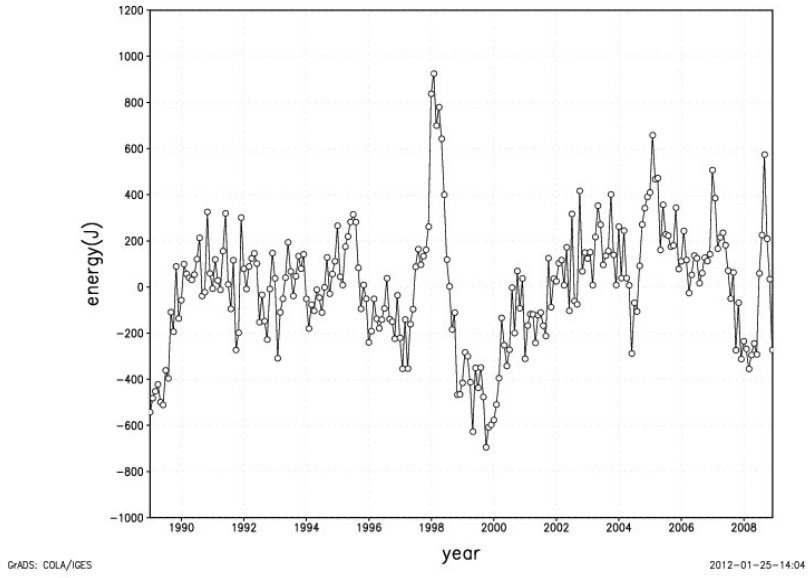

図 3.29 エンタルピーの 20 年間 (1989 年～2008 年)の長期変動
横軸は年、縦軸はエネルギー (J)

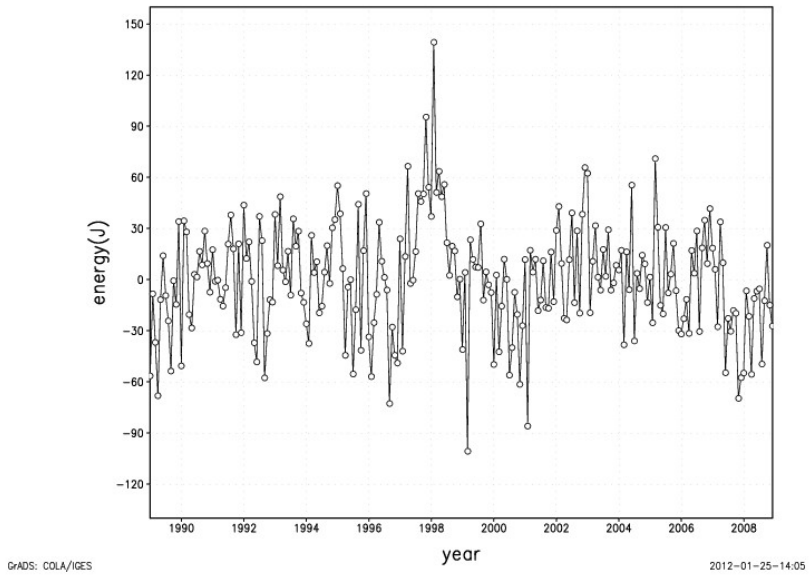

図 3.30 ジオポテンシャルの 20 年間の長期変動

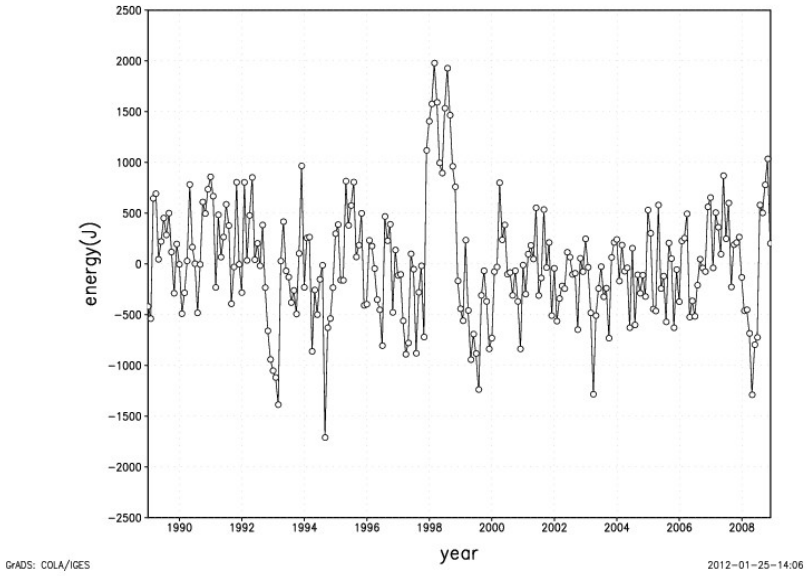

図 3.31 潜熱の 20 年間の長期変動

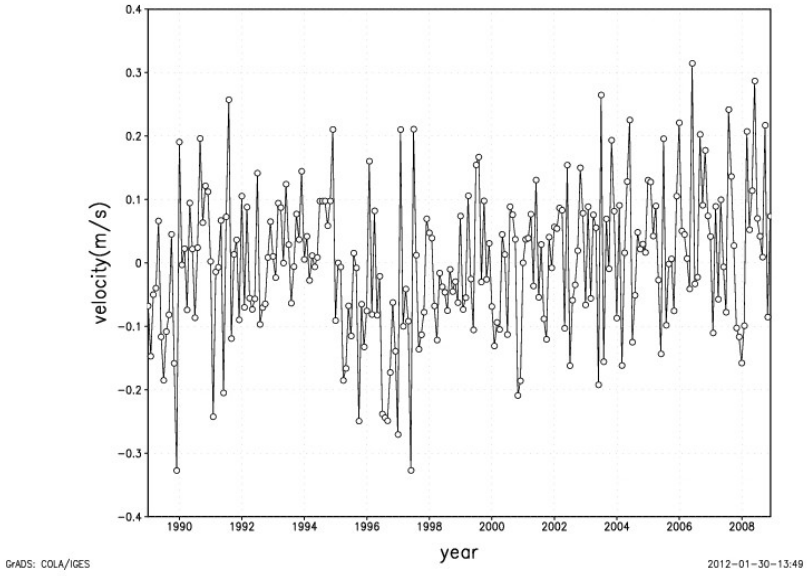

図 3.32 南北風の 20 年間の長期変動
縦軸は速さ (m/s)

図 3.13、3.19、3.25 の同じ高度、緯度帯における時系列の図と比較してみると、南北風の長期変動がそれと類似している。よって、10°Sの 850hPa においては、エネルギー輸送の線形トレンドの原因は南北風にあることが分かった。

3.3.2 10°N の対流圏上層 (250hPa)

次に、250hPa の 10°N についての結果を同様に図 3.33～図 3.36 に示す。

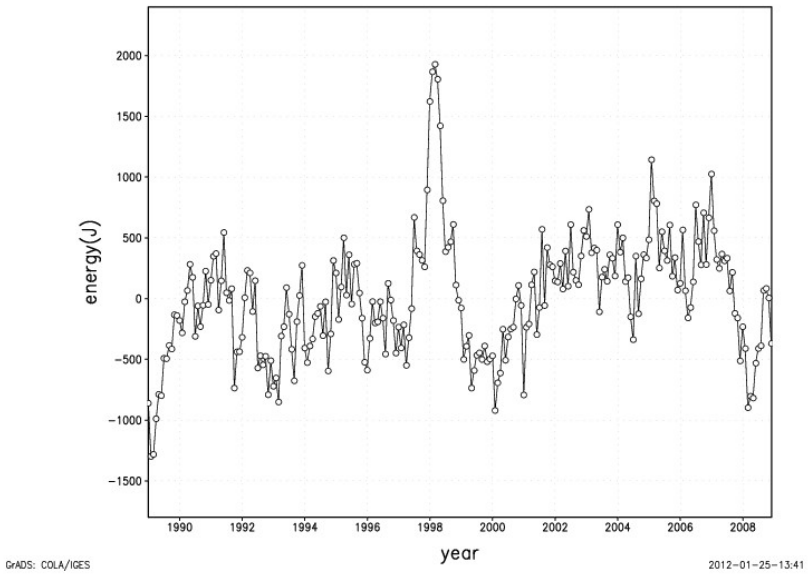

図 3.33 エンタルピーの 20 年間の長期変動

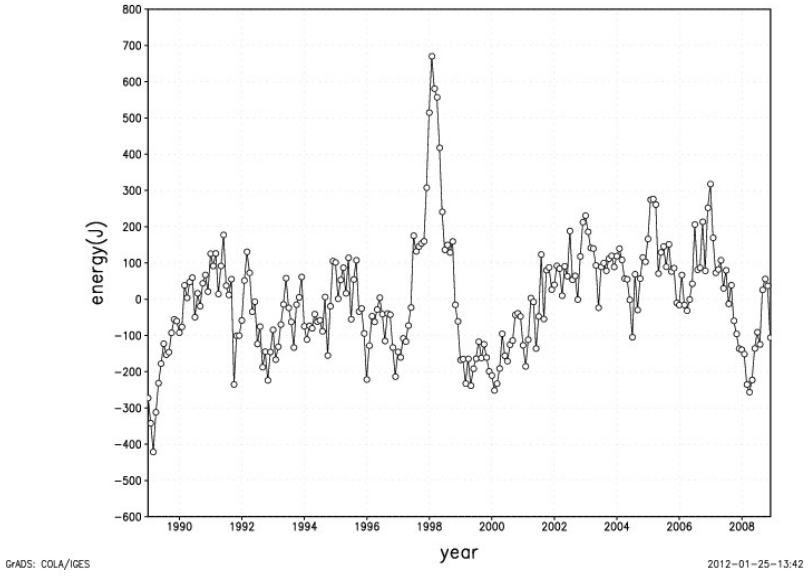

図 3.34 ジオポテンシャルの 20 年間の長期変動

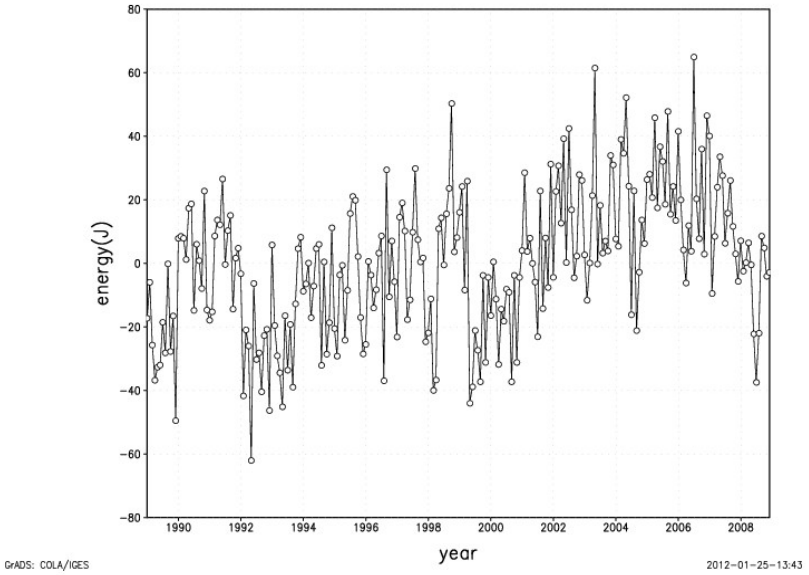

図 3.35 潜熱の 20 年間の長期変動

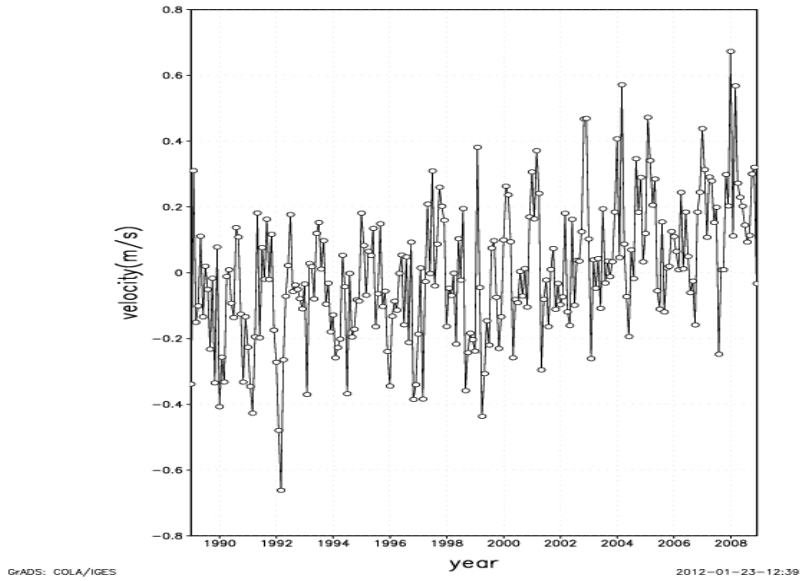

図 3.36 南北風の anomaly の 20 年間の長期変動

図 3.15、3.21、3.27 の同じ高度、緯度帯における時系列の図と比較してみると、南北風と潜熱の長期変動がそれと類似している。よって、10° N の 250hPa においては、エ

ネルギー輸送の線形トレンドの原因は南北風と潜熱にあることが分かった。

3.3.3 10°Sの対流圏上層(250hPa)

続いて、250hPa の 10°Sについての結果を同様に図 3.37～図 3.40 に示す。

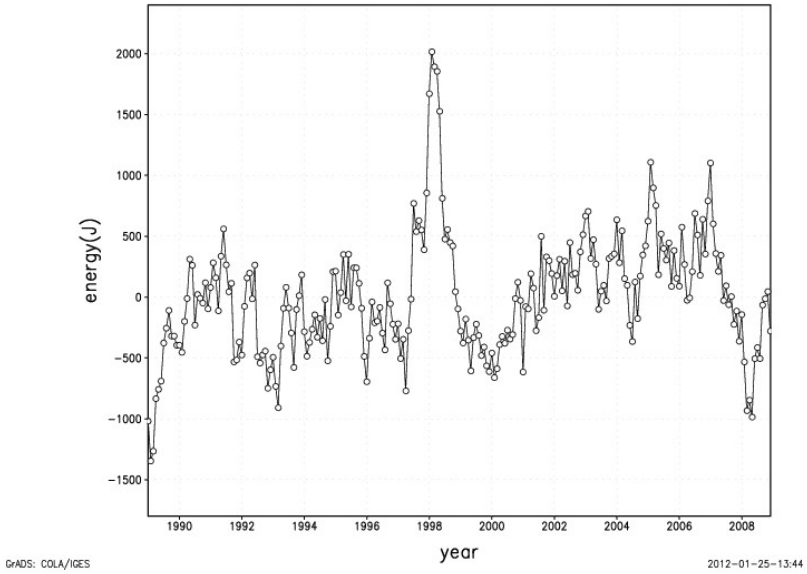

図 3.37 エンタルピーの 20 年間の長期変動

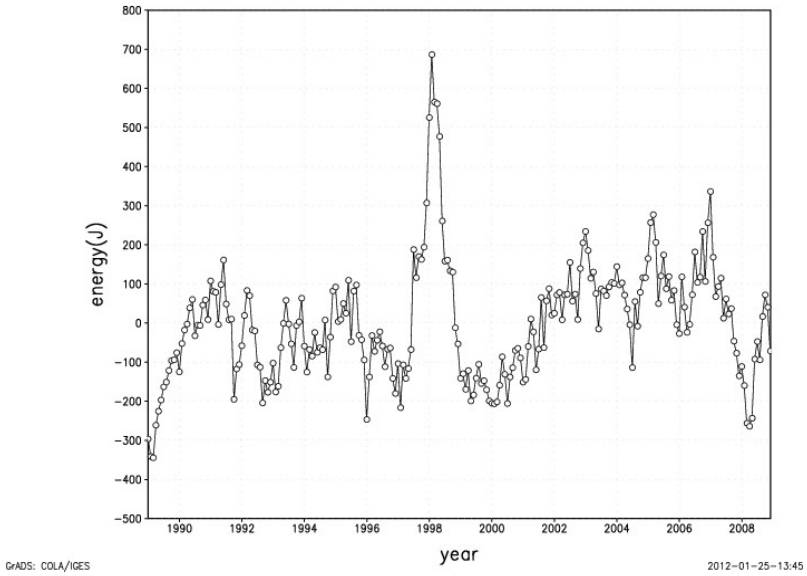

図 3.38 ジオポテンシャルの 20 年間の長期変動

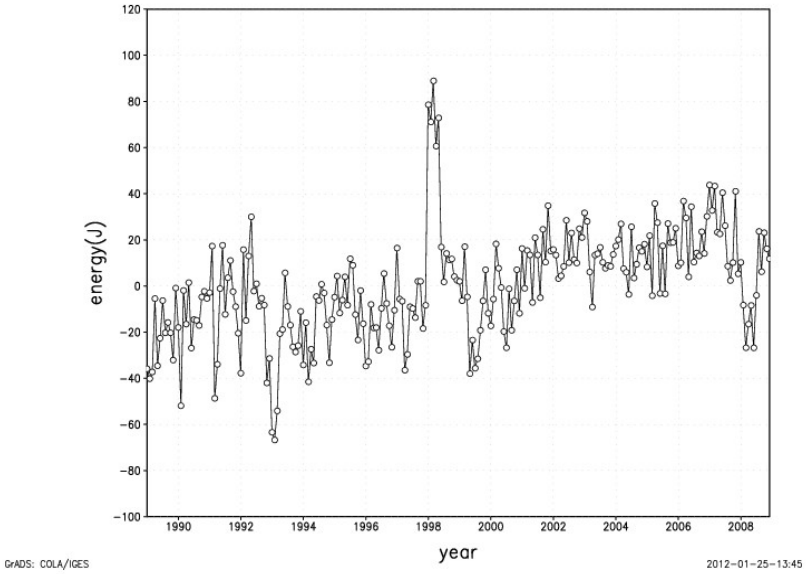

図 3.39 潜熱の 20 年間の長期変動

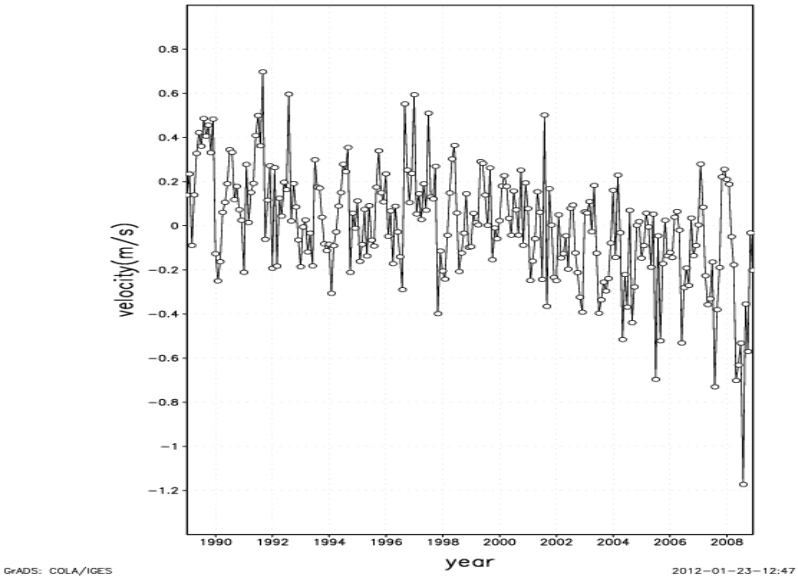

図 3.40 南北風の 20 年間の長期変動

図 3.16、3.22、3.28 の同じ高度、緯度帯における時系列の図と比較してみると、南北風の長期変動がそれと類似している。よって、10°Ｎの 250hPa においては、エネル

ギー輸送の線形トレンドの主な原因は南北風にあることが分かった。

3.3.4 本節のまとめ

以上の結果をまとめると、大気上層の 10° N については一部潜熱も要因の一つとして考えられるが、すべてに共通して南北風がエネルギー輸送の主な要因だという結論に至った。南北風について、大気下層においては南半球で正のトレンドであることから赤道向きの南北風が強まっていることが分かる。また、大気上層においては北半球では正のトレンド、南半球では負のトレンドであることから極向きの南北風が強まっているということが分かる。この原因として、低緯度帯の大気の大循環（ハドレー循環）が両半球ともに年々強まっているのではないかということが考えられる。

3.4 エネルギー輸送全体の長期変動

ここまで、第 2 章で示した (1) 式の各成分の長期的な変動を見てきたが、本節ではこれら 4 つの成分を足し合わせたトータルのエネルギー輸送の anomaly の 20 年間の長期変動について調べていくこととする。方法は、3.2 節と同様である。

3.4.1 対流圏下層 (850hPa)

図 3.41 は 850hPa におけるトータルのエネルギー輸送の分布図であり、横軸は緯度、縦軸は時間（年）で、エネルギー輸送の値の単位は（×1000 J・m/s)である。この図における値のピークは 10° N 付近と 10° S 付近にあるので、この緯度帯の時系列図を図 3.42～3.43 に示す。

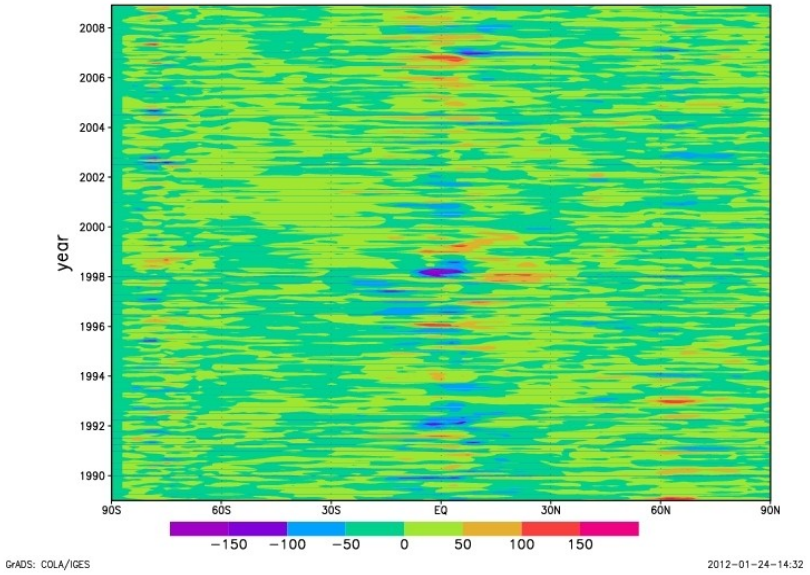

図 3.41 850hPa のトータルのエネルギー輸送の緯度－時間分布図

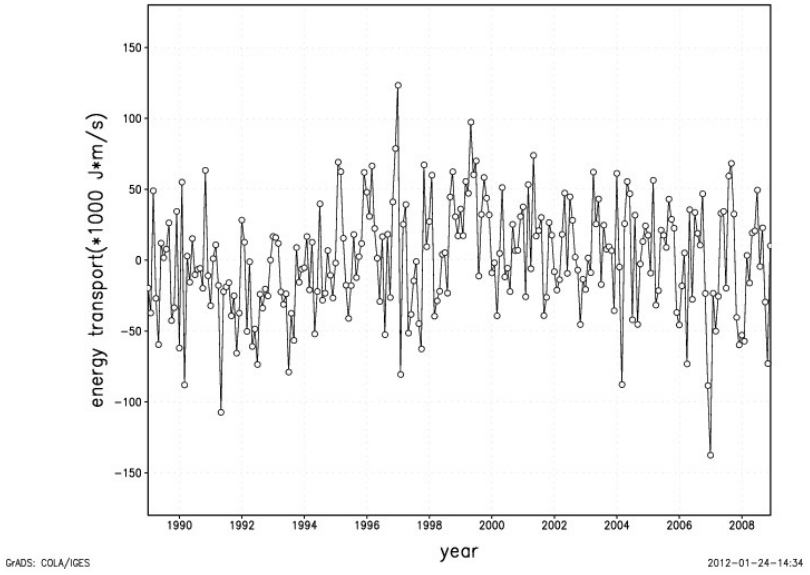

図 3.42 図 3.41 の 10° N の時系列図
横軸は年、縦軸はエネルギー輸送（×1000 J･m/s）

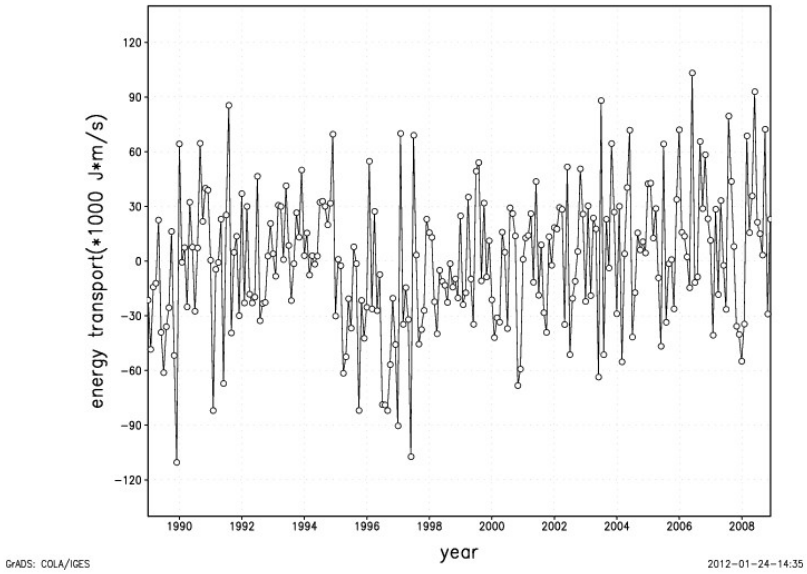

図 3.43 図 3.41 の 10° S の時系列図

3.2 節で示したエンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱フラックスの結果に類似した結果が得られた。10° N では、ほぼトレンドは見られず、10° S では、弱冠の正のトレンドが見られる。

3.4.2 対流圏上層 (250hPa)

図 3.44 は 250hPa におけるトータルのエネルギー輸送の分布図である。この図における値のピークは 10° N 付近と 10° S 付近にあるので、この緯度帯の時系列図を図 3.45～3.46 に示す。

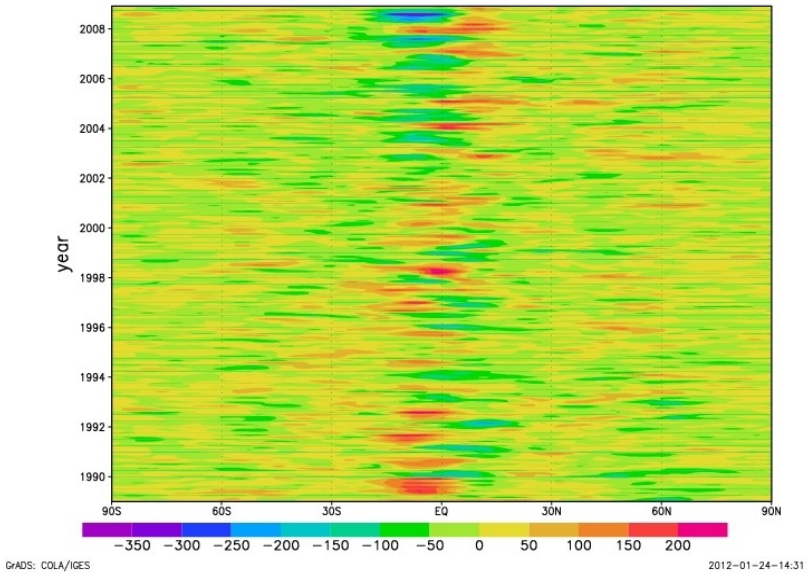

図 3.44 250hPa のトータルのエネルギー輸送の緯度 – 時間分布図

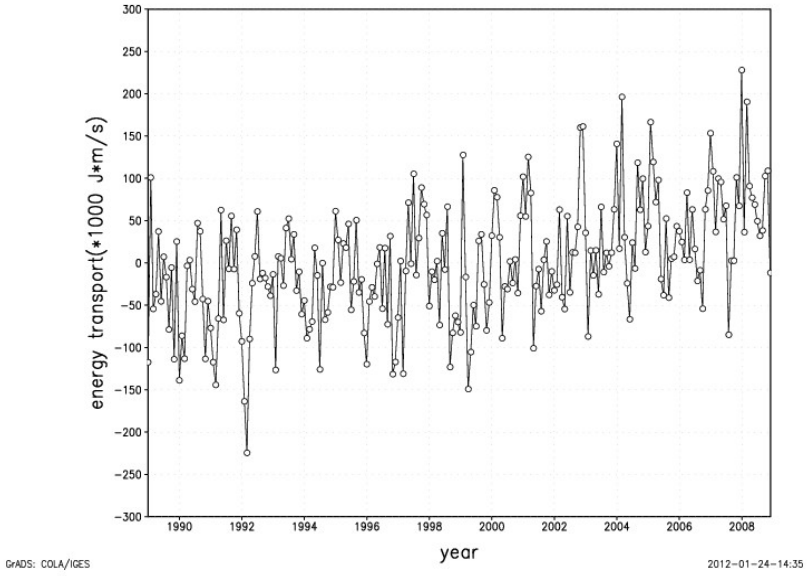

図 3.45 図 3.44 の 10° N の時系列図

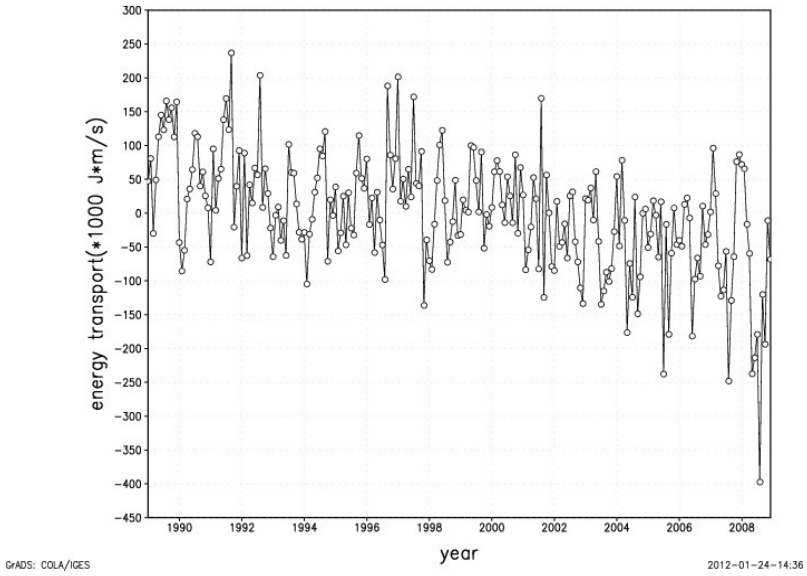

図 3.46 図 3.44 の 10° S の時系列図

大気下層と同様に、3.2 節で示したエンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱フラックスの結果に類似した結果が得られた。10° N において正、10° S において負の明瞭な線形トレンドが見られる。

3.4.3 先行研究との比較

ちなみに、Rune G. Graversen et al. (2007)の先行研究を意識し、トータルのエネルギー輸送の 850hPa と 500hPa の 60° N と 60° S の長期変動の図も示しておく。

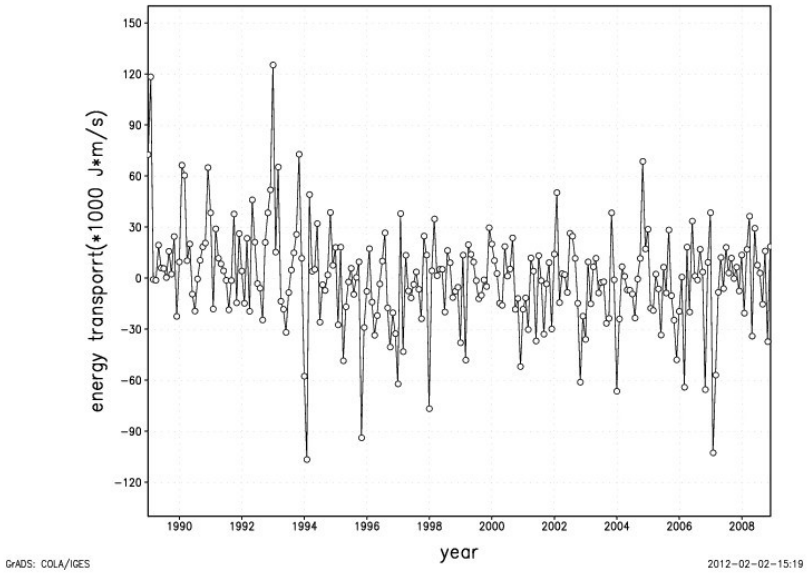

図 3.47 850hPa の 60° N の長期変動

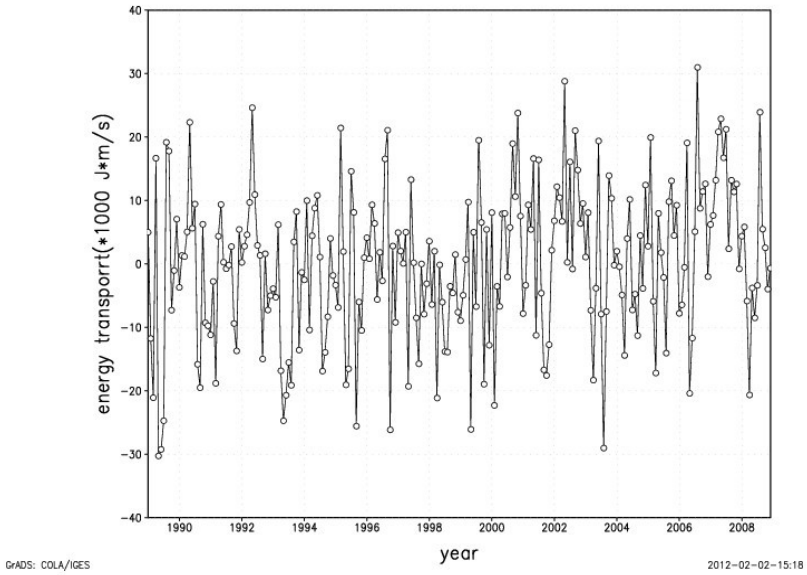

図 3.48 850hPa の 60° S の長期変動

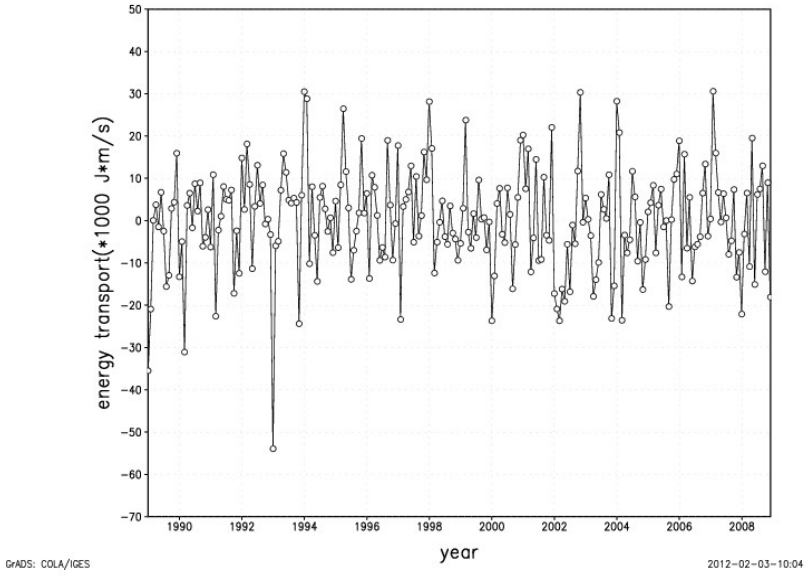

図 3.49 500hPa の 60° N の長期変動

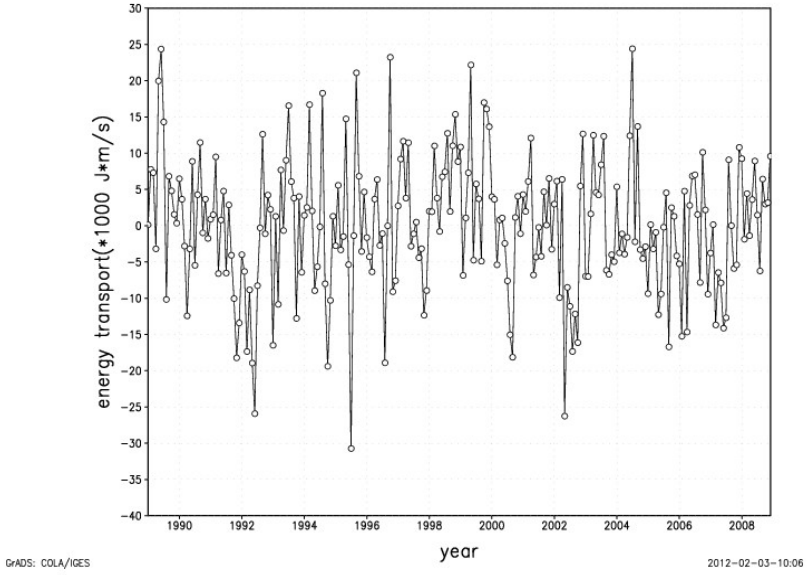

図 3.50 500hPa の 60° S の長期変動

250hPa ほどの大きなトレンドの様相は特には見られない。

3.4.4 本節のまとめ

以上の結果より、トータルのエネルギー輸送の長期的な変動は、先の線形トレンドの見られたエンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱フラックスの変動と類似したものであり、それら 3 つの成分全ての関与が強いことが伺える。3.1 節で示した各エネルギー輸送のオーダーの大小関係も考慮すると、各成分の輸送全体への寄与の程度は、エンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱フラックスの順に大きいことが分かる。

第 4 章　総括

4.1 研究結果のまとめと考察

温暖化増幅という現象の原因について探求していくために本研究を進めてきた。以上の研究結果を踏まえ、本研究の主題、「極向きのエネルギー輸送」の様相についてまとめていく。

まず 3.1 節では、(1)式中の 4 つのエネルギー輸送の成分のオーダーの比較実験を行った。大小関係としてはエンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱輸送、運動エネルギー輸送の順であるという結果が得られた。

次に 3.2 節では、各エネルギー輸送成分の対流圏下層と対流圏上層における時系列線形トレンドの有無を 20 年間 (1989 年 ~ 2008 年)の長期変動から探っていった。その実験の中で、特にエンタルピー輸送、ジオポテンシャル輸送、潜熱輸送の 3 つの成分の線形トレンドが顕著であり、どの成分も類似したような線形トレンドを呈していた。10°Ｓの 850hPa では正のトレンドを示し、このことから南半球低緯度帯における対流圏下層の赤道向きエネルギー輸送が年々強まっているということが分かった。また、10°Ｎの 250hPa では正のトレンド、10°Ｓの 250hPa では負のトレンドを示し、このことから両半球低緯度帯における対流圏上層の極向きエネルギー輸送が年々強まっているという結果が得られた。特に 250hPa の対流圏上層におけるトレンドについては、かなり明瞭なものである。

次に 3.3 節では、各線形トレンドの原因究明の実験を行った。その中で、調査対象のどの高度、緯度帯においても南北風が、一部 10°Ｎの 250hPa で潜熱にエネルギー輸送成分と同じような線形トレンドが認められた。このことから、南北風と一部潜熱にエネルギー輸送のトレンドの原因があるということが伺える。この原因として、南北風については低緯度帯における大気の大循環 (ハドレー循環)が年々強まっているのではないかということが考えられる。

次に 3.4 節では、4 つの成分のトータルのエネルギー輸送の長期変動における線形トレンドの有無を調べる実験を行った。3.1 節と 3.2 節の結果を考慮すると、どちらの高度もトレンドの見られた 3 つのエネルギー輸送成分と同じ緯度帯で類似した線形トレンドを示していた。それら 3 つの成分の関与が強いことが伺える結果である。

以上の結果を鑑みると、両半球の対流圏上層で極向きのエネルギー輸送が顕著に強まっており、南半球の対流圏下層で赤道向きのエネルギー輸送が年々強まっていることが分かる。

4.2 今後の展望

今回の研究はデータ解析という手法に慣れる、という意味ではかなり有意義なものとなったし、温暖化増幅の原因と言われている「極向きのエネルギー輸送」の様相についてかなり知ることができるものとなった。しかし、本研究では定性的な議論しか行っておらず、少し信憑性が薄いようにも思われる。統計的な手法を用いて定量的に実験結果を議論できるようになることが重要である。特に、今回のように時系列図のトレンドを議論する際には、相関係数を用いる必要がある。また、以前から気象学については独学で勉強を重ねてはいたが、今回の卒業論文作成に当たって、自分にはまだまだ知識が足りていないということが分かった。担当教授の山崎さんのご助言が無ければ、今回の卒業論文は完成しなかっただろう。自分の勉強不足を痛感したというのは本当に良い経験になった。春から地球環境科学院に進学するので、また基礎から気象学の知識と統計学の知識を習熟し、更に質の高い研究を行っていくつもりである。

そして、今回取り上げた温暖化増幅という話題については、現在様々な議論がなされており、その決定的な原因は明らかにされていない。本研究で取り上げた「極向きのエネルギー輸送」も現在は候補となっている原因に過ぎず、まだ他に調べるべき事象はたくさんある。今後の研究の方針としては今回の極向きエネルギー輸送に関する実験結果の温暖化増幅との関連性について調べる他、ERA-40 (1979 年 ~ 2001 年) を用いた先行研究 Rune G. Graversen et al. (2007)と同等の実験を ERA - Interim (1989 年 ~ 2008 年)で行うとどうなるのかを調べる再現実験も実施していきたい。また、今回のエネルギー輸送のみに固執せず、様々な角度、アプローチでこの温暖化増幅の原因についてさらなる研究を重ねていきたい。

謝辞

本研究を進めて行くにあたり、たくさんの方からのお力添えを頂いたこと、心から御礼申し上げます。

同研究室のお二人の先輩方には本当に色々とお世話になりました。岡田靖子さんには、研究室のサーバー、気象データ描画ソフトの使い方をご丁寧に教えて頂きました。ありがとうございます。渡邊武志さんには、私の研究を進めやすいようにと、専用のパソコンを準備して頂きましたし、毎週 1 回のゼミの取りまとめもしてくださいました。ありがとうございます。

担当教授の山崎孝治さんには、研究室に所属した当初から熱心なご指導を頂きました。お忙しい時にも相談相手になって頂き、私に気象学の研究の面白さを教えてくださいました。本当にお世話になりました。心より感謝申し上げます。

最後に、4 年間共に勉学に励んできた同期の皆さんに御礼申し上げます。

参考文献

[1] The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification
James A. Screen & Ian Simmonds (2010)

[2] Vertical structure of recent Arctic warming
Rune G. Graversen et al. (2007)

[3] 気象が分かる数と式 オーム社出版局 二宮洸三 [著]