

平成23年度 卒業論文

鉛直流のスペクトルと
雲のスペクトルの解析的研究

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

200810778

足立宣明

2012年2月

目次

要旨	iii
Abstract	iv
図目次	v
1 はじめに	1
2 目的	3
3 使用データ	4
3.1 NICAM データ	4
4 解析手法	5
4.1 1つの要素についてのスペクトル解析	5
4.2 2つの要素間でのスペクトル解析	5
5 結果と考察	8
5.1 各要素の水平分布	8
5.1.1 OLR	8
5.1.2 鉛直速度 W	8
5.1.3 比湿 Q	9
5.1.4 雲水 QC	9
5.1.5 雲氷 QI	9
5.1.6 スペクトルの予想	10
5.2 スペクトル解析	10
5.2.1 OLR	10
5.2.2 鉛直速度 W	10
5.2.3 比湿 Q	11
5.2.4 雲水 QC	11
5.2.5 雲氷 QI	11
5.2.6 各緯度での要素の比較	12
5.3 鉛直速度と雲要素との関係	12
5.3.1 OLR	12
5.3.2 比湿 Q	13
5.3.3 雲水 QC	13
5.3.4 雲氷 QI	14
5.3.5 中緯度の波数 8 付近の解析	14

6 結論	16
7 謝辭	17
参考文献	18

鉛直流のスペクトルと 雲のスペクトルの解析的研究

足立 宣明

要旨

地球温暖化に伴う雲のフィードバック効果はモデルの再現が難しく、将来予測における不確実性がもっとも大きな要素の一つである。対流活動に伴う雲は放射収支と密接な関係があるとされている。対流活動、すなわち鉛直速度と雲の空間関係について知る必要が出てくる。鉛直速度の空間スペクトルは中緯度でホワイトノイズスペクトルとなることがわかっている。雲のスペクトルは衛星からでは非常に小さなスケールでしか得られない。この問題に対し、地球環境フロンティア研究センターと東京大学気候システムセンターは共同で全球非静力学モデルNICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) を開発した。NICAMは雲を積雲パラメタリゼーションを用いず直接計算している。

本研究では、NICAMを用いて鉛直速度、雲要素の空間スペクトルの特徴を把握し、これらの要素の空間相関を理解することを目的とした。

T2K 筑波システムにより時間積分された glevel-10 (水平解像度 7.0km)、初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後の 2008 年 9 月 13 日 00Z のデータに対して空間スペクトルを計算した。また、各要素の空間スペクトルについてクロススペクトル解析をおこない、鉛直速度と雲要素との空間相関について調査をおこなった。鉛直速度の空間スペクトルは緯度や高度によらずホワイトノイズスペクトルとなることがわかった。雲の空間スペクトルでは赤道付近で鉛直速度と同様にホワイトノイズスペクトルとなった。緯度が高くなるにつれ雲の空間スペクトルはレッドノイズスペクトルとなるが、その傾きは非常に緩やかであった。

また、鉛直速度と雲のスペクトルとのクロススペクトルを計算した結果、鉛直速度と雲要素には非常に高い相関が見られた。低波数から高波数にわたり相関の高さは維持され、その際の位相差はなく同位相であった。つまり、どの空間スケールにおいても鉛直速度と雲は密接に関連しており、上昇流の強いところでより多くの雲できることになる。

キーワード: 鉛直速度, 雲, NICAM, スペクトル解析, クロススペクトル

Analytical Study of the Spectrum of Vertical Wind and the Spectrum of Clouds

Nobuaki ADACHI

Abstract

Accurate modeling is difficult for the feedback effect of clouds associated with global warming, and the uncertainty in climate prediction is one of the biggest elements in the future. It is supposed that there is a close relation to radiation budget of the clouds associated with a convective activity. It is necessary to understand the convective activity, i.e., vertical wind, and the spatial relation of clouds. Frontier Research Center for Global Change and Center for Climate System Research, University of Tokyo developed Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) for this problem. NICAM has calculated clouds directly without using cumulus parameterization.

In this study, we analyzed the features of the spatial spectrum of vertical wind and the cloud elements using NICAM, and attempted to understand the spatial relation of these elements.

The spatial spectrum is calculated for the data of 2008/09/13/00Z of 108 hours after the initial value of 2008/09/08/12Z. The time integration of NICAM with glevel-10 (horizontal resolution 7.0 km) is carried out by the T2K Tsukuba system. Moreover, cross-spectral analysis is conducted about the spatial spectrum of each element, and the relation between vertical wind and a cloud element is investigated. It turns out that the spatial spectrum of vertical wind becomes a white noise spectrum independently of latitudes and altitudes. Near the equator, the spatial spectrum of clouds also turns to a white noise spectrum. The spatial spectrum of clouds turns to a red noise spectrum as the latitude becomes high, but the spectral slope is very loose.

As a result of calculating the cross-spectrum of vertical wind and clouds, it is found that vertical wind and a cloud element has very high correlation. Correlation is high from a low wavenumber to a high wavenumber. There was no phase difference in that case. That is, in every spatial scale, vertical wind and clouds are related closely, and more clouds are formed in the strong place of the upward flow.

Key Words: vertical wind, cloud, NICAM, spectral analysis, cross-spectrum

目次

1	NICAM、glevel-11、N40°-N50° の 200hPa 面での運動エネルギースペクトル	20
2	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . OLR の X-Y 平面図	21
3	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . OLR の緯度に沿った経度分布	22
4	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 鉛直速度の X-Y 平面図	23
5	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 700hPa 面における鉛直速度の緯度に沿った経度分布	24
6	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 500hPa 面における鉛直速度の緯度に沿った経度分布	25
7	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 500hPa 面における鉛直速度の緯度に沿った経度分布	26
8	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 比湿の X-Y 平面図	27
9	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 700hPa 面における比湿の緯度に沿った経度分布	28
10	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 500hPa 面における比湿の緯度に沿った経度分布	29
11	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 500hPa 面における比湿の緯度に沿った経度分布	30
12	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 雲水の X-Y 平面図	31
13	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 850hPa 面における雲水の緯度に沿った経度分布	32
14	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 700hPa 面における雲水の緯度に沿った経度分布	33
15	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 600hPa 面における雲水の緯度に沿った経度分布	34
16	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 雲氷の X-Y 平面図	35
17	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 500hPa 面における雲氷の緯度に沿った経度分布	36
18	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 300hPa 面における雲氷の緯度に沿った経度分布	37
19	NICAM、glevel-10、2008 年 9 月 13 日 00Z . 200hPa 面における雲氷の緯度に沿った経度分布	38
20	OLR のスペクトルの緯度変化	39
21	鉛直速度 W のスペクトルの緯度変化	40
22	比湿 Q のスペクトルの緯度変化	41
23	雲水 QC のスペクトルの緯度変化	42

24	雲氷 QI のスペクトルの緯度変化	43
25	赤道–北緯 10° , 500hPa 面における各要素のエネルギースペクトル .	44
26	北緯 20°–北緯 30° , 500hPa 面における各要素のエネルギースペクトル	45
27	北緯 40°–北緯 50° , 500hPa 面における各要素のエネルギースペクトル	46
28	赤道–北緯 10° における鉛直速度 W に対する OLR のコヒーレンス 及びフェイズ	47
29	北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W に対する OLR のコヒーレン ス及びフェイズ	48
30	北緯 40°–北緯 50° における鉛直速度 W に対する OLR のコヒーレン ス及びフェイズ	49
31	北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W に対する OLR のコヒーレン ス及びフェイズ	50
32	赤道–北緯 10° における鉛直速度 W に対する比湿 Q のコヒーレンス 及びフェイズ	51
33	北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W に対する比湿 Q のコヒーレ ンス及びフェイズ	52
34	北緯 40°–北緯 50° における鉛直速度 W に対する比湿 Q のコヒーレ ンス及びフェイズ	53
35	北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W に対する比湿 Q のコヒーレ ンス及びフェイズ	54
36	赤道–北緯 10° における鉛直速度 W に対する雲水 QC のコヒーレン ス及びフェイズ	55
37	北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W に対する雲水 QC のコヒー レンス及びフェイズ	56
38	北緯 40°–北緯 50° における鉛直速度 W に対する雲水 QC のコヒー レンス及びフェイズ	57
39	北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W に対する雲水 QC のコヒー レンス及びフェイズ	58
40	赤道–北緯 10° における鉛直速度 W に対する雲氷 QI のコヒーレン ス及びフェイズ	59
41	北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W に対する雲氷 QI のコヒーレ ンス及びフェイズ	60
42	北緯 40°–北緯 50° における鉛直速度 W に対する雲氷 QI のコヒーレ ンス及びフェイズ	61
43	北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W に対する雲氷 QI のコヒーレ ンス及びフェイズ	62
44	北緯 40°–北緯 50° , 波数 8 における OLR に対する各要素の位相差 .	63

1 はじめに

雲は日射を反射し、地球を冷やす。その一方で下層からの高温の熱放射を吸収し、雲層の（より低温な）熱放射を射出することで、地球から出ていく放射を減らし、地球を暖めている。気候変動に伴い、雲の分布や光学特性が変化し、この雲の効果が変化して、地表面温度の変化に影響を及ぼす可能性がある。これを雲のフィードバック効果という。地球温暖化研究において、この雲のフィードバックプロセスの解明は将来のより詳細な気温を予測する上で特に重要である。2001年に発表された IPCC 第3次報告書では、地球の温暖化による2100年の地表面気温の上昇予測値は各国の研究機関ごとに異なり、1.4 から 5.8 までのばらつきがある。その要因のひとつとして、この雲のフィードバックプロセスがはっきりと解明されていないためと考えられている。雲とその放射影響は、気候モデルでの再現が難しく、将来予測における不確実性がもっとも大きな要素の一つである (Bony et al. 2006)。

雲の形成には鉛直流の特性と水蒸気量の分布が重要である。鉛直流の特性として、Terasaki et al. (2009) は全球雲解像モデル NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model; Satoh et al. (2008), Tomita and Satoh (2004)) のデータを用いて、鉛直流の空間スペクトルが波数によらず一定であるホワイトノイズスペクトルとなる事を見出した (図1)。この結果は、積雲対流に伴う現象、総観規模の現象、またプラネタリー波による現象も、鉛直流の振幅は同じ大きさとなる事を示している。しかし、Terasaki et al. (2009) では北緯 40°-北緯 50°、200hPa 面での鉛直速度にしか言及されておらず、この特徴が他の緯度・高度ではどうなるのかが示されていない。

また、雲の空間スペクトルについて Barker and Davies (1992) は米国の極軌道気象衛星 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) に搭載された可視・赤外放射計 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) からのデータを用いて、空間スケールにおける雲量の空間スペクトルを計算している。この際の空間スケールは2-256km であり、メソスケールの現象しか把握できない。このため衛星を用いた観測では空間スケールが狭くなる。時間帯をずらせば広範囲でも観測はおこなえるが等時性が失われ、複数の衛星を用いた場合の広範囲観測では計器の違いにより等質性が失われてしまう。このため全球を高い時空間分解で雲の観測を行うことは困難である。このような問題に対し、上述した NICAM は全球非静力学大気モデルであり、積雲パラメタリゼーションを用いず直に雲を計算することで全球での個々の雲を表現している。この NICAM を用いて、雲の空間スケールを表す指標としての外向き長波放射 (Outgoing Longwave Radiation: OLR) や比湿、雲水、雲氷の空間スペクトルを計算している研究はない。

熱帯付近では、対流活動に伴う雲・降水システムは放射収支と密接な関係がある (Ramanathan and Collins 1991, Linzen et al. 2001)。ここで対流に伴う雲を知るということは鉛直流と雲要素との空間関係性についてより詳細に知ることと同

義である．全球規模で鉛直流の空間スペクトルと雲要素の空間スペクトルとの関係性について研究しているものはまだない．OLR や鉛直流，水蒸気，雲水，雲氷といった要素の空間スペクトルの特徴を解析し，これらのスペクトルの相互関係を知ることは，今後の雲のフィードバックプロセスの詳細な解明にも有益であると考えられる．

2 目的

本研究では、上で述べた Terasaki et al. (2009) の解析結果に基づき、OLR・鉛直速度・比湿・雲水・雲氷の空間スペクトルを計算し、それらの各緯度・各高度での特徴を把握し、鉛直流と雲の要素との間にどのような空間相関があるのか調べることを目的とする。

3 使用データ

3.1 NICAM データ

NICAM, glevel-10 (水平 7km 解像度) で 14 日シミュレーションを行った際のデータを使用している。以下にその詳細を記述する。

2008 年 9 月 8 日 12Z の気象庁全球 面ガウス解析値 (以下, GSM 解析値) を NICAM 格子に内挿し, それを初期値とした。具体的には, 再解析値は鉛直 60 層であり, それを NICAM の格子システム (水平正二十面体格子系, 地形に沿った系 (幾何学的 z 系) 40 層) に変換して初期値を作成した。初期値における海表面温度 (SST) として, ハドレーセンターにより公開されている GISST 気候値を内挿した。雲微物理過程には Grabowski (1998) を、境界層スキームは、改良型 Mellor and Yamada level 2.0 (Nakanishi and Niino 2004) を導入している。

glevel-10 で 14 日時間積分しているが, 本研究では初期値から 108 時間後, すなわち 2008 年 9 月 13 日 00Z のデータを主に使用している。このデータは幾何学的 z 系 40 層であるが, 3 次スプライン補間法により p 系 17 層に内挿している。要素は東西風 U (m/s), 南北風 V (m/s), 鉛直流 W (m/s), 気温 T (K), 高度 Z (m), 比湿 Q (g/kg), 雲水 QC (g/kg), 雲氷 QI (g/kg), OLR (W/m^2) の 9 個で, 注意すべきこととして OLR のみ鉛直 1 層の 2 次元データとなっている。

4 解析手法

4.1 1つの要素についてのスペクトル解析

2008年9月13日00Zのデータで、各要素について各高度・各緯度でフーリエ展開を行いエネルギースペクトルを求める。これは glevel-10 でも鉛直流 W のエネルギースペクトルの分布がホワイトノイズスペクトルとなっているかを確認するという目的がある。また、他の要素についてもエネルギースペクトルを算出し、各緯度・各高度での変化の特徴をみていく。以下にエネルギースペクトルの算出手順を記述する。

高度 Z_P 面での緯度 ϕ に沿った経度 θ ($-\pi \leq \theta \leq \pi$) の関数 $x(\theta)$ を考える。 $x(\theta)$ は次のフーリエ変換することにより、波数 k の関数 $X(k)$ となる。

$$x(\theta) = \int_{-\pi}^{\pi} X(k) e^{ik\theta} dk \quad (1)$$

$$X(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\theta) e^{-ik\theta} d\theta \quad (2)$$

ここでフーリエ成分 $X(k)$ は波数 k の波の振幅であり、 $|X(k)|^2$ はその強さ・エネルギーを表す。 $|X(k)|^2$ の次元は要素によってエネルギーの次元とはならないが、本研究では日野幹雄 (1977) に則り $|X(k)|^2$ をエネルギースペクトル E と定義する。このエネルギースペクトル E に $\cos \phi$ の重みをかけることで緯度 ϕ のエネルギースペクトル E_ϕ としている。また、緯度 $\phi = \phi_i$ から緯度 $\phi = \phi_j$ の平均エネルギースペクトル E_{ϕ_i-j} は

$$E_{\phi_i-j} = \frac{\sum_{k=i}^j E_k \cos \phi_k}{\sum_{k=i}^j \cos \phi_k} \quad (3)$$

で求めている。

4.2 2つの要素間でのスペクトル解析

2008年9月13日00Zのデータで、2つの要素 x 、 y について各高度・各緯度でのある波数 k における相関の強さと位相差を考えるためにコヒーレンススペクトル $\text{coh}^2(k)$ とフェイズスペクトル θ_{AB} を求める (以下、コヒーレンスとフェイズとそれぞれ記述する)。以下にコヒーレンス及びフェイズの算出手順を記述する。

上の節と同様に、高度 Z_P 面での緯度 ϕ に沿った経度 θ の関数 $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ を考える。これらをフーリエ展開によりフーリエ成分 $X(k)$ 、 $Y(k)$ を求める。ここで単位距離あたりの平均エネルギーをとりパワースペクトル $P(k)$ を定義する。

$$P(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} |X(k)|^2 \right] = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} X(k) X^*(k) \right] \quad (4)$$

ここで T は全区間数であり，今回の場合 $T=5120$ となる． X についてのパワースペクトルを $P_{xx}(k)$ 、 Y についてのパワースペクトルを $P_{yy}(k)$ とする．

次に，クロススペクトル $P_{xy}(k)$ を

$$P_{xy}(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} X^*(k) Y(k) \quad (5)$$

と定義する．クロススペクトル $P_{xy}(k)$ は2つの信号のスペクトルの，ある波数成分どうしを掛け合わせて平均したものである．このクロススペクトル $P_{xy}(k)$ は一般に複素数であるので， $K_{xy}(k)$ と $Q_{xy}(k)$ によりそれぞれクロススペクトル $P_{xy}(k)$ の実部と虚部を表し， $K_{xy}(k)$ をコスペクトル， $Q_{xy}(k)$ をクオドラチャスペクトルと呼ぶ．すなわち，

$$P_{xy}(k) = K_{xy}(k) - iQ_{xy}(k) \quad (6)$$

となる．そしてパワースペクトル $P_{xx}(k)$ 、 $P_{yy}(k)$ 及びクロススペクトル $P_{xy}(k)$ のそれぞれに緯度 ϕ による重み付けとして $\cos \phi$ をかける．

このように求められたスペクトルは区間 T での有限のデータから求められている．そのため，箱形のラグウインドーを通してのスペクトルが求まってしまう．そのため，ここまでで求めたパワースペクトル $P_{xx}(k)$ 、 $P_{yy}(k)$ 及びクロススペクトル $P_{xy}(k)$ は変形されたスペクトルであり，真のスペクトルではない．このため，真の値を推定するために各スペクトルに対してハニングと呼ばれる平滑化を行う．各スペクトル $P(k)$ (ただし， k は1から \max までとする) に対して

$$P(k) = \begin{cases} \frac{1}{2}P(1) + \frac{1}{2}P(2) & (k = 1) \\ \frac{1}{4}P(k-1) + \frac{1}{2}P(k) + \frac{1}{4}P(k+1) & (2 \leq k \leq \max - 1) \\ \frac{1}{2}P(\max - 1) + \frac{1}{2}P(\max) & (k = \max) \end{cases} \quad (7)$$

そして，緯度による重み付け，及び10回のハニングによる平滑化が行われたパワースペクトル $P_{xx}(k)$ 、 $P_{yy}(k)$ 及びクロススペクトル $P_{xy}(k)$ からコヒーレンス $\text{coh}^2(k)$ ，フェイズ $\theta_{xy}(k)$ を次のように定義する．

$$\text{coh}^2(k) = \frac{|P_{xy}(k)|^2}{P_{xx}(k)P_{yy}(k)} = \frac{K_{xy}^2(k) + Q_{xy}^2(k)}{P_{xx}(k)P_{yy}(k)} \quad (8)$$

$$\theta_{xy}(k) = \tan^{-1} \frac{Q_{xy}}{K_{xy}} \quad (9)$$

コヒーレンスは波数 k におけるふたつの要素の相関の強さの指標であり，

$$0 \leq \text{coh}^2(k) \leq 1 \quad (10)$$

を満たす． $\text{coh}^2(k)$ が1に近づくほど，その波数で2つの要素が強い相関を示すことになる．フェイズ $\theta_{xy}(k)$ は変動 x と y の k 成分である $X(k)$ 、 $Y(k)$ との位相角を

意味する．緯度 $\phi=\phi_i$ から緯度 $\phi=\phi_j$ の平均コヒーレンス $\text{coh}_{\phi_{i-j}}^2(k)$ は，式 (3) と同様にして緯度平均を求めた $P_{xx\phi_{i-j}}(k)$, $P_{yy\phi_{i-j}}(k)$, $K_{xy\phi_{i-j}}(k)$, $K_{xy\phi_{i-j}}(k)$ から

$$\text{coh}_{\phi_{i-j}}^2(k) = \frac{K_{xy\phi_{i-j}}^2(k) + Q_{xy\phi_{i-j}}^2(k)}{P_{xx\phi_{i-j}}(k)P_{yy\phi_{i-j}}(k)} \quad (11)$$

で求め，同様に平均フェイズ $\theta_{xy\phi_{i-j}}(k)$ は

$$\theta_{xy\phi_{i-j}}(k) = \tan^{-1} \frac{Q_{xy\phi_{i-j}}}{K_{xy\phi_{i-j}}} \quad (12)$$

で求めている．このように 2 要素間のコヒーレンスを求め，大きな値を示した波数に注目し，2 つの波の位相差をフェイズで求めていく．

5 結果と考察

本章では、始めに 2008 年 9 月 13 日 00Z における OLR・鉛直速度 W ・比湿 Q ・雲水 QC ・雲氷 QI の状態を知るために水平分布図を示す。その際、各要素における北緯 5° 、北緯 25° 、北緯 45° 、北緯 65° に沿った経度分布を描いている。その後、経度分布で緯度を ± 5 度の範囲にしたもの、すなわち赤道–北緯 10° （以下、赤道付近）、北緯 20° –北緯 30° （以下、亜熱帯地域）、北緯 40° –北緯 50° （以下、中緯度）、北緯 50° –北緯 60° （以下、高緯度）での平均エネルギー・スペクトルを示す。そして、最後に鉛直速度 W に対する雲要素の関係性についての結果をまとめる。

5.1 各要素の水平分布

本節では NICAM, glevel-10 での 2008 年 9 月 13 日 00Z（初期値から 108 時間後）の各要素の水平分布と北緯 5° 、北緯 25° 、北緯 45° 、北緯 65° に沿った経度分布を描いている。各要素について、特徴をまとめ、スペクトルで現れると考えられる予想を記す。

5.1.1 OLR

図 2 と図 3 は、OLR (W/m^2) の水平分布と経度分布である。

図 2 を見ると、赤道付近に多くの背の高いクラウドクラスターが見られる。亜熱帯地域では 120° 付近に台風 13 号（以下、Sinlaku）と 260° 付近にハリケーン・アイク（以下、Ike）による背の高い雲が見られる。また、亜熱帯地域ではサハラ砂漠、東太平洋に雲が見られないことから高気圧があると考えられる。中緯度では雲が約 60° 間隔で存在しているように見える。日本の東海上、アラスカの南海上、アメリカ東部付近に温帯低気圧によるものと考えられる雲が存在している。高緯度ではノルウェーの北西、シベリア、アラスカ、グリーンランド東部に雲が見られる。図 3 から緯度ごとの特徴が見られる。赤道付近では非常に狭い範囲で OLR の高低がある。亜熱帯地域では、Sinlaku と Ike で最低値を示し、インドの上空付近でも雲が多い。しかし、これらの地域以外では OLR は高い値を示している。中緯度では 40 – 60° の間隔で大きな振幅がある。高緯度では 30° 間隔くらいで値の振幅がある。

5.1.2 鉛直速度 W

図 4 から図 7 は、鉛直速度 (m/s) の水平分布と経度分布である。

これらを見ると赤道付近では上昇流、下降流が非常に密集している。亜熱帯地域でも同じような傾向が見られる。しかし、サハラ砂漠、太平洋上では下降流が多く存在している。中緯度、高緯度は上昇流・下降流の密集が薄くなり、上昇流・

下降流どちらかが多くなる地域が存在する．どの緯度帯でも高度が高くなるにつれ上昇流，下降流の値は大きくなっている．どの緯度帯でも非常に狭い範囲で大きな振幅があるが，高緯度にいくほど低波数の波があるように見える．

5.1.3 比湿 Q

図 8 から図 11 は，比湿の水平分布と経度分布である．

水平分布では高度によって存在量が大きく異なるため，この差を減らすため比湿 Q の偏差を平均で割り 100 をかけた値 Q' を水平分布にプロットした．すなわち，

$$Q' = \frac{Q - \bar{Q}}{\bar{Q}} \times 100 \quad (13)$$

ここで \bar{Q} は各緯度の帯状平均である．

図を見ると，赤道付近の低い高度はあまりでは地域で大きな特徴はないが，高度が高くなるにつれ比湿の多いところと少ないところが明確にわかってくる．これは，赤道付近の低高度では水蒸気はどこにでも多く存在するためほとんど差が出ないが，高度が高くなるにつれ水蒸気が少なくなり，上昇流によって輸送されるところと下降するところで差がでるためだと考えられる．他の緯度帯では低高度と高高度に明確な差が出てこない．亜熱帯地域では Sinlaku と Ike の地域が非常に多く，インド洋付近でも多く存在している．それ以外の地域では非常に少ない．チベットの部分は地中のため -100 となっている．基本的に図 2 で雲が見られた部分では存在量が多い．

5.1.4 雲水 QC

図 12 から図 15 は，雲水 (g/kg) の水平分布と経度分布である．

雲水は高高度にはほとんど存在しないためここでは 850hPa から 600hPa までを載せる．基本的に緯度が高くなるほど，高度が高くなるほど量は少なくなる．雲水が雲氷に変化するため，もしくは水蒸気が存在しなくなるためである．経度分布を見る限り連続量とは言えない．あるかないかの違いである．それでも赤道付近では比較的まばらに存在している．他の緯度帯では図 2 で雲が多く見られた部分で多く見られる．

5.1.5 雲氷 QI

図 16 から図 19 は，雲氷 (g/kg) の水平分布と経度分布である．

低高度では高緯度に多く存在し，高高度では低緯度に多く存在している．図 2 の雲の部分と非常によく一致している．

5.1.6 スペクトルの予想

水平分布と経度分布からスペクトルがどのようになるかを予想する。

各要素とも高度変化による量の変化は大きいですが、高度による量の経度分布はあまり大きな違いはなかった。そのため、エネルギースペクトル量の変化は大きいですが、高度変化によるスペクトルの形状はほとんど変わらないと考えられる。

赤道付近では各要素とも存在量は非常に密集していた。そのため、高波数でもエネルギースペクトルは高くなると考えられる。亜熱帯地域ではインド洋付近とアメリカ東海岸で雲要素の量が多く、逆に太平洋とサハラ砂漠では非常に乾燥しており雲要素の量は少ない。このことから亜熱帯地域では波数 2 で非常に大きなエネルギースペクトルを予想される。また、Sinlaku と Ike の影響により波数 10 付近でピークをもつ可能性がある。中緯度、高緯度になると温帯低気圧、寒冷低気圧の影響で波数 5-15 付近といった総観規模で大きなエネルギースペクトルをもち高波数では小さくなると予想される。

5.2 スペクトル解析

本節では、前節で示した NICAM, glevel-10 での 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値から 108 時間後) の水平分布から赤道-北緯 10°, 北緯 20°-北緯 30°, 北緯 40°-北緯 50°, 北緯 50°-北緯 60° における各要素の平均エネルギースペクトルを示す。モデルの中で粘性パラメタリゼーションにより、波数がある程度の大きさになるとエネルギースペクトルの値が急激に落ち始める。緯度が高くなるほど低波数で落ちるようになる。この部分は現実と異なると考えられるので、図ではエネルギーが落ち始めたところは載せていない。

5.2.1 OLR

図 20 は 4 つの緯度帯における OLR (W/m^2) のエネルギースペクトルである。

赤道付近は波数 1 で一番大きくなっており、亜熱帯地域では予想通り波数 2 で大きなピークを示している。また中緯度では波数 7-8 でもっとも大きな値をとる。どの緯度帯でも波数が大きくなるにつれ、エネルギースペクトルの値が小さくなるレッドノイズスペクトルである。ただし、緯度が低くなるにつれスペクトルの傾きは緩やかになっている。

5.2.2 鉛直速度 W

図 21 は 4 つの緯度帯における鉛直速度 (m/s) のエネルギースペクトルである。

どの緯度帯でも高度が高くなるにつれスペクトルは大きくなる。中緯度では波数 7,8 付近、高緯度では波数 3 付近にピークをもつ。OLR と同様に緯度が低くな

るにつれスペクトルの傾きは緩やかになっている。赤道付近，亜熱帯地域はホワイトノイズスペクトルであり，中緯度・高緯度も波数が約 20 以上のところではホワイトノイズスペクトルといえる。これは Terasaki et al. (2009) での鉛直流の特徴と一致している。

5.2.3 比湿 Q

図 22 は 4 つの緯度帯における比湿 (g/kg) のエネルギースペクトルである。

どの緯度帯でも高度が低くなるにつれスペクトルは大きくなる。波数 2-3 のプラネタリースケールでもっとも大きなスペクトルをもつ。波数が大きくなるにつれスペクトルの値は小さくなるレッドノイズスペクトルであり，緯度が低くなるにつれスペクトルの傾きは緩やかになる。

5.2.4 雲水 QC

図 23 は 4 つの緯度帯における雲水 (g/kg) のエネルギースペクトルである。

亜熱帯地域では 850hPa のスペクトルが波数 20 付近まで非常に大きい。高緯度の 600hPa ではスペクトルが他の 2 高度と比べ小さくなったため載せていない。赤道，亜熱帯地域（ただし 600hPa の波数 1-20 は除く）のスペクトルはほぼホワイトノイズスペクトルといえる。中緯度から高緯度側では傾きが大きくなりホワイトノイズスペクトルとはいえないが，波数が大きくなっても雲水のスペクトル変化は小さい。

5.2.5 雲氷 QI

図 24 は 4 つの緯度帯における雲氷 (g/kg) のエネルギースペクトルである。

亜熱帯地域では波数 2 の他にも波数 8-30 で複数のスペクトルピークをもつ。亜熱帯地域以外では，スペクトルは 400-500hPa で一番大きく，高度が高くなるにつれ下がっていくが，亜熱帯地域では 200hPa で一番大きく高度が低くなるにつれスペクトルも小さくなる。高緯度の 200hPa ではスペクトルが他の 2 高度と比べ小さくなったため載せていない。プラネタリースケール，総観規模以外ではスペクトルの傾きは緯度による変化が他の要素と比べて小さい。赤道付近ではホワイトノイズスペクトルに近いが，他の緯度帯ではプラネタリースケール，総観規模での変化が大きくホワイトノイズスペクトルとはいえない。ただし，雲水と同様に波数が大きくなってもスペクトルの変化は小さい。

5.2.6 各緯度での要素の比較

図 25 から図 27 は各緯度帯における各要素のエネルギースペクトルである。高度は、OLR 以外は 500hPa 面のものを使っている。高緯度は中緯度とあまり変わらず、雲水のスペクトルが非常に小さいため載せていない。

OLR, 比湿の傾きが緯度が高くなるとともに急勾配になっていることがわかる。鉛直速度は緯度によらずホワイトノイズといえる。雲水, 雲氷は赤道付近ではほぼホワイトノイズである。しかし, 雲水は亜熱帯地域から, 雲氷は中緯度からそれぞれスペクトルがプラネタリースケール, 総観規模, メソスケールの途中までレッドノイズスペクトルとなり, 高波数ではホワイトノイズスペクトルになっている。

5.3 鉛直速度と雲要素との関係

本節では, 前節で示した赤道–北緯 10°, 北緯 20°–北緯 30°, 北緯 40°–北緯 50°, 北緯 50°–北緯 60° における各要素の平均エネルギースペクトルについて鉛直速度と雲要素についての関係性を調べる。

鉛直速度と雲要素 (OLR, 比湿, 雲水, 雲氷) について同緯度・同高度 (OLR については 1 層のみ) でコヒーレンスとフェイズをとったものを以下に挙げる。比湿以外はコヒーレンスの値が大きかった 3 高度を抜き出している。

コヒーレンスは 2 つの波の決定係数のようなもので値が大きいほど, その波数で 2 つの波が強く関係し合っていることを示している。フェイズは 2 つの波の位相差であり, 今回は全て W に対してのフェイズをとっている。そのため, フェイズが正なら各要素が鉛直速度よりも東にずれていることになり, 負なら西にずれていることになる。また, フェイズが 0 なら同位相, 180 に近いときは逆位相である。

5.3.1 OLR

図 28 から図 31 は各緯度帯における鉛直速度 (m/s) に対する OLR (W/m^2) のコヒーレンス (上) とフェイズ (下) である。

赤道付近では, コヒーレンスは波数 8 及び 25–35 付近でピークをもっている。コヒーレンスは高度 400hPa まではほぼ 0 となり, 300hPa で図のようにピークを示すようになった。波数 8 (約 5,000km) でのフェイズは約 -160° となる。これは鉛直速度の正のピークの西に -160° のところに OLR の正のピークがあることになり, 言い換えると鉛直速度の正のピークの東に 20° (約 280km) ずれたところで OLR の負のピークがある。また, 波数 30 付近 (約 1,300km) では, ズレは -120° となる。これは鉛直速度の正のピークの東に 60° (約 220km) ずれたところに OLR の負のピークがあることになる。波数 8, 25–30 のどちらのピークも OLR の負のピークは鉛直速度の正のピークから約 250km ずれていることになる。対流で形成される

積乱雲が圏界面に接近していくと、安定成層をした成層圏に突入できず水平に広がる（かなとこ雲：anvil）。anvilとして広がった部分にOLRの負のピークがあるため、対流で正のピークをもつ鉛直流とのずれが生じていると考えられる。

亜熱帯地域では波数 1-2（波数 1：約 36,000km，波数 2：約 18,000km），10（約 3,600km）付近に 2 つの大きなピークをもっている。コヒーレンスは赤道付近と同様に高高度で高い値を示す。波数 1-2 は水平分布，スペクトルでも見られた亜熱帯高気圧によるもの，波数 10 付近は Sinlaku，Ike によるものだと考えられる。どちらのピーク時のフェイズはほぼ逆位相となっており，上昇流のあるところで雲頂高度の高いところがあり，下降流のあるところで雲がないことを示している。

中緯度は波数 8（3,500-4,700km）付近にひときわ大きなピークをもっている。そのときのフェイズはほぼ逆位相である（厳密には鉛直速度の正のピークの西に約 20°（約 230km）のところでOLRの負のピークがある）。

高緯度は，プラネタリースケール（波数 1-3）で大きなコヒーレンスをもち，波数 15 付近でも小さなピークを持っている。フェイズはどちらもほぼ逆位相である。

5.3.2 比湿 Q

図 32 から図 35 は各緯度帯における同高度の鉛直速度 (m/s) に対する比湿 (g/kg) のコヒーレンス (上) とフェイズ (下) である。

基本的に上層ほどコヒーレンスの値は大きくなる。各緯度とも大きなピークが見られる波数はOLRのときとほぼ一致している。すなわち，赤道付近：波数 8・25-35，亜熱帯地域：波数 1-2・10 付近，中緯度：波数 8 付近，高緯度：波数 1-3・15 付近である。このときのフェイズは，赤道付近・亜熱帯地域ではほぼ同位相となっている。一方，中緯度・高緯度において，鉛直速度の正のピークに対して比湿の正のピークは下層ではわずかに西にずれ，中層で同位相となり，上層で東にずれる。これは下層で生成された雲が基本場の偏西風に流され高度とともに東に流されるためと考えられる。

5.3.3 雲水 QC

図 36 から図 39 は各緯度帯における同高度の鉛直速度 (m/s) に対する雲水 (g/kg) のコヒーレンス (上) とフェイズ (下) である。

中層から下ではどの緯度帯でも非常に大きなコヒーレンスとなっている。コヒーレンスの大きさは低波数から高波数まで一定の大きさを維持している。緯度が高くなるにつれ高波数側で値が落ちているが，これはスペクトルと同様にモデルの中でエネルギーを高波数側で落としていることにより生じていると考えられる。中緯度の波数 6-8 付近でひときわ大きなピークが見られる。どの緯度帯でも大気の中層付近でもっとも大きなコヒーレンスを示す。フェイズはコヒーレンスの値が大きいところではほぼ同位相となっている。

5.3.4 雲氷 QI

図 40 から図 43 は各緯度帯における同高度の鉛直速度 (m/s) に対する雲水 (g/kg) のコヒーレンス (上) とフェイズ (下) である。

中層から上ではどの緯度帯でも非常に大きなコヒーレンスとなっている。雲水はコヒーレンスの大きさは低波数から高波数まで一定の大きさを維持していたが、雲氷では赤道付近・亜熱帯高気圧において波数 40 くらいで値が下がるところがある。緯度が高くなるにつれ高波数側で値が落ちているが、これはスペクトルと同様にモデルの中でエネルギーを高波数側で落としていることにより生じていると考えられる。中緯度の波数 6-8 付近でひととき大きなピークが見られる。どの緯度帯でも大気の中層付近でもっとも大きなコヒーレンスを示す。フェイズはコヒーレンスの値が大きいところではほぼ同位相となっている。

5.3.5 中緯度の波数 8 付近の解析

中緯度では波数 6-8 付近で非常に大きなピークがあった。波数 6-8 は東西約 3600-4800km の波である。このスケールから温帯低気圧と予想される。実際にどのような構造をもっているかを検証する。

図 44 は北緯 40°-北緯 50°、波数 8 における OLR に対する鉛直風速 W 、南北風 V 、高度 Z 、温度 T 、比湿 Q 、雲水 QC 、雲氷 QI の位相差である。横軸には、-180 から 180 に OLR の一波長を置き、-90 に正のピーク、+90 に負のピークがある。縦軸は p 系高度。

鉛直速度は 3 次元データのため、鉛直速度の波のピークは大気の下層-上層でずれることが考えられる。そのため図 44 では W に対してではなく、大気の水平 2 次元データの OLR に対する各要素のフェイズをとった。

上の図を見ると、気圧の谷 ($Z -$) の前面 (東側) で上昇流 ($W +$)、南風 ($V +$)、高温 ($T +$) が見られ、逆に後面 (西側) では下降流 ($W -$)、北風 ($V -$)、低温 ($T -$) が見られる。これは Eady (1949) による傾圧不安定波の位相とよく一致している。また、観測で得られる傾圧不安定による低気圧の構造とも一致する。これらのことから波数 8 付近で見られたコヒーレンスのピークは温帯低気圧によるものだと言える。

次に下の図を見る。雲水・雲氷については、下層では雲水 ($QC +$) が上昇流 ($W +$) よりも西にずれ、中層では雲水・雲氷 ($QI +$) とともに上昇流とほぼ同位相、上層ではわずかに東にずれている。下層では上昇流の西側に雲が多くでき、それが中緯度で卓越している偏西風により上昇とともに徐々に東に流され、中層で上昇流のピークと重なると考えられる。これは雲氷についても同様であり、中層で上昇流・雲水のピーク付近で雲水が雲氷に相変化し上層に行くにつれ東へ流される。比湿 ($Q +$) は雲水と同様に下層では上昇流のピークよりも西にずれ、偏西風に流され中層では上昇流よりも東にずれる。上昇流と比湿のピークのずれについては、比湿は雲水・雲氷と同様に上昇流により上層へ運ばれるため上

昇流の強いところで多くなるが、雲水・雲氷のように断熱冷却で形成されるのではなく上昇流により運ばれるだけのため同位相にならず、上昇流のピークとずれていると考えられる。

6 結論

本研究では，Terasaki et al. (2009) の鉛直速度がホワイトノイズスペクトルになるという結果に基づき，NICAM，glevel-10（水平解像度 7.0km）による 2008 年 9 月 13 日 00Z（初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後）のデータを用いて鉛直速度と雲要素（OLR，比湿，雲水，雲氷）についてスペクトル解析及び要素間の関係性についてクロススペクトルによる統計解析を行った．

各要素のスペクトルについては，比湿・OLR は各緯度・各高度で波数が大きくなるとともにスペクトルが減少するレッドノイズスペクトルであった．しかし，鉛直速度は緯度・高度によらずホワイトノイズスペクトルとなった．また，雲水・雲氷についても赤道付近ではホワイトノイズスペクトルとなることがわかった．亜熱帯地域から高緯度側では雲水・雲氷はレッドノイズスペクトルであるが，比湿・OLR と比べるとスペクトルの傾きが緩やかである．亜熱帯地域では亜熱帯高気圧および Sinlaku と Ike により波数 2（約 19,000km），10（約 3,800km）付近で大きなピークをもち，中緯度では温帯低気圧により波数 6-8（約 3,500-4,700km）付近で大きなピークをもちることがわかった．

鉛直速度と雲要素の関係性については，OLR とは高高度でない強い相関は見られなかった．相関の高いところではフェイズが逆位相となっており，上昇速度の大きなところに雲頂高度の高い雲があることを示している．比湿とも OLR と同様に高度が高いところで強い相関を示した．そのときのフェイズはほぼ同位相であったことから上昇流により比湿が上空に運ばれていると考えられる．雲水・雲氷とは非常に強い相関を示した．相関は低波数から高波数にわたり一定の大きさをもち，大気の中層で一番強くなる．フェイズは相関の強いところでほぼ同位相であり，上昇流が大きなところで断熱冷却により多くの雲ができていたためと考えられる．全体的な緯度による傾向として赤道付近では波数 8，25-35 にピークをもち，波数 25-35（約 1,200-1,600km）で見られたピークはクラウドクラスターを示していると考えられる．亜熱帯地域では波数 1-2，10 付近で強い相関がみられ，波数 1-2 は大陸-海洋分布，亜熱帯高気圧によるもので，波数 10 付近は Sinlaku と Ike によるものだと考えられる．中緯度では温帯低気圧により波数 6-8 での相関が非常に強い．高緯度ではプラネタリースケール（波数 1-3）での相関が強く，波数 15 付近にも大きなピークが見られた．

本実験では時間平均をせず，一つの時間帯に絞って解析をおこなった．そのため，この時間帯でしかみられない波が現れ，ピークとして存在した可能性がある．例えば，台風・ハリケーン（Sinlaku・Ike）による亜熱帯の波数 10 付近のピークはこの時間帯特有のピークと考えられる．今後は期間を設定し，その時間帯で平均をおこない，より基本場に近い条件で解析をしていく必要がある．

7 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である筑波大学計算科学研究センターの田中博教授には、本研究の動機となる論文の紹介、解析手法の提案、筆者の質問や結果に対する考察などへの丁寧な御指導、御助言を賜り、心より感謝しております。

また、筑波大学研究員の寺崎康児氏にはプログラミングや解析手法など計算機関係における多くの御指導、御助言を頂きました。前筑波大学生命環境科学研究科の大橋正宏氏には、本研究を行うにあたり参考となる数多くの資料を提供して頂きました。

さらに、同大学生命環境科学研究科の林陽生教授、上野健一准教授、植田宏昭准教授および同大学計算科学研究センターの日下博幸准教授や、同大学の大学院生の皆様には、方針発表、中間発表、最終発表、ポスター発表の場で貴重な御助言を多く頂きました。

最後に、共に研究を進めてきた研究室の先輩方や、共に机を並べ卒論作業を進めてきた地球学類の4年生の皆様には、よき相談相手となって頂きました。

本論文は以上の皆様の御協力により完成させることができました。心より感謝いたします。

尚、本研究で用いた主な図は、The Generic Mapping Tools System (Wessel and Smith 1991) にて作成いたしました。

参考文献

- Barker, H. W., and A. Davis, 1992: Cumulus cloud radiative properties and the characteristics of satellite radiance wavenumber spectra. *REMOTE-SENS.ENVIRON*, **42**, 51–64.
- Bony, S., and Coauthors, 2006: How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate*, **19**, 3445–3482.
- Eady, E., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus*, **1**, 33–52
- Grabowski, W. W., 1998: Toward cloud resolving modeling of large-scale tropical circulations: A simple cloud microphysics parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3283–3298.
- Lindzen, R. S., M.-D. Chou, and A. Y. Hou, 2001: Does the Earth have an adaptive infrared iris? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **82(3)**, 417–432.
- Nakanishi, M., and H. Niino, 2004: An improved Mellor-Yamada Level-3 model with condensation physics: its design and verification. *Boundary-Layer Meteor.*, **112**, 1–31.
- Nastrom, G. D., and K. S. Gage, 1985: A Climatology of Atmospheric Wavenumber Spectra of Wind and Temperature Observed by Commercial Aircraft *J. Atmos. Sci.*, **42**, 950–960.
- Ramanathan, V., and Collins, W., 1991: Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Nino. *Nature*, **351**, 27–32
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model(NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics, the special issue on Predicting Weather, Climate and Extreme Events*, **227**, 3486–3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
- Terasaki, K., H. L. Tanaka, and M. Satoh, 2009: Characteristics of the kinetic energy spectrum of NICAM model atmosphere. *SOLA*, **5**, 180–183. doi:10.2151/sola.2009-046.
- Tomita, H., and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, **34**, 357–400.

小倉 義光, 1978: 気象力学通論. 東京大学出版会, 249pp.

田中 博, 2007: 偏西風の気象学. 成山堂, 174pp.

對馬 洋子, 2003: 雲. *Frontier Newsletter*, **23**, 5

日野 幹雄, 1977: スペクトル解析. 朝倉書店, 300pp.

Energy Spectrum

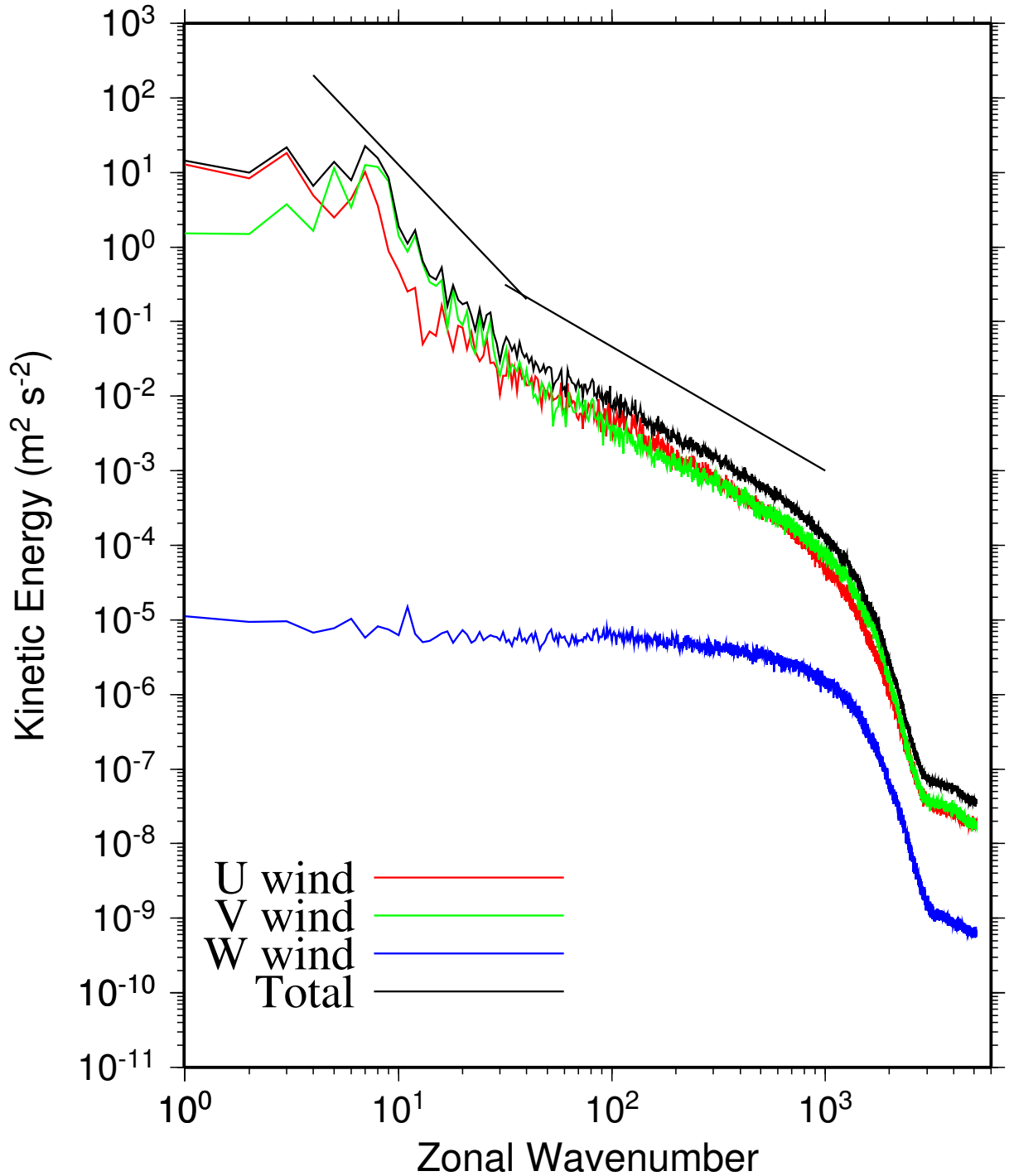


図 1: NICAM, glevel-11 (水平 3.5km 格子), N40°-N50° の 200hPa 面での運動エネルギースペクトル (Terasaki et al. 2009 より引用) .

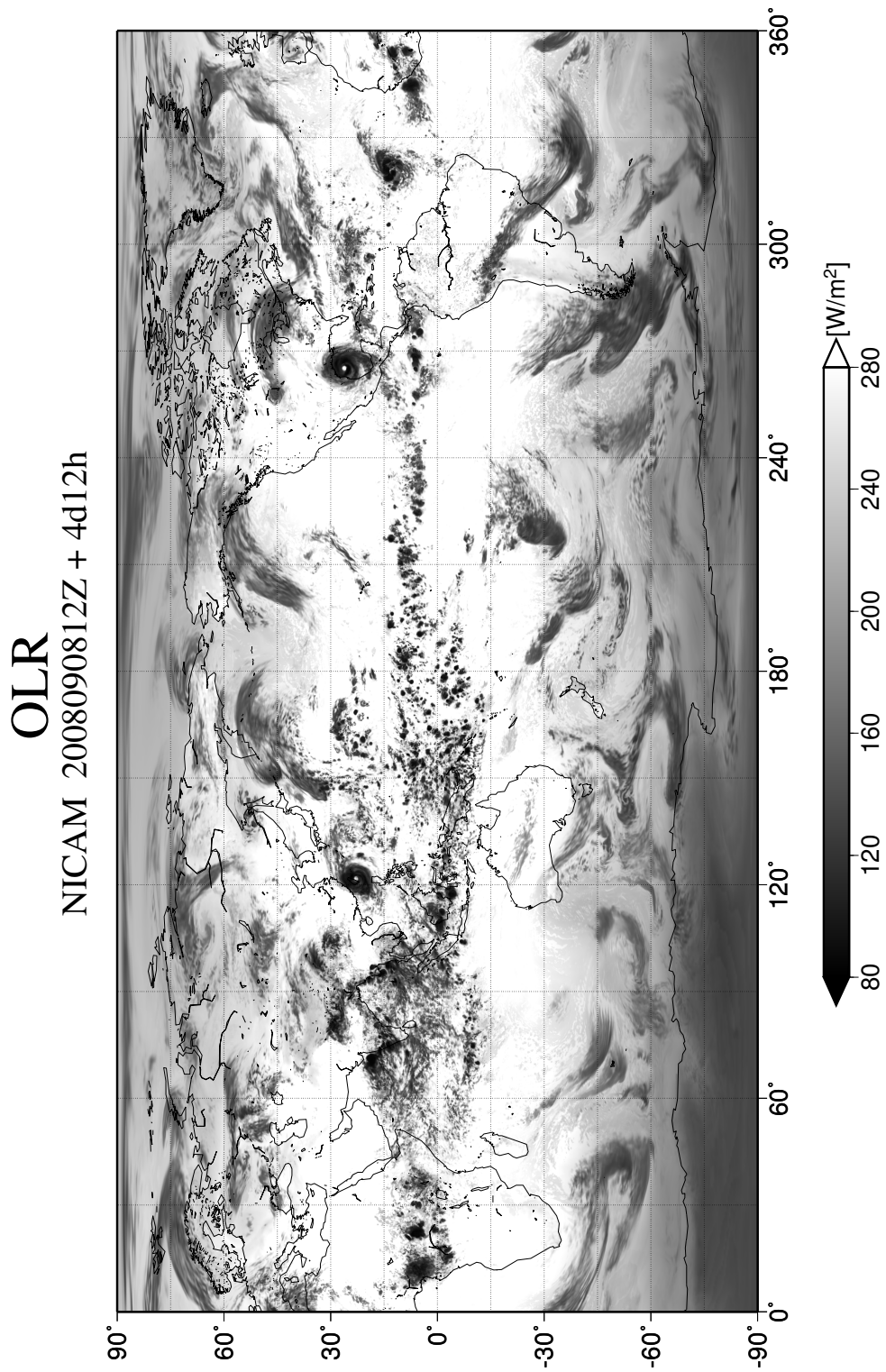


図 2: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) の OLR (W/m^2) の X-Y 平面図

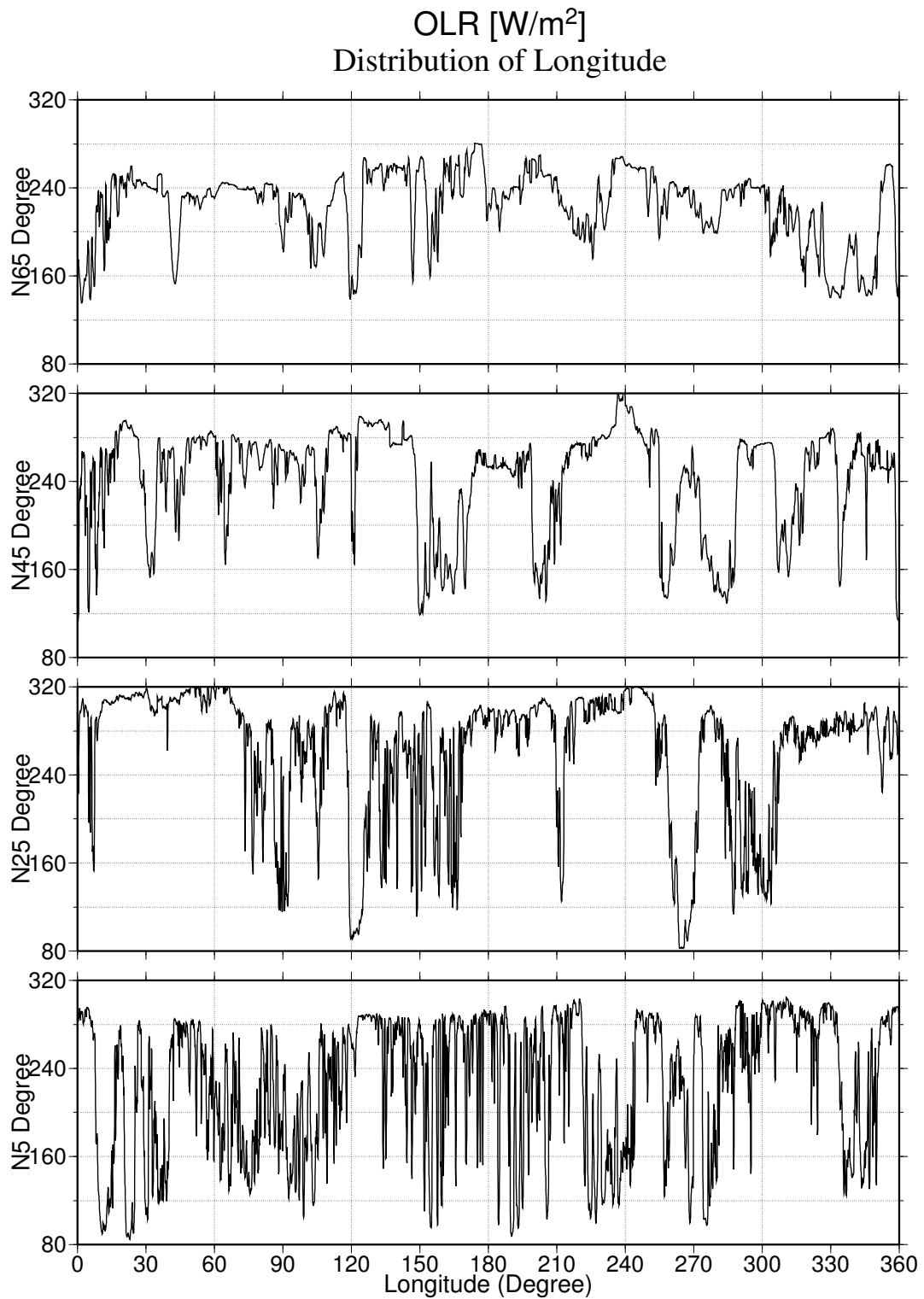


図 3: NICAM, glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後). OLR (W/m^2) の各緯度に沿った経度分布. 上から北緯 65°, 北緯 45°, 北緯 25°, 北緯 5° をそれぞれ表している.

W wind

NICAM 2008090812Z + 4d12h

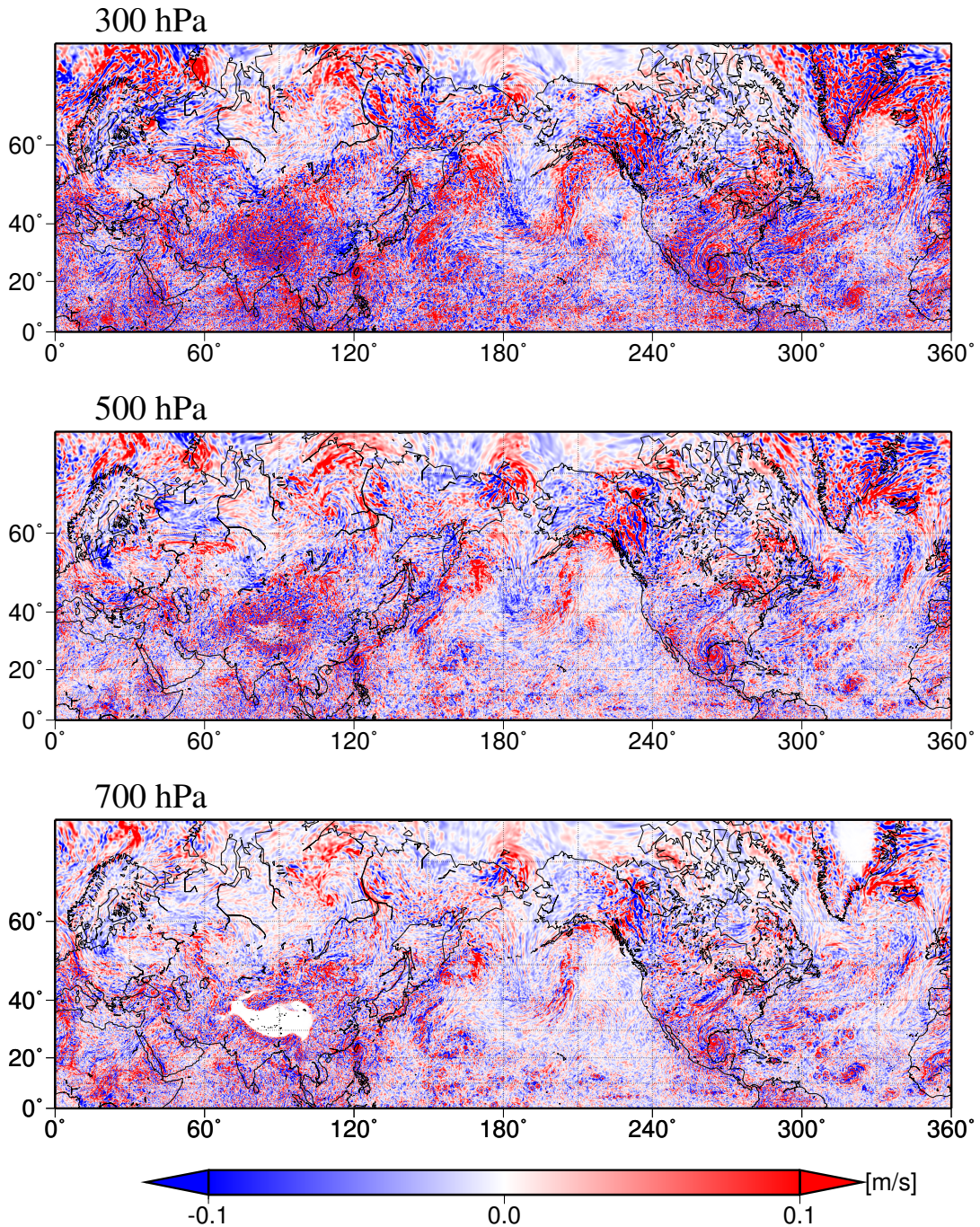


図 4: NICAM, glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後). 鉛直速度 (m/s) の X-Y 平面図. 上から 300hPa, 500hPa, 700hPa 面の分布をそれぞれ表している.

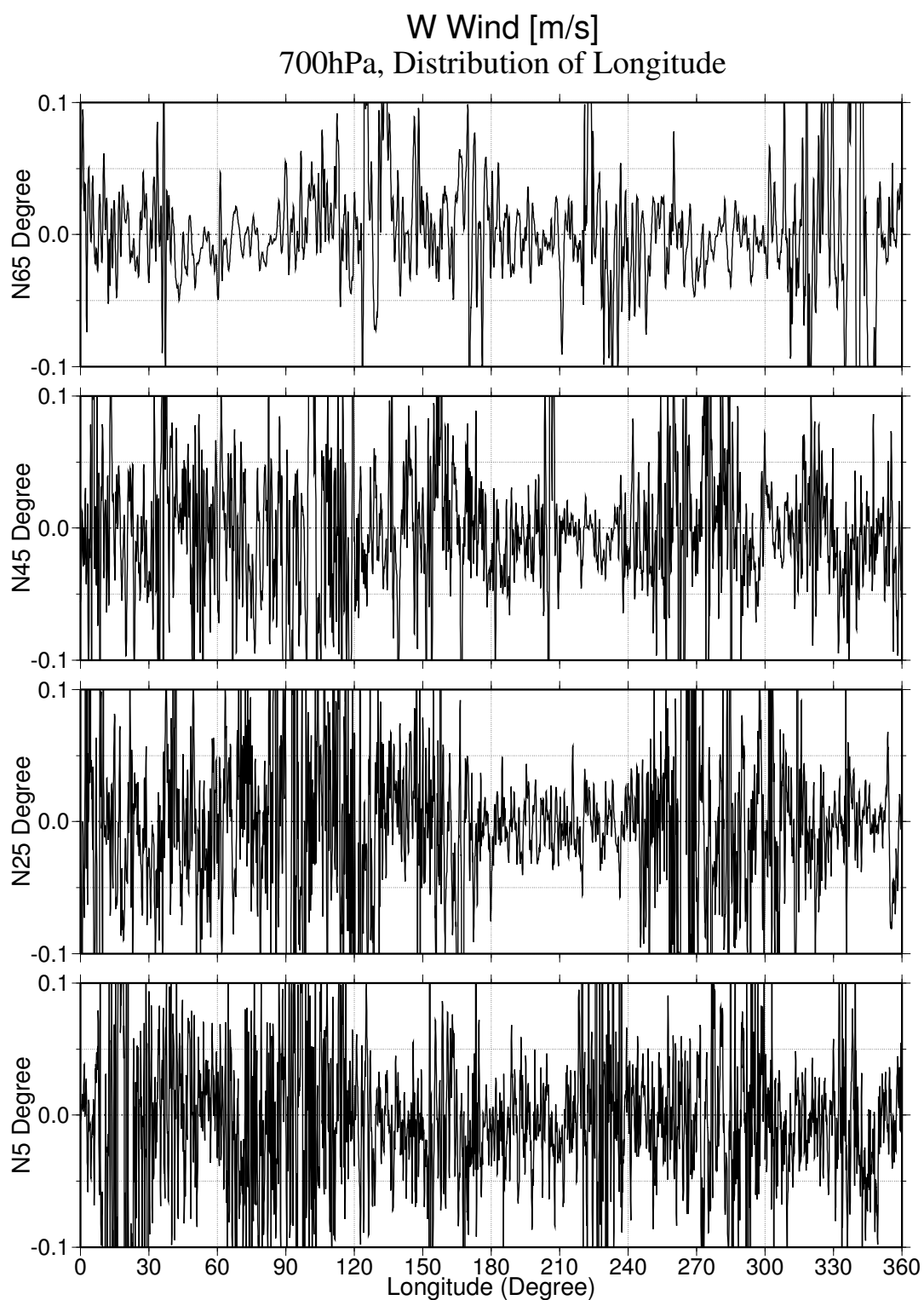


図 5: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 700hPa 面における鉛直速度 (m/s) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65° , 北緯 45° , 北緯 25° , 北緯 5° をそれぞれ表している .

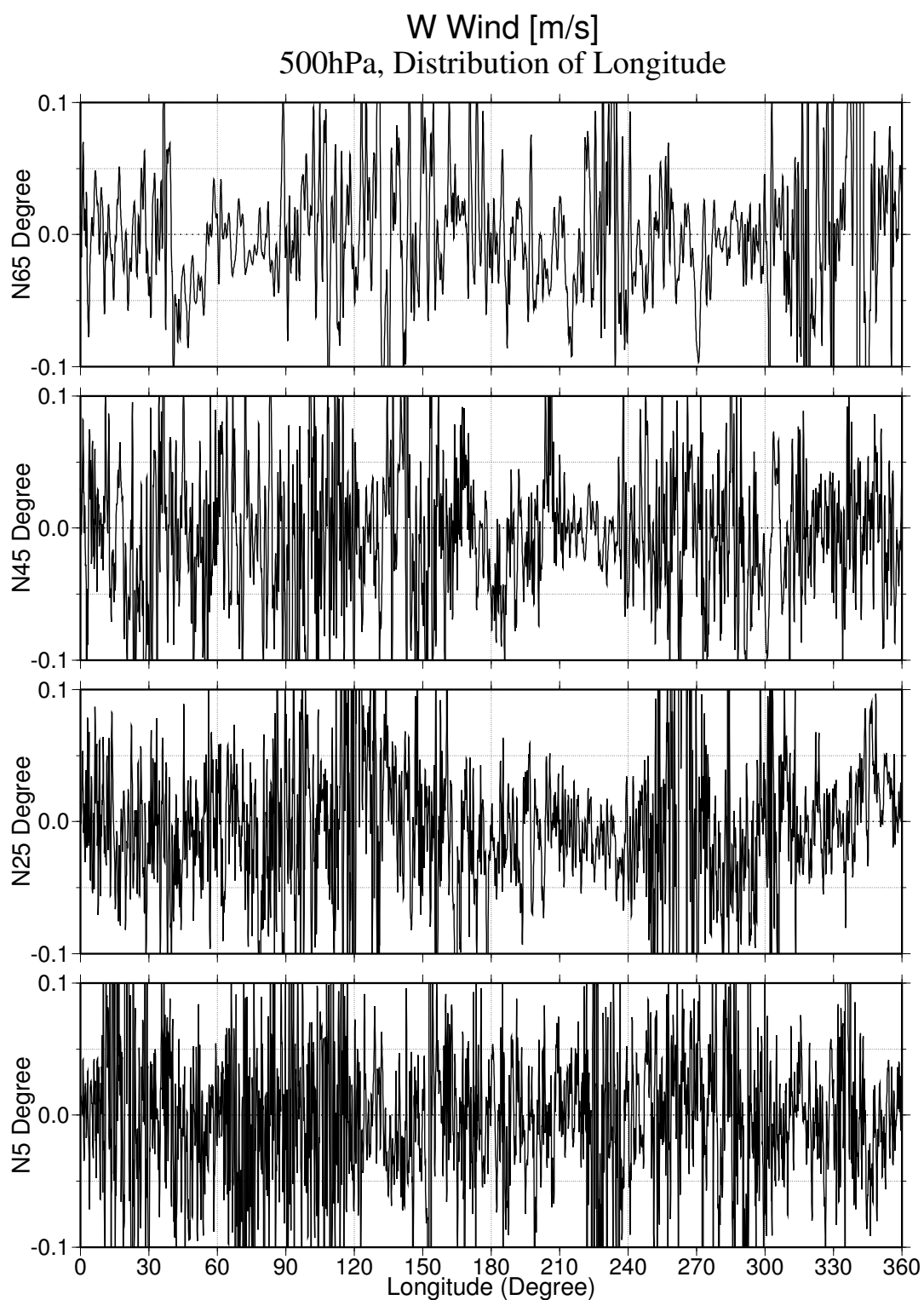


図 6: NICAM, glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 500hPa 面における鉛直速度 (m/s) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65°, 北緯 45°, 北緯 25°, 北緯 5° をそれぞれ表している .

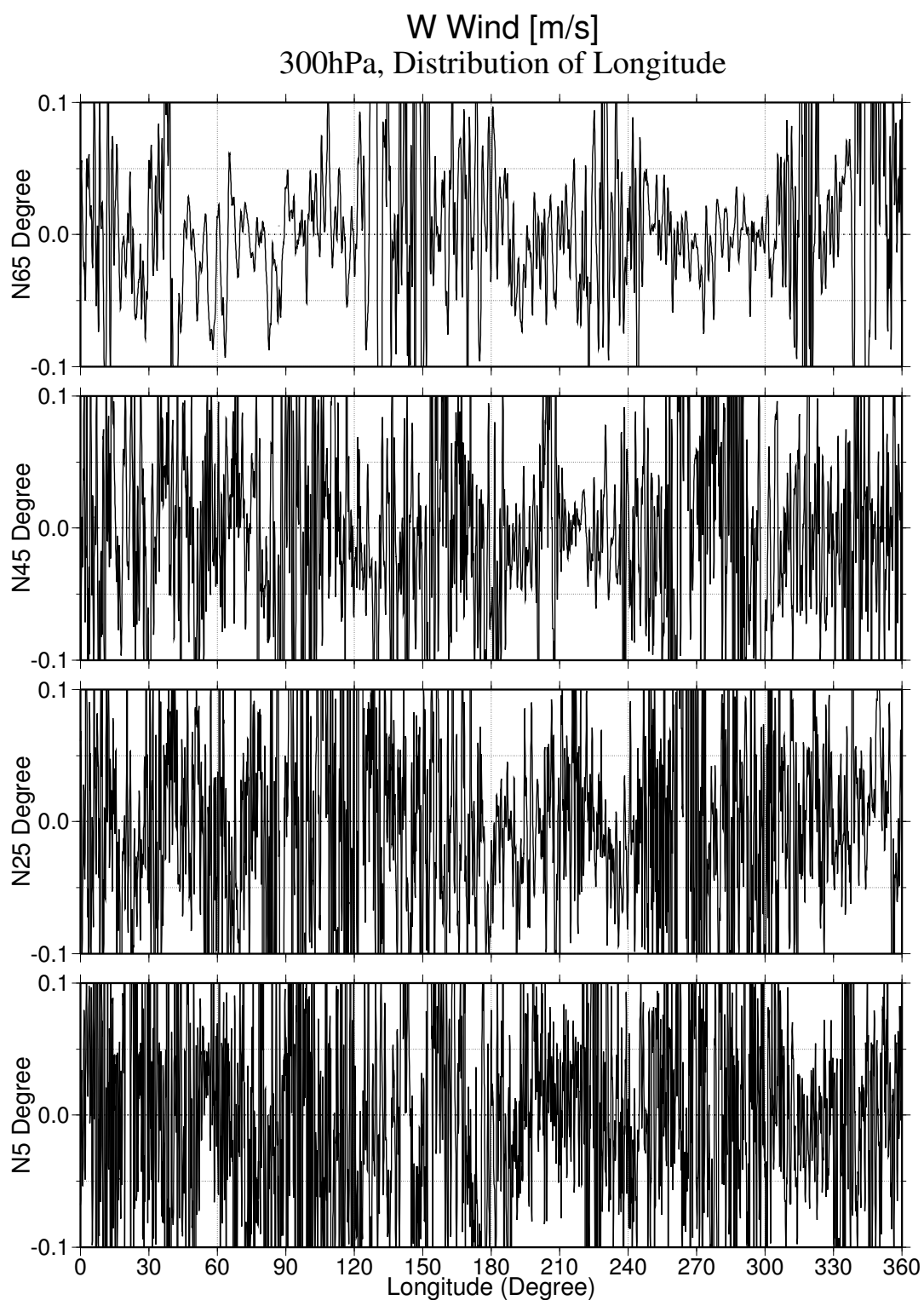


図 7: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 300hPa 面における鉛直速度 (m/s) の各緯度 に沿った経度分布 . 上から北緯 65° , 北緯 45° , 北緯 25° , 北緯 5° をそれぞれ表し ている .

Specific Humidity

NICAM 2008090812Z + 4d12h

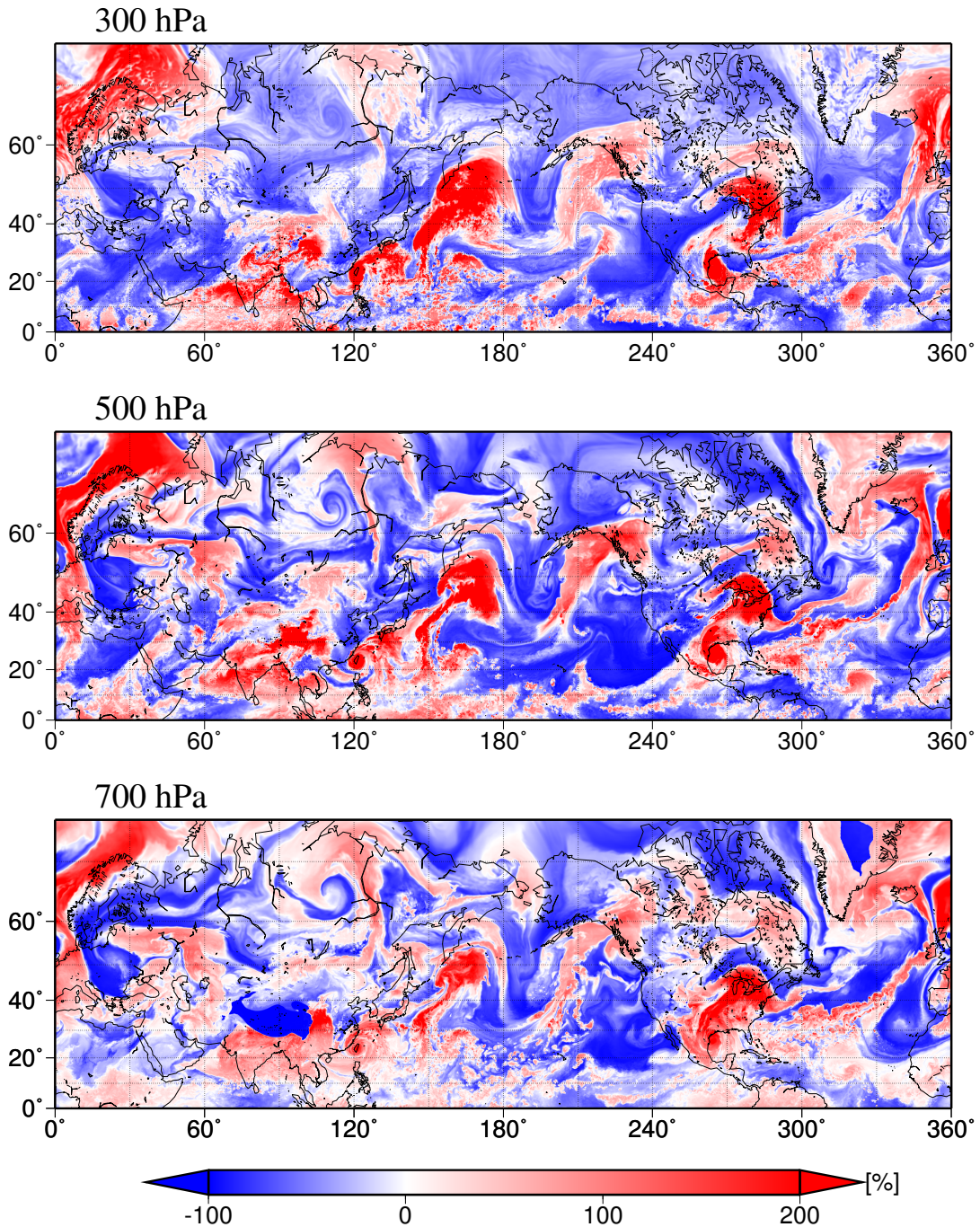


図 8: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後). 比湿 (%) の X-Y 平面図 . 上から 300hPa , 500hPa , 700hPa 面の分布をそれぞれ表している .

Specific Humidity [g/kg]
700hPa, Distribution of Longitude

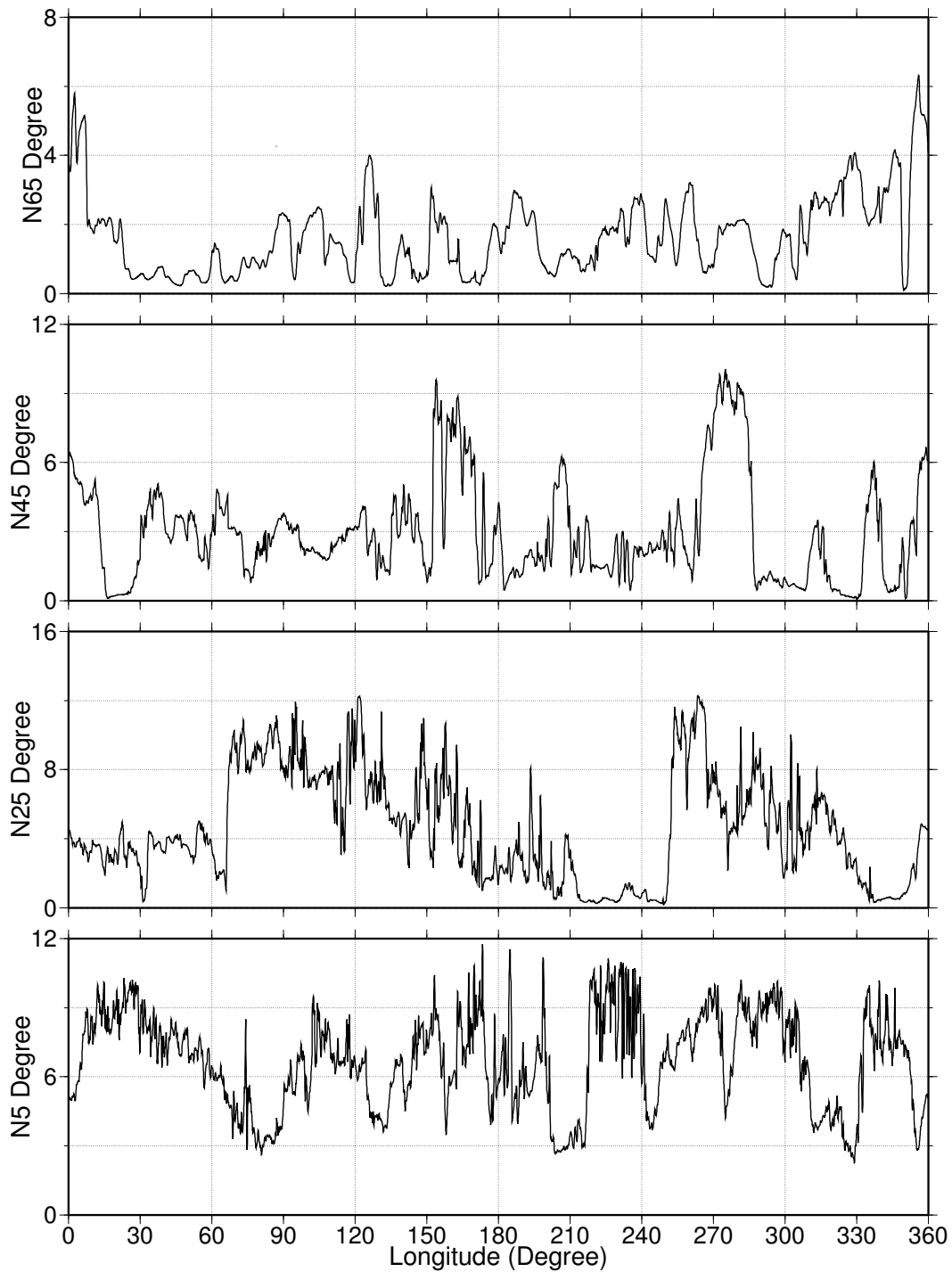


図 9: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 700hPa 面における比湿 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65° , 北緯 45° , 北緯 25° , 北緯 5° をそれぞれ表している .

Specific Humidity [g/kg]
500hPa, Distribution of Longitude

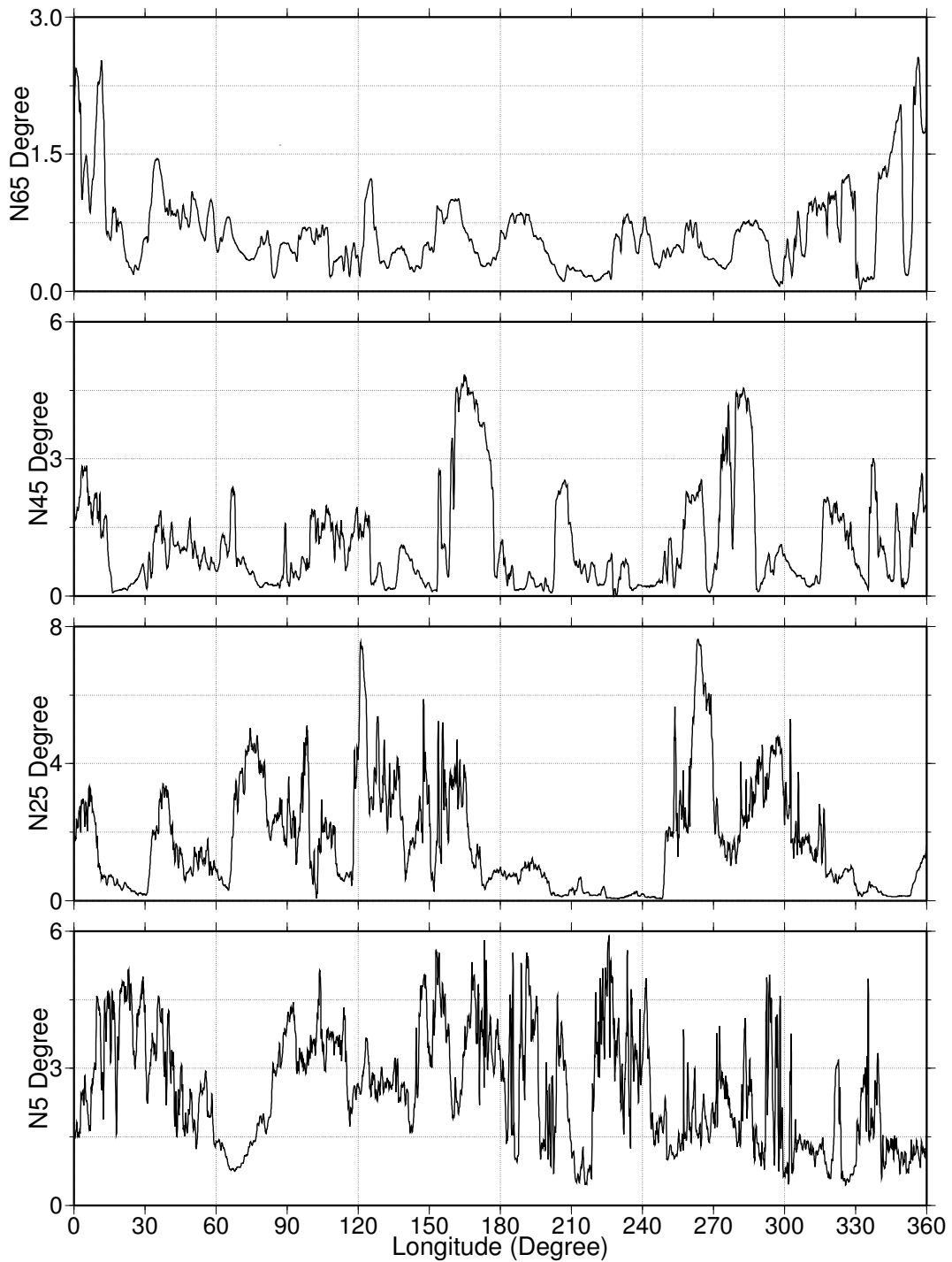


図 10: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後). 500hPa 面における比湿 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布. 上から北緯 65°, 北緯 45°, 北緯 25°, 北緯 5° をそれぞれ表している.

Specific Humidity [g/kg]
300hPa, Distribution of Longitude

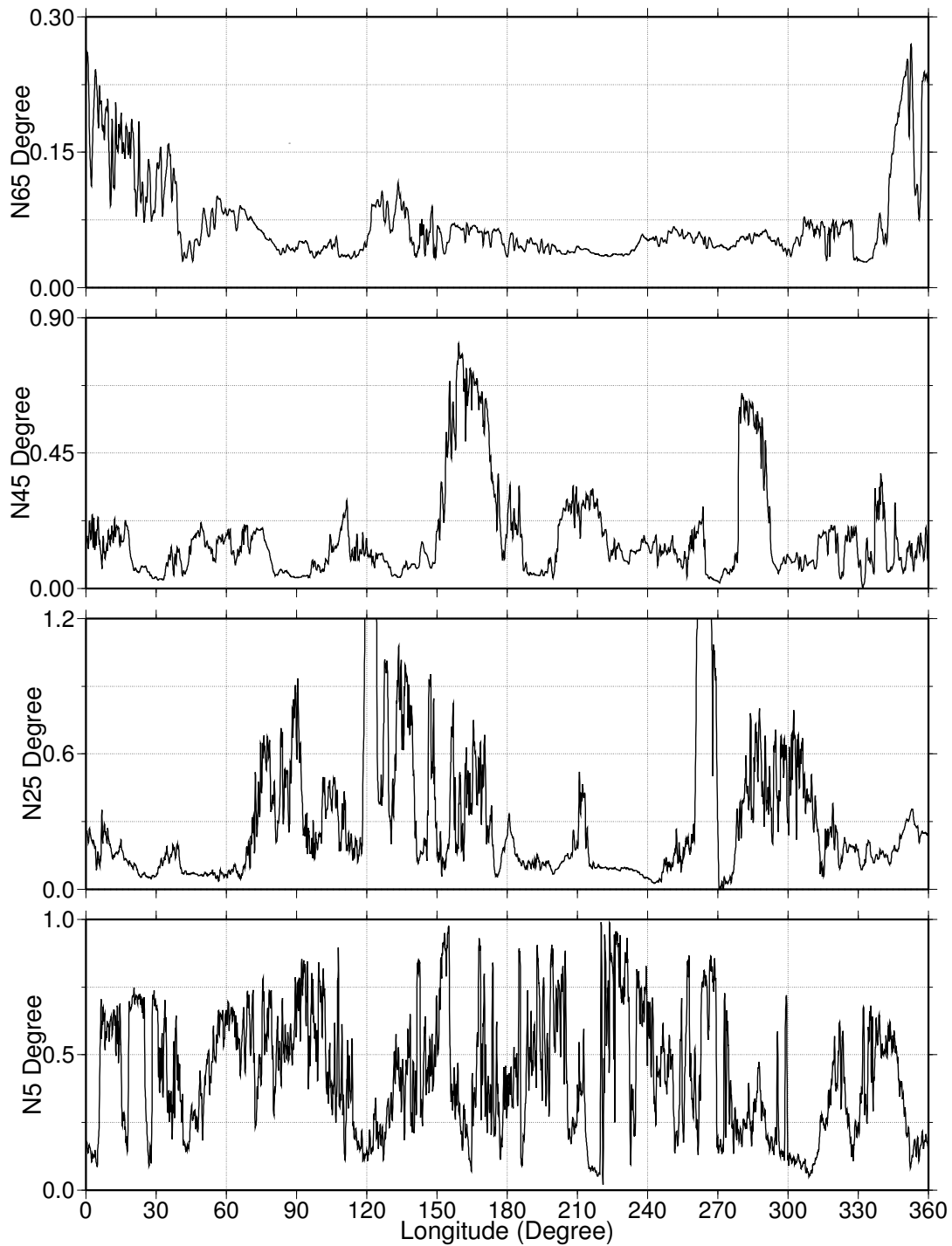


図 11: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 300hPa 面における比湿 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65° , 北緯 45° , 北緯 25° , 北緯 5° をそれぞれ表している .

Cloud Water

NICAM 2008090812Z + 4d12h

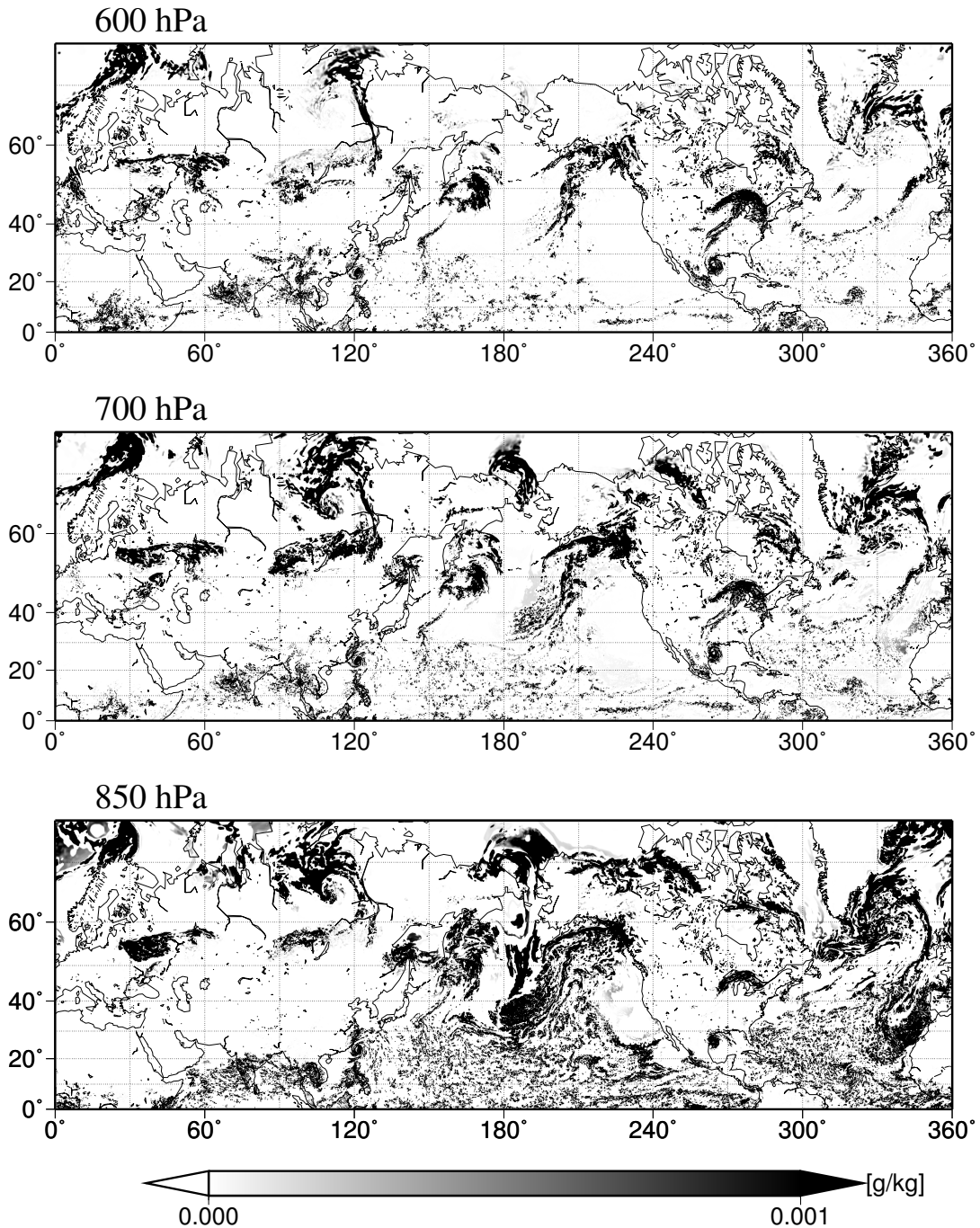


図 12: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 雲水 (g/kg) の X-Y 平面図 . 上から 600hPa , 700hPa , 850hPa 面の分布をそれぞれ表している .

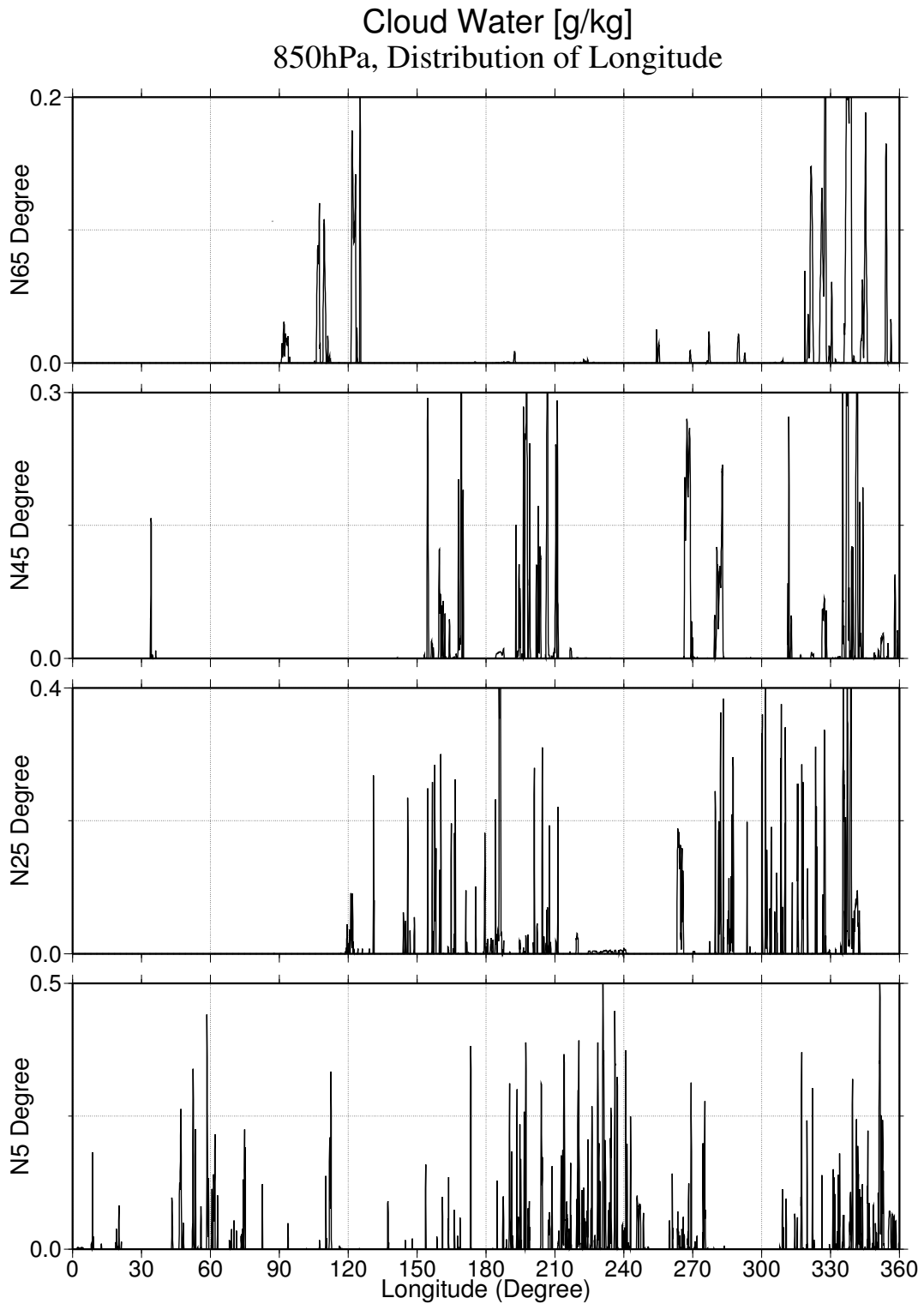


図 13: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 850hPa 面における雲水 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65°, 北緯 45°, 北緯 25°, 北緯 5° をそれぞれ表している .

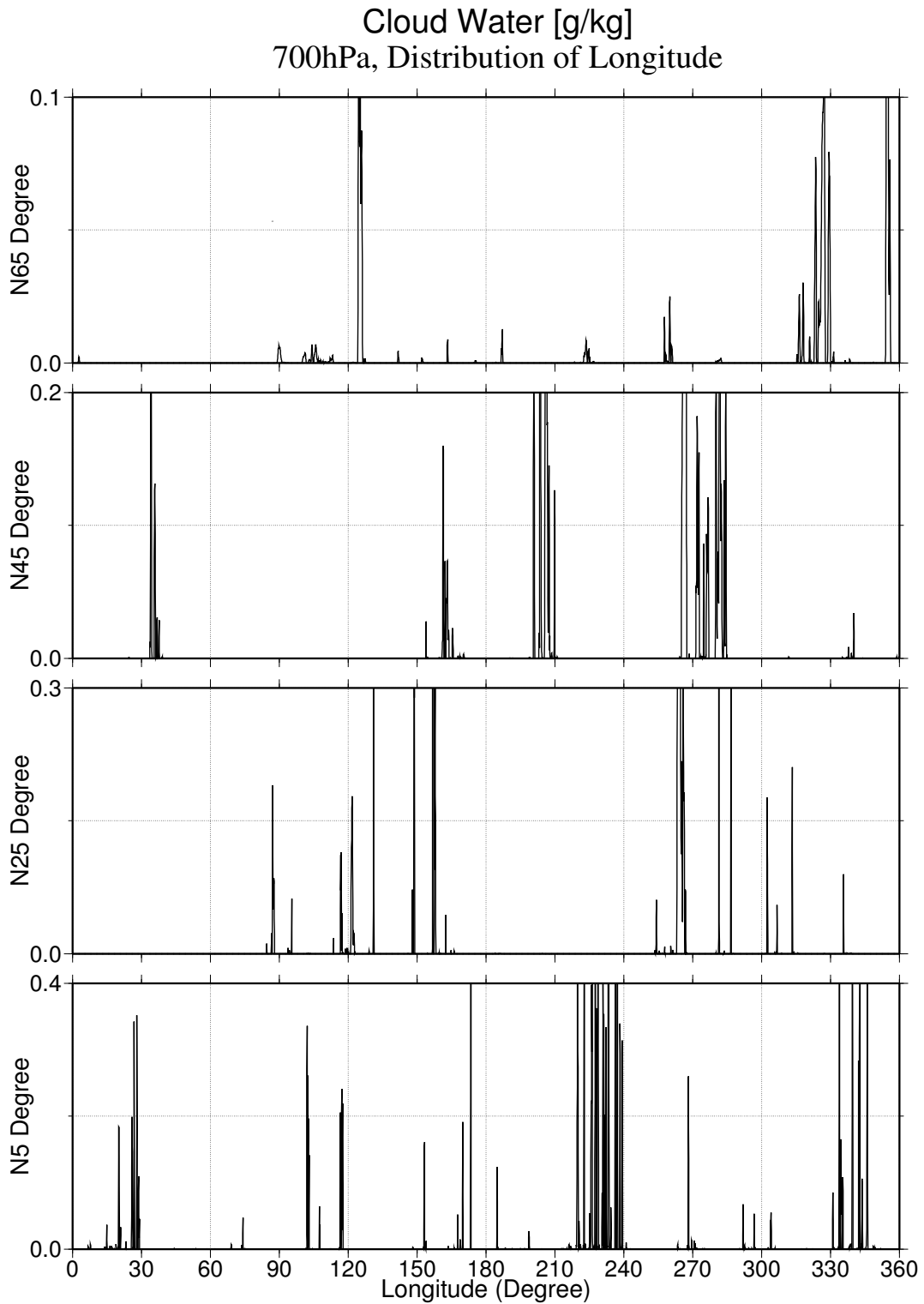


図 14: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後). 700hPa 面における雲水 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布. 上から北緯 65°, 北緯 45°, 北緯 25°, 北緯 5° をそれぞれ表している.

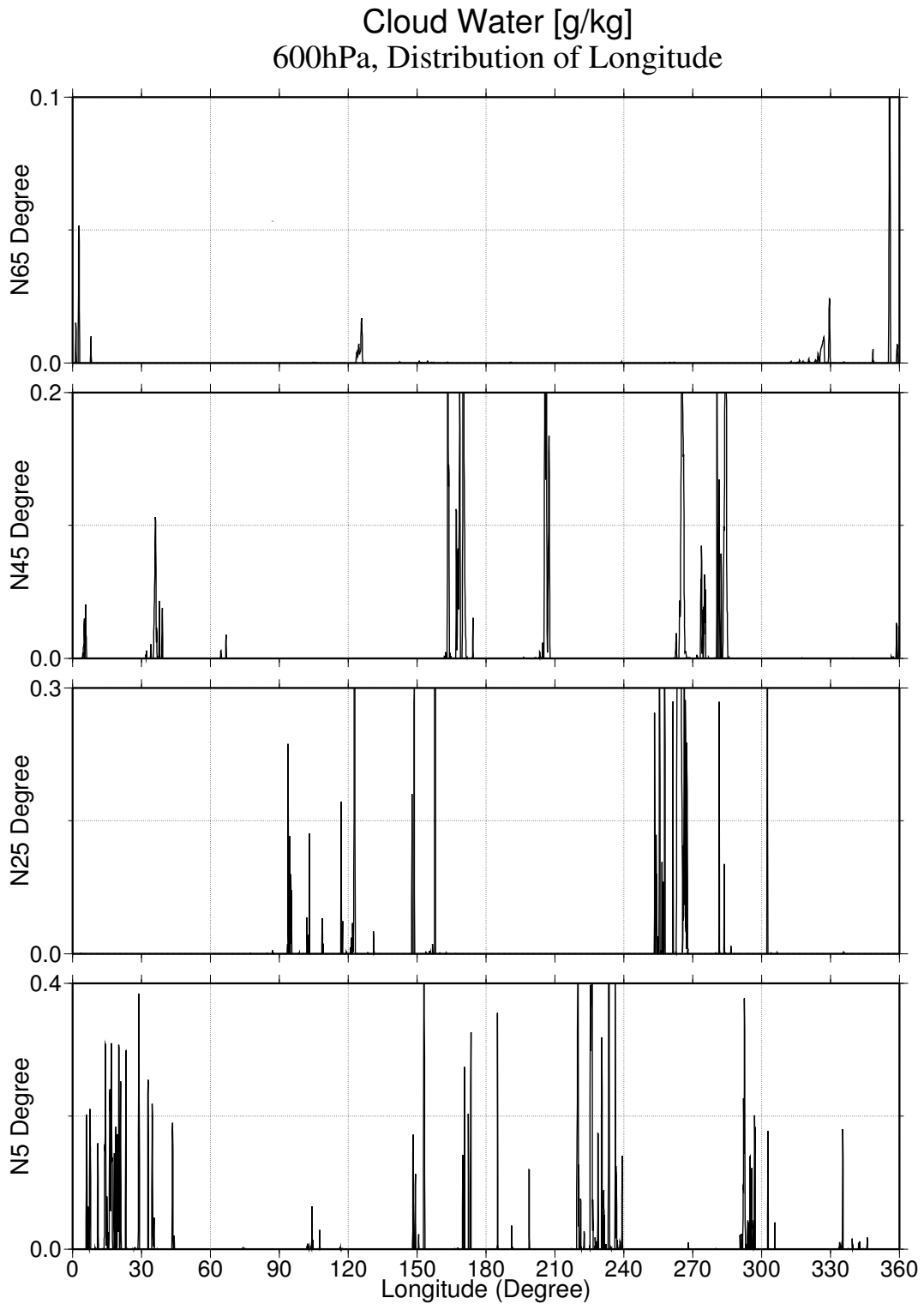


図 15: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後). 600hPa 面における雲水 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布. 上から北緯 65°, 北緯 45°, 北緯 25°, 北緯 5° をそれぞれ表している.

Cloud Ice

NICAM 2008090812Z + 4d12h

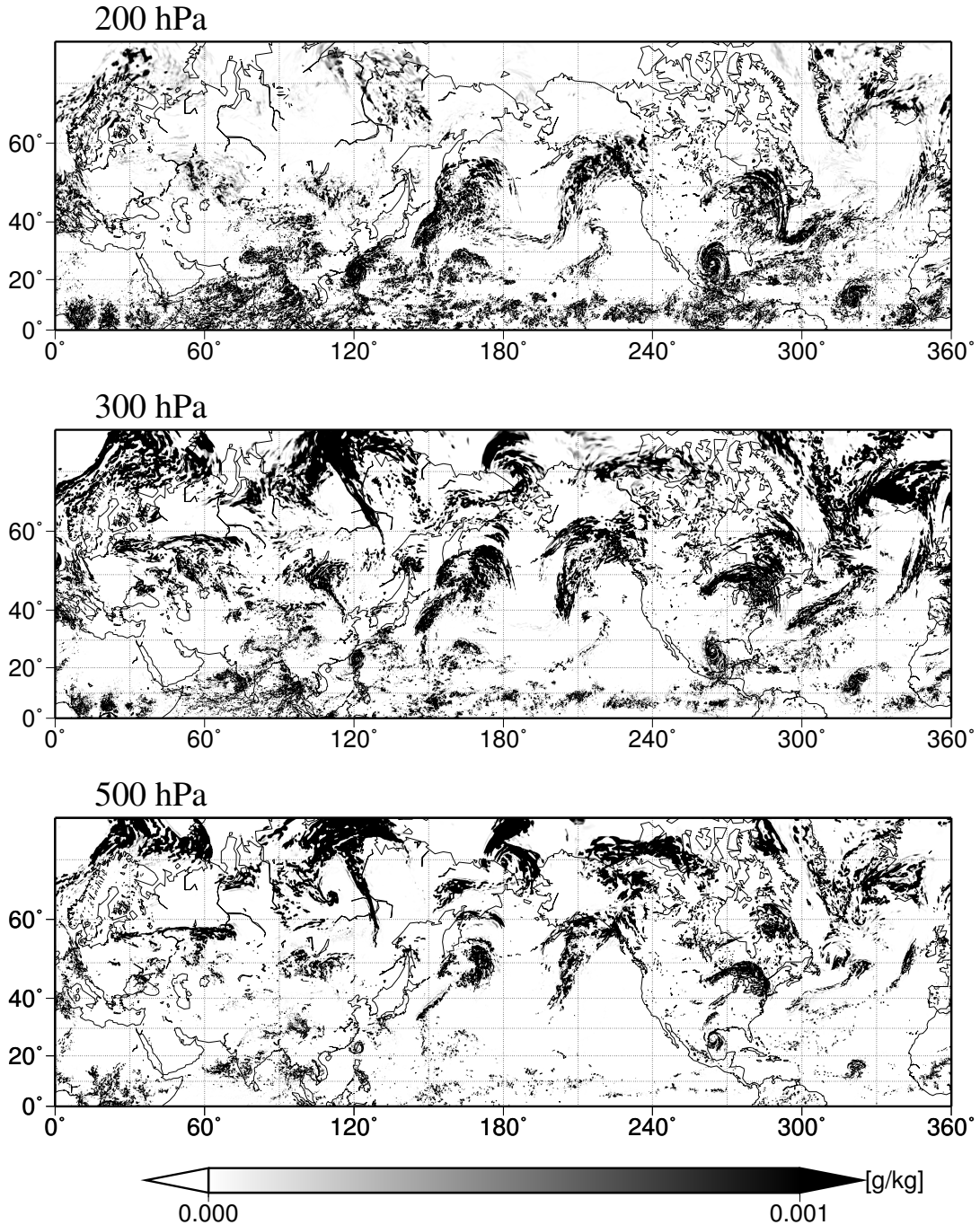


図 16: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 雲氷 (g/kg) の X-Y 平面図 . 上から 200hPa , 300hPa , 500hPa 面の分布をそれぞれ表している .

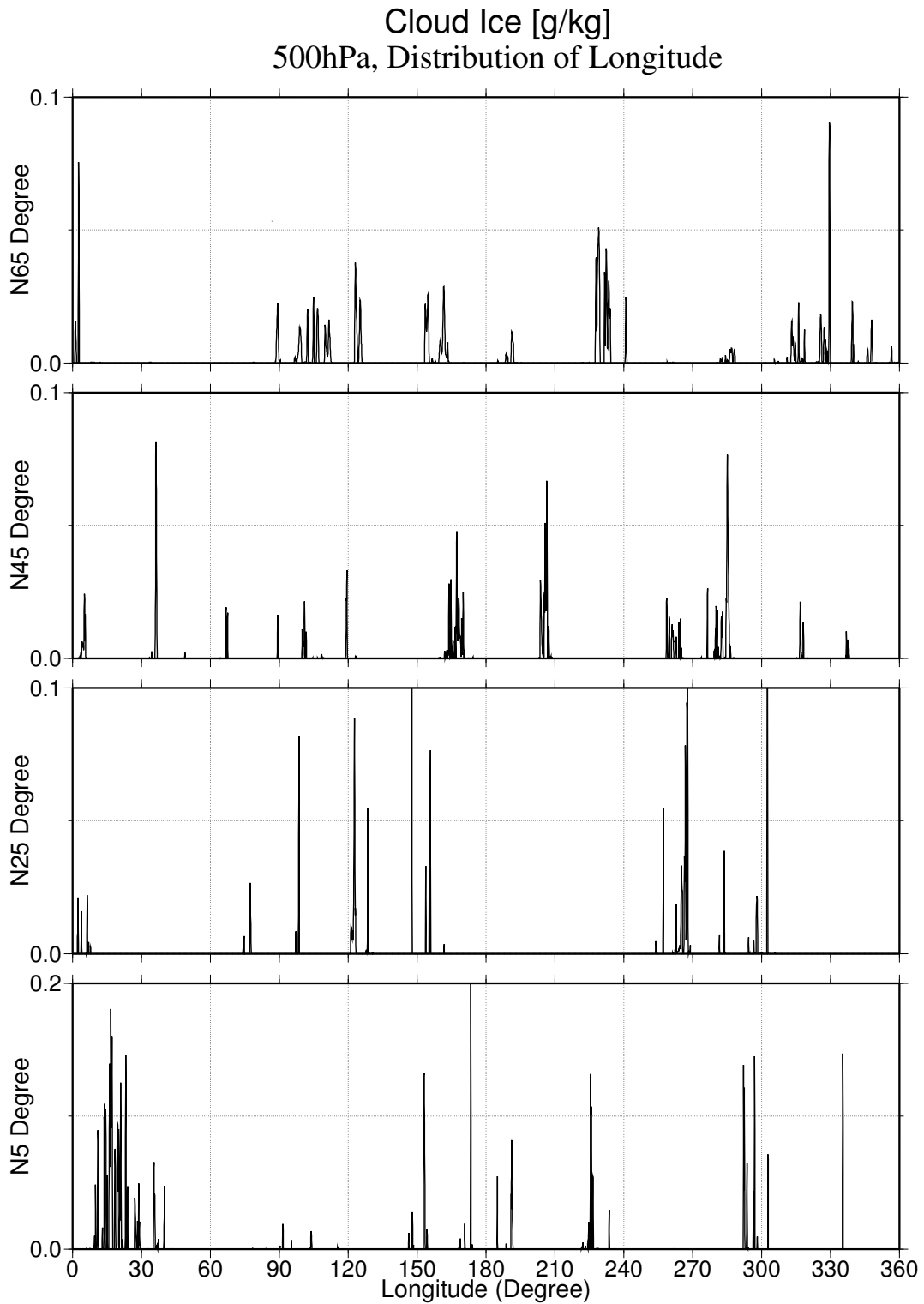


図 17: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子), 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 500hPa 面における雲氷 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65°, 北緯 45°, 北緯 25°, 北緯 5° をそれぞれ表している .

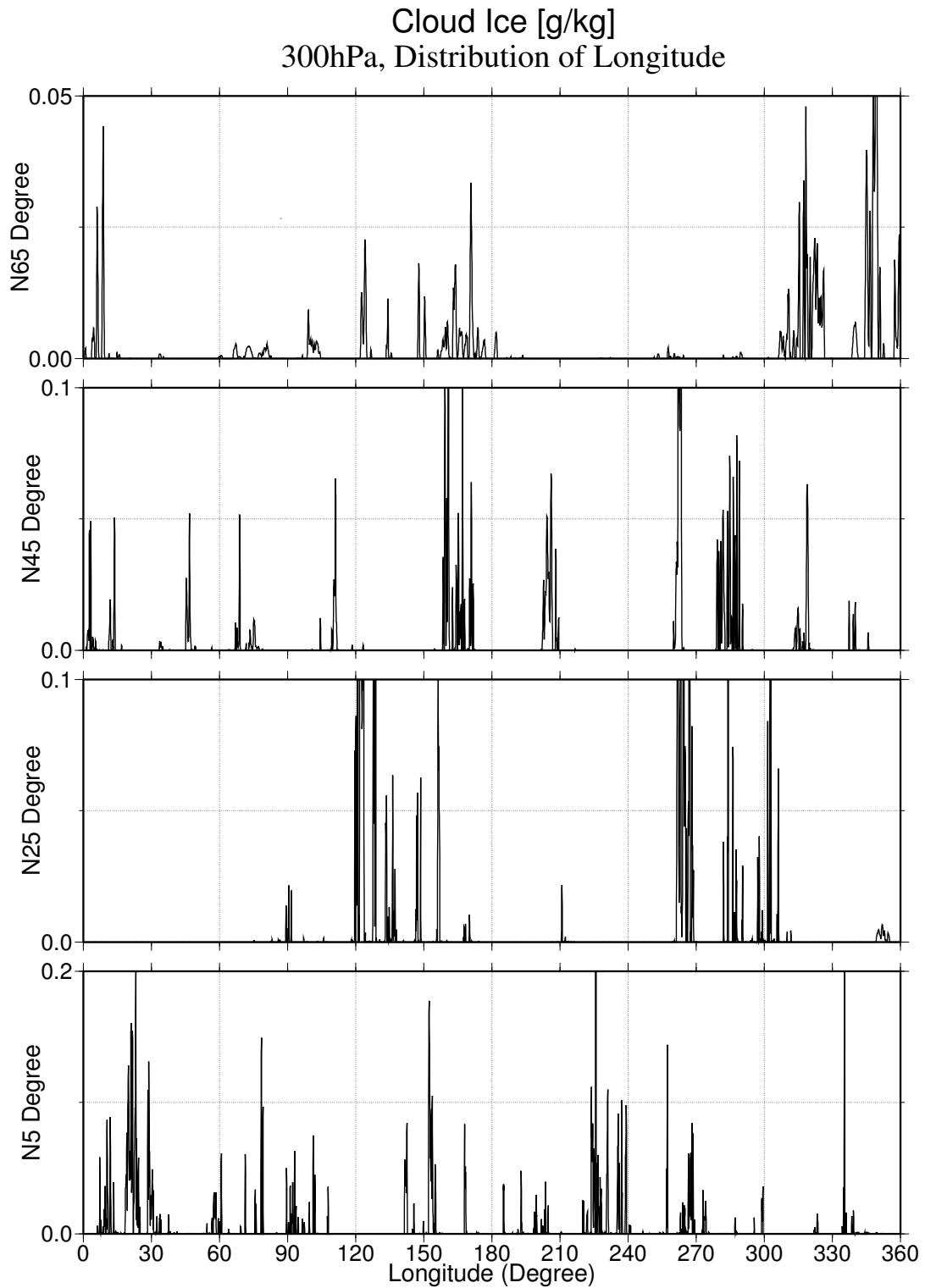


図 18: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 300hPa 面における雲氷 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65° , 北緯 45° , 北緯 25° , 北緯 5° をそれぞれ表している .

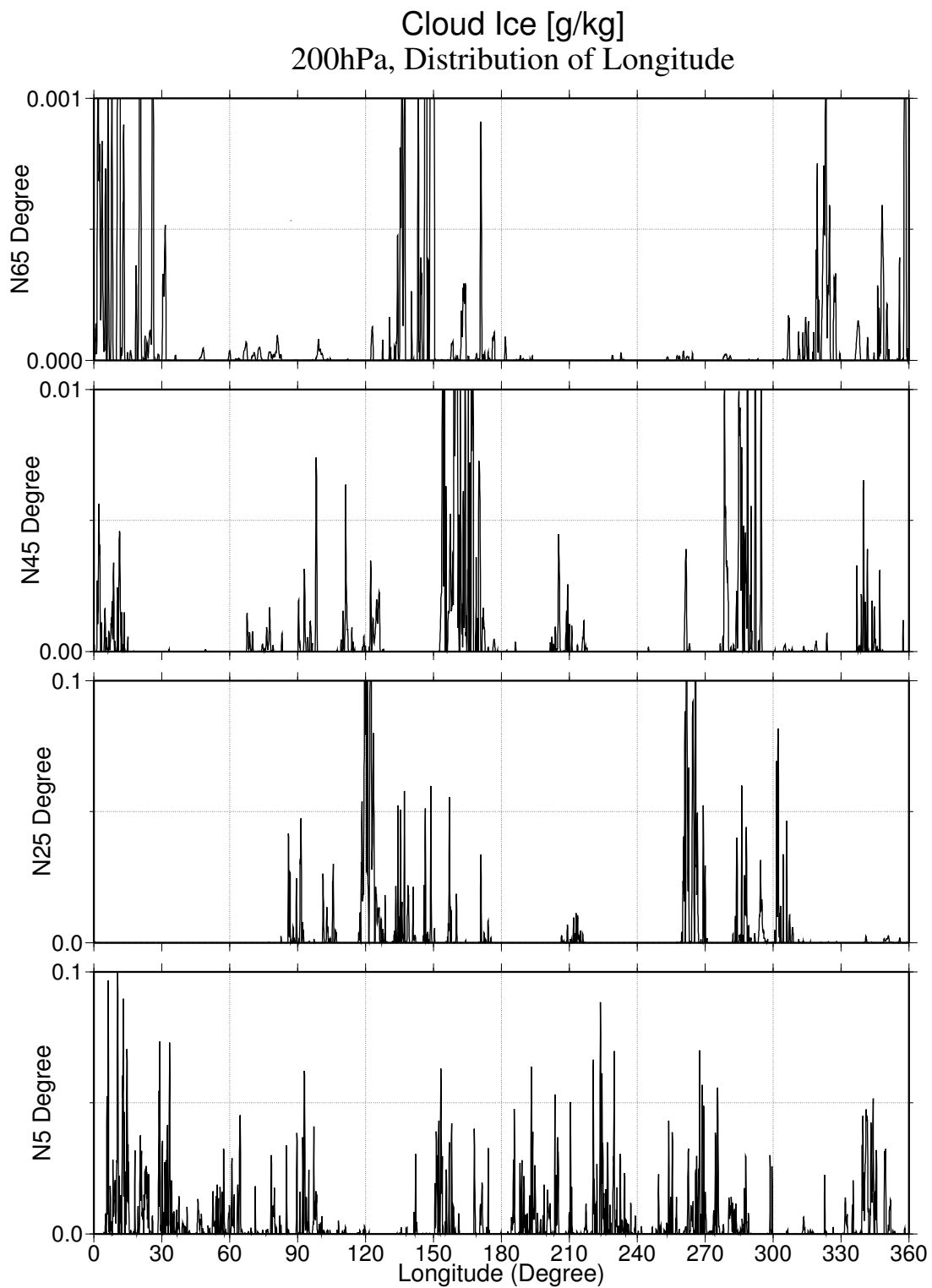


図 19: NICAM , glevel-10 (水平 7.0km 格子) , 2008 年 9 月 13 日 00Z (初期値 2008 年 9 月 8 日 12Z から 108 時間後) . 200hPa 面における雲氷 (g/kg) の各緯度に沿った経度分布 . 上から北緯 65° , 北緯 45° , 北緯 25° , 北緯 5° をそれぞれ表している .

Energy Spectrum

Northern Hemispheric 'OLR'

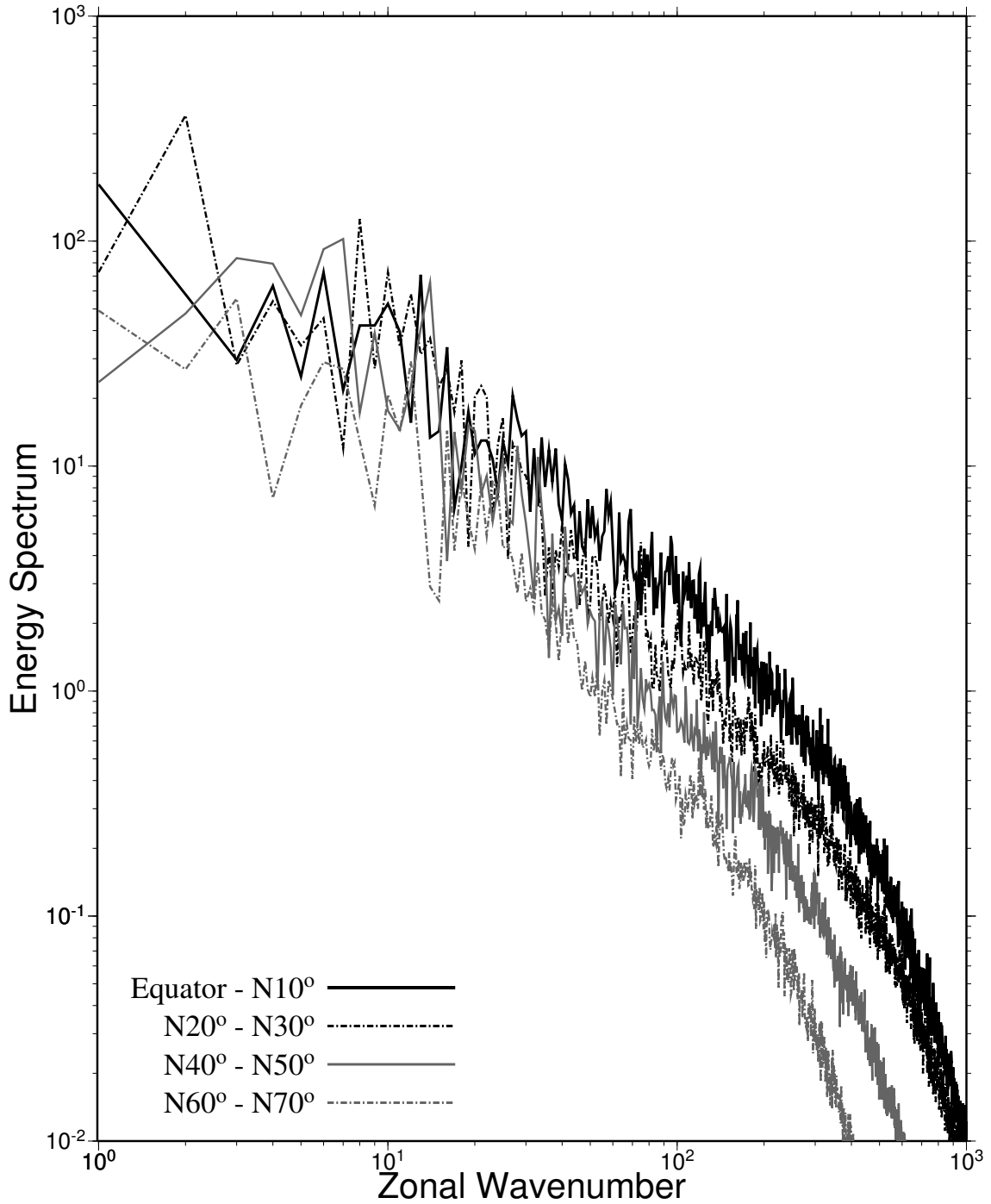


図 20: 4つの緯度帯における OLR (W/m^2) のスペクトル。

Energy Spectrum Northern Hemispheric 'W Wind'

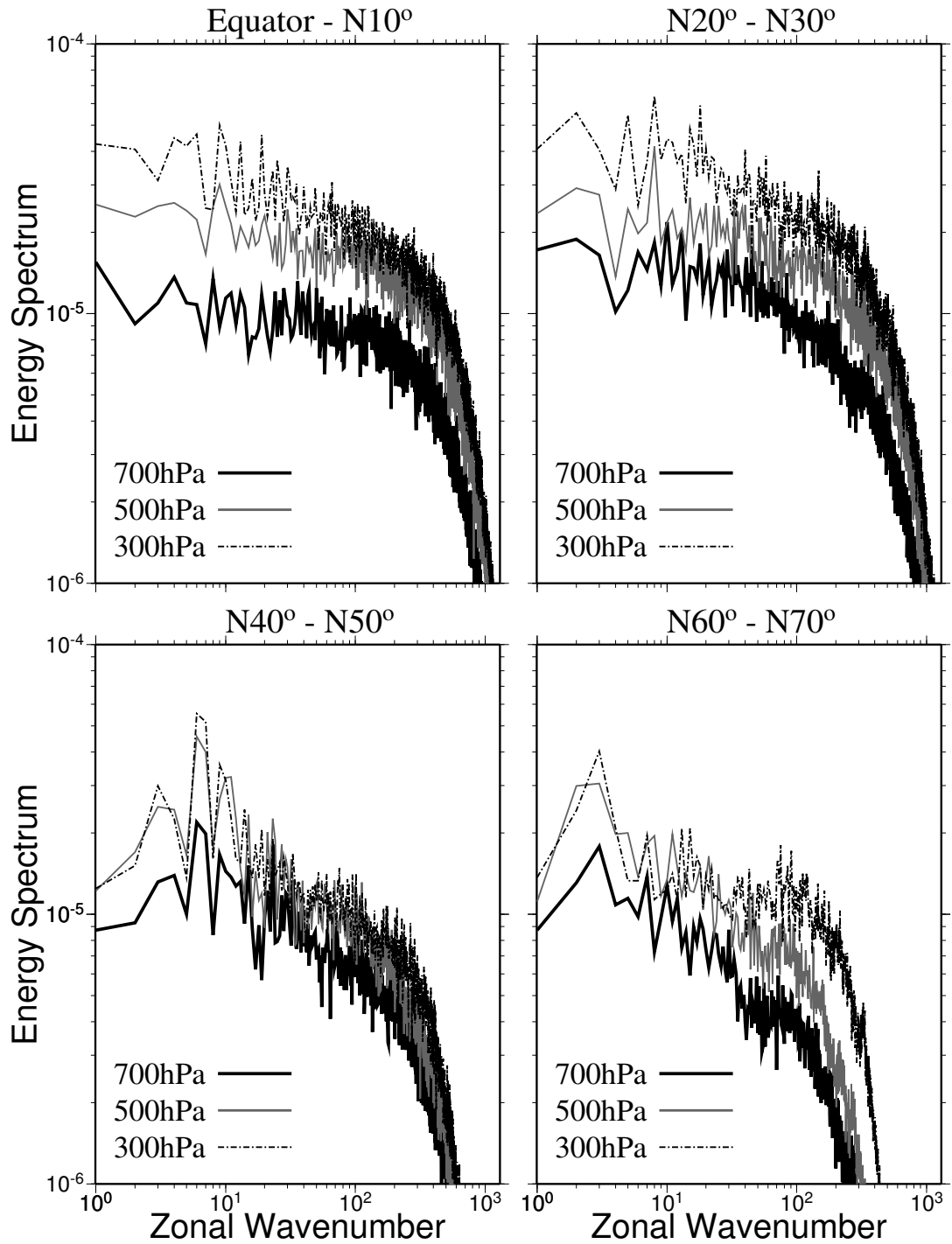


図 21: 4つの緯度帯における鉛直速度 W (m/s) の各高度のスペクトル。

Energy Spectrum Northern Hemispheric 'Specific Humidity'

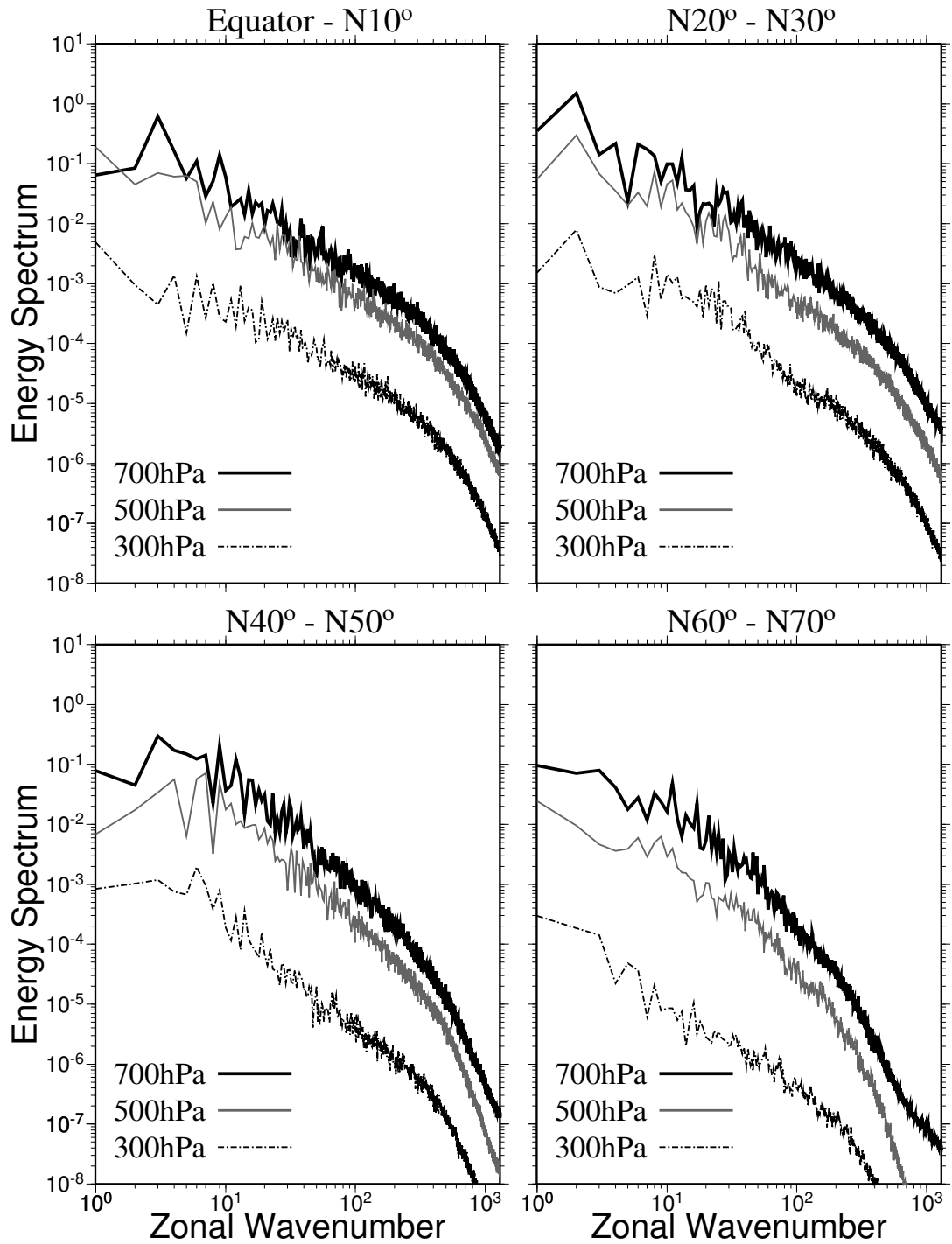


図 22: 4つの緯度帯における比湿 Q (g/kg) の各高度のスペクトル。

Energy Spectrum Northern Hemispheric 'Cloud Water'

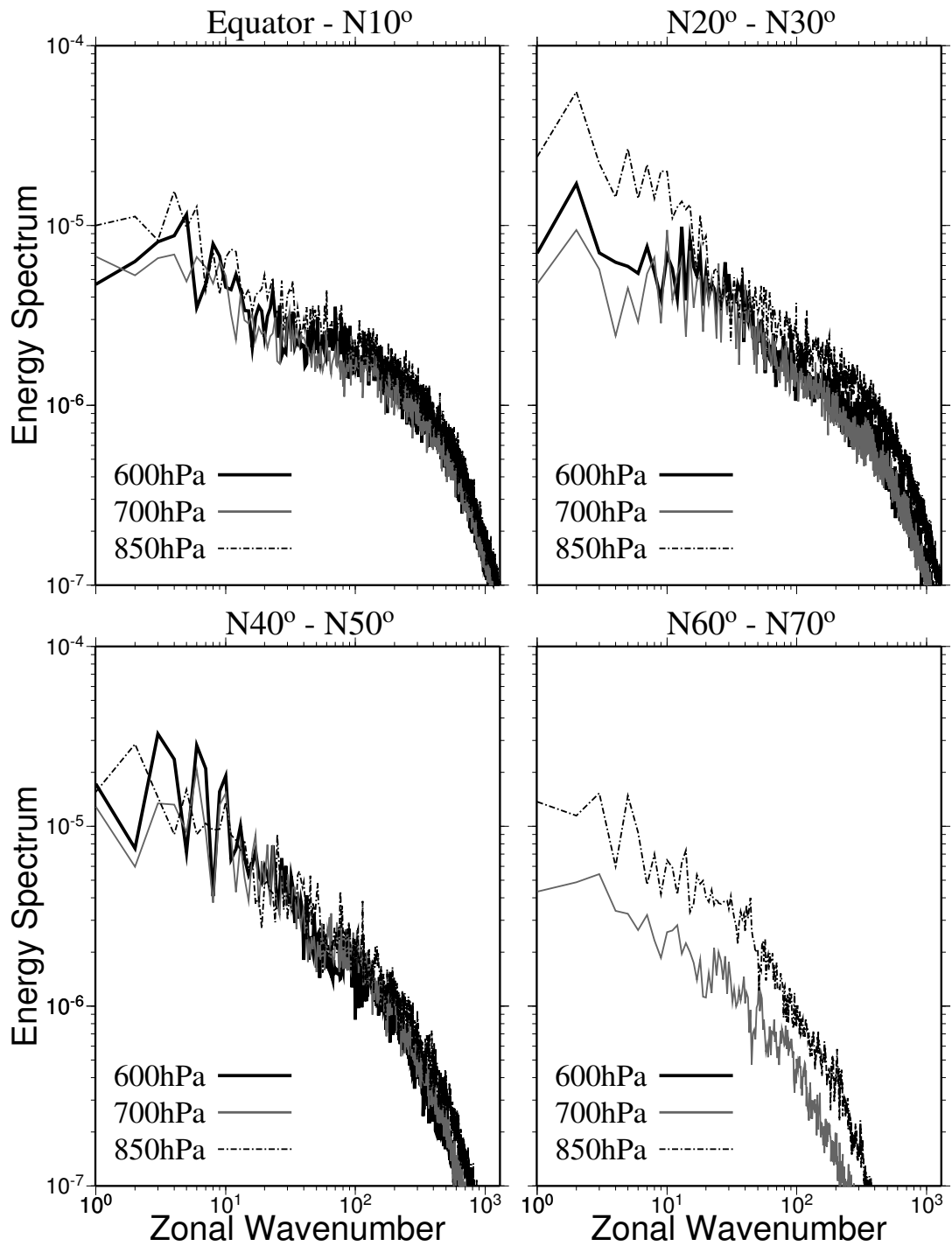


図 23: 4つの緯度帯における雲水 QC (g/kg) の各高度のスペクトル。

Energy Spectrum Northern Hemispheric 'Cloud Ice'

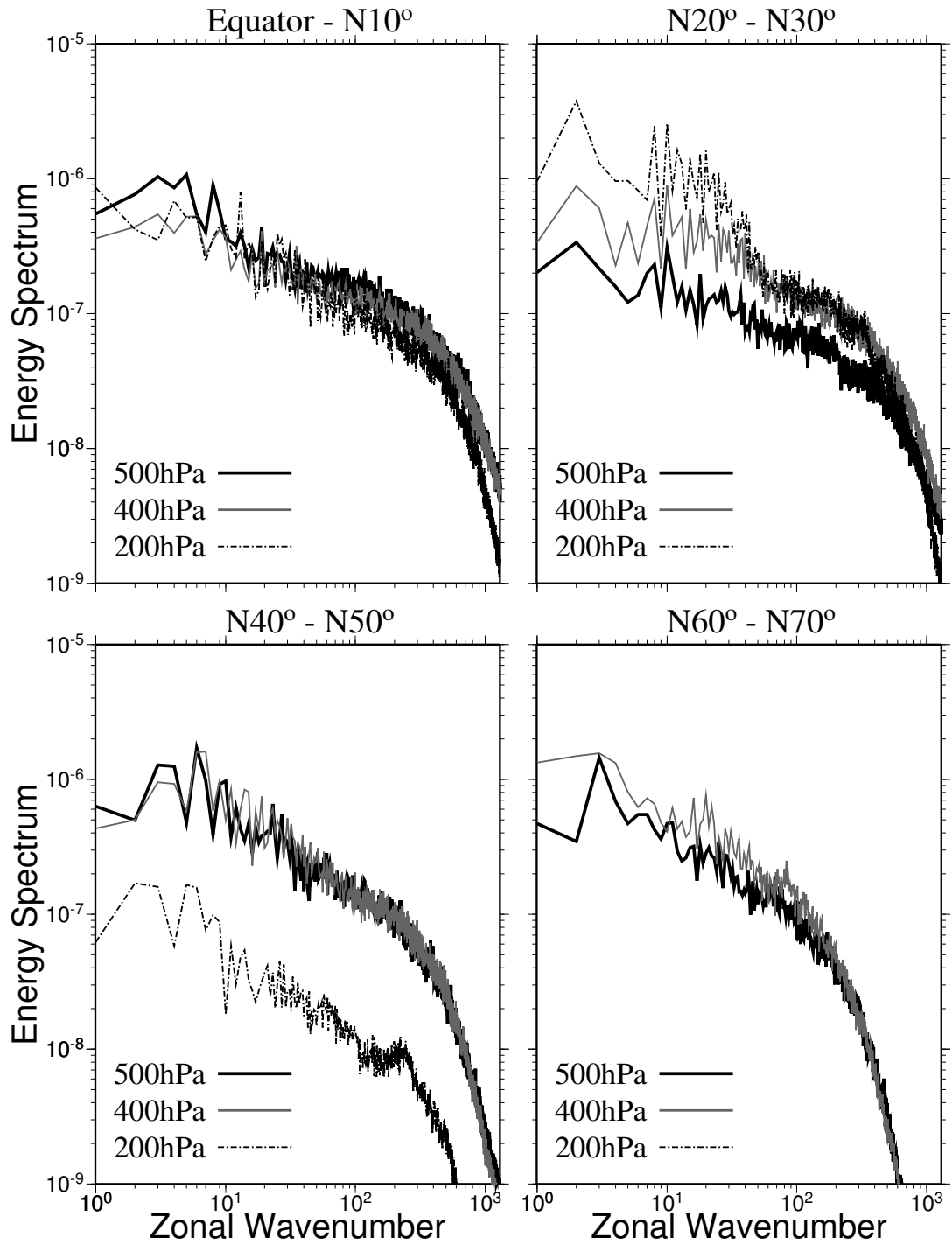


図 24: 4つの緯度帯における雲氷 QI (g/kg) の各高度のスペクトル。

Energy Spectrum

Equator - N10°

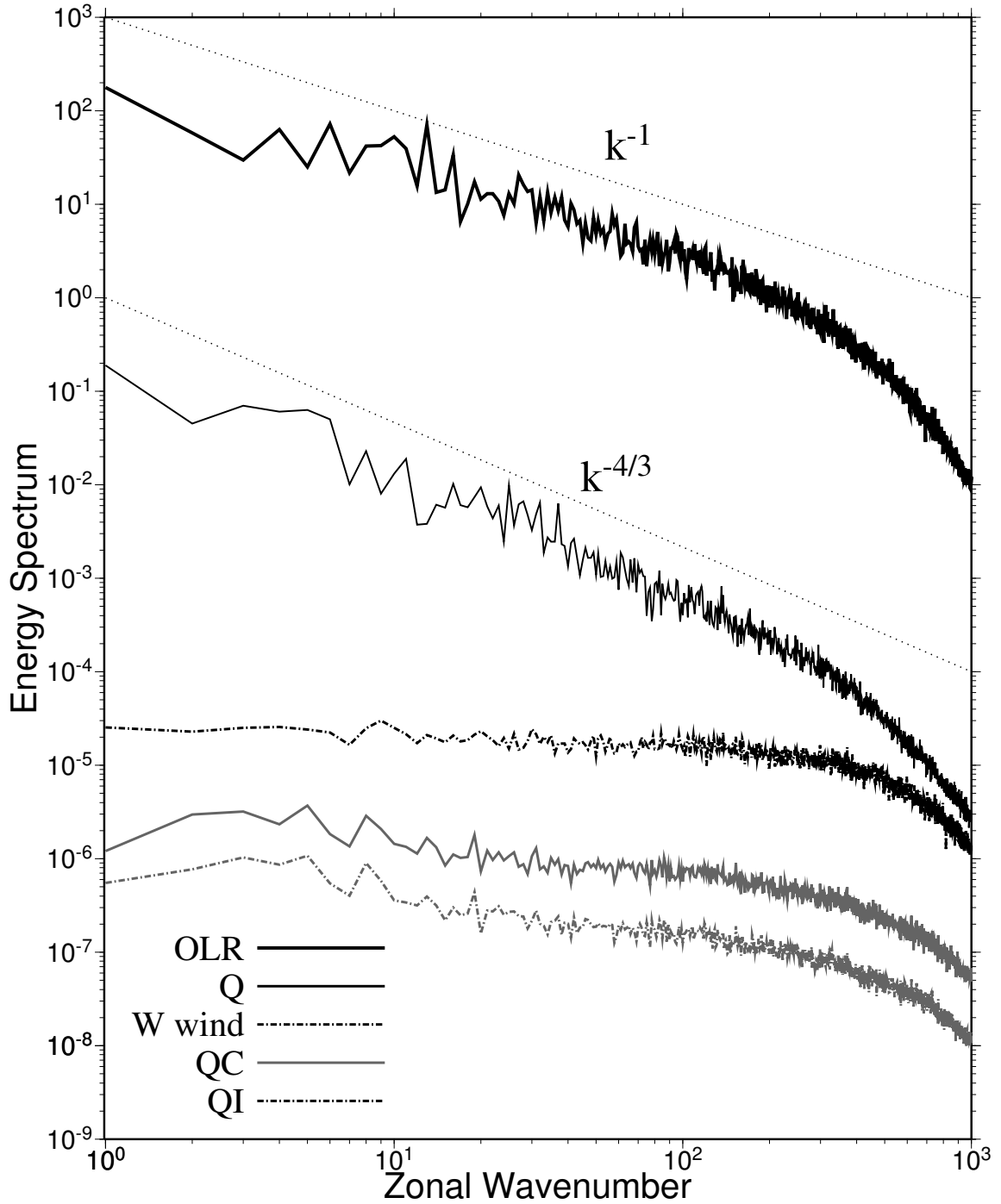


図 25: 赤道-北緯 10°, 500hPa 面における各要素のエネルギースペクトル .

Energy Spectrum

N20° - N30°

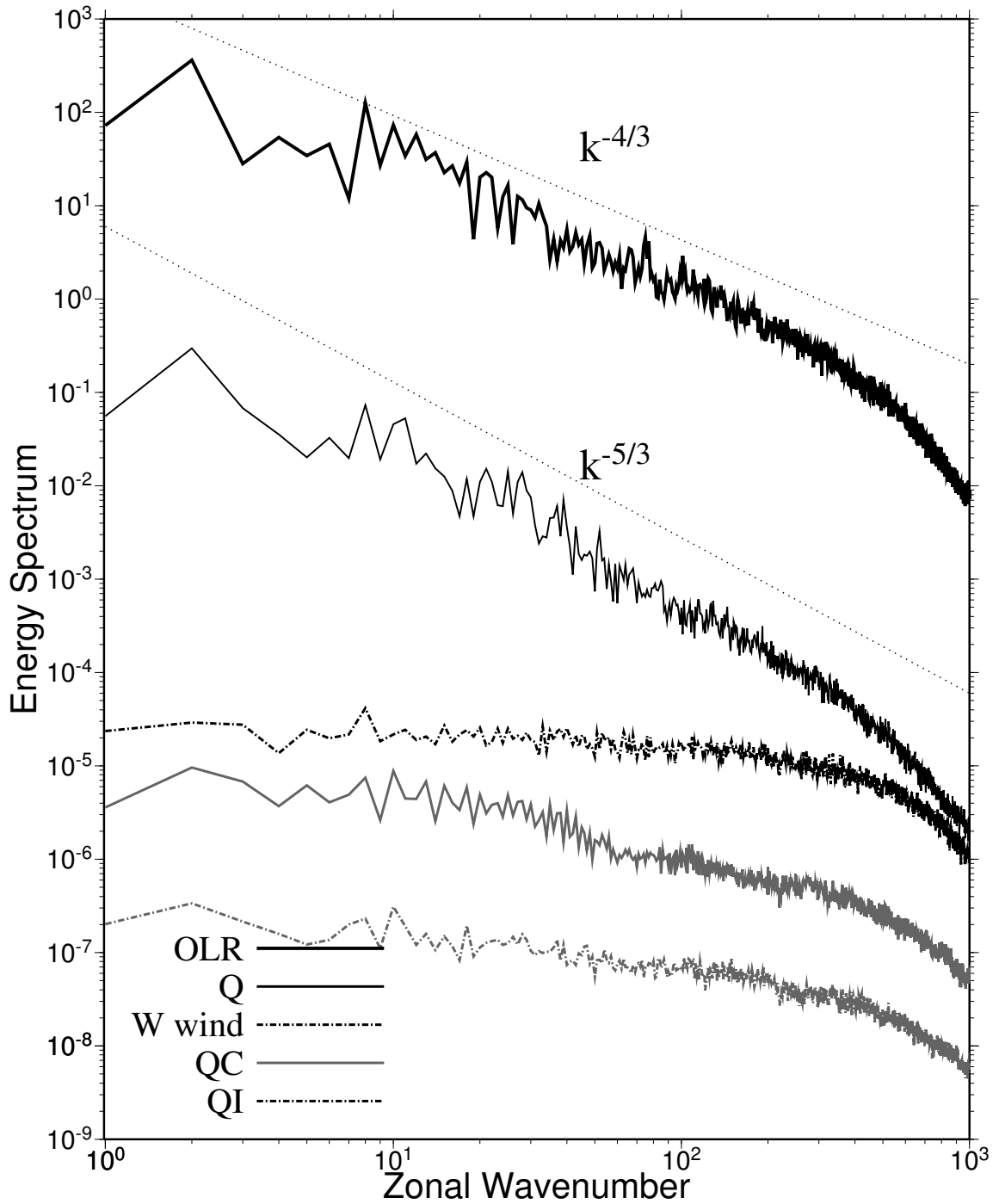


図 26: 北緯 20°-北緯 30° , 500hPa 面における各要素のエネルギースペクトル .

Energy Spectrum

N40° - N50°

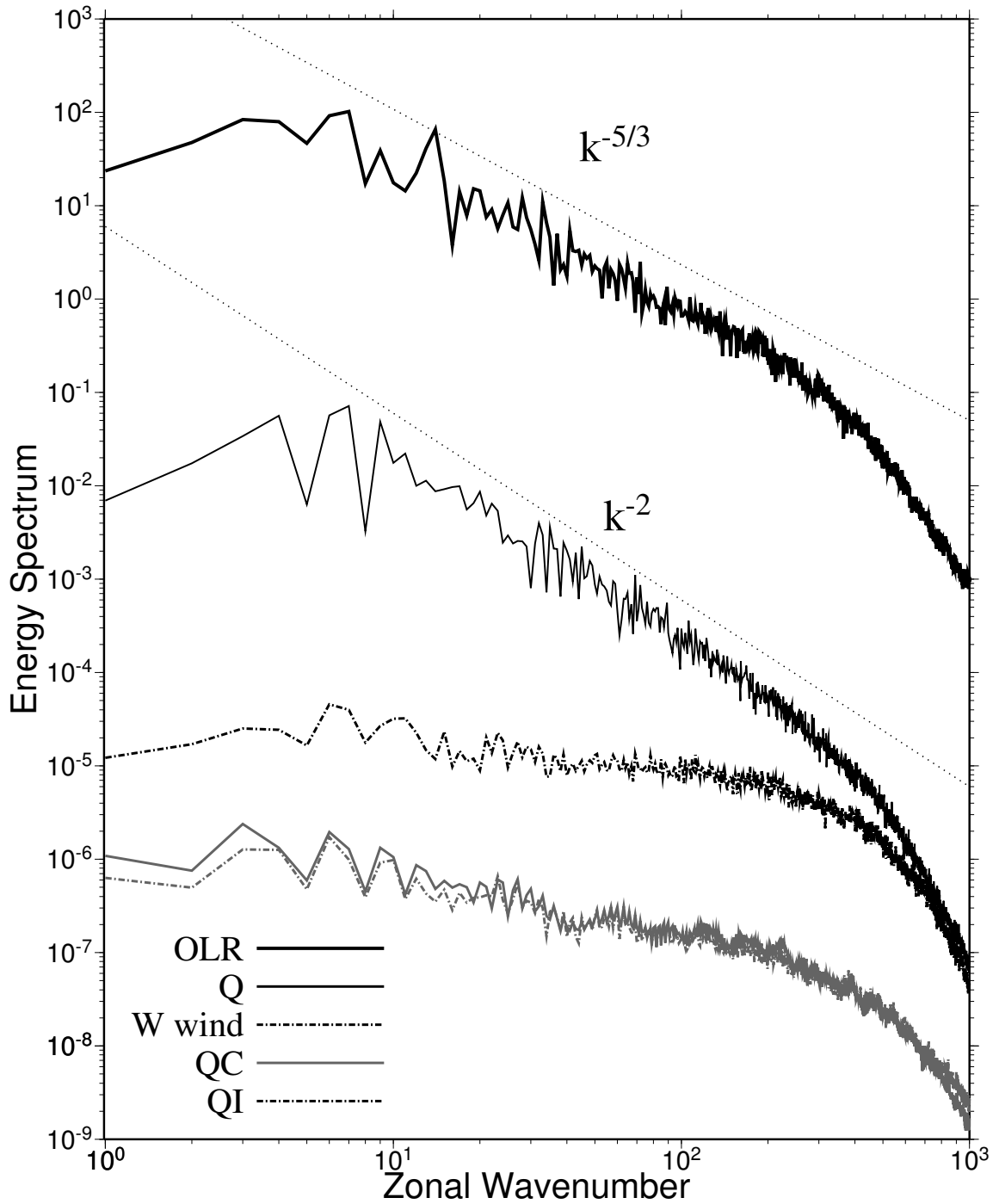


図 27: 北緯 40°-北緯 50° , 500hPa 面における各要素のエネルギースペクトル .

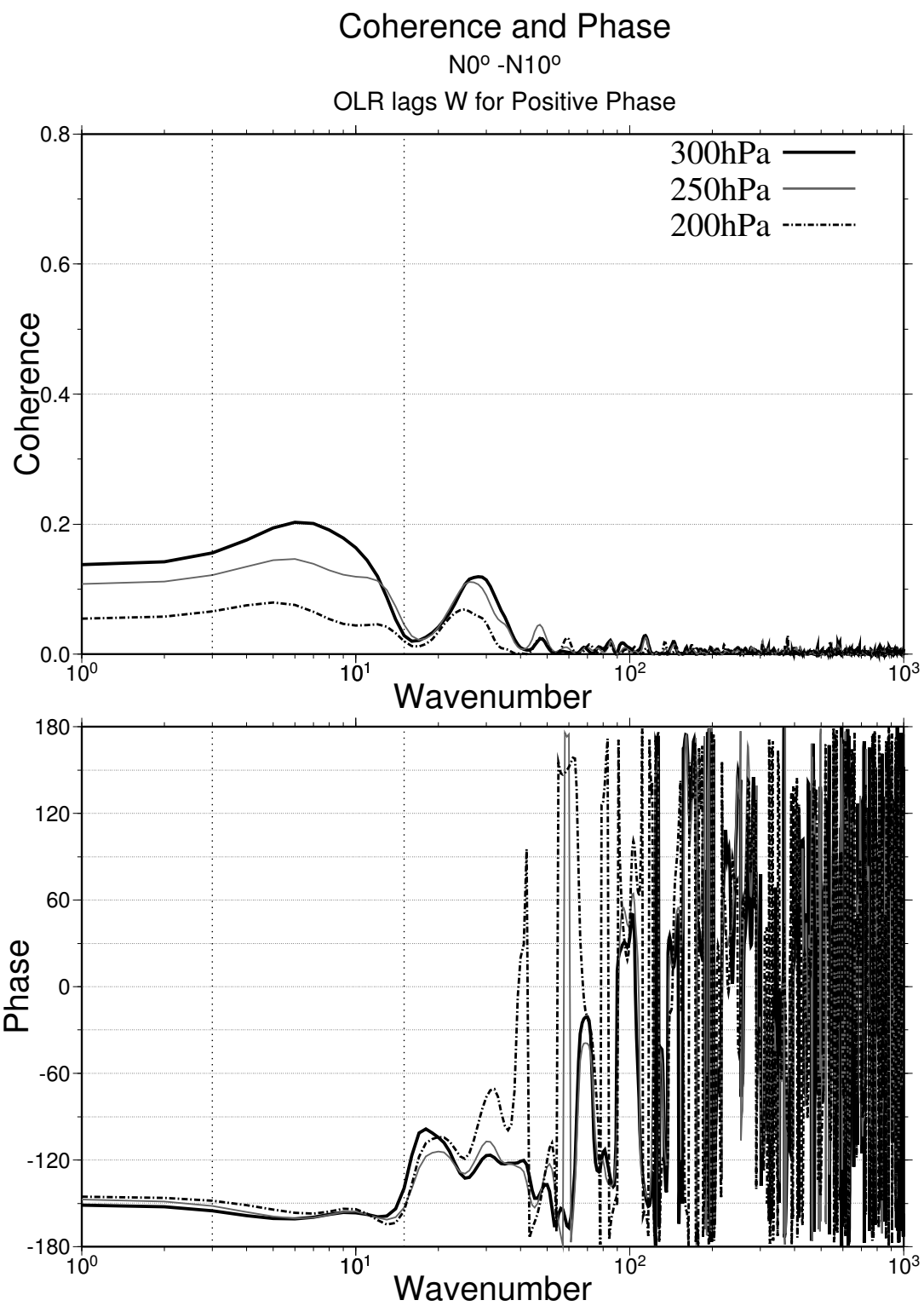


図 28: 赤道-北緯 10° における鉛直速度 W (m/s) に対する OLR (W/m^2) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

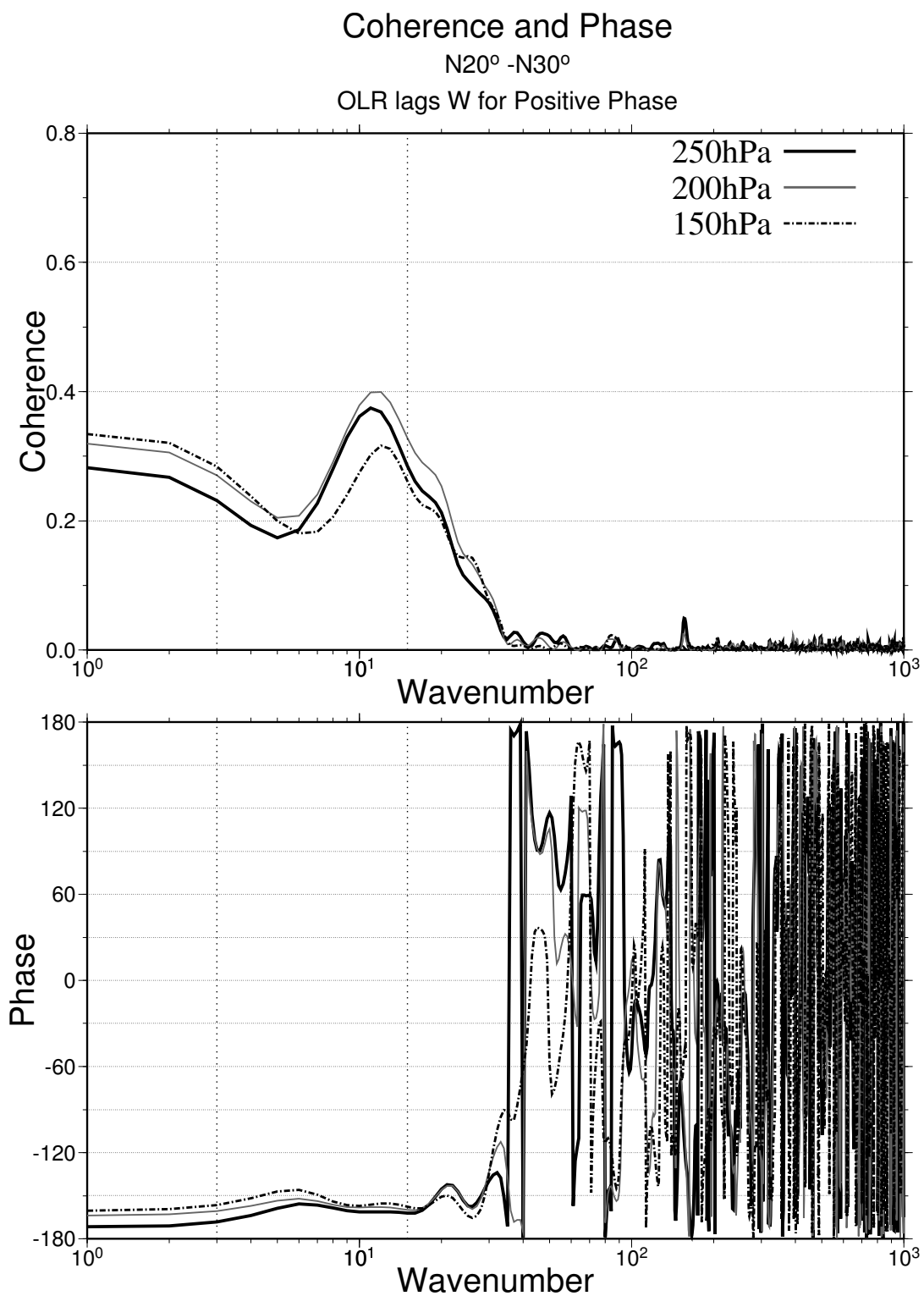


図 29: 北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W (m/s) に対する OLR (W/m^2) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

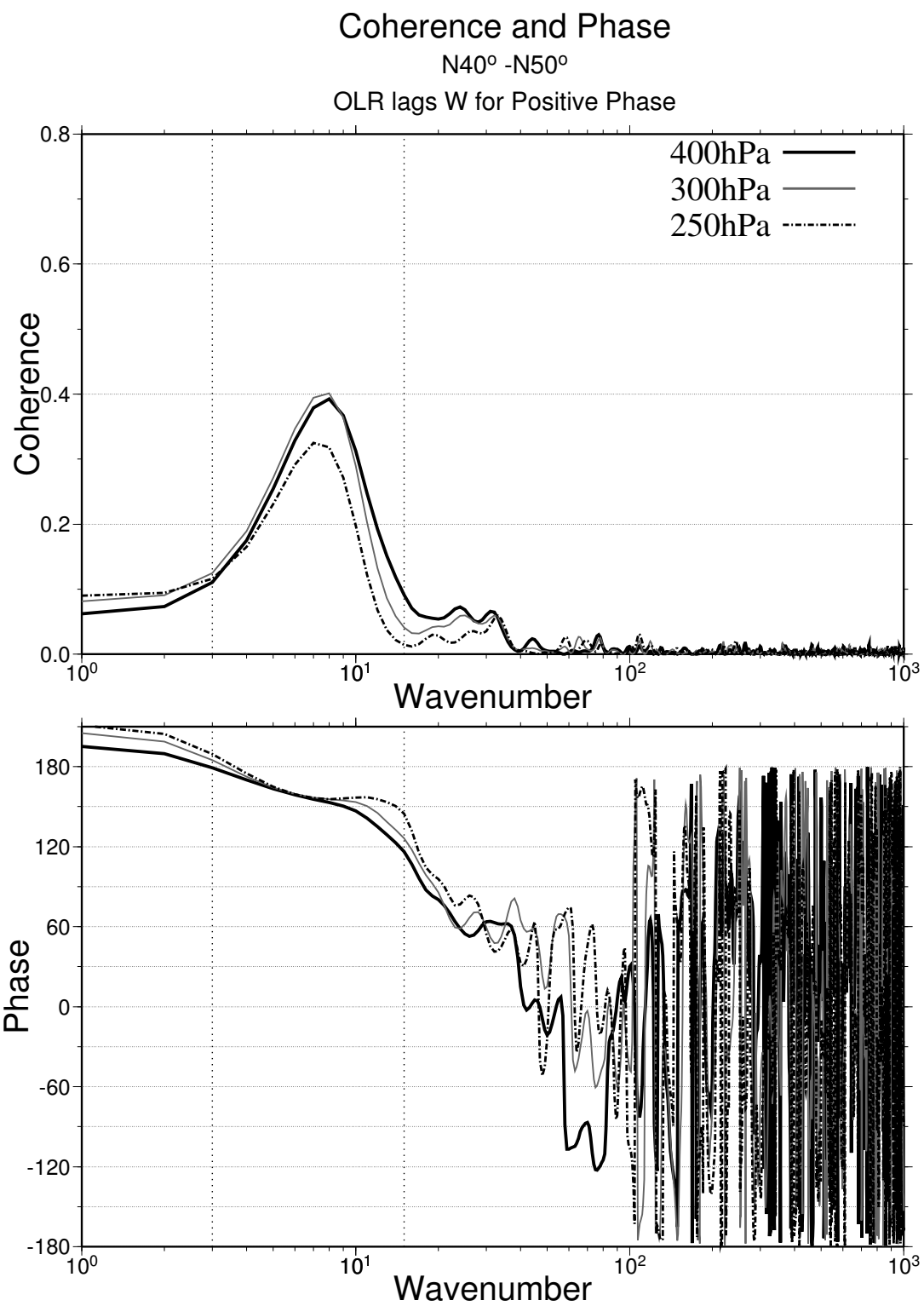


図 30: 北緯 40°-北緯 50° における鉛直速度 W (m/s) に対する OLR (W/m^2) の各高度でのコヒーレンス(上)及びフェイズ(下)。

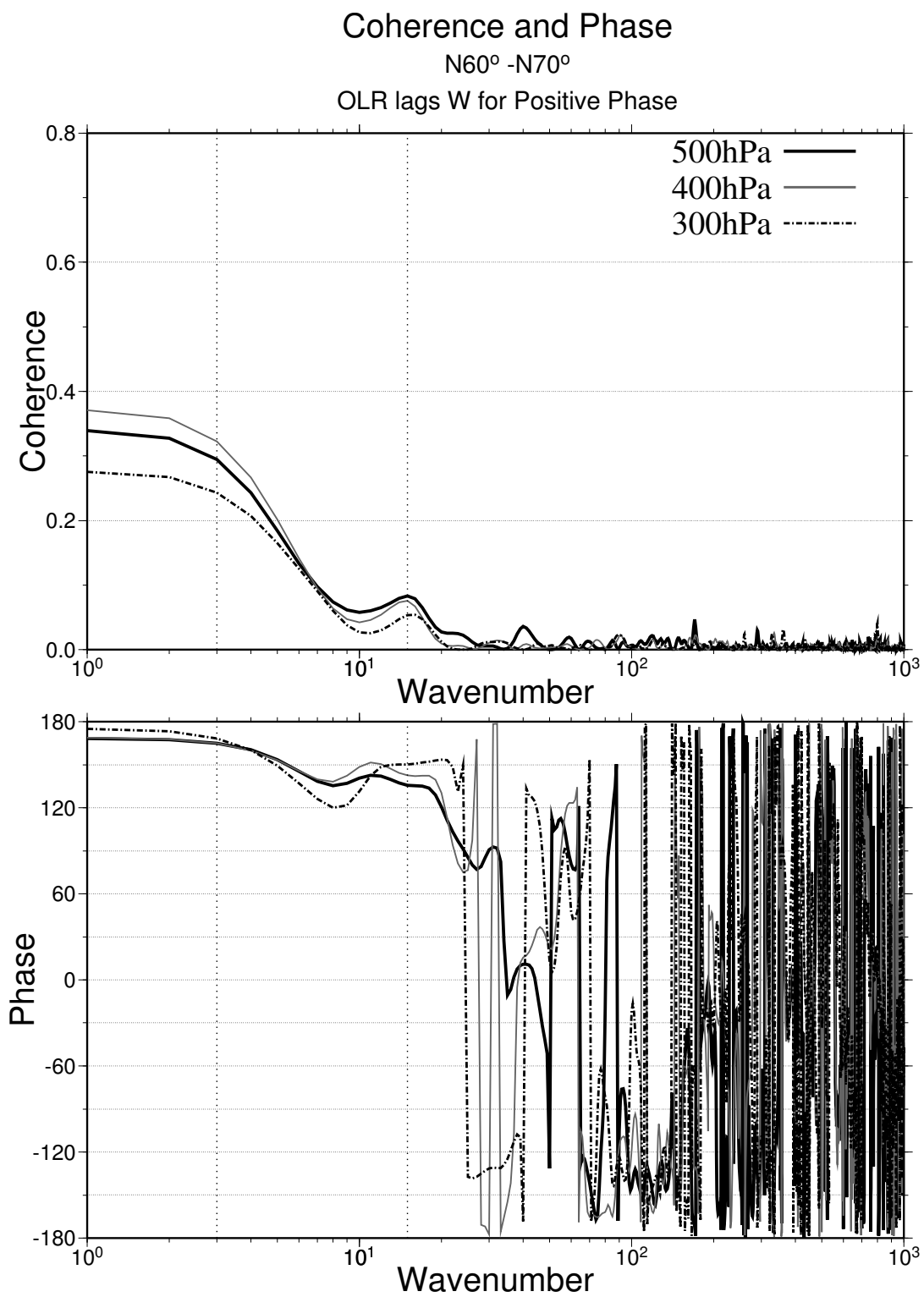


図 31: 北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W (m/s) に対する OLR (W/m^2) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

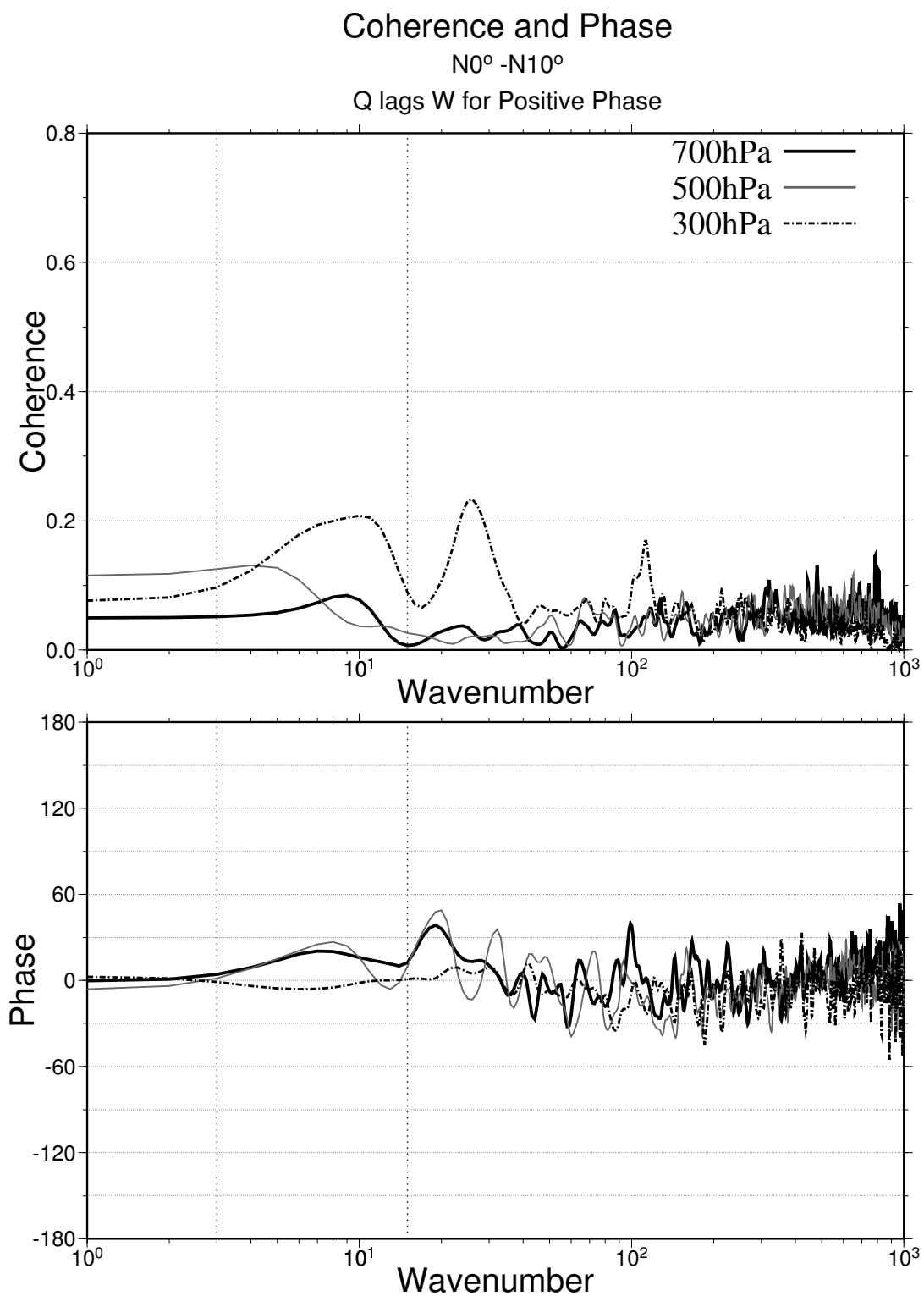


図 32: 赤道-北緯 10° における鉛直速度 W (m/s) に対する比湿 Q (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

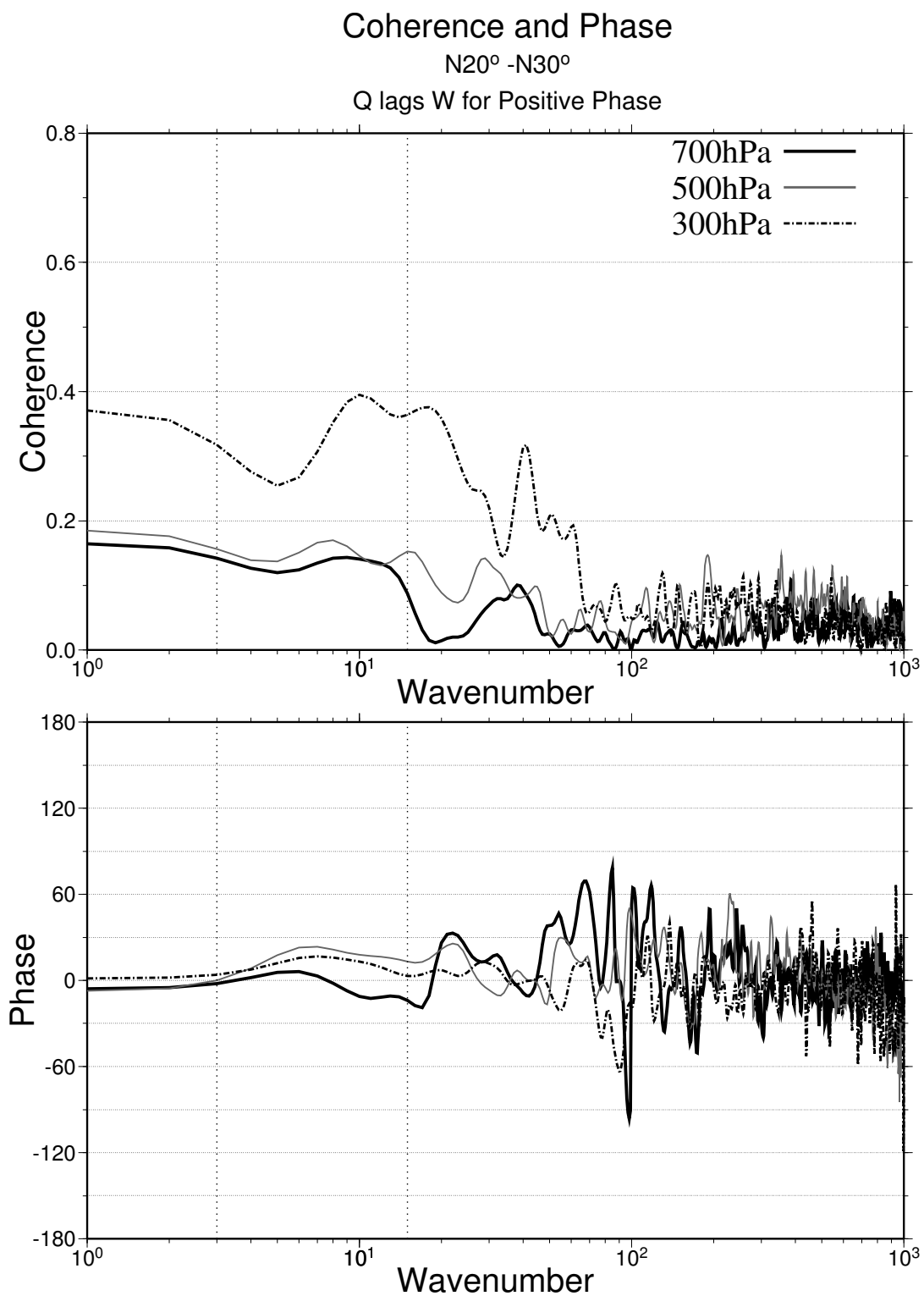


図 33: 北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W (m/s) に対する比湿 Q (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

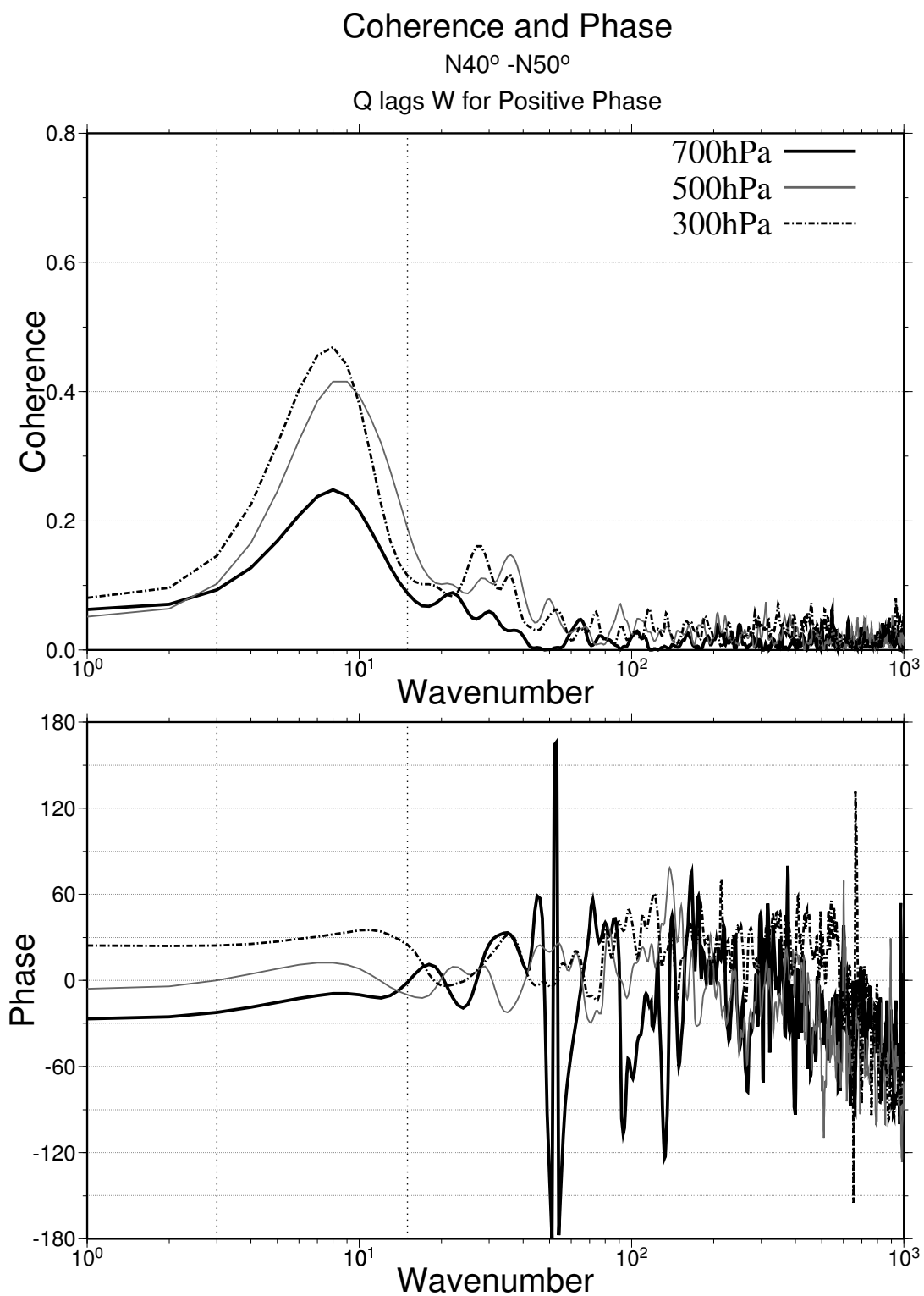


図 34: 北緯 40°–北緯 50° における鉛直速度 W (m/s) に対する比湿 Q (g/kg) の各高度でのコヒーレンス(上)及びフェイズ(下)。

Coherence and Phase

N60° -N70°

Q lags W for Positive Phase

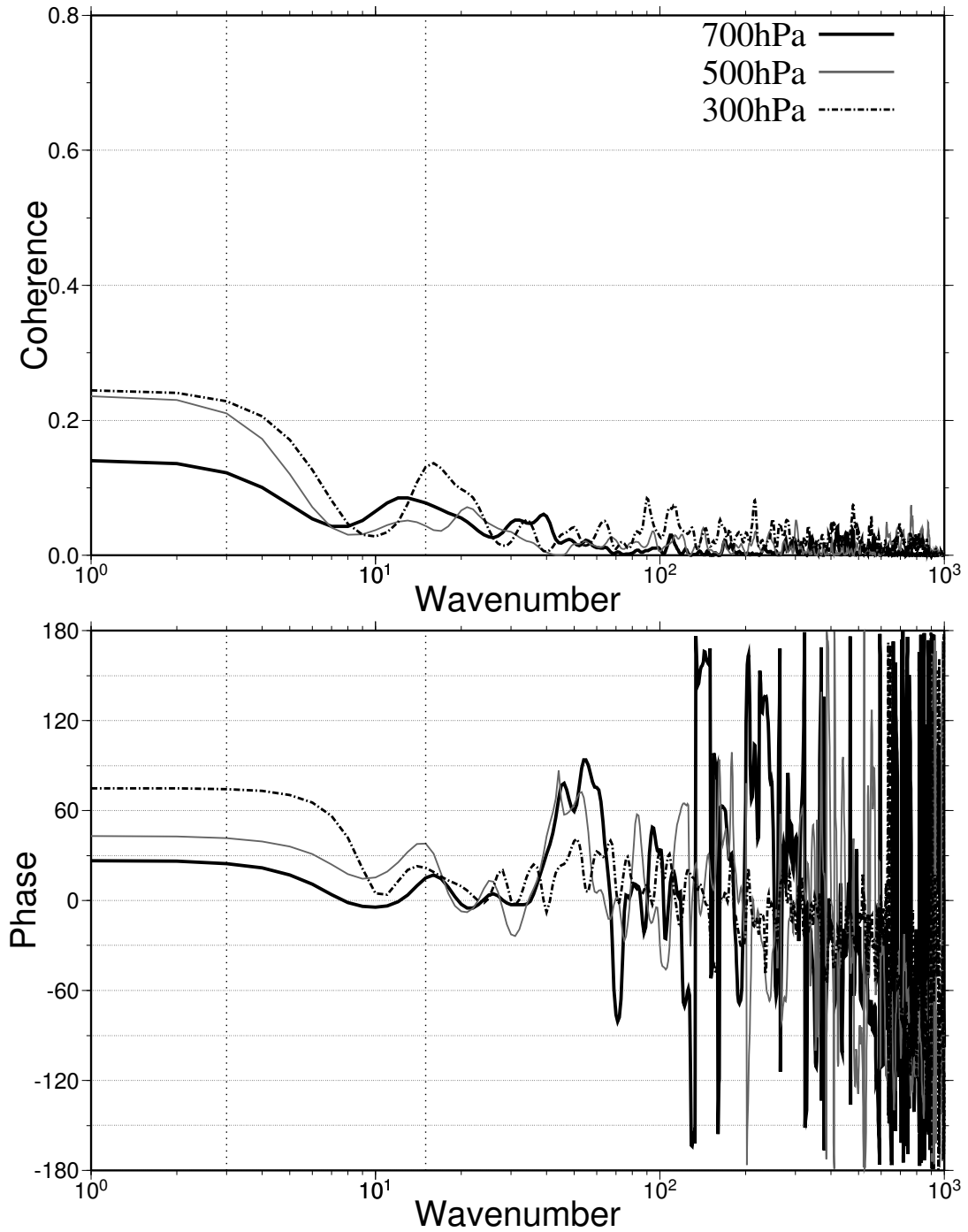


図 35: 北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W (m/s) に対する比湿 Q (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

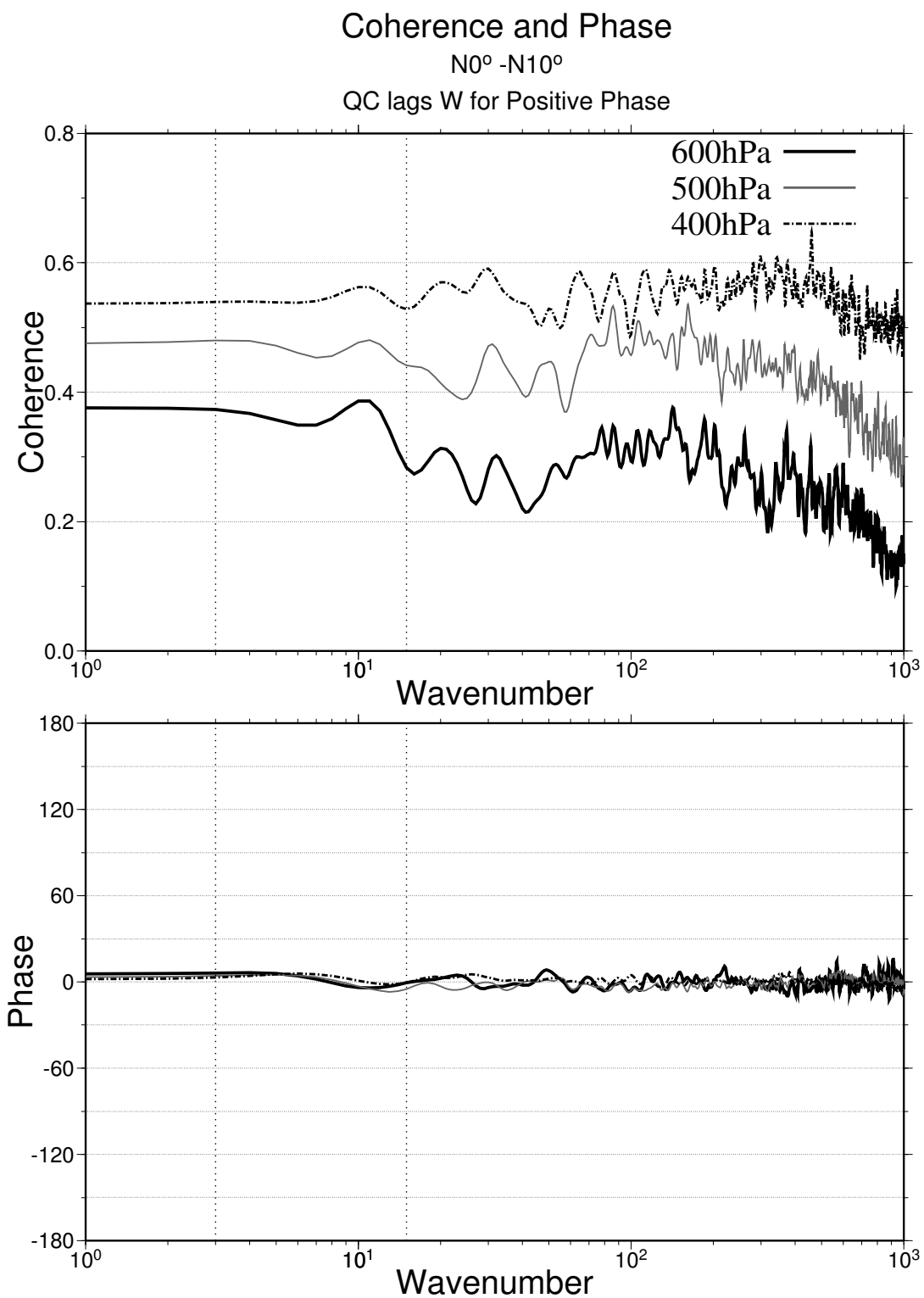


図 36: 赤道-北緯 10° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲水 QC (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

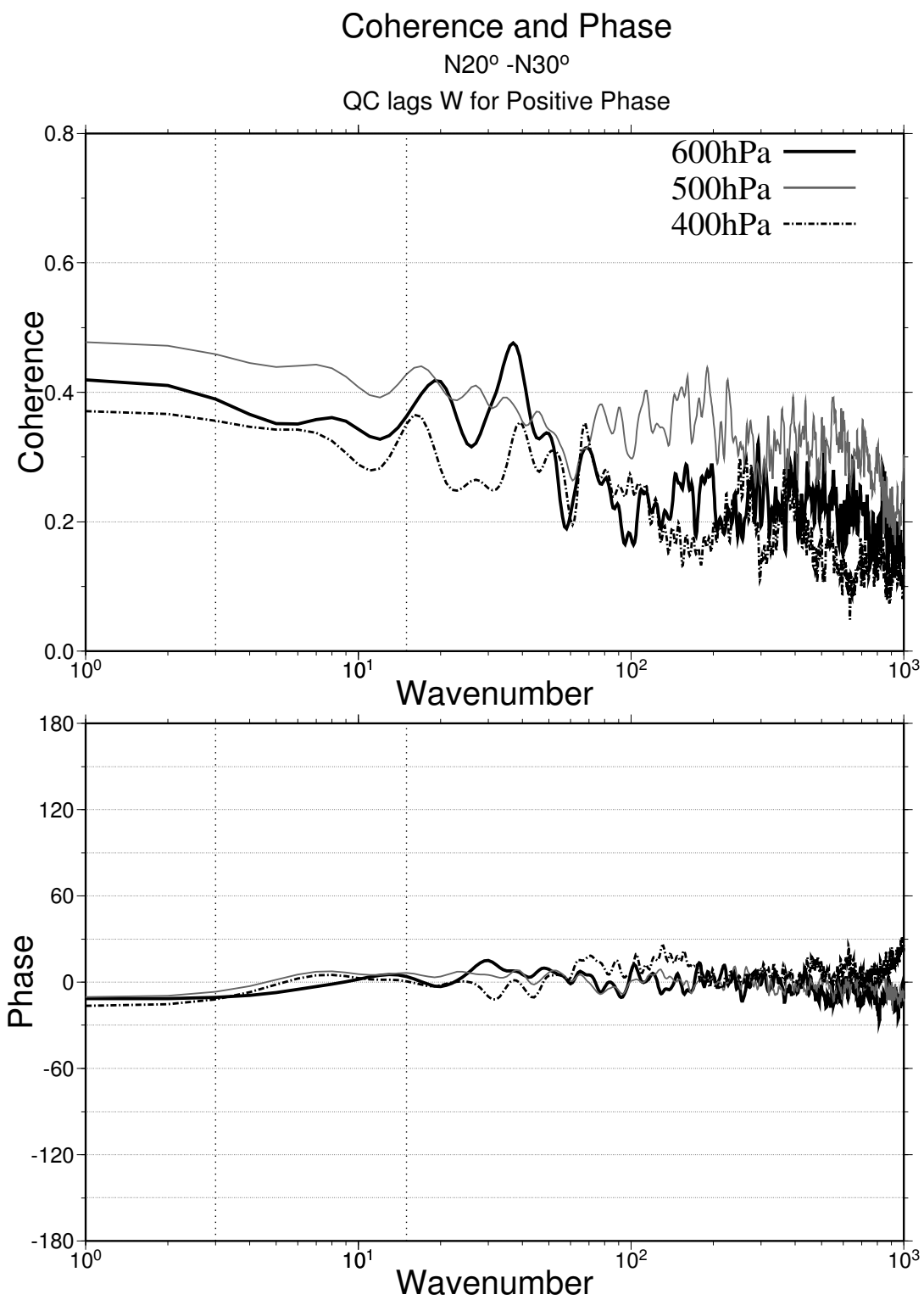


図 37: 北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲水 QC (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

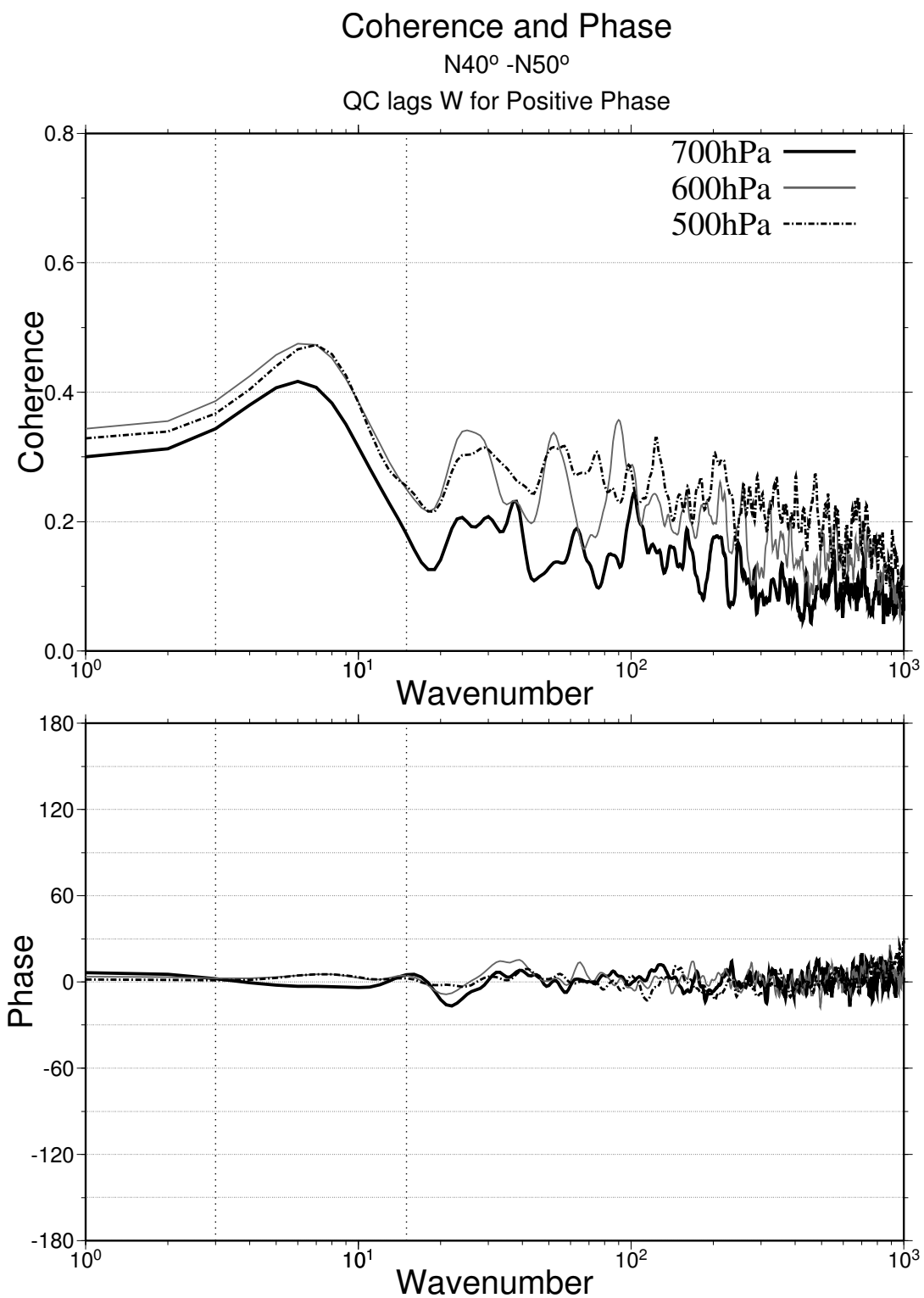


図 38: 北緯 40°–北緯 50° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲水 QC (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

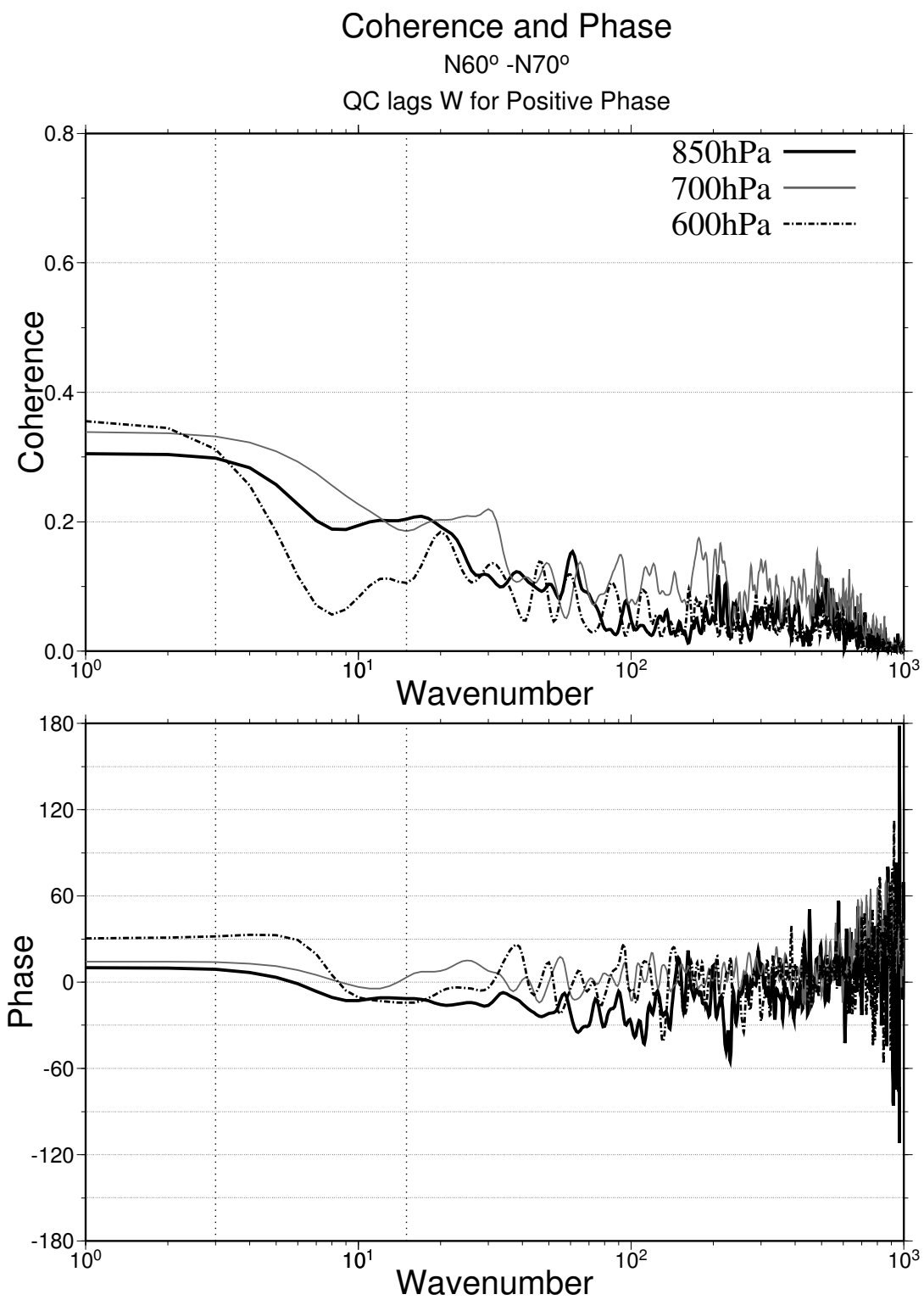


図 39: 北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲水 QC (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下)。

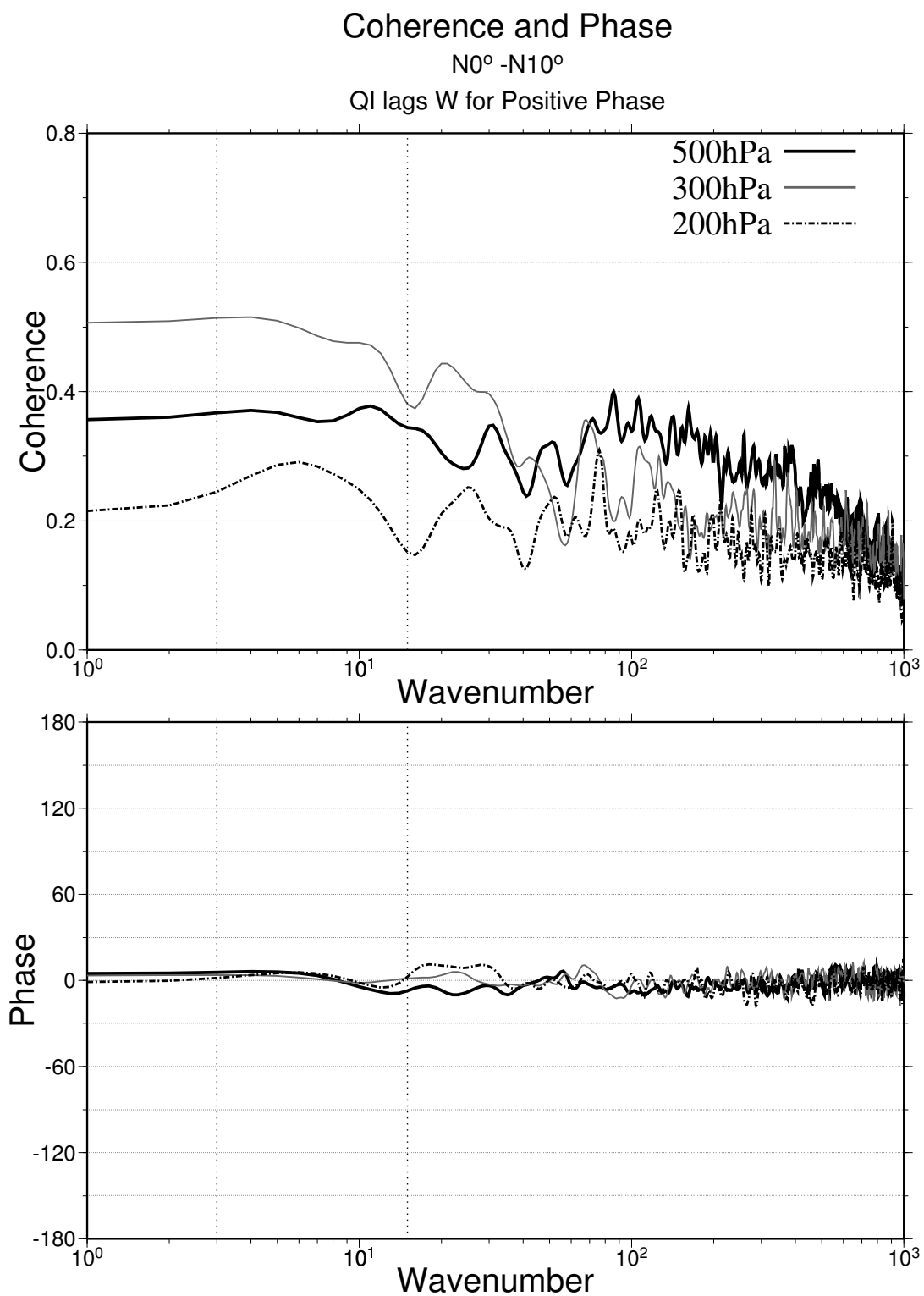


図 40: 赤道-北緯 10° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲氷 QI (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

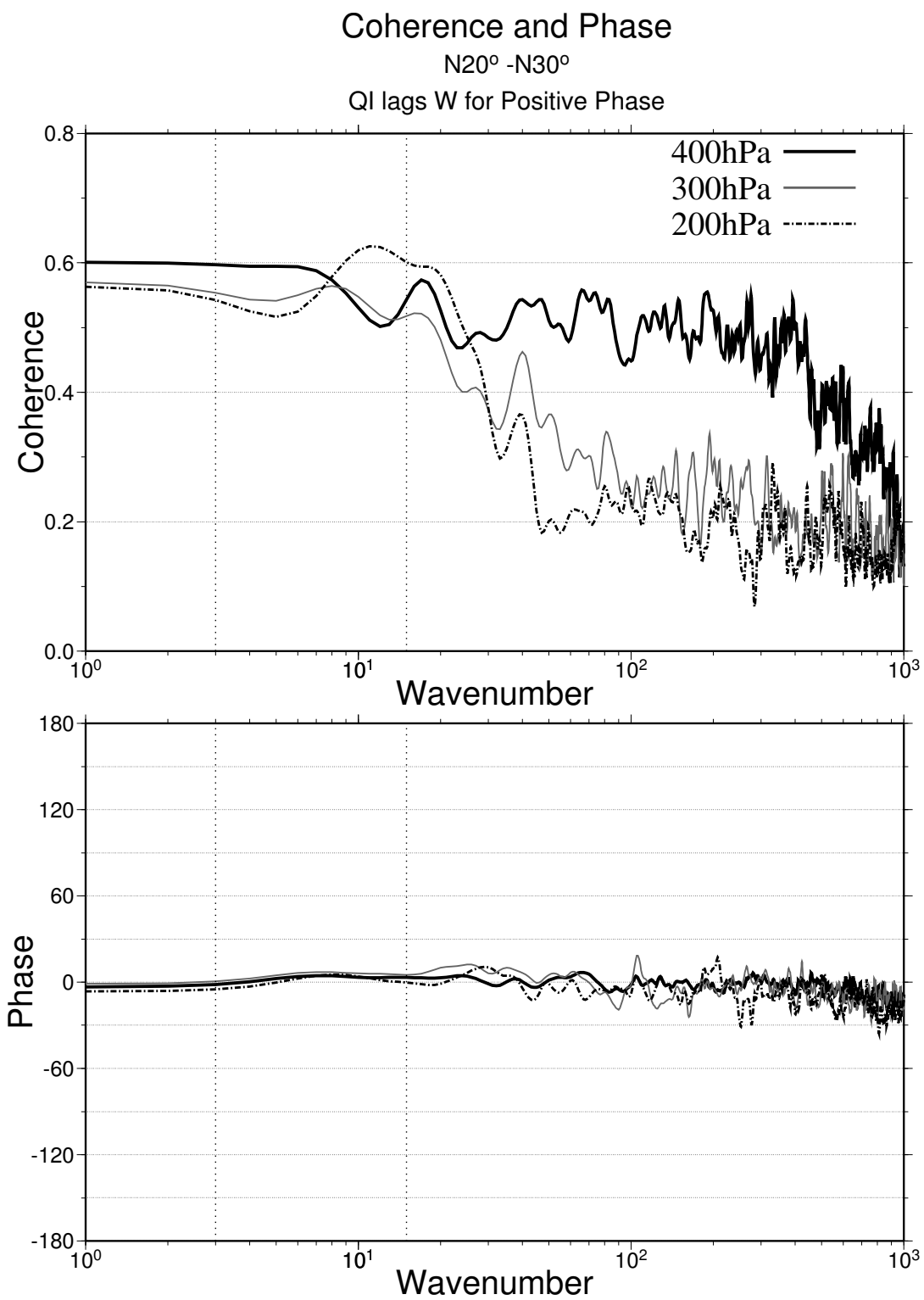


図 41: 北緯 20°–北緯 30° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲氷 QI (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

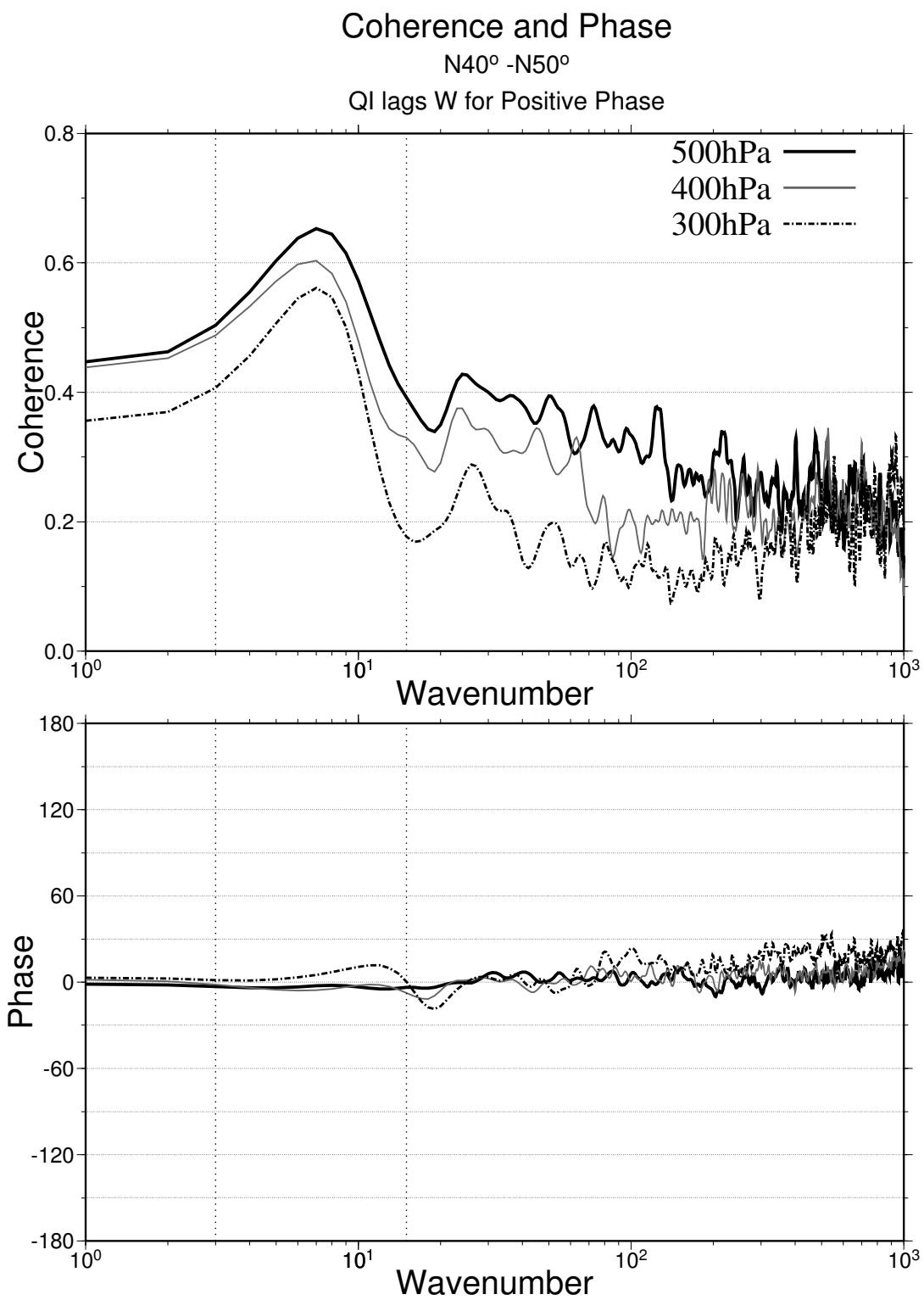


図 42: 北緯 40°–北緯 50° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲氷 QI (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

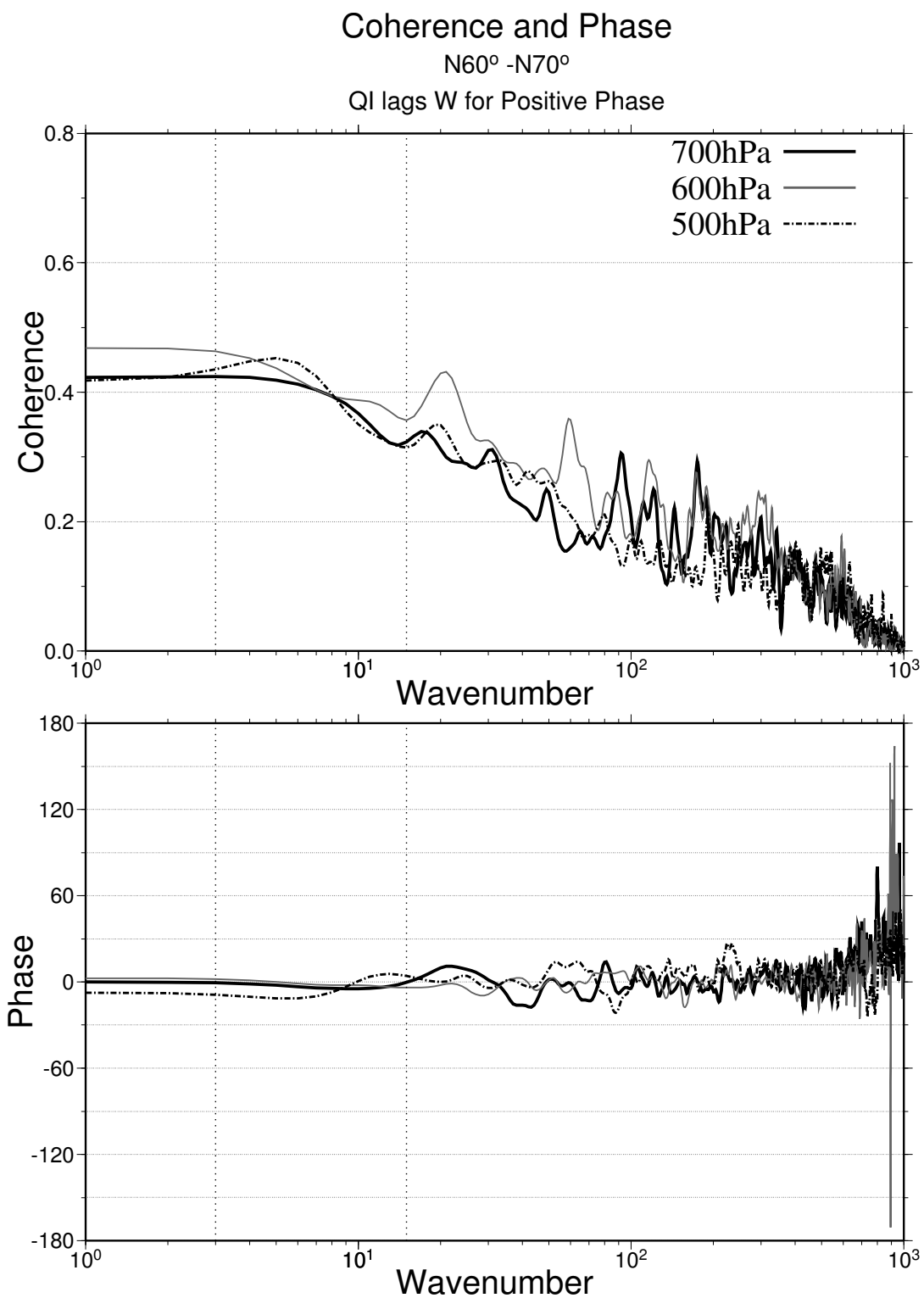


図 43: 北緯 60°–北緯 70° における鉛直速度 W (m/s) に対する雲氷 QI (g/kg) の各高度でのコヒーレンス (上) 及びフェイズ (下) .

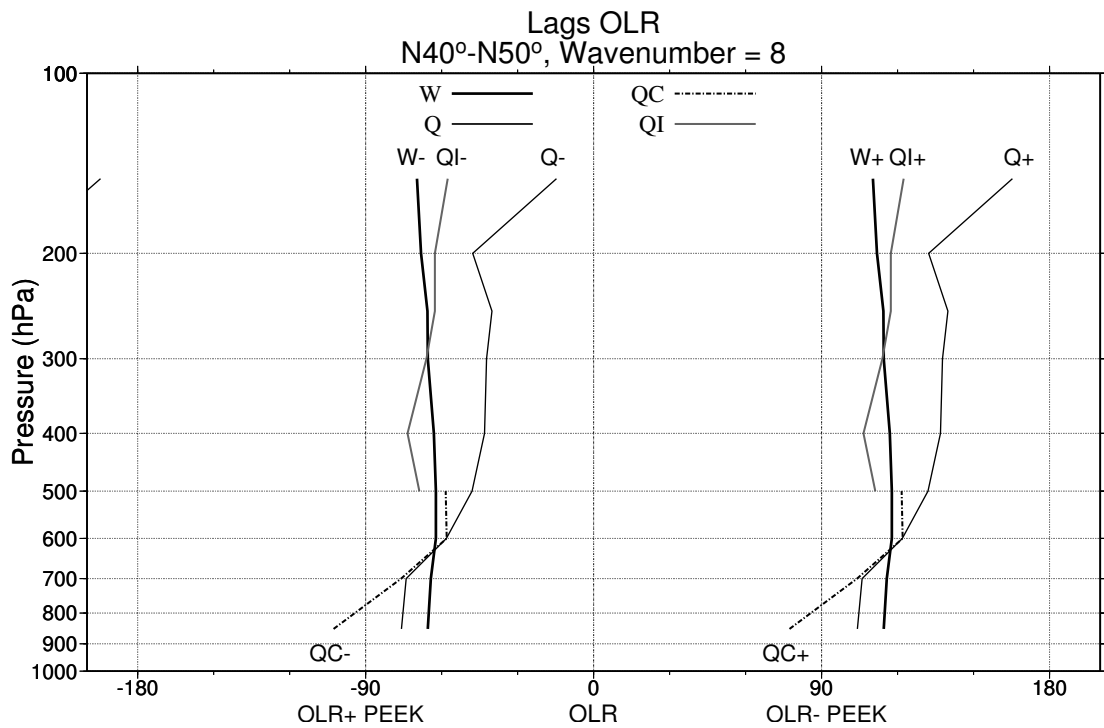
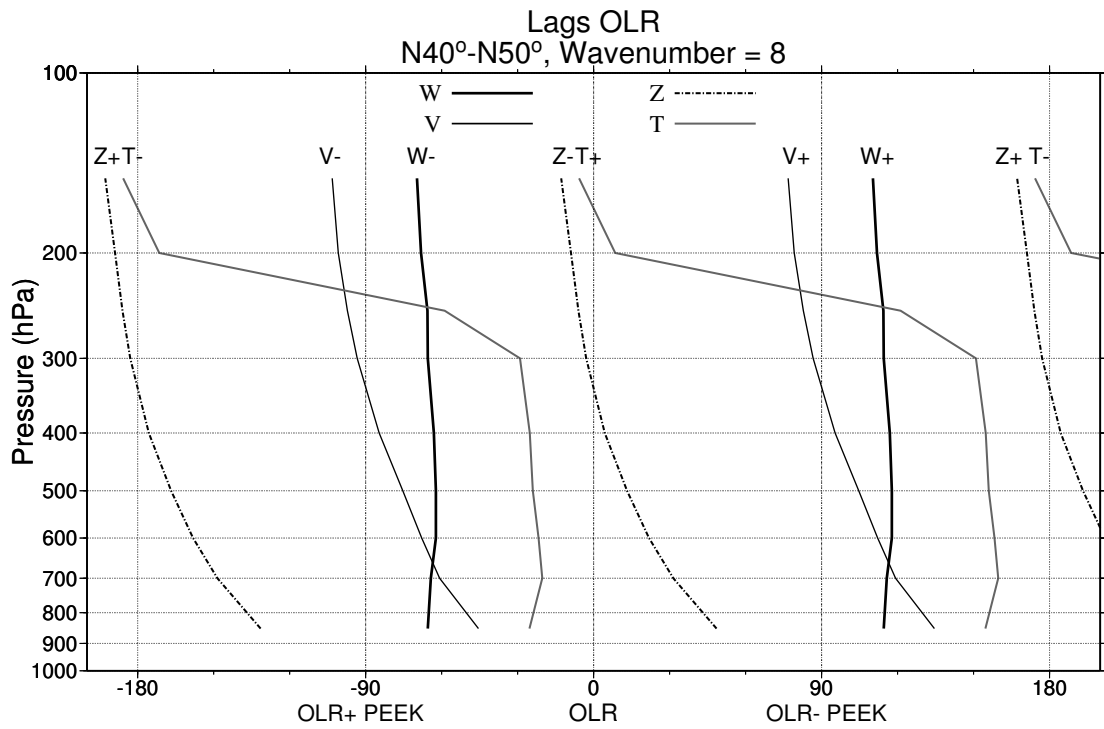


図 44: 北緯 40°-北緯 50°, 波数 8 における OLR に対する各要素の位相差。横軸には, -180 から 180 に OLR の一波長を置き, -90 に正のピーク, +90 に負のピークがある。縦軸は p 系高度。上は鉛直風速 W, 南北風 V, 高度 Z, 温度 T。下は比湿 Q, 雲水 QC, 雲氷 QI。