

平成 28 年度 卒業論文

竜巻発生要因となった寒冷渦の解析

筑波大学 生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

201310786

松崎 奈海

2017 年 1 月

目 次

目次	i
要旨	iii
Abstract	iv
図目次	v
1 はじめに	1
2 目的	1
3 方法	2
3.1 竜巻等の突風	2
3.2 竜巻発生要因	3
3.3 寒冷渦	3
3.4 解析	3
3.4.1 温度偏差	4
3.4.2 渦位	4
4 結果と考察	6
4.1 T20120506 の概要	6
4.1.1 温度	6
4.1.2 渦位	6
4.2 上層に寒冷渦が存在する突風事例	7
4.3 T20081102 の概要	7
4.3.1 温度	7
4.3.2 渦位	8
4.4 T20081107 の概要	8
4.4.1 温度	8
4.4.2 渦位	8
4.5 T20090125 の概要	8
4.5.1 温度	9
4.5.2 渦位	9
4.6 T20130831 の概要	9
4.6.1 温度	9

4.6.2	渦位	10
4.7	T20131110 の概要	10
4.7.1	温度	10
4.7.2	渦位	10
4.8	T20141112 の概要	10
4.8.1	温度	11
4.8.2	渦位	11
4.9	T20150906 の概要	11
4.9.1	温度	11
4.9.2	渦位	12
4.10	T20151003 の概要	12
4.10.1	温度	12
4.10.2	渦位	12
5	議論	13
5.1	T20120506 の竜巻発生過程	13
5.2	他事例との比較	13
5.3	気温と渦位	14
5.4	竜巻発生地点と渦位	14
6	結論	15
	謝辞	16
	参考文献	17

竜巻発生要因となった寒冷渦の解析

松崎 奈海

要旨

寒冷渦 (cold vortex) は偏西風から切り離された周囲より温度の低い寒気の渦であり、寒冷低気圧 (cold low) やあるいは切離低気圧 (cut-off low) と呼ばれている。対流が活発な内部では積乱雲が発達し雷雨、大雪、竜巻などの様々な大気現象を引き起こすことが知られている。本研究ではそのような大気現象のうち、竜巻に注目し、竜巻と寒冷渦の関係性について、構造の特徴、発生過程を明らかにした。

2012年5月6日に茨城県、栃木県において発生した竜巻では上空に寒冷渦が存在していたことが指摘されている。そこでこの事例について観測データの解析を行い、2008年3月26日から2016年6月30日までの期間内において発生した突風を対象に、同様に、上空に寒冷渦が存在する事例の抽出を行い突風発生環境について調査した。観測データは気象庁が提供している JRA-55 長期再解析データ を用いた。特に、寒冷渦の気温の鉛直構造、突風発生地の上層の渦位の分布に焦点を置き考察を行った。

結果、寒冷渦は勢力が強い春季では単体であっても地上気温と上空の気温差が顕著になったとき、突風を発生させる積乱雲の発生へとつながる。トラフの南東側では対流雲を発生させやすいことから、地上低気圧の発達を促し、特に寒冷前線に伴い積乱雲が発達、突風を引き起こすと示唆される。さらに寒冷渦の直下ではなく、南東側の圏界面の垂れ下がりの東側において突風は発生しやすいことを明らかにした。

キーワード

(寒冷渦, 寒気核, 圏界面, 渦位, 竜巻)

Analysis of the Cold vortex and the Relation to Tornado

Nami Matsuzaki

Abstract

Cold air which is cut by Westerly Wave is name as Cold vortex, also called Cold lows or Cut-off low. We know that the inside of the Cold vortex has the active convection where cumulonimbus develops, causing a wide range of meteorological disasters, such as, thunderstorm, heavy snow, tornado and so on. In this study, I focused on the tornado, and then verified the relationship between the Cold vortex and the tornado, clarifying the characteristic of the structure of the Cold vortex and developmental proceses.

It was pointed out that a Cold vortex existed on the upper layer of the tornado, which occurred on May 6, 2012 in both Ibaraki and Tochigi prefecture. So, this study firstly analyzed the causes of the event, and the background situations by selecting similar cases, Cold vortexes associated with tornados, from March 26, 2008 to June 30, 2016 are analyzed. JRA-55 long term re-analysis data provided by Japan Meteorological Agency was used for the research. I put a focus on the vertical structure of the temperature in Cold vortexes as well as the distribution of the potential vorticity on the upper layer of gusts.

As a result, this study verified that the stronger Cold vortex in spring advances cumulonimbus especially when the difference in temperature, between ground level and upper layers becomes large even if a Cold vortex does not merge. The southeastern side of the trough, which often produced the convective clouds, also blows the gust by promoting the low pressure on the surface ground. In addition, this research discovered that gusts were more likely to occur in the south east or east side of the tropopause folding, and not under the Cold vortex.

Keywords

(cold vortex, cold core, tropopause, potential vorticity, tornado)

図 目 次

4.1	T20120506 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	19
4.2	T20120506 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	20
4.3	T20120506 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	21
4.4	T20120506 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	22
4.5	T20120506 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	23
4.6	T20120506 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	24
4.7	T20081102 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	25
4.8	T20081102 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	26
4.9	T20081102 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	27
4.10	T20081102 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	28
4.11	T20081102 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	29
4.12	T20081102 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	30
4.13	T20081107 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	31
4.14	T20081107 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	32
4.15	T20081107 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	33
4.16	T20081107 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	34
4.17	T20081107 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	35
4.18	T20081107 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	36
4.19	T20090124 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	37
4.20	T20090124 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	38
4.21	T20090124 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	39
4.22	T20090125 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	40
4.23	T20090125 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	41
4.24	T20090125 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	42
4.25	T20130831 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	43
4.26	T20130831 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	44
4.27	T20130831 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	45
4.28	T20130831 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	46
4.29	T20130831 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	47
4.30	T20130831 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	48
4.31	T20131110 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	49
4.32	T20131110 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	50
4.33	T20131110 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	51

4.34	T20131110 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	52
4.35	T20131110 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	53
4.36	T20131110 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	54
4.37	T20141112 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	55
4.38	T20141112 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	56
4.39	T20141112 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	57
4.40	T20141112 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	58
4.41	T20141112 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	59
4.42	T20141112 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	60
4.43	T20150906 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	61
4.44	T20150906 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	62
4.45	T20150906 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	63
4.46	T20150906 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	64
4.47	T20150906 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	65
4.48	T20150906 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	66
4.49	T20151003 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	67
4.50	T20151003 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	68
4.51	T20151003 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線 . . .	69
4.52	T20151003 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	70
4.53	T20151003 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	71
4.54	T20151003 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線 . . .	72

1 はじめに

中緯度において地球を一周するように偏西風が一方向に吹いている。また日本上空の偏西風ジェットは世界で最も強いと知られている(田中, 2007)。偏西風帯はときには南北に蛇行をし、地球規模で循環する。その蛇行部分において「リッジ」と呼ばれる尾根付近では高気圧が発達し、「トラフ」と呼ばれる谷では低気圧が非常に発達する。特に日本をはじめとするアジア東岸ではこの偏西風のトラフが形成されやすく、寒冷渦の発生数が多い地域でもある(広沢ほか, 2007)。

寒冷渦(cold vortex)は偏西風から切り離された周囲より温度の低い寒気である。寒冷渦はほかにも寒冷低気圧(cold low)やあるいは切離低気圧(cut-off low)と呼ばれている。本論文では以下、寒冷渦という名称を用いる。

寒冷渦の内部は対流が非常に活発であり、積乱雲が発達し雷雨、大雪、竜巻などの様々な大気現象を引き起こす。「雷三日」という言葉があるように、夏に大規模な雷が発生すると3日ほど続く。これは寒冷渦がもたらす現象の一つである。上空の寒冷渦は動きが遅く、それに伴って居座った寒気により大気の状態が非常に不安定になるためである。坪木・小倉(1999)では1994年夏における雷雨を伴った寒冷渦について事例解析がおこなわれている。寒冷渦の発達から消滅までを渦位を用いてトレースを行った。特に夏場において地上気温と寒冷渦の寒気との間での顕著な温度差が、こういった積乱雲の発生を助長させていることが明らかになっている。

近年「極端気象」と呼ばれる局地的、短時間、激しい大気現象がクローズアップされる。ここでその代表ともいえるのが竜巻である。竜巻は、積雲や積乱雲を伴う上昇流の渦であり、雲底から地面(海面)までつながったものをいう。日本では陸上で発生するもの、海上で発生するもの、すべてを総称し竜巻というが、アメリカではスーパーセル型の竜巻とそうでないのを区別することもある(小林, 2014)。日本は竜巻被害が顕著なアメリカに比べると、総数は年に25個程度とアメリカの年平均1300個に対し少なく、また竜巻強度も格段に小さい。しかしながら、広大な面積を持つアメリカに対して小さな島国である日本とを土地面積、突風発生数とで相対的に見れば、日本における竜巻発生数は少ないとは言い切ることはいえない。(アメリカで発生するトルネードとの違い、気象庁ホームページ)

2012年5月6日茨城県、栃木県においてF1~F3の竜巻が複数発生した。このとき日本上空には寒冷渦があり、上空5500mにおいて氷点下21℃以下の強い寒気が流れ込んだ。12時には日本海に低気圧があって、東日本から東北地方の太平洋側を中心に、この低気圧に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ。さらに日射の影響で地上気温は上がり、地上と上空の温度差は45℃近くに達し大気の状態が非常に不安定となった。12:30~12:40頃にかけて両県で総計3本の竜巻を気象庁は把握している。1番目の竜巻は

茨城県筑西市～桜川市にかけて約 21km, 2 番目は常総市～つくば市にかけて約 17km, 3 番目は栃木県真岡市から茨城県常陸大宮市にかけて約 31km の痕跡を残した。これほど大規模なスケールでの複数の竜巻が、近接した場所で同時多発的に発生したのは、日本では珍しいことだ (小林, 2014)。また常総市からつくば市にかけて発生した竜巻の親雲は、アメダスによる観測から、暖かい南寄りの風の領域と冷たい北寄りの風の領域との境界付近に位置し、スーパーセルという発達した積乱雲の特徴を持っていた。(平成 24 年 5 月 6 日に発生した竜巻について、気象庁報道発表資料より)

上記の事例においては Hoskin et al. (1985) が述べた、「低気圧性循環の東側では地上付近の風は南風成分をもち、北半球では暖湿気流が流れ込みやすい環境となり、大気的不安定度は増す。よって大気の状態は不安定になり、暖湿気の流入が引き起こされる低気圧偏差の南東側で対流雲が発生、発達しやすくなる。」という典型的一例であると考えられる。

日本における竜巻発生要因は温帯低気圧、台風、冬型の順に多く (日本における竜巻発生要因、気象庁ホームページ) 年間を通して多様な大気擾乱によって竜巻は引き起こされている。台風は数日にわたって予測が可能であるが、日本付近で短時間かつ急激に発達をする低気圧はそれに比べ予測は難しい。それらは台風並みの勢力をもち、極端気象発生のトリガーとなり得る。

2 目的

気象庁では顕著な突風被害が発生した際、現地に調査員を派遣しており、その報告書は気象庁ホームページに掲載されている。

2012年5月6日茨城県、栃木県で発生した竜巻調査報告（水戸地方気象台ほか、2012）では上空に寒冷渦が存在したことが指摘されている。竜巻発生要因について検討する際そのほとんどの解析はメソスケールに向けられる。そのため、そのさらに上層である寒冷渦そのものに対する検討は多くはない。櫻井・川村（2008）では日本における竜巻発生の環境場と予測の可能性についてまとめられており、大気的不安定を示す新規パラメーターを用いて竜巻発生要因となり得るミニスーパーセルの検出を行った。幅広い環境下でパラメーターは使用できたが、大気が乾燥する寒冷渦の通過には適さなかった。

そこで本研究は、2012年5月6日茨城県、栃木県で発生した竜巻において上空に位置した寒冷渦の観測データの解析を行う。また、過去に上空に寒冷渦が存在し、それが要因となり発生した竜巻の事例を挙げ同一の解析を行い、2012年5月6日茨城県、栃木県事例との比較を行う。寒冷渦の構造に違いがみられるかを考察し、寒冷渦と竜巻発生の関連性を明らかにすることを目的とする。

3 方法

本研究は、2012年5月6日に茨城県、栃木県において発生した竜巻（以下 T20120506 とする）について観測データの解析を行い、2008年3月26日から2016年6月30日までの期間内において発生した突風を対象に、T20120506と同様の上空に寒冷渦が存在する事例の抽出を行い、比較をし、突風発生環境の類似点、相違点をピックアップする。

観測データは気象庁が提供している JRA-55 長期再解析データを使用する。研究対象期間を2008年3月26日としたのは竜巻注意情報の発表がこの日より開始されたためである。櫻井・川村（2008）において寒冷渦起因の竜巻予測が難しいことが述べられており、これについて、今回抽出された事象に対し気象庁の竜巻注意情報が発表されていたか確認をするためである。

3.1 竜巻等の突風

主な突風の種類として竜巻、ダウンバースト、ガストフロントが挙げられる。竜巻は、積雲や積乱雲に伴う上昇流の渦であり、雲底から地面（海面）まで繋がったものである。漏斗雲が接地したとき、竜巻となり被害を発生させる。

次に、ダウンバーストは積乱雲から吹き降ろす下降気流が地表にぶつかり、水平に激しく吹き出す流れである。被害地域は円形もしくは楕円形など面的な広がりを持つ特徴を持っている。これはシカゴ大学の藤田が1975年6月24日にケネディ空港にて発生した飛行機墜事故、ダラス空港での航空機墜落に際してこの存在を指摘した。

ガストフロントは積乱雲下で形成された重く冷たい空気の塊が、その性質のため異質の温かく軽い空気の側に流れ出し発生する。その被害は竜巻やダウンバースト以上であるのが大きな特徴であり、数十 km 以上にもなることがある。

今回は気象庁の竜巻等のデータベースを参照する。

気象庁の現地調査結果によって竜巻、ガストフロント、ダウンバーストと断定され、調査結果からは十分な判断材料が得られず不明とされたもの、すべてを解析対象とし、さらに、F スケール1以上と判断されたものを取り扱う。ただし同一県内、1時間以内の突風は1例とする。

F スケールとは前述の藤田が被害からおおよその竜巻の強さをランク付けしたものであり、現在日本においては竜巻だけでなく、全ての突風被害に対しておおよその風速を見積もる手段として使用されている。F0 ~ F5 まであり、日本において最も大きいスケールを記録したのが、1990年12月11日に千葉県茂原市、1999年9月24日に愛知県豊橋市、2006年11月7日に北海道佐呂間町で発生したもの、そして本研究で扱う2012年5月6日につくばで発生した竜巻であり（T20120506）、F3と断定されている。F3は7秒平均風速が50 ~ 69 m/s とされ、屋根瓦が飛び、車の横転などの被害が発生するとされている。

3.2 竜巻発生要因

気象庁では竜巻等の突風に対し、発生時の気象概況から発生要因を断定している。しかしながら、その要因の一つに「寒冷渦」は扱われていない。

そこで上層に寒冷渦の存在する可能性の高い、気象庁が要因を寒気の移流、寒冷前線、停滞前線、閉塞前線、気圧の谷、低気圧、熱雷の事例に解析対象を限る。

3.3 寒冷渦

はじめに、でも述べたが寒冷渦は偏西風から切り離された周囲より温度の低い寒気である。また、通常の温帯低気圧とは異なり中心に寒気が存在するため、暖気が侵入できない。地上天気図、850 hPa 高層天気図には前線を伴わない低気圧として描かれるが、500 hPa 高層天気図では非常に強い低気圧として描かれる。N. Chotaro (1966) では渦の循環と寒気を中心は一致せずずれが生じており、等温線と等高線はほぼ一致することが明らかにされ、さらに春季は寒冷渦の発生数も多く、夏に比べて勢力が強く、地上の低気圧を発達させることがわかっている(広沢ほか, 2006)。Shadler (1976) や Shimamura (1981; 1982) では寒冷渦の南東側に対流雲が発生し、その雲域では台風が発生、強化される場合もあると指摘している。

寒冷渦か否かの判断基準は先行研究でもそれぞれ異なる。本研究では 広沢ほか,(2006) が用いた「等高度線と等温度線がともに平曲していて、中心付近に寒気核があるものを寒冷渦とする」という定義を使用する。

3.4 解析

本研究では解析に JRA-55 長期再解析データを用いた。日本付近の寒冷渦抽出のため、まず、過去の寒冷渦が上層に存在する可能性のある竜巻発生日の等高度線を確認する。次に等高度線が平曲しているものに対して2高度の寒気を確認し、鉛直断面図を取り、等温線が閉じ、中心付近に寒気核があるものを寒冷渦が要因となり竜巻が発生した可能性があるもの、とした。

表 1: 使用した JRA - 55 長期再解析データ

	詳細
領域	全球
解像度	緯度 1.25 度 × 経度 1.25 度
使用データ	ジオポテンシャル高度, 気温, 風の u 成分, 風の v 成分, 相対渦度

3.4.1 温度偏差

気温をみるにあたり, 850 hPa ,500 hPa を 2 高度として選んだ。またこのときの鉛直断面は, 低圧部の中心付近の寒気を中心として考えられる部分の断面図をとった。以下はプログラム内にて使用した気温偏差値を求める式である。 T' は, 温度の基準場からの偏差であり, 以下の式で示される。

$$T'(x, y, p) = T(x, y, p) - T_0(y, p) \quad (3.1)$$

3.4.2 渦位

渦位では暖気, 寒気の境界付近である 250 hPa , 地表面近くである 925 hPa をみた。さらに鉛直断面は竜巻発生地点を含むように設定した。相対渦度は JRA-55 長期再解析データをそのまま使用している。

渦位を求めるにあたって, まず温位の式を提示する。

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{(R/C_p)} \quad (3.2)$$

で表され, R は気体定数, p_0 は基準高度, C_p は定圧比熱である。

静力学平衡を仮定すると、等温位座標における渦位は次式のように導ける。(相澤, 2016)

$$Q_{\theta} = -g(\zeta_{\theta} + f) \left(\frac{\partial p}{\partial \theta} \right)^{-1} \quad (3.3)$$

4 結果と考察

この章では、T20120506 の解析に対する基本的見解を述べ、前章で述べた寒冷渦の定義によって抽出された 11 例を、T20140506 と比較しながら発達過程や構造、特徴を読み取る。特に寒冷渦の気温鉛直断面、渦位に焦点を当てて解析結果とそれに対する考察を述べる。まず、4.1 節で T20140506 への見解、4.2 節では抽出された例を挙げ 4.3 節以降でそれぞれの事例に対して説明をする。

また、導出された図の時刻はすべて UTC であり、日本時間 -9 h である。

4.1 T20120506 の概要

2012 年 5 月 6 日の昼頃、茨城県から栃木県と広い範囲で竜巻が発生した。3 本の竜巻がタッチダウンし、最も持続したもので 31 km も発生、消滅を繰り返しながら移動していたと考えられる。つくば市の竜巻は F3 であると推定されるが基礎から横転した住宅もあるなど、局所的に F4 の可能性も示唆されており (小林, 2014)、竜巻の強さでは日本トップクラスであるといえる。この日、日本海海上には -25 の寒気をもった寒冷渦が認められる。この寒冷渦は 5 月 3 日から停滞していたものである。

4.1.1 温度

T20120506 は竜巻発生 9 時間前の 18Z (図 4.1) には暖気の流入がほぼない、寒気の塊となっている。寒気を中心は日本海上にあり、一部は北陸に達している。また茨城付近に注目すると、500 hPa では寒気に覆われているが 850 hPa の地上付近では暖気が存在し、下層は上層の寒気との温度差によって非常に不安定な状態であったと推察できる。

鉛直断面図において -10 の寒気の核が存在し 6 時間後には (図 4.2) -4 までの層の等温線が閉じ、寒気核が低高度に向かって落ち込んでいっているのが見て取れる。竜巻発生 3 時間後である図 4.2 においてもしっかりと寒気が閉じている。しかし寒気核の大きさが小さくなり、下層に暖気がだんだんと侵入してきている。

等高線は 500 hPa においても、850 hPa においても閉曲している。また、寒気を中心は等高線を中心とはズレていることがわかる。

4.1.2 渦位

図 4.4 では 2 PV の領域は高い高度にあるが時間の経過とともに、地表付近に下りてきていることがわかる。図 4.6 においては 2 か所にかけて渦位の降下が見られる。図 4.5 図 4.6 では、渦位の下降と相対渦度の地表への下降部分が重なっている。

表 2: 上層に寒冷渦が存在する突風事例一覧

	発生日	発生時刻	発生場所	気象庁による要因の断定	F スケール
T20120506	2012.5.6	12:30	茨城県	気圧の谷・寒気の移流	F3
T20081102	2008.11.2	8:30	秋田県	気圧の谷	F1
T20081107	2008.11.7	8:50	北海道	寒冷前線	F0 ~ F1
T20090125	2009.1.25	5:00	北海道	気圧の谷	F1
T20130831	2013.8.31	17:00	福井県	寒冷前線	F1
T20131110	2013.11.10	8:50	秋田県	寒冷前線	F1
T20141112	2014.11.12	19:30	北海道	寒冷前線	F1
T20150906	2015.9.6	21:30	千葉県	停滞前線	F1
T20151003	2015.10.3	19:45	秋田県	寒気の移流	F1

4.2 上層に寒冷渦が存在する突風事例

解析対象期間内にて突風は合計 464 例発生していた。その中で上層に寒冷渦が存在すると判断したものは以下の 8 例である。

上の表において発生時刻は日本時間である。複数の場所で発生したものは、気象庁の被害状況調査にて最もスケールが大きいと判断された地点の都道府県を採用する。

4.3 T20081102 の概要

2008 年 11 月 2 日 8:30 頃、秋田県八郎潟町にて F1 の竜巻被害が発生し、また、他 2 か所での突風被害も認められた。八郎潟町では 2 名が負傷し、家屋の損壊も 11 棟報告された。2 日は上空に寒気を伴った気圧の谷が通過しており、県内では激しい雷雨となっていた。このとき大雨、強風、波浪注意報のみ発表されていた（秋田地方气象台、2008）。

4.3.1 温度

寒冷渦の中心は樺太の西方に存在している。日本付近まで南下はしてきておらず、完全には切離していない。寒冷渦の南東から延伸している強い寒気が北日本上空を通過している。また気圧の谷は寒気に対応していることがわかる（図 4.7 (a)）。図 4.7 では寒気核が 2 つ確認できるが、図 4.9 で一つの寒気核が低高度に存在するようになる。しかしながら図 4.7 において等高線に注目すると前時間図に比べて中心が崩れ始めた。

4.3.2 渦位

1 PVU の範囲が下層に存在し 12 時間で刻々と東進している。図 4.10 の時点では 1 PV の領域が顕著に下層にあるが、図 4.11 ではそれに対応するかのように、2 PVU の下層への侵入が開始する。

4.4 T20081107 の概要

2008 年 11 月 7 日 9:00 頃、北海道様似町で F0 ~ 1 の竜巻が発生した。まず海上にて発生し、そのまま陸に移動し上陸したと目撃されている。小学校の建物が一部損壊するなどの爪痕を残した。この時間宮海峽上空に低気圧があり、そこから南へと伸びた寒冷前線が通過中であり、活発な積乱雲が発生していた。強風、波浪注意報が出され、雷注意報とともに竜巻などの激しい突風への注意が呼びかけられていた。竜巻注意情報は発表されていなかった（室蘭地方気象台ほか、2008）。

4.4.1 温度

寒冷渦の中心は樺太上に位置し、(b) の地上付近に注目すると刻々と発達しているのがわかる。500 hPa , 850 hPa いずれにおいても等高度線は閉曲している。500 hPa では等高線と寒気の位置が一致しているように見える。850 hPa では中心に向かって暖気の貫入が起き始めている。この暖気の貫入により、寒気の南東側、暖気との境界で前線が発生し北海道を通過したと考えられる。断面図を見てみると、-20 の寒気核が暖気核の高度 600 hPa 付近に存在し、等温線の間隔が非常に狭い。また、暖気の貫入が高度 850 hPa より下層にみられる。図 4.14 ではしっかりと寒気核があるが、6 時間後の図 4.15 には -20 の寒気核が消え、複数の -16 の寒気核が存在するようになる。

4.4.2 渦位

全体的に 1 ~ 2 PVU が下層に張り出している。また特徴的なのが図 4.17, 図 4.18 では 2 PVU が、図 4.17 では 4 PVU がコアのように張り出している部分に対して、上層から切離している。相対渦度ともほぼ一致している。

4.5 T20090125 の概要

2009 年 1 月 25 日 5 時頃北海道の新ひだか町で突風が発生し、住居の屋根の飛散など、幅が 10 m , 50 m の長さの非常に狭い範囲に被害をもたらした。この現象の特定には至

らなかった。このとき寒冷前線を伴った低気圧が接近しており、大気の状態は非常に不安定であったが竜巻注意情報は出ていなかった（室蘭地方気象台，2009）。

4.5.1 温度

巨大な等高度線の閉曲が存在する（図 4.19）。この日を通してこの大きな寒冷渦は移動していないことがわかる。上層、下層ともに日本列島は寒気で覆われている。図 4.19、図 4.20 では等温線の閉曲が明瞭には見れないが、図 4.21 を見ると下層に -22 の寒気核が沈んでいる。

4.5.2 渦位

低高度まで渦位を持つ領域が下りてきている。突風発生地点付近において、下層が高渦度となっており後方には、圏界面の折れ込みがみられる。しかし他の事例と比べると下層に突出した渦位は顕著にはみられない（図 4.22, 4.23, 4.24）。

4.6 T20130831 の概要

2013 年 8 月 31 日 17:00 頃、福井県福井市にて竜巻が発生した。幅 750 m、長さ 3.1 km の範囲に被害が集中しており、倒木の被害が多数あり、F1 であるとされた。また、17:00 ~ 17:30 の間に石川、福井にてほかに 7 つの突風被害が確認されており、石川県能美市にて発生し突風についても F1 であるとされている。竜巻発生は寒冷前線の通過によるものであると推測される。

4.6.1 温度

寒冷渦は中国大陸上にあり、移動はせず同位置に停滞している。等高線の間隔は広く、500 hPa ではしっかり閉じてはいるが、850 hPa では等高線は閉じきっていない。下層の寒気の南下が上空に比べ早く、寒気と暖気の間で寒冷前線が発生したと推察する。しかし断面図では -12 の寒気核があり、図 4.25 ~ 図 4.27 まで約 12 時間にわたって核が維持されている。

図 4.25 は断面図の等温線の間隔、構造等が T20120506 とよく似ている。

4.6.2 渦位

左端から 1 PVU , 2 PVU の領域が東へと移動, 侵入してきている。またどの時刻においても舌状の 1 PVU の先端に細々と 1 PVU の領域が点在している。また舌状の先端には, 相対渦度の 4 ~ 8 PVU が同心円状に展開している。

4.7 T20131110 の概要

2013 年 11 月 10 日 21 時頃に秋田県男鹿市戸賀付近で突風が発生し, 窓ガラスの破損やトタン屋根の飛散などの被害が出た。しかしながら被害の痕跡や分布や, 聞き取り調査からでは突風を断定する根拠は得ることができなかった。竜巻注意情報は未発表であった (室蘭地方気象台, 2015)。

4.7.1 温度

図 4.31 の断面図では下層に強い寒気の塊が存在し, 凝縮しているように見て取れる。このとき 850 hPa では等高線の閉曲が確認できるが, 500 hPa では中心がわからず, 閉曲はしていない。6 時間後の 図 4.32 で両高度ともに閉曲部が確認できるようになる。また, 完全な切離も認められない。しかし 図 4.32 以降, 断面図に存在していた寒気核は拡大しながら崩れ始めている。(b) の地上付近に目を向けると暖気の貫入とともに, 等高線の間隔が狭くなっており, 地上低気圧が発達していったと考えられる。この地上低気圧から延びた前線が北海道を通過している。

4.7.2 渦位

図 4.34 では 1 ~ 2 PVU が舌状に地表面近くまで達している。その後, だんだんと上層に渦位の領域は後退し, 舌状の先端で横ばいに広がった領域は大きく下層に取り残されている (図 4.36)。

4.8 T20141112 の概要

2014 年 11 月 12 日 19:30 頃に北海道勇払郡安平町にて F1 の竜巻が発生した。苫小牧市においても突風被害が出たが, 竜巻との断定には至っていない。安平町では 5 棟の住宅被害が報告され, 長さ約 0.7 km , 幅約 170 m の被害範囲であった。この日, 日本海北部に低気圧があり発達しながら北上をし, この低気圧からのびる寒冷前線, 温暖前線が夕方から深夜にかけて通過した。さらに寒冷前線の上空の寒気の影響で大気の状態が非常

に不安定となっており、局地的に大雨が記録されている。また、18:46 に竜巻注意情報が発表されている（室蘭地方気象台、2015）。

4.8.1 温度

高度 850 hPa において、図 4.37 には中国大陸の日本海沿岸に閉じた低気圧が存在する。低気圧の東側では暖気移流に伴い高温偏差となっており、また西側では高緯度から強い寒気が流入していることがわかる。図 4.37 において断面図では下層に -18 の寒気核がある。その後、一度寒気核は縮小し、等温線は崩れていく。北海道付近は、下層の 850hPa において暖気が入っているが、上層の 500hPa においては寒気が入り始めており大気の状態が不安定であると推察される。図 4.37 ~ 図 4.39 の 500 hPa に注目すると、等高線がだんだんと平曲し、切離していく様子がわかる。この後この切離部分は寒冷渦になり得る。

4.8.2 渦位

相対渦度の高い箇所付近の渦位が下層に向かって垂れ下がるようにみられる（図 4.41）。さらにトラフの部分で圈界面が高度 600hPa 付近まで下方に落ち込んでいる。また、下層に存在する相対渦度の大きい地点で、1 PV ほどの領域が発生する（図 4.40 ~ 4.41 にかけて）。

4.9 T20150906 の概要

2015 年 9 月 6 日 21 時 30 分頃、千葉県千葉市中央区川崎町から星久喜町にかけて竜巻が発生した。また、この他にも千葉県内 3 地点突風の被害が報告されている。千葉市では軽傷者 3 名、全壊を含めた住宅被害が 99 棟報告されている。このとき東日本の太平洋沿岸に停滞前線があり、竜巻発生時には発達した積乱雲が千葉県を通過中であつた。大雨注意情報、雷注意情報、洪水注意情報が出ていたが、竜巻注意情報の発表はなかった（銚子地方気象台ほか、2015）。

4.9.1 温度

図 4.43 の時点では等高線の閉まりは緩い。しかし図 4.45 においては両高度とも中心閉まり、気温のシェードも中心からのトレンドが確認できる。断面図では寒気核が持続はしているものの、他事例に比べ、高高度に存在している。図 4.45 の突風発生地点である千葉に目を向けると、寒冷渦から延伸した寒気と下層に存在する暖気のちょうど境目となっており、前線が発生地点の上空を通過していたことが示唆される。

4.9.2 渦位

鉛直断面図をみると相対渦度が見受けられない部分では、非常に高い高度に渦位の最低ラインが存在し、安定した領域であると考えられる (図 4.43 ~ 4.45 にかけて)。だが、925 hPa の図を見ると四国のあたりに低圧部が存在し、250 hPa で見受けられる寒冷渦からはトラフに沿って渦の存在がみられるが、竜巻発生地である千葉からは離れているため、寒冷渦とこの竜巻発生の関係性は薄いのではないかと考えられる。

4.10 T20151003 の概要

2015 年 10 月 3 日 19 時 45 分頃、秋田県仙北郡美郷町で突風が発生した。被害範囲は、幅約 350 m、長さ約 2 km であり、倒木、トタン屋根の飛散などの被害がみられた。竜巻と断定された。気圧の谷が北日本を通過し、上空に寒気が流れ込んだため、秋田県では大気の状態が非常に不安定となっていた。気象レーダー観測では、美郷町浪花付近を 19 時 30 分頃から 20 時 00 分頃にかけて発達した積乱雲が通過していた (秋田地方気象台, 2016)。

4.10.1 温度

樺太の東方に寒冷渦の中心は存在するが、寒気を中心は上層では気圧の東側、南西側、下層では南西側にみとめられる。等高線と寒気を中心は大きくずれていることがわかる。またその鉛直断面図では、図 4.49 の時点では -12 の寒気核が 2 つあったが 6 時間後、12 時間後に寒気核は 1 つとなり、下層に小さくなり落ちていく。それに伴って寒気の等温線はしっかり閉じていく。時間とともに下層の寒気は東北付近に流れ込んでいく。

4.10.2 渦位

図 4.52 で東方において圈界面が大きく折れ込んでいる。その後折れ込み角度は緩くなり、2 PV はなめらかに横ばいになっていく。200 hPa 付近に 2 か所渦度の大きい領域がみられる (図 4.53)。

5 議論

この章では、得た結果を基に T20120506 の発達過程、構造と、それに対する他事例との比較について議論を行う。

5.1 T20120506 の竜巻発生過程

T20120506 は日本時間の 12 時頃の発生であるため、UTC を用いて解析の時刻でいえば 00Z ~ 06Z のちょうど間で起きた。

まず寒冷渦の中心から見て、発生地つくば市はおおよそ南南東に位置する。寒冷渦の中心は上層の暖気から押しつぶされるように、軽くくぼんでおり、コールドコアが沈降している。図 4.1 では核とはいえないほどの大きさであった最低温度部が、図 4.2 ではしっかりと寒気核を成したことから、この間に寒冷渦は発達したと考えられる。コールドコア中心付近には相対渦度の大きい領域があり、そこへ温度差、渦度に反応するかのように圈界面 (2 PV) が垂れ下がる。寒冷渦は東進し、この圈界面の垂れ下がった東側面付近で竜巻は発生した。各高度の等高線を確認しても、この寒冷渦以外に周辺に低気圧等の存在は認められない。よって、寒冷渦のトラフに沿った渦、そして寒気によってもたらされた竜巻であると考えられる。

5.2 他事例との比較

寒冷渦を上層に伴った竜巻の事例は、大変少ない。今回検出された事例のほとんどが、高緯度で発生した竜巻のものであり、発生地は北海道に集中している。これは、そもそも寒冷渦が高緯度で切離後に南下ではなく、その場に停滞することがほとんどであることに沿った結果ではないかと考える。また T20120506 のように ” 理想 ” の寒冷渦はさらに限られる。多くの事例については寒冷渦のほかに、地上付近に温帯低気圧が認められ、寒冷渦単体の事例は T20081102 , T20131110 , T20151003 のみである。また T20120506 を除いてそのほとんどは、竜巻発生地点から寒冷渦の中心まで距離が存在する。そのため寒冷渦を抽出しただけでは、竜巻との関連は不透明としかいいようがない。しかしながら、寒冷渦の接近によってこの地上低気圧の上空に強い寒気をもたらされたのは間違いない。

以下 5.3 章, 5.4 章では、さらに解析結果にフォーカスをして議論を行う。

5.3 気温と渦位

抽出された寒冷渦の寒気核の温度は様々であり、最も低いもので -22°C 、そして高いもので -8°C である。冬であればあるほど、寒冷渦そのものが冷たい。前述した -8°C の寒気核を持った事例は T20120506 である。他の事例に比べれば核の温度は高いが、最も被害が深刻な F3 を記録しており、被害も数地点に及ぶ。

ここでもう一例春夏に起きた T20130831 に目を向ける。4.6.1 章であるように、この事例は T20120506 と酷似している。この突風においても被害地域は 2 件にまたがり、7 つ確認されるなど発生数は顕著である。このときも寒気核は -12°C とよっぽどのコールドコアではない。しかしながら、春夏という環境を考えると地上気温との気温差は非常にある。この 2 例はこの気温差が大きな要因になったといえるのではないのだろうか。また、T20120506 については広沢ほか (2006) で指摘された春の寒冷渦は勢力が強い、という点においても F3 というスケールの竜巻を発生させた一因ではないかと考えられる。

渦位について考えるにあたり、以下 2 PV を圏界面と表記する。渦位は上層ほど安定し、下層ほど風などの擾乱によって点在する。そのためトラフに沿って渦位が伸びていることが 250 hPa 高度図からわかる。さらに断面図を見ると、発達した寒冷渦のコールドコアの沈降に対応するように圏界面がコールドコアに向かって大きく舌状に垂れ下がっていく。また下層に温帯低気圧があり、上空に寒冷渦があるものでは相対渦度の大きい領域が広く、圏界面はより大きく下層に張り出して圏界面の逆転が広い範囲で起こっている (図 4.18)。

5.4 竜巻発生地点と渦位

全事例に共通するのが、竜巻発生地点は 5.3 章で述べた下層に張り出した舌状の圏界面の進行方向 (東進) の前面で発生しているということだ。圏界面の前面では上昇流が発生しやすく、さらに大きいスケールでいえば、トラフの前面にも上昇流があり、これが低気圧の発達に大きく寄与しているとされている (黒良ほか, 2014)。全ての事例において、寒冷渦の等高線の中心ではなく、その付近にずれて存在する寒気を中心 (N. Chotaro, 1966) からほぼ南東側に竜巻発生地点は存在する。そして圏界面の垂れ下がりの東側で竜巻は発生している。Shadler (1976) や Shimamura (1981; 1982) では寒冷渦の南東側に対流雲が発生し、その雲域では台風が発生、強化される場合もあると指摘しているが、今回のケースでは台風だけでなく、温帯低気圧も強化され、竜巻を発生させるほどの積乱雲を伴う可能性が考えられる。

6 結論

本研究は、JRA-55 長期再解析データ を用いて寒冷渦を上層に伴った突風事例について、寒冷渦の寒気の構造と渦位に焦点を当てて解析を行い、突風と寒冷渦の関連性について検証したものである。本研究が対象とした突風事例は、2008 年 3 月 26 日から 2016 年 6 月 30 日までの間に起こった突風であり、上空に寒冷渦が存在し、F1 以上の被害を出したものであり、総数は 9 例である。2012 年 5 月 6 日に発生した、寒冷渦が要因とされたつくば市での竜巻を中心に、他事例との比較を行い突風を発生させた寒冷渦の構造、特徴を明らかにした。以下に、本研究の結論をできるだけ簡潔にまとめる。

T20120506 は日本時間の 12 時頃に発生した。このとき上空には寒冷渦が存在し、寒冷渦の中心はくぼみ、 -8 のコールドコアが沈降していた。コールドコア中心付近には相対渦度の大きい領域があり、さらにはそれに重なるように、大きく圏界面が垂れ下がっていた。竜巻はこの圏界面の垂れ下がった東側面付近で発生していた。他の抽出された突風事例においても T20120506 と同様の構造、突風発生過程が確認された。

9 例のうち 7 例が、東北以北に集中した高緯度で発生した突風事例であった。これについては、寒冷渦の発生が高緯度で多いためであると考えられる（広沢ほか、2007）。T20120506 のように完全な寒気の塊であった寒冷渦はほとんどなく、暖気の流入が始まっているようなものも確認された。いわば寒冷渦の寿命が短いものが多かったといえる。広沢ほか（2007）は春季の寒冷渦の勢力の強さを指摘している。T20120506 が 12 時間維持していたのは、勢力そのものが他事例に比べて強かったためであると考えられる。また、寒冷渦がもたらした寒気が地上気温との気温差を生じ、F3 の竜巻を発生させた。

圏界面の張り出しが顕著なものは寒冷渦のほかに、地上付近に温帯低気圧が認められるものがあり、Shadler (1976) と Shimamura (1981; 1982) が指摘した寒冷渦の南東側での上昇流は低気圧を発達させ、積乱雲の発生を促しているのではないかと示唆された。

以上のことから、寒冷渦は勢力が強い春季では単体であっても地上気温と上空の気温差が顕著になったとき、突風を発生させる積乱雲の発生へとつながり、トラフの南東側では対流雲を発生させやすいことから、地上低気圧の発達を促し、特に寒冷前線に伴い積乱雲が発達、突風を引き起こすと考えることができる。よって寒冷渦の直下ではなく、南東側、さらに圏界面の垂れ下がりの東側において突風は発生しやすいことが明らかになった。しかし、今回指摘した寒冷渦の南東側での上昇流、圏界面の張り出し前面での上昇流の存在については可能性の範囲であり、本研究では存在について明らかにしていない。この上昇流の存在を明らかにすることによって、寒冷渦と竜巻発生までの過程がより明るみになり、竜巻注意情報の発令への精度向上に繋がると考えられる。

謝辞

本研究を遂行す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田中博教授には、終始適切で親切なご指導を頂きました。また、気象研究所の相澤拓郎研究員には、とても有用な助言を頂きました。この場をお借りして心から感謝の意を表します。

筑波大学計算科学研究センターの山上晃央研究員、また大循環ゼミに所属する皆様から適切なアドバイスを頂きました。また、同大学生命環境科学地球学類、植田宏昭教授、日下博幸教授、上野健一准教授から方針発表、中間発表、最終発表の場で貴重なご意見を頂きました。その他、筑波大学大気科学分野の皆様からも貴重な指摘を頂きました。学士論文を共に進めた B4 の皆様は、時として良き相談相手となって頂きました。また、家族の皆様からは学びの場、研究を行う環境を最大限提供して頂きました。本論文は、以上の皆様の多大な支援により成されました。ここで、心より感謝の意を表します。

参考文献

- A. S. Kentarchos, and T. D. Davis, 1997: A climatology of cut-off lows at 200 hpa in the Northern Hemisphere, 1990-1994. *Int. J. Climatol.*, **18**, 379-390.
- F. Porcu, A. Carrassi, C. M. Medaglia, F. Prodi, and A. Mugnai, 2005: A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the Mediterranean region. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **96**, 121-140.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **111**, 877-946.
- J. C. Sadler, 1976: A role of the tropical upper tropospheric trough in early season typhoon development. *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1266-1278.
- L. QI, L. M. Leslie, and S. X. Zhao, 1998: Cut-Off low pressure systems over Southern Australia climatology and case study. *Int. J. Climatol.*, **19**, 1633-1649.
- M. Griffiths, M. J. Reeder, D. J. Low, and R. A. Vincent, 1996: Observations of a cut-off low over southern Australia. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **124**, 1109-1132.
- M. Shimamura, 1981: The upper-tropospheric cold lows in the Northwestern Pacific as revealed in the GMS satellite Data. *Geophys. Mag.*, **39**, 119-156.
- M. Shimamura, 1982: An application of GMS satellite Data in the analysis of the upper cold low in the Western North Pacific. *Geophys. Mag.*, **40**, 113-152.
- N. Chotaro, 1966: Analysis of a well developed cold vortex over the South-Western part of Japan. Special Contribution of the Geophysical Institute, Kyoto University., **6**, 27-37.
- P. Satyamuty, and M. E. Seluchi, 2005: Characteristics and structure of an upper air cold vortex in the subtropics of South America. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **96**, 203-220.
- Sixiong Zhao, and Jianhua Sun, 2005: Study on cut-off low-pressure systems with flood over Northeast Asia. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **96**, 159-180.
- 相澤 拓郎, 2016: 筑波大学 生命環境科学研究科 地球科学専攻 2016 年 5 月 12 日発表資料: Potential vorticity thinking of cyclongenesis
- 広沢 学, 李 相勲, 山川 修治, 2006: 東アジアにおける寒冷渦の発生と分布特性. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **42**, 149-158.
- 櫻井 溪太, 川村 隆一, 2007: 日本における竜巻発生の環境場と予測可能性. *Meteorol. Soc. J.*, **55**(1), 7-22.
- 坪木 和久, 小倉 義光, 1998: 雷雨を伴った寒冷渦の渦位解析事例. *Meteorol. Soc. J.*, **46** (7), 453-459.
- 飯塚 義浩, 加治屋 秋実, 2009: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *Meteorol. Soc. J.*, **58** (1), 19-30.

- 櫻井 溪太, 2009: 京都大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 平成 22 年度修士論文: 日本に接近する台風に伴う竜巻発生環境場の特徴と形成に関する研究
- 黒良 龍太, 森 浩俊, 加藤 輝之, 2014: 予報作業における渦位の利用について. 平成 25 年度気象庁量的予報技術資料, 19, 49-61
- 坂本 圭, 高橋 正明, 2014: 上層寒冷低気圧の切離過程およびその構造と対流雲の関係. 海洋, 36(4), 314-318.
- 小倉 義光, 1999: 一般気象学, 東京大学出版会
- 小倉 義光, 2015: 日本の天気 -その多様性とメカニズム-, 東京大学出版会
- 田中 博, 2007: 偏西風の気象学, 成山堂書店
- 小林 文明, 2014: 竜巻 -メカニズム, 被害, 身の守り方-, 成山堂書店
- 水戸地方気象台, 宇都宮地方気象台, 東京管区気象台, 2012: 2012 年 (平成 24 年) 5 月 6 日 茨城県, 栃木県で発生した竜巻について. 東京管区気象台発表資料
- 銚子地方気象台, 東京管区気象台, 2015: 平成 27 年 9 月 6 日に千葉県千葉市, 成田市, 鎌ヶ谷市および市川市で発生した竜巻について. 現地災害調査速報
- 秋田地方気象台, 2016: 平成 27 年 10 月 3 日に秋田県仙北郡美郷町で発生した突風について. 現地調査報告
- 室蘭地方気象台, 2015: 平成 26 年 11 月 12 日に北海道苫小牧市及び勇払郡安平町で発生した突風について (気象庁機動調査班 [JMA-MOT] による現地調査の報告). 現地災害調査速報
- 秋田地方気象台, 2013: 平成 25 年 11 月 10 日に秋田県男鹿市で発生した突風について (気象庁機動調査班 [JMA-MOT] による現地調査の報告). 報道発表資料
- 室蘭地方気象台, 2009: 平成 21 年 1 月 25 日に日高郡新ひだか町で発生した突風について. 現地調査結果報告
- 室蘭地方気象台, 浦河測候所, 2008: 平成 20 年 11 月 7 日に様似郡様似新町で発生した突風について. 現地調査結果報告
- 秋田地方気象台, 2008: 平成 20 年 11 月 2 日に秋田県南秋田郡八郎潟町, 秋田市で発生した突風について. 現地災害調査報告

2012 05 05 18Z

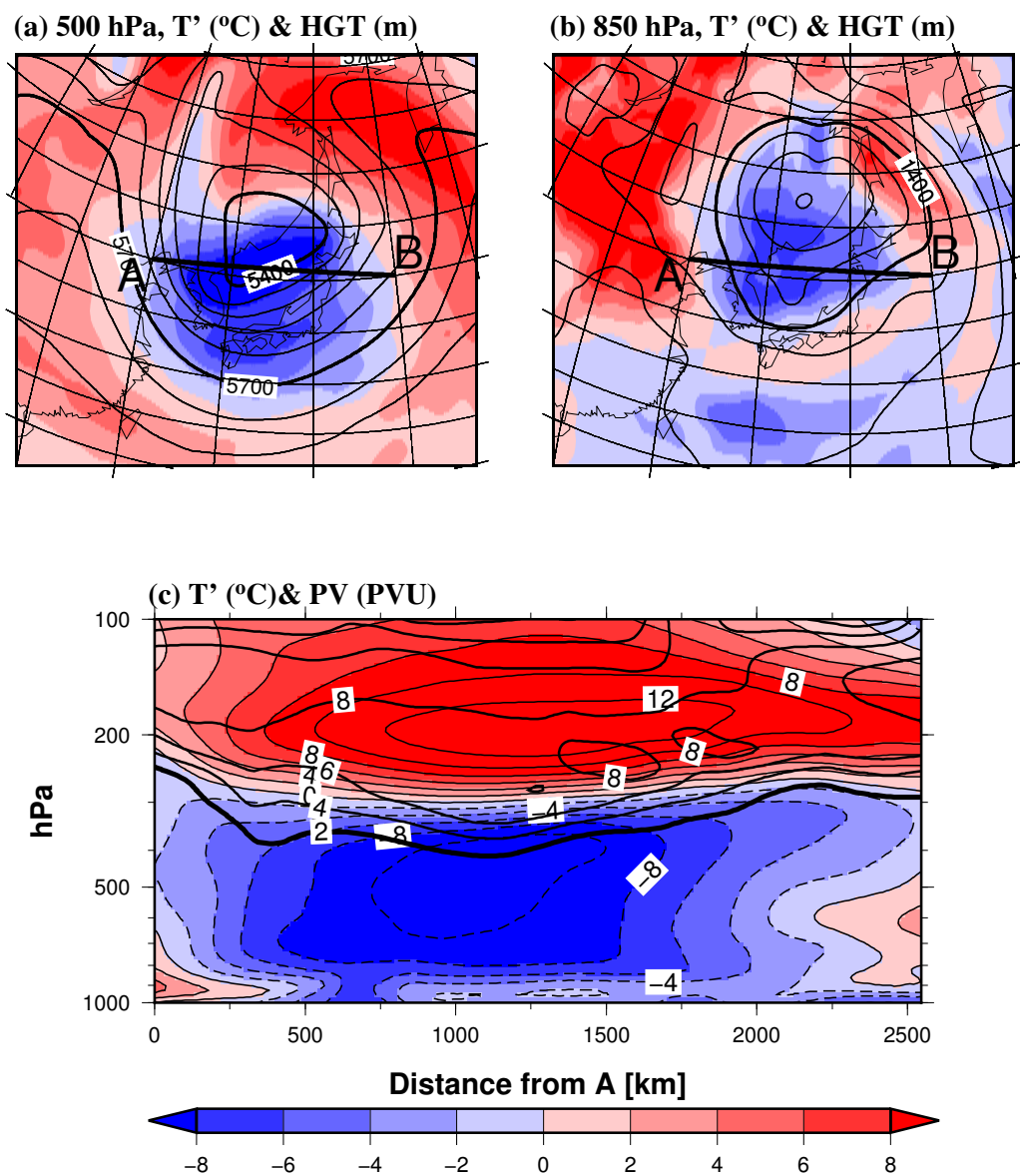


図 4.1: T20120506 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2012 05 06 00Z

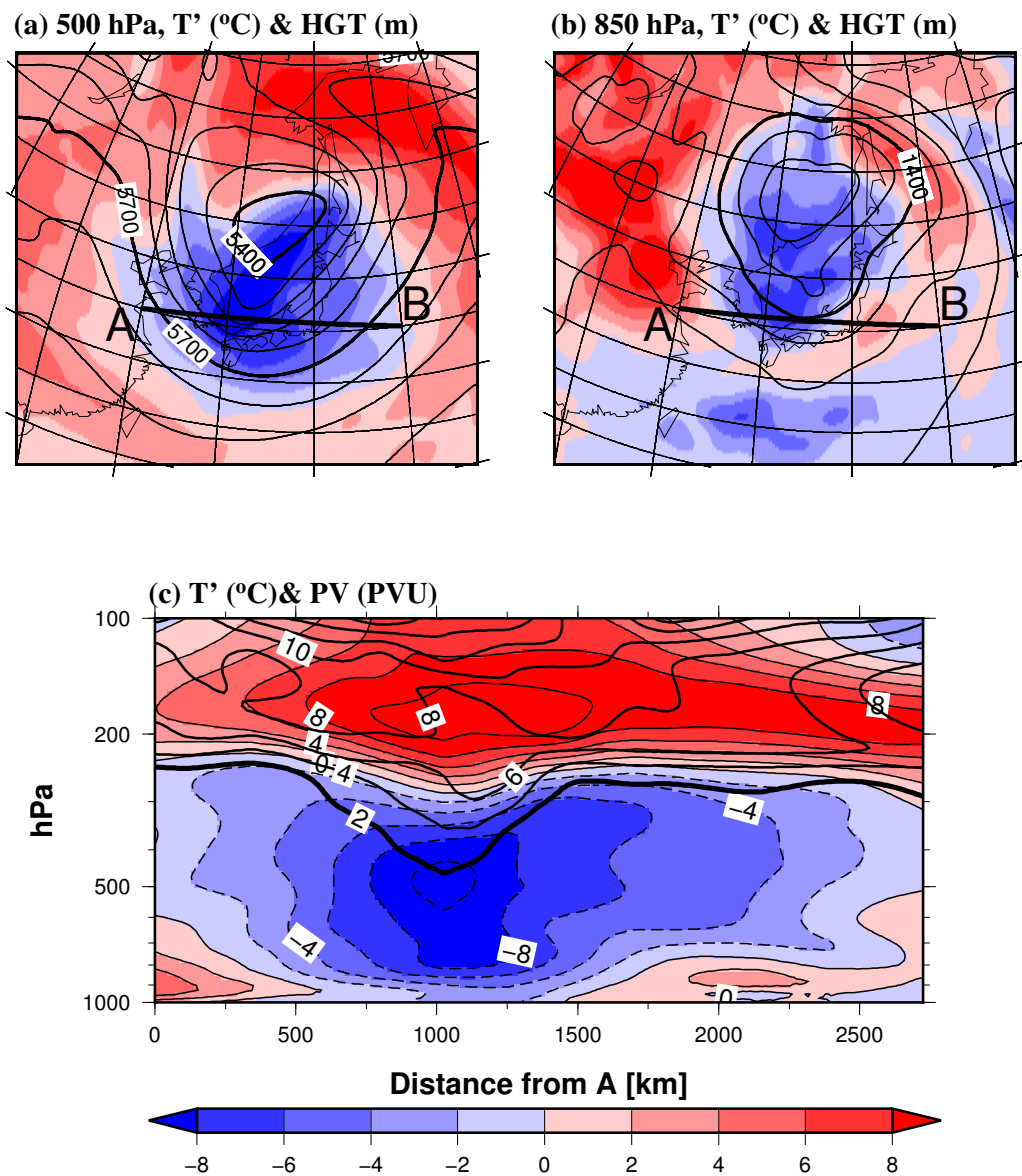


図 4.2: T20120506 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2012 05 06 06Z

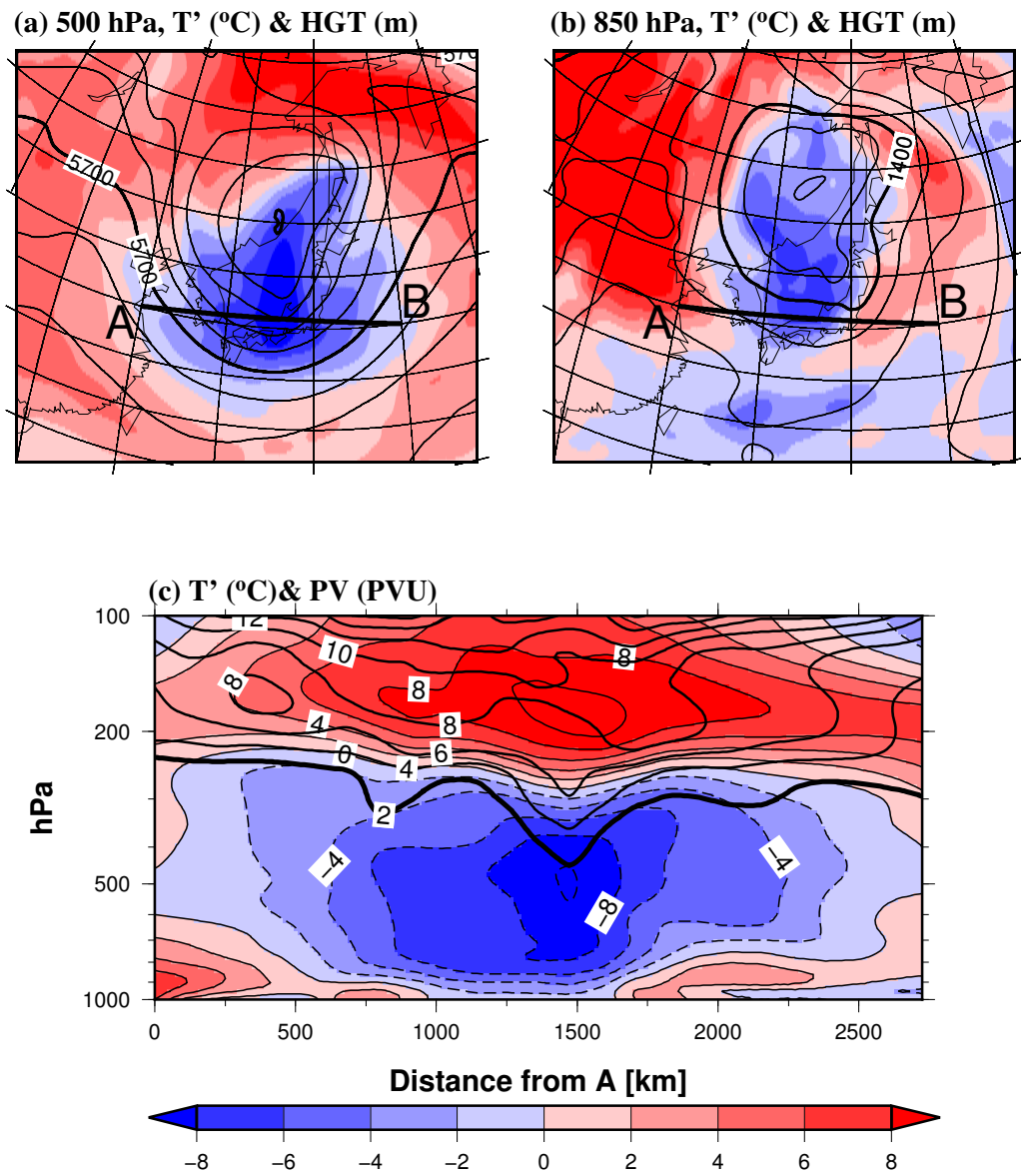


図 4.3: T20120506 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2012 05 05 18Z

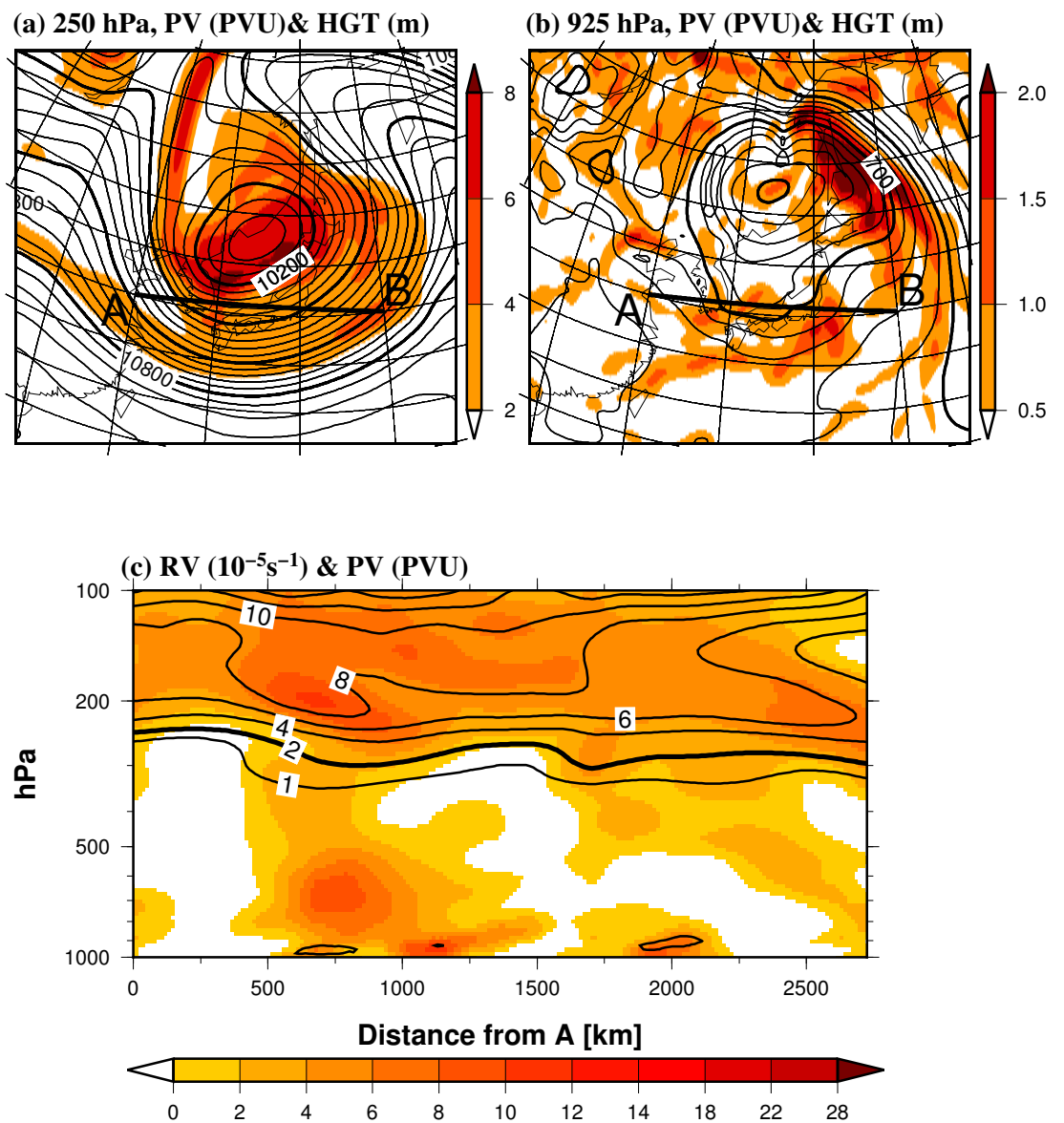


図 4.4: T20120506 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2012 05 06 00Z

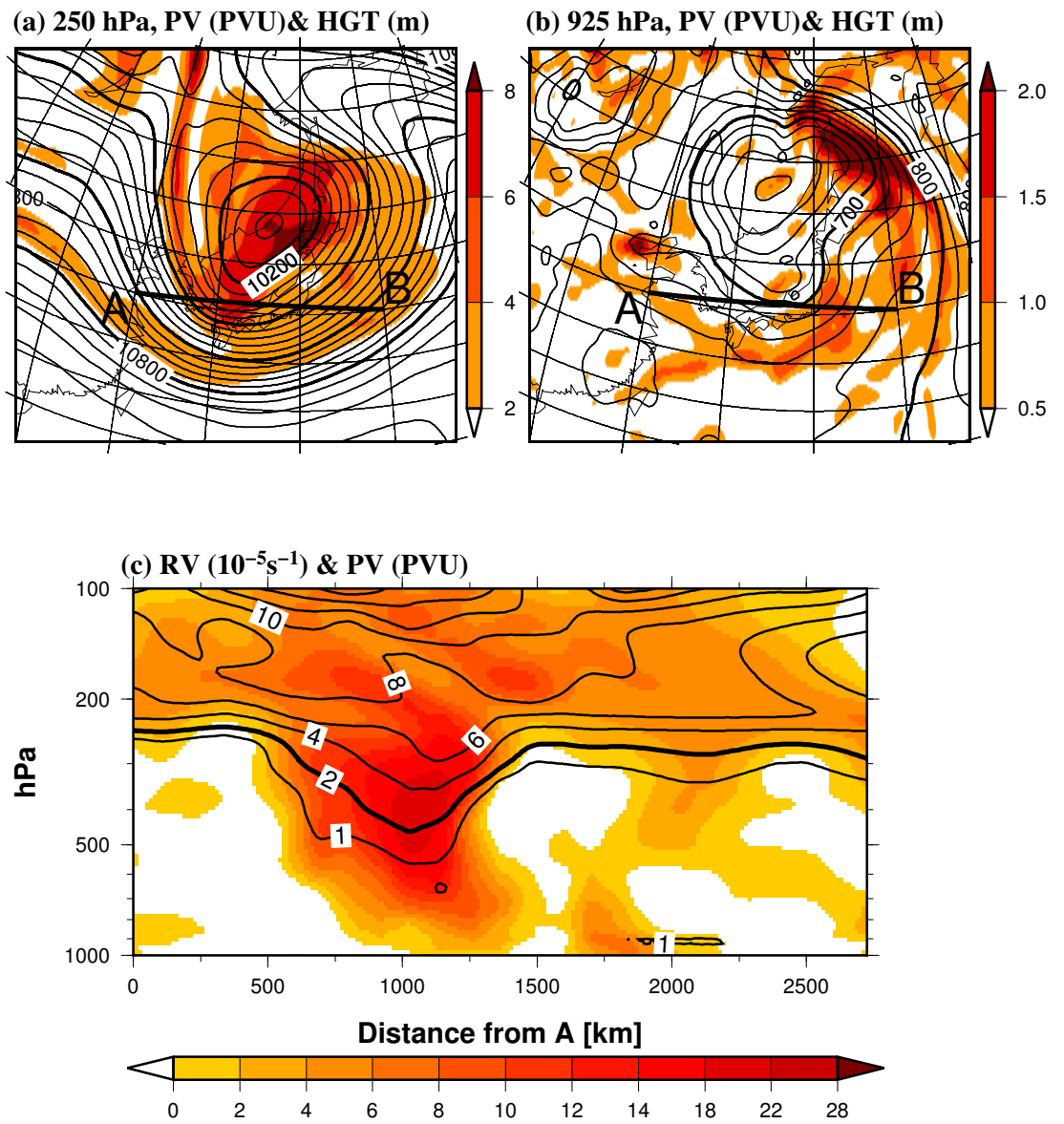


図 4.5: T20120506 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2012 05 06 06Z

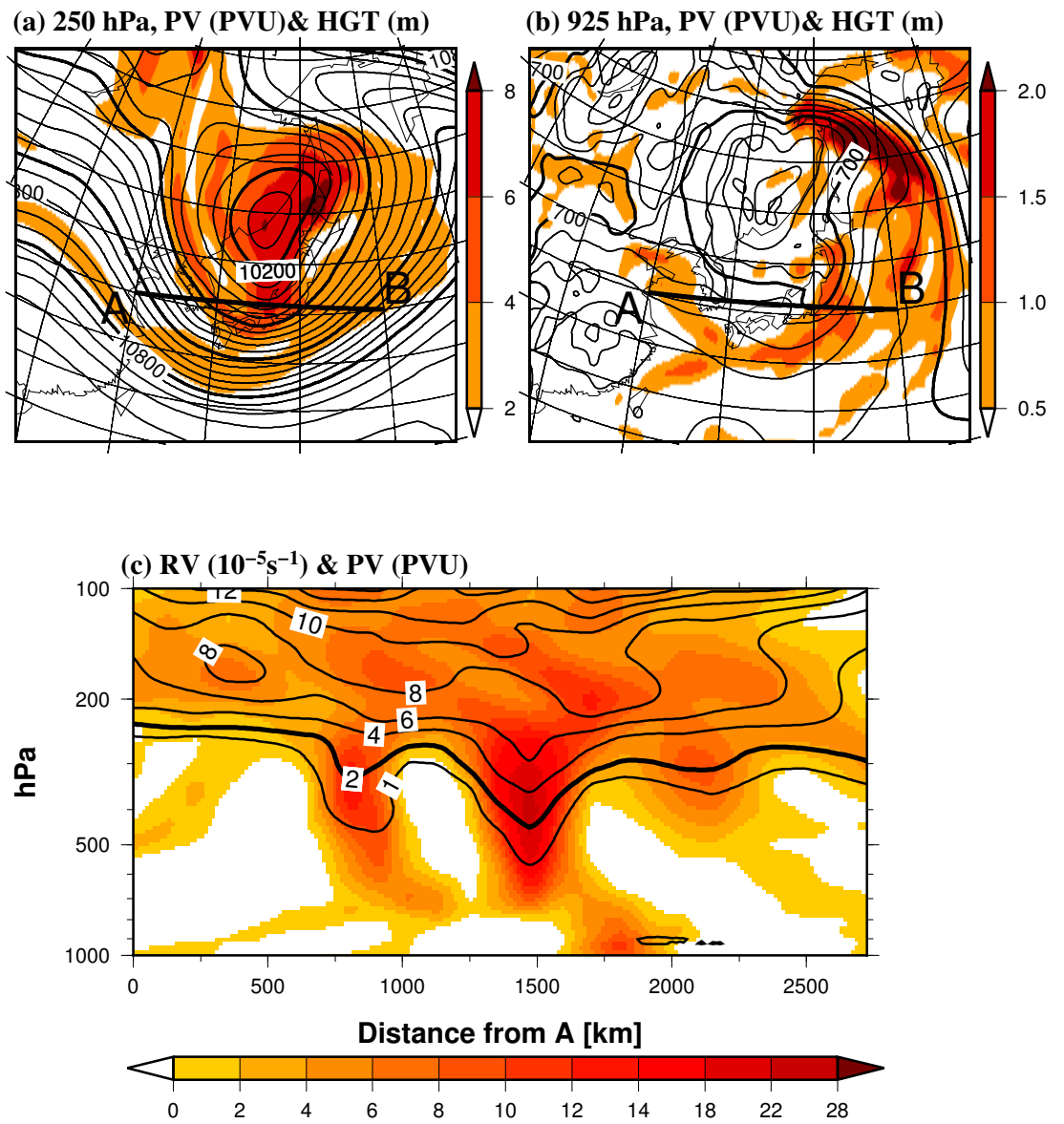


図 4.6: T20120506 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2008 11 01 18Z

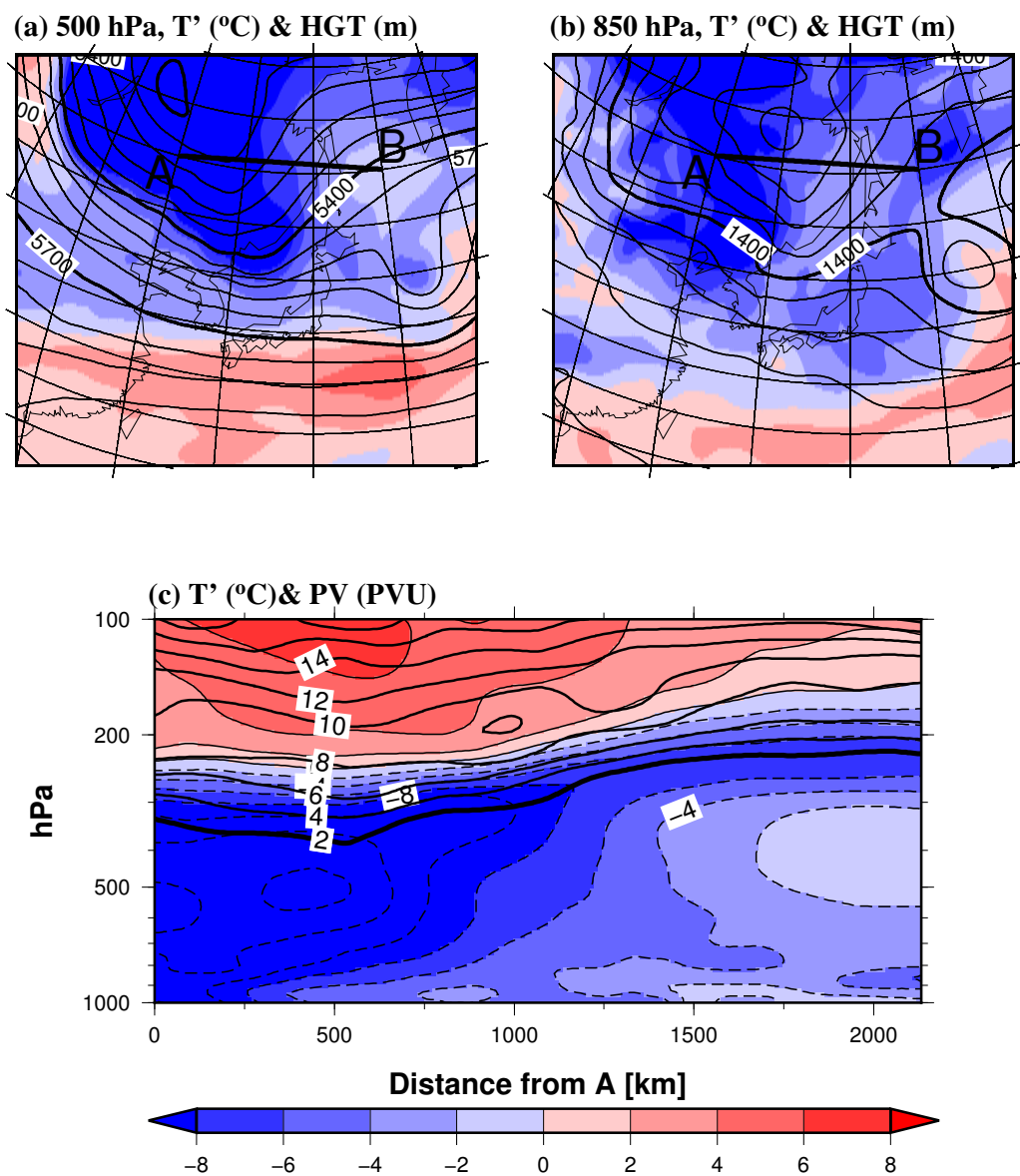


図 4.7: T20081102 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2008 11 02 00Z

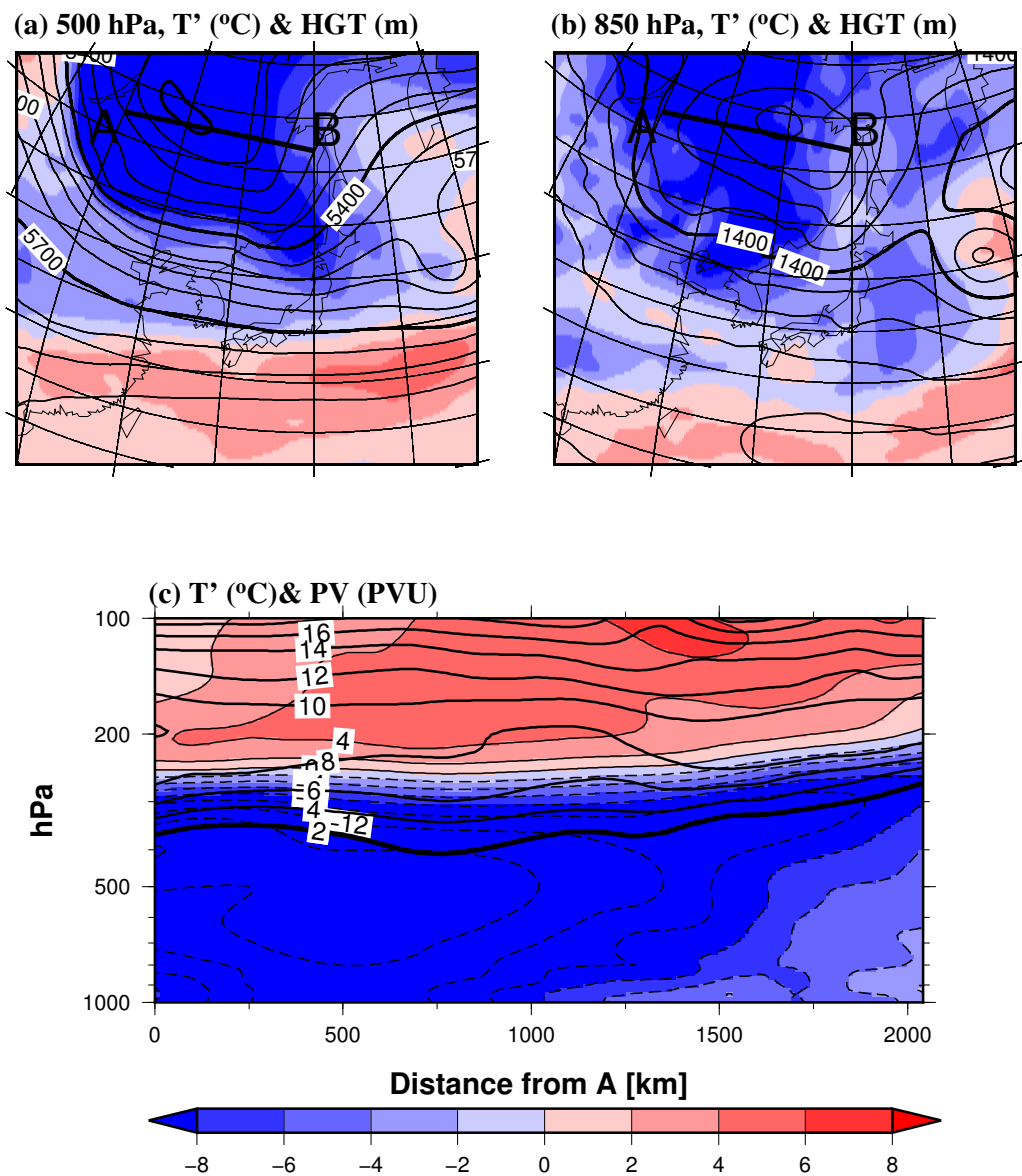


図 4.8: T20081102 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2008 11 02 06Z

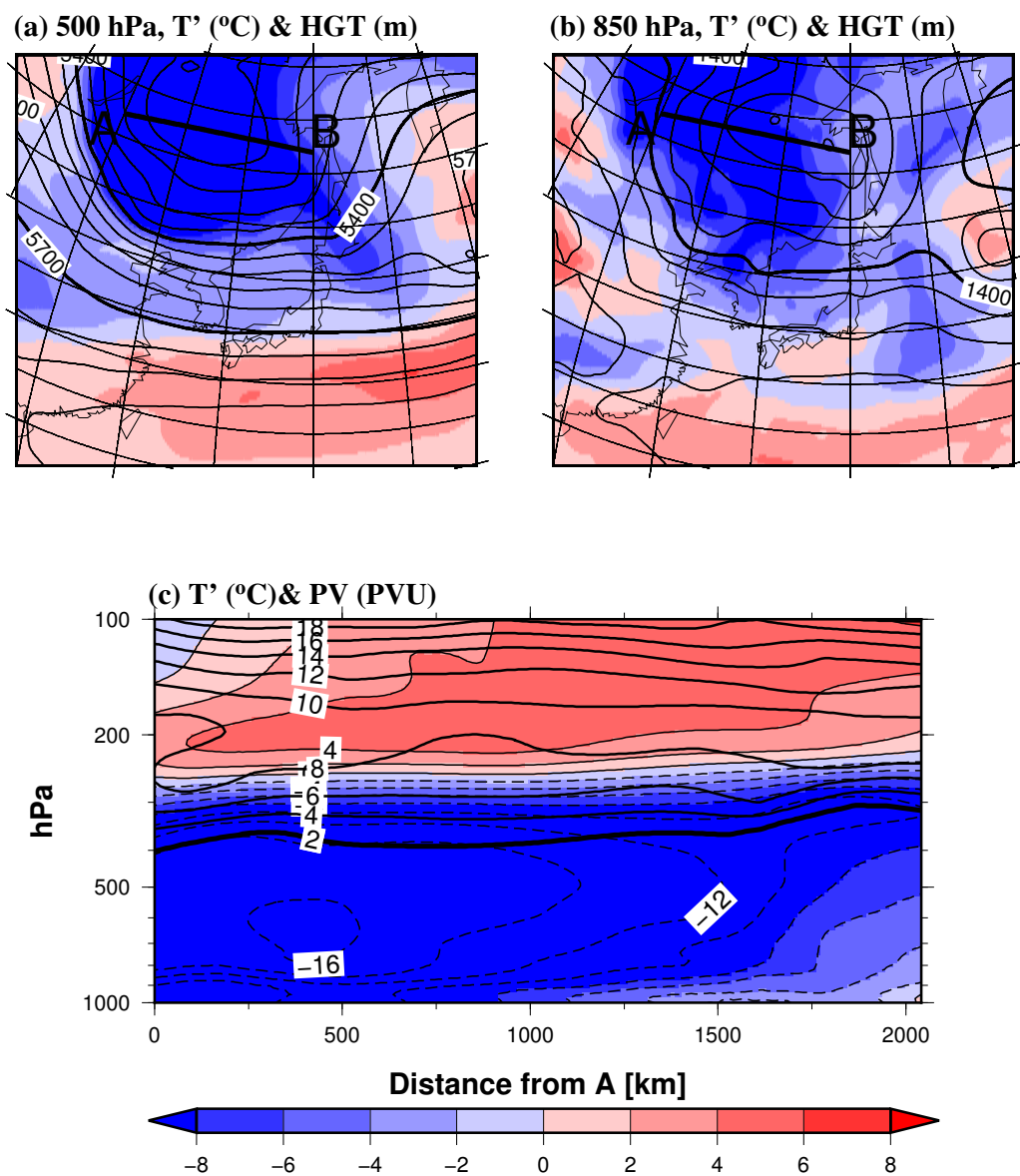


図 4.9: T20081102 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2008 11 01 18Z

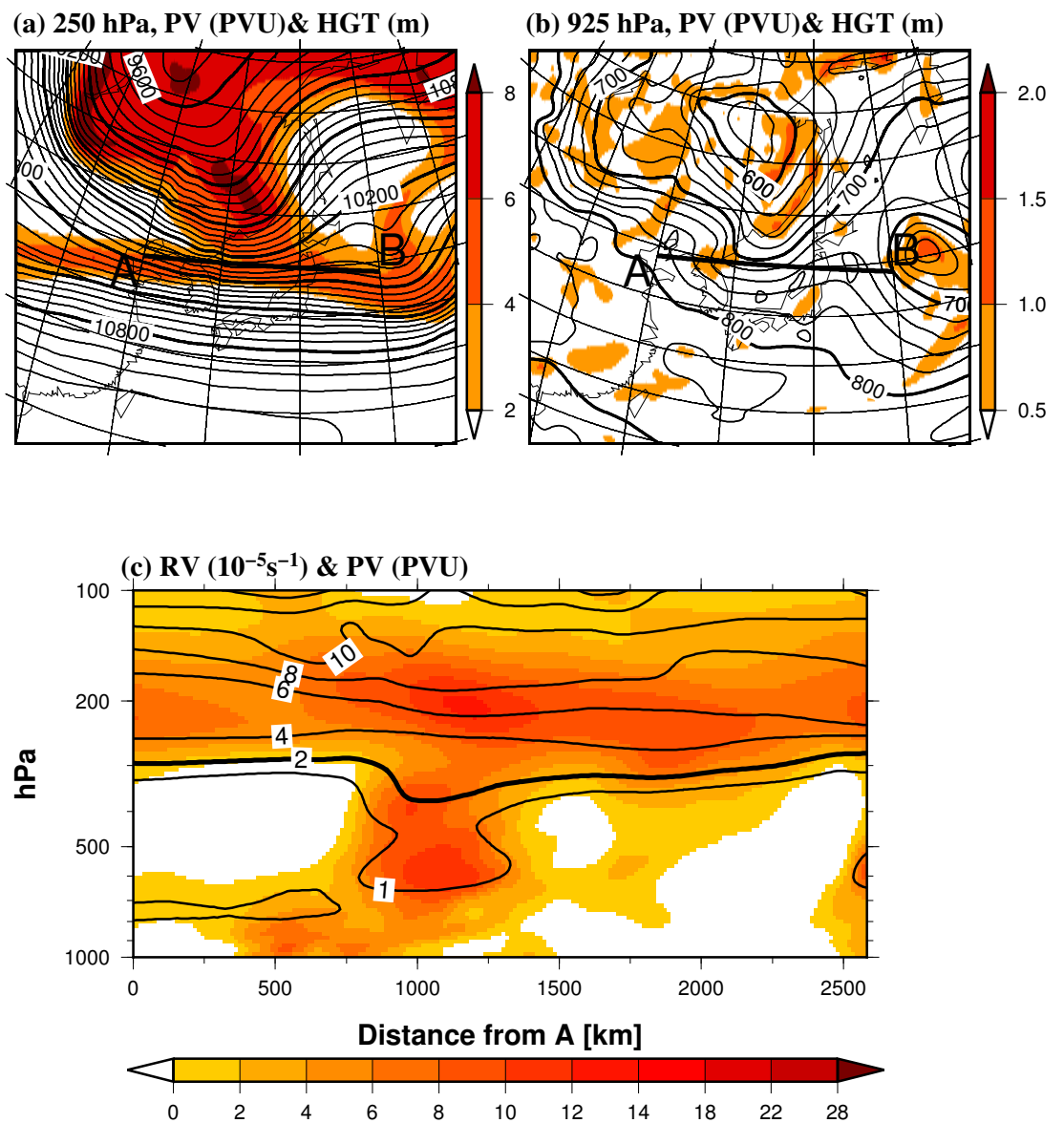


図 4.10: T20081102 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高線

2008 11 02 00Z

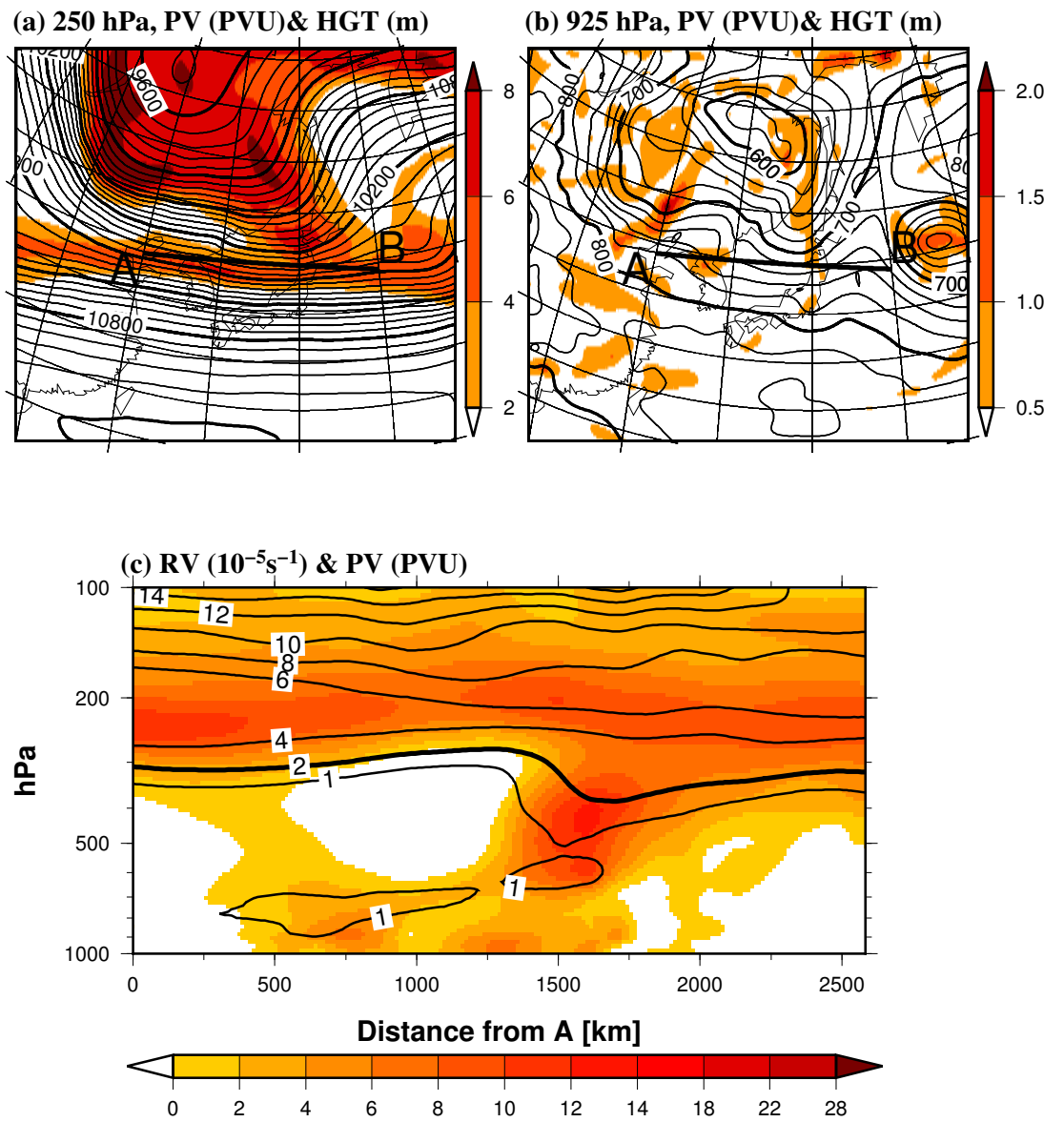


図 4.11: T20081102 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2008 11 02 06Z

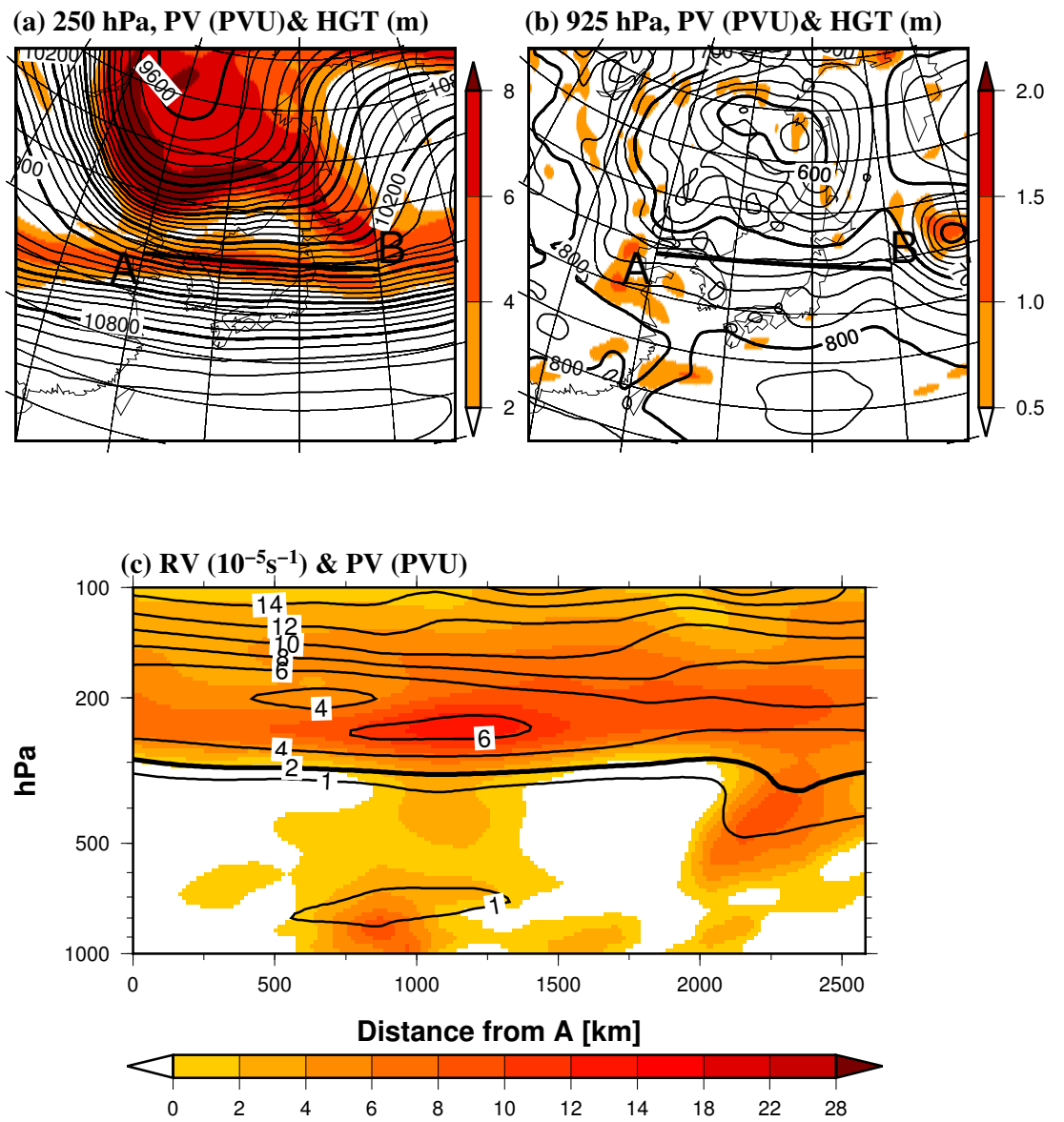


図 4.12: T20081102 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2008 11 06 18Z

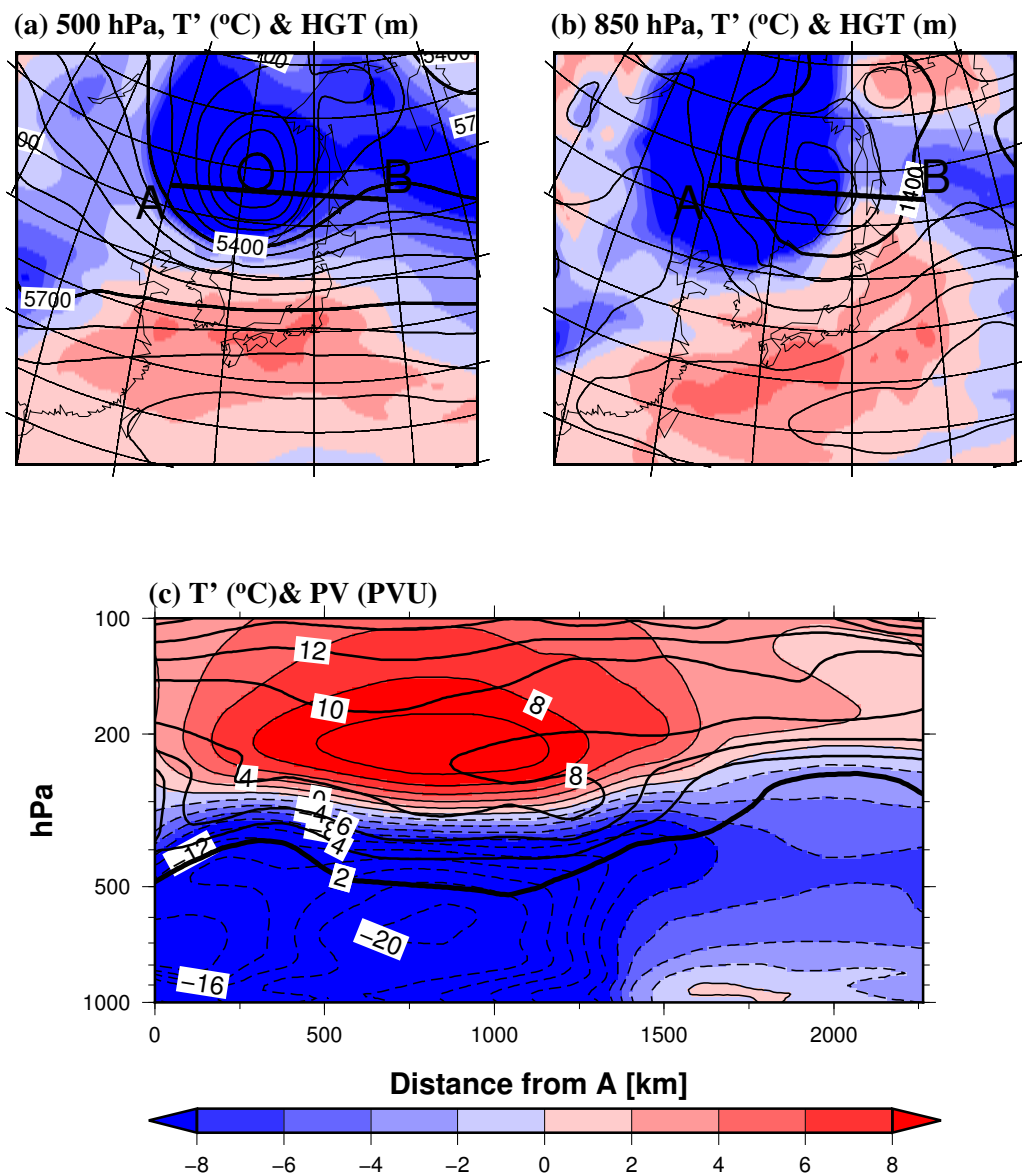


図 4.13: T20081107 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2008 11 07 00Z

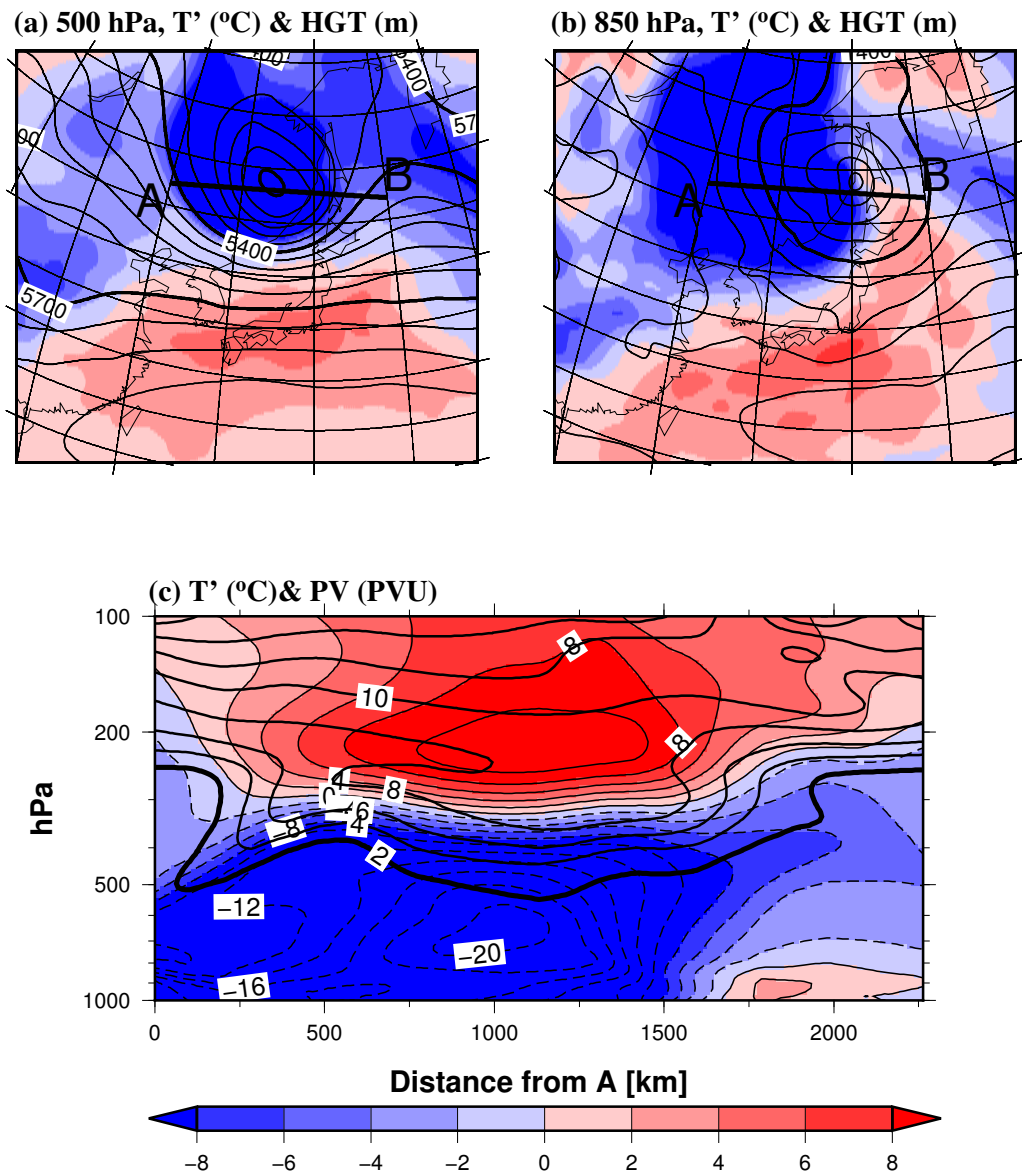


図 4.14: T20081107 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2008 11 07 06Z

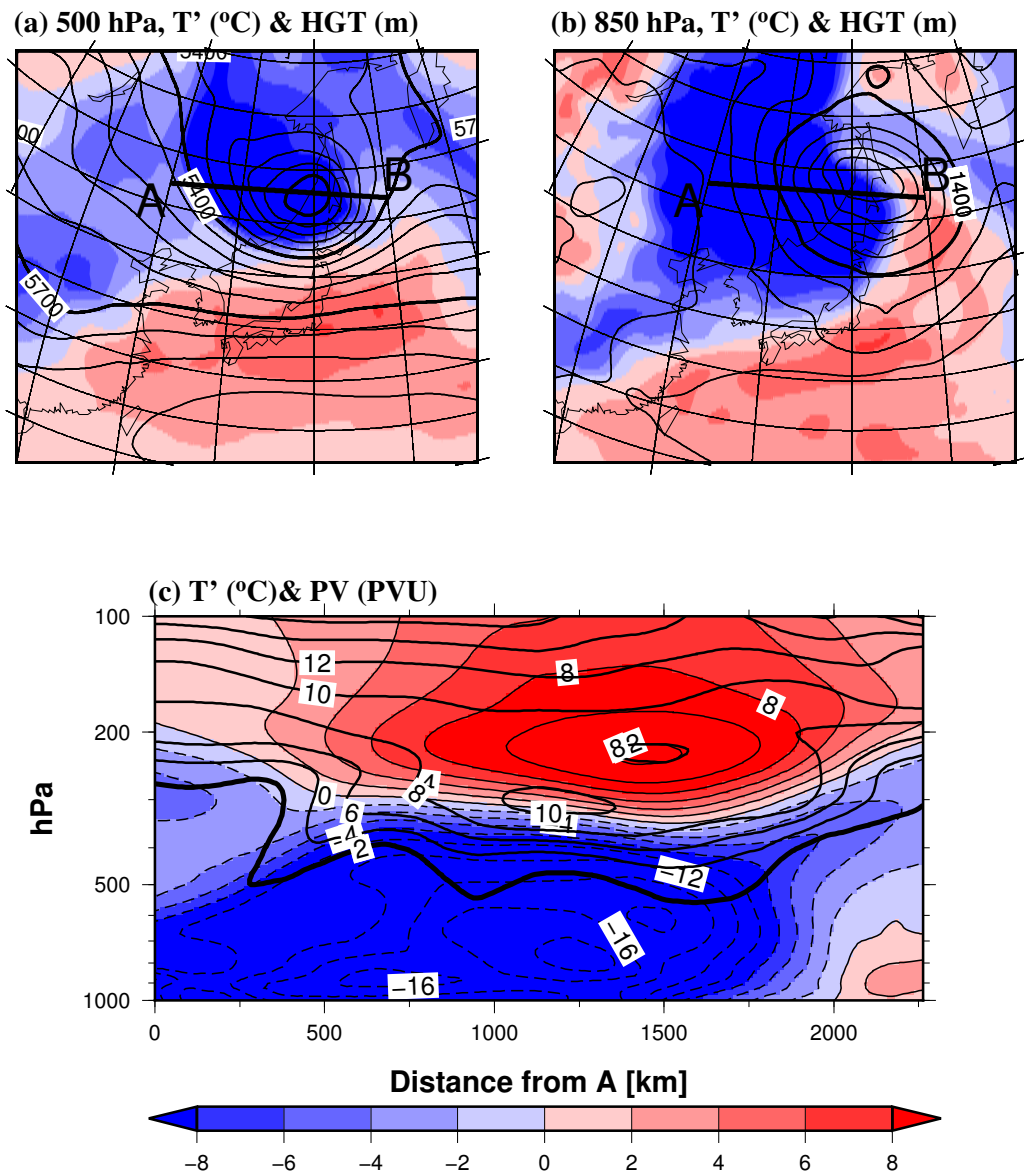


図 4.15: T20081107 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2008 11 06 18Z

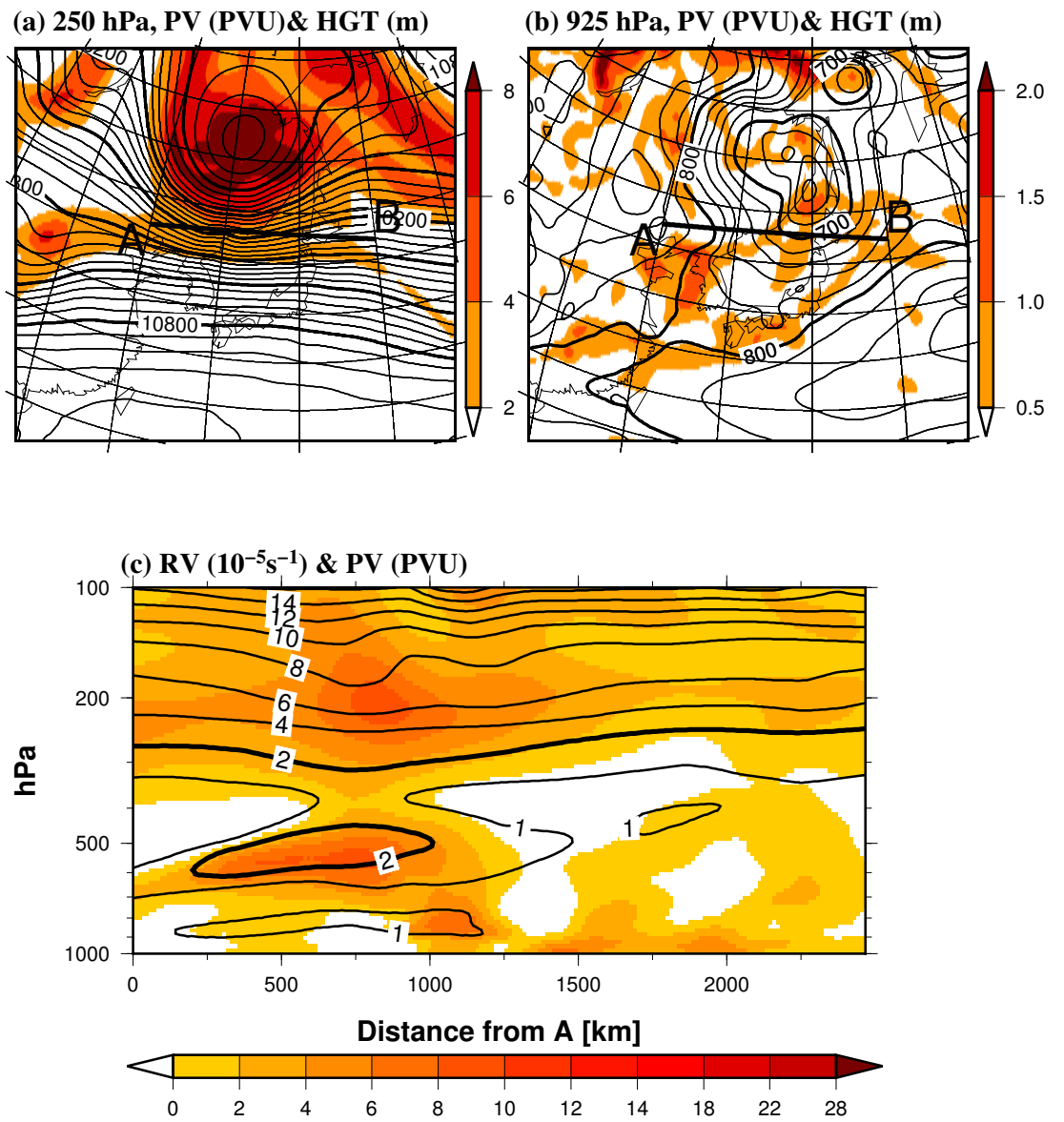


図 4.16: T20081107 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2008 11 07 00Z

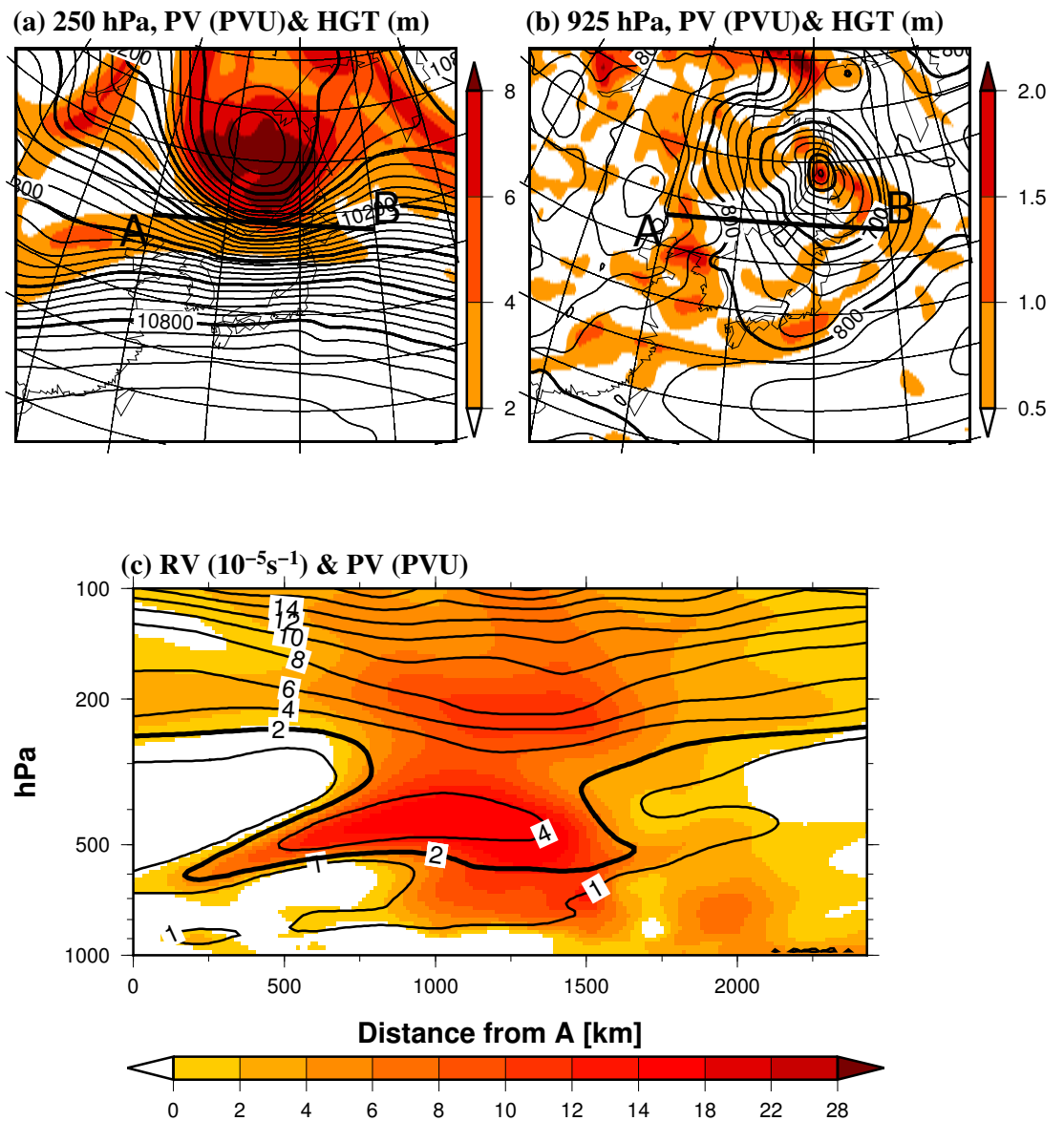


図 4.17: T20081107 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2008 11 07 06Z

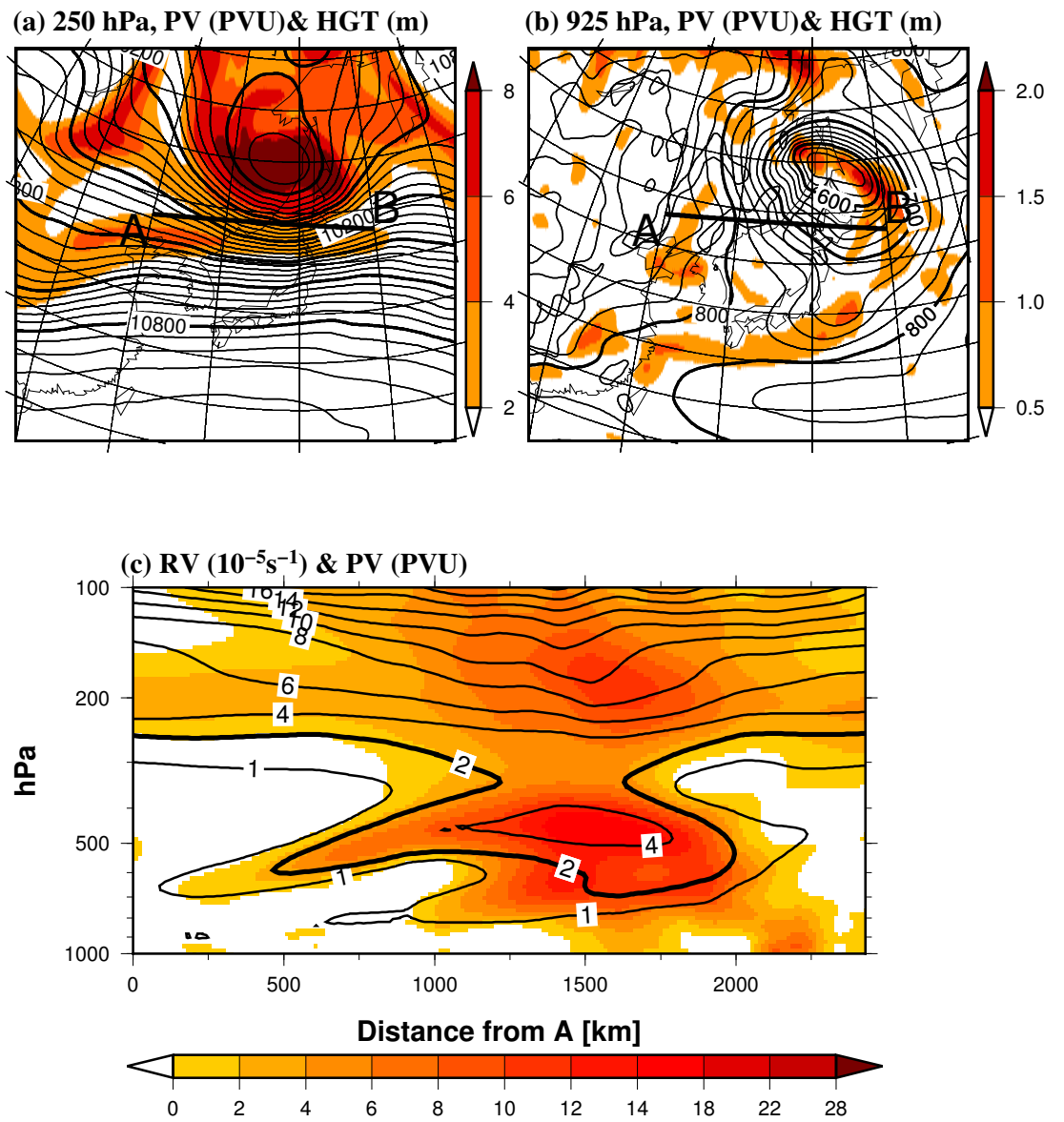


図 4.18: T20081107 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2009 01 24 12Z

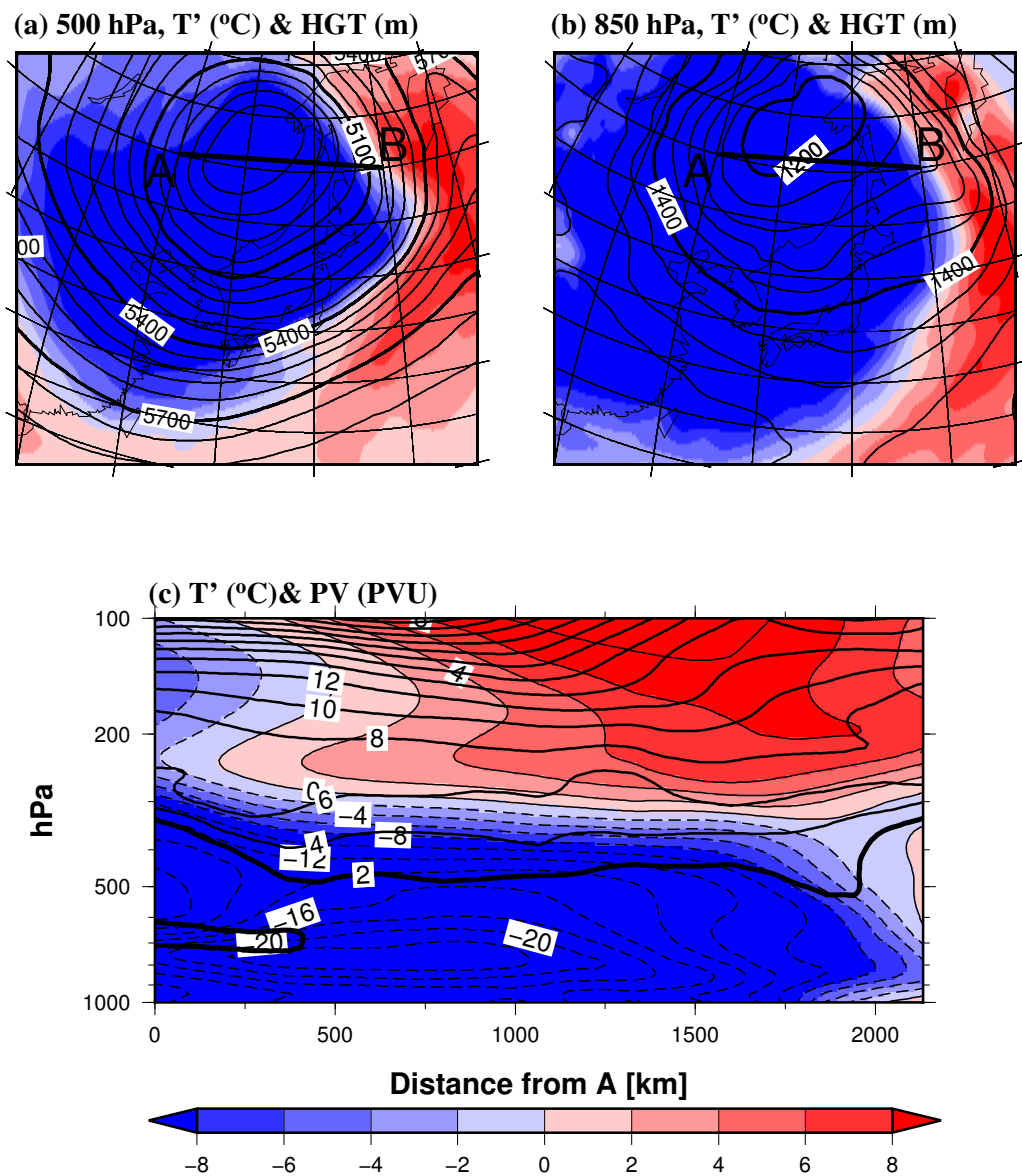


図 4.19: T20090124 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2009 01 24 18Z

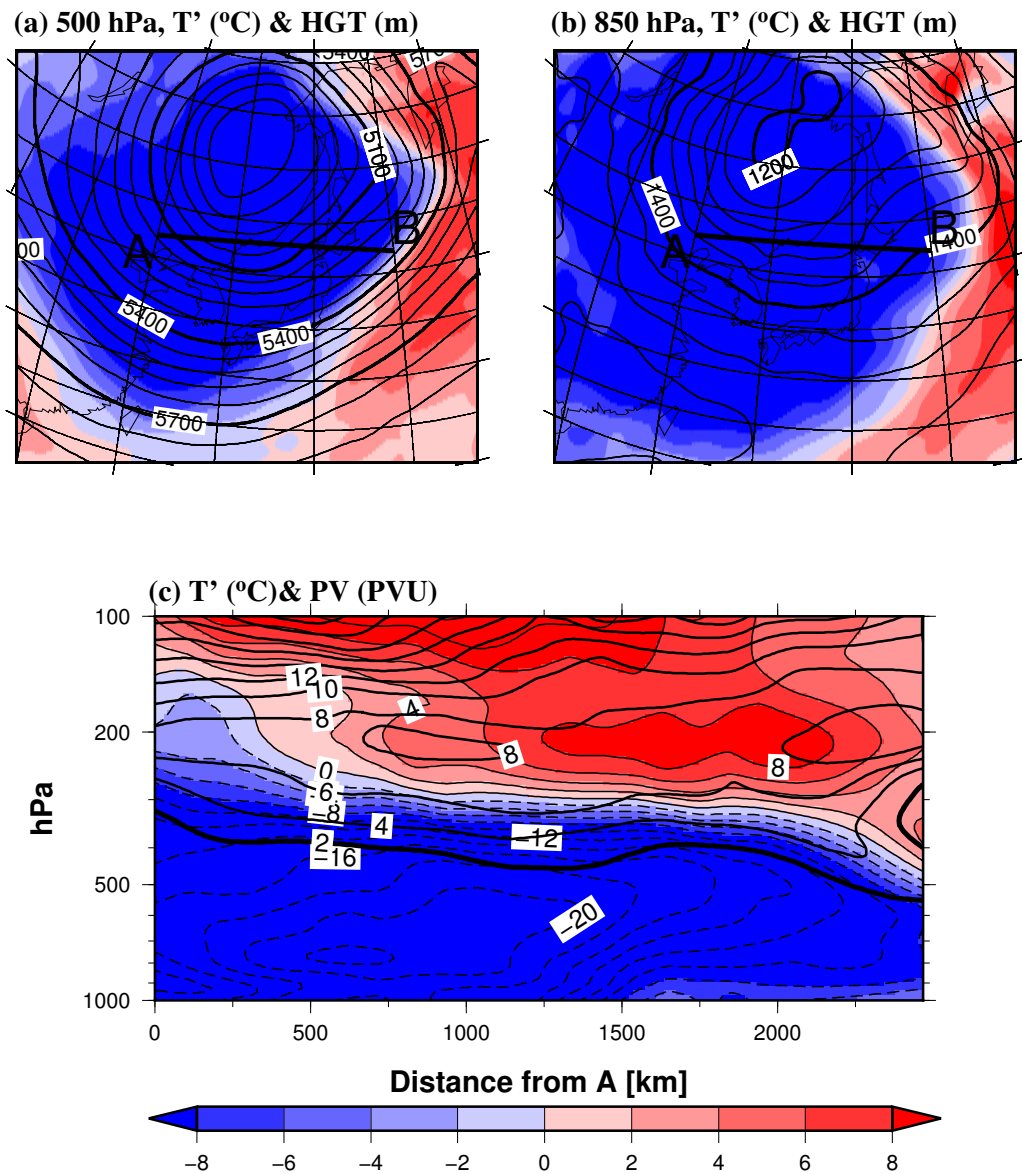
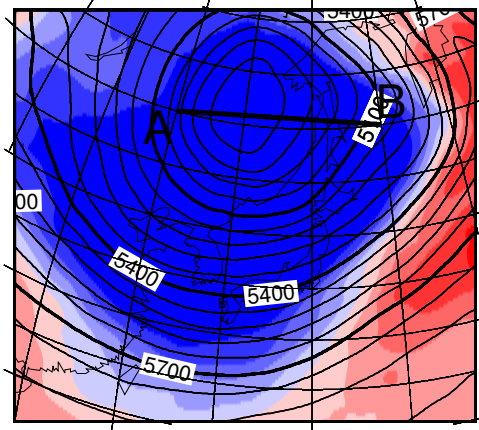


図 4.20: T20090124 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2009 01 25 00Z

(a) 500 hPa, T' ($^{\circ}\text{C}$) & HGT (m)



(b) 850 hPa, T' ($^{\circ}\text{C}$) & HGT (m)

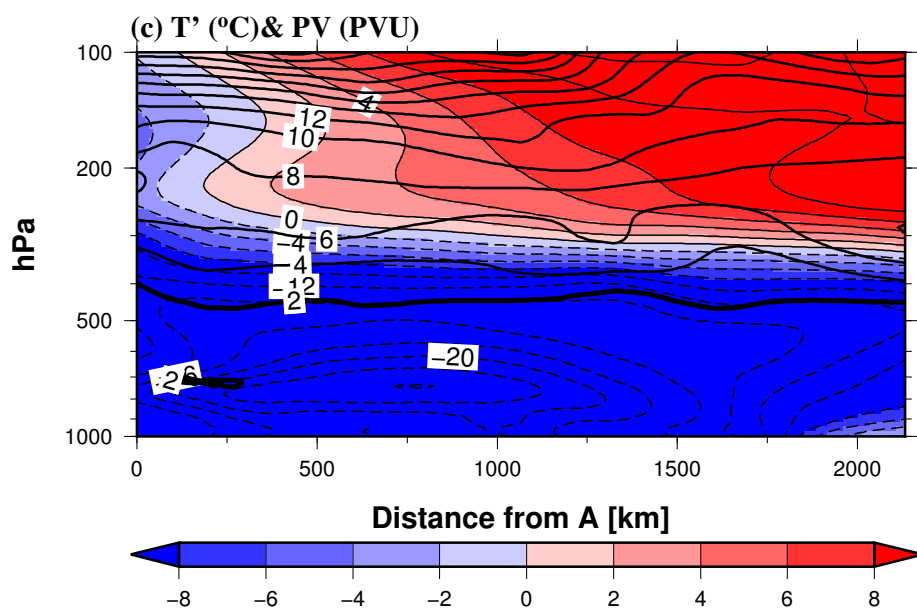
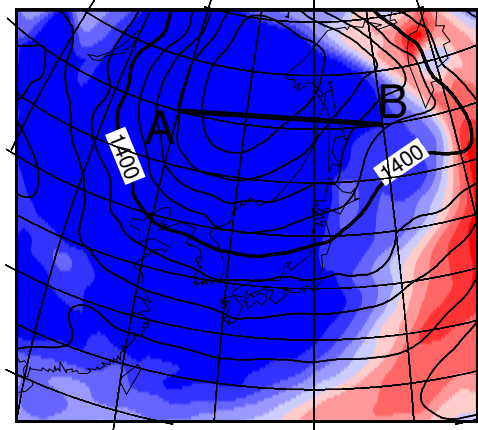


図 4.21: T20090124 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2009 01 24 12Z

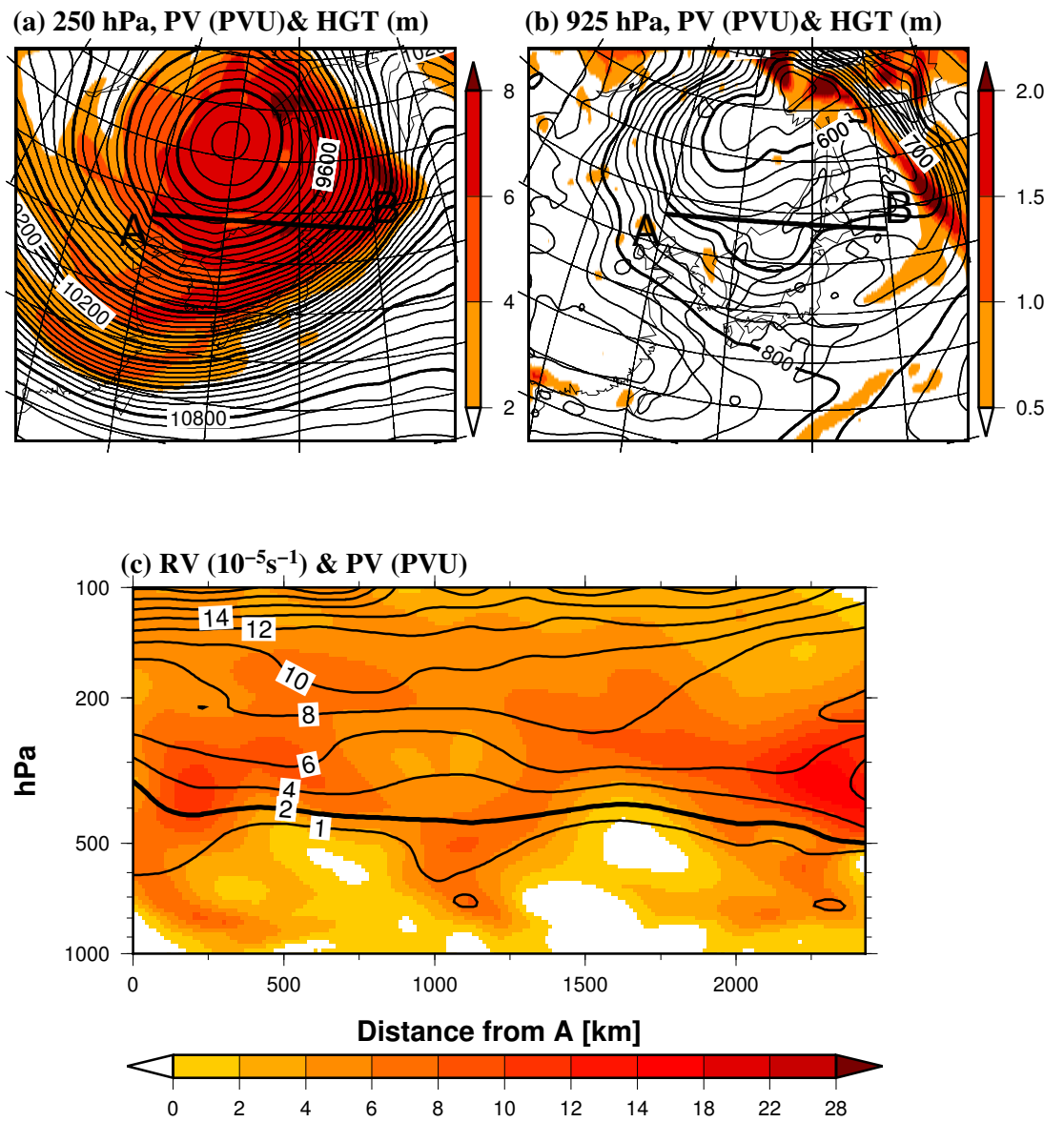


図 4.22: T20090125 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2009 01 24 18Z

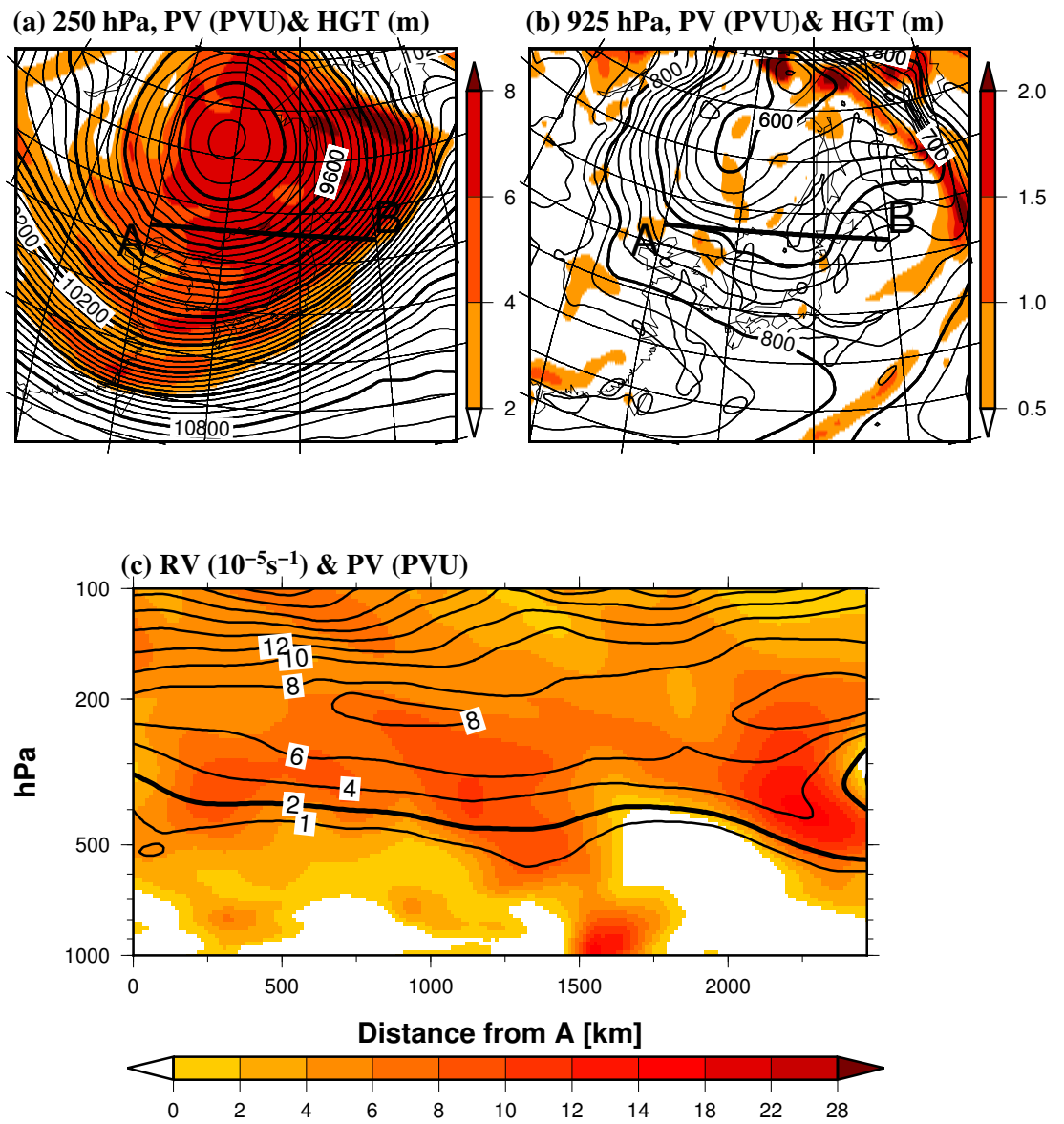


図 4.23: T20090125 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2009 01 25 00Z

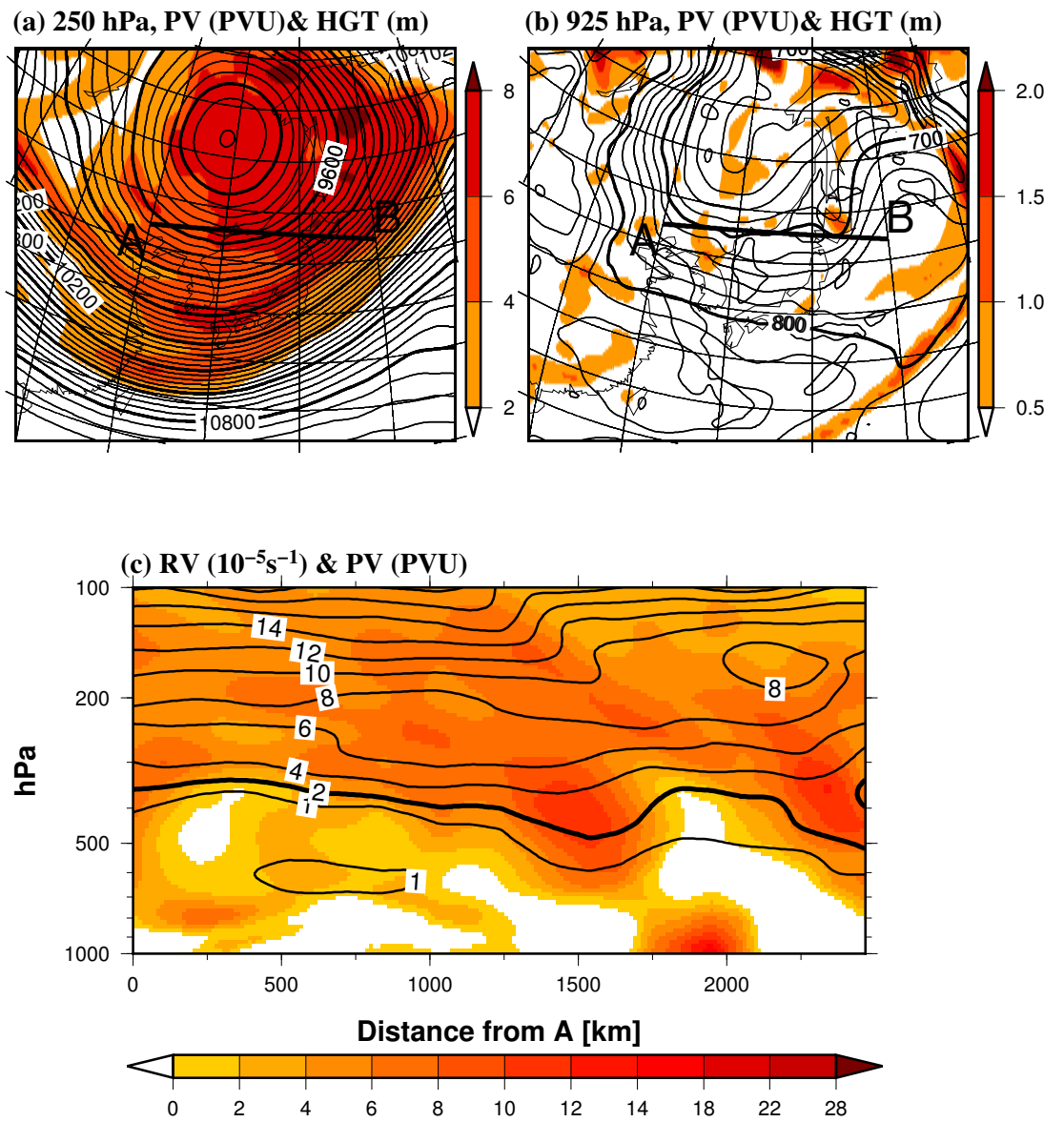


図 4.24: T20090125 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2013 08 31 00Z

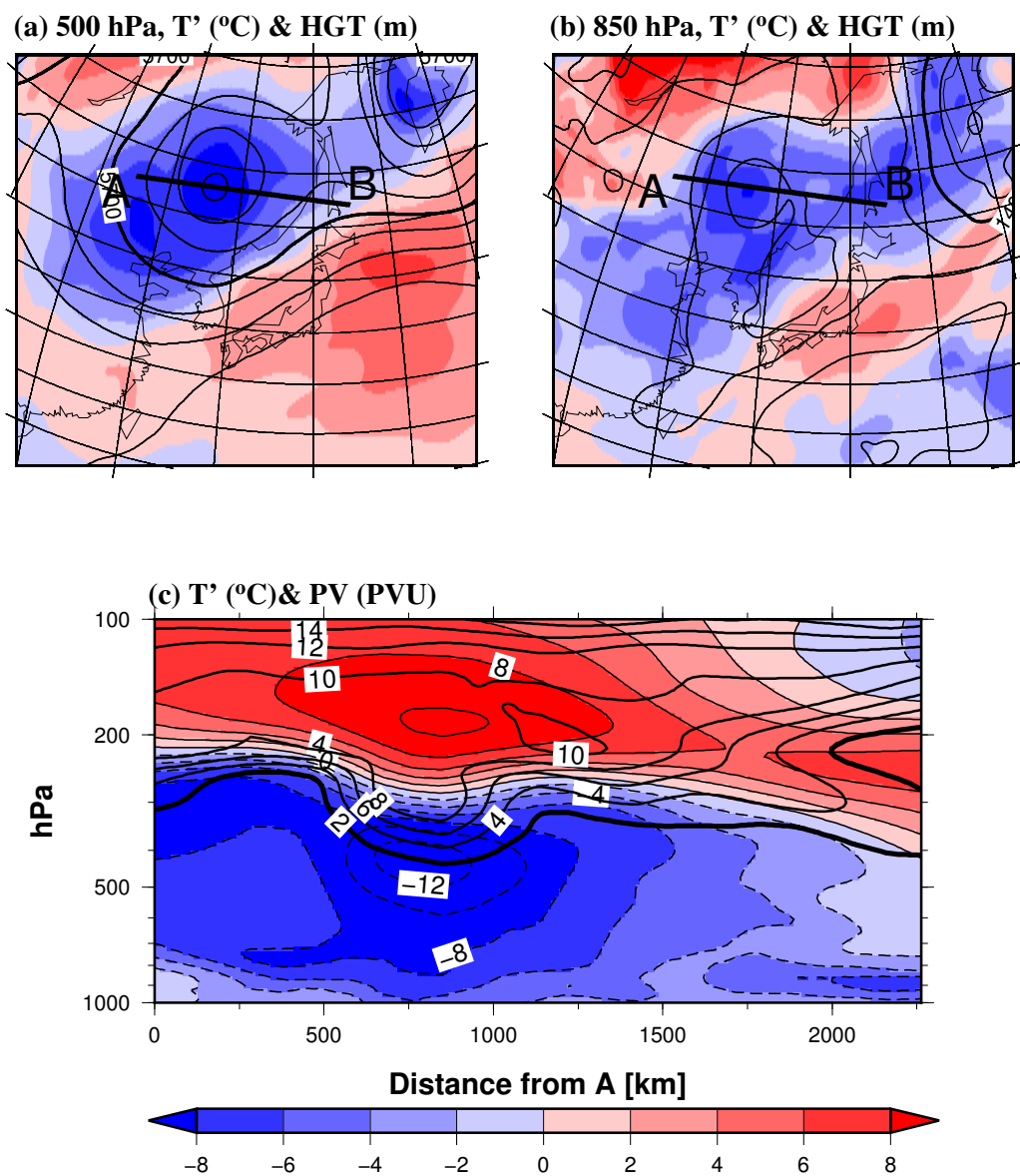


図 4.25: T20130831 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2013 08 31 06Z

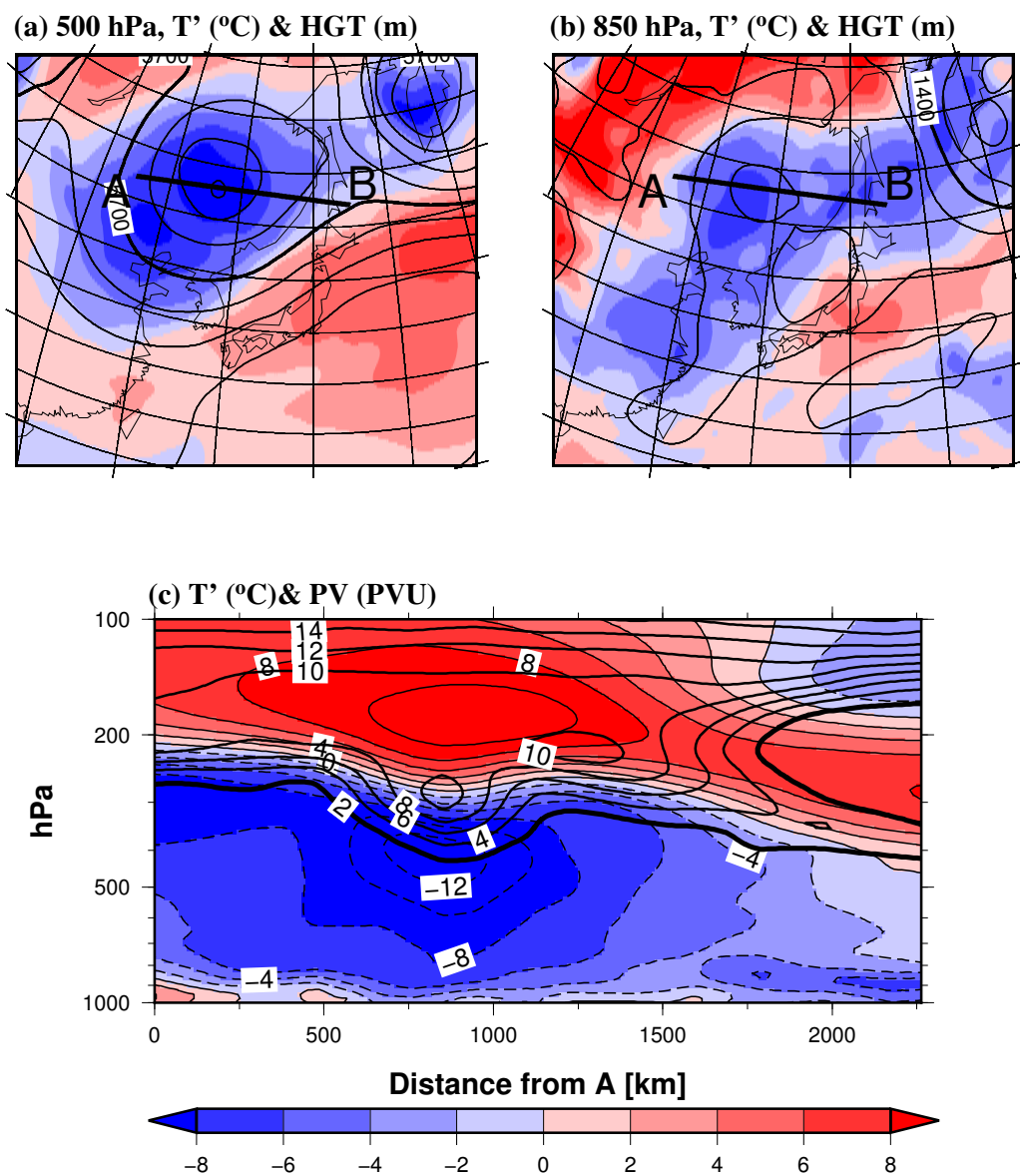


図 4.26: T20130831 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2013 08 31 12Z

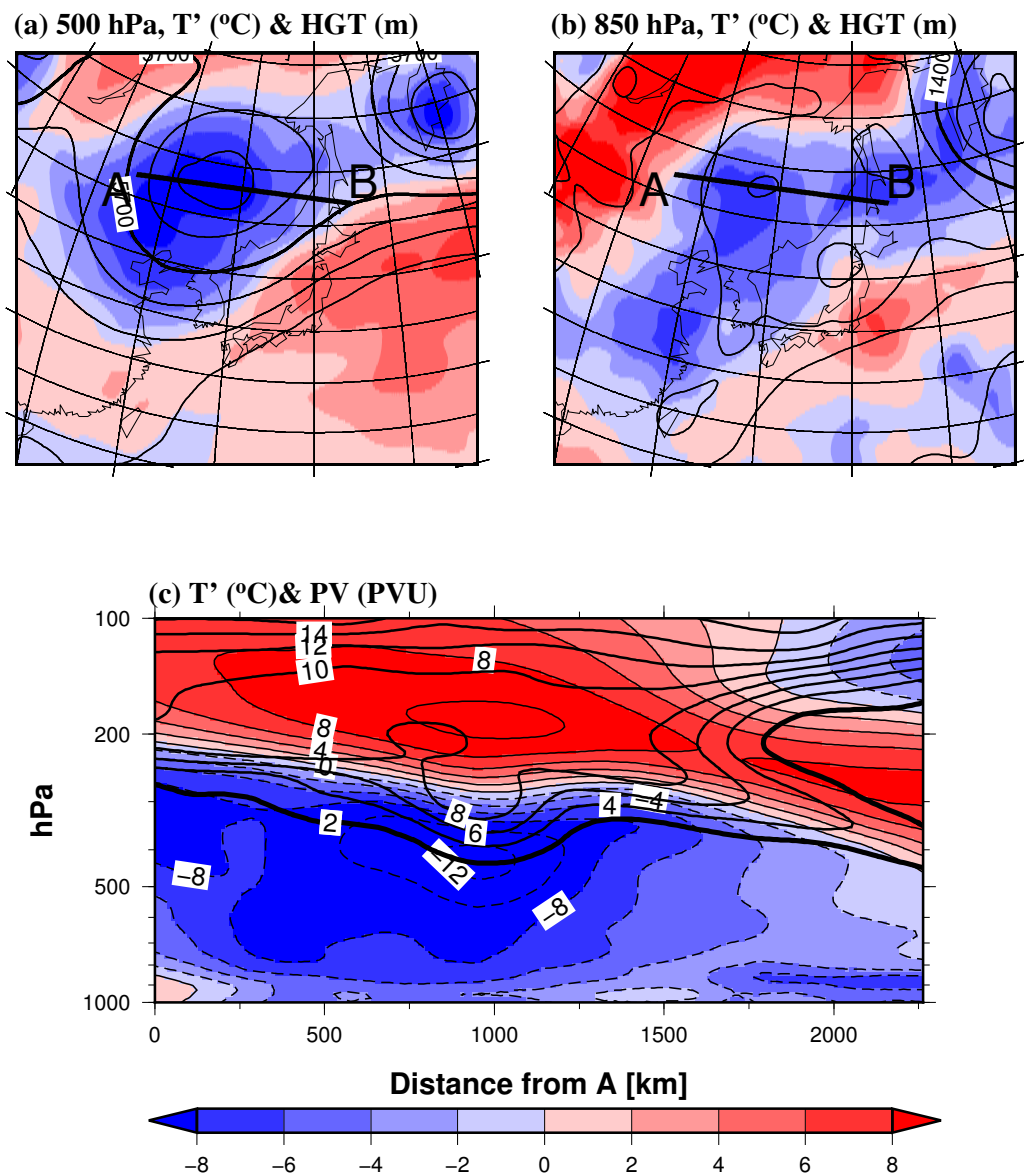


図 4.27: T20130831 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2013 08 31 00Z

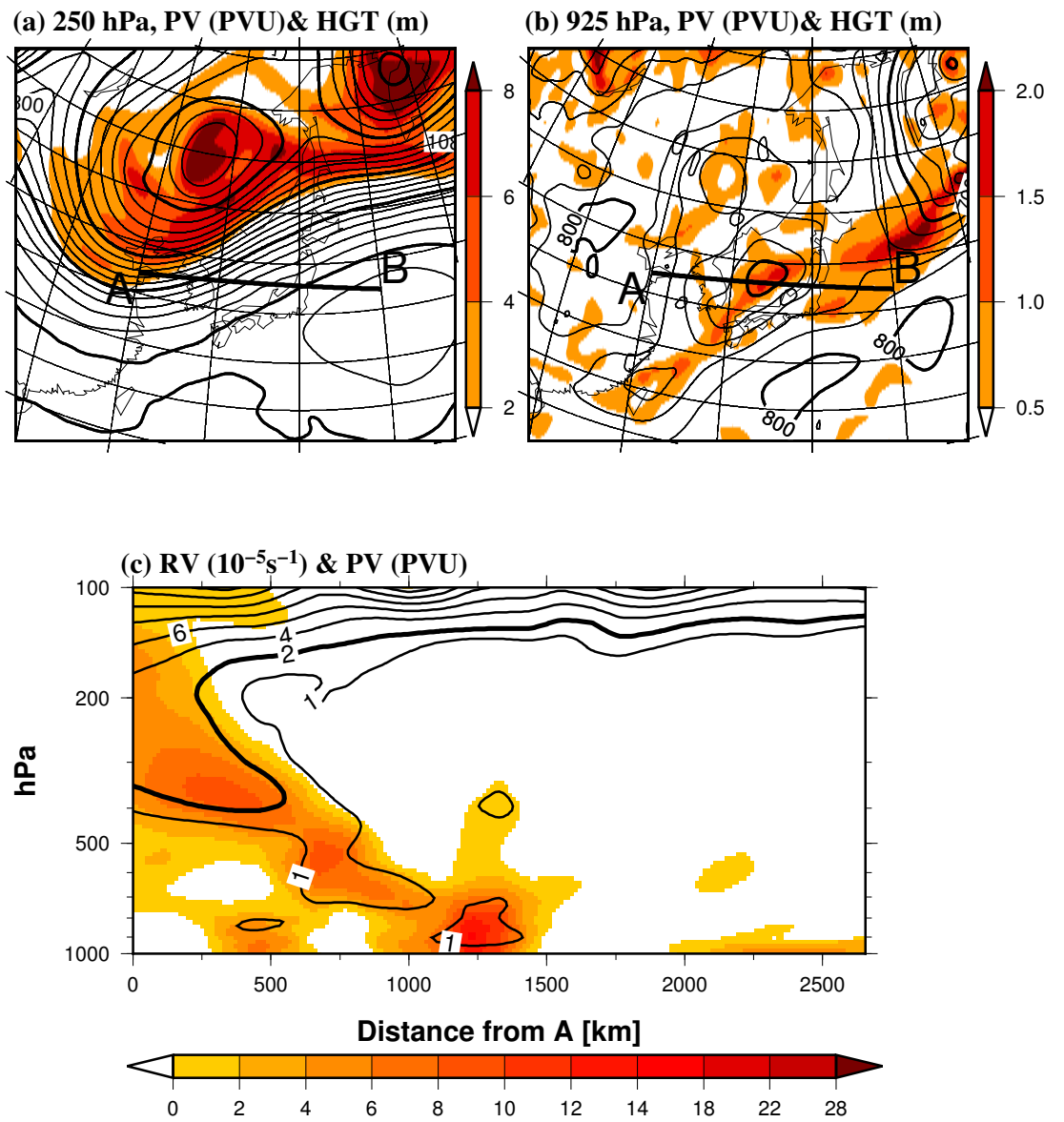


図 4.28: T20130831 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2013 08 31 06Z

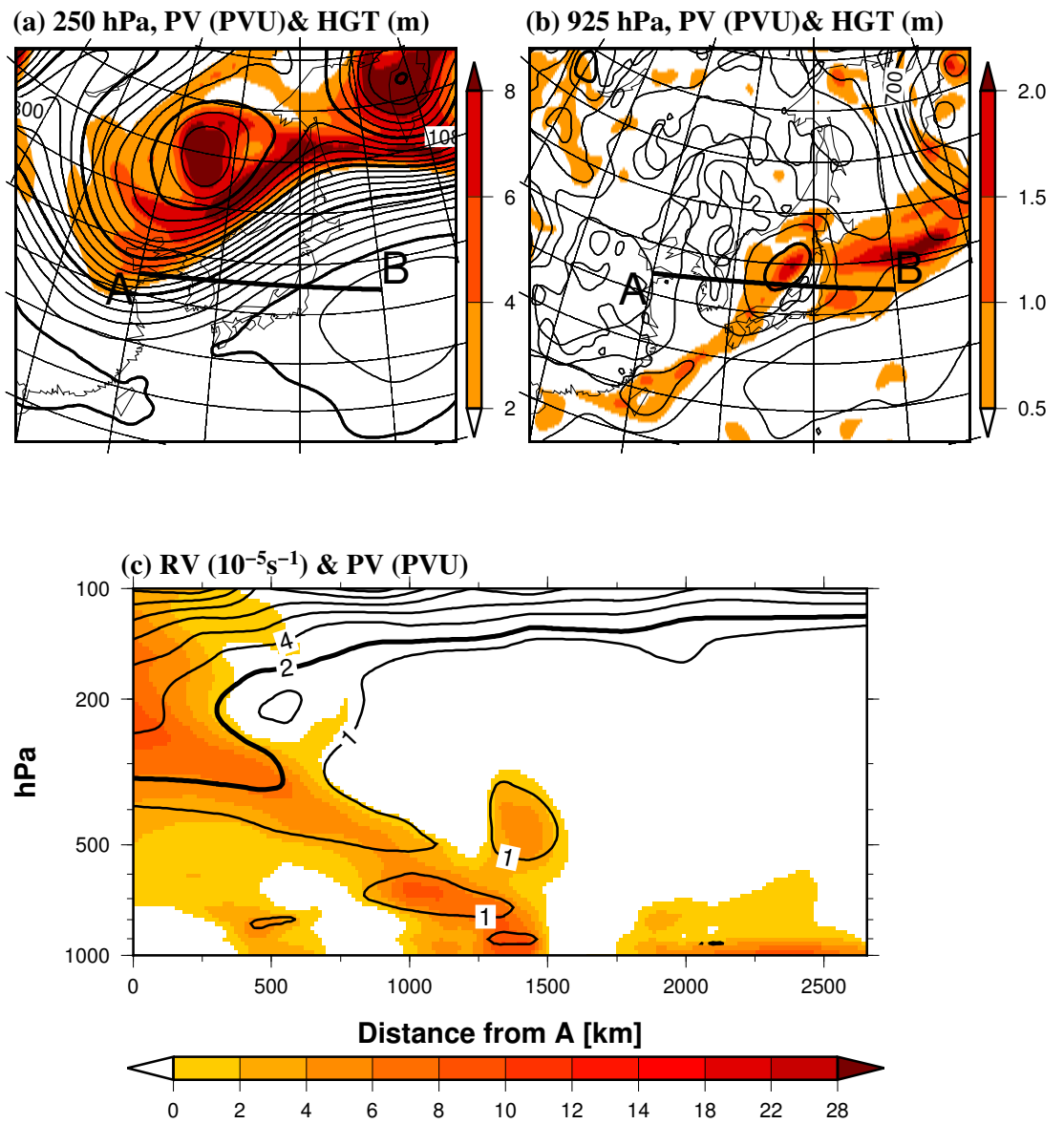


図 4.29: T20130831 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2013 08 31 12Z

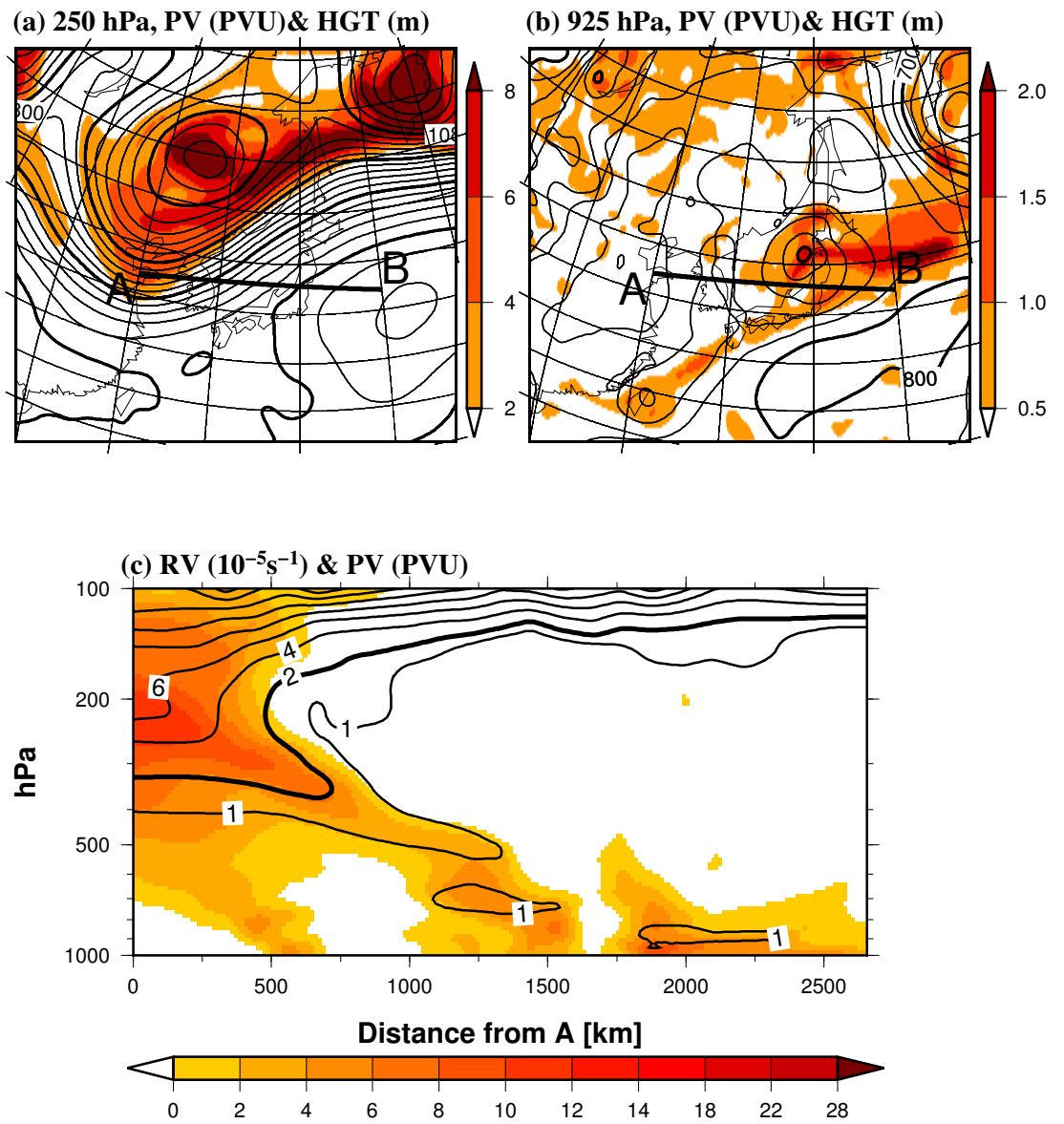


図 4.30: T20130831 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2013 11 09 18Z

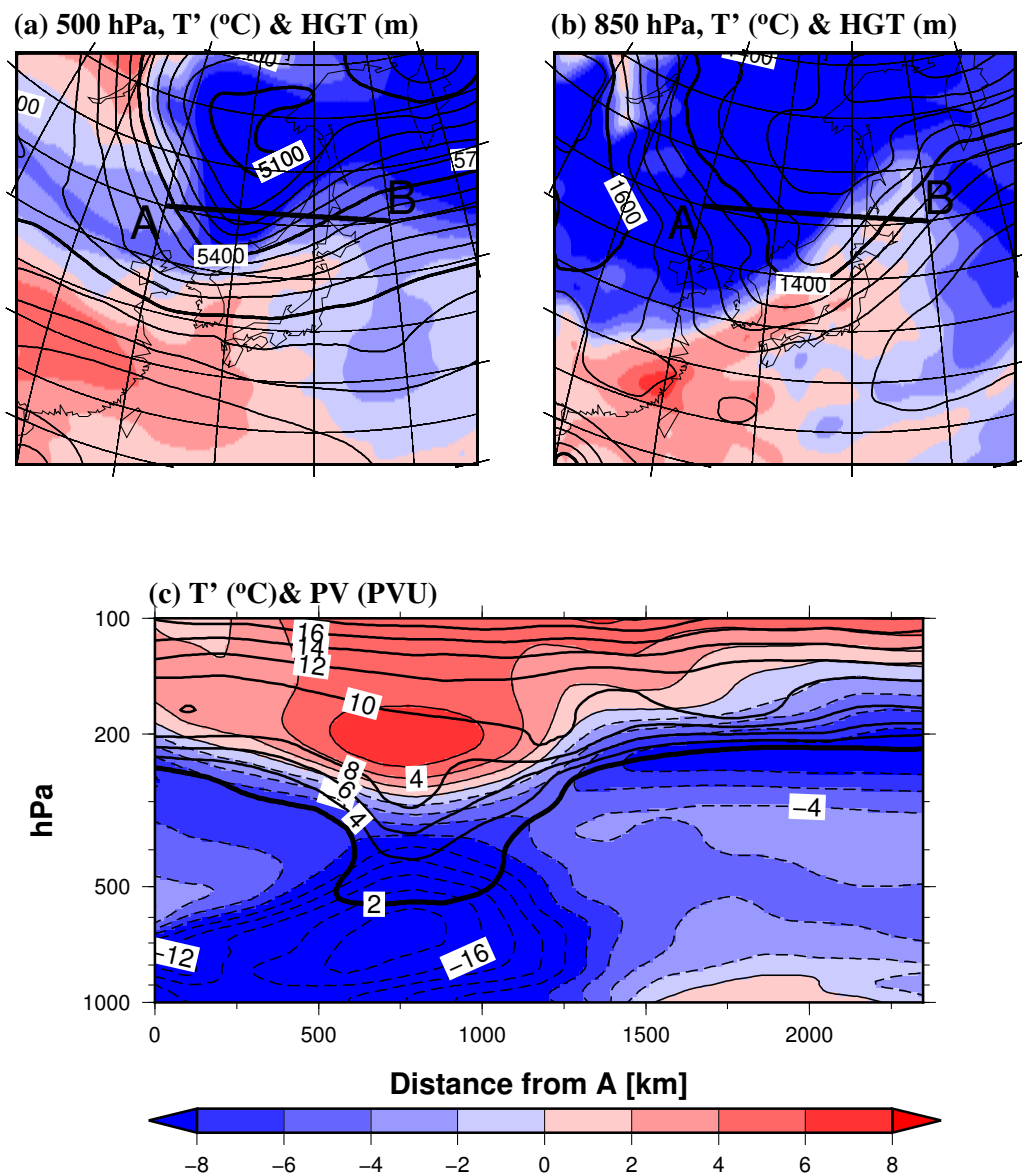


図 4.31: T20131110 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2013 11 10 00Z

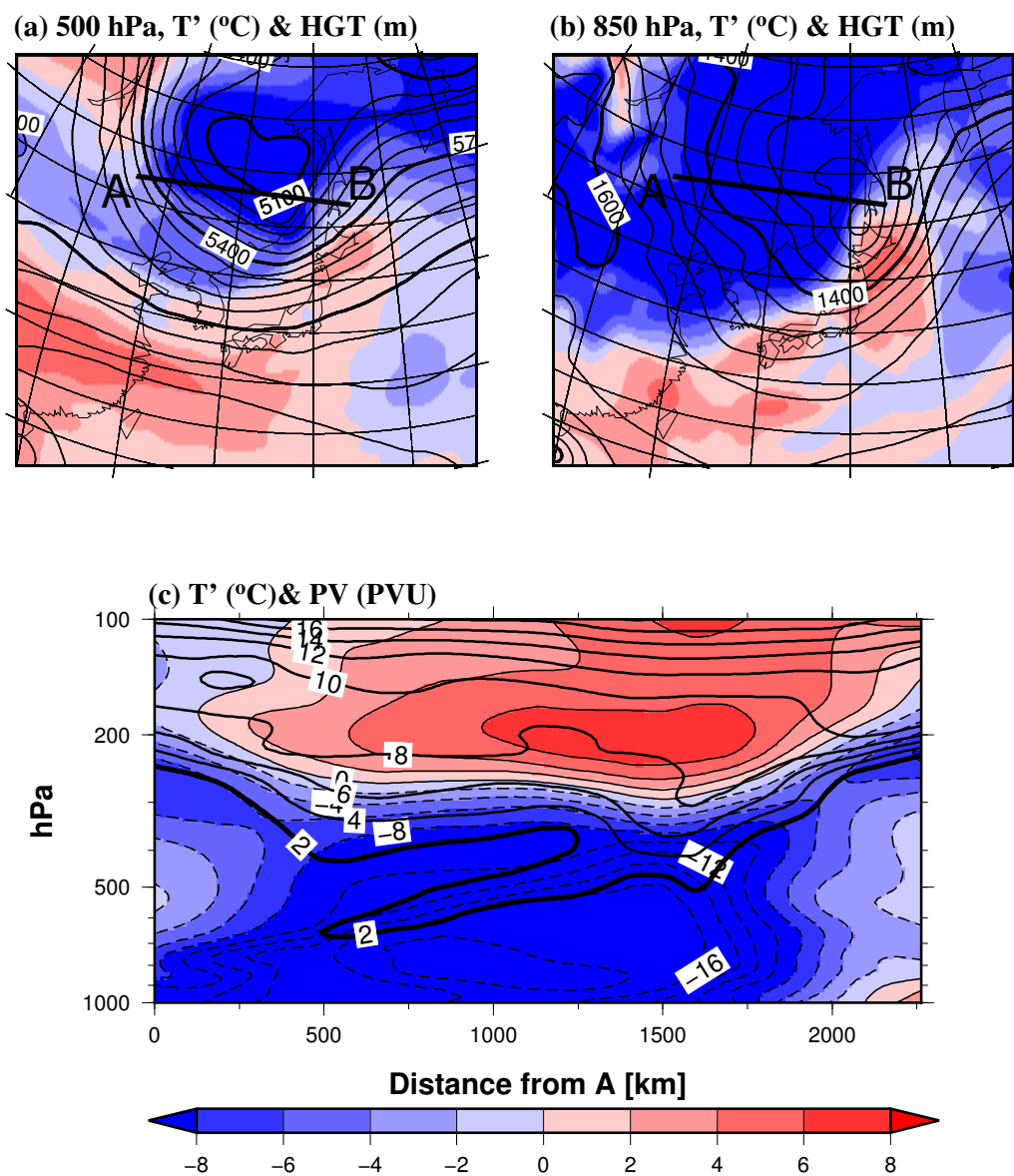


図 4.32: T20131110 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2013 11 10 06Z

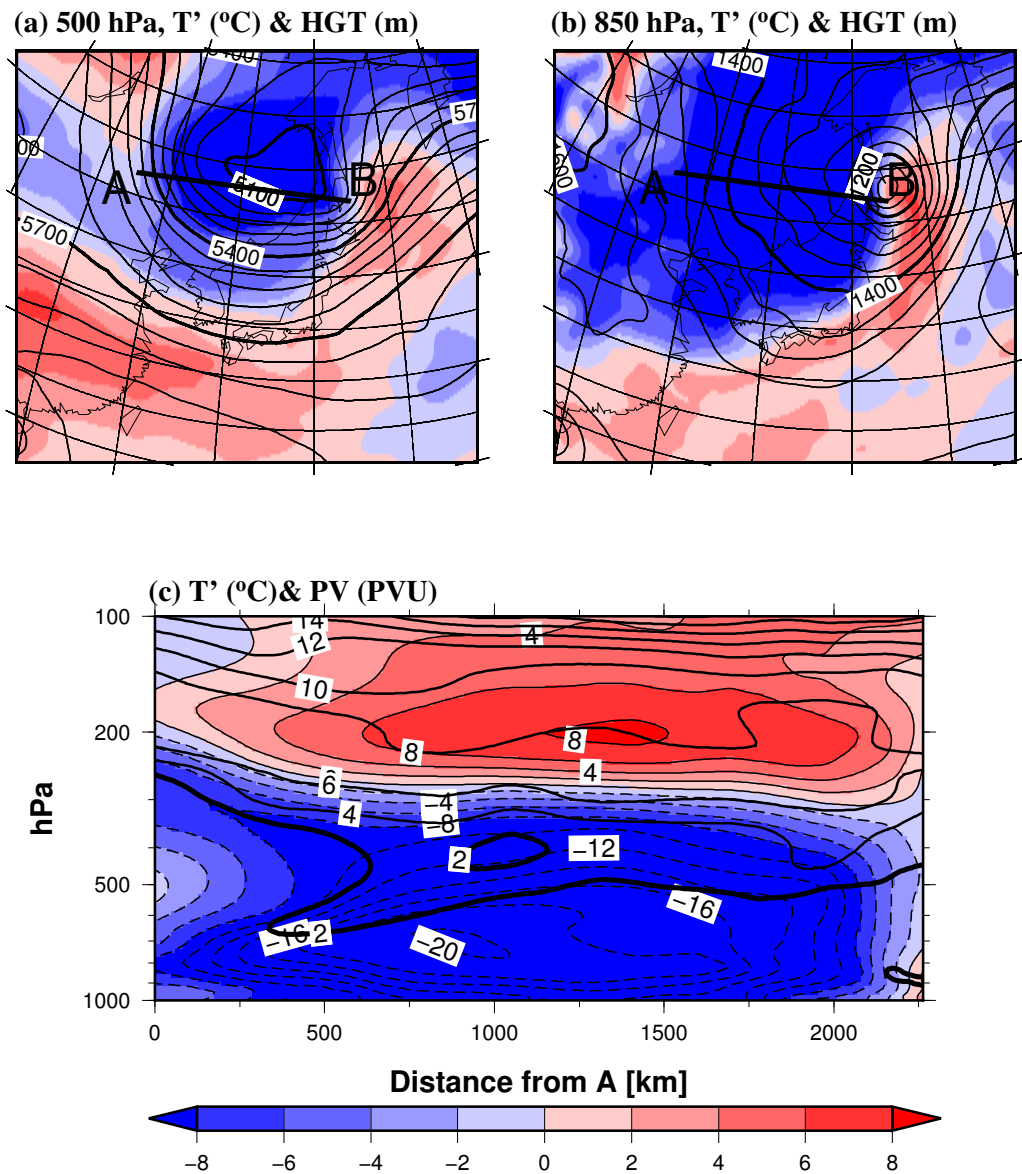


図 4.33: T20131110 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2013 11 09 18Z

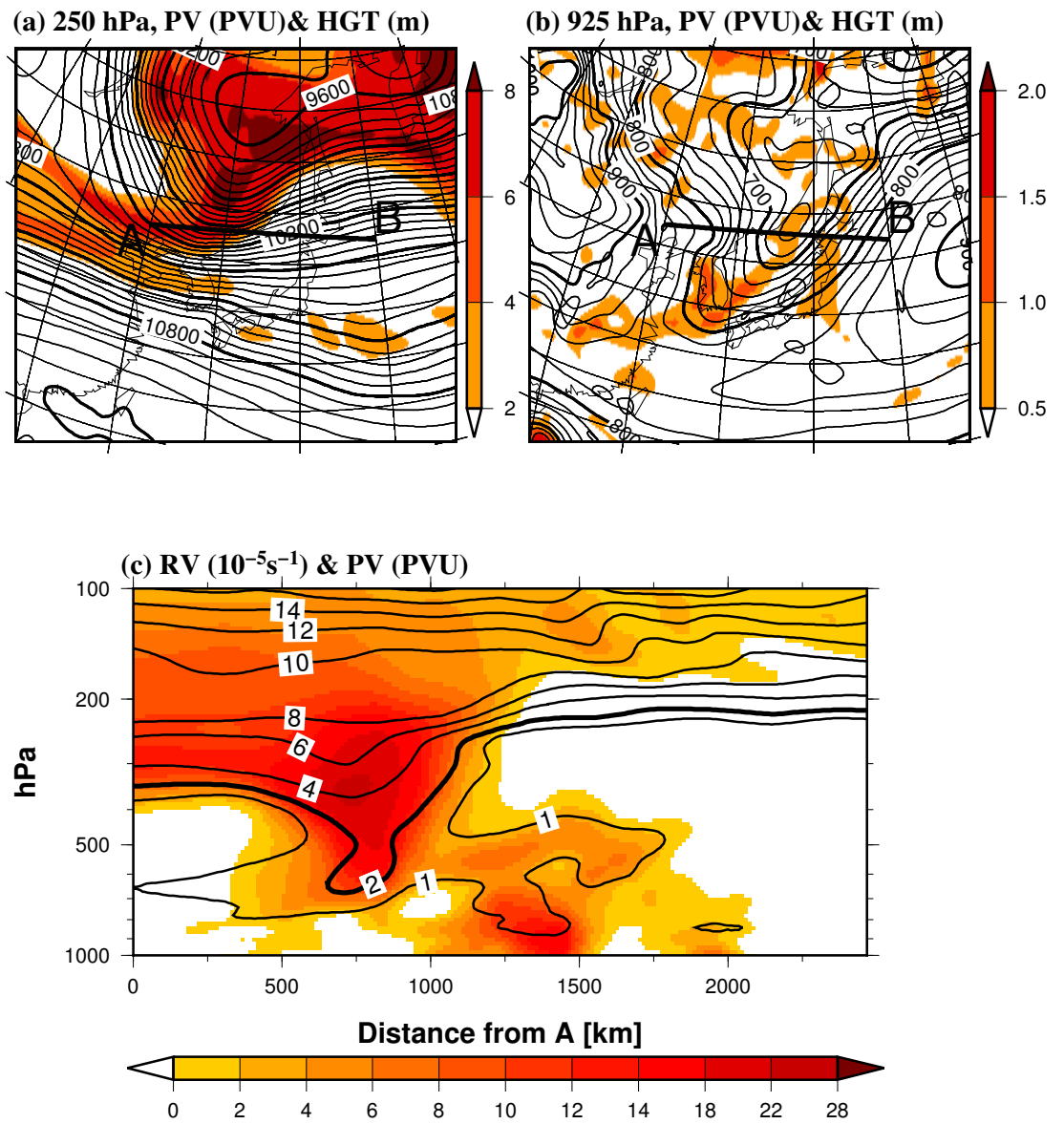


図 4.34: T20131110 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2013 11 10 00Z

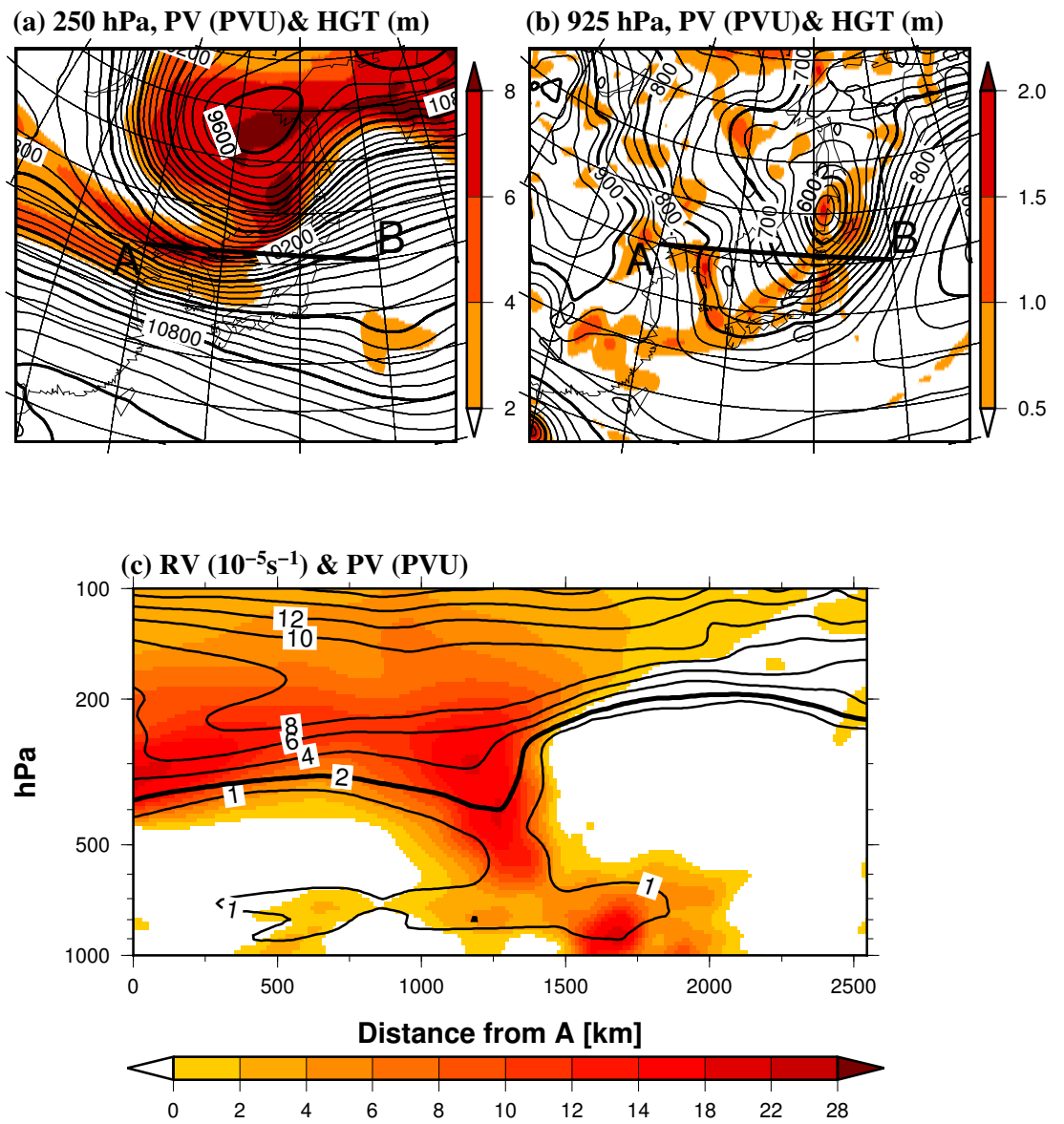


図 4.35: T20131110 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2013 11 10 06Z

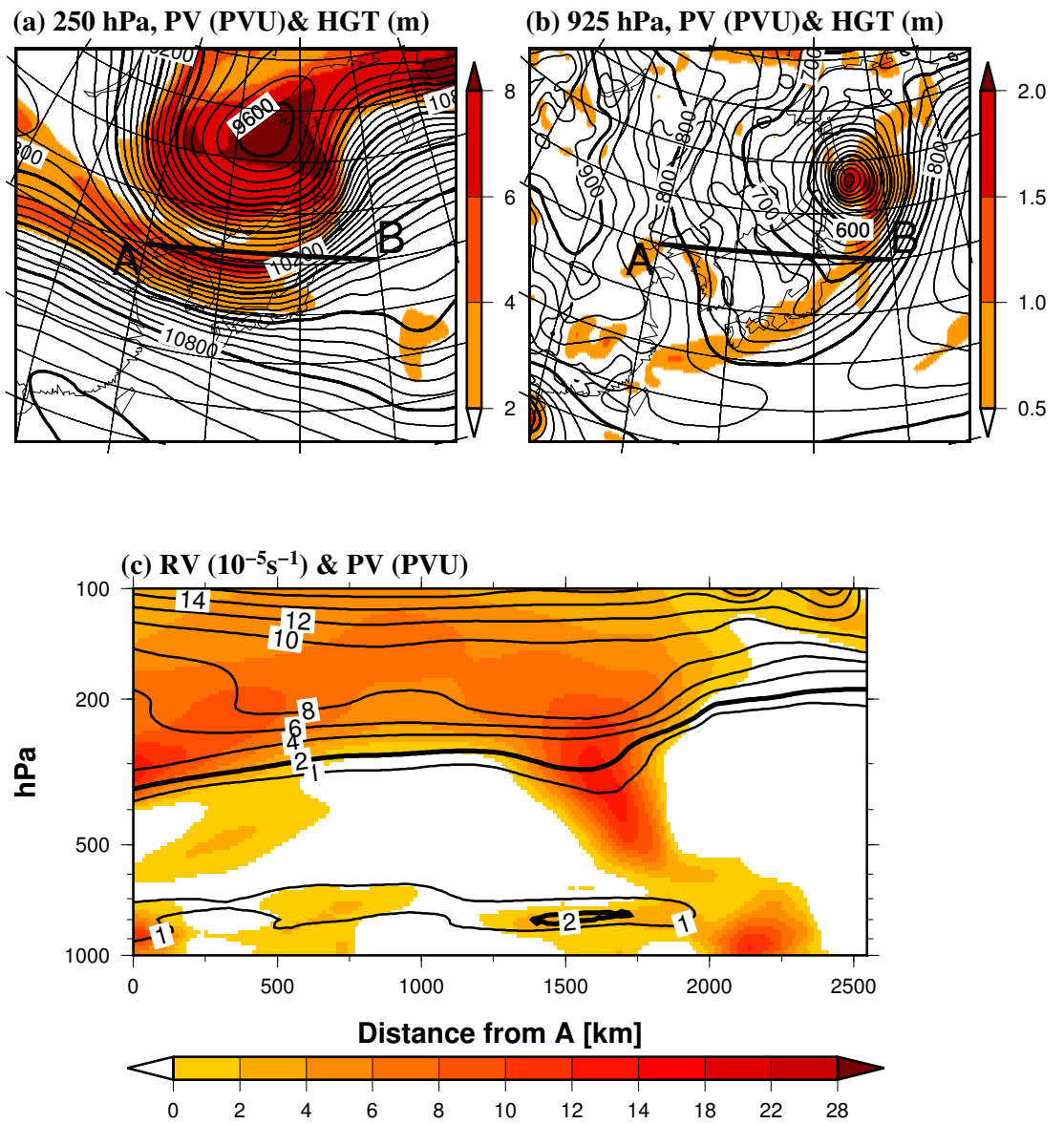


図 4.36: T20131110 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2014 11 12 00Z

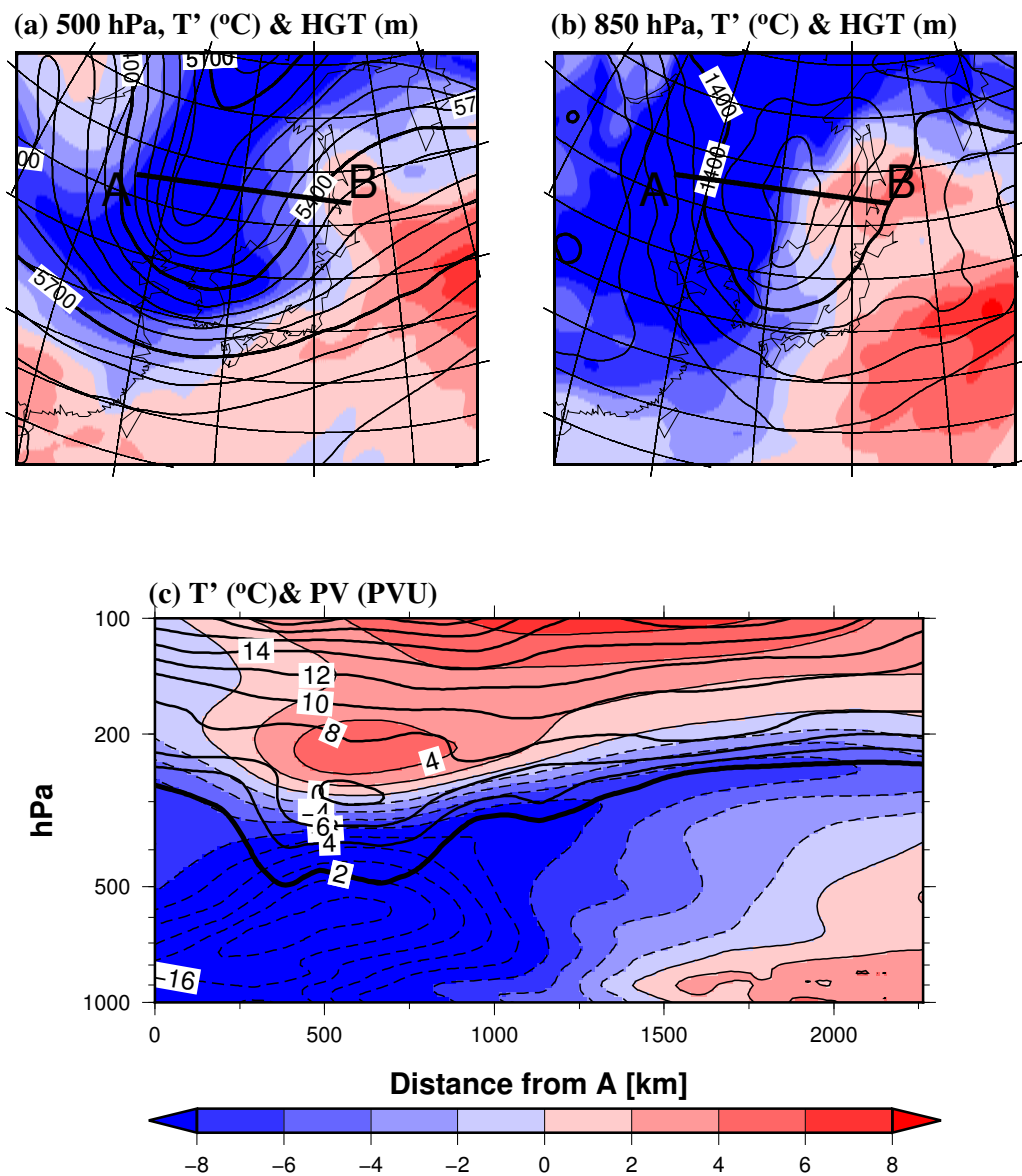


図 4.37: T20141112 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2014 11 12 06Z

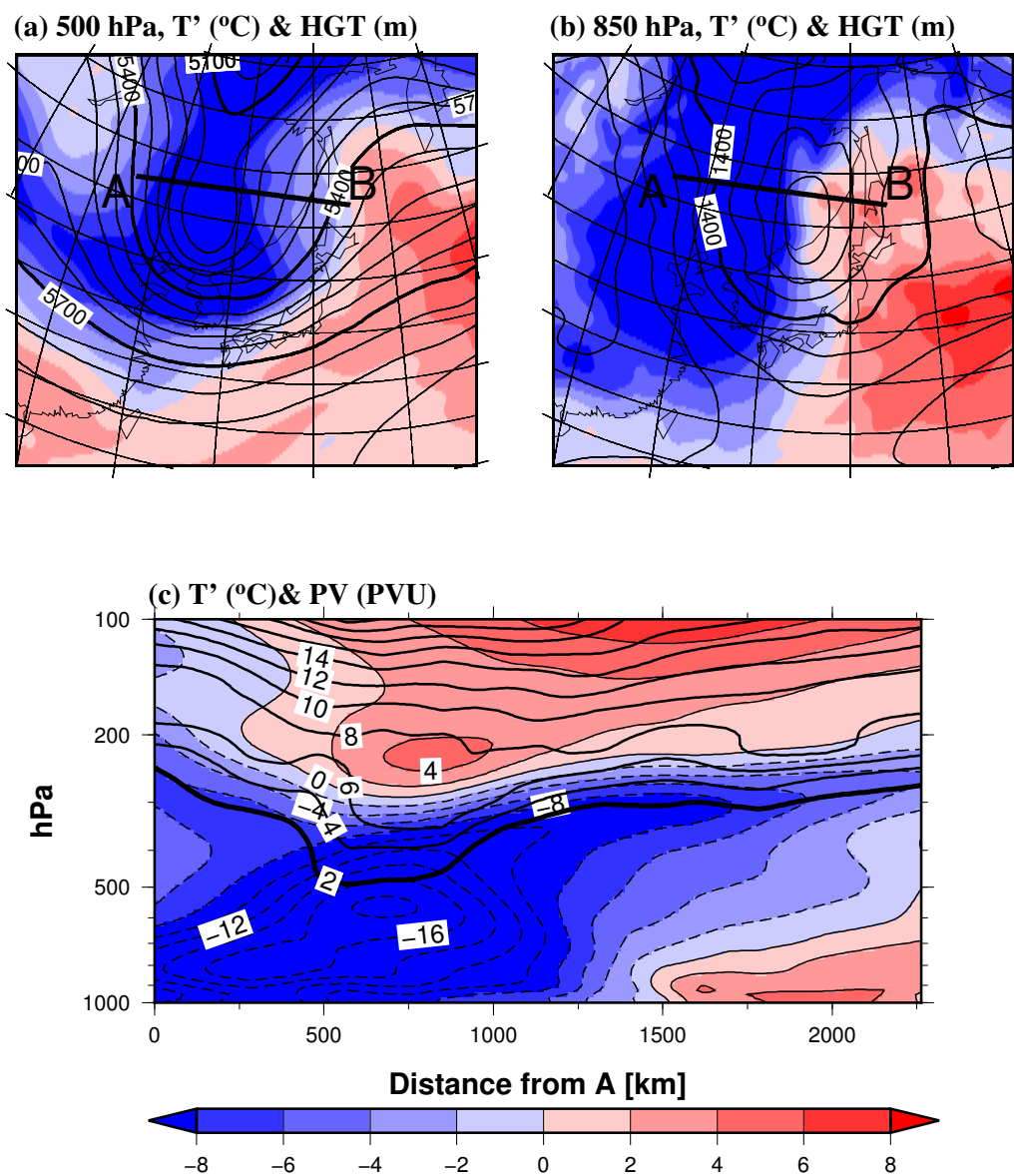


図 4.38: T20141112 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2014 11 12 12Z

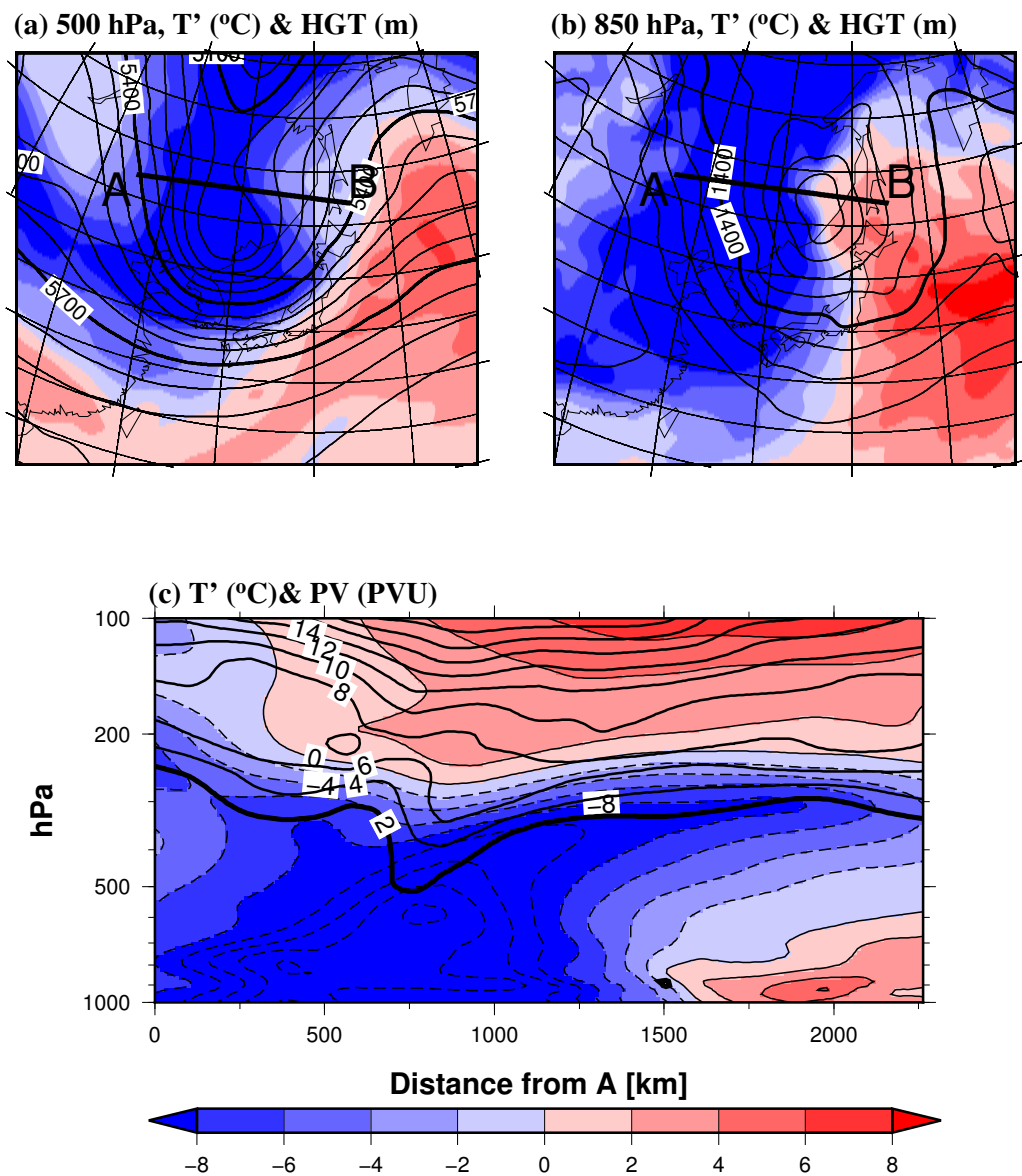


図 4.39: T20141112 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2014 11 12 00Z

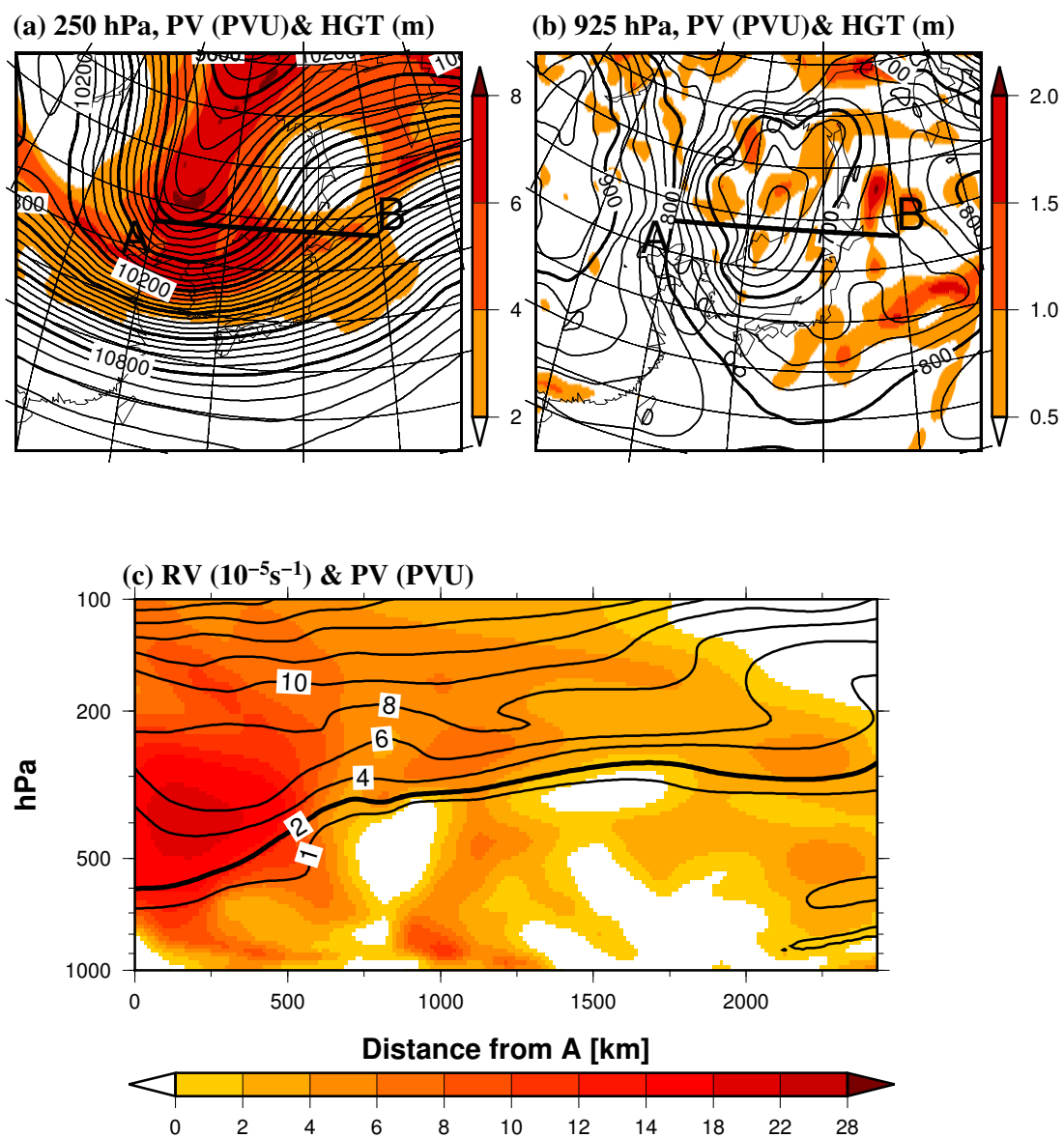


図 4.40: T20141112 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2014 11 12 06Z

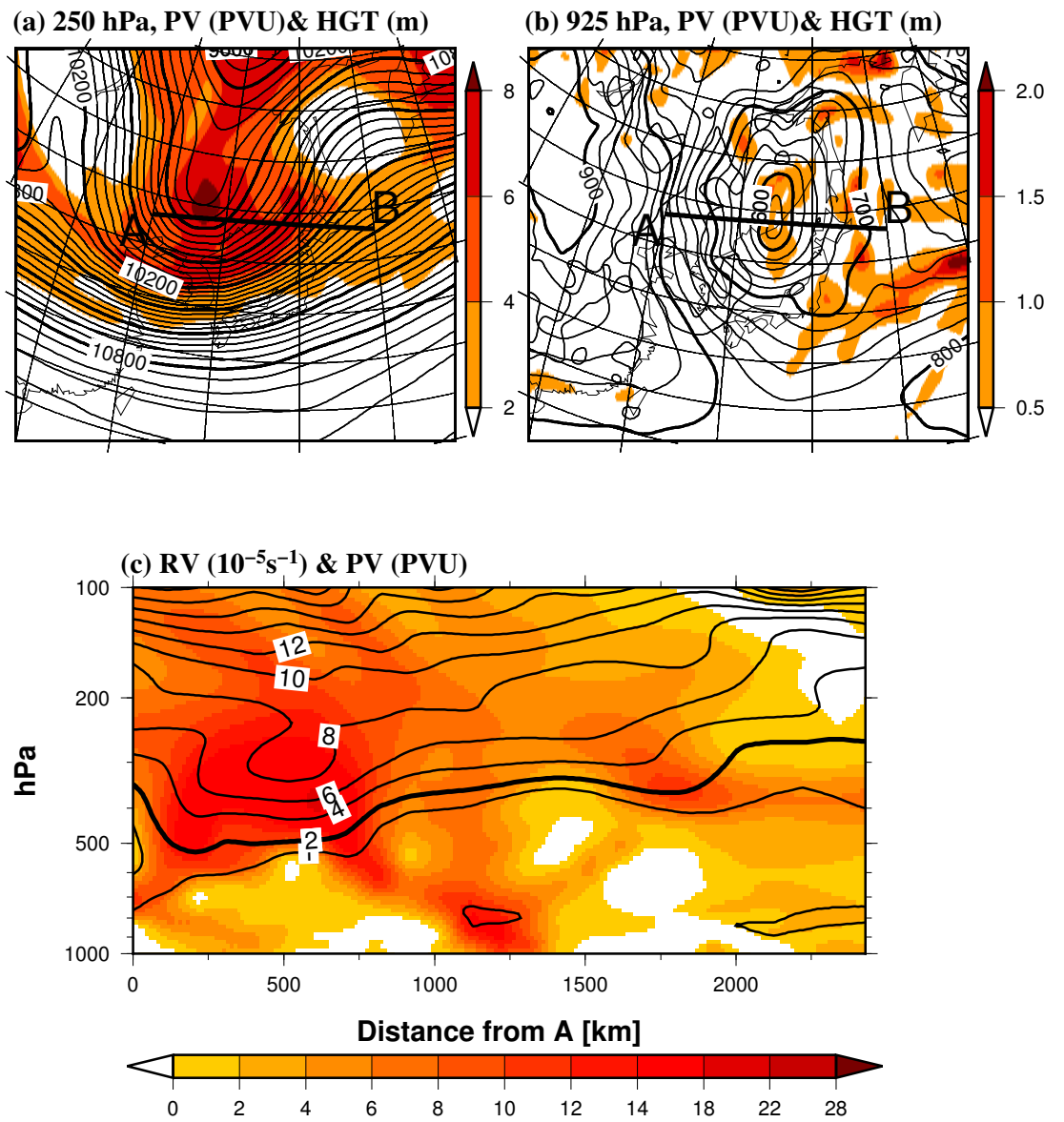


図 4.41: T20141112 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2014 11 12 12Z

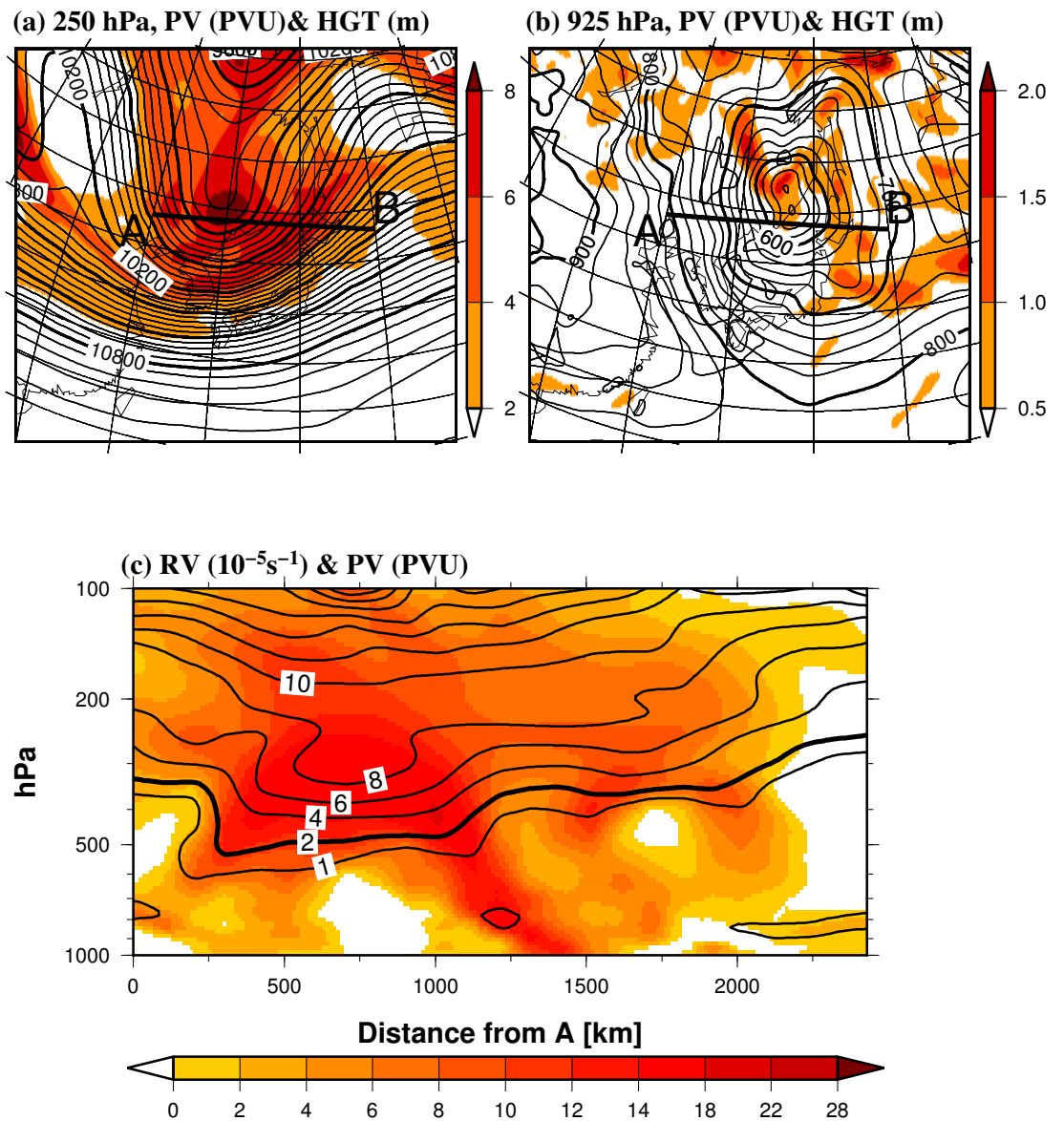


図 4.42: T20141112 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2015 09 06 06Z

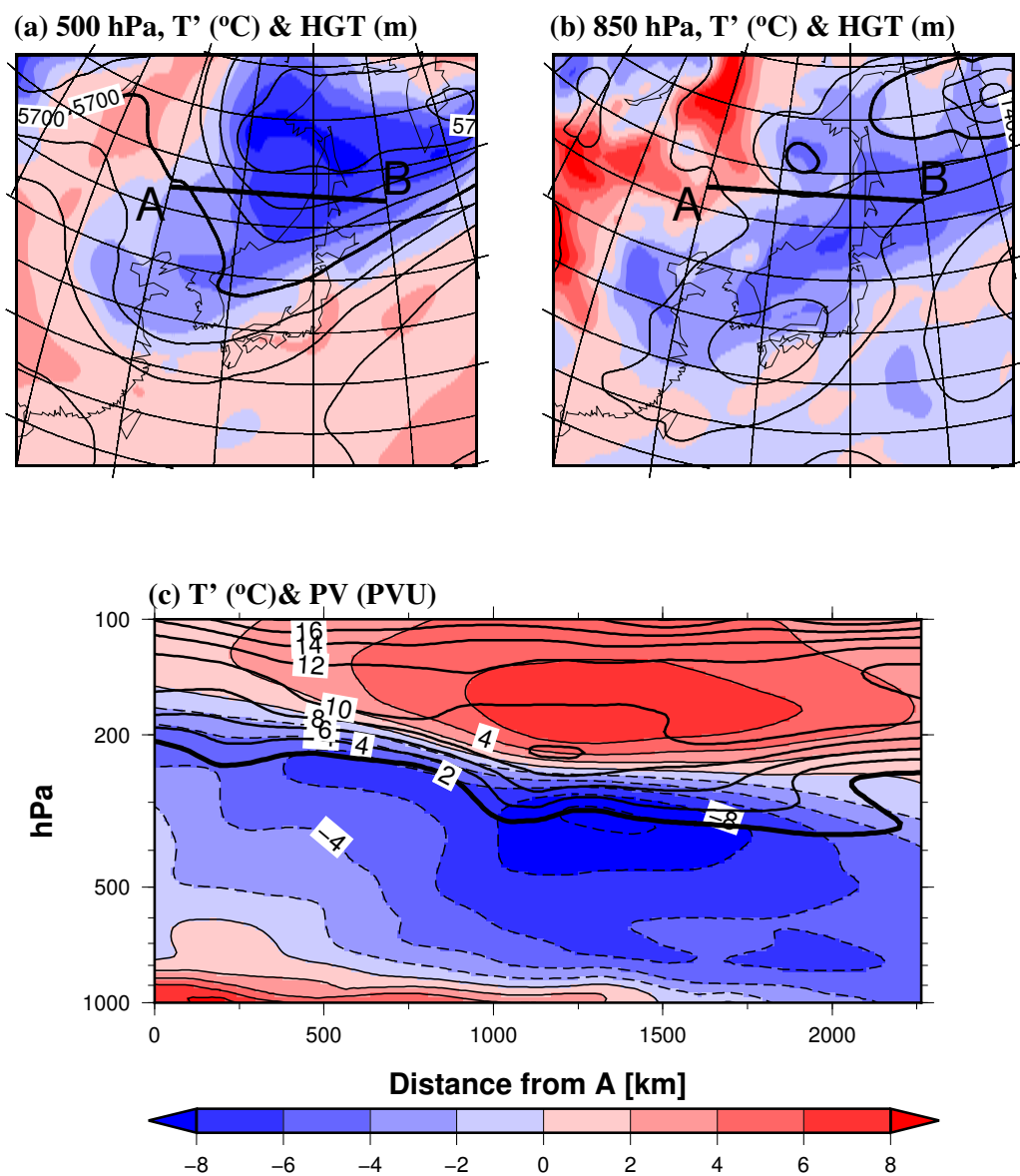


図 4.43: T20150906 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2015 09 06 12Z

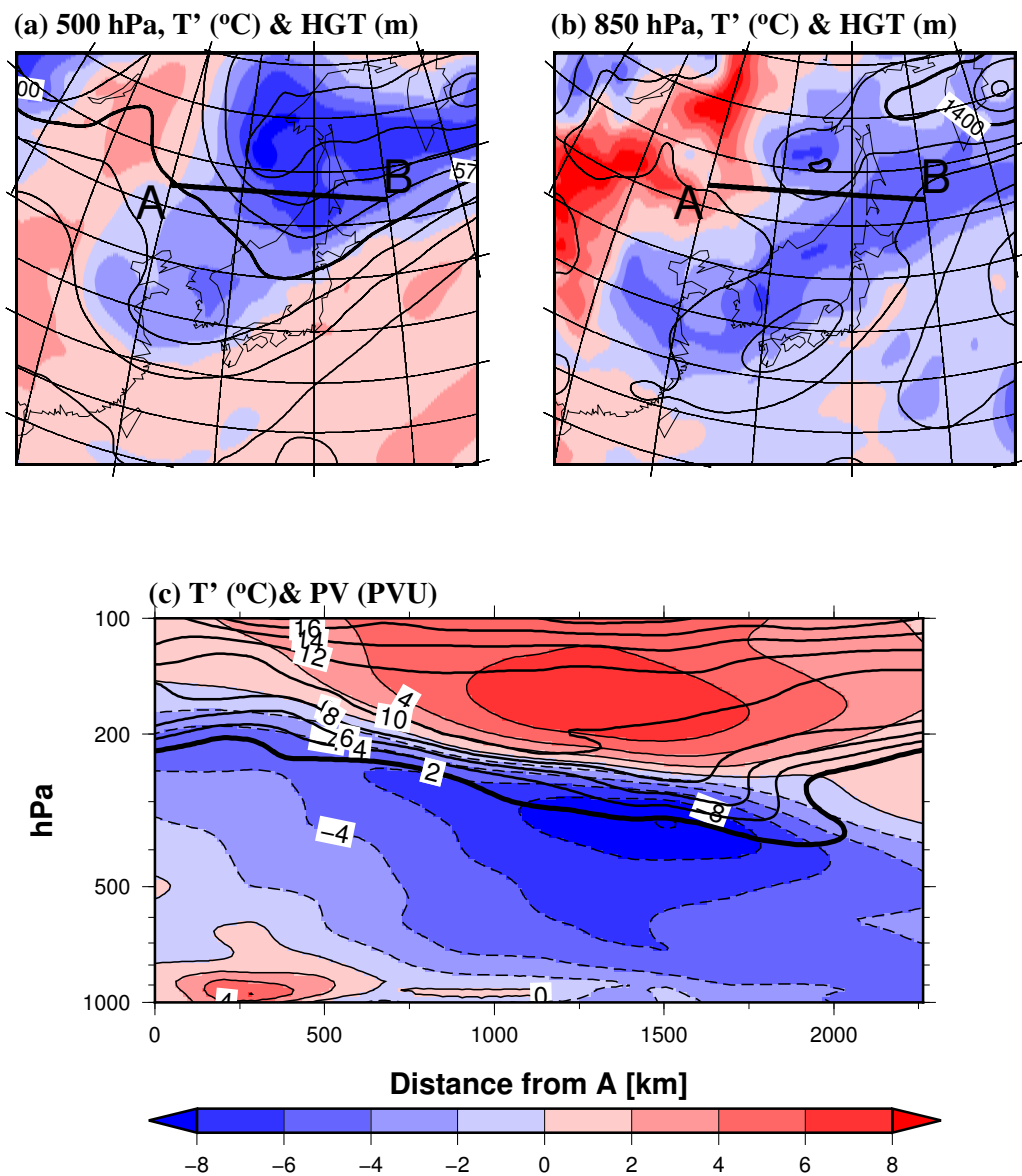


図 4.44: T20150906 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2015 09 06 18Z

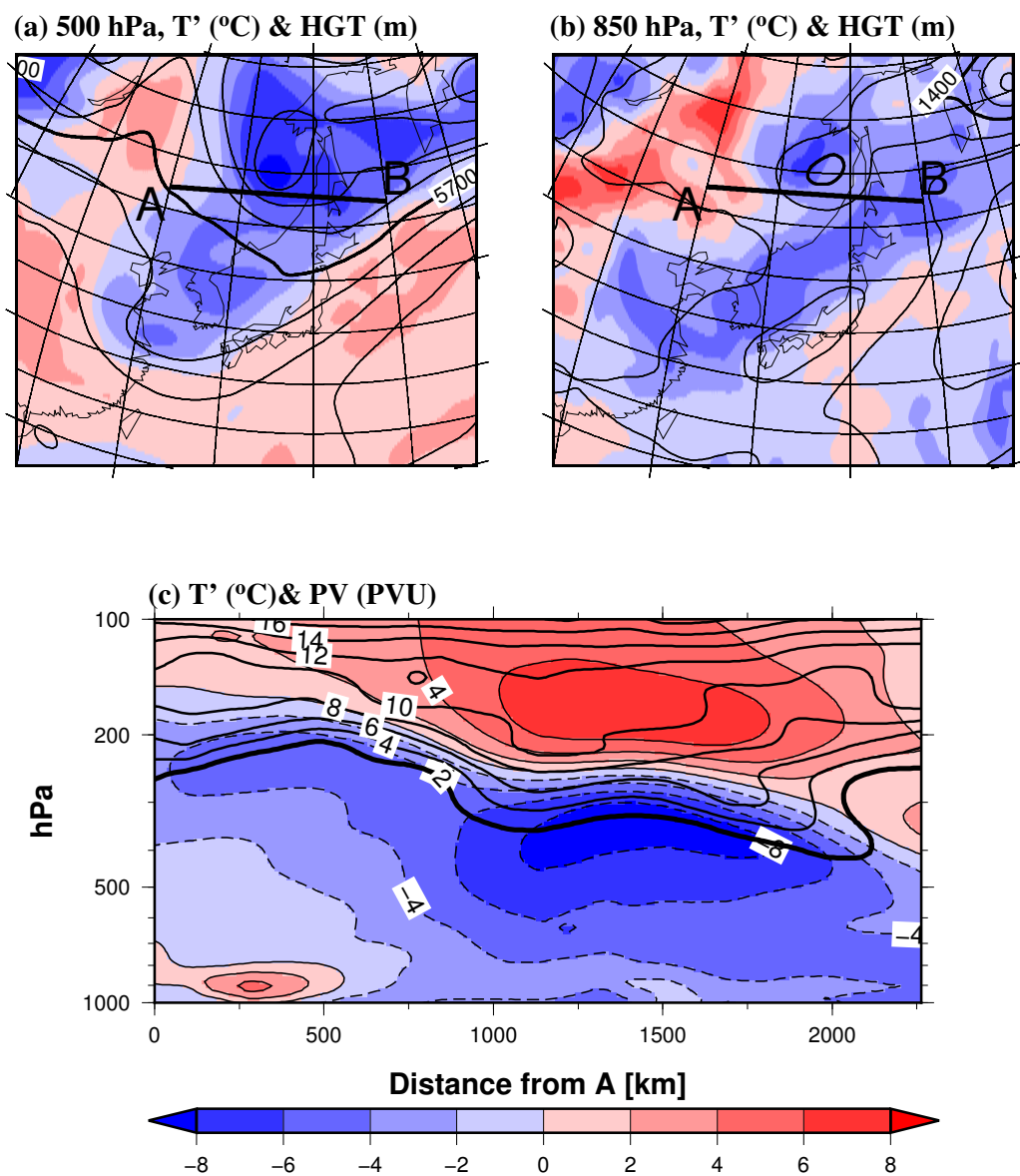


図 4.45: T20150906 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2015 09 06 06Z

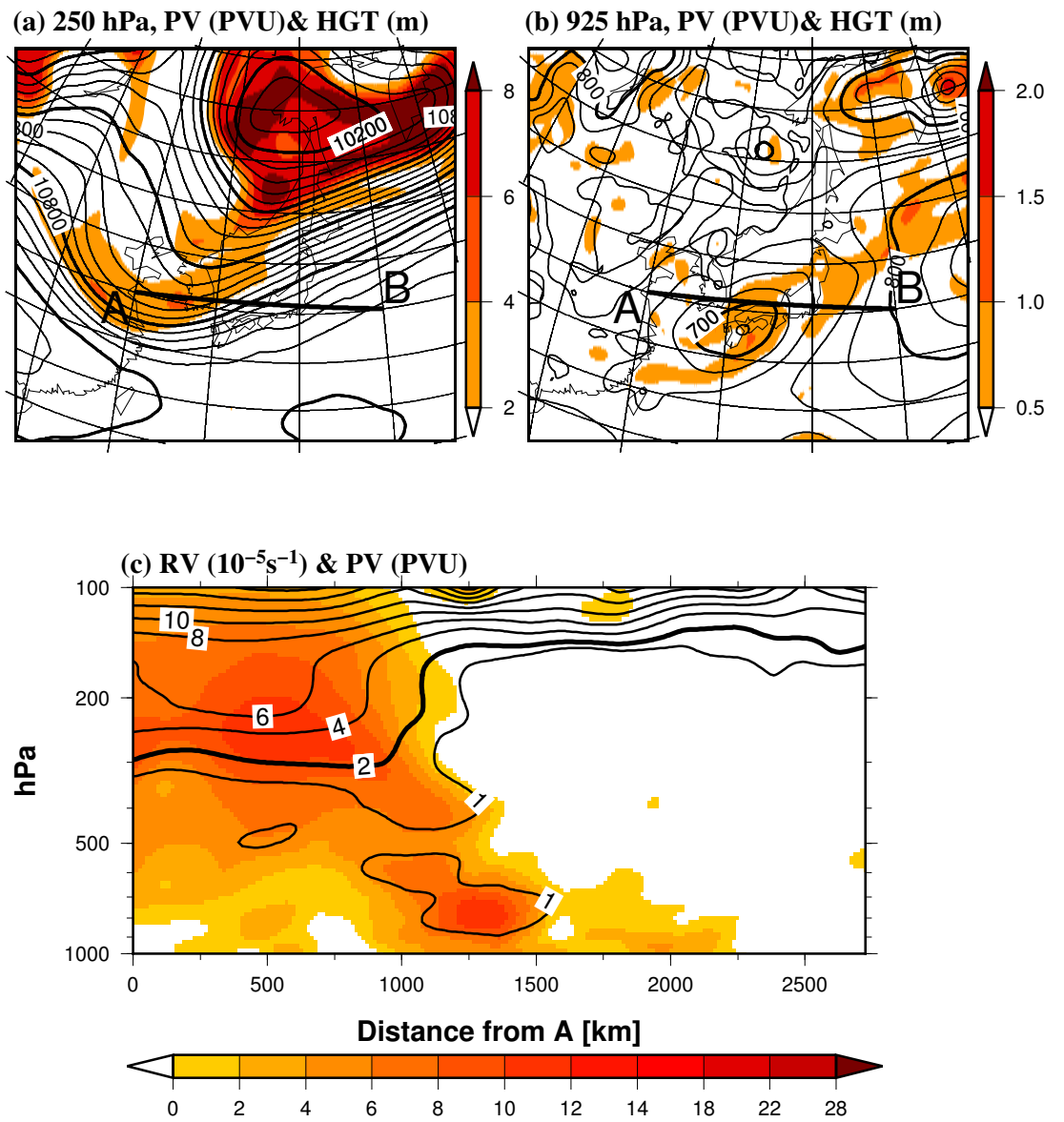


図 4.46: T20150906 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2015 09 06 12Z

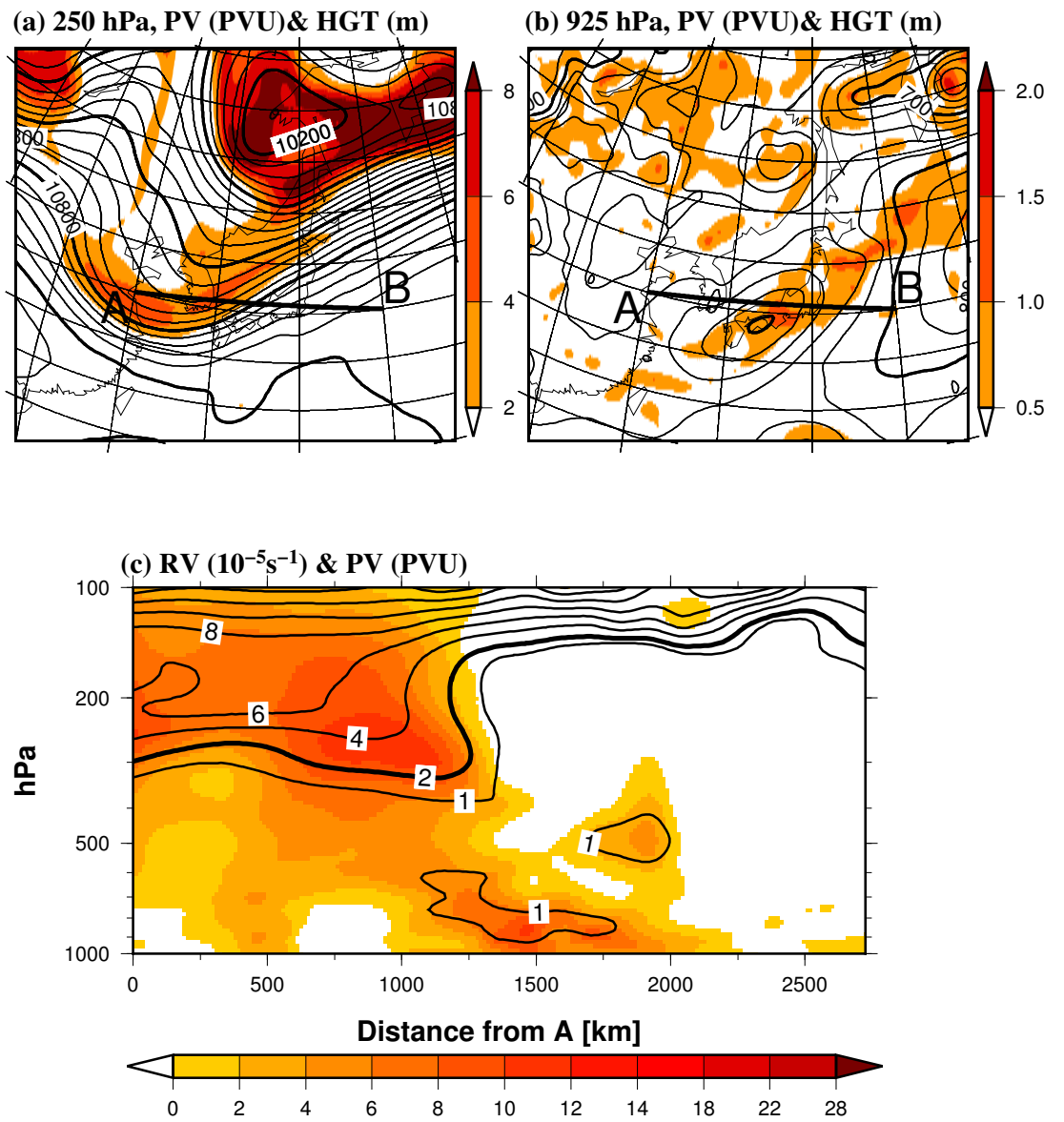


図 4.47: T20150906 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2015 09 06 18Z

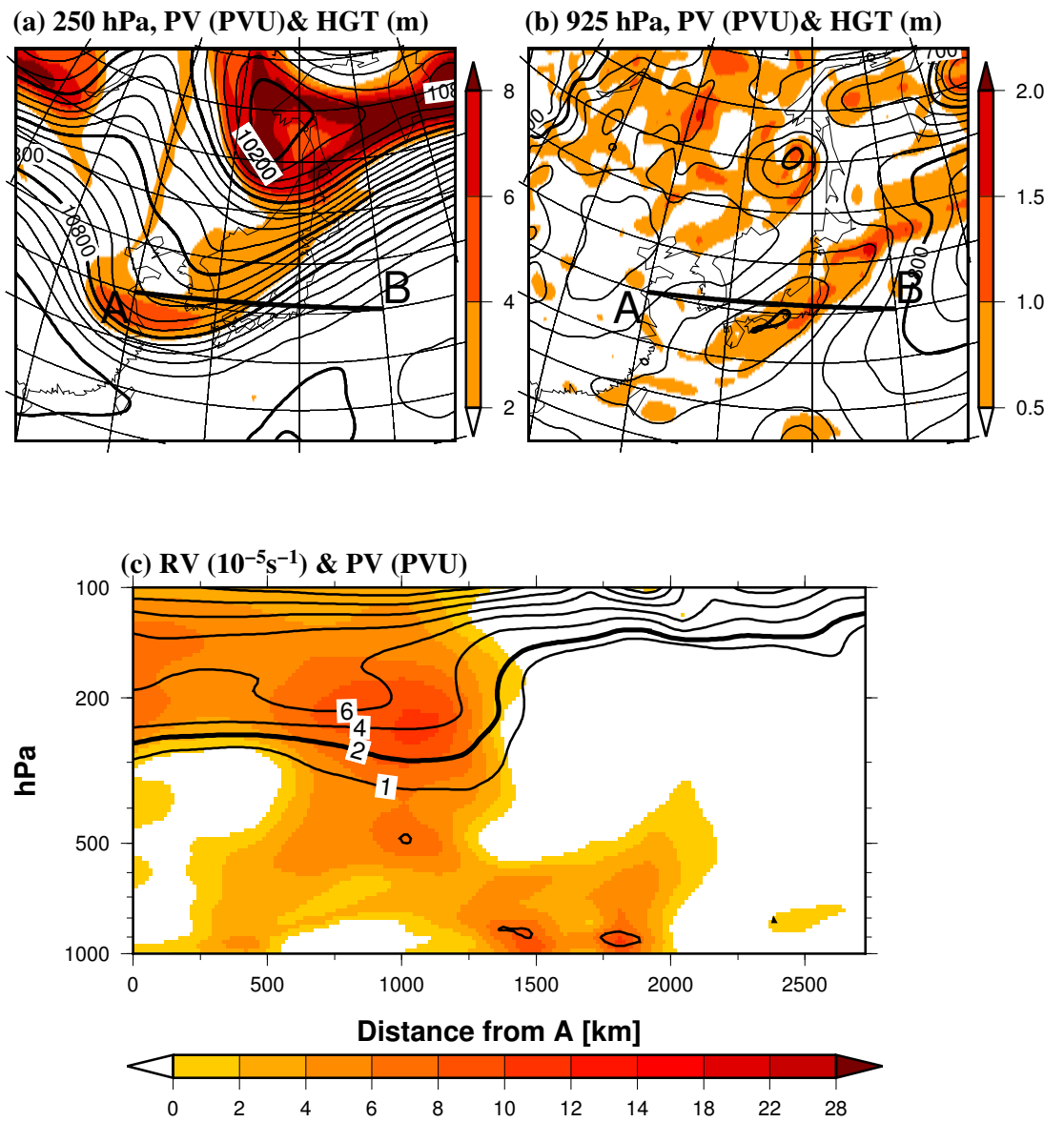


図 4.48: T20150906 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2015 10 03 00Z

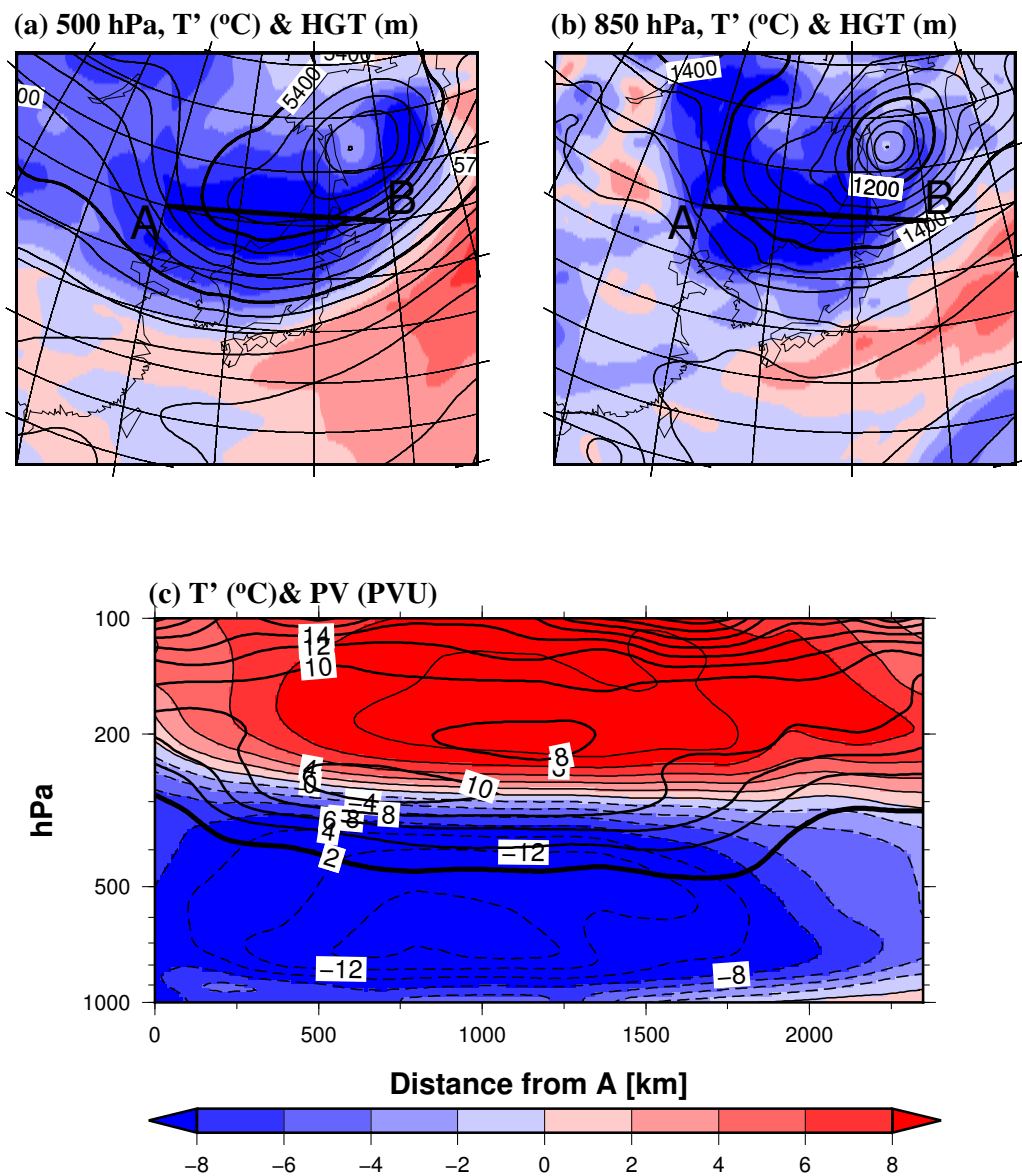


図 4.49: T20151003 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2015 10 03 06Z

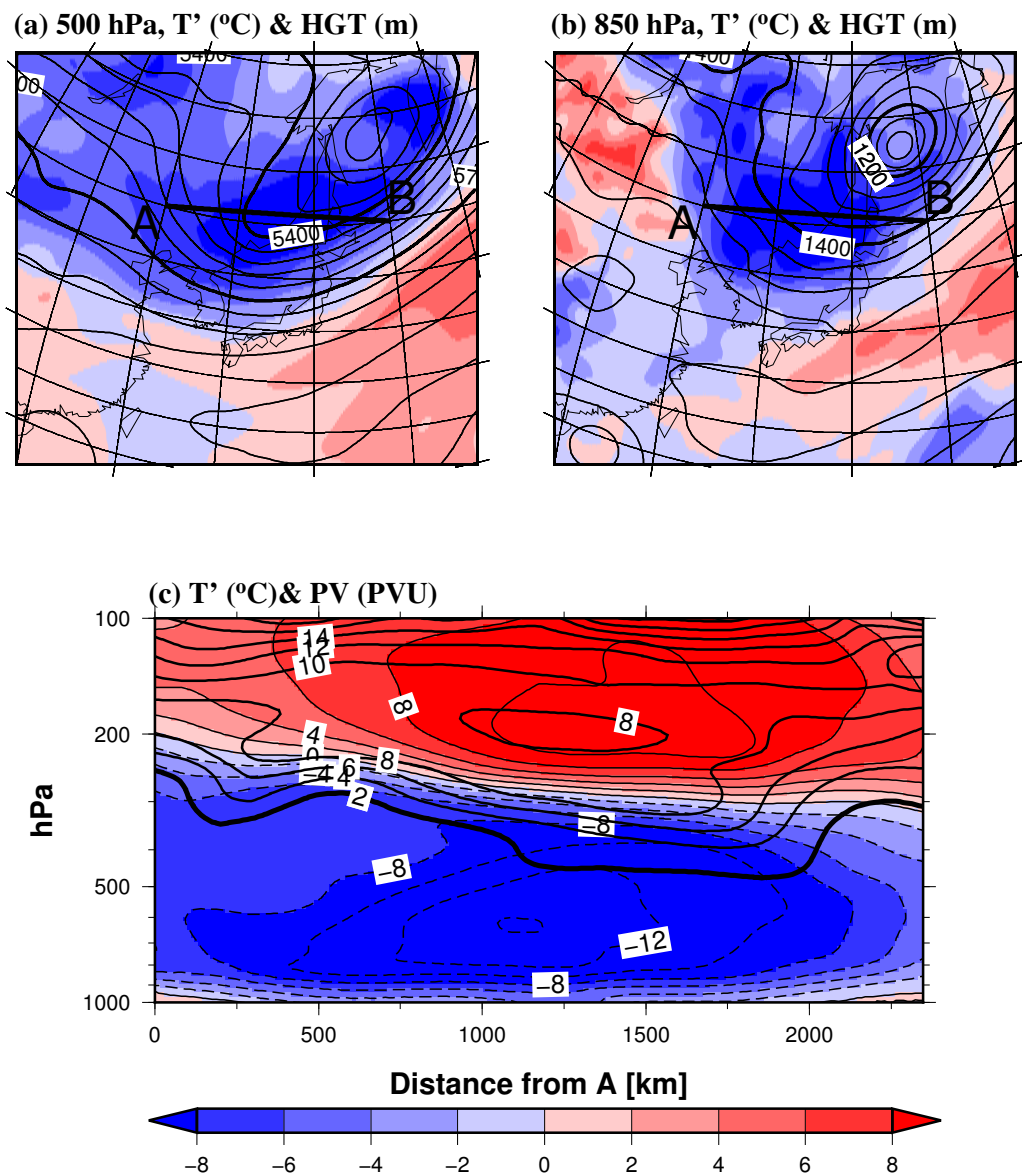


図 4.50: T20151003 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2015 10 03 12Z

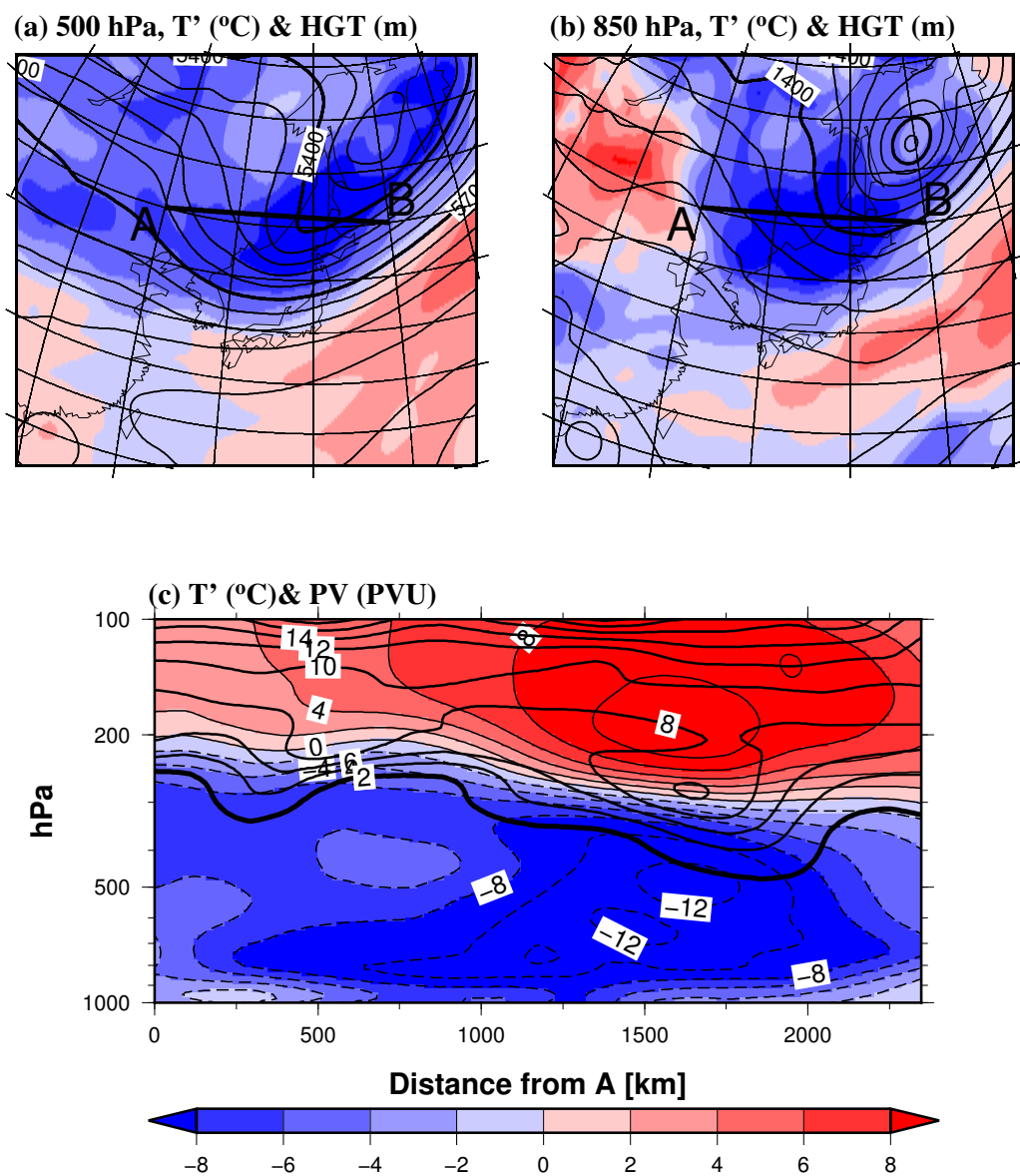


図 4.51: T20151003 (a) 高度 500 hPa と (b) 850 hPa における気温, 等高度線

2015 10 03 00Z

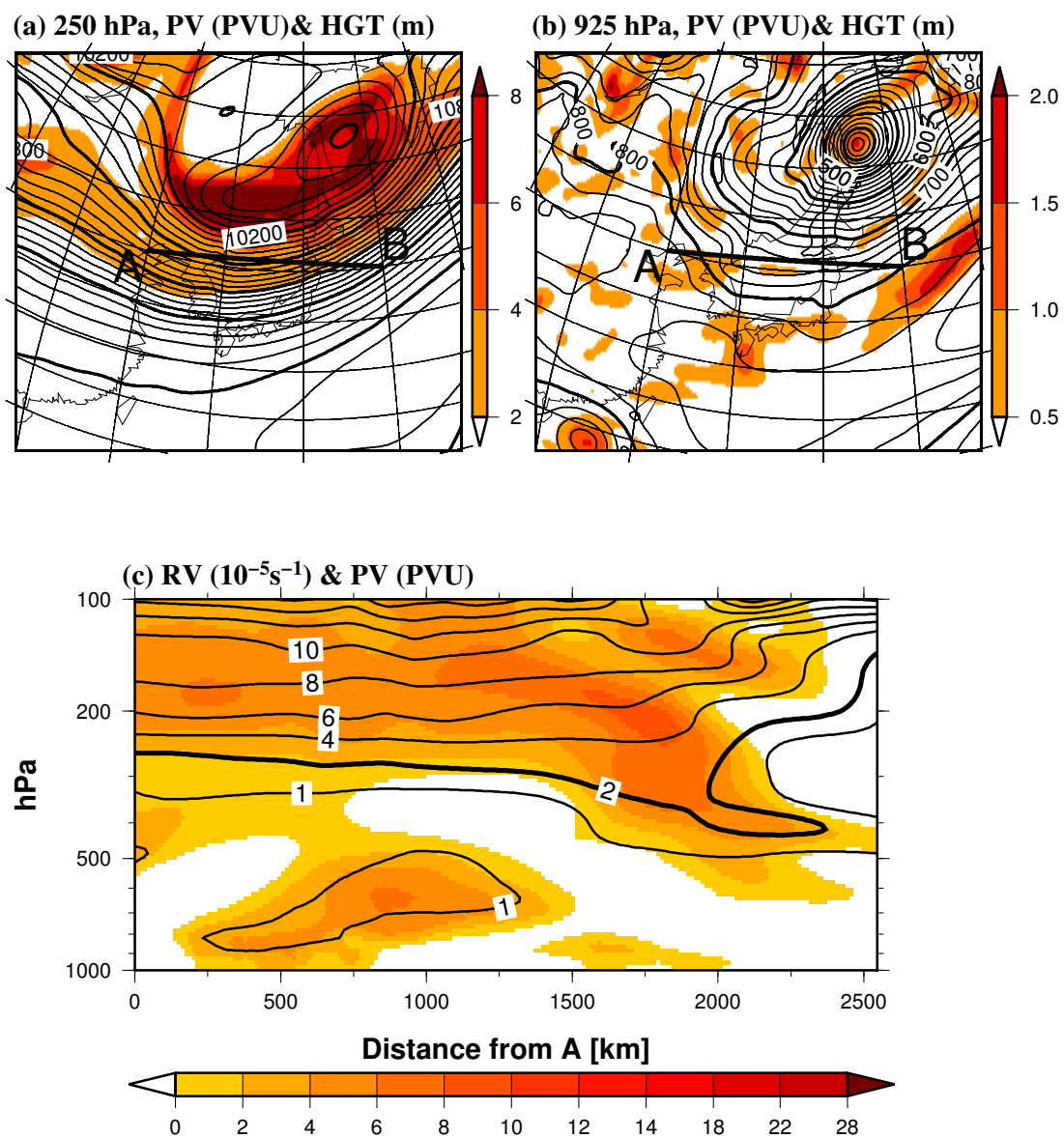


図 4.52: T20151003 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2015 10 03 06Z

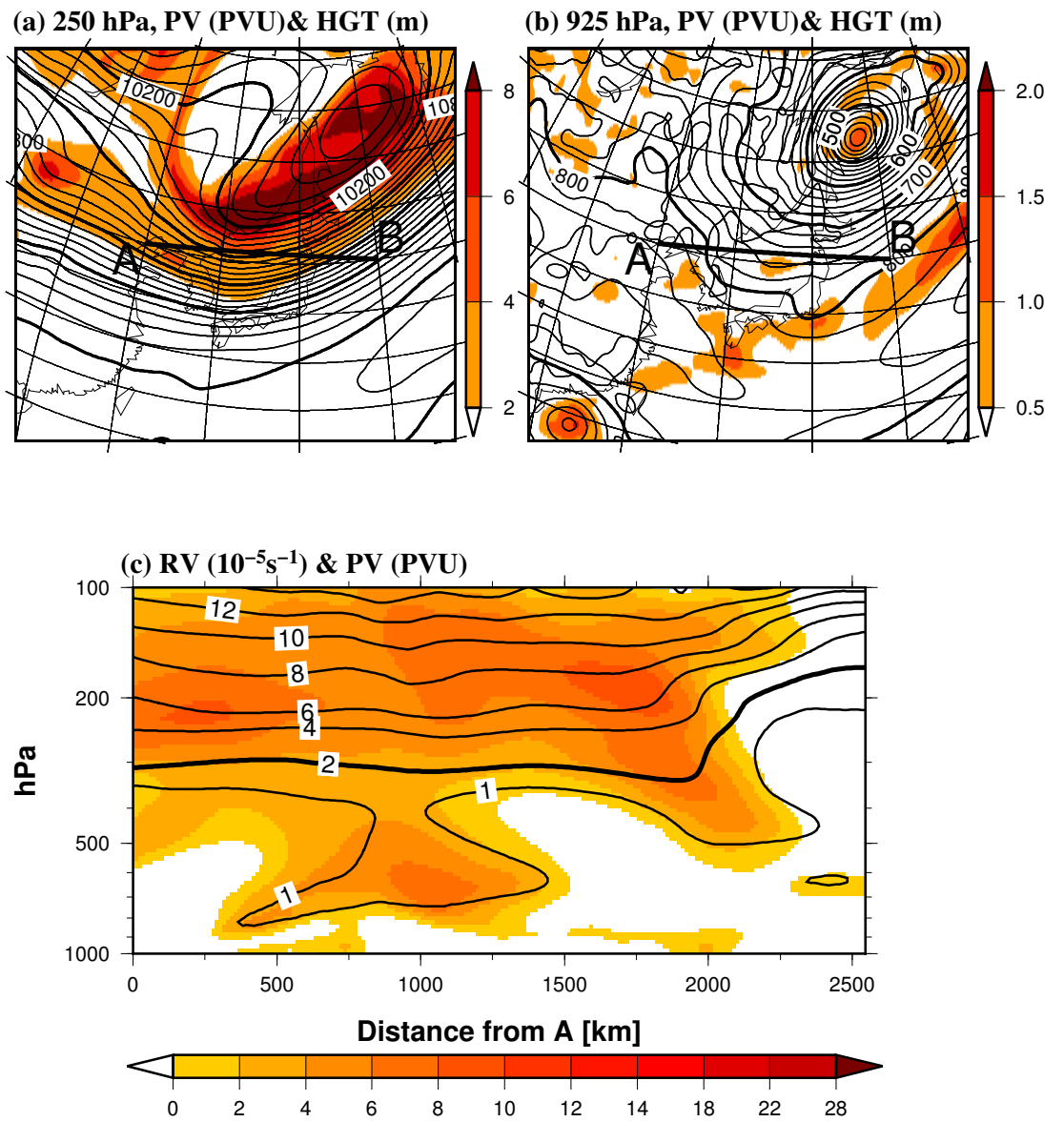


図 4.53: T20151003 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線

2015 10 03 12Z

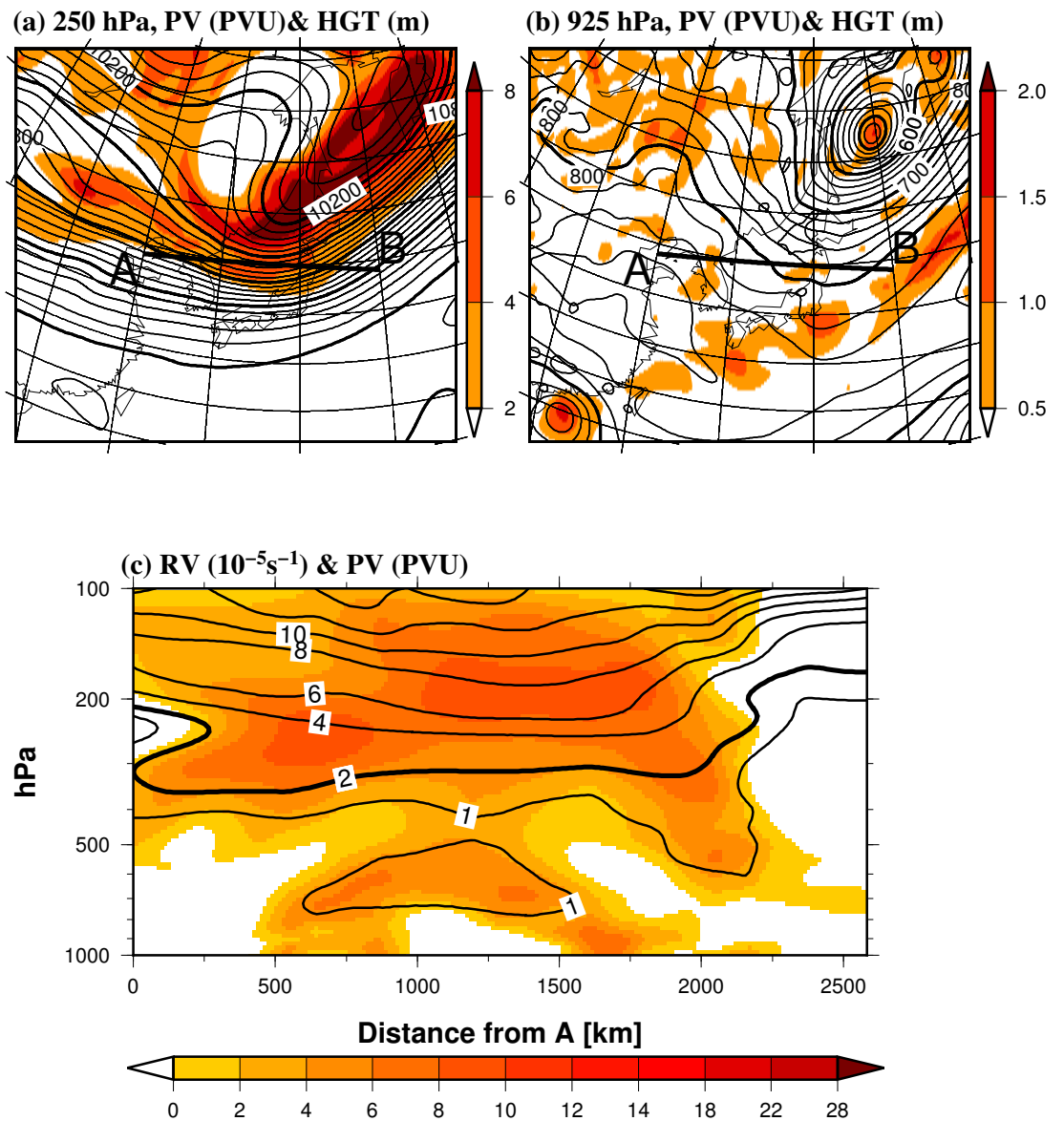


図 4.54: T20151003 (a) 高度 250 hPa と (b) 925 hPa における渦位, 等高度線