

佐呂間竜巻発生時の環境パラメター

石川裕彦・山根悠介*・佐藤和歌子*

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

2006年11月7日、北海道佐呂間町で発生した竜巻に関して、(財)気象業務支援センターから配信されている気象庁メソ数値予報のデータを用いて、竜巻発生に関係するといわれる、対流有効エネルギー(CAPE)、ストームに相対的なヘリシティ(SREH)、エネルギー・ヘリシティ・インデクス(EHI)等の環境パラメターの算出を試みた。初期時刻の異なる予報データを用いて算出したところ、竜巻発生の4時間前にあたる午前9時を初期値とした予報を用いて計算した環境パラメターは、竜巻の発生と比較的翼対応した。しかし、発生位置以外にも環境パラメターが竜巻発生を示唆する地域も存在し、竜巻発生可能性予報に用いるには、今後の研究が必要である。

キーワード：佐呂間竜巻、環境パラメター、メソ数値予報

1. はじめに

平成18年11月7日午後13:20分頃、北海道佐呂間町若狭地区で竜巻が発生した。竜巻による被害範囲は、長さ約1.4 km、幅200~300 m と比較的狭かったにもかかわらず、死者9名を出す、日本の竜巻害史上最悪の事例となった。被害の概要は、死者9名のほか、重傷者6名、軽傷者25名、住家全壊7、半壊7、一部損壊27、非住家全壊37、半壊4、一部損壊35(うち公共施設1)であった(平成18年12月28日時点での佐呂間町役場の被害集計による)。また、車両被害は90台であった。竜巻の直接的被害は若狭地区の狭い範囲に限られていたが、竜巻で巻き上げられた非産物は、約10 km 北にあるサロマ湖付近までの間に点在しており、牧草地の被害も発生している。Photo 1 ab に被災地域の空撮写真を示す。Photo 1b の左下の区画にあった鹿島建設の仮設事務所が竜巻の直撃を受け、中で会議中であった9名の方が亡くなった。

竜巻発生時には、日本海北部を発達中の低気圧が東進していて、低気圧に伴う寒冷前線が北海道中央部を南北に横切っていた。脊梁山地の東側にあたる北海道東部では、南から暖湿な気流が流入していて、同日13時のアメダスデータによれば、西側では気温



Photo 1 Damaged area of Wakasa, Saroma-cho. (Shin Engineering Consulting Co. Ltd.)

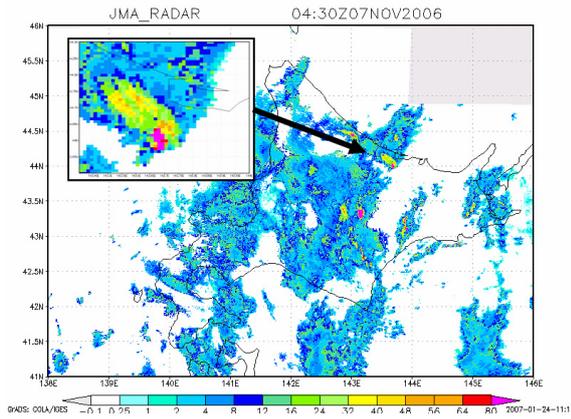


Fig. 1 Radar Echo at Nov. 7, 13.30

は10℃かそれ以下であったのに対して、東側のアメダス観測地点では12℃～19℃に達しており、東西で顕著な気温差がみられた。佐呂間町のアメダス観測点では、18.3℃（12時）、16.6℃（13時）が観測されている。

Fig. 1には、竜巻発生時刻の気象庁レーダー合成図を示す。被災地区付近上空に、竜巻の親雲に相当する顕著な積乱雲が観測されている。この積乱雲は、同日11時30分頃十勝平野付近に発生し北進してきたことが10分間隔のレーダー観測データで確認できる。

発生地点のある北海道のオホーツク海沿岸地域では、これまで竜巻の発生が報告されて居らず、竜巻発生の背景となった気象場について調べる必要がある。この研究では、（財）気象業務支援センターより配信される気象庁メソ数値予報の格子点データを用いて、米国でトルネード発生の指標とされる環境パラメータを算出し、竜巻発生との対応を調べることにする。

2. 環境パラメーター

米国のトルネード研究では、トルネードの発生しやすい大気場の指標として、CAPE（対流有効位置エネルギー）、SREH（ストームに相対的なヘリシティ）やこれらの積であるEHI（エネルギー・ヘリシティ・インデックス）が用いられている。吉野ら^[1]は、1999年9月24日に発生した豊橋竜巻に関して、メソ数値モデルで再現した環境場からこれらの指標を算出し、EHIが竜巻の発生した地域で極大となることを示し、これらの指標が竜巻発生の可能性予測として利用できる可能性を示唆した。

我が国では平成18年3月より、水平5 km格子のメソ数値予報が行われている。そこで、今回の佐呂間竜巻に関して、メソ数値予報結果からこれらの指標を

計算し、竜巻の発生しやすい環境場であったか否か、竜巻発生の可能性予測は可能か否かを検討する。

竜巻を発生させる母体となる積乱雲発達の程度に関連するのが、

$$CAPE = g \int_{LFC}^{ZE} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz \quad (1)$$

で表される対流有効位置エネルギー（CAPE: Convective Available Potential Energy）である。 $\bar{\theta}(z)$ は

温位のプロファイル、 $\theta(z)$ は地表付近の気塊を仮想的に持ち上げた時の各高度における温位を表す。気塊の温位 $\theta(z)$ が周囲温位 $\bar{\theta}(z)$ よりも大きくなる高さ（自由対流高度、LFC: Level of Free Convection: 自由対流高度）に達すると、気塊は正の浮力を受け、自発的に上昇を続ける。そして、持ち上げた気塊の

温位 $\theta(z)$ が周囲の温位よりも小さくなる高さZEに達すると、浮力による加速は終了する。この間に得られる浮力エネルギーの総和がCAPEであり、積乱雲の発達程度を示す指標となる。一方CAPEと対をなす量として、対流抑制エネルギー（CIN: Convective Inhibition）という概念がある。これは、ある高さZ0にある気塊を自由対流高度まで持ち上げるのに必要なエネルギーであり、

$$CIN = -g \int_{Z0}^{LFC} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz \quad (2)$$

であらわされる。

一方、積乱雲が低気圧性の回転を持ったスーパーセルストームとなるとトルネードが発生する可能性が大きくなる。この指標として使われるのが、SREH(Storm Relative Environmental Helicity)と言われる量で、

$$SREH = -\int_{0km}^{3km} \mathbf{k} \cdot \left[(\mathbf{V}(z) - \mathbf{c}) \times \frac{\partial \mathbf{V}(z)}{\partial z} \right] dz \quad (3)$$

で表される。 \mathbf{V} は水平風、 \mathbf{c} はストームの移動速度である。アメリカでのトルネード研究で、水平風の鉛直シアが大きいとき、特に上空に向かって時計回りに風向が変化している条件下でスーパーセルストームやトルネードが発生しやすいことからこの概念が考え出された。この量が大きいほどスーパーセルストームやトルネードが発生しやすいとされている。この定義の中で、ストームの移動速度 \mathbf{c} を見積もるの

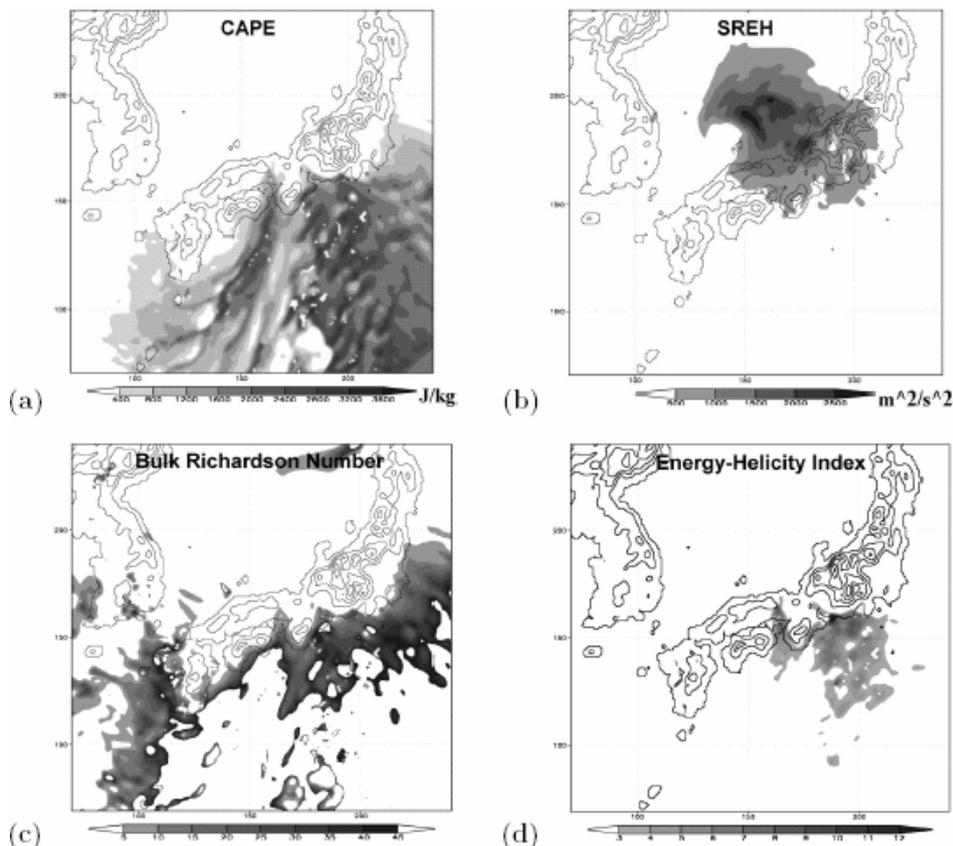


Fig.2 Horizontal distribution of (a)CAPE [J/kg], (b)SREH [m²/s²].(c) BRM[dimensionless] and (d) EHI [m²/s² · J/kg]. (After Yoshino et al. [1]).

は困難であるため、地上から6 kmまでの高さの風速を重み付け平均した平均風ベクトルを求め、風向を時計回りに30°回転し風速を75%に減じた経験的な値(30R75と呼ばれる)が便宜的に用いられる。SREHはストームに流入する周囲気流により水平渦度が立ち上がり鉛直渦度を強化する過程に対応するもので、理論的にはRotunno and Klemp^[2]で説明されている。

さらに、強い積乱雲の発生しやすさの指標であるCAPE、積乱雲が回転を持つメソ低気圧に発達する指標であるSREHを組み合わせて、トルネードの発生しやすさの指標として用いられるのが、EHI (Energy Helicity Index)と呼ばれる量で、

$$EHI = \frac{CAPE \times SREH}{1.6 \times 10^5} \quad (4)$$

で計算される。米国におけるストーム発生とこれら環境パラメーターとの関係は、Bluestein and Jain^[3]、Rasmussen and Blanchard^[4]などが調べている(Table 1)。

これらの指標が竜巻の発生環境をよく表現した事例として、1999年の台風18号に伴い発生した豊橋竜巻に関する吉野ら^[1]の結果をFig.2に示す。この研究

では、非静力メソ数値モデル (PSU/NCAR MM5) を用いて台風とその周辺の気象場を再現し、その再現結果からCAPE, SREH, EHI等の指標を算出した。図に示した時刻(9月24日12JST、以下本報告では全て日本時を用いる)には、台風の中心は島根県沖の日本海にあり北東進している。中心から400 km以上離れた豊橋市周辺で竜巻が発生した11時16分頃の台風中心位置とほぼ同じ位置である。CAPEの計算結果を見ると日本の南海上および紀伊水道付近を通るレインバンドに沿って大きな値を示しているが、台風の近くではゼロか非常に小さな値である。一方SREHをみると、台風の東側、進行方向前面で大きな値もっているが太平洋上ではそれほど大きな値ではない。しかし、CAPEとSREHの積で表されるEHIを見ると、東海沖の太平洋上で大きな値を示しており、ちょうど豊橋市の南あたりの遠州灘で極大となっていることがわかる。数値計算では、この付近に南北に延びるアウターレインバンドが再現されていて、この中にネストした1 km格子の計算では、レインバンド内で発生した降水域が低気圧性の回転を得て鉛直渦度が強化される様子がみられた。このように、メソモデルによる数値計算結果を用いてメソ低気圧や竜巻発生の可能性を調べることができそうである。

Table 1 The median of CAPE, SREH and EHI for investigated cases of tornado outbreak in United State

	F2 ≤ tornadoes	F0 and F1 tonadoes
CAPE	1314	1152
SREH	180	124
EHI	1.48	0.64

3. MSM予報データを用いた環境パラメータの算出

本調査では、(財) 気象業務支援センターから配信されているメソ数値予報モデル(MSM)の結果を用いて、佐呂間町の竜巻発生前後の環境パラメータの算出を行った。

メソ数値予報(MSM)では1日8回、00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21時、を初期値とした予報が行われている。予報モデルでは、水平方向にはランベルト正角図法で投影された地図座標系(投影面で5km格子)が、鉛直方向には地形準拠座標系が用いられている。MSMの予報値は、モデルの予測結果を、地上要素に関しては東西0.0625°, 南北0.05°間隔、上層要素に関しては東西0.125°, 南北0.1°間隔の緯度経度格子に内挿して配信される。また、鉛直方向には、1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 hPaの値に内挿されている。湿度のデータは300hPaより下層でのみ与えられている。時間間隔に関しては、地上要素は初期値を含み15時間先まで1時間間隔で、上層では同じく3時間間隔で与えられている。

環境パラメータの算出は、格子間隔、時間間隔とも上層データに合わせ、水平格子は東西0.125°, 南北0.1°, 時刻に関しては3時間間隔で行った。また、計算に必要なモデル標高は、予報モデルのモデル標高を緯度経度格子に内挿した値を用いた。CAPEの計算には、NCAR/MMMで開発されたデータ処理パッケージRIP4に含まれるプログラムを修正して用いた。このプログラムでは、地上から高さ3 kmまでの層内で最も相当温位の大きな気塊を探し、この気塊についてCAPEを計算する。また、GPVデータでは湿度のデータが300 hPaまでしか与えられていないため、計算の都合上250 hPaの湿度は300 hPaと同じであると仮定し、200 hPaより上層では5%と仮定した。SREHの計算では、気圧面で与えられるデータを地表面からの高さの値にリサンプリングして計算した。

Fig. 3 に、2006年11月7日の03, 06, 09, 12 時(日本時)を初期値とするメソ数値予報結果から算出した

11月7日12時(左列)と15時(右列)のEHIの分布を示す。例えば最上段左は03時を初期時刻とした予測結果による12時のEHI分布、最上段右は同じく15時のEHI分布で、以下同様に06時、09時、12時を初期時刻とする予報結果による分布を示す。この時間帯には、13時20分頃に発生した佐呂間町若狭地区の竜巻(図中B)に加え、日高町厚賀地区の竜巻発生(11時40分頃、図中A)、足寄町から陸別町に至る地域での突風発生(14時30分頃、図中C)が報告されている。03時、06時を初期値とした予報では、EHIは広い範囲で1.0を越える大きな値を持っている。これは、寒気の吹き出しの東側で、CAPE, SREHとも大きな値をとる領域が広く存在し、しかもほぼ重なっているためである。一方、09時を初期値とした予報値から計算した結果を見ると、12時のEHI分布は日高町の内陸部には0.4を越える極大値がある。竜巻は海上で発生した後上陸したと報告されているので、位置的には少しずれるが、EHI分布と竜巻発生がおよそ対応している。また15時の分布をみると、日高山脈、石狩山地の東側、十勝平野から北見盆地を通りサロマ湖沖のオホーツク海にいたるバンド状の領域でEHIが周囲よりも大きくなり(EHI>0.2)、サロマ湖周辺の地域では0.4以上、極大で0.55を越える値を持つ。このような分布の形は、竜巻や突風の発生域と比較的よく対応しているといえるが、値は米国で報告されている中央値よりはずっと小さい。一方では、知床半島の先端付近には別の極大(EHI>0.65)があるほか、釧路付近にはEHIの値が0.7を越える領域が広がっているが、これらの地域では竜巻や強風害の発生は報告されていない。竜巻や強風害が発生する場所は周囲よりEHIが大きいとは言えるが、EHIが大きいからと言って必ずしも竜巻が発生するとは言えないことが理解される。また、竜巻発生時刻にもっとも近い12時を初期値とした予報に基づく算出結果は、09時を初期値とした場合と比較して必ずしも良い対応を示してはいない。これは、モデルのスピンアップの問題ではないかと思われる。

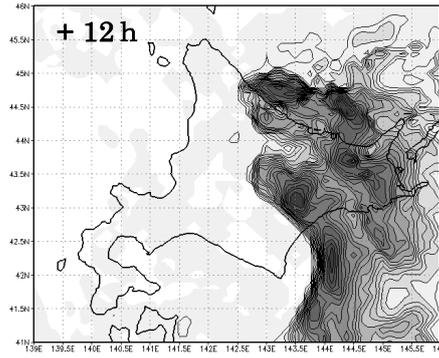
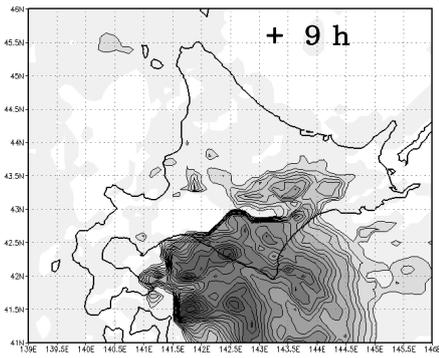
Fig. 4 には、03時及び09時を初期値とした15時のCAPE, SREH, EHIの分布を示す。表1に示した米国のトルネードで報告された値と比較すると、CAPEの値は全体的に小さめである。これには季節的要因も含まれていると考えられる。一方、SREHの分布を見ると、佐呂間竜巻と対応すると考えられる09初期値の分布をみると、EHI極大値の付近では300を越える値が算出されており、米国の値と比べると大きめである。

Initial

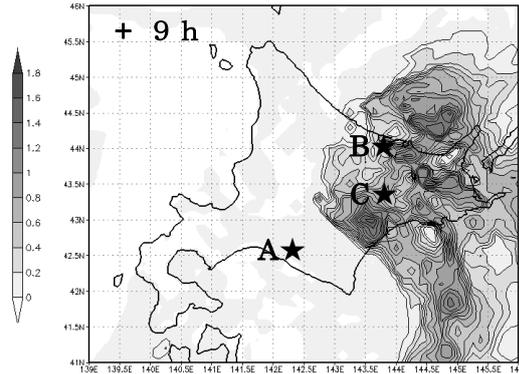
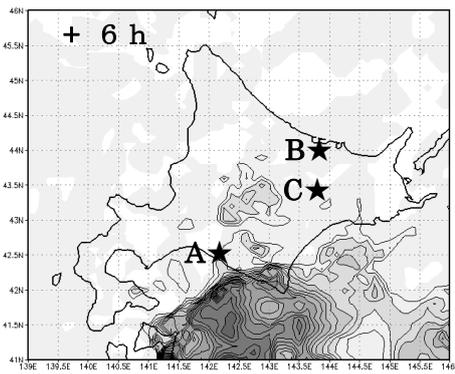
EHI at 12JST

EHI at 15JST

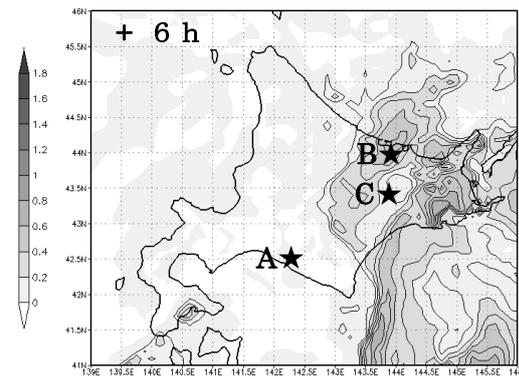
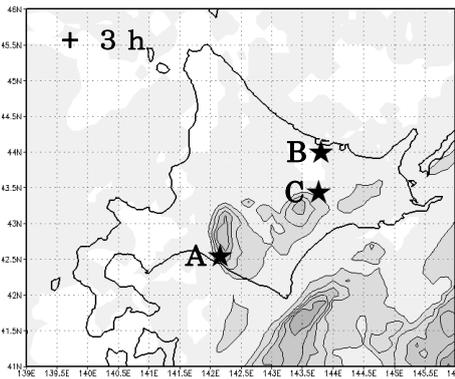
03JST



06JST



09JST



12JST

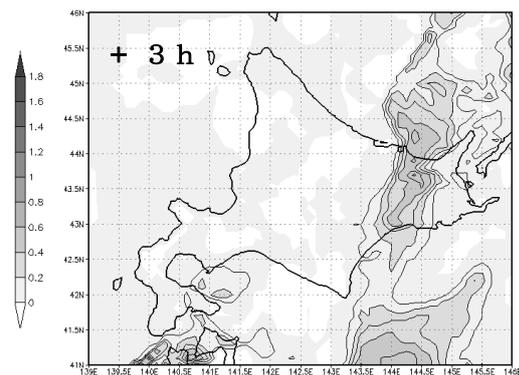
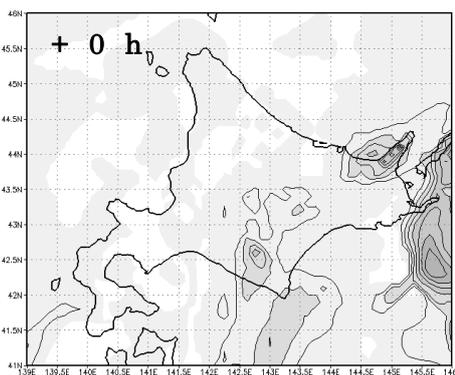


Fig. 2 The distribution of EHI at 12JST and 15 JST computed MSM prediction initialized at 03, 06, 09 and 12JST. The A, B and C in the figures denote the places of tornado at Hidaka-cho (11:40), tornado at Saroma-cho (13:20), and wind gust at Rikubetu/Asyoro area (14:30).

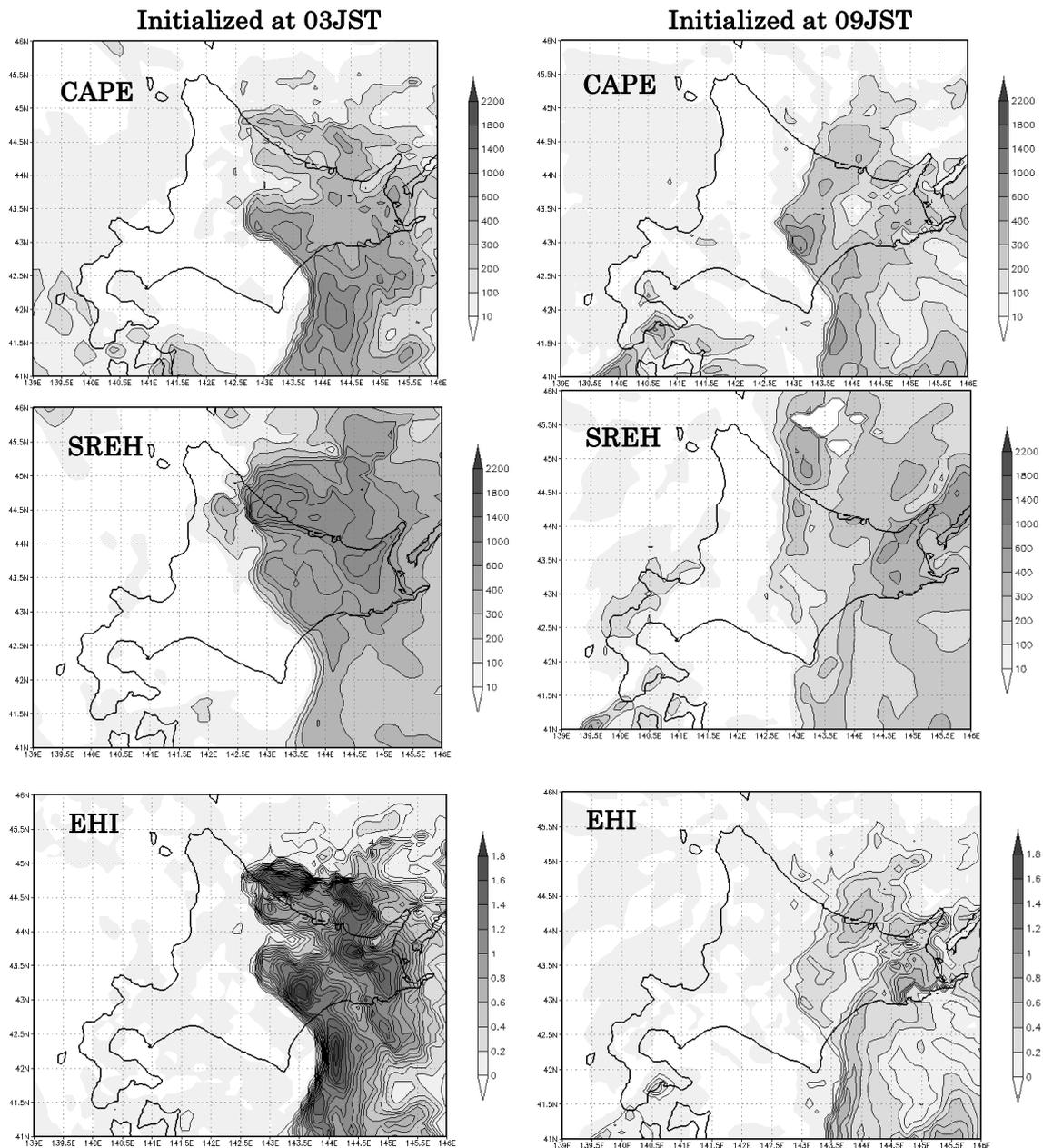


Fig. 4 Distribution of CAPE, SREAH and EHI at 15 JST

4. おわりに

本調査では、気象庁メソ数値予報データを用いて竜巻発生に関連するとされる環境パラメーターを試算し、竜巻や突風の発生状況と比較した。09時を初期値とした予報結果を用いたケースでは、竜巻や突風の発生とある程度対応するEHIの分布が見られた。今回の調査では、空間・時間解像度を落としGPVとして配信されるデータを用いたが、モデル格子のデータをそのまま使えば、もう少し良好な結果がえられるであろう。

しかし、可能性予報として利用するためには、まだ多くの課題が残されている。まず、災害発生地域以外にもEHIが大きな値を示す地域が広く存在するため、これをより限定された領域に絞り込む必要がある。また、発生可能性とEHIとの数値的な関係を客観化する必要がある。本報告で行ったSREH算出では計算の上限高度やストームの移動速度の算出基準に関して米国で使われている値をそのまま用いたが、例えば、これらの値を日本の気象環境に合うようにチューニングすることにより、ある程度確度が向上するかもしれない。また、予報モデルの予報精度との

関係に関連して、何時間先の予測であれば使えるか…という検討も必要と考えられる。いずれにしろ、統計的な判断が出来る程度の多くの事例を対象として調査を進める必要があるが、米国とは異なり、対象とする事例が少ない事が難点である。

参考文献

吉野純・石川裕彦・植田洋匡(2002)：台風9918号により東海地方にもたらされた竜巻に関する数値実験，京都大学防災研究所年報，第45号B, pp. 369-388.

Bluestein, H. B. and M. H. Jain (1985): Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall line in Oklahoma during the spring, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 42, pp. 1711-1732.

Rasmussen E. N. and D. O. Blanchard(1998): A baseline climatology of sounding-derived super cell and tornado forecast parameters, *Weather Forecasting*, Vol. 13, pp. 1148-1164.

Rotunno, R. and J.B. Klemp (1982): The influence of shear-induced pressure gradients on thunderstorm motion, *Mon. Weather Rev.*, Vol. 110, 136-151.

Storm Environmental Parameters Associated with a tornado outbreak at Saroma, Hokkaido

Hirohiko ISHIKAWA, Yusuke YAMANE* and Wakako SATO*

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

On November the 7th, 2006, a tornadic storm hit Saroma-cho, Hokkaido. The environmental parameters for this severe storm event were examined using output of mesoscale numerical prediction by Japan Meteorological Agency, which are provided by Japan Meteorological Business Support Center. The distribution of EHI (Energy Helicity Index) computed with numerical prediction at 09JST (about four hours before the event) fairly coincides to the storm position. However, other storm risky areas were also found in the EHI distribution, so that further studies are needed to use these parameter as predictive tool for hazard potential.

Keywords:Tornado, Saroma, Numerical Prediction, Environmental Parameter