

1999年6月広島災害をもたらした前線位置と 豪雨の関係

THE RELATIONSHIP BETWEEN FRONT POSITION AND HEAVY RAIN
CAUSING HIROSHIMA DISASTER IN 1999 JUNE

渡邊明英¹・福岡捷二²・足立文玄³・後藤勝洋⁴

Akihide WATANABE, Shoji FUKUOKA
Fumiharu ADACHI and Katsuhiko GOTO

¹正会員 工博 広島大学大学院助教授 社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 社会環境システム専攻 (同上)

³正会員 工修 国土交通省徳島工事事務所 (〒770-0803 徳島市上吉野町 3丁目 3-5)

⁴学生会員 広島大学大学院 社会環境システム専攻 博士課程前期 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

About the heavy rain which brought great damage to Hiroshima prefecture in June 1999, various studies have been made. But, the cause of its heavy rain has not been examined from meteorological viewpoint. Since generation of the heavy rain is considered to originate in the overall weather condition, analysis of the weather data observed widely is important. Then, in this study characteristic of the front and the relevance with generation of the heavy rain have been examined in analyzing the GMS images at the time of the disaster. From characteristics of vector field of moving cloud by the mutual correlating method between the GMS images, we have grasped front position and the generating position of the rainy area moving with the front. Also, we examined relationships between the front positions by the GMS images and the GPV data.

Key Words : GMS images, Mutual correlating method, Cold front, Heavy rain, GPV data

1. 序論

広島県では多くの表土が風化花崗岩で覆われており、急峻な地形を有しているため、豪雨が発生すると土砂災害が多発する。過去にも幾度となく豪雨によって多大な被害を被ってきた。土砂災害に対してハード対策が行われているが、これには時間を要するため、住民の避難などのソフト対策が早急に必要とされる。このためには、有益な気象情報が高い予測精度で迅速に提供されなければならない。豪雨の発生機構や伝播特性を解明することが重要となる。

広島県に多大な被害をもたらした1999年6月末の豪雨災害についてこれまで様々な研究がなされており、レーダー雨量データを用いた解析によって、山地斜面部の地形性収束による降雨の増大が大きな影響を与えていることなどが明らかとなっている¹⁾²⁾。しかし、雨量データの解析だけでは限界があり、気象学的観点に基づく豪雨の発生に関しては明らかにされていない。これには広域的

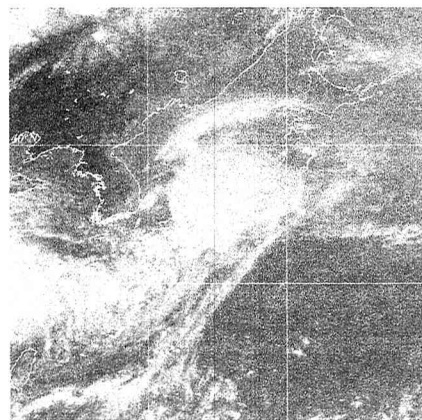


図1 GMS雲画像 (1999年6月29日15時)

な気象データを用いた検討が必要である。

現在、中国地方の気象データとしてGPV(気象予報格子点データ)があるが、一日2回の観測値に対する同化解析値を元に行っていること、高層気象に関しては解像度が約45km程度であることから³⁾、時間的、空間的な集中豪雨

に対して精度は十分ではない。羅漢山レーダーは中国地方上空半径 120km の面的な雨量情報を与えるが、角度が固定されていることやドップラーレーダーではないことから、風速場や豪雨の 3 次元構造を知ることはできない。すなわち、中国地方において豪雨災害時の面的な高層気象場を表す直接的なデータはない。一方、図 1 に示す GMS 雲画像(赤外画像)は日本上空東経 120 度～150 度、北緯 20 度～50 度の領域(約 3000km×3000km)の雲頂を約 5km×5km/画素の解像度で観測している。この画像解析によって求まる雲移動ベクトルは、高層風速場の面的な情報を補完するものとして活用できると考えられる。

本文では、1999 年 6 月の広島災害時における GMS 雲画像の画像解析により前線位置を推定する方法を検討し、前線の移動と豪雨発生位置の関係を述べている。また、GMS 雲画像と GPV 高層データから得られた前線の位置関係を比較することで、その位置の妥当性を検討している。

2. GMS 雲画像の画像解析による前線位置

(1) 画像の前処理

GMS 雲画像(赤外画像)は、表面温度に対応した赤外波長域の輝度を表している。本手法ではカラー画像で提供されている赤外画像(東京大学生産研究所アーカイブデータ)を白黒に変換して用いている。図 1 に示されるように、提供されている GMS 雲画像は、経緯線や陸地線を示す情報が含まれている。雲だけの情報にするために、メディアン・フィルタ処理⁴⁾を施し、これらの線を除去した。

(2) 雲移動ベクトルの算出

雲移動ベクトルを求めるために、1 時間間隔の GMS 雲画像の輝度データに対して相互相関法²⁾⁴⁾を適用する。時刻 t の画像において、対象となる基準位置 (x, y) に相関をとる領域を設定して、 Δt 後の画像において、相関をとる領域を基準位置から $(\Delta x, \Delta y)$ 平行移動させ、以下に示す式で領域間の相互相関係数 ρ を計算する。

$$\rho(x+\Delta x, y+\Delta y) = \frac{1}{n\sigma_A\sigma_B} \sum_{i=1}^n (A_{(x,y)} - \bar{A})(B_{(x+\Delta x, y+\Delta y)} - \bar{B})$$

ここに、 n は領域内の画素数、 A, B は時刻 t 、時刻 $t+\Delta t$ の画像の輝度、 \bar{A}, \bar{B} は時刻 t 、時刻 $t+\Delta t$ の画像における領域内の輝度の平均、 σ_A, σ_B は時刻 t 、時刻 $t+\Delta t$ の画像における領域内の輝度の標準偏差に相当する。

雲移動ベクトルは基準位置を始点、雲が時間 Δt 内に移動しうる一定範囲内で相関領域を移動させ、最大相互相関係数を示した位置 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ を終点とする。

相互相関法により算出される雲移動ベクトルは、相関をとる領域の設定方法により結果が異なる。まず、前線や低気圧付近の特徴を表すのに適した領域の設定方法を

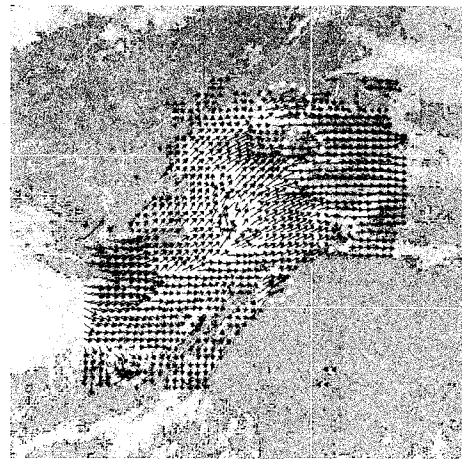


図 2 雲移動ベクトル図 (6 月 29 日 15 時)
相関サイズ 450km×250km (90 画素×50 画素)

検討した。相関領域の大きさが小さ過ぎると一様な輝度が広がる場合に適切な相関をとることができず、大き過ぎると細かい雲の移動を捉えることができない。種々の大きさに実際に雲移動ベクトルを求め、350 km×350km(70 画素×70 画素)前後の面積が適当であり、領域の形状は東西方向に長い長方形の場合に雲移動ベクトルがよく表されることが分かった。これは、多様な輝度を含む細長い相関領域を選ぶことで、前線や低気圧付近の南北方向の変化がより明確に現われるためである。この相関領域で他の事例に適用し、その一般性を検討した結果、GMS 動画で渦が見られる程低気圧が発達している場合に十分適用できることを確認している。

図 2 に算出した雲移動ベクトル図を示す。雲移動ベクトルは全体的には一様な流れが見られる。相互相関法では雲の広がりや発生を考慮できないこと、密度の高い雲の中心では適切な相関をとれないことから、点線枠内で示される様な局所的に急変したベクトルが見られる。しかし、周囲のベクトルと比較してその差異が大きな異常値を取り除けば問題はないと思われる。

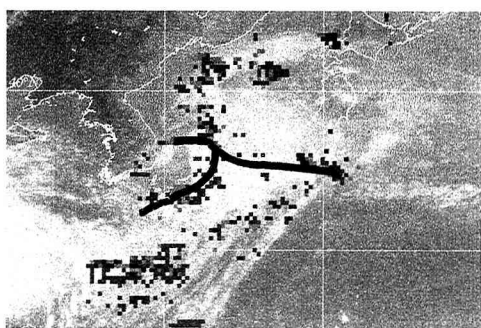
(3) GMS 雲画像から推定した前線・低気圧

図 2 から前線や低気圧の位置を目視で特定することは主観に大きく依存することになる。雲の移動がその場の風と関係していることから、雲移動ベクトルを風ベクトルとみなして、以下に示す式⁵⁾により風の収束度(発散 div の負の領域)、風の渦度 rot を計算し、その分布特性を求める。

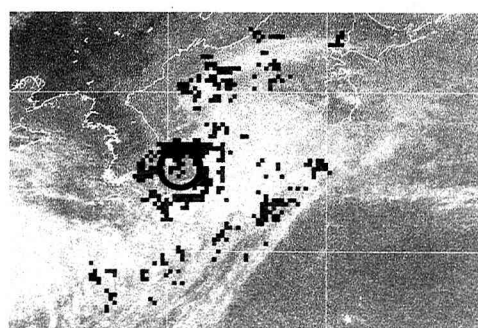
$$\text{div} = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y \quad \text{rot} = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$$

ここに、 u, v [画素/hr] は x, y 方向の風速、 x, y [画素] は東西、南北方向の距離に相当する。

図 3 にベクトルの収束度・渦度の分布を示す。前線付近に風の収束域、低気圧の周囲に風の渦領域があると考

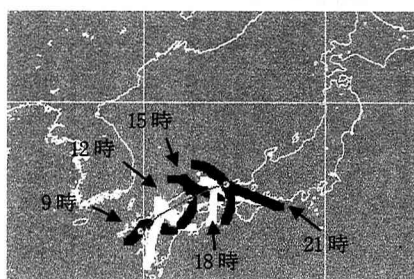


収束度分布 (前線)

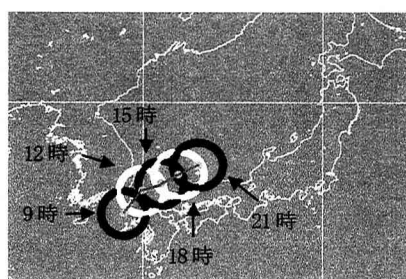


渦度分布 (低気圧)

図3 雲移動ベクトルの収束度・渦度の分布 (6月29日15時 前線・低気圧の推定位置を線で表示)



前線



低気圧

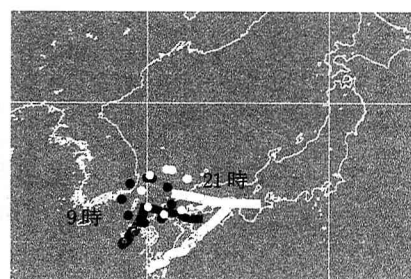


図5 地上天気図の前線・

低気圧の位置(6月29日9時, 21時)

図4 GMS雲画像から得た各時刻における前線・低気圧の位置(6月29日)

えられる。低気圧の位置はその周囲で円弧状の密な渦領域が見られることから明確に分かる(線で表示)。一方、収束域はばらついているため、前線の位置を特定しにくい。前線と低気圧の位置関係に基づいて、低気圧につながった収束域を線で結び、各時刻における前線位置とした。これにより、前線の移動だけでなく、前線の閉塞過程も見ることができる。図4にGMS雲画像から得た各時刻における前線・低気圧の位置を、表1に寒冷・閉塞前線及び低気圧の中心位置の進行速度を示す。低気圧は減速しながら、日本海岸線を沿うように北東へ移動している。また、前線は九州から中国地方に上陸した後、災害時である15時以降から低気圧の減速に伴い大きく閉塞しながらゆっくりと広島上空を横断している。

図5に地上天気図の前線・低気圧の位置を示す。天気図のスケールで考えると、GMS雲画像から推定される前線位置は地上天気図の前線位置とおおよそ一致している。しかし、地上天気図では災害時に広島県の上空を通過したのは閉塞前線のように見られる。21時において図5に示される低気圧(点線)は図4に比べて南西に位置している。また、それに伴う前線の位置にもずれあり、前線の位置については十分な検討が必要である。

本手法を用いることにより、地上天気図のない時間帯の前線の位置を示すことができた。これらの図から広島市西部、呉市上空を通過し豪雨をもたらしたのは閉塞前線よりも寒冷前線であることが確認された。

表1 GMS雲画像から得た前線・低気圧の進行速度

時間帯[時]	9~12	12~15	15~18	18~21
寒冷・閉塞前線の平均速度[km/hr]	40	60	40	35
低気圧中心位置の平均速度[km/hr]	50	45	40	40

3. 前線の移動と雨域の発生位置の関連

図6に中国地方における各時刻の前線位置を、図7に広島県における各時刻の降雨量分布を示す。図6は先にGMS雲画像から得られた収束域を取り出したものを、四角の枠は降雨量分布を示す対象地域を表す。図7は5分間隔で測定されている羅漢山レーダー雨量データの15分間積算値である。図6から、前線が14時頃には広島県上空を覆っており、18時頃には広島県を通過していることが分かる。図7から、広島県に寒冷前線が到達する前の12時に小さい雨域がばらついて発生しており、前線が到達した14時頃から、降雨量の大きい雨域が発生しているのが分かる。この帯状の雨域は次々と発生する雨域が重なって発達することにより形成されていると考えられ、その発生箇所は山地や島などの斜面に沿って集中している¹⁾。この非常に幅の狭い雨域が局所的な豪雨をもたらしている。図6と図7を比較すると、帯状の雨域の発生位置は前線の移動と共に東へ移動しており、前線の通過後は雨域が発生していない。以上のことから、1999年6

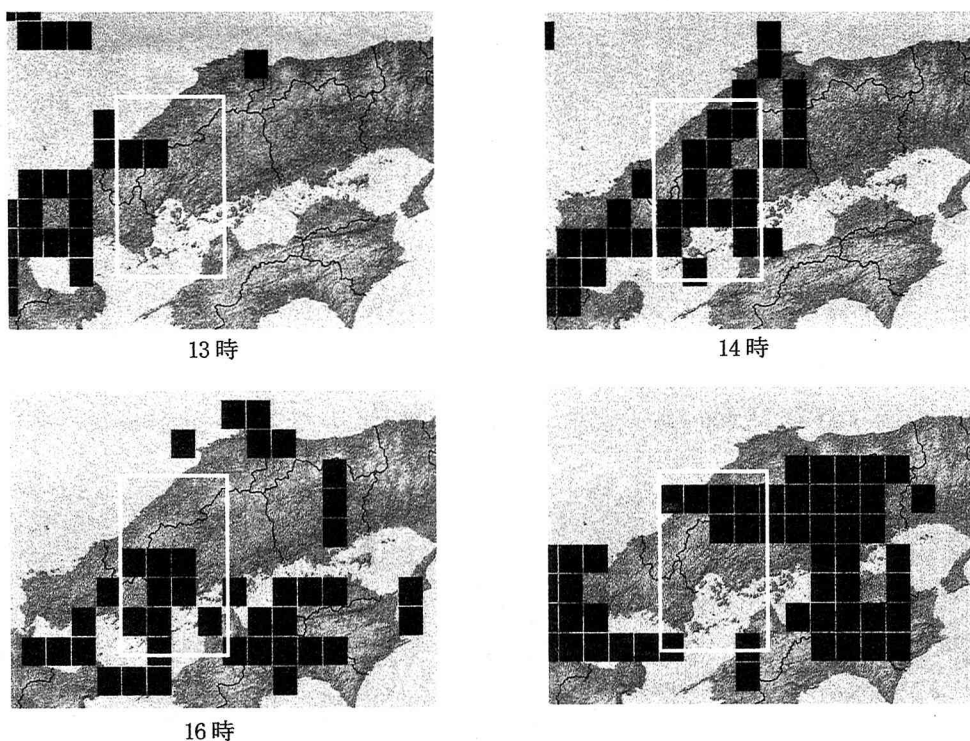


図6 中国地方における各時刻の前線位置 (6月29日)

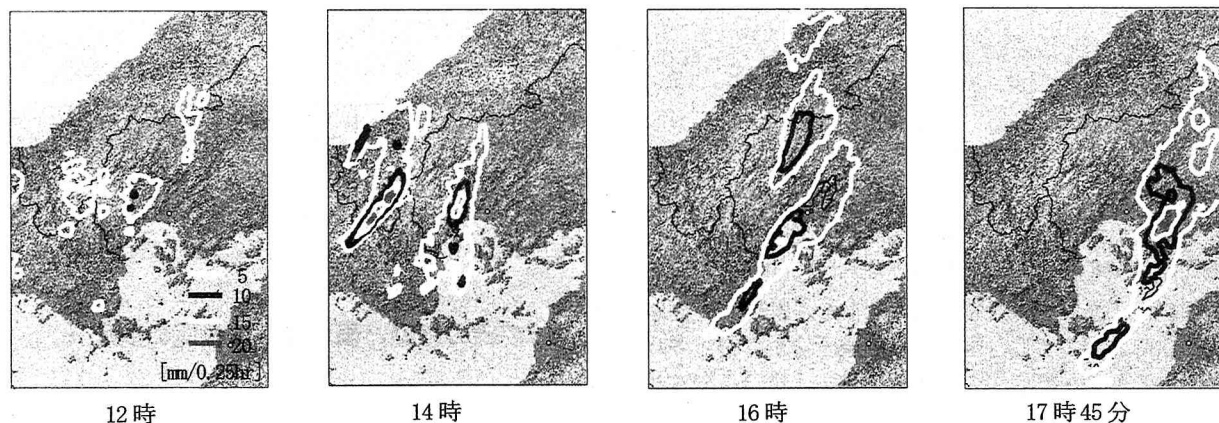


図7 広島県における各時刻の降雨量分布 (6月29日)

月広島豪雨は、ゆっくりと移動する寒冷前線による収束に地形性収束の影響が重なって生じたと考えられるのが妥当であろう。

4. GPV 高層データによる前線位置

GMS 雲画像の相互相関による雲移動ベクトルの妥当性は、GMS 動画の目視によって判断しているため、精度は十分とは言えず、客観性に欠ける。そこで、GPV 高層データと GMS 雲画像から得られた前線位置を比較して、その位置の妥当性について検討する。

ここでは RSM (領域モデル; 東アジアの広領域を計算対象) の気象庁 GPV データを用いる。RSM の高層データ

は3時間間隔に52時間先までの数値予報値を算出している³⁾。本手法では、比較的精度があると考えられる観測時間(日本時間9時, 21時)におけるデータについて検討している。

(1) GPV 風データによる前線位置

図8に GMS 雲画像から算出した雲移動ベクトル図を、図9に同時刻における GPV 風ベクトル図(850hPa 面)を示す。図8と図9を比較すると、雲の密度が高い部分(点線枠内)ではベクトルの対応は良くないが、高度の低い雲の周辺部(点線枠と破線枠の間)ではベクトルの方向は概ね一致している。GMS 雲画像の輝度は雲の密度に依存しており、雲の密度が高い場所では輝度が一樣であるため適切な相関をとることができない。また、GMS 雲画像は

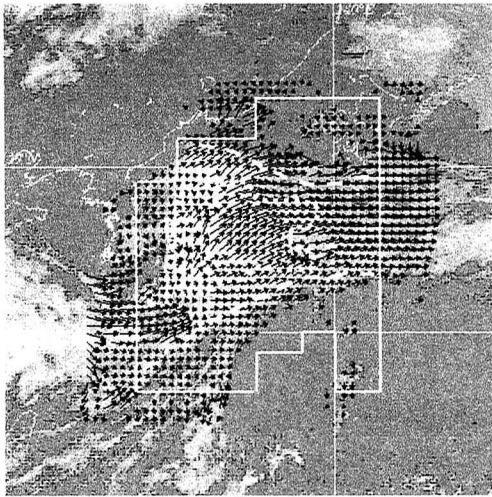


図8 雲移動ベクトル図 (6月29日9時)

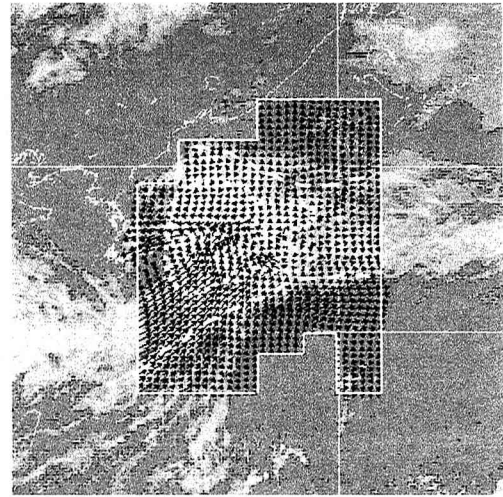


図9 GPV 風ベクトル図 (850hPa, 6月29日9時)

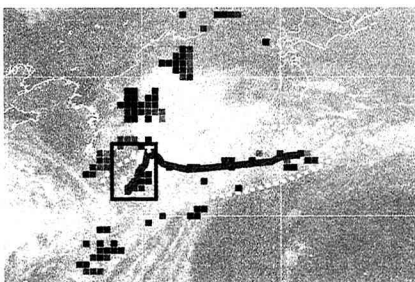
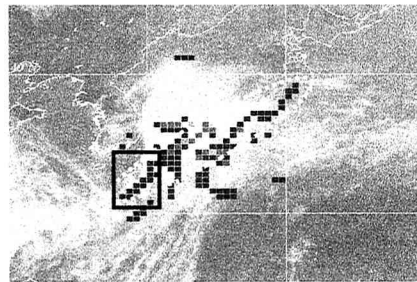
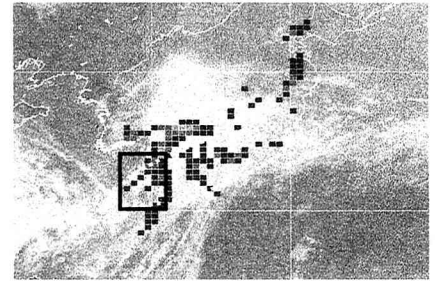


図10 GMS 雲画像による収束度分布
(6月29日9時, 前線推定位置を線で表示)



850hPa



925hPa

図11 GPV 風データによる収束度分布 (6月29日9時)

それぞれの位置で表している雲の高度が異なるため、等気圧面の風速場と一概に比較できない。以上のことが場所によって風ベクトルの対応が異なる原因であると考えられる。

各前線位置を比較するために、図10にGMS雲画像による風の収束度分布を、図11にGPV風データの収束度分布を示す。図10と図11の点線枠内を比較すると、GMS雲画像から求まる収束域が全体的にばらついているのに対して、GPV風データから求まる収束域は連続した形状を示している。温暖前線に位置する収束域に関して、925hPa面に対してはGMS雲画像による前線位置とおおよそ一致している。850hPa面に対しては南北方向にずれが見られる。四角枠内に示される南西に伸びる寒冷前線に関しては両気圧面で良く一致している。寒冷前線の雲構造は対流性であり、前線面の傾斜が急であることに対して、温暖前線の雲構造は層状性であり、前線面の傾斜が緩やかである。これにより、高度や前線の種類による収束域の違いが現われたと思われる。GMS雲画像はそれぞれの場所で異なる高度の雲頂を表しているが、収束域の対応関係から判断すると、画像解析により得られた風速場はおおよそ925hPa、850hPa面付近の風速場と思われる。

(2) GPV 温度データによる前線位置

寒気と暖気の境界である前線付近では温度が急変する。

図12にGPV温度データから求めた広島市を通る経度上空の南北縦断面温度コンターを示す。点線枠内で示されるように、この経度上において850hPa面では14°C~16°C、925hPa面では16°C~20°Cで前線を示す急勾配が生じている。各経度線上空の温度場から、850hPa面では16°C、925hPa面では20°C付近で温度場が急勾配になっていることが分かった。図13に温度の急変部を表す16°C(850hPa面)、20°C(925hPa)の温度コンター線を示す。図13では温度コンター線の形状は層によって異なっているが、このスケールでは点線枠内に示される東西に伸びる線は概ね一致して見える。図10と図13の点線枠内を比較すると、温度コンター線に示される前線はGMS雲画像による前線と南北方向にずれているが、その形状は概ね一致しており、特に四角枠内に示される寒冷前線に関してはよく一致している。GPV温度コンターによる前線から判断すると、GMS雲画像の画像解析による前線はおおよそ925hPa、850hPa面付近の温度場から求まる前線に対応している。

(3) GMS 雲画像と GPV 高層データの併用

GMS雲画像は一定時間間隔の実画像であるが、雲の高度や密度に依存して求まる収束度分布がばらつき、前線位置の特定が困難である。一方、GPV高層データは観測が12時間間隔と粗く、数値予報値は観測地点の粗さから

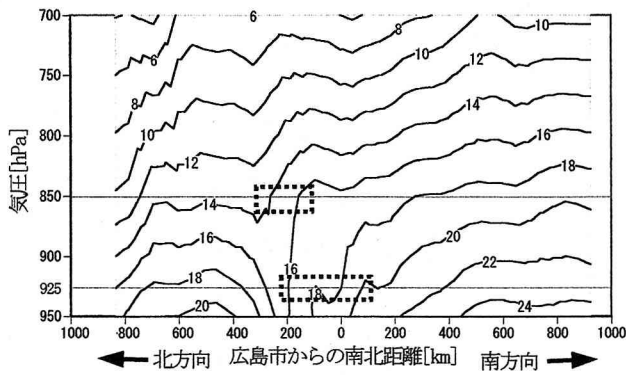


図12 132° 27' Eにおける南北縦断面温度コンター[°C]
(6月29日9時)

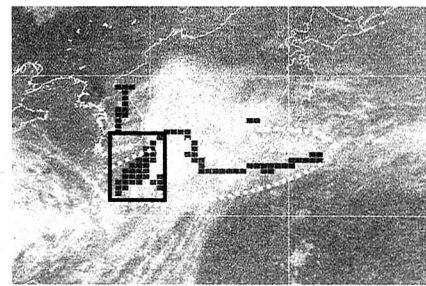
時空間的な位置の精度は十分でないが、得られる前線位置が特定しやすい。GMS 雲画像と GPV 高層データによる前線の位置が同じであれば、前線の位置として妥当性があると思われる。図10と図11, 図13(925hPa面)に表される前線位置の共通部分を抽出したものを図14示す。図14では前線位置の特定が容易であり、天気図スケールでは比較的信頼性が高いものが得られる。

1999年6月29日の豪雨災害では非常に発達した低気圧が前線を伴っていたことから、低気圧を示す渦域が明確に現われており、その付近の収束域を抽出することで前線の特定が可能であった。しかし、低気圧が発達しておらず渦度が密でないケースでは、前線の位置の特定が困難である。その場合、主観に大きく依存した前線の特定を必要としないこの手法が望まれる。

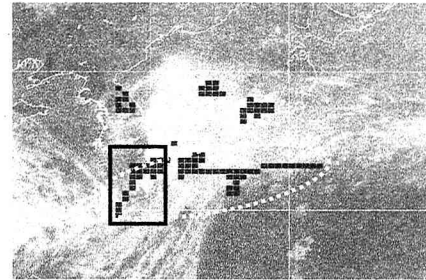
5. 結論

本研究では、GMS 雲画像の画像解析により、地上天気図等の前線情報がない各時刻における前線の位置を求める手法を検討した。その手法を用いて、災害時に広島上空を通過している前線が寒冷前線であることを確認し、寒冷前線位置と雨域の発生位置が一致していることを示した。GMS 雲画像による前線位置が GPV の 850hPa, 925hPa 面における高層データによる前線位置とおおよそ一致していることを示した。GMS 雲画像と GPV データを併用により、主観性の大きい操作を必要としないで比較的信頼性のある前線位置が得られることを述べている。本手法は精度の点で課題があるが、以上のことから高層気象の観測網が十分でない中国地方において、GMS 雲画像が高層風速場の面的な情報を補完するものとして活用できる可能性を示したと言える。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省中国地方整備局河川計画課から羅漢山レーダーデータの提供を、気象庁から GPV データの提供を受けました。また、GMS 雲画像は東京大学生産研究所で整理されているものを利用して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。



850hPa (16°C)



925hPa (20°C)

図13 GPV 温度データによる前線 (6月29日9時)

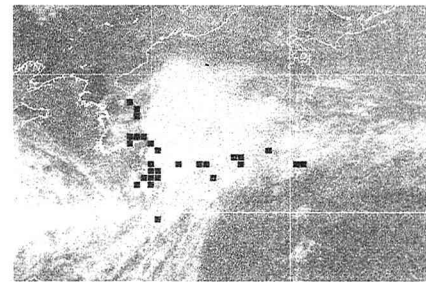


図14 GMS 雲画像と GPV データによる前線位置の一致している部分を抽出 (6月29日9時)

参考文献

- 1) 福岡捷二, 渡邊明英: 1999年6月29日広島県土砂災害をもたらした集中豪雨の特性と土石流の発生・流動, 1996年6月西日本の梅雨前線豪雨による災害に関する研究 平成11年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp.1-22, 2000
- 2) 渡邊明英, 福岡捷二, 青山芳彦, 足立文玄: レーダ雨量データを用いた広島県の豪雨の解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.43-48, 2002
- 3) 中北英一, 杉本聡一郎, 池淵周一, 中村徹立, 奥田昌弘, 山路昭彦, 高棹琢馬: 3次元レーダーおよびGPVデータを用いた短時間降雨予測手法, 水工学論文集, 第40巻 pp.303-308, 1996
- 4) 谷口浩成, 黒川浩助, 大谷謙仁: 気象衛星「ひまわり」画像から算出した雲移動ベクトルを用いた雲の自動推定
- 5) 谷岡康, 福岡捷二, 渡邊明英: 雷雨性豪雨の発生と気象状況-1994年・関東平野での解析事例- 水工学論文集, 第44巻, pp.115-120, 2000
- 6) 小倉義光: 一般気象学, 東京大学出版, 1994

(2002. 9. 30受付)