

アラビア海における低気圧の発生 および発達過程に関する研究

A STUDY ON THE CYCLOGENESIS AND
ITS DEVELOPMENT OVER THE ARABIAN SEA

谷口健司¹・小池俊雄²

Kenji TANIGUCHI and Toshio KOIKE

¹正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区七丁目3-1)

²正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区七丁目3-1)

A cyclone over the Arabian Sea has lots of effect on people's life in India and it sometimes bring Indian summer monsoon. In the present study, cyclogenesis and its development over the Arabian Sea are investigated by using satellite observation data and atmospheric reanalysis data. There is large temperature gradient around the coastal area of the Arabian Peninsula between warmer air over land and cooler air over ocean. Baroclinic instability by the horizontal temperature gradient in that region easily generates a seed of cyclone at 850hPa.

Regarding development of cyclone over the Arabian Sea, water vapor over the region of a seed of cyclone does not show significant difference between development and non-development case. On the other hand, occurrence of air disturbance in middle-upper troposphere and coupling of upper and lower air disturbances are considered to be more important for the development of cyclone over the Arabian Sea.

Key Words : *Indian summer monsoon, Arabian sea, cyclogenesis, baroclinic instability, coupling, water vapor, sea surface temperature*

1. 研究の背景

アラビア海における強い低気圧(サイクロン)はインドの人々の生活に多大な影響を与えている。1998年6月4日から6月11日にかけて発達したサイクロンは、それ以前の25年間でもっとも勢力が強く、1000人以上の死者を出し、数千の家屋が被害を受け、約15000人が転居を余儀なくされた。被害総額は2億9000万ドル近いと推定されている¹⁾。一方、5月から6月にかけてアラビア海において発達する低気圧は、アラビア海およびインド西岸の下層大気場に急激な変化をもたらし、暖かなアラビア半島と気温の低下したインド西岸との間の温度傾度によってアラビア海上に強い西風を形成し、夏季インドモンスーンをもたらす²⁾。1981年から2002年までの22年のうち8つの年において、アラビア海で発達した低気圧によって夏季インドモンスーンが開始した。

このように、アラビア海で発生・発達する低気圧は、人々の生活に多大な影響を与えるひとつのイベントであるとともに、モンスーンという季節進行の中で重要な役

割を果たしているにも関わらず、現在のところ十分な理解がなされていない。本研究では衛星観測データおよび再解析データを用いて、夏季インドモンスーン開始前後にアラビア海でみられる低気圧の発生および発達に関する解析を行った。

2. データ

低気圧の発生・発達に関する解析を行うために、本研究では米国環境予測センター(National Center for Environmental Prediction: NCEP)および米国国立大気研究センター(National Center for Atmospheric Research: NCAR)による大気再解析データ(NCEP/NCAR再解析データ)を用いた³⁾。データの水平解像度は2.5度×2.5度、時間に関しては毎6時間値、日平均値、月平均値および気候値がある。本研究では日平均データを用い、詳細な検討が必要な際には6時間データを用いた。データは1948年からほぼ今日までのものが入手可能であるが、本研究では1980年から2003年までを解析対象期間とした。

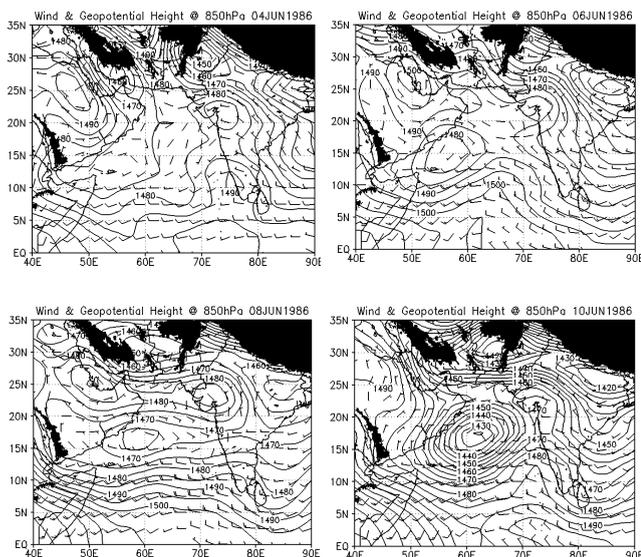


図-1 1986年6月4日から6月10日までの850hPa等圧面におけるジオポテンシャル高度および風ベクトルの分布。

アラビア海上の水蒸気量が低気圧の発達に及ぼす影響に関しても、Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) によって観測されているカラム水蒸気量を用いて解析を行った⁴⁾。SSM/Iは米国海軍気象衛星 (Defense Meteorological Satellite Program: DMSP) に搭載され、複数のセンサーによって観測が行われている。DMSPは太陽非同期の極軌道衛星であり、観測時刻は日によって異なる。複数の衛星によるデータを用いた場合でも一日のデータでは欠測領域が生じるため、本研究では3日間の観測データから合成図を作成し、解析を行った。

3. 低気圧発生とアラビア海周辺の大気場の特徴

図-1 に1986年の低気圧発生から発達に至る850hPa等圧面上におけるジオポテンシャル高度 (単位: m) および風の場の季節進行の概略を示す。

6月4日の大気場の様子を見ると、アラビア半島沿岸 (東経57.5度、北緯15度付近) にジオポテンシャル高度の低い領域が延びており、反時計回りの低気圧性の循環場が存在していることがわかる。6月6日には閉じた等値線がみられ、6月8日、6月10日と低気圧が強化されていく様子がわかる。

図-2 には6月4日の850hPa等圧面における気温および各グリッドにおける気温傾度を示す。気温傾度は各グリッドの周囲8グリッドのうち2点 (12パターン) を選んで温度差を算出し、それらの最大値を気温傾度とした。なお、解析対象領域は赤道に近く、各緯度における経度1度あたりの距離の違いは小さいと考え、グリッド間の温度差をそのまま気温傾度として用いることとした。また図中の黒い三角印は低気圧発生の最初の段階と考えられるグリッド (ジオポテンシャル高度が極小値を示した

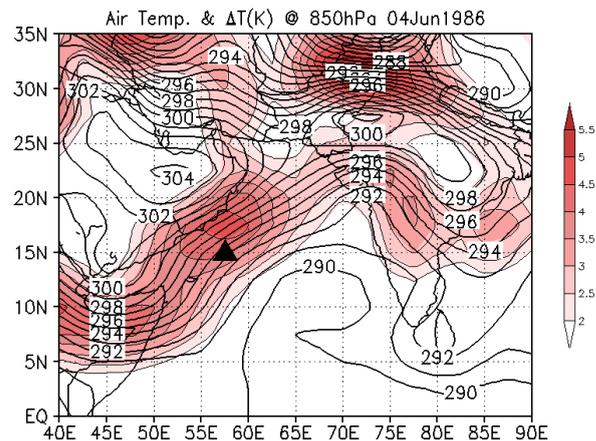


図-2 1986年6月4日の850hPa等圧面における気温 (等値線) と水平温度傾度。黒い三角印は低気圧の卵が発生したグリッドを示す。

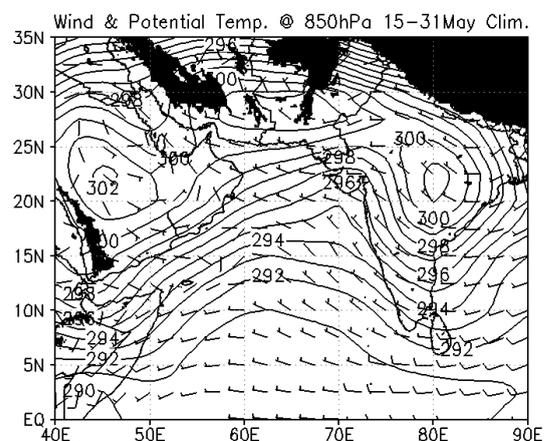


図-3 気候値による850hPaでの気温と風の分布。

グリッド) を示している。図-2 より低気圧発生の初段階がみられた付近では、アラビア半島上の暖かな空気と海洋上の冷たい空気とが接するために等温線が混んでいることと、気温傾度の極値が存在していることがわかる。等圧面において気温傾度が大きい領域では傾圧性が大きく、大気は不安定である。冬季の日本海などにおいてもシベリアからの冷たい空気と日本海上空の暖かな空気とが接するために大気は傾圧不安定となり、こうした領域では低気圧が発生しやすい⁵⁾。図-3 には気候値を用いた5月中旬から下旬にかけての850hPa等圧面での気温分布を示す。図-3 より気候値においてもアラビア半島沿岸では等温線が混んでおり、温度傾度が大きいことがわかる。すなわち5月中旬以降のアラビア半島沿岸の周辺域は下層大気の傾圧性が大きく、大気が不安定な状態になり易い。1980年から2003年の間において夏季インドモンスーンの開始に寄与した、あるいは開始直後に発達したアラビア海上での低気圧は13個であった。これら低気圧が発生したとみられるグリッド、すなわち下層において低気圧の卵が発生したグリッドを、東経65度以西で850hPa等圧面におけるジオポテンシャル高度の等値線および極小値から同定したところ、図-4 に示すようにア

表-1 1980年から2003年までの間にアラビア半島沿岸で発生した低気圧の卵の位置

年	日付	緯度・経度	カップリング	年	日付	緯度・経度	カップリング
1980	May-23	(57.5E, 15N)		1992	June-3	(50E, 10N)	×
1981	May-25	(57.5E, 17.5N)			June-13	(55E, 15N)	
	June-12	(60E, 25N)		1993	May-22	(50E, 10N)	×
1982	May-28	(65E, 17.5N)	×		May-26	(55E, 17.5N)	
1983	June-5	(52.5E, 15N)	×		May-29	(52.5E, 15N)	×
	June-13	(65E, 20N)			June-1	(52.5E, 17.5N)	
1984	May-25	(52.5E, 12.5N)		1994	May-31	(55E, 15N)	
	May-29	(55E, 17.5N)		1996	May-30	(57.5E, 15N)	
1985	May-22	(55E, 17.5N)	×		June-7	(60E, 17.5N)	
	May-26	(55E, 15N)		1998	June-2	(57.5E, 17.5N)	
1986	May-26	(55E, 15N)	×	2000	May-13	(65E, 20N)	
	June-4	(57.5E, 15N)		2001	May-14	(52.5E, 12.5N)	×
1987	May-30	(52.5E, 12.5N)			May-17	(52.5E, 17.5N)	×
1988	May-24	(55E, 15N)			May-21	(47.5E, 12.5N)	
	June-4	(55E, 15N)		2002	May-17	(57.5E, 17.5N)	×
	June-9	(55E, 20N)			May-28	(50E, 12.5N)	×
1989	May-22	(55E, 17.5N)	×		May-31	(52.5E, 17.5N)	×
	May-27	(55E, 17.5N)	×		June-3	(52.5E, 17.5N)	
	May-31	(65E, 17.5N)			June-10	(57.5E, 17.5N)	
1990	May-13	(60E, 15N)		2003	May-20	(55E, 15N)	×
1991	June-2	(55E, 17.5N)	×		June-5	(52.5E, 15N)	

注) 上層の擾乱との間でカップリングしたものを○, 擾乱は生じたがカップリングしなかったものを●, 上層の擾乱が生じなかったものを×, その他を○とした。

アラビア半島沿岸域の海洋上に多く分布することがわかった。また、傾圧不安定な状態にあるアラビア半島沿岸では、図-4 に示しただけでなくさらに多くの低気圧の卵が下層で発生している。表-1 には1980年から2003年までの間にアラビア海沿岸で発生した低気圧の卵に関して、その発生日、発生グリッドおよびジオポテンシャル高度の値をまとめた。さらに図-5 には表-1 に示した結果から各グリッドにおける低気圧の卵の発生頻度をまとめた。これよりアラビア海沿岸周辺の傾圧帯において低気圧の卵となるような下層擾乱が非常に発生し易いことがわかる。図-5の結果はアラビア半島沿岸が傾圧不安定で低気圧の卵となるような擾乱が大気下層で生じやすいことを示すものであるが、それらすべてが発達するわけではない。次章では低気圧の発達要因に関して、実際に発達した場合とそうでなかった場合とを比較して、その影響に関する考察を行う。

4. 低気圧発達要因に関する解析

(1) 顕熱および潜熱フラックスの影響

アラビア半島沿岸と同様、日本海上空も大きな温度傾度のために傾圧性が大きく、大気状態は不安定である。こうした領域では短時間のうちに急激に中心気圧が低下し発達する低気圧がみられ、これらは爆弾低気圧とよばれている⁶⁾。爆弾低気圧は太平洋や大西洋でみられるが、

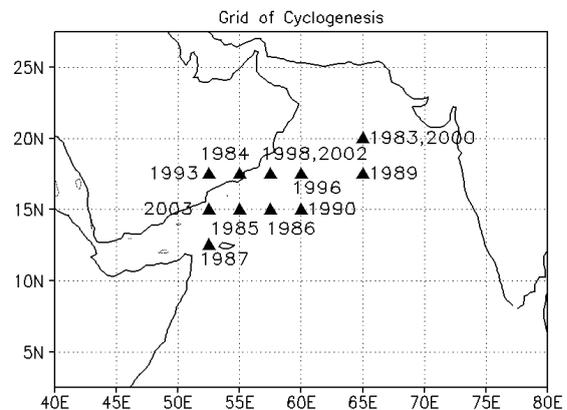


図-4 発達に至った低気圧の卵が発生したグリッド

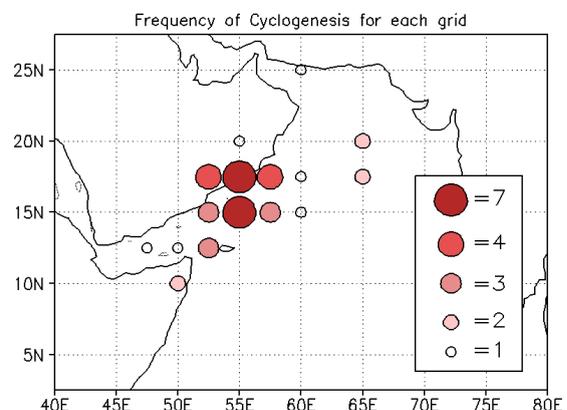


図-5 グリッド毎の低気圧の卵が発生頻度分布(発達に至らなかったものも含む)。単位は回。

いずれの領域においても頻度が大きいのは海洋の西端かつ大陸の沿岸近くである⁵⁾。多くの爆弾低気圧が海上で発達するのは、陸面に比べて海面の地表面摩擦が弱いことや、海面での顕熱と潜熱の鉛直フラックスが大きいことがあげられる。海面からの加熱と加湿が低気圧の発達におよぼす影響に関する研究では、それらの効果を考慮したシミュレーションの方が現実近く、発達への影響が大きいことが示されている⁷⁾。地表面からの顕熱フラックス (F_s) および潜熱フラックス (F_q) はバルク法によれば次式でもとめられる。

$$F_s = -\rho C_h C_p |v_{10}| (T_{10} - T_G) \quad (1)$$

$$F_q = -\rho C_q L_c |v_{10}| (q_{10} - q_G) \quad (2)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 C_h 、 C_q はそれぞれ顕熱および水蒸気の交換係数、 C_p は空気の定圧比熱、 L_c は凝結の潜熱、 $|v_{10}|$ は海面から10mの高さでの風速、 T_{10} 、 q_{10} 、 T_G 、 q_G はそれぞれ海面から10mと海面における温度と混合比である。

式(2)によって潜熱フラックスは求められるが、現在のところ大気中の比湿に関して十分な精度を有するデータは存在していないため、正確な推定は困難である。一方、式(2)は海面から大気への水蒸気供給と考えられる。そこで本節ではSSM/Iによるカラム水蒸気量の比較を行い、アラビア海上における低気圧の発達に及ぼす影響に関して考察を行う。

図-6は850hPa等圧面において低気圧の卵が発生した1996年5月29日、1996年6月7日および1998年6月2日におけるSSM/Iによるカラム水蒸気量分布である。その後低気圧が発達した1996年6月7日の水蒸気量分布をみると、低気圧の卵が発生した周囲では55mm以上の多量の水蒸気が存在していることがわかる。一方、低気圧が発達に至らなかった1996年5月29日ではアラビア海の南部には多量の水蒸気が存在しているが、低気圧の卵の周りの水蒸気量は40mm程度である。一方、1998年6月2日は低気圧が発達しなかった1996年5月29日と同程度かそれよりも低気圧の卵の周りの水蒸気量は少ないが、実際には低気圧の発達が見られ、それによって夏季インドモンスーンが開始した。1996年5月29日と1998年6月2日の結果は、アラビア海での低気圧の発達は、必ずしもカラム水蒸気量の大小によって影響されるものではないことを示唆するものである。すなわち40mm程度のカラム水蒸気量でも十分に低気圧の発達に寄与するが、他の要因によって発達が左右されたものと考えられる。

海面からの顕熱フラックスは式(1)によって求められる。地表面温度として、Reynolds SST (Sea Surface Temperature) などのデータによる海面温度のデータを利用することは可能である。しかし、Reynolds SST は7日平均値であるために、短期間に生じる低気圧の発生を議

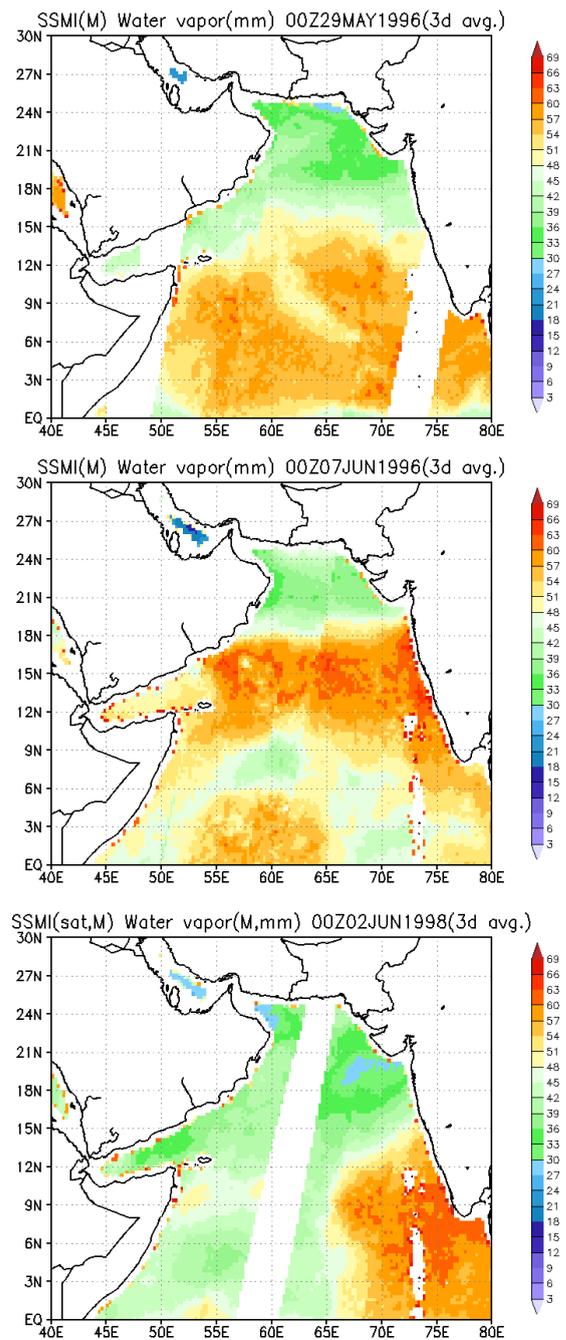


図-6 SSM/Iによるカラム水蒸気量(3日平均値)。上から1998年5月29日、1996年6月7日および1998年6月3日のもの。単位はmm。

論することは難しい。また、NCEP/NCAR再解析データでは地表面における顕熱フラックスを算出し公開しているが、現在の数値モデルによる地表面フラックスの算定は必ずしも十分な精度を有しているとはいえない。以上の理由から、本論文においては海面からの顕熱フラックスがアラビア海上における低気圧の発達に及ぼす影響に関しては解析を行わなかったが、この点に関しては今後十分に検討する必要がある。

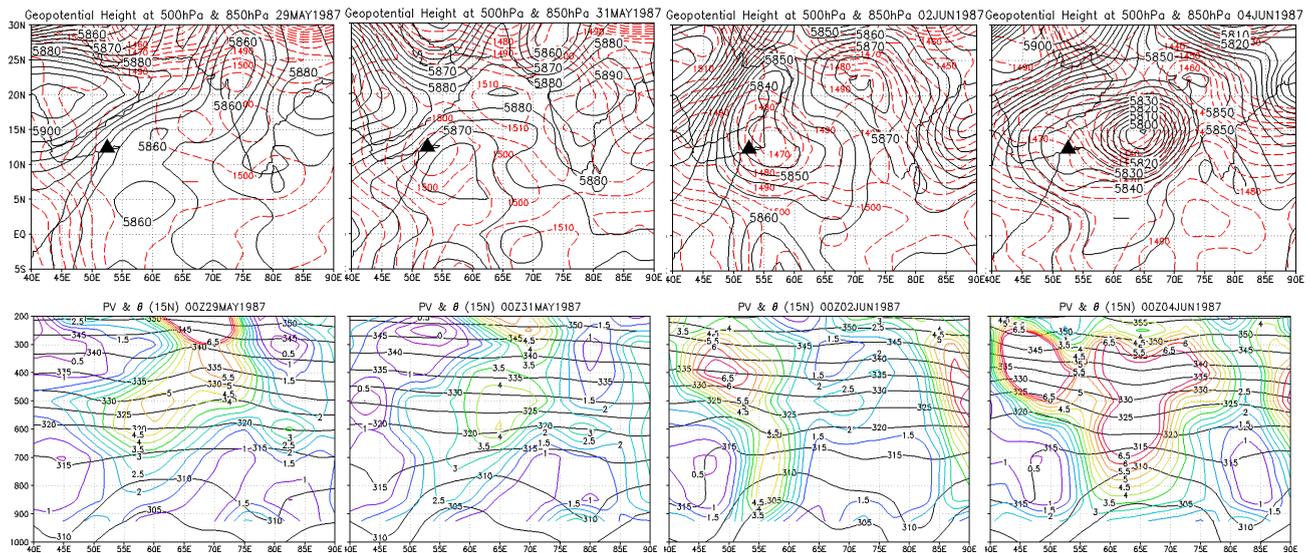


図-7 (上) 1987年のジオポテンシャル高度．黒線が500hPa等圧面，赤線は850hPa等圧面に関するもの．三角印は低気圧の卵が発生したグリッド．(下) 上図と同じ日の北緯15度に沿った渦位(カラー)と温位(黒線)．縦軸は高さ(hPa)．

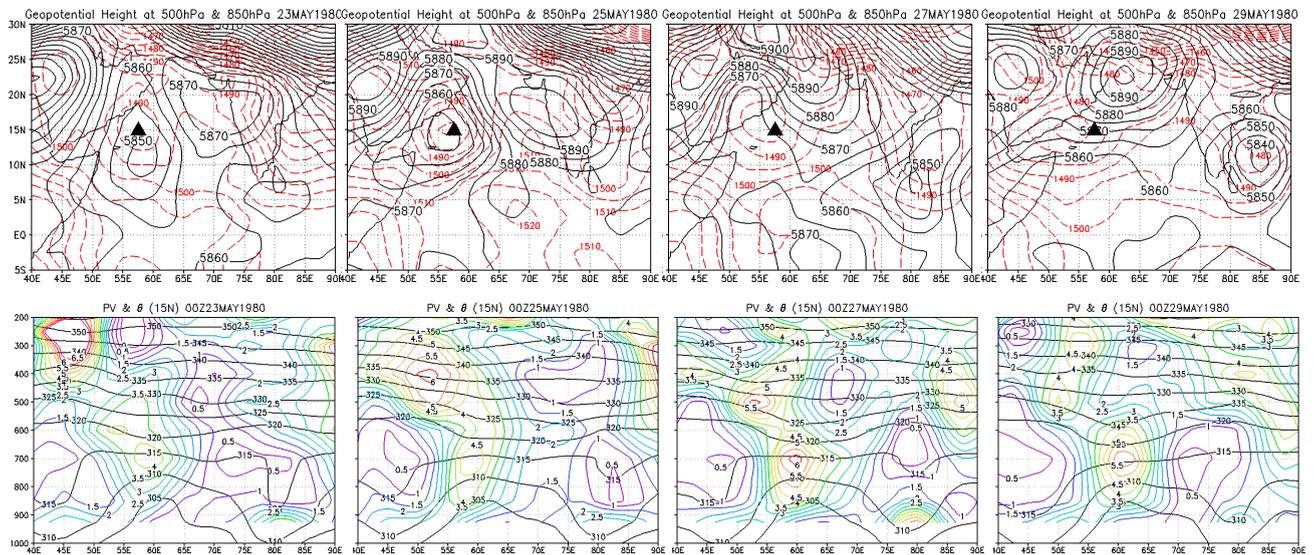


図-8 図-7と同様の結果．ただし1980年に関するもの．

(2) 上層大気と下層大気のカップリング

低気圧の発達においては，下層の傾圧帯に低気圧の卵があり，そこに上層のトラフが接近することによって，背の高い総観規模の低気圧に成長するものが多い³⁾．このような上層と下層の擾乱のカップリングも低気圧発達の重要な要因のひとつである．

図-7は1987年5月30日に発生し，その後発達した低気圧に関して，850hPaおよび500hPa等圧面におけるジオポテンシャル高度と，温位(K)と渦位に関する北緯15度の経度高度断面図である．渦位の単位はPVU (Potential Vorticity Unit : $1\text{PVU}=10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}$) である．5月29日を見ると850hPa等圧面には低気圧の卵は存在していないが，500hPa等圧面ではアラビア海南部に低気圧性の擾乱が生じていることがわかる．渦位の鉛直分布を見ると東経55度付近の500hPaから600hPaにおいて渦位のやや弱

い極大値が存在している．5月31日になると850hPa面でアラビア半島沿岸にジオポテンシャル高度の極小値がみられ，500hPa等圧面における擾乱は下層の低気圧の卵に接近してきている．渦位の鉛直分布をみると3PVUの等値線がやや下層に延びてきているのがわかる．6月2日では850hPaと500hPaにおいて低圧場が重なっている．渦位も4PVUの等値線が900hPa付近にまで達している．6月4日になると低気圧は完全に発達し，東進していく．渦位の鉛直分布においても大きな渦位の領域が東へ移動しているのがわかる．このように，1987年のケースでは上層の低気圧性擾乱の接近によって下層の低気圧の卵とのカップリングが生じ，低気圧が発達したことがわかる．

図-8は1980年5月23日に発生した低気圧の卵とその上層における擾乱に関して，図-7と同様の結果を示したものである．5月23日のジオポテンシャル高度の分布をみ

ると850hPaにおける低気圧の卵は存在しており、そのわずかに南の500hPa等圧面においては低気圧性の擾乱が重なっている。渦位の分布をみると800hPaから400hPa付近にかけてやや大きな渦位の領域がみられる。5月25日になると上層と下層に擾乱は完全に重なり合う形となる。渦位の分布をみると東経55度から65度の間で3PVUの等値線が下層に伸びていく様子がわかる。5月27日においても下層の低気圧性擾乱は依然として存在しており、渦位の分布をみてもやや強化されているのがわかる。しかし500hPa等圧面の擾乱ははっきりしなくなっている。これは5月23日、5月25日に低気圧性擾乱の東に存在していた高気圧が西へと広がったためと考えられる。5月29日になると下層の擾乱は存在しているが上層では高気圧がさらに強くなって低気圧場が消えてしまう。800hPaから700hPaの間に渦位の極大値が存在しているが、1987年のように広い範囲で発達することはなく、この後、5月31日頃になると渦位の局地はすっかりみられなくなってしまう。

図-8に示したように、下層に低気圧性の卵があり、上層に低気圧性の擾乱が存在している場合でも、それらが必ずしもカップリングするとは限らない。1980年のケースでは上層の低気圧性擾乱の東に存在していた高気圧場が発達したためカップリングが阻害されている。しかし、他のカップリングが生じなかったケースが必ずしも高気圧場の存在によるものではなかった。このように上下層に擾乱が存在する場合でもカップリングが生じないのは海上の対流混合層の厚さと混合層内の渦位の違いが関連しているのではないかと研究もある⁹⁾。

表-1に示した42個のケースに関して500hPa等圧面における低気圧性擾乱の有無とそれらがカップリングし低気圧の発達に至ったか否かを調べた。表-1の各ケースの右端に示すように、13個のケースで低気圧が発達し、11個のケースでは上層の低気圧性擾乱が存在していたが擾乱の移動あるいは消滅のためにカップリングが生じなかった。また、16個のケースでは上層の低気圧性擾乱が存在しないために低気圧の発達は起こらなかった。残りのふたつのケースでは、一方は上下層の擾乱のうち下層が先に消滅し、一方はアラビア海東部で発生した低気圧によって急激な大気場の変化が生じ、アラビア海沿岸での低気圧の発達が妨げられた。低気圧の発達には上層の低気圧性擾乱が必要であるが、存在していれば常にカップリングが起こり下層での低気圧の発達が起こるというわけではない。

また、発達に至った低気圧のカップリングに関して調べたところ、いずれの場合も上層の擾乱は下層の低気圧の卵に対して南あるいは南東から接近していることがわかった。日本海周辺域で発達する爆弾低気圧などでは上層の擾乱は下層の擾乱に対して北西に位置していることが多い。このような違いを明らかにすることも低気圧発達のメカニズム理解には必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究ではインドの人々の生活に多大な影響を与え、夏季インドモンスーン開始をもたらすアラビア海での低気圧の発生・発達について調べた。アラビア半島沿岸の下層大気は水平温度勾配が大きく、傾圧不安定な状態にあり、低気圧の卵となる擾乱が発生しやすい。下層で発生した低気圧の卵の発達要因に関して調べたところ、水蒸気量の大小はさほど大きな影響を与えない可能性が示唆された。一方、上層の低気圧性擾乱とのカップリングが生じるか否かが低気圧の発達に重要であるとの結果を得た。しかし、上層に擾乱が存在しているにもかかわらずカップリングが生じない場合もあり、今後、上下層で擾乱が存在している際のカップリングの成否を分ける要因について詳細に調べる必要がある。また、本研究では海面からの顕熱フラックスの影響を議論していないが、それに関しても今後検討する必要がある。本研究では下層における擾乱の発生機構の詳細に関しては触れていないが、そうした点も低気圧の発生を理解するうえで明らかにする必要がある。これらの課題に関しては、今後提供され得るより詳細な衛星データによる解析や、物理過程の理解を助けるための数値実験を行う必要がある。

謝辞：本研究ではNCEP/NCAR, NASA Earth Science REASoN Discovery Project より提供されたデータを用いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) From the web site of NOAA Defense Meteorological Satellite Program (<http://dmsp.ngdc.noaa.gov/html/hurricanes/indian98.htm>)
- 2) 谷口健司, 小池俊雄, 生駒栄司, 喜連川優: データ統合活用による夏季インドモンスーン形成過程の研究, 水工学論文集, 第48巻, pp.199-204, 2004.
- 3) Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne and D. Joseph: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, pp.437-472, 1996.
- 4) Wentz, F. J.: A well-calibrated ocean algorithm for SSM/I, *J. Geophys. Res.*, 102(C4), pp.8703-8718, 1997.
- 5) Roebber, P.J.: Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, 112, pp.1577-1589, 1984.
- 6) Sanders, F. and J.R. Gyakum: Synoptic-dynamic climatology of the "bomb", *Mon. Wea. Rev.*, 108, pp.1589-1606, 1980.
- 7) Reed, R.J., G.A. Grell and Y.-H. Kuo: The ERICA IOP 5 storm. Part II, Sensitivity test and further diagnosis based on model output, *Mon. Wea. Rev.*, 121, pp.1595-1612, 1993.
- 8) 小倉義光: 総観気象学入門, 東京大学出版会, 2000.
- 9) Okland, H.: Heating by organized convection as a source of polar low intensification, *Tellus*, 39, pp.397-407, 1987.

(2005.9.30受付)