

論文の内容の要旨

論文題目 A Study on Interactions between Tropical Cyclones and the Ocean
(台風と海洋の相互作用に関する研究)

氏名 和田 章義

熱帯低気圧（台風）は時間スケールにして1日から2週間、空間スケールにして100kmから成熟期には1000kmを超える大気擾乱である。台風は地球上でもっとも破壊力のある大気現象の1つであり、強風・豪雨・高波・高潮により甚大な災害や人命の損失を生じる原因となる。台風の構造や特徴を理解し、その予測を改善することは、台風により生じる損失を軽減させるためにも不可欠である。一般的に台風は熱帯・亜熱帯海域で発生し、海面水温が高い海域で強化する傾向にある。しかしながら、現実の台風は海面水温のみで見積もられる潜在強度に達することはないといわれている。台風は、実際にはその経路に沿って直下の海水温を低下させ、この海水温低下は台風の強化にとって負の効果をもたらす。従って、台風と海洋の相互作用を理解することは、台風予測を改善するために重要である。

近年の衛星海面高度計の発展により、海面水温だけでなく、海洋の水温・塩分構造が台風予測に重要であるという証拠が示されるようになった。しかしながら、海洋表層の水温・塩分構造を特徴づける台風の潜在熱容量 (TCHP) といった指標と台風強度の関係については、いくつかの事例解析を除けば、これまで十分に調査されていない。特に、海面水温・TCHP の変化が、力学的、熱力学的にどのような過程を経て台風予測に影響を与えるのかについては十分に解明されていない。さらに言えば、海面水温や TCHP が台風に与える影響が台風のライフステージによって異なるのかどうかについても、探究する必要がある。

台風通過時に台風が引き起こす湧昇や乱流混合により、海面水温が急速に低下することは良く知られている。しかしながら、乱流混合が海水温低下に寄与する過程には依然とし

て不確かさが残されている。特に波浪の砕波により生成された乱流運動エネルギーフラックスが台風域の乱流混合や台風による海水温低下に与える影響については、これまで調べられていない。強風及び高波による砕波により、海面状態すなわち粗度長は変化し、これにより大気海洋間の運動量、熱、水蒸気フラックスは変化する。しかしながら、高波による砕波が台風予測に与える効果について扱った研究はない。

本研究では最初に、海面水温・TCHP と台風の最低中心気圧の関係を、統計的かつ解析的な観点から明らかにした。積算台風熱容量(ATCHP)と呼ばれる、台風発生から初めて最低中心気圧に達した期間における台風直下の TCHP の積算値を、本研究において新しい指標として導入した。1998 年から 2004 年までの期間の台風について、気象研究所海洋データ同化システムによる水平解像度 0.5 度の海洋再解析データ、熱帯降雨観測衛星(TRMM)/TRMM マイクロ波放射観測装置(TMI) 3 日平均日別海面水温データ及び地域特別気象センター (RSMC) 東京台風センターのベストトラックデータを用いて、台風最低中心気圧と ATCHP、積算海面水温(ASST)及び台風の持続時間との回帰相関を調べた。この相互比較結果として、最低中心気圧は ATCHP ともっとも相関が高かった。対照的に、2004 年の台風 Chaba と Songda の衰退期について事例解析を行った結果、中心気圧変化は台風直下の TCHP の変化傾向と高い相関にあった。しかしながら、1998 年から 2004 年までの全ての台風について、中心気圧と TCHP の有意な相関は認められなかった。以上の結果から、本研究では、中心気圧と TCHP の関係は台風のライフステージにより異なることを初めて明らかにした。

2 番目に、台風による急激な海水温低下に関わる物理過程を解明するために、水平解像度 0.25 度、鉛直層 54 層の気象研究所共用海洋大循環モデル(MRI.COM)と水平解像度 0.25 度、鉛直層 8 層の海洋層モデルを用いて、1998 年台風 Rex の海洋応答について、数値的な研究を行った。MRI.COM は Noh and Kim(1999)の海洋混合層スキームを、海洋層モデルは Deardorff(1983)のエントレインメント式を使用した。MRI.COM は Rex 通過後に啓風丸により観測された約 3°C の海面水温低下をよく再現した。主に低気圧性の風応力によるエクマン湧昇及びシアア不安定と砕波による乱流混合により海水温低下は生じていた。海水温低下の特性は、台風の移動速度、大きさ及び強度に依存していた。湧昇により運ばれた冷たい海水は、移動速度が遅くなる転向点付近でもっとも効果的に海洋混合層に取り込まれた。MRI.COM の数値実験結果に基づき、海洋層モデルのエントレインメント式に Noh and Kim(1999)で既に導入されていた砕波の効果を加えるよう修正した。修正したエントレインメント式を組み込んだ海洋層モデルは、台風 Rex による約 3°C の海面水温低下をよく再現した。また Rex の経路に沿った海域における、海洋層モデルで計算された海面水温を TRMM/TMI 3 日平均日別海面水温を用いて検証した結果、良好な結果を得た。Noh and Kim (1999)の海洋混合層モデルには改善の余地が残されており、また 1 事例の数値シミュレーション結果ではあるものの、ここでは砕波による乱流エネルギーフラックスの生成は、海洋混合層底のシアア不安定と並んで、台風による海水温低下に重要な役割を果たすこと

を示した。

3番目に、台風渦による海水温低下が、その渦の時間発展と強度にいかんして影響を与えているのかを解明するために、水平解像度 2km の高解像度非静力学大気モデル(NHM)と、NHMに海洋層モデルを結合した大気海洋結合モデルを用いて、理想的な数値実験を実施した。渦の発達率を3時間内の中心気圧の低下量で定義し、台風渦直下の海面水温と渦の発達率との間の線形回帰を調べた結果、海面水温が 26.3°Cより下がると、台風渦は発達を示さなくなった。この 26.3°Cという数字は、TCHP を算出する際の基準温度とほぼ等しい値である。本数値実験結果からはまた、ATCHP は ASST よりも台風渦の最低中心気圧との相関が高いことが示された。この結果は統計解析により得られた関係と整合する。

海水温低下による台風渦内部コア域の力学への影響を理解することは、いかんして海水温低下が台風渦の強度に影響を与えているかを知る上で重要である。積分初期の段階、つまり渦の発達率が小さい時の台風渦は、順圧不安定により別々のメソ渦へと分かれる。海面水温が高ければ高いほど、この台風渦の順圧不安定によるメソ渦への分離は早まる。メソ渦はメソ渦間の融合による個数の減少と単一な渦の形成、すなわち渦融合効果を通じて、渦の強化に重要な役割を果たす。またこの効果は、海面水温初期値や台風渦による海水温低下により影響を受ける。相対角運動量の渦輸送成分はこの海水温低下により、対流圏下層から中層で小さくなり、これにより渦融合効果は遅くなる。しかしながら成熟期の完成した円環状のリングに対しては、台風渦は直下の海水温を低下し続けるものの、その影響はほとんど見られなかった。従って ATCHP は渦融合時の SST や顕熱、潜熱の変化を含む潜在的要素とみなせる。

2005年の台風 Hai-Tang の発達期に対し、2つの数値シミュレーションを実施した。1つは水平解像度 6km で積雲対流パラメタリゼーションを用いた大気海洋結合モデルによる数値実験で、海洋環境場が台風の時間発展に与える効果を調べた。数値シミュレーション結果から、Hai-Tang は水平スケール数 100km の暖水渦上、高い TCHP をもつ海域を通過した時に強化する傾向にあった。海洋環境場の違いが中心気圧の変動に与える影響については、台風による海水温低下による中心気圧の変動と同程度とみなすことができる。もう1つの数値シミュレーションは水平解像度 3km で積雲対流パラメタリゼーションを使用しない大気波浪海洋結合モデルによる数値実験で、波浪が台風の時間発展に与える効果を調査した。Hai-Tang の強化は海面状態すなわち粗度長と関連し、また粗度長の変化により抵抗係数に対するエンタルピー係数の割合は変化した。この割合の 10m 風速に対する依存性は、抵抗係数を 10m 風速で評価するか、対数則で評価するかにより異なっていた。抵抗係数と地表摩擦は台風の強度と内部コア内の構造を決める上で重要な役割を果たしていた。

本研究は、TCHP と ATCHP が台風と海洋の相互作用を解明する上で重要であることを明らかにした。TCHP や ATCHP は1時間から1日スケールの海面水温の値には含まれない、SST や顕熱、潜熱の短時間変化を潜在的に含むことから、台風強度に対して、最適なパラメータとなりうる。また海水温低下は海洋混合層底のシア不安定に加えて波浪の碎

波の影響を受け、また台風の強化に影響を与えることも示した。砕波は抵抗係数及び乱流混合の両方に影響し、双方とも台風予測にとって重要である。砕波の見積もり及び乱流混合自体に不確かさは残っているとはいえ、本研究成果は天気予報から気候変動にわたる、高風速時における大気海洋相互作用の理解に貢献すると考えられる。またこうした不確かさを解決するためには今後、台風のライフステージを通じて随時実施される航空機による直接観測や継続的に実施できる衛星による連続観測、そして現業観測と革新的な観測の実施、より精巧な大気波浪海洋結合モデルが必要となってくるであろう。