

台風 0514 号の眼の形状に関する調和解析

藤 井 健
 小 林 慧
 沖 本 真由美

(平成 19 年 9 月 27 日提出)
 (平成 20 年 2 月 8 日修正)

要 旨

発達した台風の特徴の一つは、明瞭な眼をもっていることである。その形状は必ずしも円形ではなく、楕円形や多角形になることがある。本研究では、2005 年 9 月 5 日に奄美大島東方海上を通過した台風 0514 号について、多角形の眼の形状が眼の縁付近で発生した波動によるものと考え、気象庁現業用レーダーの画像上で中心から眼の縁までの距離を方位ごとに計測し、波数 3~6 の波動を対象として方位角方向に調和解析を行い、波数ごとに振幅と位相角を求めた。振幅の大きさから判断すると、同日 12:50~15:00 の時間帯において波数 5 の波動が卓越していることがわかった。そこで、この時間帯において波数 5 の位相角から波動の伝播速度を求めると、12:50~14:00 には 31 m/s、14:00~14:20 には 85 m/s、14:20~15:00 には 33 m/s で、14:00~14:20 に不連続性が見られた。さらに、奄美大島名瀬市の気象庁ウィンドプロファイラで観測された上空風の接線成分について、角運動量保存則により眼の縁付近の風速に換算すると、12:50~14:00 における波数 5 の伝播速度は高度 2168 m~3054 m の風速接線成分の約 40% であった。

キーワード：台風，台風眼，調和解析，フーリエ級数，レーダー画像，ウィンドプロファイラ

1. はじめに

発達した台風の特徴の一つは、明瞭な眼をもっていることであり、その存在は衛星雲画像やレーダー画像で確認できる。眼の中では、雲が切れ、青空や星空が見えることがある。また、眼の内部では風が弱く、無風状態であることは、風速の記録からも確認できる。この眼の形が円形ではなく、楕円形をしていることがあり、古くは、気象庁により第 2 宮古島台風と命名された 1966 年の台風 18 号（通し番号で 6618 号）のレーダー画像上で認められている (Mitsuta and Yoshizumi, 1973)。彼らの解析によると、楕円形の眼の長径は 55 km、短径は 40 km であり、眼は 58 分間に半回転の割合で、反時計回りに回転していた。また、この楕円形の眼の回転に対応して、地上気圧、風速、降水量の気象要素について、同じ周期の変動が観測されていた。その後、Lewis and Hawkins (1982) は、1965 年のハリケーン Betsy のレーダー画像を調べて、多角形の眼の存在を示した。また、Muramatsu (1986) は、台風 8019 号の眼について解析した結果、眼

の形は四角形から六角形で、反時計回りに回転していることを示した。

近年、板野・細谷(2006)は、台風0216号について、沖縄本島通過時前後の時間帯において、調和解析を行った結果、波数2に次いで、波数5の波動の振幅が大きいことを示した。彼らの解析によると、波数2が1時間に $50\sim 85^\circ$ 、波数5が1時間に 130° の位相速度で伝播していた。また、楠・益子(2006)は、台風0418号が沖縄付近を通過していたときの眼の形状について解析を行い、開けた海上では四角形～六角形の眼が卓越していたが、沖縄本島付近では楕円形に変わったことを示した。

本研究においては、台風0514号が奄美大島東方海上を通過している時の眼の形状が波数6以下の波動が重なり合ったものとして方位角方向に調和解析を行い、各波数の振幅と位相角の時間変化を求めた。この場合、波数1は台風中心の推定位置のずれから生じるものであり、波数2は眼がある方向に引き伸ばされたことから生ずるものも含まれている。そこで、本研究においては、波数3から6までの波動を解析の対象とした。また、波動の伝播速度を名瀬測候所に設置されているウィンドプロファイラによって観測された上空風と比較した。

2. 台風0514号について

気象庁によると、台風0514号は、図1に示すように、2005年8月29日にマリアナ諸島付近で発生し、発達しながら西へ進み、9月4日昼過ぎに南大東島の東海上を通過し、4日21時には奄美大島名瀬市の南東260kmに進んだ。この頃の中心気圧は935hPa、中心付近の最大風速

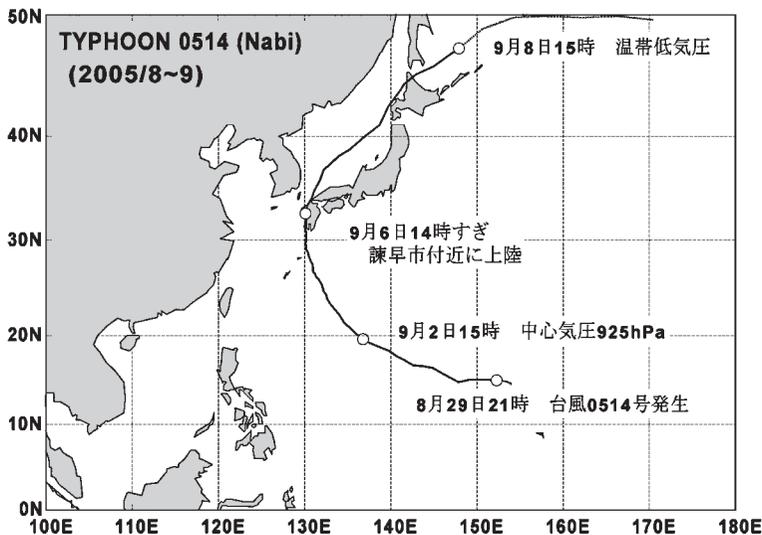


図1 台風0514号の経路，気象庁ベストトラックデータにより作成

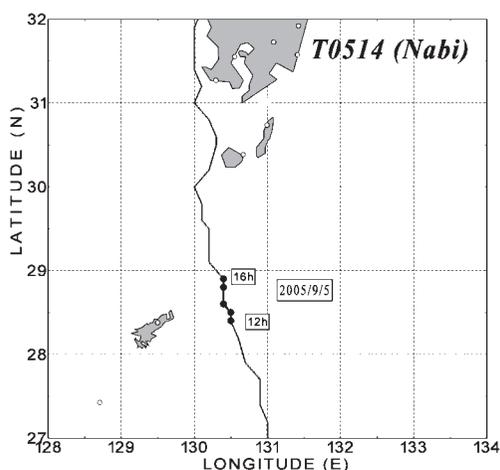


図2 台風 0514 号の奄美大島付近通過時の経路，実線は解析対象時間帯， \bullet は，この時間帯における 1 時間おきの中心位置（気象庁暫定値）

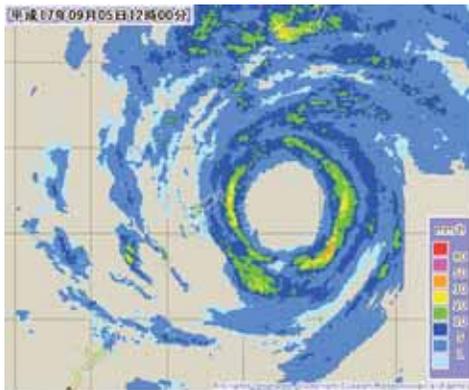
45 m/s であり，大型で非常に強い勢力であった．台風は強い勢力を維持しながら北上し，5 日午後 12 時に奄美大島東方海上を進み，気象庁が決定した中心位置（暫定値）によると 14 時に名瀬市東方 90 km の海上を通過している．この台風は，その後も北上を続け，6 日 14 時過ぎには長崎県諫早市付近へ上陸した．上陸時の中心気圧は 960 hPa，中心付近の最大風速は 35 m/s であり，大型で強い勢力であった．

この台風が奄美大島の東方海上を通過したところ，眼の直径は約 100 km と非常に大きく，また多角形で，反時計回りに回転していることがレーダー画像で確認できた．調和解析の対象としたのは，奄美大島東方海上を通過していた 9 月 5 日 12:00（以下すべて JST）から 16:20 であり，解析の対象とした範囲を図 2 に示す．また，気象庁のホームページでは，レーダー画像が 10 分間おきに公表されているが，これから抜粋して 1 時間おきに図 3 に示す．これらの図によると，眼の形は多角形であることが明らかである．ただし，12:00，13:00 および 16:00 の画像では，眼は南北方向に伸びており，波数 2 も卓越しているようである．

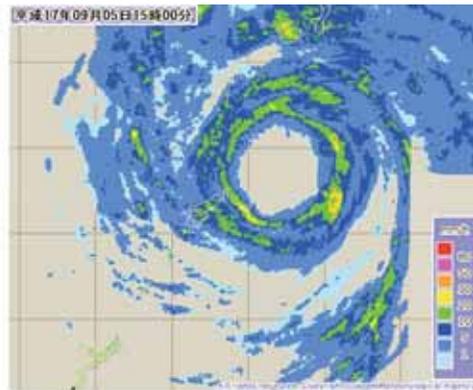
3. 解析方法

ある関数をフーリエ級数に展開することは調和解析と呼ばれている（たとえば，「数学ハンドブック」，1985）．本研究では，多角形の眼の形状が，いくつかの波数の波動が重なったものと考え，方位角方向に調和解析を行い，卓越する波数について調べた．また，これらの波数の位相速度を求めた．その方法は，次のとおりである．

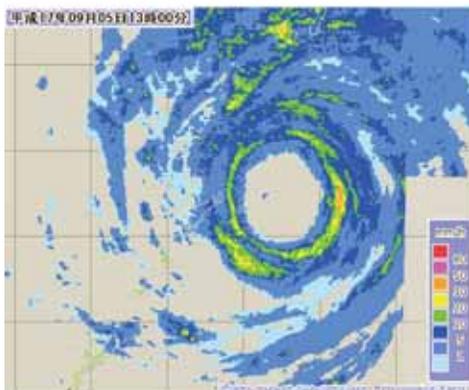
(1) レーダー画像上で目視により眼の中心位置を定める．



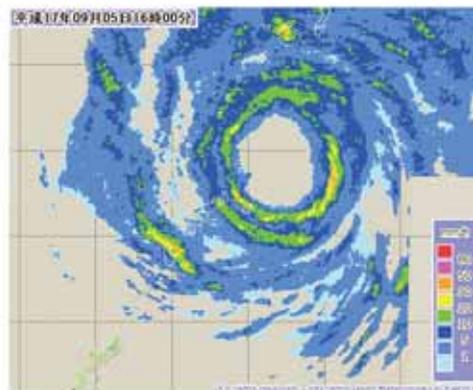
(a) 12:00



(d) 15:00



(b) 13:00



(e) 16:00



(c) 14:00

図3 解析対象時間帯の気象庁現業用レーダーの画像，2005年9月5日12時00分から16時00分まで，1時間ごとに抜粋．(a)12:00，(b)13:00，(c)14:00，(d)15:00，(e)16:00，レーダー画像は気象庁ホームページより引用

- (2) その中心を通る対角線を 22.5° 間隔で引き、眼の中心から縁までの長さを測定する。
 (3) 東の方向から反時計回りに測った方位角 θ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) を独立変数として眼の中心から眼の縁までの距離 $r(\theta_i)$ を次のように波数 6 までの Fourier 級数として表す。

$$r(\theta_i) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \theta_i + b_1 \sin \theta_i + a_2 \cos 2\theta_i + b_2 \sin 2\theta_i + \dots + a_6 \cos 6\theta_i + b_6 \sin 6\theta_i \quad (1)$$

この式で、係数 $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_6, b_6$ は Fourier 係数 (定数) である。 $\theta_i = 0 \sim 2\pi$ の範囲でデータが等間隔に存在している場合、Fourier 係数は最小二乗法により次の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i), & a_1 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i) \cos \theta_i, & b_1 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i) \sin \theta_i, \dots \\ a_6 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i) \cos 6\theta_i, & b_6 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i) \sin 6\theta_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

この式で、 n は方位の分割数であり、ここでは $n = 16$ となる。

波数 k の波動の振幅を A_k 、位相角を α_k (radian) とすると、

$$a_k \cos k\theta_i + b_k \sin k\theta_i = A_k \sin(\theta_i - \alpha_k) \quad (3)$$

と表される。したがって、振幅と位相角は

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (4)$$

および

$$\alpha_k = \frac{1}{k} \tan^{-1}\left(\frac{a_k}{-b_k}\right) \quad (5)$$

により求められる。なお、逆正接の値は、4 象限表現として逆正接の値を求める Excel の関数 ATAN2 を使ったので、 α_k の値は $-\pi/k \sim +\pi/k$ の範囲 ($-\pi/k$ は除く) で求められる。

- (4) もし波数 1 の振幅 A_1 が大きい場合、中心の位置が不適當である。そこで、 A_1 の値が 2.0 km よりも大きい場合、 $\alpha_1 + \pi/2$ の方向に A_1 の値だけ中心の位置を移して、 $r(\theta_i)$ の値を再度測定し、調和解析をやり直す。
 (5) この結果においても、 A_1 の値が 2.0 km よりも大きい場合、中心の位置を A_1 の値だけ移して、 $r(\theta_i)$ の値をもう一度測定して、調和解析を行う。これを A_1 の値が 2.0 km よりも小さくなるまで繰り返す。

4. 解析結果

調和解析の一例として、13:50 における中心から眼の縁までの距離の分布を図 4 に示す。この時刻では、波数 5 までの Fourier 級数で台風眼の形状がほぼ正確に近似できている。

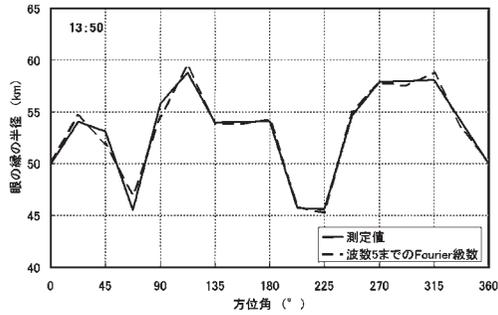


図4 調和解析の例，2005年9月5日13時50分

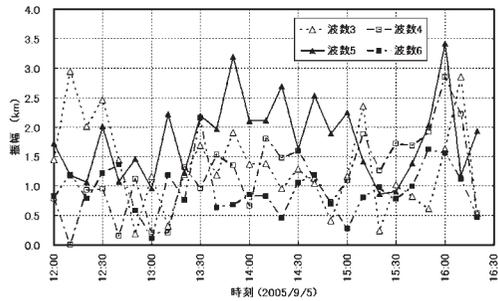


図5 各時刻における波数3～6の波動の振幅の時間変化

調和解析により求めた波数3～6の振幅の時間変化を図5に示す．12:00～12:40においては波数3が卓越，12:50～15:00は波数5が卓越しており，波数5の最大振幅は3.2km（13:50）である．また，15:10～16:20は特定の波数が卓越している傾向は見られない．この結果から，本研究においては，2時間10分間にわたって卓越した波数5の波動を対象とし，図6に示した位相角の時間変化から位相速度を求めることにした．

まず，波数5の位相角が線形に時間変化をすると仮定し，最小二乗法より係数を求めることにしたが，その方法は次のとおりである．

時刻 t において，波数5の位相角 $\alpha_5(t)$ を直線で近似した値を $\alpha'_5(t) = \beta_5 t + \gamma_5$ とおくと，係数 β_5 は位相角の時間変化率，すなわち位相速度を表す．図6によると，位相速度は，12:50～14:00，14:00～14:20，14:20～15:00の時間帯で異なっている．各時間帯において直線近似をすると，位相速度は，それぞれ， $121^\circ/\text{hr}$ ， $331^\circ/\text{hr}$ ， $119^\circ/\text{hr}$ である．眼の内縁の平均的半径が52kmであるので，位相速度を伝播速度に換算すると，それぞれ，31 m/s，85 m/s，33 m/s となる．この結果によると，14:00～14:20の波動の伝播速度は，前後の伝播速度に比べて2倍以上も大きく，これはレーダー画像においても確認できる．したがって，この20分間における波動の伝播の連続性については疑問である．そこで，次の節では，12:50～14:00の伝播速度をウィンドプロファイラ

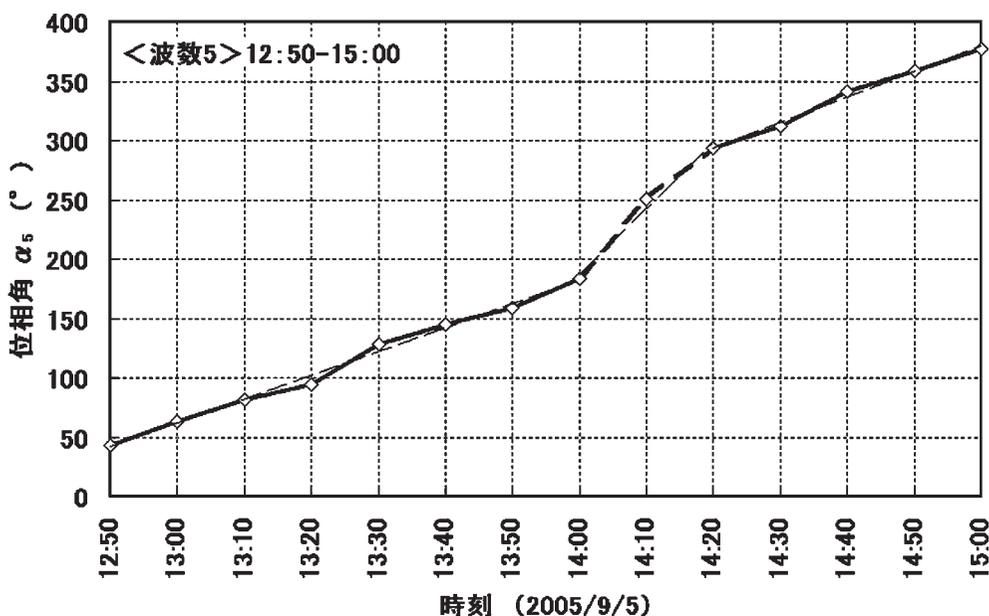


図 6 波数 5 の位相角の時間変化，破線は各時間帯における直線近似

によって観測された風速と比較することにした。

5. ウィンドプロファイラによって観測された風速との比較

以上のように調和解析により求めた各波数の波動の伝播には風の影響が考えられるので，波動の伝播方向である風速接線成分との間の関係について調べてみた。

本研究における台風 0514 号の解析時間帯においては，台風の中心から約 100 km 離れた奄美大島の名瀬測候所に設置されたウィンドプロファイラにより上空の風の観測が現業的に実施されていた。眼の形について解析の対象とした時間帯における風速の時間変化を図 7 に示す。各高度において，台風の中心を極とする極座標において，風速の接線成分の平均値（毎正時）を求めると，高度（アンテナ上）2168 m では 42 m/s，3054 m では 43 m/s である。この時間帯における名瀬と台風中心（眼の中心）の間の平均的距離は 99 km である。一方，中心から眼の縁までの距離の平均は，上述のように 52 km である。ここで，風速接線成分が角運動量保存則のもとに分布していると仮定して眼の縁付近まで外挿すると高度 2168 m では 79 m/s，3054 m では 82 m/s となる。この値を 12:50～14:00 における波数 5 の波動の伝播速度 31 m/s と比較すると，波数 5 の波動の伝播速度は，この高度あたりにおける風速の接線成分の約 40% になる。

なお，台風眼の回転については，楠・益子（2006）が沖縄本島を横断した台風 0418 号について

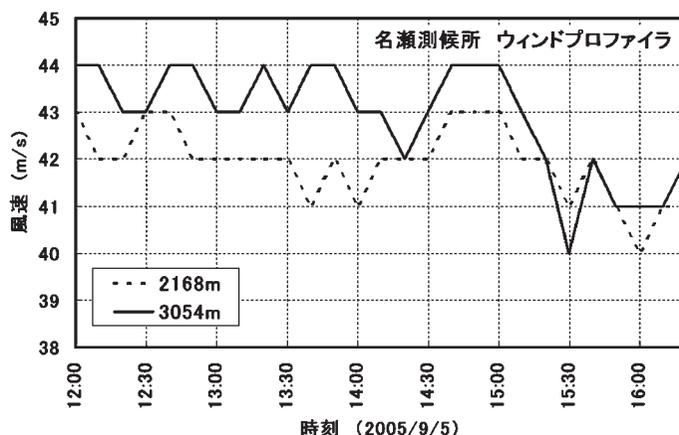


図7 名瀬測候所ウインドプロファイラにより観測された風速の時間変化，2005年9月5日12時00分～16時20分．データは、『気象庁月報CD-ROM平成17年9月』より引用

ドップラーレーダーで観測された風を用いて解析している．これは，眼半径の方位角方向における変化の時系列から眼の形や回転速度を求めた．その結果，眼の形状は約30 m/sで回転しており，これはドップラーレーダーで観測された風速（壁雲の速度）接線成分の約60～70%に相当していた．この値は，本研究における値よりも大きい．

6. まとめと今後の課題

台風0514号が奄美大島東方海上を通過していると時間帯における眼の形状について，調和解析を行って波数6以下のフーリエ級数で表わしてみた．その結果，12:50～15:00の時間帯では波数5の波動が卓越していた．また，位相角の時間変化から波数5の波動の伝播速度を求めると，連続性が維持されていると考えられる12:50～14:00では，31 m/sとなった．この値は，角運動量保存則に基づいて眼の内縁へ外挿を行ったウインドプロファイラにより観測された高度2168 mおよび3054 mの風速接線成分の約40%であった．

なお，14:00～14:20の時間帯においては，波数5の波動の伝播速度が85 m/sという大きな値が得られたが，これは同じ波動の伝播なのかどうかは疑問であり，今後の課題である．

今後の展開としては，多くの台風について，眼の形状の調和解析を行い，波動の伝播速度を求め，台風の強さや眼の大きさとの関係を調べることが考えられる．

最近，衛星画像から，台風眼の壁の内側に数個の小さな渦が存在していることが発見され，メソ渦と呼ばれている．台風やハリケーンのレーダー画像上や衛星画像上で確認できる多角形の眼の形状は，メソ渦の存在に関連したものとも考えられている (Kossin and Schubert, 2001; 2004)．このメソ渦は，眼の壁付近の風を強める作用があり，強風災害とも関連が深い．

なお、本研究は、京都産業大学理学部物理科学科の卒業研究である『気象物理学特別研究 1・2』において、2006 年度を受講生の沖本が解析した結果に、2007 年度を受講生の小林が追加して解析した結果をまとめたものである。また、本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号 19510051, 研究代表者勝矢淳雄京都産業大学教授）の助成を受けた。

最後に、レーダー画像やウィンドプロファイラ観測資料を提供していただいた気象庁に対して、また、貴重な意見をいただいた 2 名の査読者に対して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 板野稔久・細谷宗行, 2006: 台風 Sinlaku (T0216) の多角形眼のスペクトル解析, 日本気象学会 2006 年度春季大会講演予稿集, p. 323 .
- 気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- Kossin, J. P. and W. H. Schubert, 2001: Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in Hurricane-like vortices. *Journ. Atmos. Sci.*, Vol. 58, pp. 2196–2209.
- Kossin, J. P. and W. H. Schubert, 2004: Mesovortices in hurricane Isabel, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 85, pp. 151–153.
- 楠 研一・益子 渉, 2006: 台風 0418 号のインナーコアの構造と時間変化, 京都大学防災研究所研究集会 17K-01 報告書「台風災害の軽減に関する総合討論会 2004 年の台風による強風・豪雨による被害の実態解明」, pp. 84–89 .
- Lewis, B. M. and H. F. Hawkins, 1982: Polygonal eye walls and rainbands in hurricanes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 63, No. 11, pp. 1294–1300.
- Mitsuta, Y. and S. Yoshizumi, 1973: Periodic variations of pressure, wind and rainfall observed at Miyakojima during the Second Miyakojima Typhoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 51, No. 6, pp. 475–485.
- Muramatsu, T., 1986: The structure of polygonal eye of a typhoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 64, pp. 913–921.
- 矢野健太郎 (監修), 1985: 数学ハンドブック, 森北出版, 1224 pp .

A Harmonic Analysis on a Polygonal Eye of Typhoon 0514 (Nabi)

Takeshi FUJII

Kei KOBAYASHI

Mayumi OKIMOTO

Abstract

Intense typhoons have a distinct eye where clouds often clear up and the blue sky appears overhead. The shape of an eye wall on the weather radar imagery is usually circle, but it sometimes transforms to ellipse or polygon such as triangle or pentagon. In this study, it is assumed that the polygonal eye wall is formed by waves occurring along the eye wall inner edge, and the azimuthal variation of the distance from a typhoon center is represented by superimposing waves for wave numbers two to six in the tangential direction. Amplitude and phase angle of each wave number are estimated by the Harmonic Analysis Method. As a case study, the eyes of Typhoon 0514 (Nabi) are analyzed during its passage over the sea to the east of the Amami Oshima, in the afternoon of Sept. 5, 2005. In results, the wave number five dominated from 12:50 JST to 15:00 JST. The wave propagating speed of the wave number five is estimated as 31 m/s for 12:50 to 14:00, 85 m/s for 14:00 to 14:20, and 33 m/s for 14:20 to 15:00. The propagating speed for 12:50 to 14:00 is compared with the typhoon tangential wind estimated from the Naze wind profiler assuming the conservation of angular momentum between the observation radius and the eye edge. It is found that the propagating speed is about 40% of the typhoon tangential wind in the upper layer.

Keywords: typhoon, typhoon eye, harmonic analysis, Fourier series, radar imagery, wind profiler