

— 論 文 —

統計的手法を用いた黒潮流路変動解析*

吉田 次郎^{1**}・前田 恵理子^{1†}・中野 知香¹・出口 大貴²・根本 雅生¹

要 旨

日本南岸の黒潮流路は代表的な3流路(典型的な大蛇行流路:tLM, 非大蛇行接岸流路:nNLM, 非大蛇行離岸流路:oNLM)に区別されてきた。本研究では日本南岸の潮位データ, 並びに, 黒潮流軸データセットを用い, 1970年1月から2009年12月までの黒潮流路を統計的手法である, マハラノビス距離を用いた判別分析とK-mean法を用いた非階層型クラスター解析により分類した。黒潮流路の指標として南限緯度(東経136度-142度間)と北限緯度(東経136度-140度間)を算出し, 大蛇行西偏流路(LMW), 非大蛇行北偏流路(NLMN), 非大蛇行南偏流路(NLMS)に加えて, 南限緯度が北緯32度以南を示す大蛇行東偏流路(LME)の4つに分類できた。LMWはtLMに対応し, NLMNはnNLMに対応するものであるが, LMEは北緯32度以南まで達しているという面ではLMWと類似し, 八丈島の南を通過しているかという面ではNLMSと類似していた。しかしながら, 八丈島の潮位, 並びに串本以西でも低潮位の傾向を示したことから, LMEはoNLMに隠されていた4つ目の流路と判断された。本研究によって, LMEの流路が区別されたことにより, NLMNからLMWとなり, 大蛇行が形成され, LMWが北東に偏することによりLMEを形成し, さらに北上しNLMS, そしてNLMNとなり大蛇行が消滅するに至ることが示された。

キーワード: 大蛇行西偏流路(LMW), 非大蛇行北偏流路(NLMN), 非大蛇行南偏流路(NLMS), 大蛇行東偏流路(LME)

* 2013年3月1日受領; 2014年6月9日受理
著作権: 日本海洋学会, 2014

¹ 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科
〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

^{1†} (株)NYK Business Systems
〒104-0033 東京都中央区新川1-17-21
茅場町ファーストビル5F

² 神奈川県立海洋科学高校
〒240-0101 神奈川県横須賀市長坂1-2-1

** 連絡著者: 吉田 次郎
TEL/FAX: 03-5463-0459
e-mail: jiro@kaiyodai.ac.jp

1. はじめに

代表的な西岸境界流の一つである黒潮は, その流れの速さや広範囲にわたる流帯域などの特徴によって古くから日本の水産業や海運に多大な影響を及ぼしてきた。黒潮は台湾の東沖に接近した後, 大陸棚斜面に沿って東シナ海を北東に進み, 九州南方の屋久島と奄美大島間のトカラ海峡を通過して四国海盆上へと進入する。その後, 日本南方を北上し, 房総半島沖まで達した後, 本州を離

れて流れていく。房総半島沖から太平洋へと東に向かう部分は「黒潮統流域」と呼ばれている。しかし、黒潮は常に一定の場所を流れるのではなく、本州南岸に接岸しながら進む「直進流路」と紀伊半島潮岬沖合から大きく離岸し、南偏する「大蛇行流路」に大別されることがわかっている。この二つの流路間の遷移は黒潮独特の現象であり、他の西岸境界流では観測されていない。また、それぞれの流路は数年にわたって継続することも多く、どちらが主たる流路であるとは言えず、この特徴から、日本沿岸を直進する流路を非大蛇行流路、紀伊半島の潮岬沖で離岸する流路を大蛇行流路と呼んで区別することが多い。

黒潮の離接岸に伴い、日本南岸の潮位が大きく変動することは、1950年代末ころから多くの研究者によって指摘されてきた。特に津村(1963)は、日本南岸に設置された潮位観測点を串本以西と以東に分け、非大蛇行流路をとる場合には、西部と東部の潮位変動は著しく異なるものの、大蛇行流路をとる場合には、両者の変動の様子はほぼ一致することを示した。そして、このことから、串本と近接した浦神の潮位差をモニターすることにより、黒潮が接岸しているか離岸して蛇行するか判断するよい指標になることを指摘した。Fig. 1に過去40年の串本と浦神の潮位差の推移を示す。気象庁の判定した大蛇行流

路をとる時期は1970年以降、①1975年8月-1980年3月、②1981年11月-1984年5月、③1986年12月-1988年7月、④1989年12月-1990年12月、⑤2004年7月-2005年8月の期間であった。この期間の潮位差は小さく安定して推移していることが分かる。気象庁では従来、大蛇行が1年以上継続した場合を「黒潮大蛇行」と定義していたが、潮位記録(本州の紀伊半島南端に位置する串本と浦神の潮位差が小さい値に安定)と流路の形状(東経136-140度で北緯32度以南まで蛇行)を組み合わせ、継続期間に関わらずより客観的に黒潮大蛇行期を判定し直している(吉田他, 2006)。

この潮位差の要因は、黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への変移にある。大蛇行流路は九州沖で発生する黒潮小蛇行が、潮岬に向かって東進することで引き起こされ(例えば, Kawabe, 1980), 潮岬沖で小蛇行が増幅されることによって、内に含まれる冷水渦が強化されて大蛇行流路が形成されるといわれている。冷水渦が東海地方に及ぶと、沿岸の海面高度が上昇するため、東海から関東地方沿岸が高潮位となる。

黒潮の流路は伊豆諸島付近では複雑な挙動を示す。非大蛇行時に接岸傾向にある流路の場合は東海地方沿岸に沿い、八丈島と三宅島の水深が大きい場所を通過し、大蛇行流路の場合は遠州灘を南偏し、その後伊豆諸

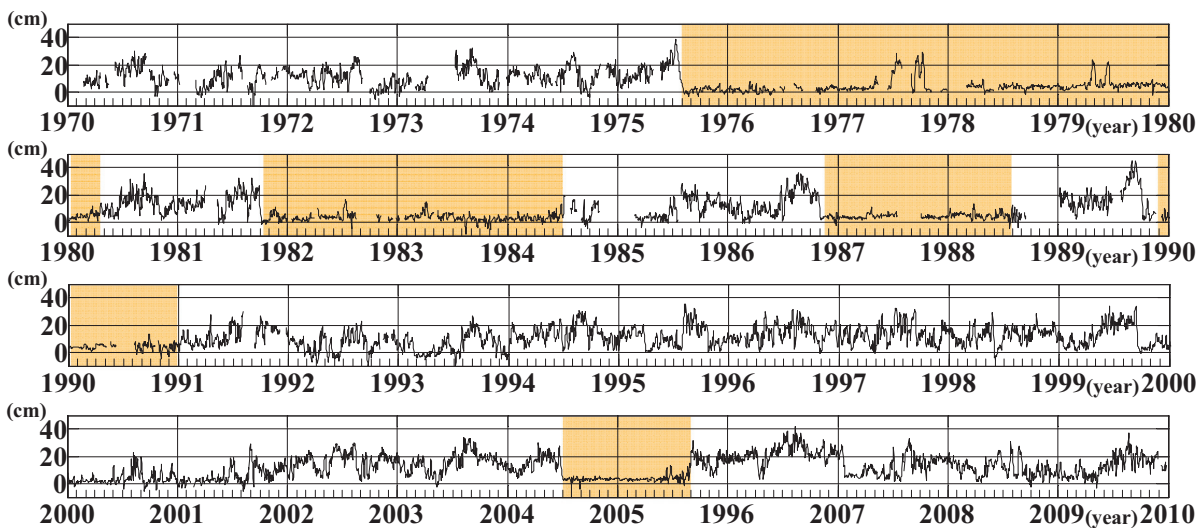


Fig. 1. Sea level difference between Kushimoto and Urakami from 1970 to 2010. Hatched areas show the large meander periods determined by the Japan Meteorological Agency (JMA).

島西に沿って北上し、やはり八丈島と三宅島の水深が大きい場所を通過する。非大蛇行時に離岸傾向にある流路の場合は八丈島の南を通過する。

このように、八丈島北方海域を通過するルートに対して、八丈島南方を迂回した水深の大きい場所を通過するルートをとる場合がしばしば見られる。黒潮流軸の流下方向に対して、向かって左側の海面高度は低く、右側の海面高度が高くなることから、この黒潮流路変動は伊豆諸島の島々の潮位に反映し、伊豆諸島の潮位変動を調べることにより、黒潮の流路変動を明らかにできる可能性がある。

Kawabe (1980, 1985, 1986, 1989, 2005) はこのことに注目し、串本、浦神、三宅島、八丈島の潮位から、頻度の高い状態に対応した黒潮の代表的流路とその性質を明らかにしている。即ち、串本と浦神の潮位差の変化が大きい場合は非大蛇行流路、変化の小さい場合は大蛇行流路として分類した後、伊豆諸島の三宅島と八丈島の潮位の高潮位か低潮位かによって3つの流路に分類した (Fig. 2)。nNLM, oNLM, tLM はそれぞれの流路を示し

ており、Kawabe (1985) は nNLM (nearshore Non-Large-Meander path) : 非大蛇行接岸流路 (三宅島、八丈島の潮位は高い), oNLM (offshore Non-Large-Meander path) : 非大蛇行離岸流路 (三宅島、八丈島の潮位は低い), tLM (typical Large-Meander path) : 典型的な大蛇行流路 (三宅島、八丈島の潮位は高い) と定義した。Fig. 3 にそれぞれの流路を模式的に示した。非大蛇行接岸流路は日本南岸全域で岸近くを流れ、典型的な大蛇行流路は、遠州灘南方で大きく蛇行した後、伊豆諸島に沿って北上し、八丈島北方を通過し、非大蛇行離岸流路は伊豆諸島海域周辺で離岸し、八丈島南方を通過する。このように黒潮から伊豆諸島を下流方向に望んだとき、比較的深くになっている二つの通り道のどちらかを選ぶことになり、伊豆海嶺の海底地形が黒潮流路変動に大きく影響を与えていることが分る。

近年の短期黒潮変動予測モデル (例えば Miyazawa *et al.* (2005)) などでは、特に黒潮の流路変動の複雑さは伊豆海嶺の地形に拘束されて起こることが重要視されており、上述の流路予測にある程度の成功を収めている。こ

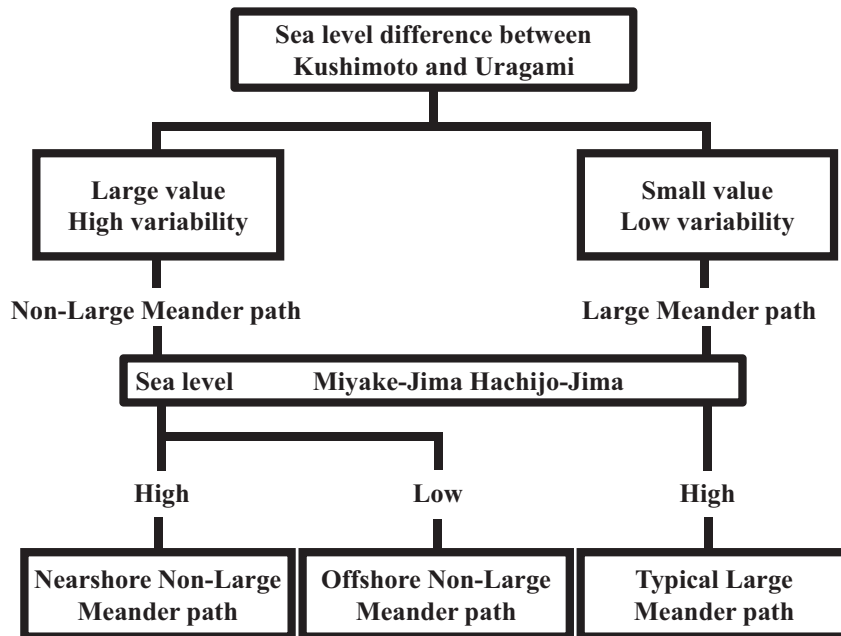


Fig. 2. Classification of three stable paths of the Kuroshio along the south coast of Japan by the sea level difference between Kushimoto and Uragami, and the sea levels at Miyake-Jima and Hachijo-Jima. After Kawabe (1985, 1986).

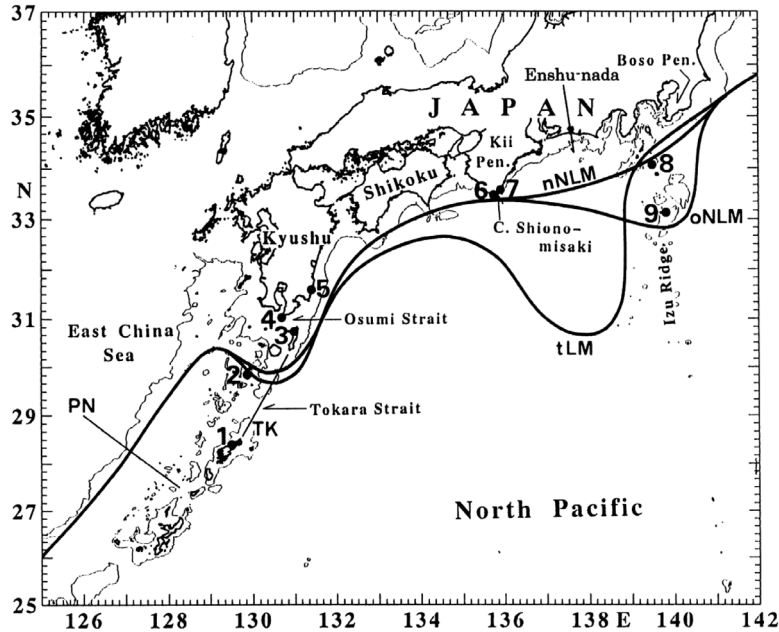


Fig. 3. Three stable paths of the Kuroshio along the south coast of Japan. tLM: typical Large Meander path, nNLM: nearshore Non-Large Meander path, oNLM: offshore Non-Large Meander path. After Kawabe (2005).

のようなことから、伊豆諸島の潮位変動が黒潮流路変動を知る上でも重要な実観測データであるといえる。また、人工衛星などによる海況変動の長期的モニタリングが可能となって、黒潮流路パターンを視覚的に判断できるようになってきた。近年になって、日本水路協会海洋情報研究センター（MIRC）は、表面水温分布（等値線の幅の狭い海域）、表面海流（2 knot 以上の海域）、200 m 水温分布（15～16°C を目安に等値線の混んでいる海域）、遠州灘に発生する冷水渦の南方、人工衛星の海面高度計データなどを用い、黒潮流軸データセットを整備した。さらに、Kawabe (1980) の潮位変動を用いた黒潮流路変動の分類から 30～40 年程経過した現在、継続した潮位データも蓄積されて、長期的な黒潮流路変動パターンの実態を時間・空間いづれも密なデータで把握できる状況にあるといえる。

そこで、本研究では、過去 40 年分（1970 年 1 月～2009 年 12 月）の黒潮流路を統計的手法によって客観的に分類し、本州や伊豆諸島の潮位データと比較して日本南岸の長期的黒潮流路変動の特徴を検討することとした。

2. データの詳細と処理について

本研究では、潮位データセットと黒潮流軸データセットを取り扱う。

2.1 潮位データ

研究に用いた潮位観測点は Kawabe (1980) と Kawabe (1985) を参考にして、油津、土佐清水、室戸岬、串本、浦神、尾鷲、鳥羽、舞阪、御前崎の 9 地点と、神津島、三宅島、八丈島の伊豆諸島 3 地点を選択した (Fig. 4)。Kawabe (1985, 1986) は黒潮流路の分類をするにあたって、串本と浦神の潮位差、並びに伊豆諸島の三宅島、八丈島の潮位変動に注目したが、本研究では伊豆諸島のうち神津島も加えて考察することとした。その理由は、海面付近の黒潮流軸が中層での流軸よりも流れの向きに対して左側に位置するため、水深 500 m よりも浅い三宅島付近やその北側に黒潮流軸をとることがあり、その傾向が三宅島よりもやや北側にある神津島の潮位変動に現れ

るのではないかと推測したからである。

毎時潮高データは日本海洋データセンター (JODC: Japan Oceanographic Data Center) からダウンロードして用いた。また、1970年以前は欠損値が多いので、比較的観測が継続し、観測基準面等が記載される潮位属性情報 (付録) が揃っていた1970年1月–2009年12月を主な使用期間とした。

黒潮による海況変動を把握するために、生の潮位データから潮汐成分の影響や大気圧による変動成分、さらに各地のトレンドや季節的な変動である年周成分を取り除く必要がある。以下にそれらの一連の処理方法を段階的に示した。

①欠損値のチェック

潮位観測点によっては、欠損値が連続している。そこで、連続したデータが500以上(20日分)のものだけを残した。

②TP補正

各潮位観測点の潮位属性情報に記載される観測基準面 (A Dove DL) と東京湾平均海面 (Tokyo Peil: T.P.) との差を潮位から差し引き、東京湾平均海面を潮位標高の基

準とした。

[潮位標高]

= [固定点の標高 (Height_of_the_fixed_point)]

– [観測基準面定数 (Datum_constant)]

+ [潮位 (海水面) Sea level]

③潮汐成分の影響の除去

生の毎時潮位データに対して、花輪、三寺 (1985) による24時間タイド・キラー・フィルターを施し、主要8分潮の潮汐による変動を除去した。

④日平均潮位

潮汐成分の影響を除去した潮位を日平均潮位に変換した。

⑤大気圧変動の除去

低気圧、高気圧などの気象擾乱による気圧変動成分を取り除くために、気圧1hPaの低下に対して1cm海面上昇すること (比例係数-1cm/hPa) を仮定して、上記で処理した各潮位観測点の日平均潮位データに対して、潮位観測点近傍の気象観測点日別平均気圧値を用いて気圧補正を行った。

⑥トレンド除去

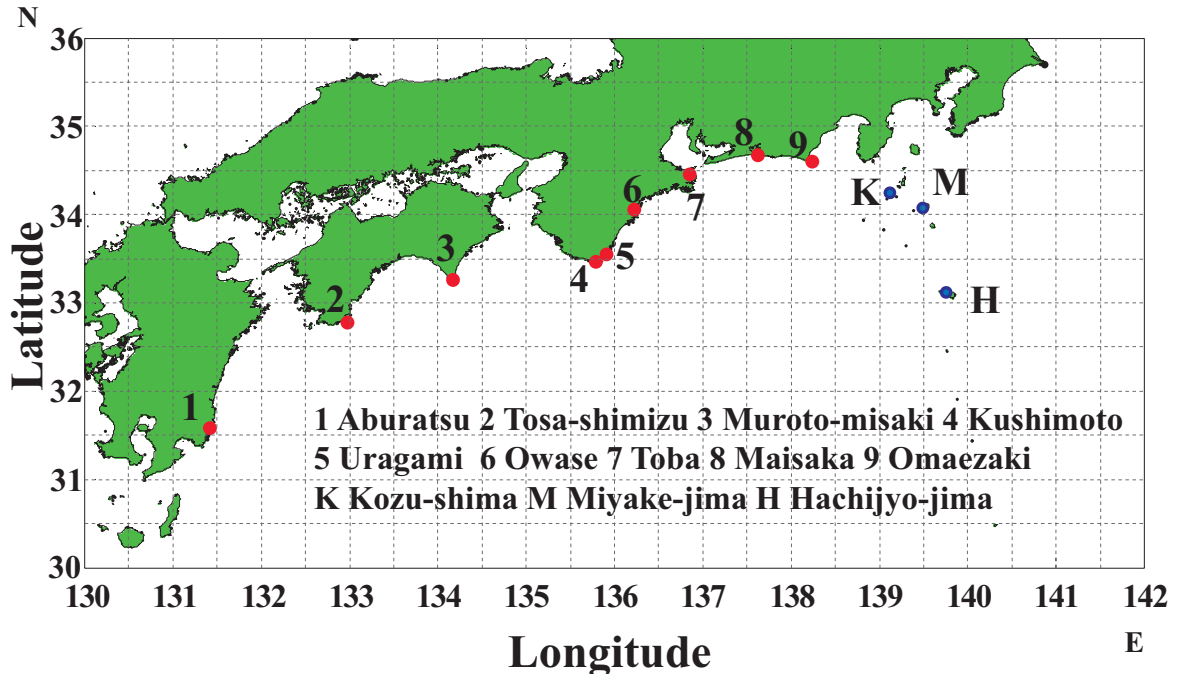


Fig. 4. Location of the tide stations along the southern coast of Japan.

ここまでで処理した日平均潮位には、各潮位観測点特有のトレンドがみられ、共通して目立った特徴としては、2000年以降から右上がりのトレンドがみられることであった。これらのトレンド成分には、プレートの沈み込みや地盤沈下に伴う地殻の上下変動の他、地球温暖化などによる潮位の長期変動による成分も含まれている。このトレンドを取り除くために、それぞれの日平均潮位に最小二乗法を用いてトレンド成分を差し引いた。なお、地震に伴う地殻上下変動による潮位変化や、機器調整などによると思われる明らかな潮位変化が伊豆諸島の神津島と三宅島に見られた (Fig. 5)。そこで、その2測点に関しては、その時期の前後で潮位レベルが同じレベルとなるように調整してからトレンドを除去した。

⑦年周成分の除去

潮位には海水温の季節変化に伴う熱膨張の効果と考えられる年周成分も含まれている。この成分を除去するために、津村(1963)と同様に単純に毎年の同じ月の平均値を月ごとに求めて年周成分とした。小林(2008)は、潮位記録から地殻上下変動を推定するために、適切な海況補正を行える潮位観測点の海域区分を検証しており、

これらの検証過程で計算される年周成分と本研究で処理した各潮位観測点の年周成分はほぼ一致し、適切であると判断した。

これらの一連の処理を施した残りの潮位偏差成分は、黒潮などによる海況変動を反映したものだと考えられる。本研究では、この潮位偏差成分を黒潮による潮位変動として取り扱い、これ以降、潮位と呼ぶこととする。

2.2 黒潮流軸データセット

黒潮流路推定のための基本データとして、日本水路協会海洋情報研究センター (MIRC) が発行する MIRC 黒潮流軸データセットから、1970年1月–2009年12月の期間のデータを用いた。黒潮流軸データセットは、海上保安庁海洋情報部が発行する海洋速報を元に、黒潮北縁から南縁にむかって13マイルの位置 (北縁と南縁の間の北側からほぼ約1/3の位置) を黒潮の最流速帯 = 黒潮流軸として、その緯度経度座標を黒潮流路であると認定できる間隔で数値化したデータで、1–2週間の間隔で収録されている。この各期間において経度は東経122–150度

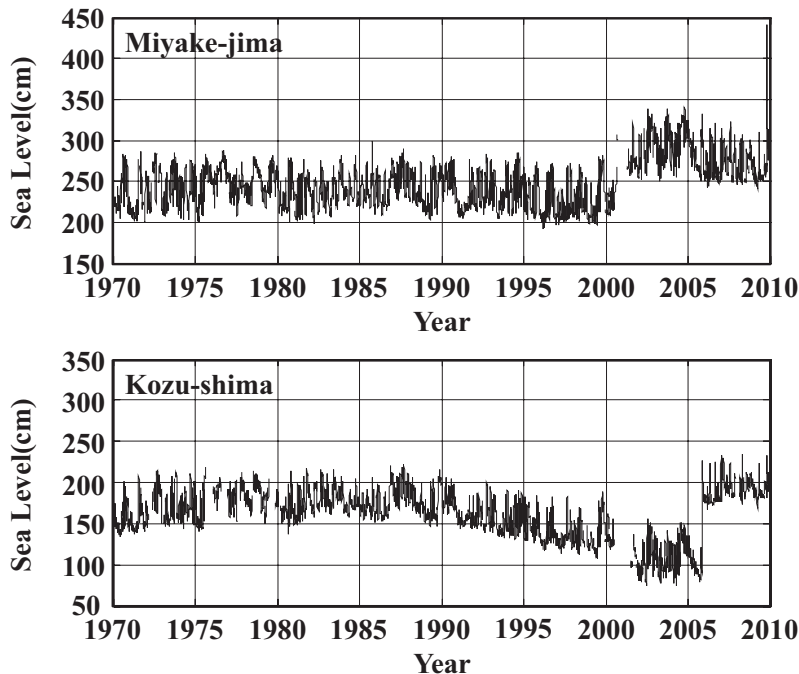


Fig. 5. Time variation of daily averaged sea level at Miyake-jima and Kozu-shima from Jan. 1970 to Dec. 2009.

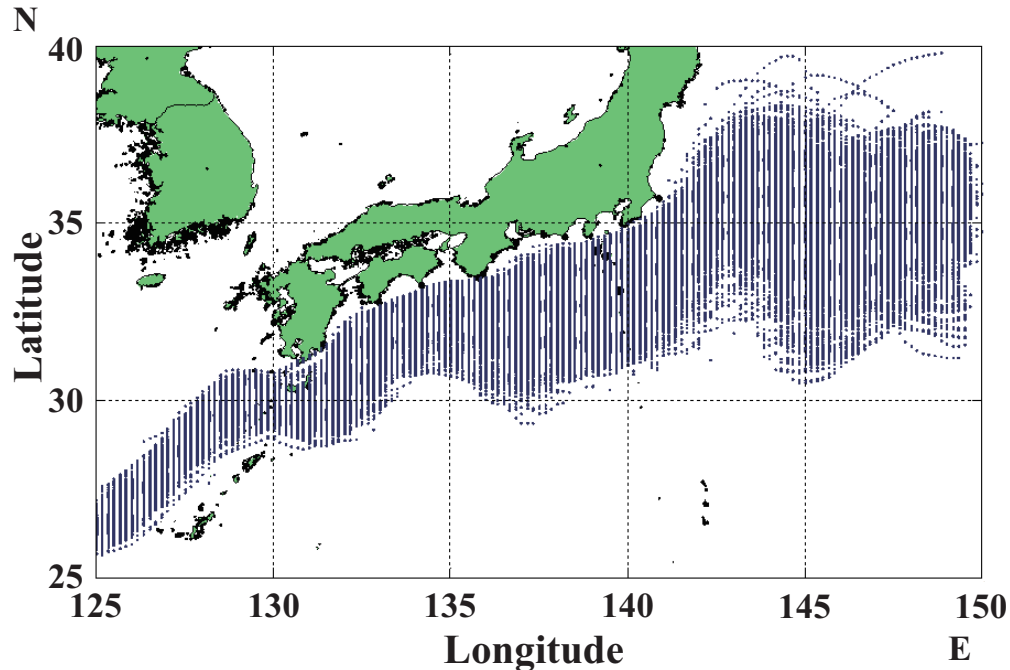


Fig. 6. The Kuroshio axes along the south coast of Japan from Jan. 1970 to Dec. 2009. Axes data are based on the Kuroshio Axes Data Set distributed by the Marine Information Research Center (MIRC). Each axis data is interpolated at 10' in longitude.

の範囲で緯度・経度ともに等間隔ではない数値となっている。そのため、本研究では、データを統一化するため、経度 122-150 度の範囲で経度 10 分毎に内挿して、各経度に対する黒潮流軸の緯度を求めた。また、一定した期間で比較するため、各年各月の前半と後半で振り分けて 1 流路の情報としている。全期間の内挿後の黒潮流軸データを Fig. 6 に示す。期間は 1970 年 1 月-2009 年 12 月である。

3. 潮位を用いた黒潮流路分類

3.1 串本と浦神の潮位差、伊豆諸島の潮位のヒストグラムの特徴

Fig. 7 に 1970 年から 2009 年までの 40 年間の串本と浦神の潮位差のヒストグラムを示した。潮位差がおよそ 5 cm 付近に鋭い 1 つの大きなピークがあり、15 cm 付近になだらかなピークが見て取れる。鋭いピークは串本と

浦神の潮位差の変動が小さい大蛇行期間に対応し、それ以外の期間は串本と浦神の潮位差の変動が大きくなる非大蛇行期間だと考えられる。大蛇行期間のピークが鋭くなっていることと、非大蛇行期間でなだらかな分布を示すことから、大蛇行期間では小さな潮位差が、安定している一方、非大蛇行期間では変動が大きいことを示している。

次に、神津島と三宅島、八丈島の潮位偏差のヒストグラムを Fig. 8 に示す。1970 年から 2009 年にわたって、八丈島の潮位は負偏差 42%、正偏差 58%、三宅島の潮位は負偏差 52%、正偏差 48% を示し、神津島の潮位は負偏差 57%、正偏差 43% を示した。三宅島と八丈島に関しては負偏差と正偏差の状態に 1 つずつピークがみられた。これらのことはすでに神津島の潮位を除いて、Kawabe (1985) で指摘されており、三宅島が黒潮流軸よりも内側 (本州沿岸側) に入る (負偏差) 割合が高く、八丈島は外側に位置する (正偏差) 割合が高いこと反映している。一方、神津島は負偏差の状態に 1 つのピークが

偏っていたことから、三宅島と八丈島に比べると黒潮流軸に対して内側に入る割合が高いと考えられる。図中の水色のヒストグラムは串本と浦神の潮位差が小さい大蛇行期を示す。神津島の分布形状は全期間を通しての分布

とほぼ同じである。一方、三宅島の分布はなだらかであり、明瞭なピークは見られない。一方、八丈島には正偏差側と負偏差側に2つの明瞭なピークがあった。この結果は、串本と浦神の潮位差が小さい大蛇行期の場合に、

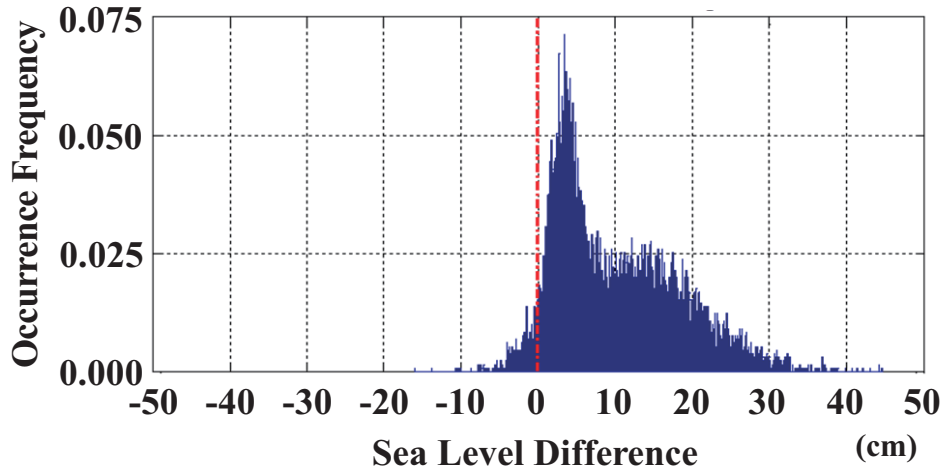


Fig. 7. Occurrence frequency of sea level difference between Kushimoto and Urugami from Jan. 1970 to Dec. 2009.

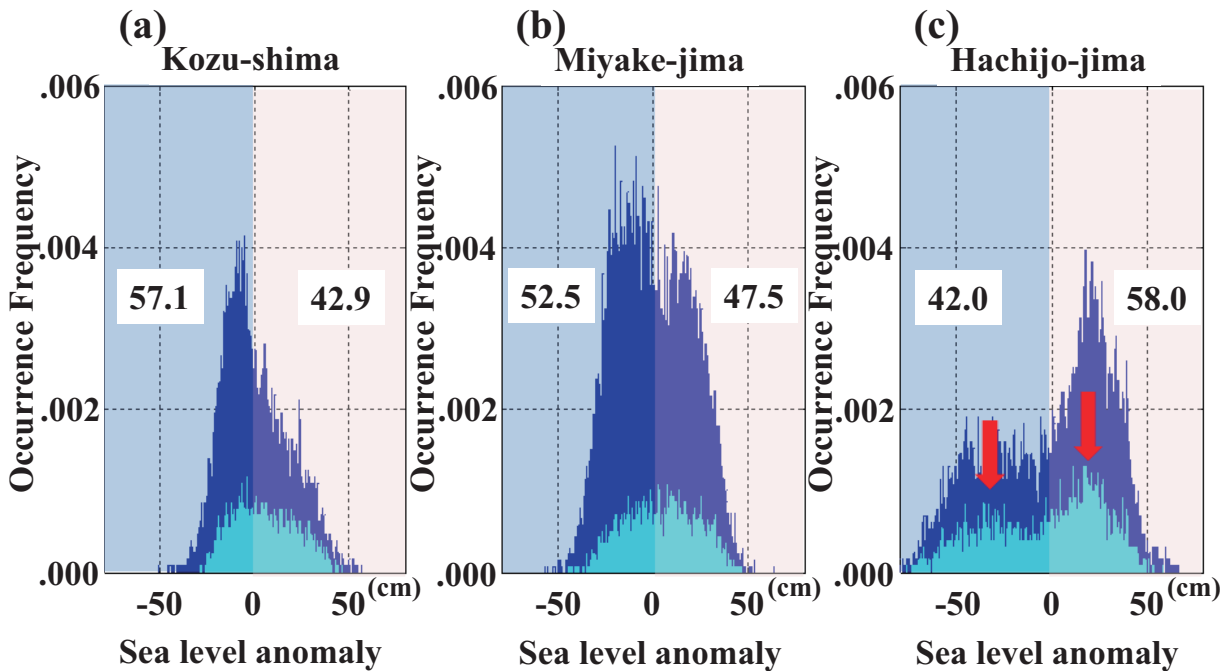


Fig. 8. Occurrence frequency of sea level at (a) Kozu-shima, (b) Miyake-jima and (c) Hachijo-jima from Jan. 1970 to Dec. 2009. Blue area: Total period, Light blue area: Large meander period.

必ずしも三宅島、八丈島の潮位が高くなるわけではないことを示しており、Kawabe (1985) による分類にはない四番目の黒潮流路が考えられる。なお、Kawabe (1995) は典型的な大蛇行時に八丈島で低潮位となる、「典型的では無い大蛇行流路」の存在を指摘している。また、吉田ら (2006) も同様に黒潮内側の冷水渦が伊豆諸島西側に限定される典型的な大蛇行流路と東西にまたがる「典型的では無い大蛇行流路」の存在を指摘している。そこで以下の章では前述の潮位データと黒潮流軸データセットを用いて、この点に着目してより詳細な統計解析を行った結果を述べる。

4. 黒潮流路の指標

Kawabe (1985) は黒潮流路を求めるために、200 m 深 15°C と 400 m 深 13°C の等温線を指標として膨大な海洋観測データを整理し、黒潮流路を分類した。このような作業には長大な時間を要し、またそれらに隠されたトレンドを見いだすのは、当時の計算機能力では容易な作業では無かった。本研究では黒潮流軸データセットが整備されたことにより、黒潮がどの緯度・経度を通っているか長期間にわたって数値化されたデータを用いることができるようになったことから、それぞれの流路の指標となるポイントをつかんで、統計的手法を用いることにより、客観的に分類することができるのではないかと考えた。

4.1 南限緯度と北限緯度

Kawabe (1985) は、非大蛇行接岸流路、非大蛇行離岸流路、典型的な大蛇行流路の3つの代表的流路は、東経 131 度と東経 142 度の間の最上流と最下流域でほぼ同じ場所を通過していることを指摘していた。また、非大蛇行接岸流路と非大蛇行離岸流路の位置は九州から紀伊半島の潮岬 (東経 136 度) 付近にかけてほぼ一致しており、安定して岸に近接していることも指摘していた (Fig. 3)。したがって、黒潮流域を除いて、黒潮流路は東経 136–142 度の付近で最も変動が大きいと考えられる。

そこで、本研究では各黒潮流路の特徴を表すものとして、東経 136–142 度の範囲での黒潮流軸最南下緯

度を黒潮流路の南限緯度とした。南限緯度が大きければ、黒潮が大蛇行していることになるであろう。一方で、非大蛇行接岸流路か非大蛇行離岸流路かという分類は伊豆諸島の地形によって、つまり三宅島と八丈島の間を通過するか否かに左右されていた。したがって、伊豆諸島の位置が東経 140 度とほぼ同等であることを考慮して、東経 136–140 度の範囲の黒潮流軸最北上緯度を黒潮流路の北限緯度とした。しかし、北限緯度は伊豆諸島付近での黒潮流軸通過位置を概ね示すものと考えられるが、常に伊豆諸島付近での黒潮流軸通過位置を示すものではない。非大蛇行離岸流路の場合には紀伊半島沖合での黒潮流軸通過位置を示し、南限緯度が伊豆諸島付近での黒潮流軸通過位置を示すことがある (Fig. 3)。このことから、今回用いた指標により黒潮流軸が一意に決定されるわけではなく、若干の流路の重複が現れることに注意すべきである。しかしながら、後述する流路形態分類図 (Fig. 12) で北限緯度が北緯 33 度 30 分を境として新たに流路が分類されることから、解析結果に大きな影響を及ぼさないものであると判断した。

4.2 南限緯度と北限緯度の推移

黒潮流軸の南限緯度と北限緯度の時系列を Fig. 9 に示す。青い線が北限緯度を示し、赤い線が南限緯度を示す。太線はデータのあった時期で、細線はデータが欠損していた時期で、前後のデータから内挿して図示した。

1975 年 8 月–1980 年 3 月は南限緯度が最大で北緯 30 度以南に達している一方、北限緯度は北緯 34–34 度 30 分付近に安定しており、三宅島南方海域を通過していたと考えられる。黒潮流路は一度大蛇行に転じた後、その流路を 1–2 年ほど継続することが知られているが、この時期は 4 年ほど継続した大規模な大蛇行流路をとったことが伺えた。1977 年 1 月から 6 月あたりには南限緯度が急に北上し、その後再び南下していた。この時期は、冷水渦の切離が起こって、紀伊半島沖合から沖合方向に切離し、その後に再び合体した特例の時期として知られ、「春風」と命名されている。

1981 年 11 月–1984 年 5 月は、南限緯度が北緯 32 度以南を安定して推移しているが、北限緯度は南北変動が大きい。この時期は気象庁により黒潮大蛇行期と認定さ

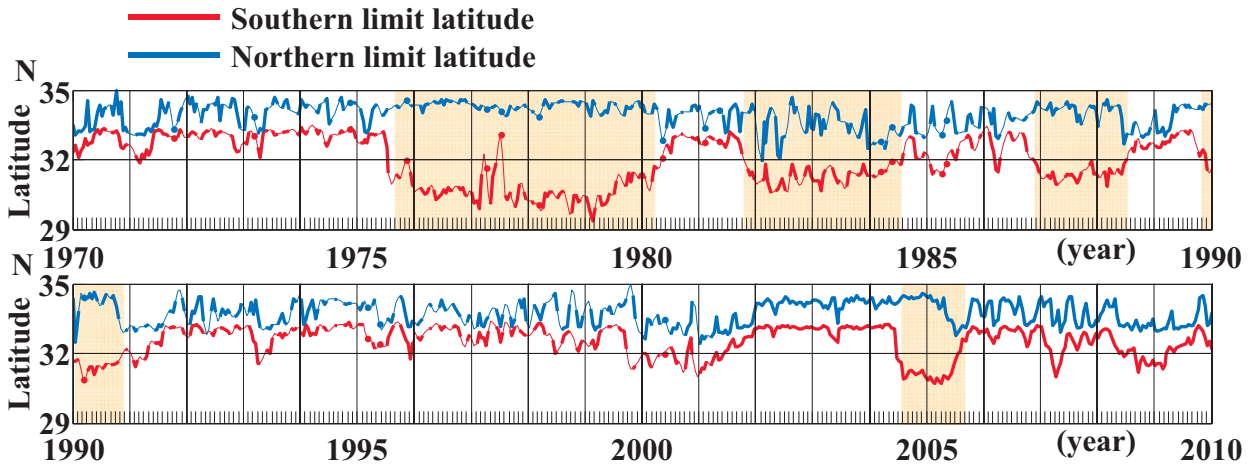


Fig. 9. Time variation of southern and northern limit latitudes of the Kuroshio axis from Jan. 1970 to Dec. 2009. Hatched areas show the large meander periods determined by the Japan Meteorological Agency (JMA).

れているが、伊豆諸島付近での流路変動が激しい不安定な大蛇行期であったと考えられる。

1986年12月–1988年7月は北限緯度が北緯34度–34度30分付近を、南限緯度は北緯32度以南を安定して推移している。また、1989年12月–1990年12月、2004年7月–2005年8月も同様であり、比較的安定した大蛇行期であったことを伺わせる。

また、気象庁の判定している大蛇行期以外にも、1999年11月–2001年9月、2008年3月–2009年3月の付近は継続して南限緯度が北緯32度以南に達し、北限緯度も共に南下している傾向がみられた。南限緯度が32度以南に達していない、非大蛇行期とみられる期間において、北限緯度は北緯33度から北緯34度30分の間で大きく変動している。これらのことは、大蛇行流路は安定流路である一方、非大蛇行流路は伊豆諸島付近での流路変動の激しい流路であることを示している。

各大蛇行の生成期に注目すると、共通した傾向として、北限緯度に変化はない一方、南限緯度が北緯33度付近(潮岬沖合)から1か月から4か月ほどをかけて北緯32度まで南下し、大蛇行を形成していることが挙げられる。このことは、黒潮大蛇行流路は九州沖で発生する黒潮小蛇行が、潮岬に向かって東進することで引き起こされる(例えば、Kawabe, 1980)ことと軌を一にするものと考えられる。

一方、各大蛇行期の消滅期を見ると、1975年8月–1980年3月、1986年12月–1988年7月、そして1989年12月–1990年12月の大蛇行期では、南限緯度が北上を開始して北緯32度を越す1, 2か月前から北限緯度が急激な南下を開始し、北緯33度の八丈島付近に至っている。1975年8月–1980年3月と2004年7月–2005年8月の大蛇行期では33度付近まで南下後、すぐに北限緯度は北上している。一方、1986年12月–1988年7月と1989年12月–1990年12月の大蛇行期では、北限緯度はゆっくりと9か月から1年かけて北上して、三宅島近辺海域に至っている。2004年7月–2005年8月の大蛇行期では、この逆に北限緯度が南下を開始後、6か月ほど経過してから南限緯度が北上を開始している。1981年11月–1984年5月の大蛇行期ではこのような特徴はみられず、南限緯度が北緯32度を通過し、最南端の30度付近に到達後、4年ほどかけてゆっくりと北上している。この間北限緯度は上述したように、伊豆諸島付近で大きく変動している。このことから、この時期の大蛇行は他の時期の大蛇行とは特徴の異なったものであったと考えられる。大蛇行生成、消滅期において、南限緯度が北上を開始し、最終的に北緯32度に至るまでの期間をTable 1にまとめた。

Table 1. Time to take the southern limit latitude of the Kuroshio axis to approach 32°N for formation and disappearance periods of Large meander.

	FormationPeriods	DisappearancePeriods
1975 Aug. – 1980 Mar.	1 month	15 months
1981 Nov. – 1984 May	3 months	48 months
1986 Dec. – 1988 Jul.	2 months	4 months
1989 Dec. – 1990 Dec.	4 months	8 months
2004 Jul. – 2005 Aug.	2 months	4 months

5. 統計的手法を用いた黒潮流路の分類と潮位変動

黒潮流路の南限緯度と北限緯度の推移をみることによって、同じように大蛇行期と分類される場合でも、流軸変動に相違があることがわかった。本節ではこの情報を用いて、黒潮流路に関する先験的な知識も利用し、統

計的手法を用いて客観的に黒潮流路を分類し、似通った流路を集めることを試みた。統計的手法としては「マハラノビス距離」を用いた判別分析とクラスターの数を予め設定して分類できる K-mean 法による非階層型クラスター解析を用いた。この場合は黒潮流路が東経 136 度-142 度の範囲でとった南限緯度と東経 136-140 度の範囲でとった北限緯度の組み合わせが集団を形成するものを抽出することになる。

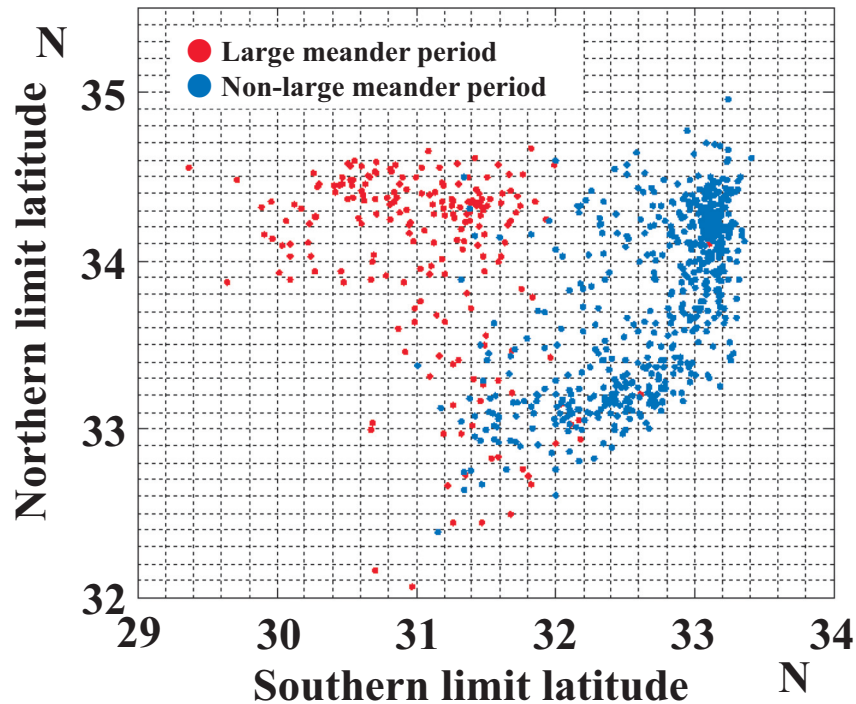


Fig. 10. Scatter plot of southern and northern limit latitudes of the Kuroshio axis from Jan. 1970 to Dec. 2009. ●: Large meander period, ●: Non-large meander period determined by the Japan Meteorological Agency (JMA).

Table 2. Mean, variance and co-variance of southern limit latitude and northern limit latitude for large meander period and non-large meander period.

Large meander period		
Variable	Southern limit latitude	Northern limit latitude
Mean	31.07	34.03
variance and co-variance matrix	$\begin{pmatrix} 3.387 & 0.991 \\ 0.991 & 3.335 \end{pmatrix}$	
Non-large meander period		
mean	Southern limit latitude	Northern limit latitude
mean	32.7	33.77
variance and co-variance matrix	$\begin{pmatrix} 0.26 & 0.159 \\ 0.159 & 0.258 \end{pmatrix}$	

5.1 南限緯度と北限緯度を用いた判別分析と非階層型クラスタ解析

南限緯度と北限緯度の散布図を Fig. 10 に示す。南限緯度の上限は北緯 33 度 24 分で、下限は北緯 29 度 20 分であった。北限緯度の上限は北緯 34 度 57 分で、下限は北緯 31 度 54 分であった。気象庁の分類による大蛇行期と非大蛇行期に対応して、二つの領域に分かれている様子が分かる。一つは南限緯度が北緯 33 度を中心とした領域であり、もう一つは北限緯度 34 度 30 分を中心とした領域である。

この特徴を客観的に分類するために判別分析を導入する。判別分析は、ある 2 グループの性質としてそれぞれ 2 変数が示されている場合に、その 2 つのグループを、それぞれのグループの平均 (重心) からの距離によって客観的な境界線 (判別関数) で判別できるものである。境界としては、一般に線形判別関数あるいはマハラノビス距離による 2 次の判別関数を用いるが、本研究ではグループ内の分散を考慮する 2 次の判別関数を用いた。黒潮流軸の北限緯度と南限緯度をそれぞれ変数 x, y 、それぞれの平均値を \bar{x}, \bar{y} 、分散、共分散を $\sigma_x^2, \sigma_y^2, S_{xy}$ とする。この時マハラノビス距離 D は以下のように定義される。

$$D^2 = (x - \bar{x} \quad y - \bar{y}) \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & S_{xy} \\ S_{xy} & \sigma_y^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x - \bar{x} \\ y - \bar{y} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $(x - \bar{x} \quad y - \bar{y})$ は平均値からの偏差を成分とするベクトルであり、 $\begin{pmatrix} x - \bar{x} \\ y - \bar{y} \end{pmatrix}$ はその転置ベクトル、

$\begin{pmatrix} \sigma_x^2 & S_{xy} \\ S_{xy} & \sigma_y^2 \end{pmatrix}^{-1}$ は分散共分散行列の逆行列である。

Table 2 に大蛇行流路期と非大蛇行期の南限緯度と北限緯度の平均と分散・共分散行列を示す。

大蛇行流路のグループを a 、非大蛇行流路のグループを b とし、Table 2 の値を用いて、(1) 式に代入すると、 a グループの平均 (重心) からグループ内の点 (x, y) までのマハラノビス距離 D_a^2 、 b グループの平均 (重心) からグループ内の点 (x, y) までのマハラノビス距離 D_b^2 は

$$D_a^2 : f(x, y) = 3.39x^2 + 3.34y^2 + 1.98xy - 2.78 \times 10^{-2}x - 2.89 \times 10^{-2}y + 9.23 \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$D_b^2 : g(x, y) = 6.16x^2 + 6.21y^2 - 7.59xy - 1.47 \times 10^{-2}x - 1.71 \times 10^{-2}y + 5.30 \times 10^{-3} \quad (3)$$

で与えられる。一般に、ある時期の南限緯度と北限緯度のデータ (x_i, y_i) があるとき、それを上式に代入して

$$D_a^2 : f(x_i, y_i) > D_b^2 : g(x_i, y_i) \rightarrow \text{非大蛇行流路}$$

$$D_a^2 : f(x_i, y_i) < D_b^2 : g(x_i, y_i) \rightarrow \text{大蛇行流路}$$

と判別できる。この 2 グループを区別する判別関数はマハラノビス距離の差が 0、即ち

$$D_a^2 : f(x, y) = D_b^2 : g(x, y)$$

の場合であり、(2)=(3)として

$$D_a^2 = D_b^2 \Rightarrow h(x, y) = 2.77x^2 + 2.87y^2 - 9.57xy + 1.31 \times 10^{-2}x + 1.18 \times 10^{-2}y - 3.93 \times 10^{-3} = 0 \quad (4)$$

と定義できる。Fig. 11の黒く太い曲線は判別関数(4)である。判別関数によってもたらされたこの境界は、数学的に平面上で両グループの特徴を最もよく判別できる境界を意味している。細い灰色の等値線はそれぞれのグループの平均値(重心)からのマハラノビス距離を示す。判別されたグループの中で、大蛇行期の*a*グループであっても、北限緯度34度より北に偏在するグループと、それより北限緯度が南下しているグループに分かれる。この境は北緯33度30分付近であり、また、非大蛇行期(*b*グループ)に区分されるはずのデータが、大蛇行期の*a*グループに含まれている様子が見られる。一方、*b*グループはこれも北緯33度30分付近を境にして、二つに分かれる。

これらのことより、判別関数で南限緯度に関して、お

よそ北緯32度よりも北に属するか、南に属するかという分類と合わせて、北限緯度が北緯33度30分付近よりも北に属するか、南に属するかという4グループに分かれると考えられる。北緯32度というのは大蛇行している基準としてよく用いられる緯度で、黒潮は過去の大蛇行期と判定された全期間で北緯32度以南を通過していたこと、また、北緯33度30分付近はちょうど八丈島の緯度にほぼ一致しており、八丈島の北を通過するか南を迂回するかという基準があることから、大蛇行流路に判別されたグループと非大蛇行流路に判別されたグループをそれぞれさらに2分割することにした。その方法として、非階層型クラスター解析の代表的な手法であるK-mean法を用いた。K-mean法はあらかじめクラスター数を固定して分類することができ、グループの重心の計算を繰り返すことで分類を行える手法である。このK-mean法を用いて、合計で4つのクラスター(A, B, C, D)に分類した(Fig. 12)。北緯32度よりも北に属するか、南に属するかという見方では、大蛇行流路か非大蛇行流路

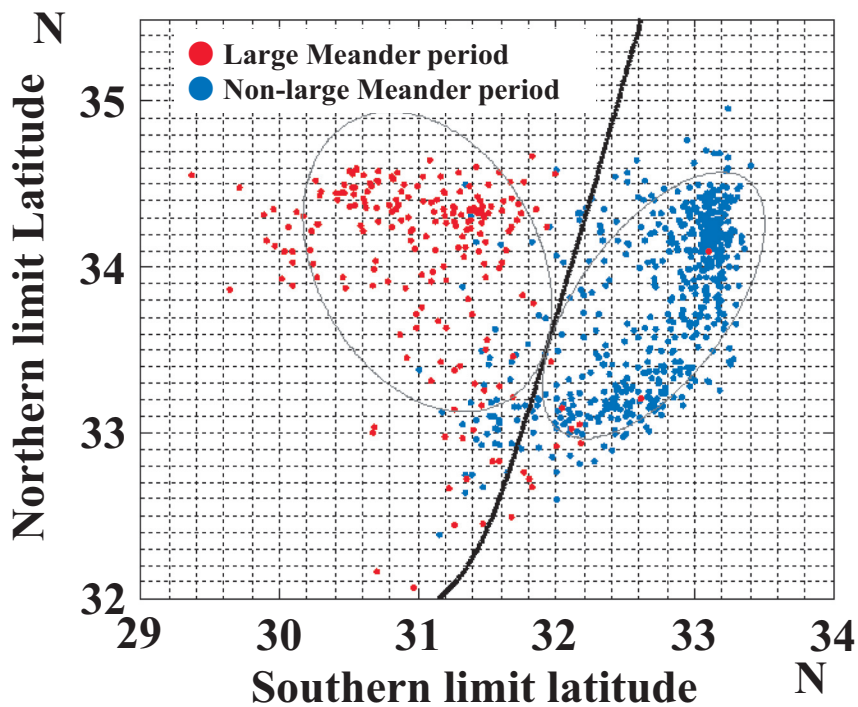


Fig. 11. Same as in Fig. 10, but with discriminant function between large meander and non-large meander (thick line) and the square of Mahalanobis distance function (thin line).

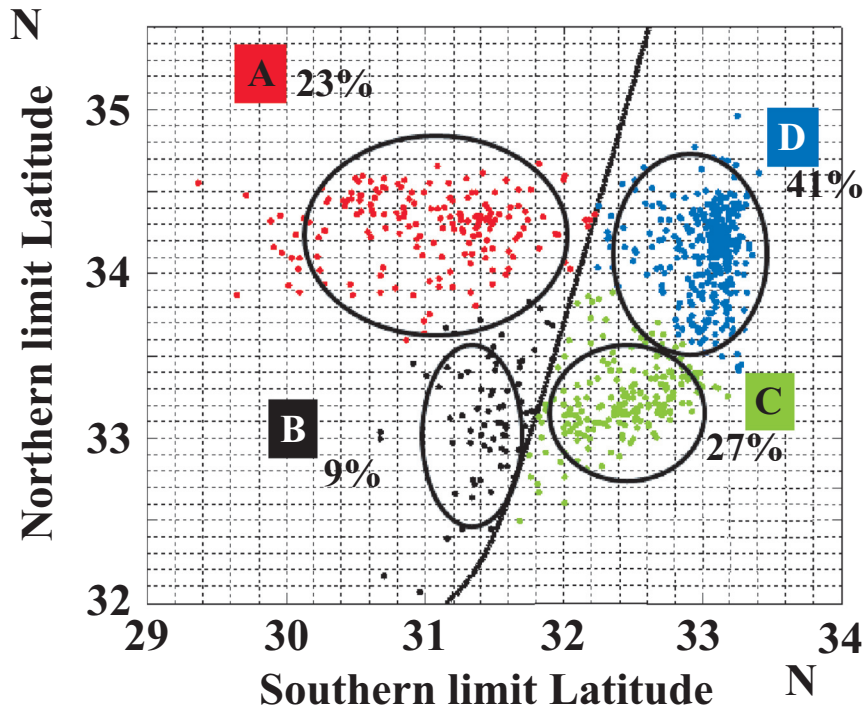


Fig. 12. Same as in Fig. 11, but four categories are classified by the K-mean cluster method and are shown by ● (A)、● (B)、● (C) and ● (D).

かという特徴をよくとらえて判別でき、北限緯度が北緯33度30分付近よりも北に属するか、南に属するかという特徴は活かされたまま分割でき、視覚的に判断した分類とも対応のある結果となった。各クラスターの割合はA (23%)、B (9%)、C (27%)、D (41%)であった。

5.2 4パターンの黒潮流路の特徴

判別分析と非階層型クラスター解析によって、4パターンの類似した黒潮流路が考えられた。大蛇行流路であると判別されていたAとB、非大蛇行流路と判別されていたCとDのクラスターに所属する流路をそれぞれ平均して、各クラスターの経度10分毎の標準偏差を示すエラーバーと共に日本南岸の黒潮平均流路として示した (Fig. 13)。Aの平均流路は潮岬沖で北緯32度付近まで離岸する一方、Bでは北緯33度付近に平均流路があった。流軸最南下部の経度は、Aでは東経137度20分付近、Bでは東経139度20分付近と西か東かに分かれていた。

これらのことよりAをLMW (Large Meander West path: 大蛇行西偏流路)、BをLME (Large Meander East path: 大蛇行東偏流路)と定義した。非大蛇行流路であると判別されたCとDの流路は両者とも潮岬沖合で接岸傾向にあり、伊豆諸島海域では、北緯33度30分より北か南か、即ち、平均流路が八丈島を迂回するか、八丈島と三宅島の間を通過するかに分かれていたため、DをNLMN (Non Large Meander North path: 非大蛇行北偏流路)、CをNLMS (Non Large Meander South path: 非大蛇行南偏流路)と定義する。各流路の南西諸島から九州東方海域にかけての平均流路はほぼ同一であり、東経132度線上においては、NLMSがやや南の流路をとるものの、ほぼ北緯31度付近を通過していた。ここより東の流路は大きく様相を異にしていた。平均流路の振る舞いを上流側からまとめると以下ようになる。

- ① 土佐清水沖合 (ほぼ東経133度)で、LMW、NLMS、NLMNは北緯32度付近を通過しているが、LMEはやや北上し、北緯32度30分付近を通過している。流路

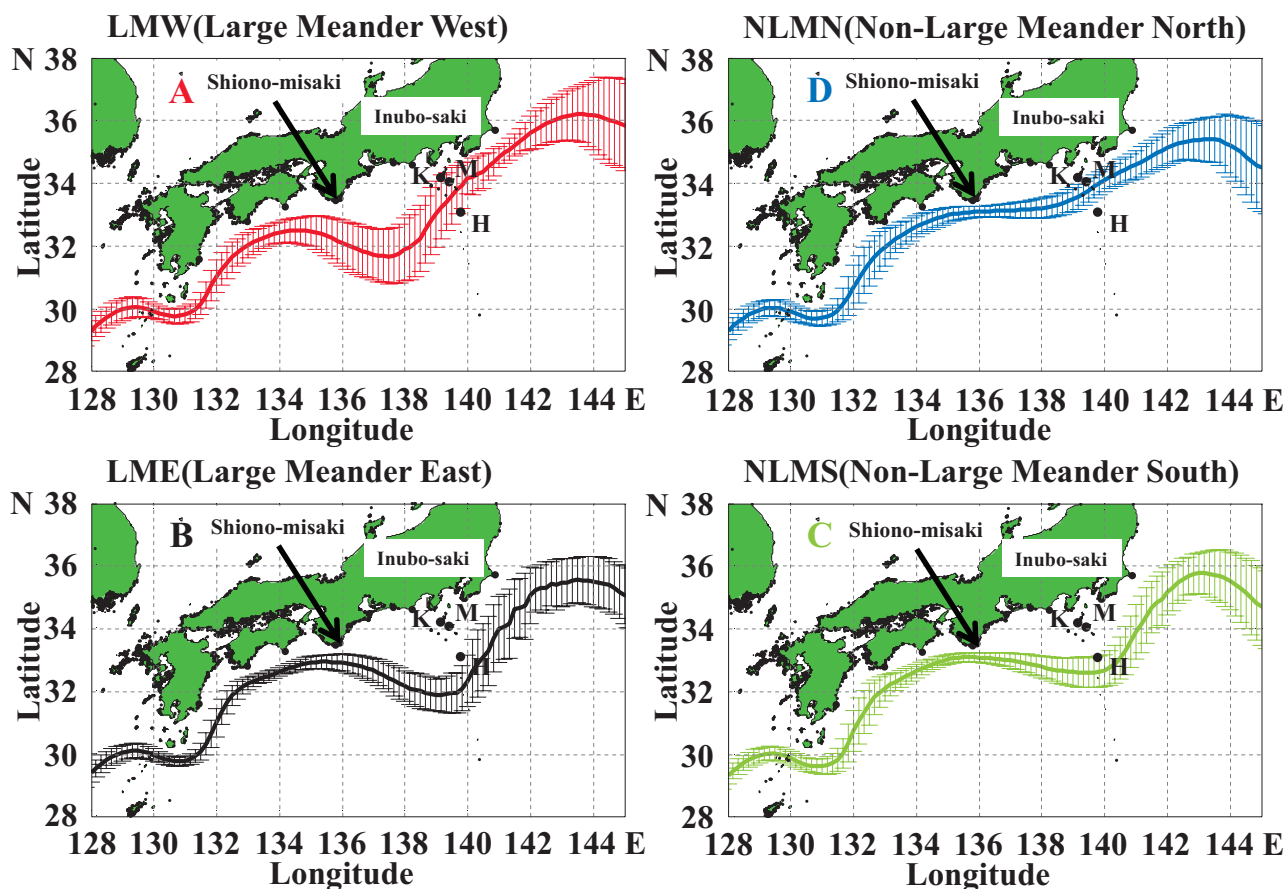


Fig. 13. Four different paths of the Kuroshio classified by the combination of the discriminant analysis and the K-mean cluster method. A: Large Meander West (LMW), B: Large Meander East (LME), C: Non-Large Meander South (NLMS) and D: Non-Large Meander North (NLMN).

Error bars are standard deviation of each cluster at every 10 minutes in the longitude. Alphabets on the map show the tide gauge stations shown at (K) Kozu-shima, (M) Miyake-jima and (H) Hachijo-jima.

の南北変動はLMEが最も小さく、次いでLMWであり、NLMSとNLMNはほぼ同様であった。

- ② 室戸岬(東経134度20分)にかけて、すべての流路は北上するが、LMWは室戸岬付近から南偏を始め、潮岬(ほぼ東経136度)沖合では離岸し北緯32度を通過している。一方、他の3流路は潮岬への接岸流路をとる。ただし、LMEはやや離岸傾向を示している。LMWは室戸岬から東進するに従い南北変動が増大する。LMEもこの傾向を示すが、その割合はLMWよりも小さい。NLMSとNLMNは潮岬に向かうにつれ南北変動は小さく収束していく。

- ③ 潮岬から遠州灘、そして伊豆諸島にかけてLMWは大きく南偏し、南北変動も大きくなるが、東経137度30分付近を南偏の底として北上を開始し、東経138度20分付近で北緯32度を通過、そして伊豆諸島においては八丈島と三宅島の間を通過する。流路の最南端は北緯31度50分付近にまで及んでいる。LMEも同様に南偏するが、LMWほど大きくはなく、また南北変動も小さい。北緯32度に東経138度付近で到達したあとほぼ東進し、八丈島南方(ほぼ東経139度40分)付近を迂回して北上を開始する。NLMSは潮岬を通過後、やや南偏し、南北変動を徐々に増やしなが

八丈島を迂回する流路をたどる。NLMN は潮岬を通過後ほぼ東進し、東経 138 度付近から北上し、その後八丈島と三宅島の間を通過する。南北変動は 4 流路の中で最も小さい。

- ④ 伊豆諸島通過後、どの流路も北東に進み、北に凸となった流路となる。その曲率は NLMS で最も大きい。LMW は南北変動の割合が小さくなり、犬吠埼の南方北緯 35 度付近まで到達したところで南北変動は最も小さくなり、その後急激に南北変動を増大させながら北緯 36 度 10 分、東経 143 度 20 分付近を北偏の頂として東方へ向かう。LME は八丈島迂回後犬吠埼南方で北緯 34 度を通過し、北緯 35 度 10 分、東経 143 度付近を北偏の頂としたあと東進する。NLMS も LME と同様であるが、北偏の頂は北緯 35 度 40 分付近である。南北変動の様子は LME と同様である。NLMN は八丈島と三宅島の間を通過後、犬吠埼の南方北緯 34 度 30 分付近を通過後、北偏の頂を北緯 35 度 10 分、東経 143 度 20 分として東進する。

LMW は 136-138 度付近で北緯 32 度以南まで南下しており、三宅島と八丈島の間を通過していることから、Kawabe (1985, 1986) の分類では tLM にあたる流路に近い。LME は平均流路が北緯 32 度まで達し、流軸変動が北緯 32 度を超えていることから、tLM にあたる流路に近いが、八丈島の沖合を通過していることから、oNLM とも考えられる。この結果は 3-1 章で述べた Kawabe (1995) 並びに吉田ら (2006) の指摘した「典型的では無い大蛇行流路」に対応するものであると考えられる。NLMS は南北変動を考慮に入れても北緯 32 度までは到達しないこと、そして八丈島を迂回することから、oNLM と考えられる。また、NLMN はその形態から nNLM である。

6. 黒潮流路変動、遷移過程と日本南岸の潮位変動

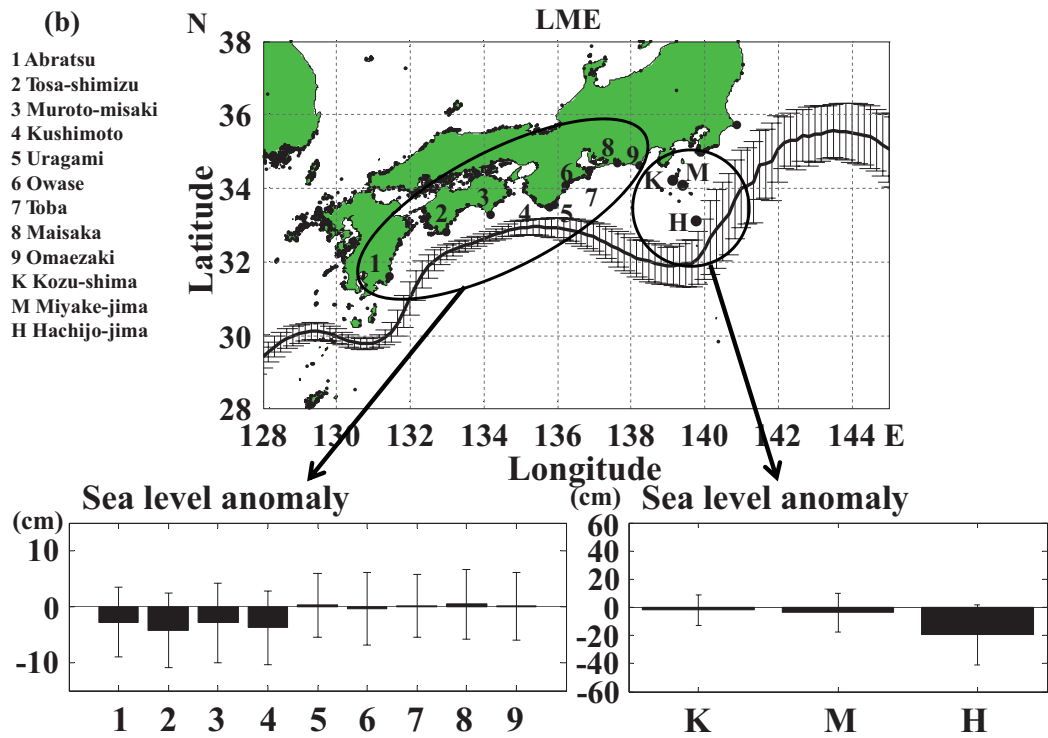
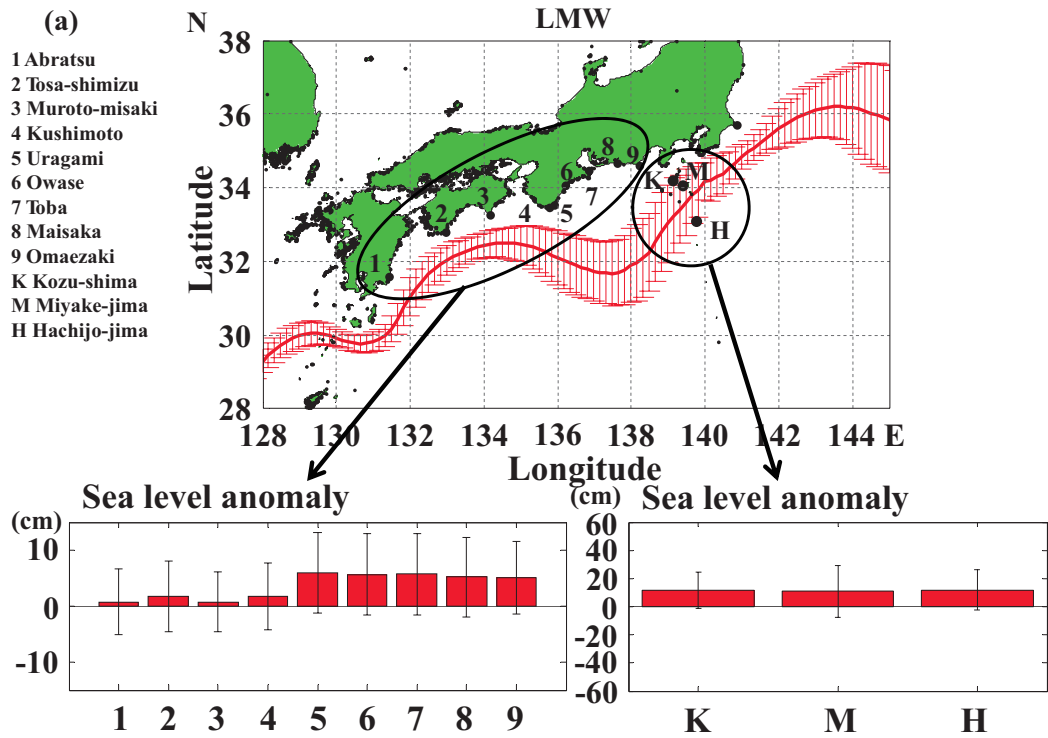
前章までに黒潮流軸の情報である南限緯度と北限緯度を用いて統計解析を行った結果、Kawabe (1985, 1986) の分類とは異なり、4 つの黒潮流路が導かれた。これまでに述べてきたように黒潮流路変動は日本南岸、並びに伊

豆諸島海域の潮位に影響をもたらすことが知られている。前述のように LME は tLM とも oNLM ともとれる振る舞いをするのがわかった。そこでこの章では、この点に注目し、その 4 つの黒潮流路と、その流路をとる期間に対応する日本沿岸・伊豆諸島の潮位の特徴を議論する。

6.1 黒潮流路変動に伴う日本南岸の潮位の特徴

4 つの黒潮流路の時期に対応する日本南岸の各潮位観測点 (Fig. 4) の平均潮位を示した (Fig. 14 (a), 14 (b), 14 (c), 14 (d))。以下に傾向をまとめる。

- ① LMW の時期 (Fig. 14 (a)) は、日本南岸全域にわたって高潮位であり、串本以西で +0 ~ +2 cm、浦神以東で +5 ~ +6 cm であった。伊豆諸島の潮位も神津島、三宅島、八丈島ともに +10 cm と高潮位を示した。この結果は、Kawabe (1985) の分類による tLM の流路の場合の潮位変動傾向と一致するものである。
- ② LME の時期 (Fig. 14 (b)) は、串本以西では -3 ~ -2 cm、浦神以東で正であるが、殆ど平均値に近いものの、串本以西よりはやや高潮位にある傾向を示した。伊豆諸島の潮位は神津島ではやや低潮位ながらもほぼ平均値、一方、三宅島、八丈島はともに低潮位を示し、特に八丈島で -20 cm と顕著だった。
- ③ NLMS の時期 (Fig. 14 (c)) は、日本南岸全域にわたって -2 cm 程度と低潮位の傾向を示した。伊豆諸島の潮位は LME の場合と同様に神津島、三宅島は低潮位であるが、LME の場合よりも更に低潮位であり、八丈島においても LME の流路の場合よりも更に低潮位となり、-30 cm 程度であった。この傾向は LMW の場合のほぼ逆の傾向であった。伊豆諸島の潮位の傾向は Kawabe (1985) の分類による oNLM の流路の場合の潮位変動傾向と一致したが、日本南岸の潮位変動傾向は非大蛇行期の特徴である、串本と浦神を境にして西と東で異なるというものではなかった。
- ④ NLMN の時期 (Fig. 14 (d)) は、串本以西の潮位が +0 ~ +1 cm と高潮位、浦神以東は -2 ~ +0 cm と低潮位の傾向を示している。伊豆諸島の潮位は神津島においてはほぼ平均値、三宅島は +5 cm、八丈島は +20 cm と高潮位を示した。この傾向は LME の場合のほぼ逆の傾向であった。これらは Kawabe (1985) の分



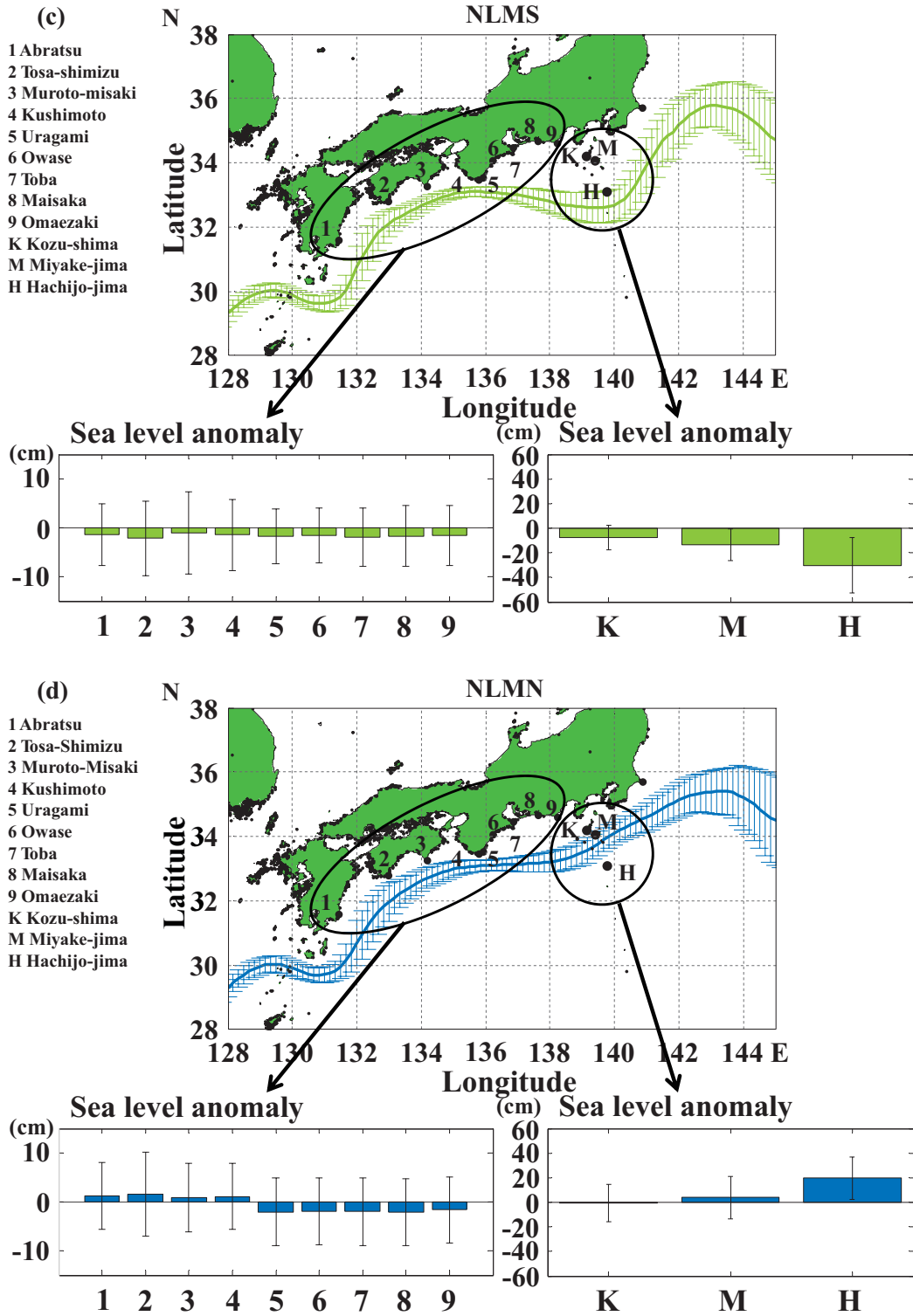


Fig. 14. Sea level anomalies along the south coast of Japan and the Izu Islands when the Kuroshio takes; (a) Large Meander West(LMW) path, (b) Large Meander East(LME) path, (c) Non Large Meander South(NLMS) path and (d) Non Large Meander North(NLMN) path.

類による nNLM の流路の場合の潮位変動傾向と一致している。

上述したように、LME 流路の時期に、串本以西と浦神以東の潮位差に差が見られた。また、三宅島並びに八丈島の低潮位ということは黒潮が八丈島を迂回しているということである。このような潮位変動傾向はこれまでに指摘されてこなかったものである。LME は蛇行が北緯 32 度まで達していることから、大蛇行流路と判断されそうであるが、LMW の場合とははっきり異なっており、NLMS の場合の潮位変動と傾向が一致している。即ち、LME は oNLM の分類の中に含まれていた流路であると考えられる。また、LMW と NLMS、LME と NLMN でそれぞれ潮位変動傾向が逆になっている点は興味深いも

のである。次章ではこの 4 流路の遷移過程に注目して解析を行う。

6.2 黒潮流路変動と串本と浦神の潮位差の推移

1970 年 1 月から 2009 年 12 月までの串本と浦神の潮位差の時系列に 4 つの黒潮流路を合わせて示した (Fig. 15)。赤色の▷は LMW、黒色の▷は LME、緑色の▷は NLMS、青色の▷は NLMN に対応する。背景が黄色の時期は気象庁によって判定された大蛇行期を示している。Kawabe (1985, 1986, 1995) は黒潮各流路間の遷移過程を論じているが、その中で、典型的な大蛇行流路は非大蛇行接岸流路をとっている際に、トカラ海峡で流軸が北方

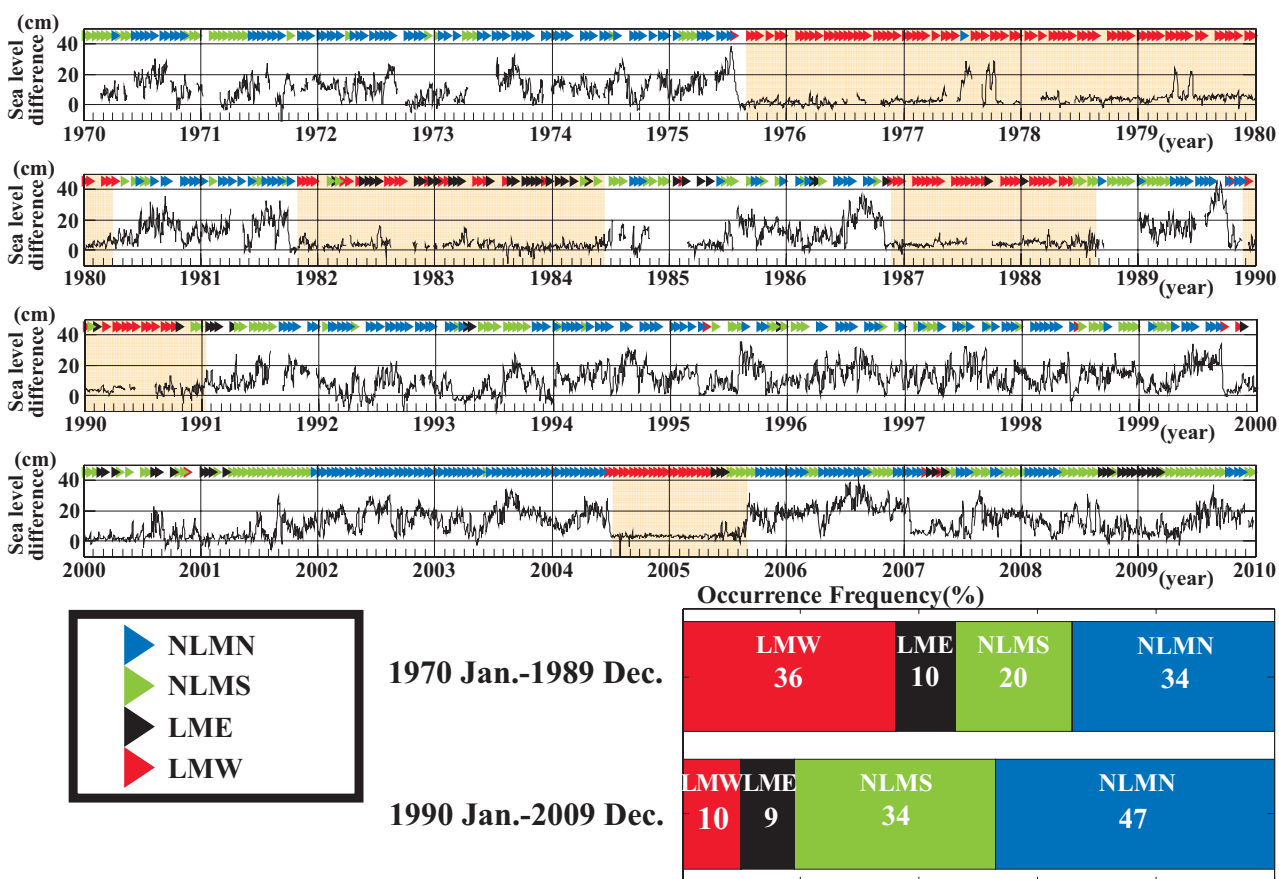


Fig. 15. Periods of four different paths of the Kuroshio are shown by colored triangles on top of the time series of sea level difference between Kushimoto and Uragami from Jan. 1970 to Dec. 2009. Hatched areas show the Large Meander periods determined by the Japan Meteorological Agency (JMA).

に変位してからほぼ4か月程度で形成され、消滅する際にはトカラ海峡で流軸が南に変位してから、ゆっくり数か月以上かけて消滅することを示している。今回の研究ではトカラ海峡の流軸変動は直接扱っておらず、九州沖合の小蛇行形成と、その東進については議論できないので、大蛇行形成期間を論ずることは出来ないが、ここでは串本と浦神の潮位差が高い状態から下降を始め、ほぼ潮位差がなくなるまでを大蛇行形成期間とし、ほぼ潮位差のない状態から上昇を開始し、潮位差が20 cm程度に達した時点までを大蛇行消滅期間として、大蛇行期間と非大蛇行期間に分けて、大蛇行形成、消滅過程にも注目し、4つの流路の推移過程を見てみる。

大蛇行期間

1. 1975年8月-1980年3月 1977年の6月頃の「春風」の切離を除いて、安定してLMWをとっている。「春風」の切離の際には一時的にNLMNをとっているが、すぐにLMWとなっている。大蛇行形成期間(1か月程度)ではNLMNの流路からLMWに移行している。大蛇行消滅期間(5か月程度)ではLMWからNLMSへと遷移している。以降NLMNかNLMSかどちらかの流路をとっている。
2. 1981年11月-1984年5月 この期間は串本と浦神の潮位差は小さく安定しているにもかかわらず、大蛇行初期にNLMSの流路をとり、以降LMWとLMEの間で頻繁に流路交代が起こっているが、LMEの期間のほうが長くなっている。大蛇行形成期間(1か月程度)ではやはりNLMN流路からLMWに移行している。大蛇行消滅期間(2か月程度)ではLMEからNLMSへと遷移し、その後NLMNに移行している。1985年初頭に串本と浦神の潮位差が小さくなる時期があったが、安定した流路とみられるLMWの流路とはならず、LMEからNLMN, NLMSと推移している。
3. 1986年12月-1988年7月 ほぼ安定したLMWの流路をとっており、時折LMEの流路をとる時期があった。大蛇行形成期間(2か月程度)はNLMN→NLMS→LMEからLMWを形成している。大蛇行消滅期間は欠測があるので判じがたいが、6か月程度で、NLMSの流路となり、以降NLMNかNLMSのどちらかの流路をとっている。
4. 1989年12月-1990年12月 期間は短いながらも

安定したLMWの流路をとっていた。大蛇行形成期間(1か月程度)ではNLMNからLMWへと移行している。消滅期間(5か月程度)でLME→NLMS→LME→NLMSと推移し、その後は同様に、NLMSかNLMNの流路をとる。

5. 2004年7月-2005年8月の期間 この期間は安定したLMW流路であった。大蛇行形成期直前は2年半以上と長い安定したNLMNの期間であり、大蛇行形成期間(1か月程度)では直接NLMNからLMWに遷移している。大蛇行消滅期間(4か月程度)はLME→NLMS→NLMNへと遷移している。この期間の遷移過程の様子はUsui *et al.* (2011)のモデルで調べられ、今回の研究でのLMWから2005年5月には伊豆海嶺上の黒潮流軸が東方に遷移し、蛇行の中心が八丈島の南を迂回し下流方向に輸送されることにより、蛇行の強度が弱まりNLMSに遷移することを示している。

非大蛇行期間

1. 串本と浦神の潮位差が小さいにも関わらず大蛇行形成に至らなかった時期が見られる。多くは一旦LMWまたはLMEの流路を短期間形成するものの、NLMSに移行している。特に、1999年10月-2001年6月の期間は串本と浦神の潮位差が長期間にわたって小さかったにも関わらず、大蛇行形成には至っていない。この間流路はLMEとNLMSの間を遷移していた。
2. 他の非大蛇行期間ではNLMSまたはNLMNの流路間で遷移していた。特に興味深いのは、2007年2月から2009年5月に至る期間で、直前の非常に高潮位の状態から、一気に潮位差が下降し、大蛇行形成に至ると見られたが、再び潮位差は上昇し、その後は上昇下降を繰り返し、LMEの流路もとっていた。

このように、黒潮大蛇行形成の良い指標である串本と浦神の潮位差と、今回の研究で得られた4流路の関係を調べることにより、これまでの研究で串本と浦神の潮位差が小さい時期が典型的な大蛇行流路と分類される場合であっても、異なる振る舞いをするのがわかった。また、非大蛇行流路であると判断された場合でも、比較的大蛇行に近いと目されるLMEの分類を導入することにより、黒潮流路変動を詳しく分類しうることがわかった。また

黒潮流路変動の特徴として、特例である1977年の6月頃を除いて、LMWからNLMNへの直接的な遷移はみられなかったこと。LMWが収束する時期はNLMSかLMEの時期を経ていること。つまり、NLMNからLMWの後にLME、続いてNLMS、NLMNとなる流路変動パターンが多かったことが分かった。各流路がどの流路に遷移しやすかったのかを検討した結果をTable 3に、その様子をFig. 16に示した。LMWから最も遷移しやすかったのはLMEだった(Fig. 16①)。LMWの流路をとると、南限緯度をほぼ維持したまま東偏するパターンが多いと考えられる。LMEから最も遷移しやすかったのは、NLMSだった(Fig. 16②)。一度LMEの流路をとると、北向きに流路は遷移することになる。NLMSから最も遷移しやすかったのはNLMNで(Fig. 16③)、また、LMEに遷移する場合もあった(Fig. 16④)。NLMNから最も

Table 3. Number of transition processes among LMW, LME, NLMS and NLMN. Circled numbers are shown in Figure 16.

Transitions from path to path	Number of transitions
LMW → LME	14 ①
NLMS	3
NLMN	1
LME → NLMS	12 ②
LMW	6
NLMN	0
NLMS → NLMN	38 ③
LME	8 ④
LMW	2
NLMN → NLMS	32 ⑤
LMW	8 ⑥
LME	2

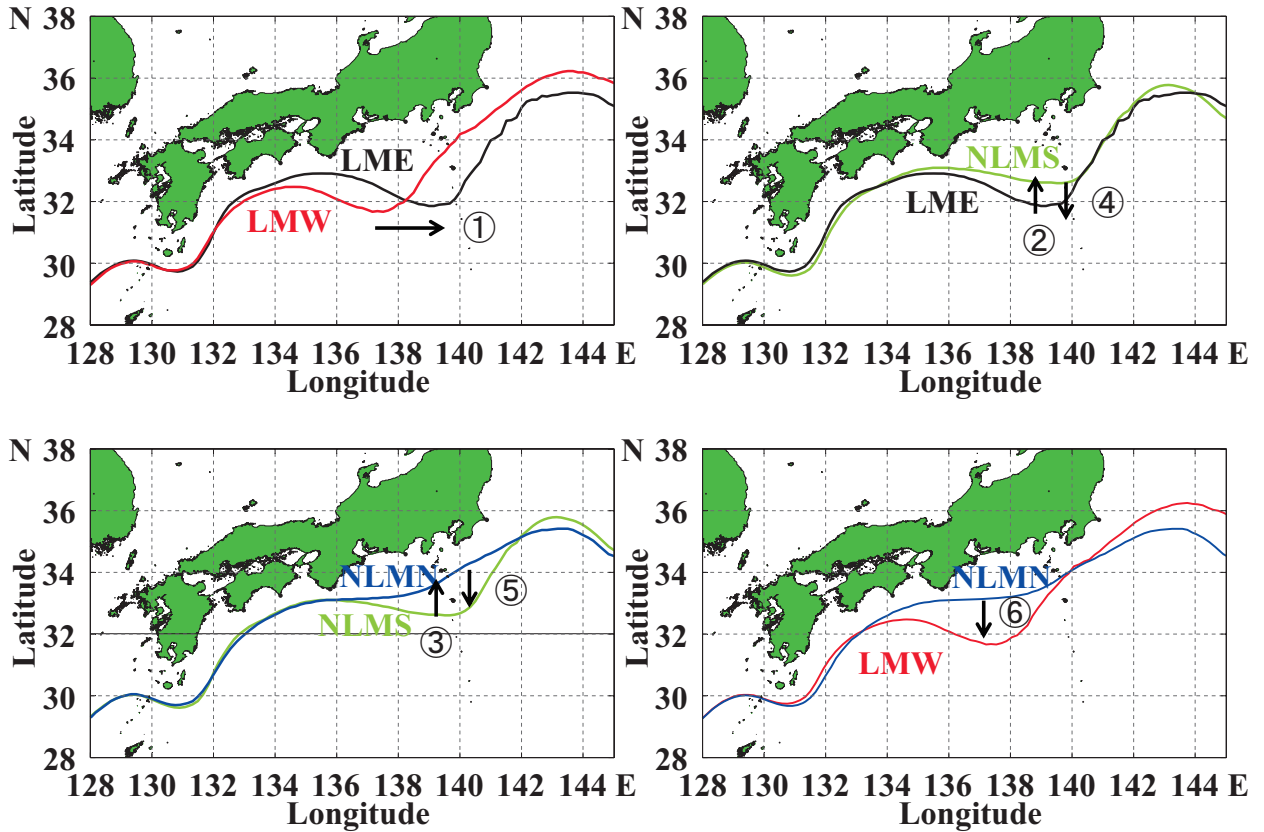


Fig. 16. Schematic Figs of transition processes among LMW, LME, NLMS and NLMN. Circled numbers are occurrence index shown in Table 3.

遷移しやすかったのは NLMS であった (Fig. 16 ⑤)。このように NLMS と NLMN は交互に頻繁に遷移しやすかったことがわかった。このことは非大蛇行期に北限緯度が大きく変化していたこと (Fig. 9) と一致するものである。また、NLMN の流路から LMW に変化する場合がある (Fig. 16 ⑥)。このことは Kawabe (1986) が、tLM はほとんどの場合に nNLM から形成され、常に oNLM に遷移することを示していたことと合致するものである。

したがって、今回の研究で見いだされた LME の流路は、tLM (本研究の場合の LMW) から oNLM (本研究の場合の NLMS) に遷移する過程で生じた流路だと考えるのが自然である。しかし、Fig. 15 をみると、1985 年前半や 2000 年から 2001 年にかけて、2008 年後半から 2009 年前半にかけてなど、NLMN から南偏して LME に遷移した状態も目立っていた。また、1982 年から 3 年ほど継続した大蛇行期に注目すると、典型的な大蛇行路に対応した LMW が主ではなく、LME が主役であった。この時期は気象庁による判断基準では大蛇行流路だと判断されているが、蛇行路が東西に揺らいで不安定だったと同時に、八丈島の北のルートと八丈島の南のルートを交互に通過するという伊豆諸島周辺海域における黒潮流路変動の重要な要因を見出せる時期だったのではないかと考えられる。さらに、注目すべきこととして、1990 年以降か

ら 2004 年の大蛇行期まで 10 年以上目立った LMW は発生していなかったことが挙げられる。1990 年以前の 20 年間と 1990 年以降の 20 年間の各流路の割合を比較すると、1970–1990 年は LME:36 %, LMW 10 %, NLMS 21 %, NLMN 34% であり、1990–2010 年は LME:10%, LMW 9%, NLMS 33%, NLMN 47% と大蛇行流路に至るケースが 1990 年を境に少なくとも 20% 以上も低下していたことがわかった。この要因については今回研究では知ることができないが、今後数値モデルなどを用い、詳細に検討する必要がある。

これらのことと Kawabe の一連の先行研究結果を合わせると、黒潮大蛇行形成、消滅に関して Fig. 17 のようなシナリオが考えられる。即ち、NLMN 流路の状態の時に 1 か月ほどで LMW 流路が形成され、黒潮は八丈島と三宅島の間を通過して犬吠埼の沖合から東進する。この大蛇行状態で何らかの不安定が引き金となり、4–6 か月かけて、蛇行が北東へシフトして LME 流路をとり、さらに、NLMS 流路を経て NLMN 流路へ変遷し、大蛇行が消滅するというものである。この中で LME, LMNS は持続期間が比較的短く、LMW, NLMN との間のみならず、お互いで遷移することもしばしばある。

この遷移過程の詳しい原因についてはここではわからず、今後の研究課題となる。

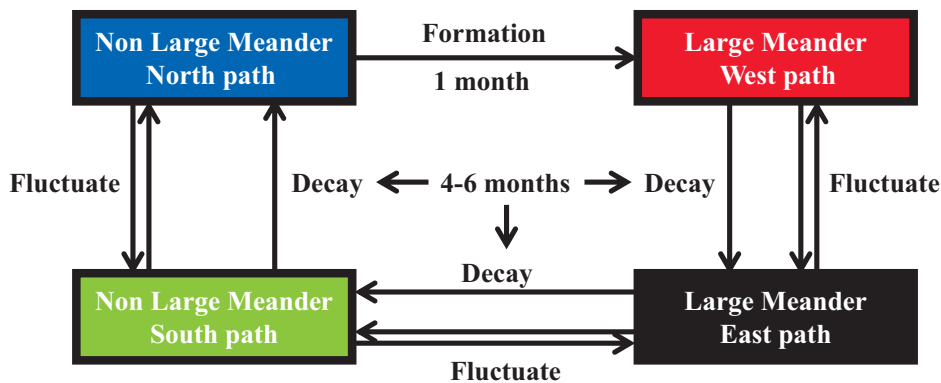


Fig. 17. Formation, decay and fluctuation cycles of the Kuroshio paths.

7. まとめ

本研究では、日本南岸の潮位データから、日平均潮位偏差成分を抽出し、続いて過去40年(1970年1月–2009年12月)の黒潮流軸データによる黒潮流路を統計的手法によって分類し、潮位と組み合わせて長期的黒潮流路変動の特徴を客観的に検討した。

その結果、串本と浦神の潮位差が小さい時期(大蛇行流路)に、八丈島の潮位が低潮位、高潮位に1つずつピークを持つことがわかり、Kawabe(1980, 1985, 1986, 1989)には指摘されていなかった流路が推測された。次に、黒潮流路の特徴として南限緯度と北限緯度を算出し、マハラノビス距離を用いた判別分析とK-mean法を用いて非階層型クラスター解析を行ったところ、代表的な3流路(典型的な大蛇行流路:tLM, 非大蛇行接岸流路:nNLM, 非大蛇行離岸流路:oNLM)にそれぞれ類似した大蛇行西偏流路(LMW), 非大蛇行北偏流路(NLMN), 非大蛇行南偏流路(NLMS)に加えて、串本と浦神の潮位差が小さい時期に対応し、南限緯度が北緯32度以南

を示す黒潮流路(大蛇行流路)に判別された大蛇行東偏流路(LME)の4つに分類できた(Fig. 18)。4つの流路の特徴を流路の形状や日本南岸の潮位を用いて確認すると、LMWとNLMN, NLMSの流路は代表的な3流路の特徴をよくとらえたが、LMEは北緯32度以南まで達しているという面ではLMWと類似し、八丈島の南を通過しているかという面ではNLMSと類似していた。しかしながら、八丈島の潮位が平均−20 cmほどの低潮位を示し、串本以西でも低潮位の傾向を示したことから、LMEはoNLMに隠されていた4つ目の流路といえ、Kawabe(1995)並びに吉田ら(2006)の指摘した「典型的では無い大蛇行流路」に対応するものであると考えられた。本研究によって示された黒潮流路分類の模式図を潮位変動の特徴と合わせてFig. 19に示してまとめた。

本研究によって、LMEの流路を区分することにより、大蛇行形成、消滅過程をより精密化できた。海洋速報、衛星情報などを合わせて解析することにより、本研究で導入した南限緯度、北限緯度をFig. 12上にプロットすることにより、黒潮流路を迅速に分類することができると考えられる。

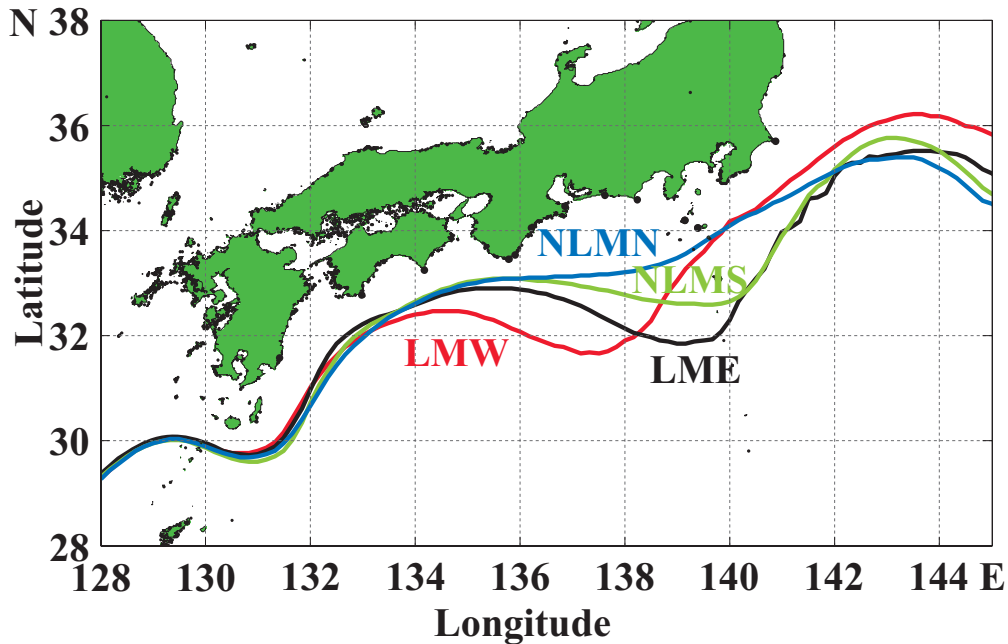


Fig. 18. Kuroshio paths obtained in this study. LMW: Large Meander West path, LME: Large meander East path, NLMS: Non Large Meander South path and NLMN: Non Large Meander North path.

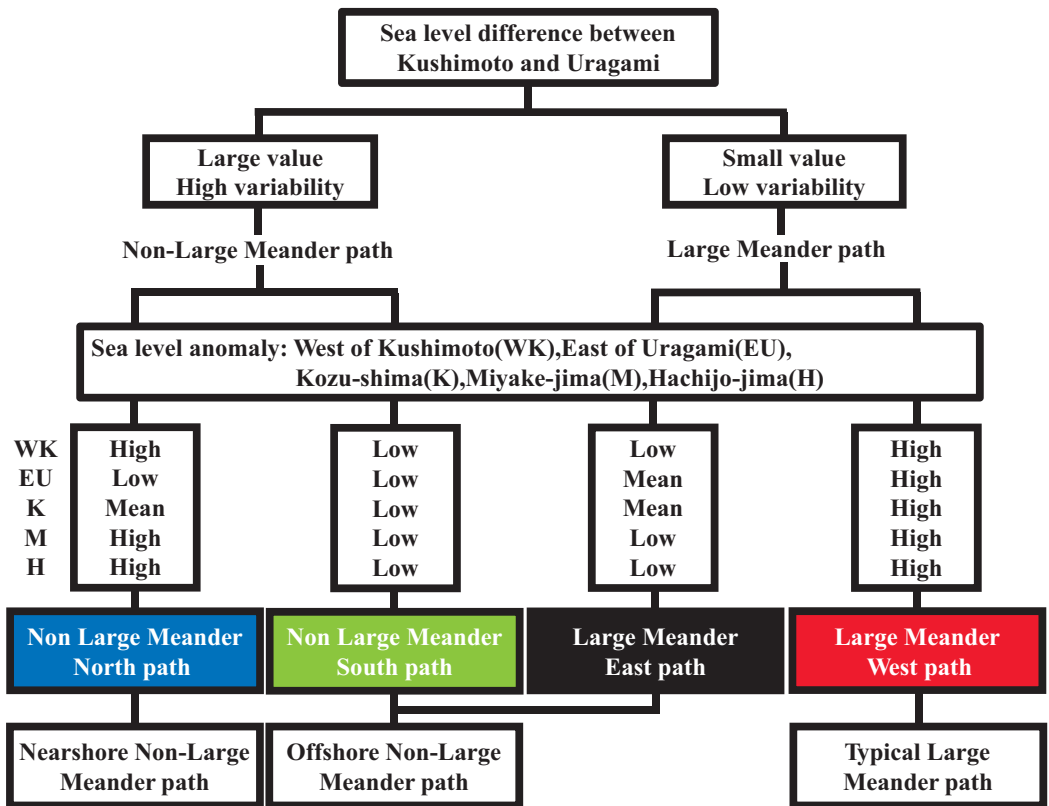


Fig. 19. Schematic diagram showing the relation among 4 Kuroshio paths and sea level differences between Kushimoto and Urugami, and sea level anomalies at tide stations along the southern coast of Japan including Izu Islands.

謝 辞

本論文は第2筆者が東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科海洋環境保全学専攻博士前期課程に在籍中の研究成果をまとめたものであります。本研究遂行に当たっては、同専攻准教授北出裕二郎博士並びに同専攻准教授島田浩二博士にはご助言を戴くとともにご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。特に東京大学大気海洋研究所海洋物理学専攻教授 故川邊正樹博士には本研究にあたって有益なご助言を戴きました。ここに深謝の意を表します。特に第1著者である吉田は大学2年次在籍中より友人として、また研究者仲間として40年近く共に過ごし、その間絶えず刺激を受け、かつ励まされてきました。本研究を行うことによって、彼が遺した黒潮流路変動に関する先駆的研究を少しながら精密化できたことに喜びを感じます。ここに記して、故川邊正樹君に深甚な謝意を表します。

本研究で用いたデータに関して、日本海洋データセンター (JODC: Japan Oceanographic Data Center), 気象庁 (JMA: Japan Meteorological Agency), 日本水路協会海洋情報研究センター (MIRC: Marine Information Research Center) の資料を取り扱わせて戴きました。各機関に対し、感謝の意を表します。本専攻資源・海洋情報解析学研究室、並びに海洋物理学研究室、海洋気候物理学研究室内の各位には研究遂行にあたり日頃より有益なご討論ご助言を戴きました。ここに感謝の意を表します。本論文の初稿に関して、2名の査読者、並びに編集委員の方からは懇切なご指摘、ご助言、ご批判を賜りました。ここに記して深甚な謝意を表します。

References

花輪公雄, 三寺史夫 (1985): 海洋資料における日平均値の作成について日平均潮位を取り扱う留意点, 沿岸海洋研究ノート, **23**, 79–87.

Kawabe, M. (1980): Sea level variations along the south coast of Japan and the large meander in the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**, 97–104.

Kawabe, M. (1985): Sea level variations at the Izu Islands and typical stable paths of the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 307–326.

Kawabe, M. (1986): Transition processes between the three typical paths of the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 174–191.

Kawabe, M. (1989): Sea level change south of Japan associated with the non-large-meander path of the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **45**, 181–189.

Kawabe, M. (1995): Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander. *J. Phys. Ocean.*, **25**, 3103–3117.

Kawabe, M. (2005): Variations of the Kuroshio in the southern region of Japan: Conditions for large meander of the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, **61**, 529–537.

小林昭夫 (2008): 潮位記録を用いた地殻上下変動推定のための津村による海域区分の検証. 験震時報第71巻 (2008), 1–17項.

Miyazawa, Y., S. Yamane, X. Guo and T. Yamagata (2005): Ensemble forecast of the Kuroshio meandering. *J. Geophys. Res.*, **110**, C10026, doi: 10.1029/2004JC002426.

津村建四朗 (1963): 日本沿岸の平均海面およびその変動の研究 (I) – 潮位変化の地域分布. 測地学会誌, **9**, 49–90 (with English abstract and legends).

Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, Y. Fujii, and M. Kamachi (2011): Decay mechanism of the 2004/05 Kuroshio large meander. *J. Geophys. Res.*, **116**, C10010, doi: 10.1029/2011JC007009.

吉田隆, 下平保直, 林王弘道, 横内克巳, 秋山秀樹 (2006): 黒潮の流路情報をもとに黒潮大蛇行を判定する基準. 海の研究, **15**, 499–507 (with English abstract and legends).

Statistical analysis of the variation of the Kuroshio path

Jiro Yoshida^{1**}, Eriko Maeta^{1†}, Haruka Nakano¹,
Hiroki Deguchi², Masao Nemoto¹

Abstract

The Kuroshio Current path has been classified into three passes: typical Large Meander path (tLM), nearshore Non-Large Meander path (nNLM) and offshore Non-Large Meander path (oNLM). We investigated these paths in more detail statistically by Discriminant Analysis using Maharanobis Distance and K-mean method (Nonhierarchical Cluster Analysis). We used the sea level data along the southern coast of Japan and the Kuroshio Axis Dataset from January 1970 to December 2009. We defined the southern limit latitude of the axis of the Kuroshio between 136 and 142°E and the northern limit one between 136 and 140°E as indices of the Kuroshio path. We classified the Kuroshio paths into four paths: Large Meander West (LMW) path, Non-Large Meander North (NLMN) path, Non Large Meander South (NLMS) path and Large Meander East (LME) path. The LMW path corresponds to the tLM path, and the NLMN path corresponds to the nNLM path: however, both axis of the LME and the LMW extend beyond 32°N before approaching the Izu Islands, and both axis of the LME and the NLMS take the path to the south of Hachijyo-jima. In the period of the Kuroshio taking the path of LME, the sea levels at Hachijyo-jima and Kushimoto are low, indicating that the LME path is one of the paths hidden in the oNLM path. In this context, the oNLM path should be divided into the LME and the NLMS paths. We also discussed the transition processes among these four paths: the change of the NLNN path to the LMW path, following LMW → LME → NLMS → NLMN.

Key words : Large Meander West (LMW) path, Non-Large Meander North (NLMN) path, Non Large Meander South (NLMS) path, Large Meander East (LME) path

(Corresponding author's e-mail address: jiroy@kaiyodai.ac.jp)

(Received 1 March 2013; accepted 9 June 2014)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2014)

¹ Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology
4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo, 108-8477, Japan

^{1†} NYK Business Systems Co.

1-17-21, Shinkawa, Chuo-ku, Tokyo, 104-0033, Japan

² Kanagawa Prefectural Marine Science High School

1-2-1, Nagasaka, Yokosuka-City, Kanagawa, 240-0101, Japan

** Corresponding author : Jiro Yoshida

TEL/FAX: +81354630459

e-mail: jiroy@kaiyodai.ac.jp