

伊勢湾, 大阪湾・紀伊水道, 土佐湾における 異常潮位, 高潮に及ぼす黒潮の影響

山下 隆男・山本 圭介・土屋 義人

KUROSHIO EFFECTS ON UNUSUAL TIDES AND STORM SURGES IN ISE, OSAKA AND TOSA BAIES

By *Takao YAMASHITA, Keisuke YAMAMOTO and Yoshito TSUCHIYA*

Synopsis

Observed data of tides, atmospheric sea-surface pressures, Kuroshio paths and water temperatures at a 200 m depth, during the period of 1976-1986, are analyzed to make clear the Kuroshio effects on unusual tides and storm surges in the bays of western Japan facing the Pacific Ocean. Tidal components due to the Kuroshio effects are extracted by eliminating meteorological and astronomical components from observed tides by means of a harmonic analysis. The sequential map of the Kuroshio paths and the 200 m depth water temperature are compared with the time series of unusual tides.

Four typical Kuroshio path patterns are found to correspond to the unusual tides. These four cases are associated with the formation of reverse currents which branch off the main Kuroshio stream. It is also concluded that the forerunner of storm surge is part of the unusual tide.

1. 緒 言

1950年代後半から1960年代前半にかけては, 世界的規模で大きな高潮が頻発した期間であり, これ以後高潮に関する研究が急速に進展した。さらに, コンピュータによる数値計算法の進歩に伴って, 今日では的確な境界条件を与えれば, 数パーセントの誤差で湾内高潮の最大偏差が計算されるようになってきた。しかしながら, 浅海域における高潮は, 津波, 潮流とは特性が異なり, 強風による吹き寄せ効果が卓越するため, 流れの3次元性を考慮しなければ, 的確な乱流抵抗特性は与えられないし, 黒潮などの外洋条件が高潮を含む潮位変化に影響している点も指摘されている。このように, 高潮の発生機構には未解決の点が残されており, 流況, 高潮波形, 水質等を数値的にシミュレートする高品位数値モデルの開発に対する社会的ニーズに答えるためには, 未だ多くの研究課題が残されている。

最近の高潮来襲頻度の減少は, 高潮研究の未解決課題を忘れさせてくれるには十分すぎる程であり, 高潮がわが国における甚大な自然災害を引き起こす外力のひとつであることの認識が薄れてきている。高潮統計の教えるところによれば, 60年周期で頻発期が現われる点, 太陽黒点の55年周期等を考慮すると, 21世紀初頭には大きな高潮の頻発が予想され, 次世紀における海洋開発の重要性, 沿岸域の開発, 再整備の緊急性を考えると, 環境問題を含めた発展的高潮研究の必要性は極めて大である。

高潮研究の今後の課題は, 予知法の確立であり, 気象のみならず海象の大規模変動に対して, 来襲高潮

の高精度の予知を何如に実現するかという点に集約される。気象に関する大スケール、長期間の予知能力の向上は衛星データの援用により急速な進歩を遂げている所は周知のとおりであるが、海象に関する情報集収、現象の理解度は必ずしも満足できるものではないように思われる。西日本の太平洋岸で1週間以上に渡る異常な潮位上昇が発生し、初秋の大潮と重なった場合には浸水被害を生ずることは知られているが、この異常潮位の発生機構は明確にされておらず、黒潮変動、気象・海象変動により励起された地形性 Rossby 波にその要因を求める考え方が一般的である。1971年9月の台風23号通過後に西日本の太平洋岸で生じた異常潮位について、Isozaki¹⁾は気象条件によって黒潮の流れの場が変動し、これに伴う潮位変化が陸棚波として西進した可能性を示している。また、安田²⁾は、和歌山と松山との潮位差と土佐湾で逆流の生ずる黒潮流路パターンとから、逆流時には和歌山の水位が上昇する事を示しているが、これは後述するように、足摺岬沖での小蛇行が土佐湾に逆流渦を放出する黒潮の変動パターンであり、潮岬以西の海域(土佐湾、大阪湾・紀伊水道)に異常潮位を発生させる典型的パターンのひとつである。黒潮の流れ路変動が2地点の潮位差に顕著に現われる例として、潮岬を挟んで15kmしか離れていない串本と浦神の潮位差が黒潮の直進時には大きく(串本が高い)、大蛇行期には差が無くなる事が知られており、Kawabe³⁾は約30年間のデータを用いて、これを明確に示している。黒潮の大蛇行期には大冷水塊が遠州灘の西側から熊野灘の沖(31°N-33°N)に形成され、この大冷水塊の北側に発生する逆流(黒潮の分流も含む)が浦神の潮位を上昇させ、潮位差を縮める。一方、中小蛇行、直進期の非大蛇行期には、冷水塊は東側へ移動し遠州灘沖に形成され、黒潮は潮岬に接して流れる。このために潮岬西側の串本では潮位が上り、20~30cm程度の潮位差が生ずる。

このように、黒潮の流れの場の変動により、西日本の太平洋沿岸では20~50cm程度の海面の変化が生じ、これが異常な潮位上昇の要因であると考えられる。本研究では、黒潮変動と異常潮位との関係を検討し、異常潮位の発生する場合の黒潮流路パターンを分類するとともに、高潮波形にみられる forerunner がこの異常潮位とどのような関係にあるかを明らかにする。

2. 潮位、黒潮データと解析方法

2.1 潮位偏差

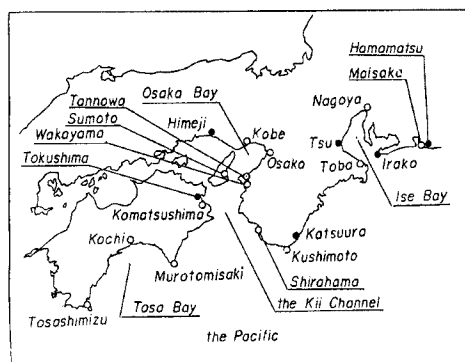


Fig. 1. Observation stations of tides.

Fig. 1 に示す検潮所における、1976年から1986年までの11年間の気象庁管轄の検潮データ、および同庁発表の推算潮位の毎正時値を用い、潮位偏差 η_a を求めた。推算潮位の計算には、40分潮が用いられており⁴⁾、検潮データ η と推算潮位 η_e との関係は、次式のようなのである。

$$\eta_a = \eta - \eta_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

η_a には、気象じょう乱による成分(気象潮)とその他の成分、すなわち、波浪による wave set-up、黒潮等による外洋成分および40分潮に考慮されていない長周期の天文潮等が介入している。そこで、次節に述べる方法により外洋成分のみを抽出する。

2.2 海面変動の外洋成分の抽出

1年以上に渡る長周期成分は対象外とし、各年毎のブロックでデータの解析を行った。これにより天文潮を差し引いた偏差 η_a は、以下のような成分に分離される。

$$\eta_a = \eta_p + \eta_w + \eta_k \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 η_p は気圧低下にともなう静的な水位上昇（吸い上げ効果）、 η_w は波浪、風による吹き寄せ効果とし、 η_k を黒潮による海面変動と考える。

まず、気圧による成分 η_p を除去するため、普通気候観測データ（SDP）の海面気圧の毎正時補間値から、各検潮所における吸い上げ相当水位を求め η_p とした。

次に、wave set-up, wind set-up による成分の除去を行う必要があるが、一般に地上風データから吹き寄せ、波浪による海面上昇を推算することは容易でない。そこで、このような気象じょう乱による成分は、1週間以内の調和成分であると考えて、 η_p を除去した成分 $\eta_w + \eta_k$ の1年間データの調和解析から、7 days 以下の成分を除去し、外洋成分 η_k を求めた。

2.3 黒潮データ

潮位データの解析期間における黒潮に関する情報としては、海上保安庁発表の海洋速報を用いた。同速報より、黒潮流軸の位置を示す指標としては、足摺岬、室戸岬、潮岬、大王崎、御前崎および石廊崎からの南北の距離を用いた。また、冷水塊の拡がりの指標として、水深 200 m における 12°C 以下の領域を海流図中に示した。

3. 異常潮位、高潮と黒潮との関係

3.1 異常潮位と黒潮

前述した解析方法により、主に黒潮変動に起因すると考えられる海面変動の外洋成分 η_k と各岬から黒潮流軸までの距離および、Fig. 2 の黒潮流路パターンの分類⁵⁾を各年について求めた結果を Fig. 3 (a) ~ (k) に示す。図中、A, M, S, D, O, I はそれぞれ、足摺岬、室戸岬、潮岬、大王崎、御前崎および石廊崎から黒潮流軸までの南北距離を示し、 η_k の波形で年平均海面からの上昇が顕著な部分が黒く塗りつぶしてある。この部分を、ここでは異常な潮位上昇と定義する。

一方、Fig. 4 (a) ~ (k) には、海洋速報の海流図に 200 m 水深での 12°C 以下の水温の領域を重ねて表示したものである。表示してある領域は、29° N-35° N および 132° E-141° E であり、図中の 1 ~ 24 の番号は速報の号数を示している。すなわち、速報は月 2 回発表されており、第 1 号は前年の 12 月下旬の観測期間中のデータで、第 2, 3 号は 1 月の上、下旬のデータ、第 24 号は表示年の 12 月上旬のデータである。

Fig. 3 および 4 を各年毎に対比させて、異常潮の発生と黒潮流路、冷水塊の位置との関係を概説すると、以下のようである。

1976 年：黒潮は前年度から大規模蛇行期（Fig. 2 の A 型）に入っており、遠州灘沖に冷水塊を形成して比較的安定に流れている。顕著な異常潮位は認められないが、以下の速報号数の期間で 10 ~ 20 cm の年平均海面からの上昇が認められる。

第 4-5 号、第 8-10 号、第 13-14 号、第 18-19 号：なお、6 月には冷水塊の水温が低下し、水深 200 m 層で 8°C 台を記録した。このため 6 月には反流が発達し沿岸潮位を上昇させている。8 月には冷水塊の勢力が弱まり北上したため、20 cm 以下の水位の低下が生じたものと考えられる。

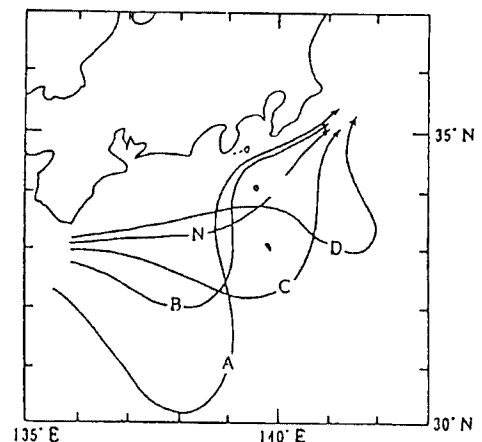
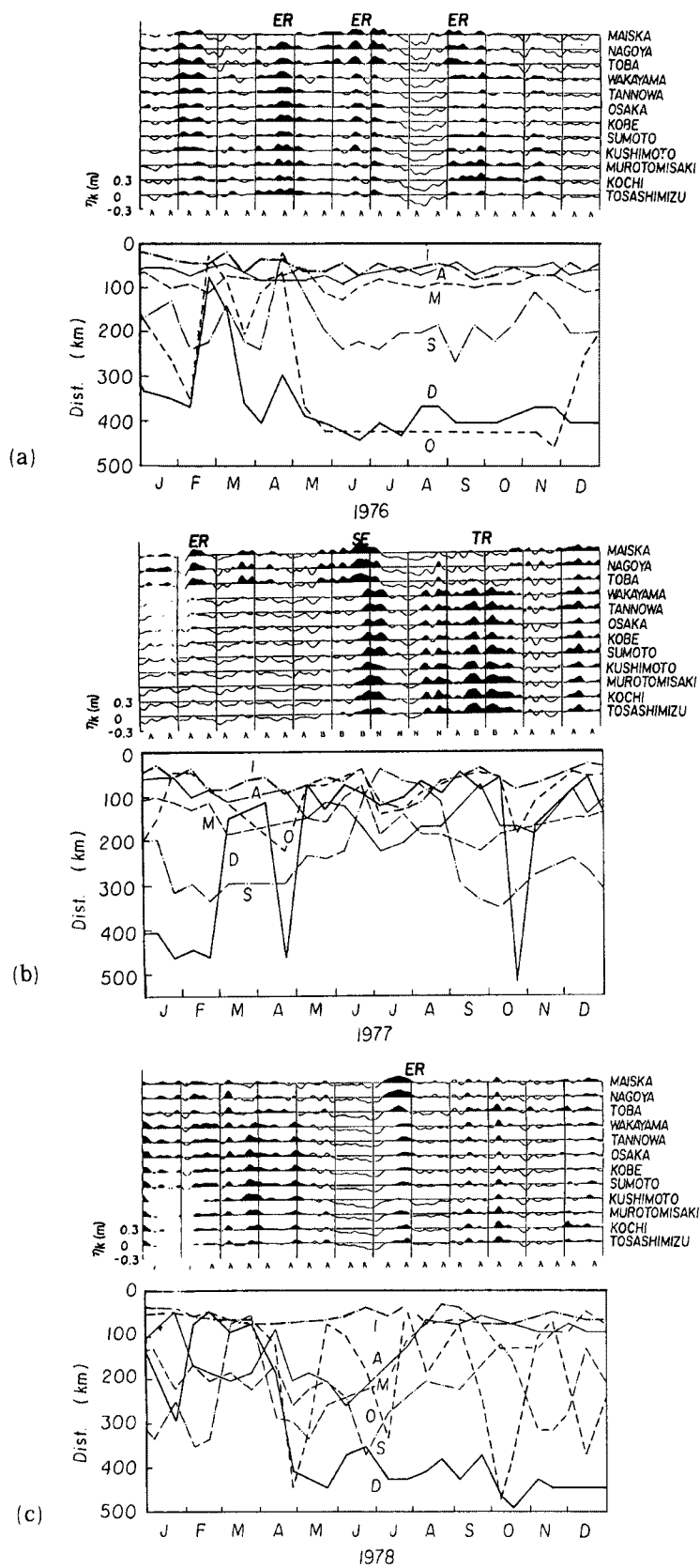
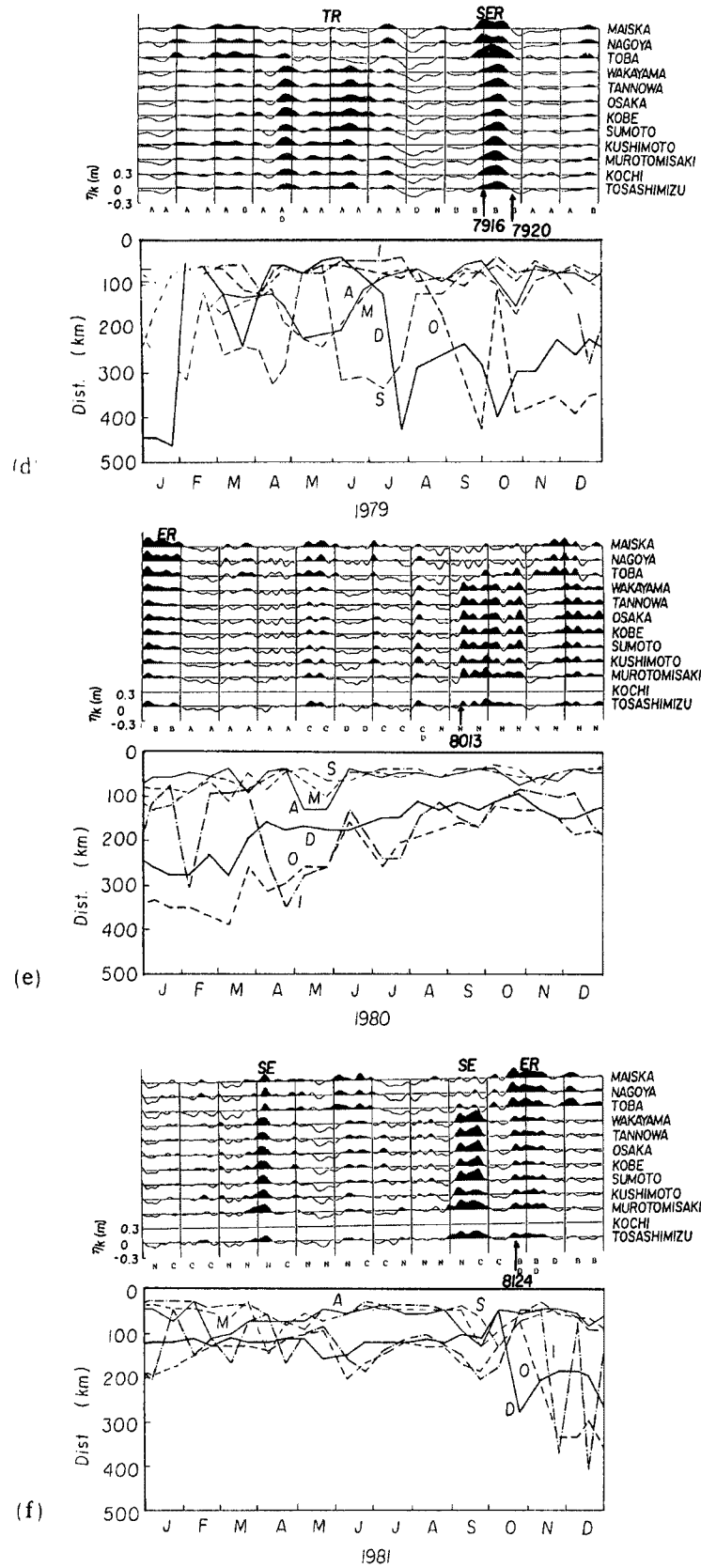
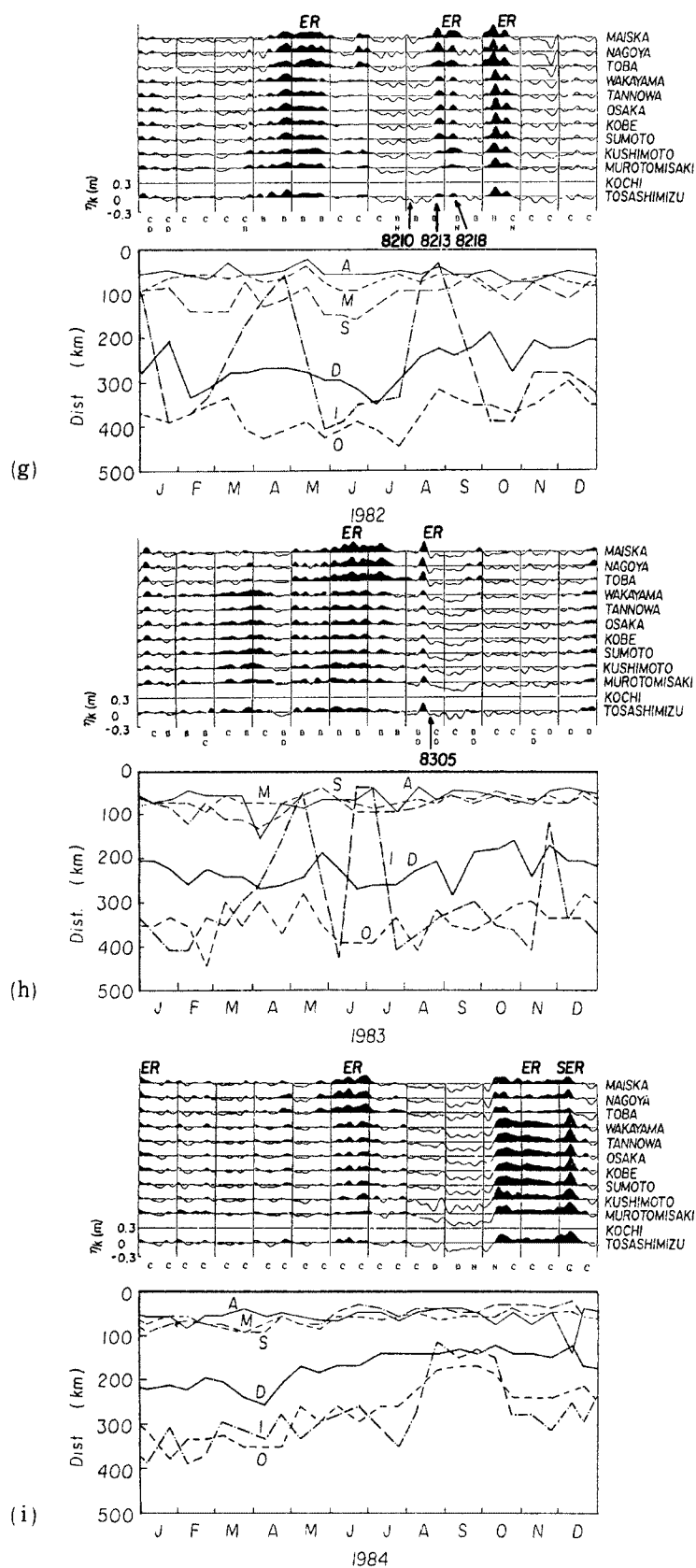


Fig. 2. Types of the Kuroshio path classified by KER report⁵⁾.







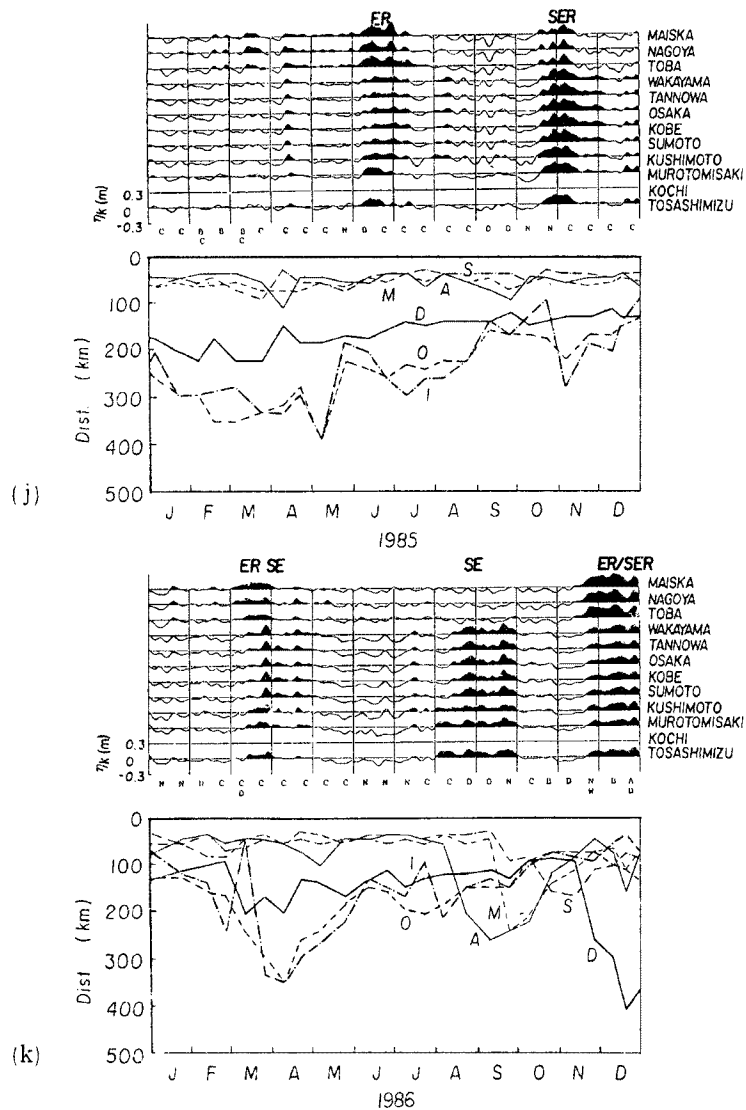
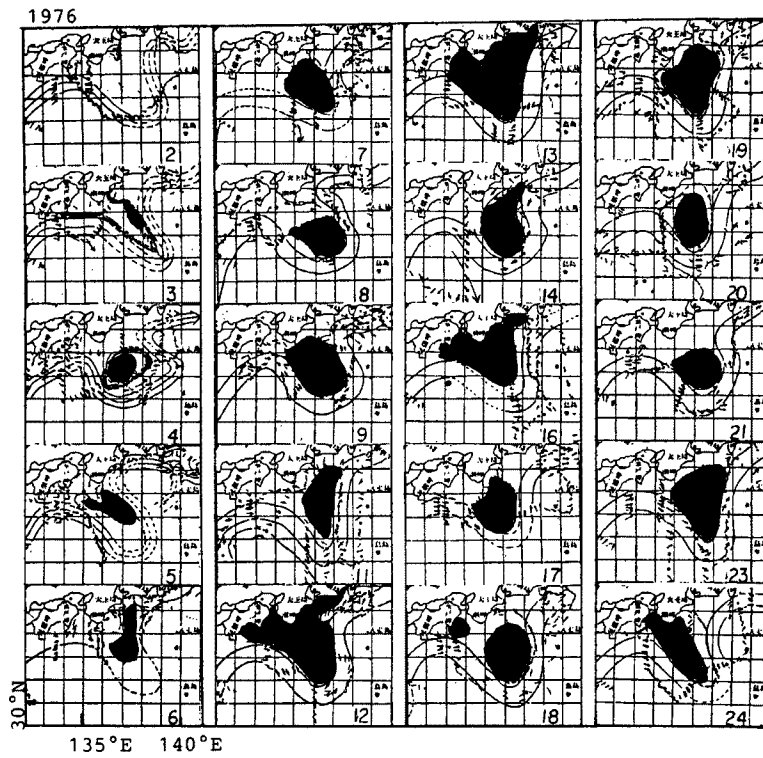


Fig. 3. Extracted unusual tides and distances from each cape to main stream of the Kuroshio.

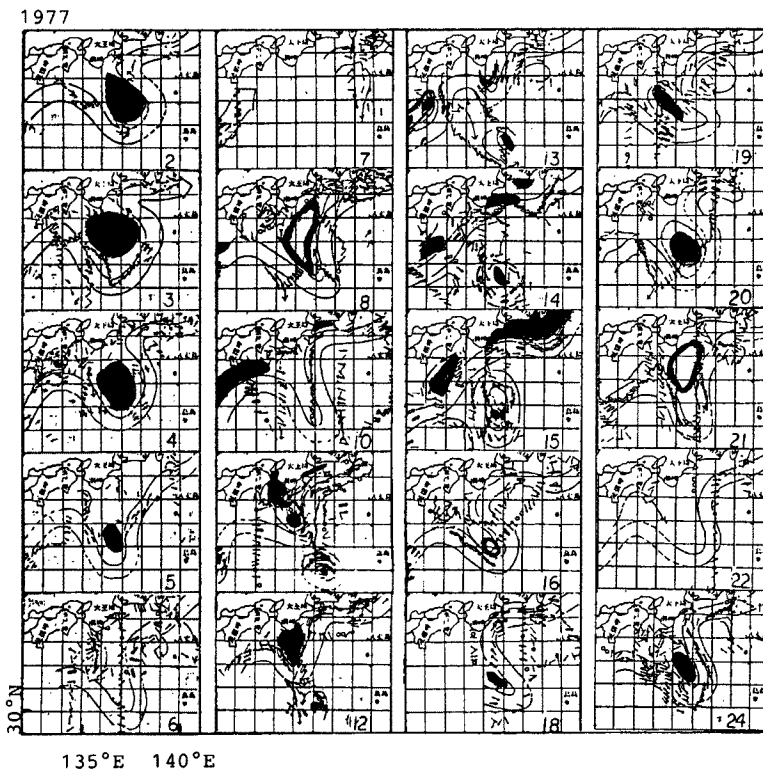
(a) 1976, (b) 1977, (c) 1978, (d) 1979, (e) 1980, (f) 1981,
(g) 1982, (h) 1983, (i) 1984, (j) 1985, (k) 1986

1977年：3～4月に冷水塊の温度が上昇，5月には遠州灘沖で冷水塊の分離が発生し，7月には黒潮本流が一旦直進を初めたが9月には再び大規模蛇行型へ移行している。この年は全般的に12℃以下の領域が減少しており，冷水塊の分離後の6月には伊勢湾周辺で，6月下旬から7月上旬には潮岬の西側の沿岸で20 cm程度の海面上昇がみられる。これは，冷水塊が弱まり，Fig. 4 (b) の12,13号のように，小規模な反流渦（12号の潮岬沖，13号の足摺岬沖）を形成し，前者は伊勢湾周辺へ，後者は土佐湾，大阪湾・紀伊水道に放出され，14号のように直進型へ移行したためであると考えられる。同様に，冷水塊分離後の黒潮の弱体化に伴う反流渦形成の大規模なケースが1979年の20号に示されており，この場合は，後述するように，顕著な異常潮位を発生させている。

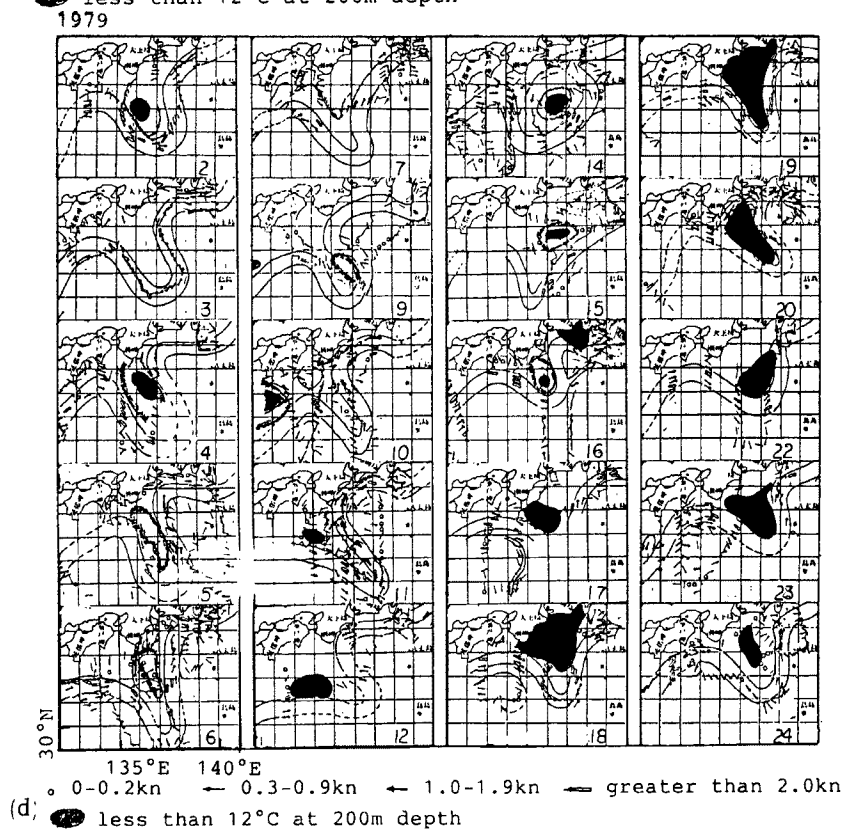
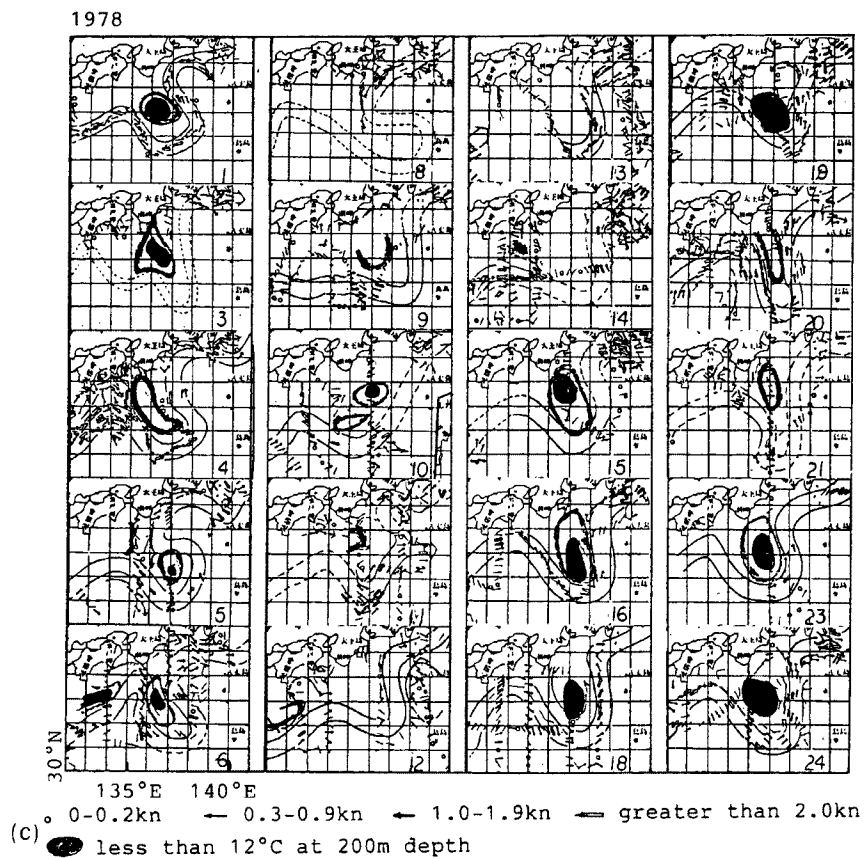
一方，8～10月にみられるように，潮岬西側だけで海面の上昇が生じることがある。これは，17-20



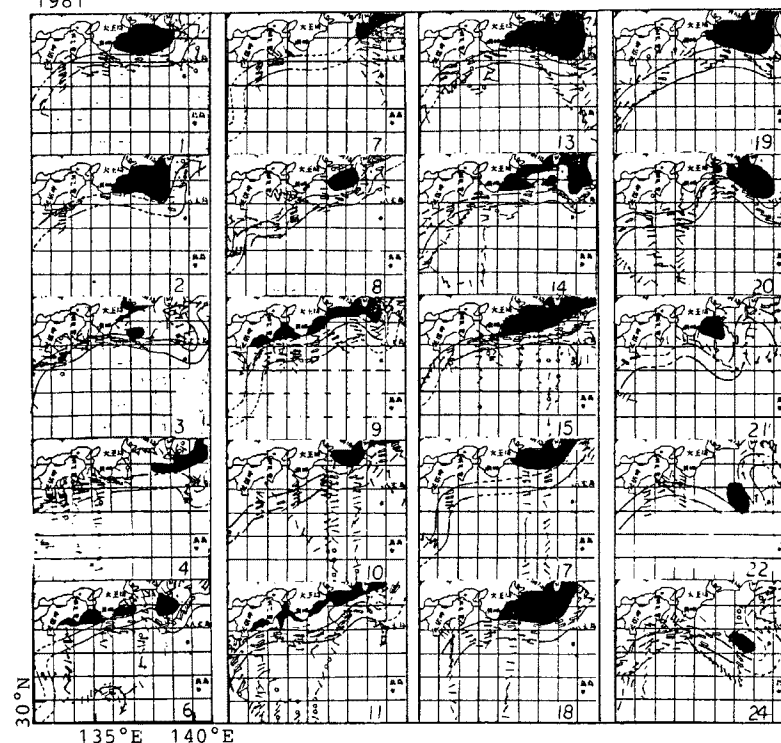
(a) ○ 0-0.2kn ← 0.3-0.9kn ← 1.0-1.9kn ← greater than 2.0kn
 ● less than 12°C at 200m depth



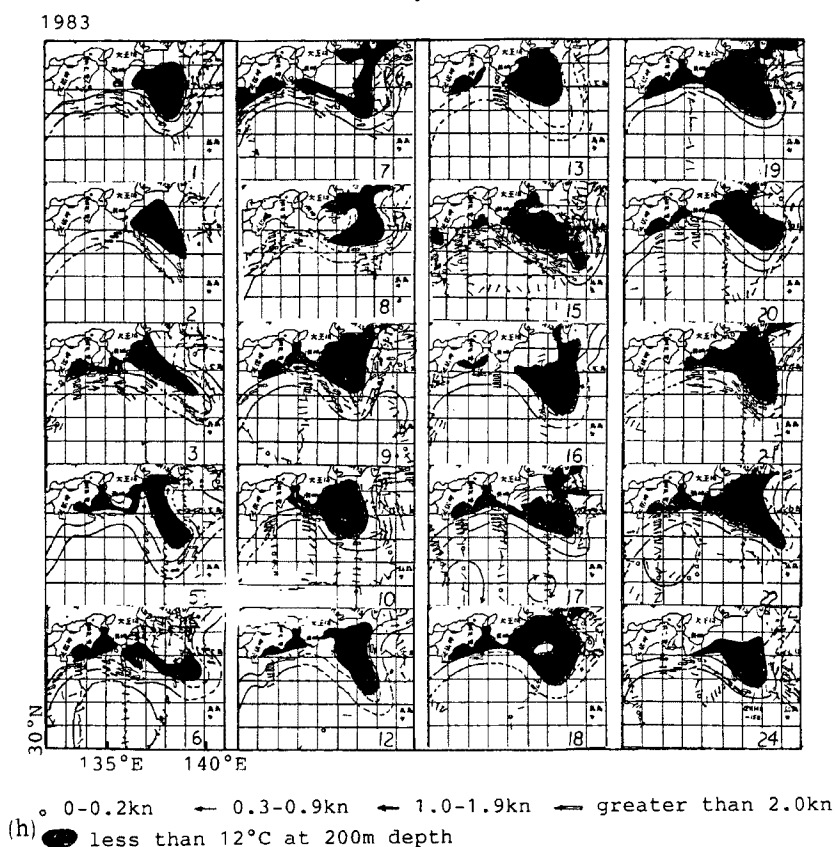
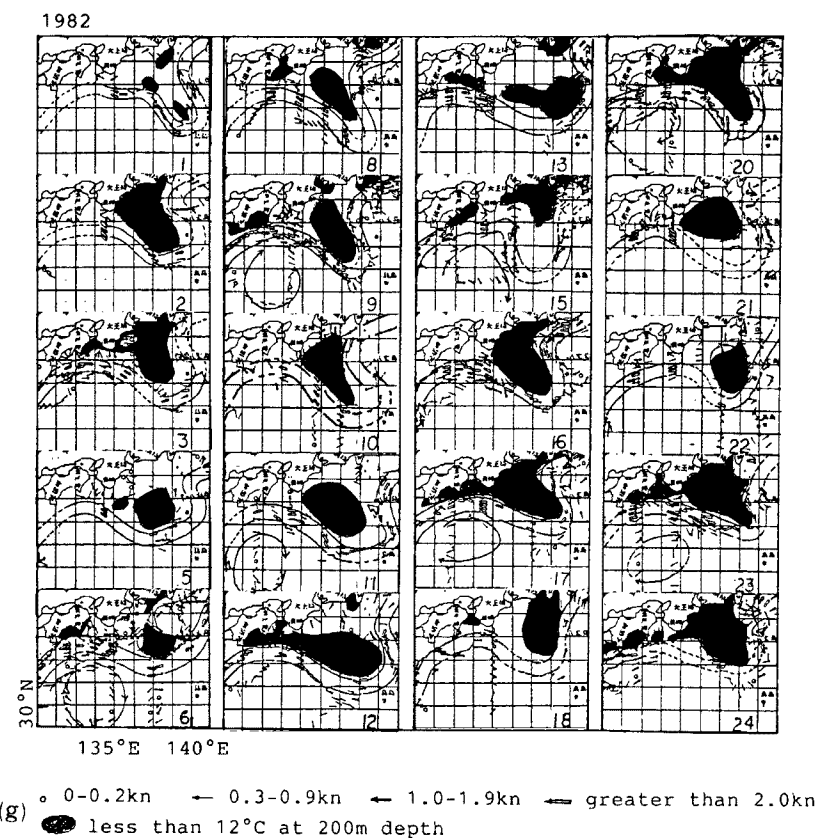
(b) ○ 0-0.2kn ← 0.3-0.9kn ← 1.0-1.9kn ← greater than 2.0kn
 ● less than 12°C at 200m depth

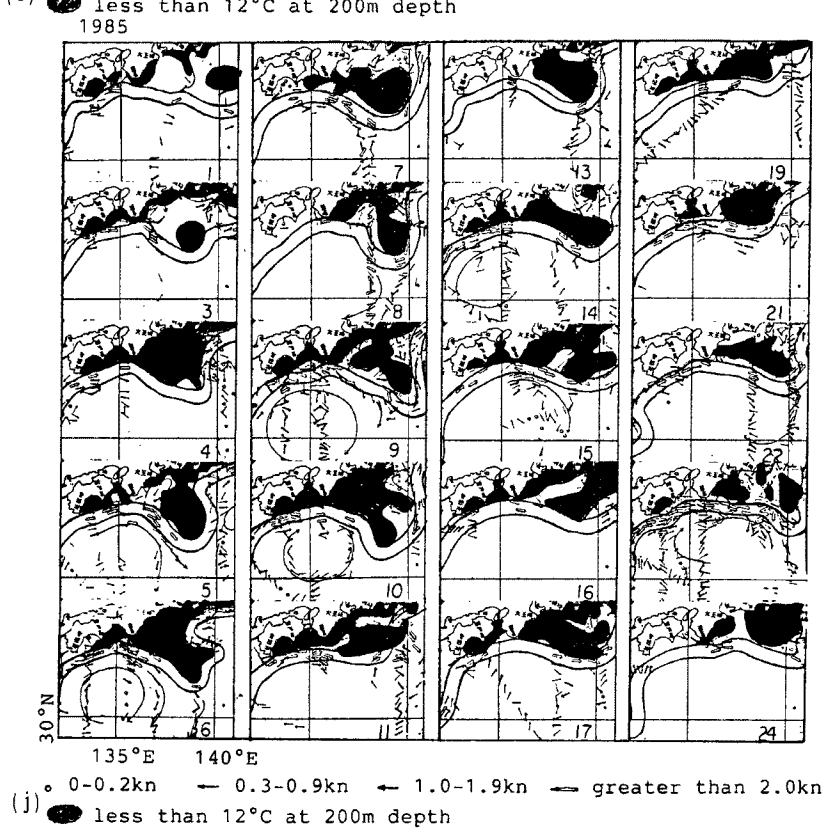
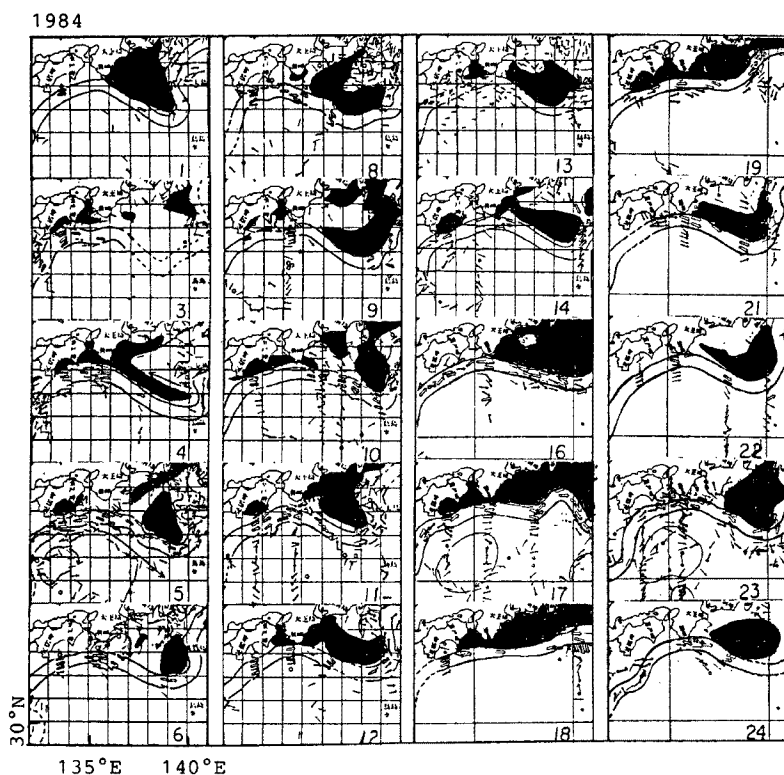


1981



9





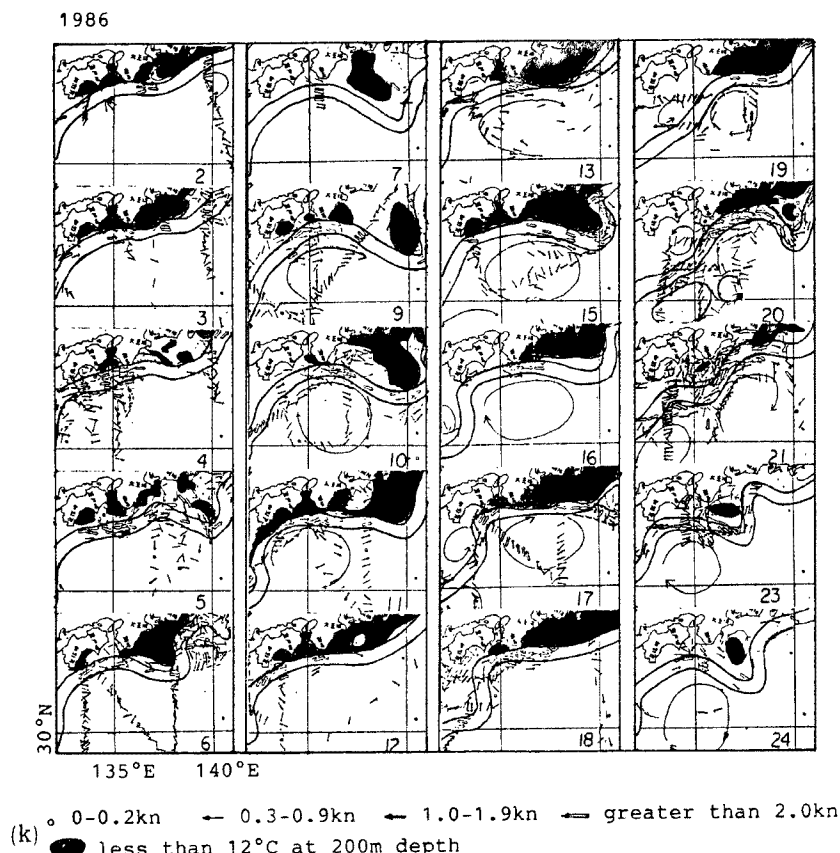


Fig. 4. Sequential map of the Kuroshio path and area where water temperature at 200 m depth is below 12°C.

(a) 1976, (b) 1977, (c) 1978, (d) 1979, (e) 1980, (f) 1981,
(g) 1982, (h) 1983, (i) 1984, (j) 1985, (k) 1986

号に示した流況から判断されるように、潮岬以西の海域に生じた大規模な反流によるもので、継続期間が長いのが特徴である。これと同様のケースは1979年の4月下旬から6月上旬にもみられ、この場合にも2ヶ月以上の継続期間となっている。

1978年：大規模蛇行のパターンは不安定であるが、黒潮の流軸は30°Nまで南下して蛇行しており、海面変動の外洋成分は極めて小さい。

1979年：4月と8月に冷水塊を分離しており、その後に海面の上昇を生じている。特に、8月には海面の低下が著しく、大規模反流の生じた9月下旬から10月にかけて遠州灘で生じた海面の上昇が西進していることがわかる（Fig. 3 (d)）。2回の冷水塊の分離と、9～10月の大規模反流の発生後、大規模蛇行が消滅している。

1980年：中小規模の蛇行から直進型へと移行。1月に遠州灘での反流による海面上昇、9,10月に潮岬以西での海面上昇がみられる。後者は都井岬沿岸の緩水域が北上したためであると考えられる。

1981年：小規模なB型、C型蛇行と、直進型をくり返している。4月上旬および9月の異常潮は、足摺岬沖の小規模な蛇行による反流渦の放出によるもので、10月下旬-11月上旬のものは、遠州灘での反流によるものと考えられる。

1982年：中規模のB、C型蛇行へ移行しており、遠州灘での反流により4-5月、8月下旬-9月上旬および10月に異常潮が生じている。

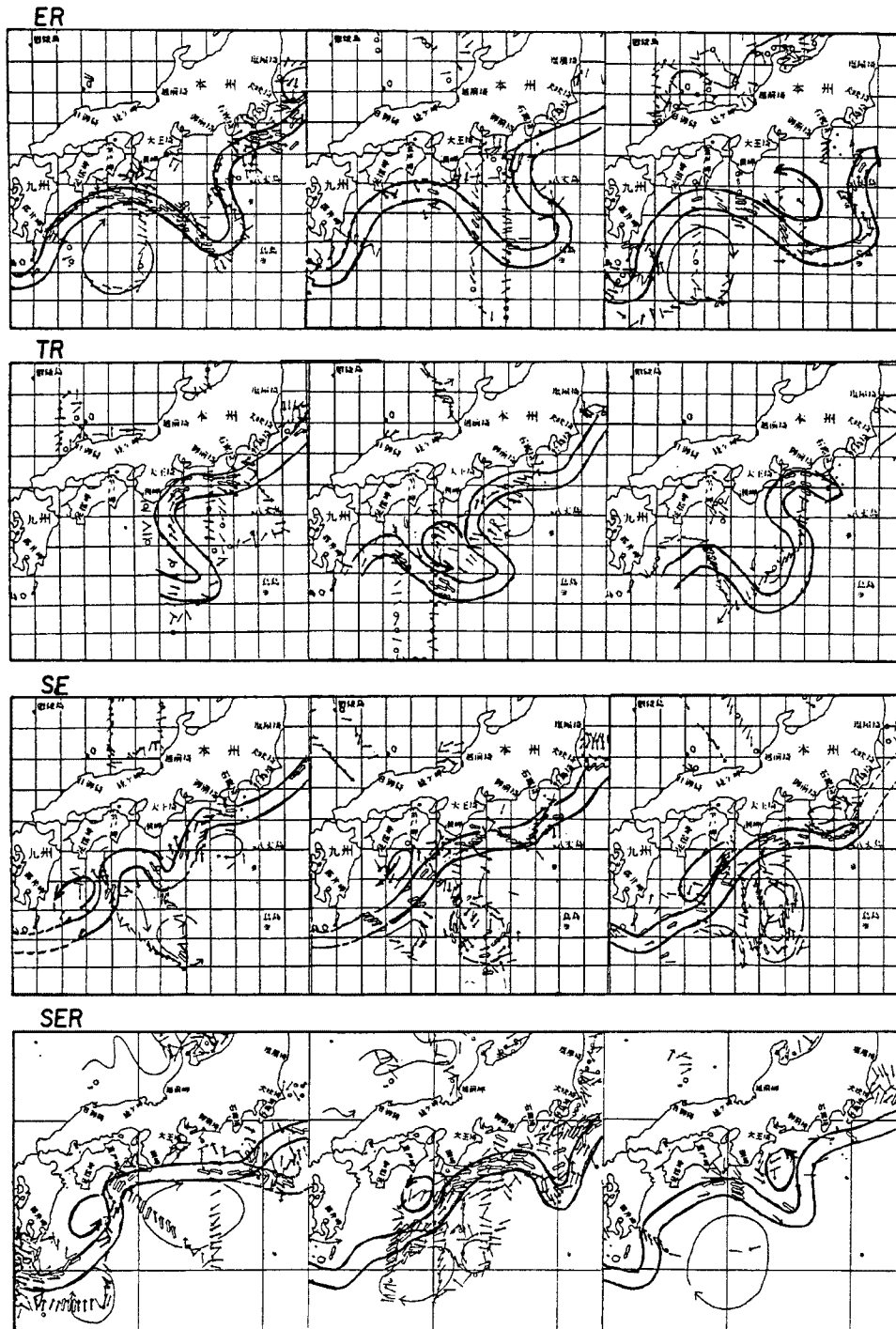
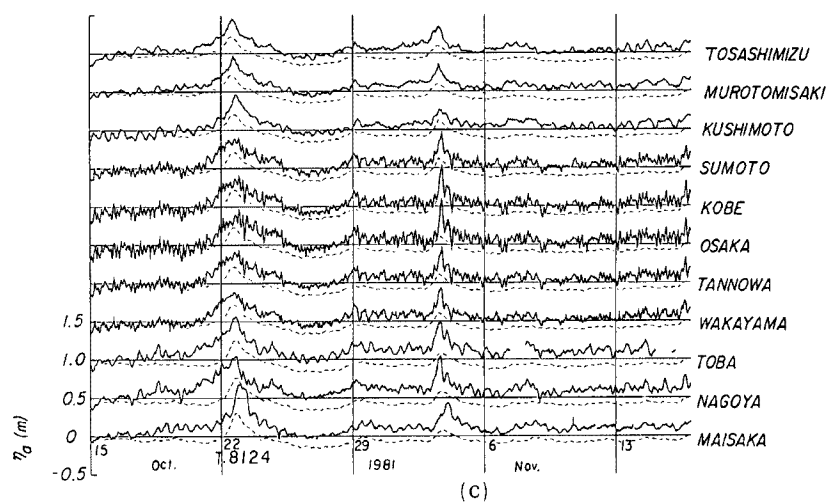
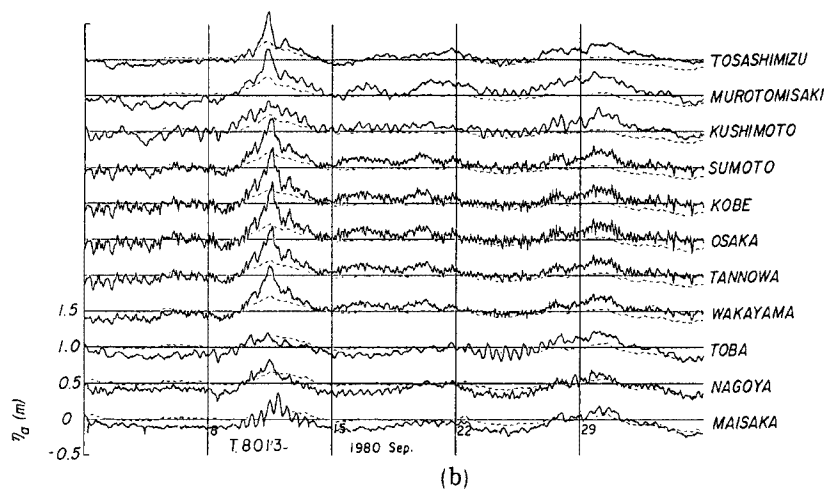
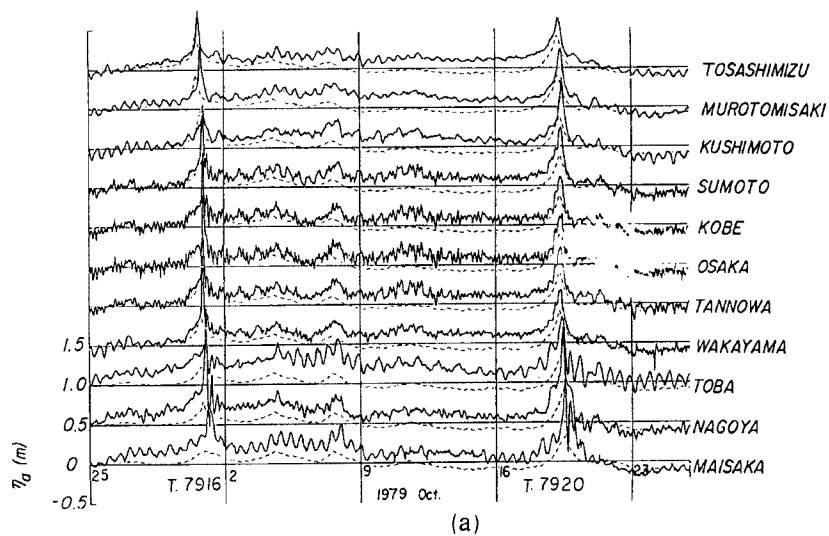
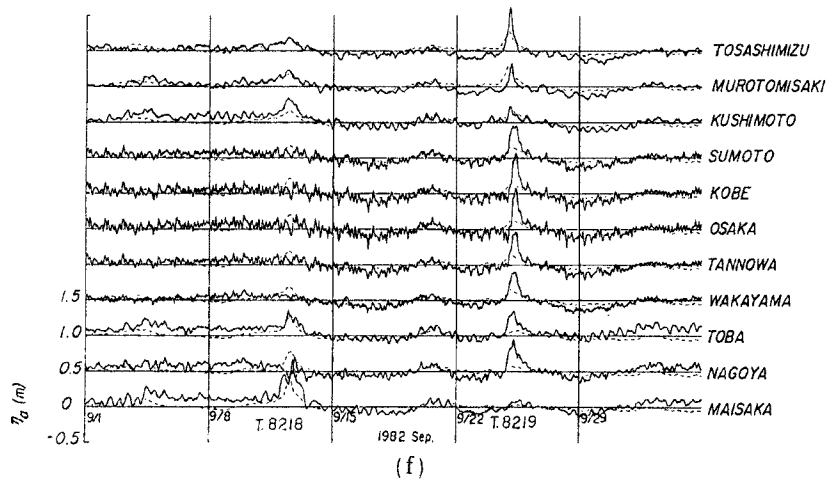
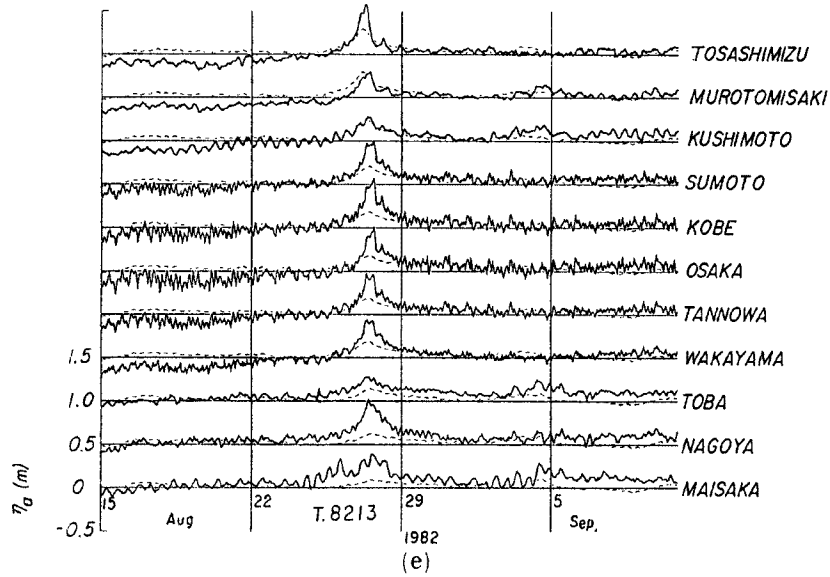
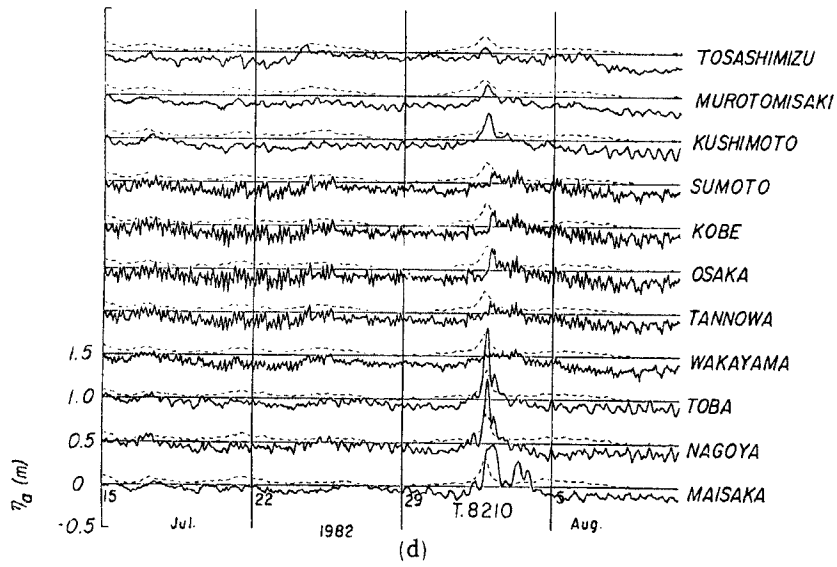


Fig. 5. Typical patterns of Kuroshio path in which unusual tides are observed.





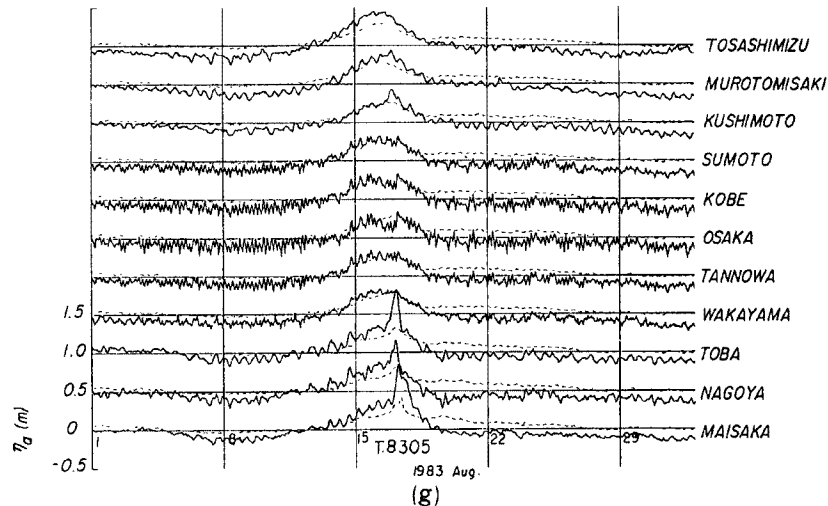


Fig. 6. Profiles of storm surges.

- (a) Typhoon 7916 and 7920, (b) Typhoon 8013, (c) Typhoon 8124,
 (d) Typhoon 8210, (e) Typhoon 8213, (f) Typhoon 8218 and 8219,
 (g) Typhoon 8305

1983年：前年と同様の蛇行パターンが継続し、6-7月に遠州灘の反流による異常潮位がみられる。

1984年および1985年：両年の蛇行パターンおよび異常潮位は極めて類似しており、6月と10-12月に異常潮位が発生している。前者は遠州灘での反流によるものであり、後者はこの反流と、足摺岬沖での小規模反流渦の放出型との混合したタイプである。

1986年：小規模B、C型蛇行とN型とのくり返しパターンであり、3度の異常潮位が発生している。第1は3月のもので、遠州灘、熊野灘での反流型、第2は8-9月に生じ、足摺岬からの反流渦の放出型、第3は11月下旬から12月の遠州灘での反流型である。

以上の各年毎の異常潮位の発生と黒潮流路との検討から、西日本の太平洋岸における異常潮位の発生パターンは、次の4通りに分類される。

1. 遠州灘に発生する反流型（ER型）：大蛇行期および中小規模の蛇行期に発生する最も典型的なパターンで、伊勢湾を含む遠州灘沿岸に20～30cm程度の年平均海面からの上昇が生じる。1～2ヶ月の継続期間で、海面上昇は西進し、大阪湾・紀伊水道、土佐湾にも影響を及ぼす。

2. 足摺岬沖で発生した小規模蛇行が反流渦を放出する型（SE型）：蛇行の不安定期、すなわち大蛇行の衰退期、直進型から中小蛇行への移行期に発生し、主に潮岬以西の海域に1ヶ月以内の異常潮位をもたらす。

3. 潮岬以西に発生する反流型（TR型）：大規模蛇行期に冷水塊の分離に伴って生じ、3ヶ月以上に及ぶ長期の異常潮位となることも稀ではない。

4. ER型とSE型との結合型（SER型）：遠州灘でER型が継続している期間に、足摺岬沖でSE型の小規模蛇行が生じると、潮岬以西の海域に大きな異常潮位が発生する。

以上の4タイプと異常潮位との対応をFig. 3に記号で示すとともに典型的な例をFig. 5に示した。

3.2 異常潮位と高潮の forerunner との関係

高潮の forerunner の発生機構は、これまでに明確にされておらず、西日本の太平洋沿岸の高潮には顕著な forerunner の認められるものとそうでないものがあり、黒潮等の外洋条件に起因すると想像されていた。ここでは、1979-1983年に発生した高潮の偏差と前述した異常潮位（外洋成分 η_k ）との対応を

示すことで, forerunner が外洋成分 η_k である可能性が高い事を示す。

対象としている11年間で最も顕著な高潮は台風7916号(1979年9月30日)および7920号(1979年10月20日)による高潮⁶⁾であり, 両者ともに20~25 cmの forerunner が生じていた。これは明らかに, 前述した1979年9月下旬から10月にかけての異常潮位に高潮が重ったために高潮波形に forerunner が現われていることがわかる。その他の7例の高潮波形とともに Fig. 6 (a) ~ (h) に示したが, これらからも forerunner は外洋成分の異常潮位の一部であり, 異常潮位の発生していない台風8013, 8210, 8219号による高潮には forerunner は観測されていない。

4. 結 語

11年間の検潮記録と黒潮流路データとを用いて, 黒潮の変動に起因すると考えられる海面変動の外洋成分を抽出し, 黒潮流路パターンとの関係で異常潮位の発生する条件を明らかにした。さらに, 異常潮位と高潮の forerunner との関係を検討した結果, 以下の結論を得た。

1) 異常潮位の発生する4通りの黒潮流路パターンを示した。潮岬を境界としてその東西での異常潮位の発生形態は異っており, 東側の海域では, 遠州灘に発生する黒潮の逆流が異常潮位の主要因であり, 1~2ヶ月間継続し, 中小規模蛇行時に年2~3回の頻度で発生する。また, 遠州灘で発生した異常潮位は西進し, 大阪湾・紀伊水道および土佐湾沿岸にも影響を及ぼす。

2) 一方, 西側の海域では, 大規模蛇行時に形成される潮岬以西の反流型と小規模蛇行期に生ずる足摺岬沖での小蛇行の伝播に伴う反流渦の放出型とが異常潮位の発生要因であり, 前者は3ヶ月以上にも及ぶ長期間継続することも稀ではないが, 後者は1ヶ月以内である。

3) 中規模蛇行期に遠州灘での反流と足摺岬沖からの小規模蛇行に伴う反流渦放出型とが重なることがあり, この場合, 大阪湾・紀伊水道, 土佐湾沿岸に大きな異常潮位が発生する。

4) 西日本の太平洋岸における高潮の forerunner は黒潮の変動に起因する異常潮位の一部である可能性が高い。

最後に黒潮の変動に伴う異常潮の発生機構を考察するに当たり, 有益な議論をしていただいた京都大学防災研究所吉岡 洋助手に感謝するとともに, 検潮データ, 推算潮位を提供して下さった気象庁海洋気象部浅田暢彦部長, 小西達男技術専門官に謝意を表明する。

参 考 文 献

- 1) Isozaki, I.: Unusually high mean sea level in September 1971 along the south coast in Japan, 気象研究所研究報告, 第23巻, 第4号, 1972, pp. 243-257.
- 2) 安田秀一: 豊後・紀伊両水道間の日平均潮位差と瀬戸内海の貫流, 中国工業技術試験所報告, No. 17, 1982, pp. 41-51.
- 3) Kawabe, M.: Sea level variations at the Izu: lands and typical stable paths of the Kuroshio, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 41, 1985, pp. 307-326.
- 4) 中央気象台: 海洋観測指針, 1955, pp. 225-252.
- 5) Kuroshio Exploitation and Utilization Research (KER) summary report, 1985, p. 125.
- 6) 土屋義人・中村重久・山下隆男・岡 扶樹: 台風7916号による大阪湾・紀伊水道の高潮, 京大防災研年報, 第24号, B-2, 1981, pp. 475-484.