

2. 海岸防護への影響に着目した検討

2-1 海面上昇の実態分析と潮位設定についての検討

a) 日本沿岸の海面上昇量の実態分析

「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（平成20年6月、社会資本整備審議会答申）」において、海岸域では予想される高潮の増大に対し、施設更新時等に合わせ海岸堤防を段階的に嵩上げすることが適応策の1つとして提案されている（2-4にて詳述）。このためには海水面の上昇量を見積もる必要がある。

全国14の験潮場について、地盤変動の影響を取り除き潮位変動量を算出してみた。朔望平均満潮位の変動量について示したものが図-II. 2. 1. 1である。潮位変動量を1980年以降で算出したものも合わせて示した。その結果、地球温暖化の影響が現れていると言われる1970年代後半以降である1980年以降の潮位変動量は3mm/年前後となっていた。

我が国沿岸の潮位変化について、観測箇所数が多く確保できる1988年以降の験潮場の年平均潮位の変化速度、衛星高度計(1993年-2003年)の各験潮場近傍の格子点で算出した海面上昇速度を比較したものが図-II. 2. 1. 2である。図にはIPCC第4次評価報告書で示された衛星高度計観測値(1993年-2003年)の全球平均の海面上昇量3.1mm/年も入れてある。験潮場の変化速度と近傍の衛星海面高度計の海面上昇速度は一致しない場所もあるが、全体的に両者とも全球平均値3.1mm/年の前後に分布する。半島や離島では3.1mm/年から大きく離れる場所が多いが、これらの地点では海流流路の変動による水位変化を含んでいることが要因と考えられる。海面上昇を、験潮場や沿岸ごとに算出する方法も考えられるが、前述したとおり験潮場の潮位変化速度と近傍の衛星海面高度計で値が異なる場合もあること、海流流路変動の周期に比較して十分に長い期間のデータが得られないこと踏まえると、現状では日本沿岸一律3.1mm/年で見積もる方法が無難と考えられる。

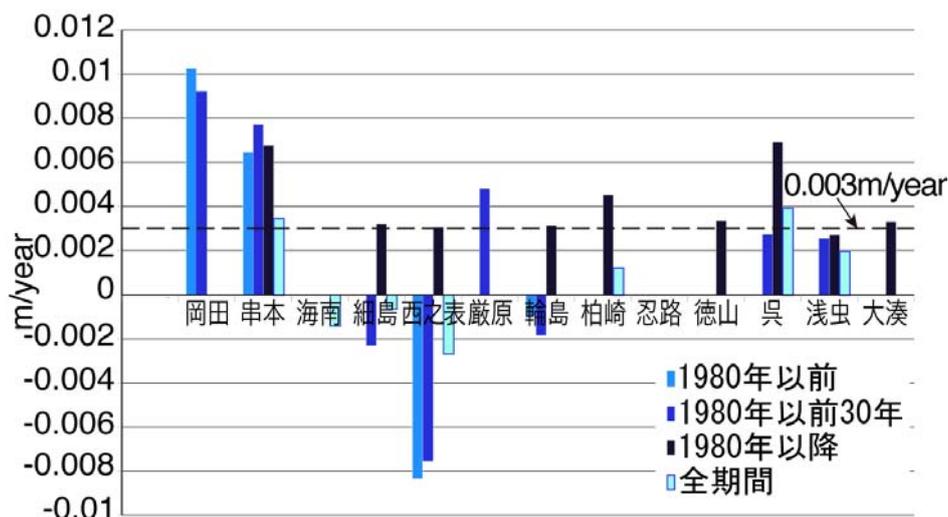


図-II. 2. 1. 1 朔望平均満潮位の変動量

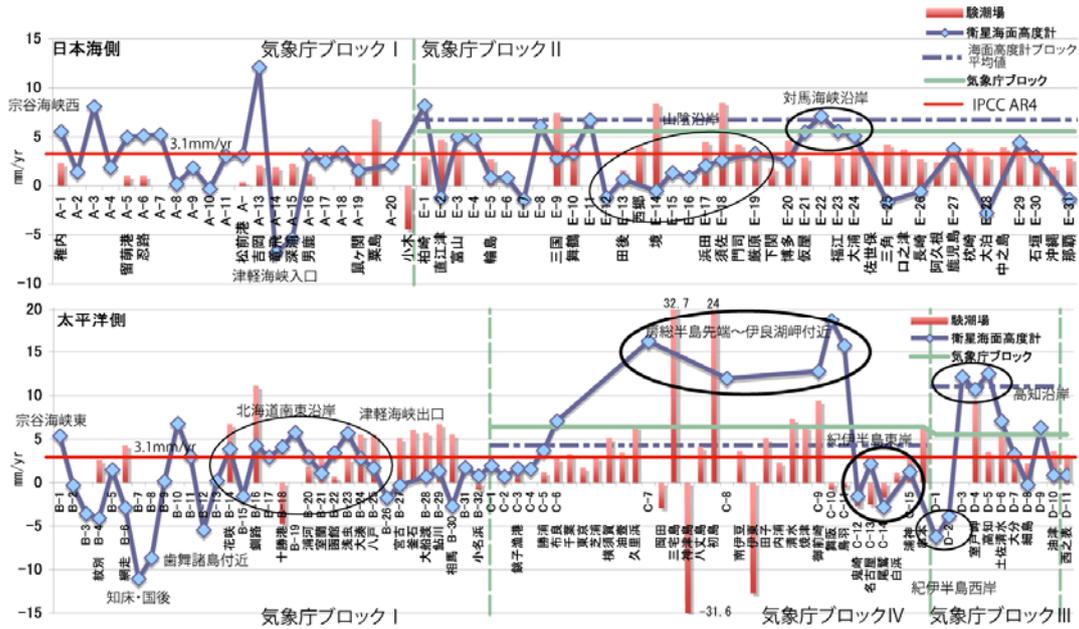


図-Ⅱ.2.1.2 衛星と験潮場の海面上昇速度比較（左ほど北）

2-2 極端現象を引き起こす気象擾乱の経年変化特性の分析

気候変動による海岸での外力変化として、海水面の上昇とともに台風の激化による波浪の増大が懸念されている。波浪の増大あるいは波浪の起動力である台風等の気象擾乱の激化がこれまでに生じているかについて、波浪観測データ及び天気図をもとに分析を試みた。

気象が海象を形成するので海象は気象現象の積算結果と言える。そこで、本研究では日本周辺を海象を特徴付ける台風・低気圧の移動特性に従って区分した。台風の経路と日本列島の形状を考慮し、6つの領域に区分した(図-Ⅱ.2.2.1)。南北に2つに区分する線として関東地方から中国地方を縦断

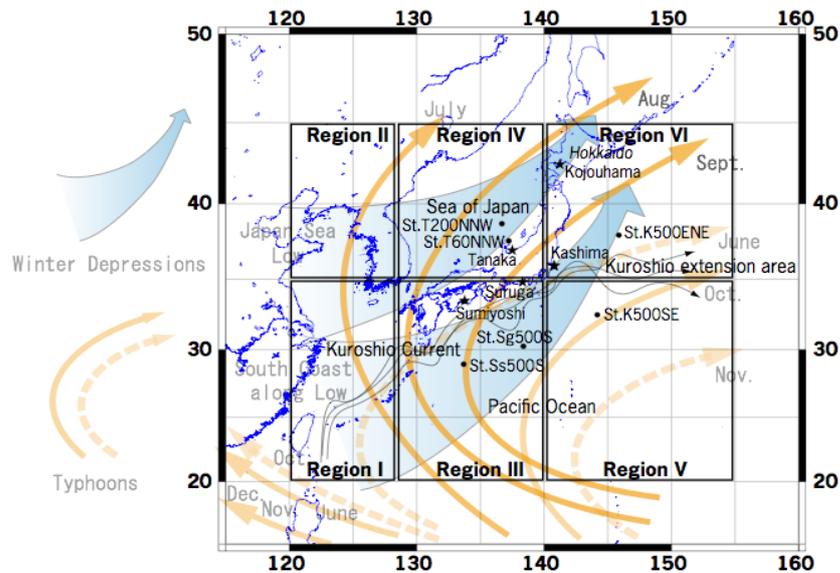


図-Ⅱ.2.2.1 波浪変化についての区分

する北緯 35 度線を用いた。東側として東北地方と伊豆諸島付近を通過する東経 140 度線を、西側を分けるものとして朝鮮半島から沖縄本島を通過する東経 128 度線により区分した。これにより縦の 3 列は台風の通過時期や経路の違いを反映でき、南北の 2 行により低気圧の経路を反映できる。

図-Ⅱ.2.2.2 に年最大波高及び上位 10 位までの年平均値の変化を示す。これらの値から、上昇傾向を見ることは出来ない。これは、気候の変化が緩慢であり年ごとのばらつきに埋もれてしまうことや波浪の発生成長が広い気象状態の集積の結果によるものであるからと考えられる。このため上位値を用いた統計解析では、気候の変化が表出しづらいと考えた。

年間の代表波浪の変化傾向（解析の過程）

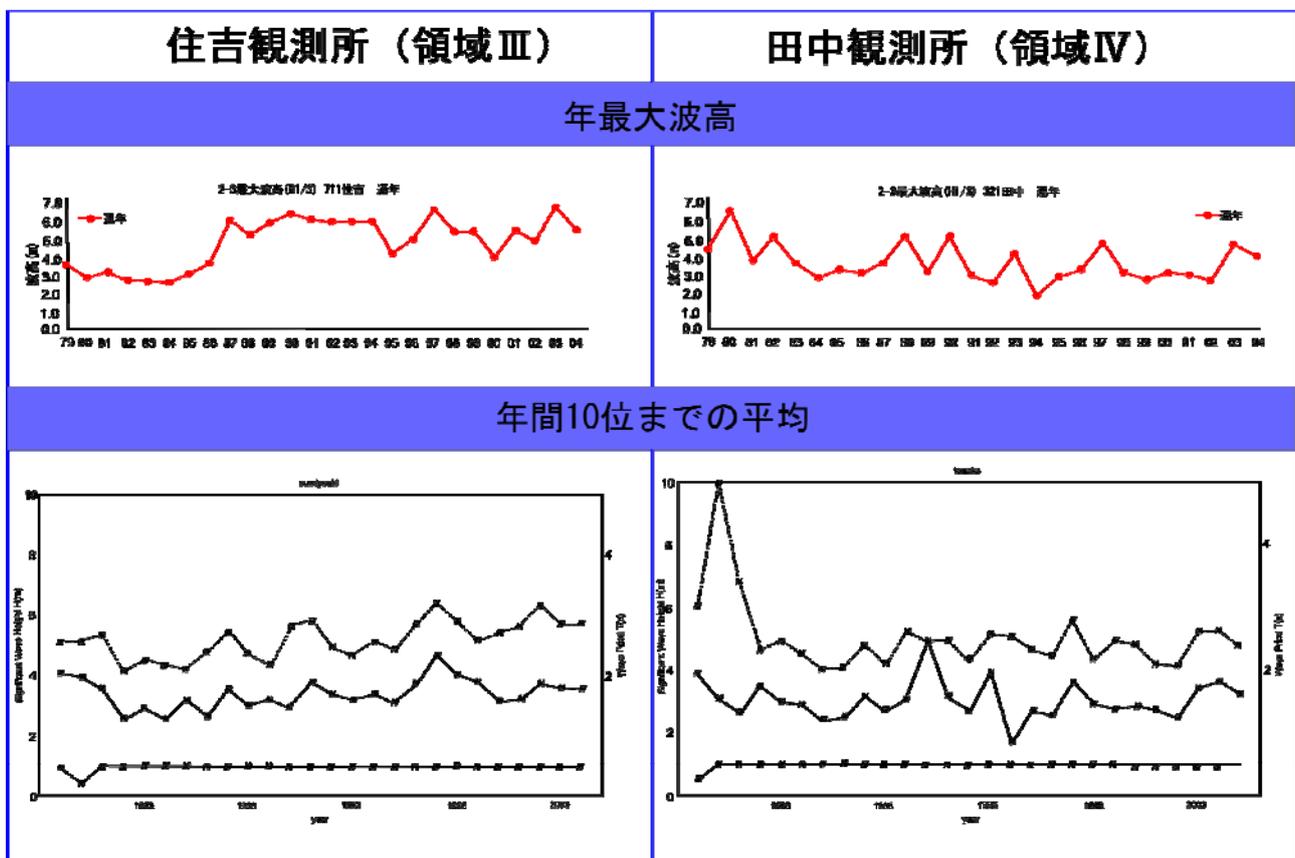


図-Ⅱ.2.2.2 上位値を用いた統計に依る経年変化

海岸へ来襲する外力は、多方向の発生源から総和であり、かつ発生源から伝播する間の気象の集積値であると言える。また、海岸地形変化は、波高と周期の組合せにおいて両者の広い帯域にわたる影響を受ける。そこで、波高と周期を結合したエネルギーフラックス（ H^2T として）を用いることとした。これにより、その地点へ来襲する総エネルギーとして算出できることとなる。

波高と周期の対についてそれぞれ一波とした時のエネルギーフラックスを算出して頻度を乗じ、総和を算出しその年のエネルギーフラックスとした。その際に閾値として、波高、周期、エネルギーフラックスについて設定した。波高とエネルギーフラックスについては 1990 年から 4 年間のエネルギ

一平均波の波高またはエネルギーフラックスの平均値、周期はうねり性とされている8秒を閾値とした。

これによる経年変化を示したのが図-Ⅱ.2.2.3である。日本海に面する徳光、西園の両観測所では、近年来襲する波浪エネルギーが増大していることがわかる。また、田中観測所においても若干の増加傾向がうかがえる。一方、日吉津観測所では大きな変化が見られない。これは、徳光、西園の両観測所はともに冬季風浪が直接来襲する西に開いた海岸に面するが、日吉津の両観測所は、島根半島の遮蔽域となっている地形的な特徴による。領域Ⅲに位置する駿河海洋、城南、住吉の各観測所では、高波浪の来襲エネルギーが増大している。

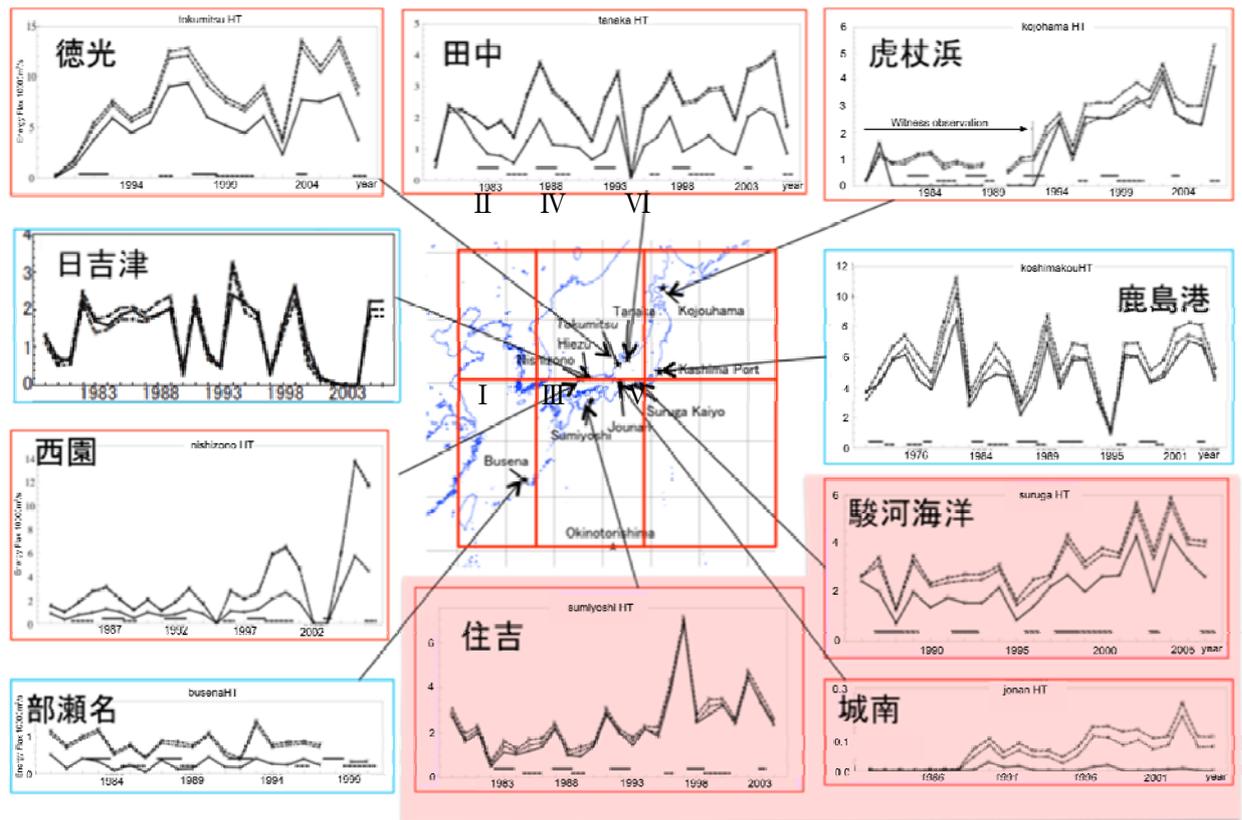


図-Ⅱ.2.2.3 年間エネルギーフラックスの変化

次に、主な高波浪や高潮の原因である低気圧・台風について調べた。我が国では1883年より天気図が作成されているが、すべての天気図に緯度線と経度線が表記されるようになったのは1915年からである。そこで、1915年から2007年1月までの印刷天気図を収集し、北緯20度～北緯46度、東経122度～東経153度の範囲で中心気圧が990hPa以下となった台風を含む低気圧を抽出し、中心気圧や位置のデータベースを作成した。なお、1951年以降の台風については気象庁ベストトラックデータを使用した。データベースの記述を、中心気圧は1hPa単位、中心位置の緯度経度は1度単位とした。1958年8月以降は、現在の印刷天気図形式となっているが、低気圧や台風の中心位置や中心気圧が表示されたのは1965年11月からである。それ以前のものについては、閉じた等圧線の中心付近を中心位置とし、中心気圧は閉じた等圧線の一番低い等圧線の値とした。また、台風は天気図上や概況分に中心気圧が表記されている場合はその値を採用した。ただし、初期の天気図では、何mm Hg以下と表現されているので、その値を中心気圧とした。

このデータベースから図-Ⅱ.2.2.1 で区分した領域毎に、各領域を通過する台風・低気圧の年間個数を図-Ⅱ.2.2.4 に、それらの領域内での最低気圧を年毎に平均したものを図-Ⅱ.2.2.5 に示す。

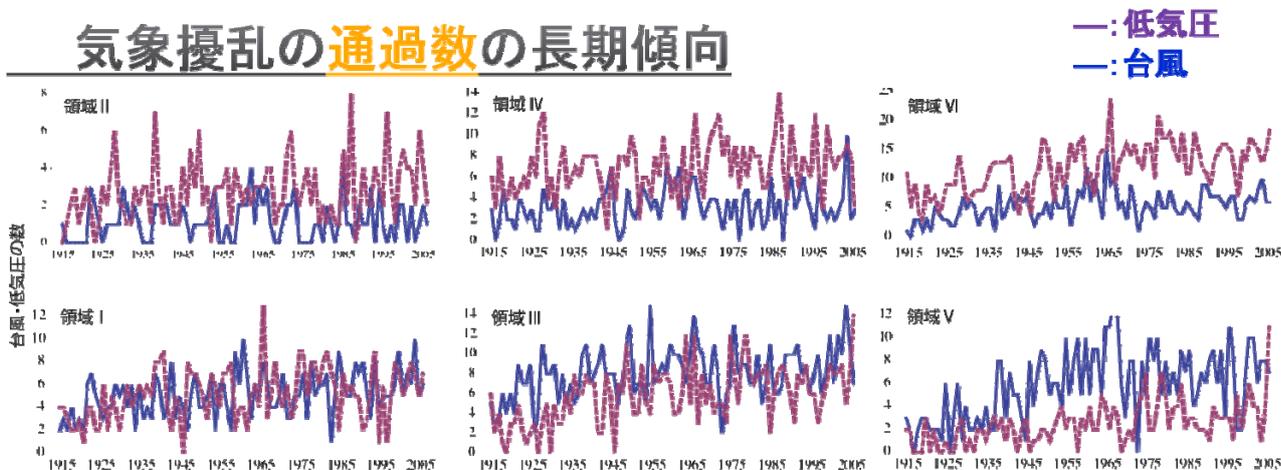


図-Ⅱ.2.2.4 ブロックを通過した台風・低気圧の個数の変化

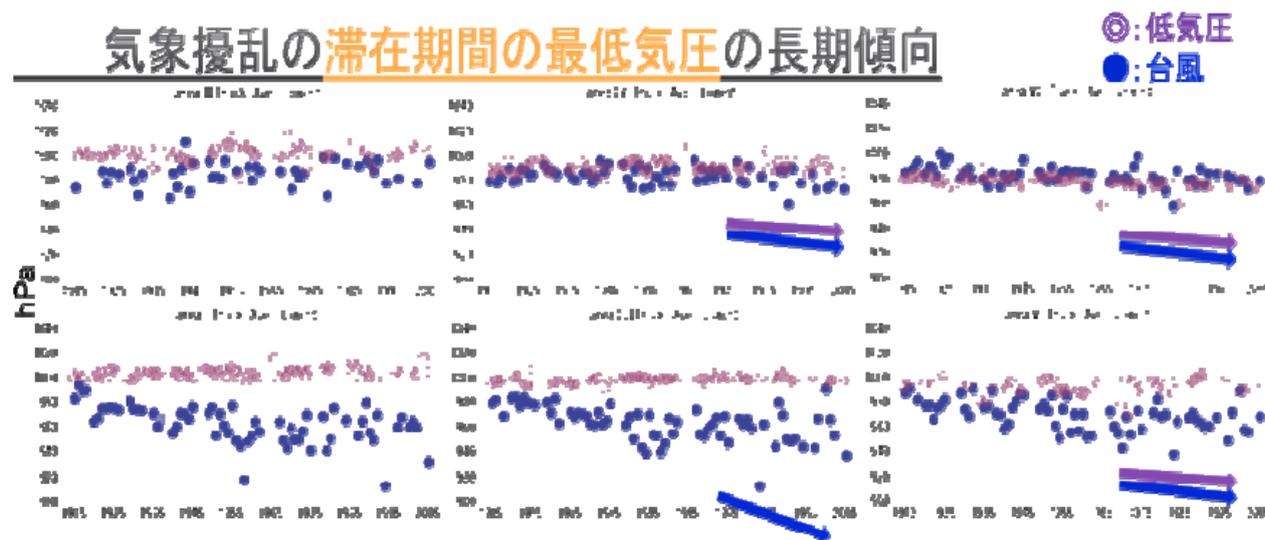


図-Ⅱ.2.2.5 ブロック内に滞在した間の最低気圧の変化

台風の発生域に近い領域 I、III、V では長期として見ると、近年は来襲数（通過数）、滞在時間ともに安定している。図-Ⅱ.2.2.3 で見たように台風の影響を強く受ける領域 III にある住吉観測所や駿河海洋観測所の来襲波浪エネルギーは上昇していた。そこで、領域 III の海象観測期間である 1979 年以降を中心に見ると、台風数は増加傾向にあり通過台風の最低気圧の年平均値（右端）も大きな低下傾向にあり年々台風の勢力が強くなっている。さらに、1915 年に比べ平均値で 40hPa 低下している。これが住吉、駿河両観測所の高波浪の増大として現れている可能性がある。

一方、図-Ⅱ.2.2.3 における徳光観測所や田中観測所の増加傾向の要因は、図-Ⅱ.2.2.4 の領域 IV から想定できない。しかし、領域 VI において低気圧が来襲数、滞在時間ともに増加傾向にあり、2008 年 2 月 24 日に生じたような大型の低気圧と付随して生じる気圧の谷が強化している可能性を示唆している。

2-3 気候変動が高潮外力に及ぼす影響の見積もり

国土技術政策総合研究所は、財団法人地球科学技術総合推進機構（平成22年3月31日解散）との共同研究により文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムへ参画している。このプログラムで得られた予測データの活用し、同プログラムの京都大学防災研究所と連携して、気候変動に伴う台風の変化（コース等のシフト）による高潮偏差の生起確率の変化を試算した。

京都大学防災研究所が同プログラム内で気象研究所が実施した温暖化予測結果を用いて、統計的に有意となるようにモンテカルロ法を用いた確率台風モデルにより現在気候および100年後の将来気候についてそれぞれ10,000年分の台風を作成した（京大防災研確率台風(ver. H21)）。台風は計算メッシュごとの既存の台風通過情報から確率分布と乱数により移動、成長、消滅を再現される。国土技術政策総合研究所は、この作られた台風より東京湾、伊勢湾、大阪湾に影響を及ぼす台風を抽出し、それらについて高潮・波浪推算を実施した。

偏差を階級に分け、それら区分内の頻度の変化を図-II.2.3.2に示した（横軸に示した数字は、図-II.2.3.1に示した地点の位置に付された番号を意味する。）。現在気候から将来気候への頻度の変化を「頻度の変化量」を「現在気候と将来気候の頻度の和」で除したもので表現している。これにより現在気候では発生せず将来気候では発生した場合は1で表現され、逆に現在気候で存在したが将来で発生しない場合には-1として表現することが可能となる。0.5は、将来気候の頻度が現在気候の3倍となる。1となったものについてはマークの大きさにより頻度を示した。この図では、変化を確率密度ではなく頻度の実数により求めている。

高潮偏差が0.5mまでの低い区分では3つの湾とも負の値となっており減少している。東京湾では現在気候で出現しない2m以上の偏差が将来気候では沿岸のほぼ全体で生じている。このように、現在気候では高潮偏差が大きい湾口部や来襲頻度が低い東京湾で、将来において中程度以上の高潮偏差の頻度が上がる可能性を示している。一方、大阪湾および伊勢湾の湾奥部では現在気候でも3mを越える偏差が発生しており、将来気候では頻度が増す結果となっている。

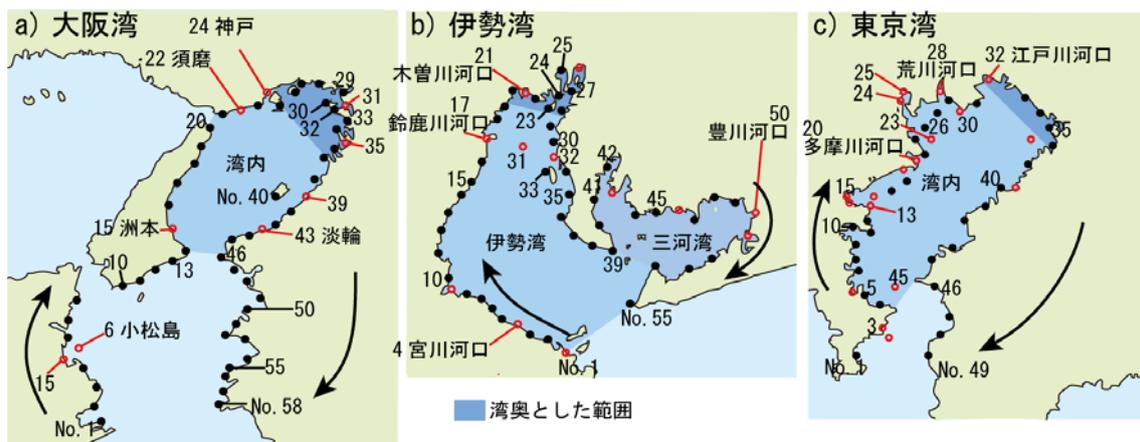


図-II.2.3.1 算出した地点の位置

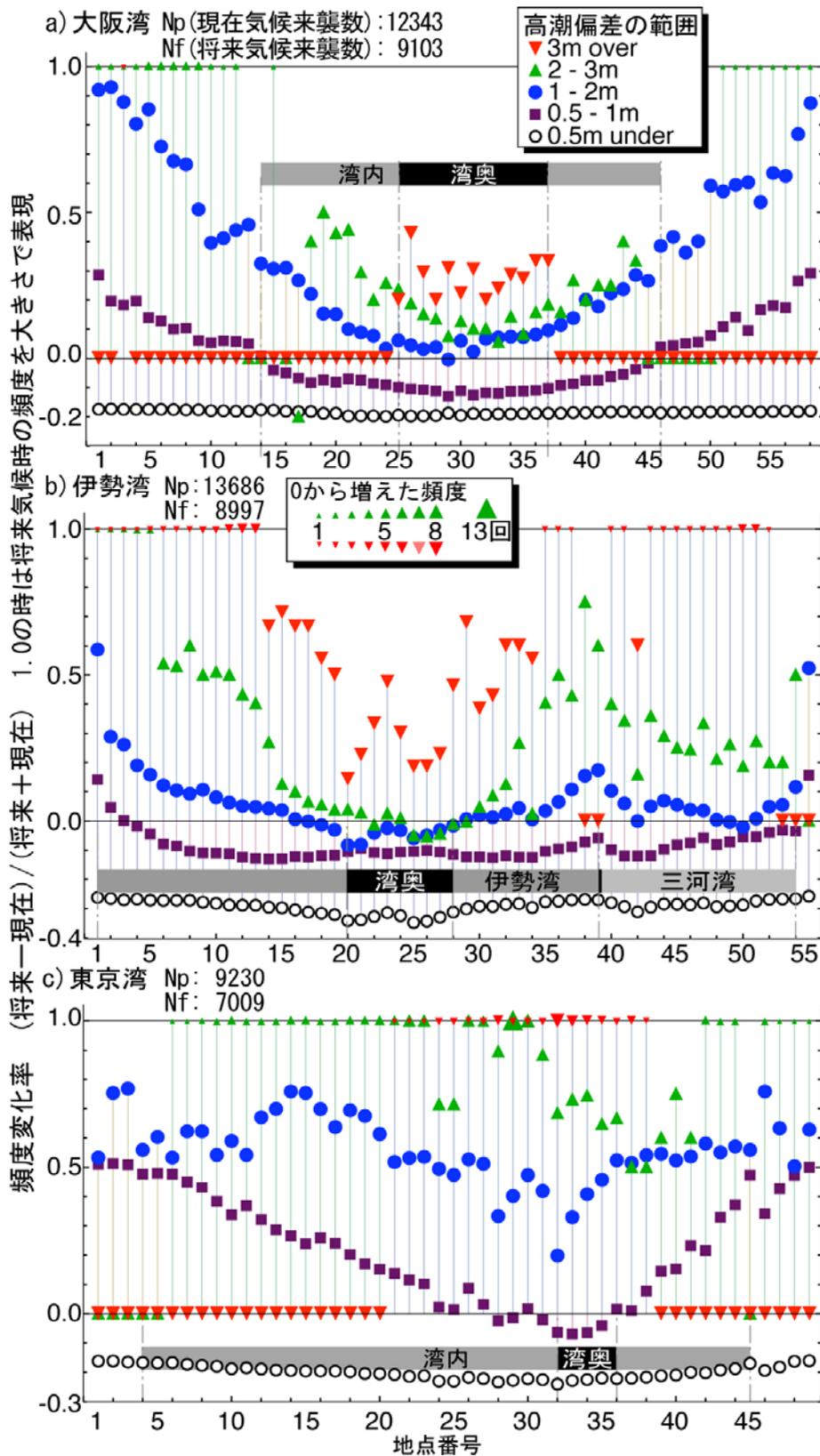


図- II . 2 . 3 . 2 極値解析の結果を用いた高潮偏差の変化

2-4 海岸防護構造物を対象にした気候変動を考慮したマネジメント

図-Ⅱ.2.4.1は、気候変化に伴う高潮の外力変化と海岸堤防の嵩上げ必要量の関係を示したものである。嵩上げ必要量は、平均海水面の上昇分 ΔZ_a 、潮位偏差の増加分 ΔZ_b 、波浪打上げ高の増加分 ΔZ_c の3つに分けることができる。

海岸防護施設に対する気候変化の影響は、海面上昇と台風等の激化に分けられる。台風等の激化は、潮位偏差の増大と波浪の増大をもたらすので、 ΔZ_b と ΔZ_c に効く。海面上昇は、一見 ΔZ_a のみに効くと思いがちだが、海岸堤防が存在する砕波後の打上げでは水深が大きいほど打上げ高が増すので、海面上昇 ΔZ_a と ΔZ_c の両方に効くので注意が必要である。 ΔZ_c は、海面上昇によるもの ΔZ_{c1} と波浪の増大によるもの ΔZ_{c2} に分けられる。

次に、気候変動の研究の進捗と段階的な嵩上げ手順の関係について整理する。IPCC第4次報告書においても、海面上昇については既に観測され今後も確実に生じるものとして扱われている一方、高潮現象の増加や熱帯サイクロン活動の増加については「可能性が高い」としており、今後の研究進捗を待つ部分も多いことから、段階的な嵩上げにあたっては両者を分けて考える。つまり、海面上昇に対する嵩上げ高は、 $\Delta Z = \Delta Z_a + \Delta Z_{c1}$ とし、海面上昇と台風等の激化の両方を考慮した嵩上げ高は、 $\Delta Z = \Delta Z_a + \Delta Z_b + \Delta Z_{c1} + \Delta Z_{c2}$ とする。

このうち、現状の研究進捗状況でも対応可能な、海面上昇に対する波浪うちあげ高増加に伴う堤防の嵩上げ高 ΔZ_{c1} は、海面上昇量 ΔZ_a が与えられれば、うちあげ高・越波量等に関する既往の研究成果を整理することにより、次のような簡易設定が可能である。

$$\Delta Z_{c1} = \Delta Z_a \times 0.7 \quad (\text{堤脚前面に砂浜有。})$$

$$\Delta Z_{c1} = \Delta Z_a \times 1.7 \quad (\text{堤脚前面に砂浜なし (堤脚が水没。)})$$

$$\Delta Z_{c1} = \Delta Z_a \times 1 \quad (\text{堤脚前面に消波工有。})$$

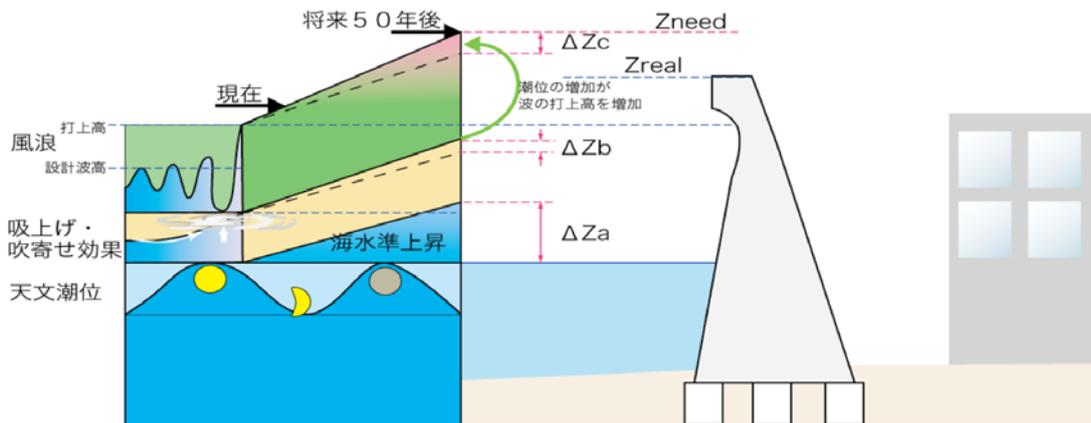


図-Ⅱ.2.4.1 海岸堤防を設定するパラメータと気候変動による影響

海岸堤防の主たる構造である、3面張りの直立堤及び傾斜堤を想定し、嵩上げ必要高が計算できた後に現場の制約等に応じて嵩上げの具体的な工法を選択するフローを図-Ⅱ.2.4.2のとおり整理した。あたりまえのことだが、嵩上げ高が大きいほど、用地等の制約や前面堤脚の状況等で施工条件が厳しくなるほど大がかりな嵩上げ対策工事になってしまう。段階的な嵩上げの第1段として、海面上昇への緊急的な対策として嵩上げを実施する際には現場で活用できるものと考えている。

なお、現状においても海岸侵食や越波が厳しい現場では、上記のような緊急対策ではなく、侵食対策や沖合消波との組み合わせも含めた総合的な検討が必要となる。また、景観や海浜へのアクセスに配慮が必要な現場では、ダブルパラペット化や背後に潮あそびを整備する等の対策検討も必要であろう。

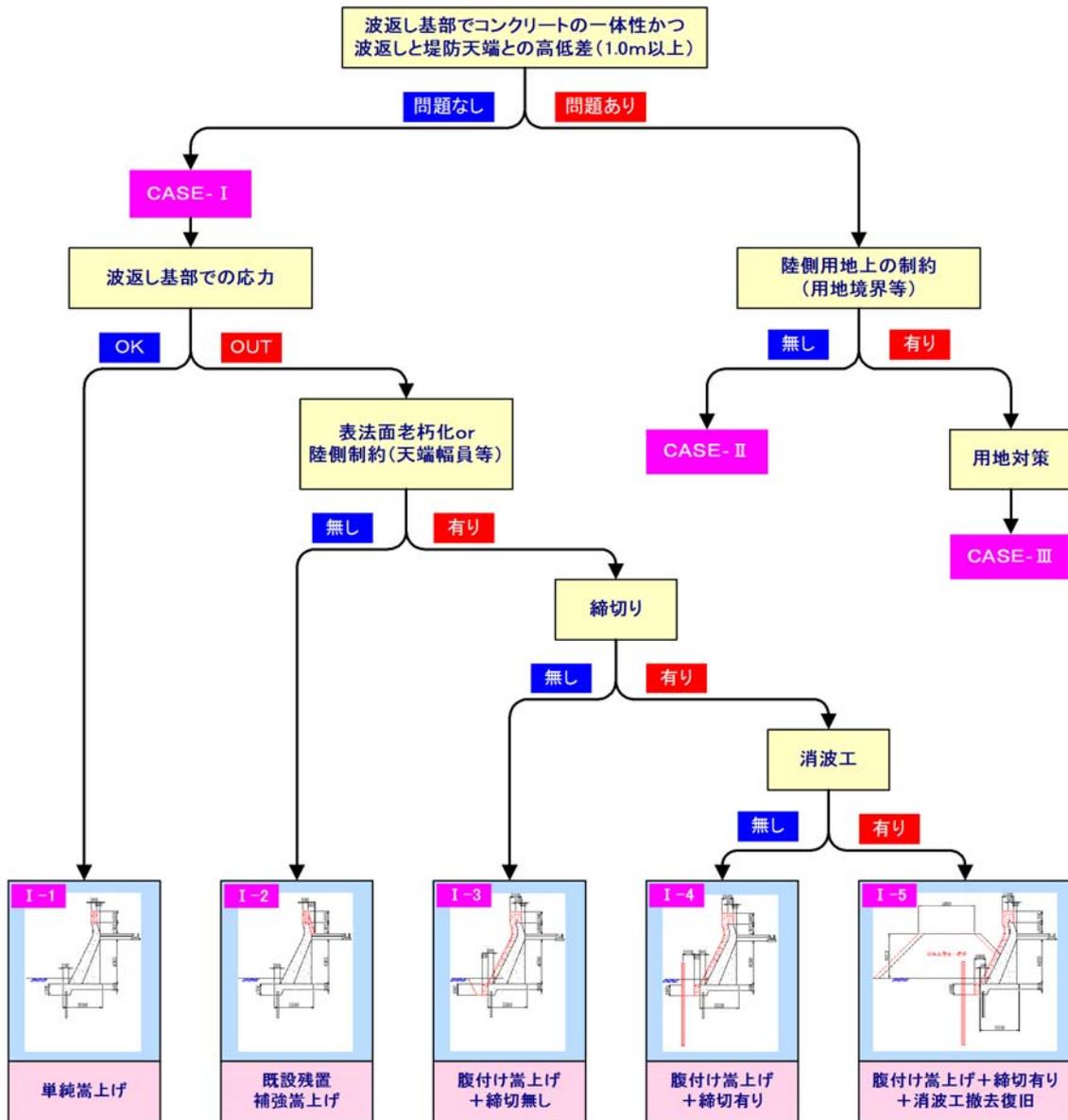


図-Ⅱ.2.4.2 堤防嵩上げの工法検討ツリー