

# 協働防護による港湾の気候変動適応に至る IPCCからの道筋



ご講演者：京都大学 防災研究所／横浜国立大学台風科学技術センター 教授 森 信人氏

講演日：2025年11月19日（水） 於：星陵会館

（本稿は、コースタル・テクノロジー2025の特別講演を抜粋し、編集した内容となっています。）

## ●「気候変動に適応する海岸保全」

皆さんこんにちは。私はIPCC（気候変動に関する政府間パネル）から、都道府県の適応策まで、一通り関わらせていただいていますので、気候変動科学から社会実装までの全体としての動きを今日をご紹介します。

地球温暖化の対策及び制御につきましては、まず温室効果ガス排出の削減と緩和策が最も大事です。日本としては2°C目標、世界としてはパリ協定がありますので21世紀末に1.5°Cを狙っておりますがなかなか削減が難しい。一方で気候変動そのものを予測していく上で、海面上昇や高潮のような気候モデルに解けないものについての影響を見る、いわゆる影響評価ということをやっています。影響が強すぎることが分かると、それに対して、我々がアジャストしていくために適応が必要となります。

日本では2018年に環境省が主に主導して気候変動適応法が施行されました。2020年、海岸関係四省庁主導の「気候変動に適応する海岸保全」という検討会で、沿岸における適応策をまとめたものがございます。

一番目は「海岸保全に影響する気候変動の現状と予測」です。海面上昇は間違いなくこれから計画するものには入れていく、さらに高潮、波浪についても将来の変化を考える、ということになります。2020年では、基本的には平均海面が上がる。高潮における潮位偏差も極値は上がる。波高は、平均は下がるが極値は上がる、波向きも変わるということがまとめられています。並行して海岸浸食についても、少なくとも海面上昇が進むと、どんどん沈んでいきますので砂浜の多くが失われるだろう、となっています。

ではどう考えて計画を立てていくのか、ベースとしてまとめられたのが、二番目の「海岸保全に影響する外力の将来変化予測」という項目です。日本にとっては台風がかなり問題ですので、台風の将来変化に合わせてどのように高潮を考えていくかも議論されました。ここではd4PDFと呼ばれる日本が作った大規模な気候のアンサンブル予測を使って、現在から将来にいた

る台風の変化を評価することが謳われています。基本的には、これからは海岸保全においては気候変動の影響をしっかりと考えるということ、もう一つは、これまでは観測ベース、過去に実際に起こった災害とかイベントベースで設計してきたものを、数値モデルに予測を使ってもいいということ盛り込んだのが、結構大きな進展になったと思います。これが5年前の話です。

これを受けて港湾局では「港湾における気候変動適応策の実装」が議論されました。基本的には海岸保全のものと非常によく似ていまして、海面上昇、波浪の打ち上げ高、高潮の潮位偏差の将来予測を入れる、ここは同じです。大きな違いは適応について踏み込んでいまして、設計する段階で気候変動の影響を盛り込む「事前適応策型」と、施工してから気候変動が進んでいくことが確認できたら、その時点で合わせて適応策を打つという「順応的適応策」の2種類あるだろうということまでまとめられています。これは同じ港湾の中でも、例えば護岸なのか、メカニクなところなのかで判断していけばいいだろうということです。

三番目は、港湾域は民間もありますし、公的なところもありますので、それぞれがバラバラに動いてはいけないということで、協働防護というアイデアを当局が出しました。みんなで議論しながら計画を立てていく、また気候変動に適応するプランを考えるときには、資金的なサポートをするなど、結構珍しい取り組みを打ち出しています。そして気候変動を取り込んだ設計が現実的に動き出しているというのが、日本の現状になります。

この科学と政策のリンクは、実は世界的に見るとかなり進んでいまして、色々ところで紹介すると「何で日本はそんなことができるんだ」とか、「日本はお金があるからできるんじゃないか」とか、よく言われます。確かに日本はお金もあって、研究も進んでいるのでできる、これはいい点です。

あとは具体的に、どれぐらい将来変化を見込めばいいのかが難しいということで、日本の気候変動予測のd4PDFを使って、例えば東京湾だと100年発生確率1%、1/100の潮位偏差は、2°C上昇の条件では10%くらいに増えるだろうというようなこ

とを、日本全国の港湾について評価しました。この国総研のレポートの港湾の協働防護で私が主張したのは、気温の上昇と海面の上昇と高潮の変化は時間的なスケールが違うということです。海面上昇はほぼ単調に将来に向かって増加していくわけですが、台風とか、台風による高潮は気温に結構追従しますので、2°C上昇の場合はピークが2100年ではなくもっと手前にきます。これは温室効果ガスの排出を2050年ぐらいで安定化させるという目標なので、気温の上昇がそこで止まることになります。2°C目標といいましても、実際のところ海面上昇と高潮で想定されている年が違いますので、気をつけて考えないといけないというようなことを盛り込んでいます。ということで今、協働防護という、社会実装と我々が呼んでいるものにかかなり近いところまで、気候変動の予測と適応が進んできました。

### ●気候科学の進展

一方で、気候研究の方がどうなっているか、簡単に紹介したいと思います。まず、こういう気候変動の予測は、一人ひとりの研究者がやる研究が一番のベースになっています。そういう研究成果を、世界では主にIPCCで取りまとめます。IPCCは7年から8年に1回、個々の成果をフェアに集めてレポートをまとめる機関です。今は6次評価報告書 (AR6) が出されて、次のフェーズに移っています。次のレポートは順調にいけば2028年にまとまる予定になっています。

日本では、2002年に「人・自然・地球共生プロジェクト」がスタートしています。日本独自の気候予測モデルGCMとか、地球全体を解く気候モデルを作ろうというのが、この「共生プロジェクト」のスタートです。結果として今では、日本は2つの「全球気候モデル」で予測するモデルを持っています。一つは東大大気海洋研のMIROCと呼ばれるモデルで、もう一つは気象庁気象研究所のMRIモデルで、世界を見渡しても一つの国で複数のGCMを持っているというのはアメリカと日本だけで、日本の研究レベルはこの分野では非常に高いと思っています。

一つ大きな成果として、我々は7年ぐらい前に「大規模気候アンサンブルデータセット」d4PDFを作りました (図1)。これは地球全体を解く全球気候モデルと、もう一つ、日本の周りの情報を詳しく解く、領域気候モデルとを組み合わせて、地球全体では1メッシュ60キロ、日本の周りは1メッシュ5キロの細かさで、現在と将来に向かって大量に計算したものです。これを大規模気候アンサンブルと呼んでいます。気候のアンサンブルは初期値問題ではなく境界値問題となります。初期値を忘れた何ヶ月後から何百年も計算して、大まかに気候システムが右にいくのか左にいくのかを調べるのが気候アンサンブルと呼ば

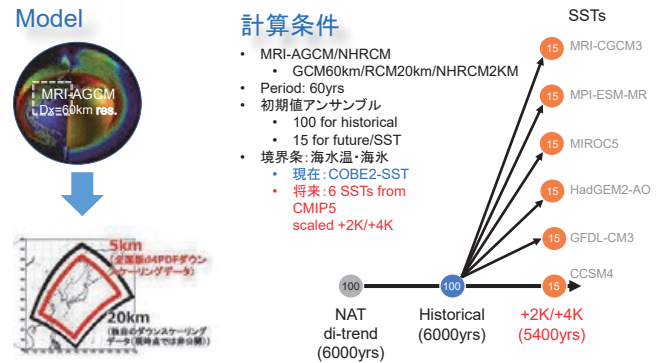


図1 大規模気候アンサンブル d4PDF

れるものです。ここでの境界値は、広く捉えると温室効果ガスの排出で、我々のアプローチではSSEという地球全体の海面水温の分布を境界値として与えています。d4PDFは気候としては6000年、2°Cと4°Cの将来気候としては5400年、シミュレーションしています。

この図2はデモですが、こういう地球全体を解くモデルを、60年を1回とすると90回から100回計算して、しかも日本の周りでは超高解像度でシミュレーションすることを行いました。だいたい計算時間で10か月ぐらいかかっています。

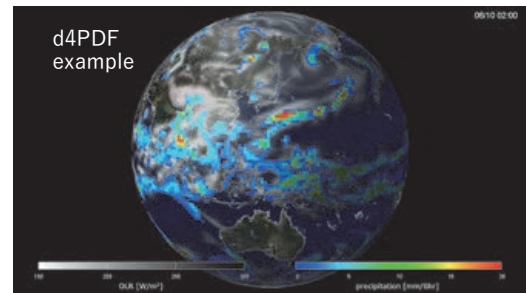


図2

図3は非常に日本独特の、珍しいデータセットで、これを使って台風の将来変化がどうなるかを我々は調べてきました。左が北半球の太平洋の西側、日本周りを見たものになります。横軸が年発生確率で縦軸が確率密度です。黒が観測値で青が現在、赤が+2°Cの将来になります。現状、北西太平洋で台風がだい

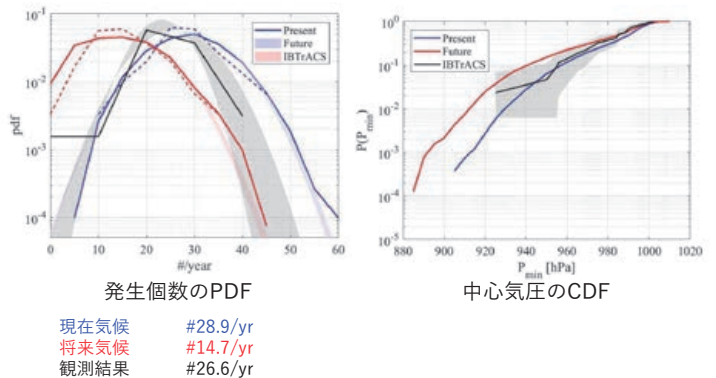


図3 d4PDFによる台風頻度と強度の将来変化

たい年間27個ぐらい発生しますが、モデルとしてもほぼぴったり、妥当な結果になっています。結構きつい条件ですけれども、4°C地球の平均気温が上がると大体半分ぐらいになり、年変動があるので、現在並みにできる年もあります。台風がでにくくなるということがハッキリ確率的に分かりました。図の右側は台風の強さです。1個1個の台風の中心気圧を見たものですが、例えば920hPaの台風は、現在気候だとだいたい数百個に1個ぐらいしか到達しないわけですけれども、赤の将来気候ではだいたい10倍ぐらい発生頻度が上がり、非常に強い台風が出やすくなるということになります。台風の発生個数は減りますが、強い台風は増えるだろうという、大規模アンサンブルデータを使うと確率でできるようになりました。

## ●沿岸防御の考え方

我が国の沿岸防御の考え方は、平均海面に加えて、天文潮位で高潮の偏差、打上高、余裕高を加えていく。気候変動が進むと、基本的には、爆弾低気圧はあまり強くなるのですが、台風の特性は、たまにくるものが強くなるだろうということで、基本的に全部上がるということが分かってきました。

2008年ぐらいに我々の研究グループは、まず波高から、地球全体の波浪の将来変化を30年ぐらい計算して、平均的な波高が将来日本周りでは減るだろうという予測を行いました(図4)。青系が10cm~15cm減るところで、赤系が増えるところですが、計算してみたら結構綺麗なパターンが出てきて、これは何か面白そうだということで、我々はこの後色々詳しい計算を行いました。将来、平均波高は日本周りでは減っていくだろうというのが15年前の我々の予測です。ネガティブ要素は、波高が減るということは、若干風速が将来下がるんじゃないかと今予測しております。

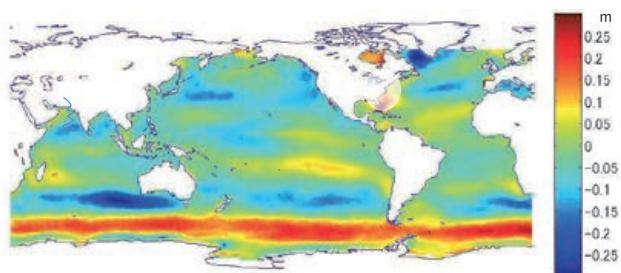


図4 平均波高の将来変化(2010)

一方で波向きや周期がどうなるかというのも進めています。日本は銚子で結構曲がっていますので、銚子より北か、西かで波浪の特性が違います。アラスカの方から来る波か、赤道の方から来る波かということです。西日本の太平洋側では波高は減る、そして東日本の太平洋側では波高は減り、周期も減るとい

うような予測を、今我々を出しています。

図5は日本だけをさらに高解像度化して予測したものです。左が4°Cの将来ですけれども、ほとんど全般的に太平洋側では日本の将来の平均波高は減るとというのが我々の今持っている予測です。一か所だけ赤いところがあります。オホーツク海です。海氷が将来どんどん減っていきますので、冬の間の海氷がなくなると、風が強いですからすごく高い波が起きるだろうということで、日本で最初に波浪として将来変化が捉えられると思っております。

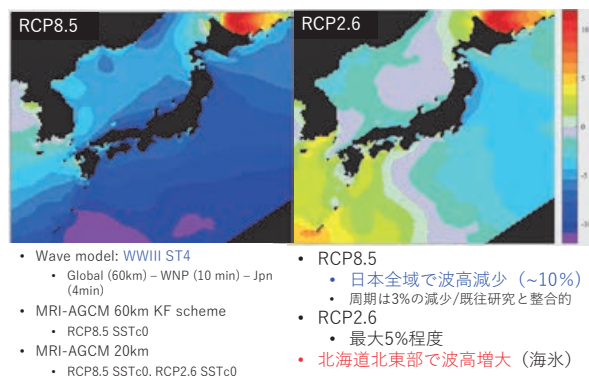


図5 波浪の将来変化：平均波高

一方で、高潮は依然として評価が難しいのが現状です。なぜかということ、まず、日本に上陸する台風は年間2.7個ぐらいです。そもそも日本に来る台風の数が少ない。かつ、台風が来たからといっても必ず高潮が起きるわけではない。例えば東京湾なら、高潮が起きやすい経路を通らないと起こらない。さらに中心気圧は大分強く強い台風でないとならない。さらに強い高潮が起きるためには移動速度がある程度速くないとならない。かつ、半径も台風によって違うので、これらのいくつかの要素をかけていくと、過去のデータだけではとても東京湾、大阪湾、伊勢湾の高潮の評価という長期的な評価ができないという問題があります。

## ●d4PDFのデータの活用

それでは実際に何をやっているかということ、d4PDFのデータを使って、地球全体の高潮と波浪を全部計算しています。波浪の方はだいたいメッシュ数キロでいけるのですが、高潮はやはり湾の中に入ると非常に細かいデータがあるので、今はだいたい200mぐらいまで落として、地球全体を解くようなことをしています。地球全体で、100年に1回の高潮が4°C上昇のところまでどれくらいか。東アジア、中国、韓国、日本あたりは、まだ仮ですけれども少なくとも20cmぐらい将来の高潮の偏差は上がるだろうということを得ています。東アジアはかなり高解像度で解いていますので、順調に研究が進むと数年先には、ゼ

ひ皆さんに使っていただきたいと思っています。

その後どうなるか、行政とか民間の皆さんに、得られたデータでぜひ適応策を考えていただきたいと思います。図6の青い線が高潮の推移のようなもので、横軸が時間です。赤が、気候変動によってゆっくり上がっていく平均値を模式的に示しています。そして緑色が、防潮堤や海岸堤防の高さを示しています。現状でも、自然変動、台風が来る年と来ない年でたまに災害がおきますが、気候変動はこのペースでいくと平均値がどんどん上がっていきますので、やがて現在の防御レベルでは耐えられなくなる。それをいかにいいタイミングで防御レベルを上げるかというのが沿岸の適応策かと思います。1年、2年で防御施設はアップグレードできませんので、計画を立てて工事するという長いスケールが必要になります。なので、予測を使って将来を見越して、うまいタイミングで適応策を打っていかないといけない。

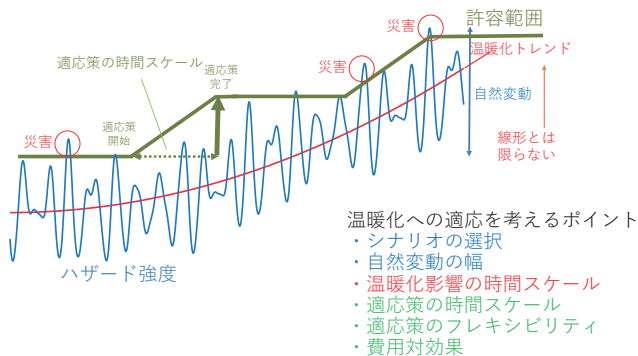


図6 温暖化に対する順応的適応策の考え方

港湾の適応を考えると、さらにもっと考える必要があります。一つは費用対効果をどうするかというところ。あともう一つはどういうふうに技術要素を入れていくか。いかに新しい技術を使って、コストを下げながら厳しくなる沿岸の外力に適応していくかというのは、もう技術の話なので、我々も協力していきますが、日本全体で考えていく必要があるのではないかと考えております。

港湾の施設をどういうふうに拡張アップグレードするか。コストはいつ負担するのか、2040年ぐらいで順応的に負担するのか。全部アップグレードする必要があるのかという、コストベネフィット的なところも必要ではないかと考えています。他人事のように言って申し訳ありませんが、これが今、現実動いている流れかと思えます

一つだけ宣伝を入れさせていただきます。2050年とか、2100年の話をしていると、港湾関係の人には重要性をすぐ理解していただけますが、一般の人はなかなか遠い話なので「それは大変だな」で終わってしまう。なので、先ほどの文科省の先端プロのメンバー何人かで、最近、極端気象アトリビューションセン

ター (WAC) を立ち上げ、メディアに対して、今年起きた極端な現象に対して温暖化の寄与率を計算して説明することを行っています。

例えばある年におきた猛暑について、もうすでに起きている気候変動の影響が何%関与しているかを定量的に評価する。ただ評価するだけではなくて、2週間以内に出すことを目標にしてやっております。これは、2ケースリリースしています。例えば2024年の7月下旬の猛暑は、すでに起きている温暖化の影響がなければほぼ0%というような、これまでは言い切れなかったことが言えるような成果を、研究のスピンアウトで出しています。我々としては、将来の予測も出しますが、今起きている現象に対しても説明するような研究を進めているということを宣伝したいと思います。

## ●まとめ

ここ15年から20年、気候科学および我々のエンジニアも進歩して、台風、特に日本周りの台風の量的な予測ができるようになってきました。波浪や高潮についても、将来何cm、何%ぐらい上がるだろうということが、ようやく言えるようになってきた。それを踏まえて、港湾についても協働防護という方針が打ち出されて、新しい方向に向かっていくというのが現状です。

今後の展開としては、IPCCの方では一つ大きな話として、オーバーシュートシナリオというのが今盛んに議論されております。これは、もう2°C目標は少々厳しいということがわかってきましたので、これをどう現実的に評価するか。2°C目標は保持するが、2100年ぐらいに2°Cに持っていきたい。その中間の2050年ぐらいは一時的に2°Cを超えて3°Cぐらいまでいくのはやむを得ないというのがオーバーシュートシナリオです。1回3°Cぐらいまで上がっていくのを受け入れて、その後落としていくということになります。

今日ご紹介した結果は、4°Cの2100年という話をしていますが、オーバーシュートシナリオの世界では、もっと手前の2040年から60年ぐらいに強い温暖化が来て、その後頑張っても落とすということが、かなり現実的に議論されています。思ったよりも厳しい将来が手前に来そうだというのが、IPCCの議論になっています。

また国内的には、d4PDFのバージョン2を計算しています。ここでは10年予測という形、2°C、4°Cではなくて2030、40、50、60という、10年ごとに日本の極端現象がどうなるかの予測を行っています。計算が来年度半ばまでに終わって、可能ならば2027年ぐらいには公開していきたいと思っています。ご清聴ありがとうございました。