

オホーツク海の波浪研究に関する取り組み



(国研)寒地土木研究所
寒冷沿岸域チーム 主任研究員
室蘭工業大学
大学院工学研究科
もの創造系領域准教授(現職)
岩崎 慎介 氏

ご紹介ありがとうございます。寒地土研、寒冷沿岸域チームの岩崎と申します。よろしくお願いいたします。

最近このテーマでお話しする機会が多いので、どこかで聞いたことがある方もいらっしゃると思いますが、お付き合いいただけたらと思います。また、海と港で公表した内容と同じものになっておりますので、興味ある方はそちらも見ていただけたら幸いです。

ご存知の方が多いと思うのですが、こちらに示すアニメーションは、オホーツク海の風と氷のアニメーションを10月の頭から描いたものです(図2.1)。オホーツク海は、冬季に氷が形成される季節海水と呼ばれています。

こちらは、先ほどのアニメーションを10月から5月まで描いたものです(図2.2)。そうすると、11月頃から季節風がオホーツク海に吹き始めて、そこから12月頭には北側で氷が形成され始めます。それから時間の進行とともに、我々の生活圏に近い北海道の北部まで氷が到達してきます。その後、4月5月あたりで暖かく

なってくると、どんどん後退していきます。

海の波は、基本的には風のエネルギーで発達するのですが、そこにオホーツク海のように氷が存在しますと、その氷が波の発達を抑えてくれるという役割を果たします。

こちらの右側に示している図は、気象庁のホームページから持ってきたものなのですが、1970年代からこれまでのオホーツク海における年最大海氷面積になっております。見ていただくと、年ごとに多かったり少なかったりばらつきを持っているのですが、長期的に見ると、どんどん減っているということが分かります。さらに、これは将来予測、これから先どうなるかというのをシミュレーションしたもので、特に温暖化の影響が非常に著しかった場合のシナリオのシミュレーション結果ですが、今よりも70%も減ってしまうというような報告もあります(図2.3)。

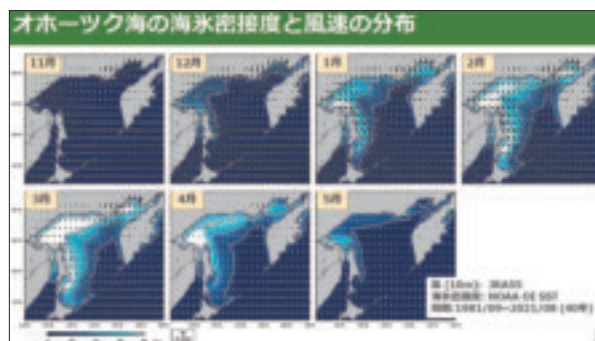


図 2.2

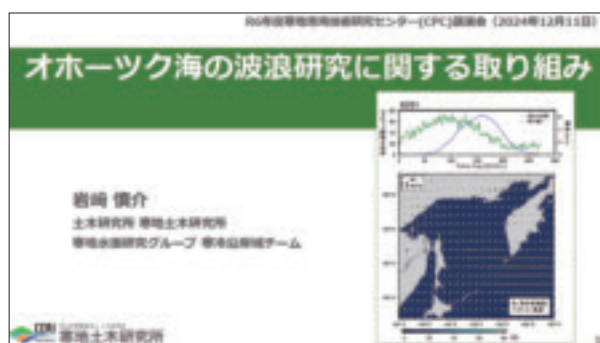


図 2.1

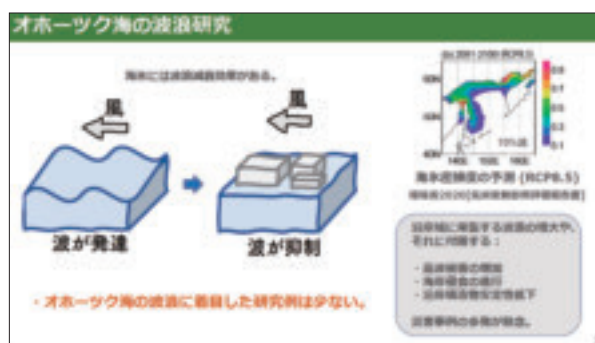


図 2.3

1つ目は、海水域に対するアルゴリズムの精度検討ということで、まず観測データが非常に少ないので、シミュレーションでオホーツク海の波浪を再現しようということになるのですが、ここでは「WAVEWATCH Ⅲ」というモデルを使って、オホーツクの波浪の再現を試みます。というのも、このスライドに示してあるとおり、このモデルの中にある海水域の計算アルゴリズムが豊富に組み込まれているので、このモデルを使用することにしました。ここでは、実際に先行研究で提案されたアルゴリズムが、オホーツク海でも適用可能なのか？適用可能だった場合どれが一番波浪の再現率が高いのか？ということをは明らかにすることが目的です(図 2.5)。

これは数字がばらばらとあって、よく分からないという感じなのですけれども、各アルゴリズムで計算した統計値、海水の密接度が10%以上あるときの、その比較結果になっております(図2.7)。緑色の数字で示しているのが上位三位まで、成績が比較的良好だったアルゴリズムということを表しています。さらに、こちらの真ん中のテーブルで示しているのは氷がもっと多



かったとき、海水の密接度が50%以上のときに比較したものになります。緑色の値が大きいもののほど、精度が高いアルゴリズムということなのですけれども、結果的には、IC4M2というアルゴリズムが、一番再現率が高いということが分かりました。ここからは、このアルゴリズムを適用して、過去40年間オホーツクの波を計算して研究してきたというのが、あとの2つのテーマの成果になります。

2つ目の研究成果に移りたいと思います。波浪に対する海水の役割、海上風の強弱で変化する自然の防波堤というテーマでお話をします(図2.8)。先ほどの話で、オホーツクの波浪に対しての研究というのは非常に少ないのですが、その海水自体がどういふ変化をするかという研究はいくつか存在してしまっていて、そのうちの1つの研究をヒントに進めた研究になります。

その先行研究で何を言っていたかといいますと、12月以降、冬のオホーツク海の海水密接度

は、それよりも前の11月の海から大気に出ていく熱の量、つまり熱輸送量が影響しているという研究があります。11月の熱の量というのを決定する1つの要因として、風の強さがあります。当然、風が強くなるとその時の波も同時に発達します。さらに熱もたくさん出ていくということが考えられます。そうすると何が起きるかと言いますと、その後、海から大気に熱が出ていくので氷が発達すれば、その時の波も抑制することが考えられます(図2.9)。

何が言いたいかといいますと、11月の風、あるいはその時の波の強さと言ってもいいのですけれども、それに応じて波が強い時には氷も大きくなることで波を抑制するし、風がそんなに強くない波が弱い時には、逆に氷もそんなに成長しないで波の抑制をそんなにしないということです。つまり、波の力が強くなればなるほど氷も発達するし、氷が波の強さを調整してくれる優秀な防波堤の機能があるのではないかと。それを証明してやろうというのが、この研究の目的になります(図2.10)。

ここではIC4M2というアルゴリズムを使ってWAVEWATCHを駆動しました。その時のインプットデータとして、風と氷のデータが必要になってくるのですけれども、ここでは気象庁で提供しているJRA55というものと、NOAAで提供している衛星の海水を使用しました。さらに、先ほど自然の防波堤としての役割というお話ですけれども、その前に氷の有無

1. 海水域に対するアルゴリズムの検討

有義波高の比較結果 (海面>50%)

緑の文字は正確な値

	IC1	IC2	IC3	IC4M1	IC4M2	IC4M3	IC4M4	IC4M5	IC5
バイアス	-0.47	-0.3	-0.65	-0.35	-0.33	-0.58	-0.55	-0.1	-0.37
二乗平均誤差	0.71	0.4	0.45	0.44	0.44	0.4	0.43	0.44	0.43
相関係数	0.8	0.83	0.79	0.83	0.76	0.81	0.77	0.83	0.81

(海面>50%)

	IC1	IC2	IC3	IC4M1	IC4M2	IC4M3	IC4M4	IC4M5	IC5
バイアス	-0.7	-0.81	-0.1	-0.14	-0.09	-0.17	-0.26	-0.33	-0.09
二乗平均誤差	0.72	0.39	0.43	0.47	0.41	0.36	0.42	0.34	0.39
相関係数	0.51	0.89	0.89	0.87	0.89	0.8	0.87	0.85	0.8

詳しくはこちら！

Iwasaki S and Otsuka I, Evaluation of wave ice parameterization models in WAVEWATCH®E along the coastal area of the Sea of Okhotsk during winter, *Frontiers in Marine Science*, Vol.8, 713784 (12 pages) (2021)

図 2.7

1. 海水域に対するアルゴリズムの精度検討	Iwasaki and Otsuka (2021; Front. Mar. Sci.)
2. 波浪に対する海水の役割：海上風の強弱で変化する自然の防波堤	Iwasaki (2023; Prog. Oceanogr.)
3. 海水減少による波浪増大	Iwasaki (2023; Sci. Rep.)

図 2.8

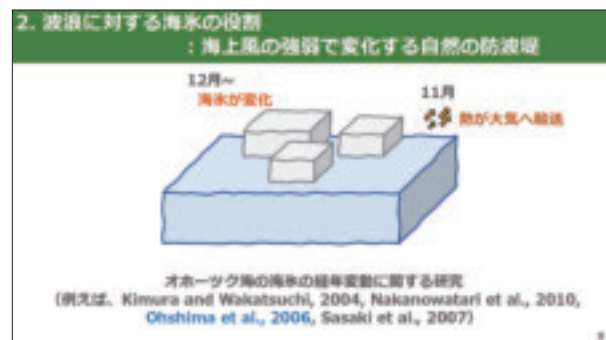


図 2.9

でどれくらい波が変わるのかということも見てみたいということで、風と海水のデータで駆動した標準実験に加えて、風のみで駆動、つまり氷の値を入れないで計算する実験も行いました(図 2.11)。

まず、モデルがどれくらい現実を再現できるのか確認するために、観測と比較を行いました。灰色で示しているのは観測の波のパワーを示しています(図 2.12)。灰色のバーで示しているのは周辺の海水の季節変化です。モデルがどれくらいの値を示すかというのを見たのがこちらの青の線になっています。よく季節変化を再現できていることが分かります。一方で、氷がなくなると波はどれくらい増えてしまうのかというのが、こちらの黄色の線になっています。氷がある時に比べると当然大きくなるということです。これは観測のデータがある紋別周辺のものになるのですが、さらにオホーツク全体で見るとどれくらい氷のインパクトがあるのかというのを見てみました(図 2.13)。こちら青で示

しているのが波のパワー、オホーツク全体で平均したもので、灰色が風の強さです。両者は非常によく対応しているというのが分かります。さらに氷がなくなるとどれくらい増えるかというのがこちらの黄色の線になります。右側で示しているのは、この青と黄色の差です。そうするとこの灰色の氷の面積が非常に広いときには、波のパワーの差は 5 kW/m^2 で、半分くらいまで落ちるということです。

領域平均に加えて、場所ですれどれくらい変わるのかというのを見たのがこちらの図です(図 2.14)。色で示しているのは標準実験から計算された波のパワーで、コンターで示しているのが、海水の有無による波パワーの差です。左側が12月1月で、右側が2月3月の空間分布になっています。そうすると、どちらも基本的に波パワーは南東部に行くほど強くなる構造を持っています。さらに氷のインパクトで見るとこのコンターですけれども、海水が多い2月3月は、南西部では 10 kW/m^2 にも達し、氷の

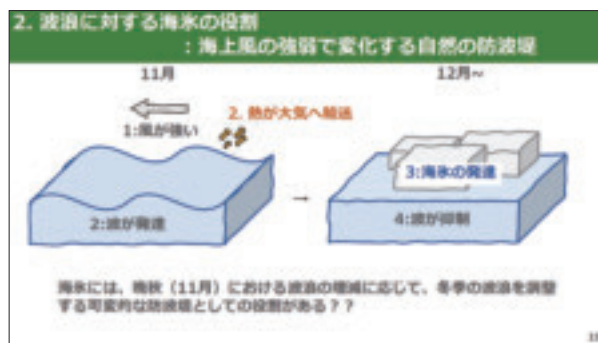


図 2.10

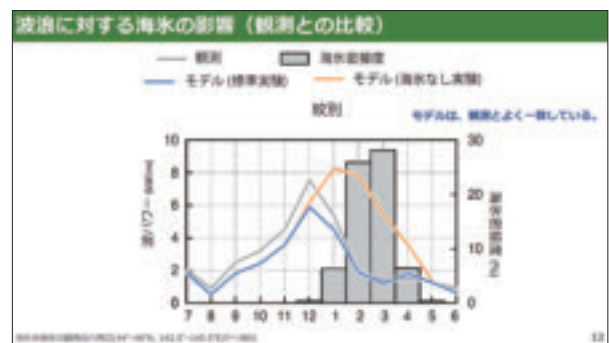


図 2.12

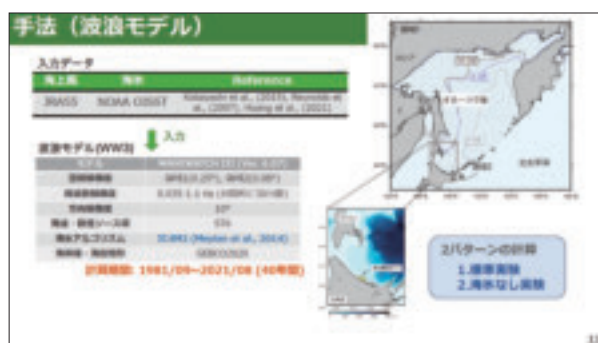


図 2.11

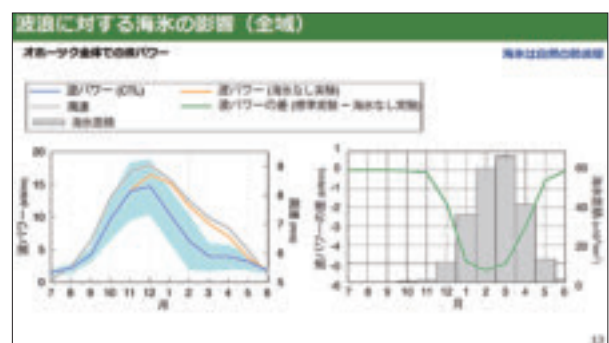


図 2.13

影響が非常に大きいことが分かります。つまり、海水が自然の防波堤としての役割があることが分かります。

ここからは、先ほど言っていた11月の風や波の強さに応じて、海水に可変的な防波堤として役割があるのかということを証明していきます。こちらに示すのは11月における風の強さを平均値からの差で見たものになります。また、同じ時期の海から大気に出ていく熱の量を赤線で示しています(図2.15)。そうすると、両者の相関係数は0.8であり、両者非常に高い関係性を持っていることが分かります。ここから、11月の風が強い時と弱い時を、緑色の点線よりも上回った時を強い時、それよりも下回った時を弱い時と定義して解析を進めていき

ます。

こちらの図が、11月の風が強い時と、弱い時の同じ時期における波のパワーを色で示していて、ベクトルは風の強さを示しています(図2.16)。そうすると、同じ時期の風が強いことによって、波パワーが増加しており、特に南東のほうでその傾向が顕著に見られます。さらに、その同じ時期の海から大気への熱の輸送量を見たのが、この色で示しているのですが、風が強くなることで、オホーツク海からたくさん熱が出ていることを確認できます。コンターで示しているのは、その後の時期の氷の密接度になります。熱がたくさん出ているところで海水が成長していることが分かります。

それに応じた波のパワーの変化を見たのがこちらの図です(図2.17)。左側が12月1月、右側が2月3月における波のパワーを11月の風が強い時、弱い時で振り分けたもので、色で示しているのが波パワーです。そうすると12月1月の間、氷が成長している時は波のパワーも

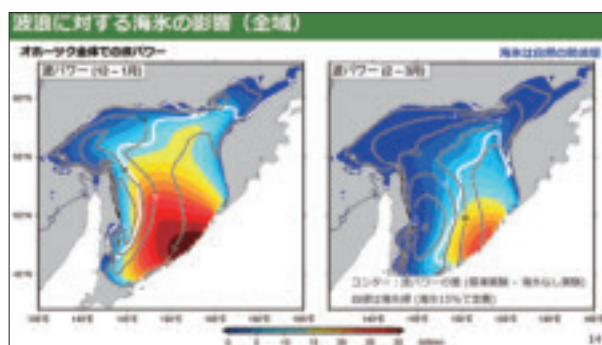


図 2.14

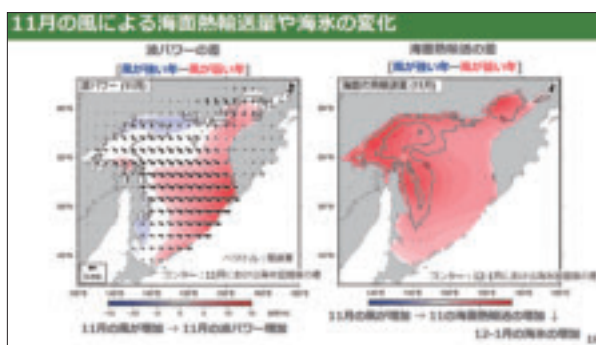


図 2.16

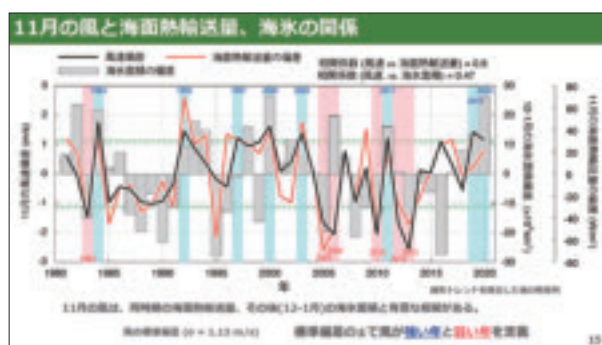


図 2.15

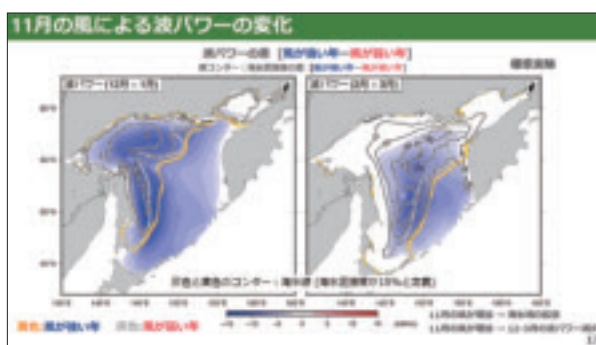


図 2.17

同じところで小さくなっていることが示されました。また12月1月だけではなくて、2月3月もシグナルの位置は中央部にまで移動していますが、同じ傾向が確認できます。つまり氷が減ることによって波パワー減は、その数カ月後まで影響することを示しています。さらに、この灰色と黄色で線で示しているのが、それぞれ風が弱い時と強い時における海水縁になります。11月の風が強い時は、海水の密接度に加えて面積も大きくなることが分かります。

ここまでの話から、海水には波に強弱に応じて、その大きさを調整する可変的な自然の防波堤としての役割があることを証明しました。さらに、海水が大気にも影響するという話を、この研究ではやっているのですけれども、その話は次のテーマにも出てくるので、ここでは割愛したいと思います(図2.18)。

こちらが最後で、海水減少による波浪増大というテーマになります。イントロでも言ったのですが、氷がなくなることによって波が増大するというふうに危惧されているわけですが、実際に波は増大しているのかということを、ちゃんと明らかにしようというお話になります。この成果はScientific Reportsという雑誌に掲載されたのですが、令和5年度ダウンロード数トップ100に認定され、国内でもいくつかの新聞に掲載されたということで、国内外で非常に注目を集めた研究成果になります(図2.19)。

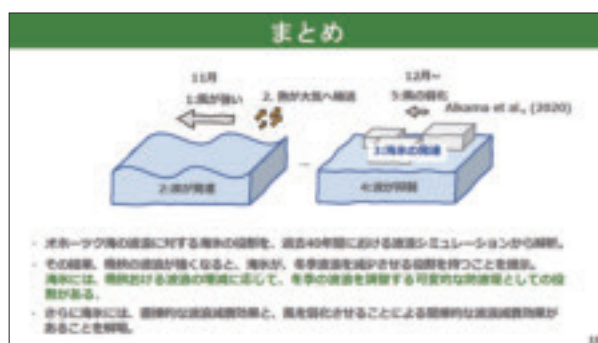


図 2.18

計算方法は基本的に先ほどのテーマと同じなのですが、計算ケースを増やしています。先ほど使ったのはこちらの上の2つののですが、それに加えてヨーロッパとアメリカで提供されているデータを用いて3ケースの計算を過去40年間で行いました。それから、それを標準実験あるいはコントロール実験と呼んでいますが、ここでは、海水気候値実験というのも同じように3ケース行っています。この計算方法については、後ほど詳しく述べたいと思います(図2.20)。

まずは、本当に波は増えているのかということで、この左上に示しているのが3ケースの標準実験で計算した月ごとの波のパワーの変化量を示しています。大きい丸は統計的に信頼できる値であると思って下さい。見ていただくと、どの色も12月から2月の冬季の間、波のパワーが増えているということが分かります。さらに、下に示しているのは、この同じ時期の冬季で平均した波パワーを、年ごとのにプロットし



図 2.19

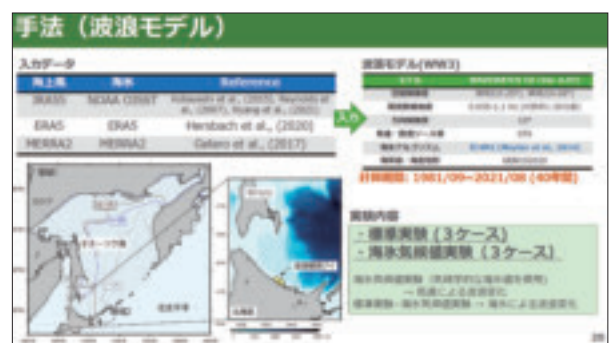


図 2.20

たものです。この線は線形の回帰直線で当然ですが増加傾向が確認できます。さらに、空間的にどこで増えているのかを見たのが、こちらの右側の図で、暖色系は増加傾向を意味します。特に北側で増加傾向が強いです。コンターは、変化量を割合で示しています（図 2.21）。

上のテーブルは、領域平均するとどれくらいの値になるのかを示していて、右側の値を見ていただくと 12% から 15% 程度、波のパワーが増加していました。この波のパワーの増加要因は、海水が減ることであろうということなのですが、それに加えて風のエネルギーが強くなるというのも一つの要因であると考えられます。下の表は、波浪の計算に使った海水の面積と海上風の変化量を示しています（図 2.22）。そうすると、氷は当然どのデータもプロダクトごとに値が異なることになってしまいますけれども、基本的には減っているのですが、それに加えて、風も増加傾向であることが分かります。どっちが波浪増大の主な原因になるのか明らかにする

ために、それぞれ氷と風の効果というのを切り分けて、解析を行います。

ここで、先ほど言った海水気候値実験が出てきます。標準実験というのは、時時刻々と変化する風と氷の値を波浪モデルに与えるのですけども、一方の海水気候値実験は、基本的に風に関しては標準実験と同じ、時時刻々と変化する風のデータを与えるのですが、氷に関しては季節変化のみで経年的な変化を除去した氷を与えています。これによって、風の長期変化のみによる波の変化を抽出します。さらに、標準実験と海水気候値実験の差を見ることで、氷の長期変化に伴う波の変化を抽出するという手法になります（図 2.23）。

これがその結果で、氷の変化に伴う波の変化を見たのがこの左側の図で、コンターで示しているのは、氷自体の変化です。そうすると、氷が減っているところで波が増加しているというのが分かります。さらに、右側は氷ではなくて、風の効果に伴う波の変化と風自体の変化をコン

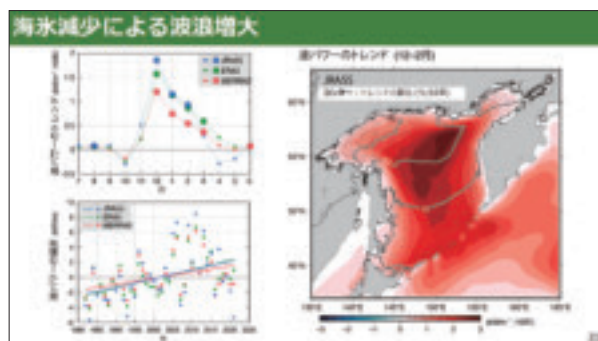


図 2.21

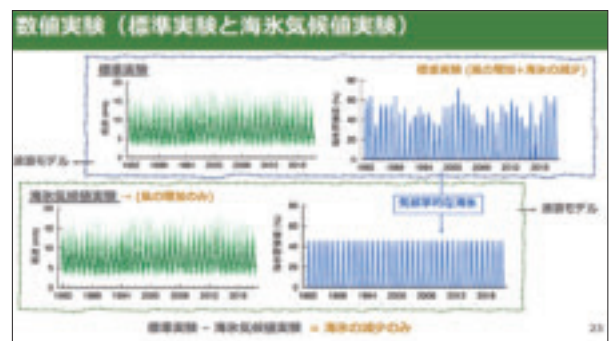


図 2.23



図 2.22

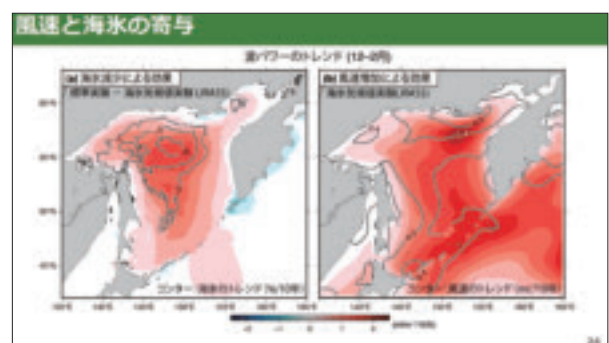


図 2.24

ターで示しています（図 2.24）。そうすると、どの領域で見ても風の増加が波を増加させていることが確認できます。この結果から、風と海水はどちらも波を増やすセンスに働いているのですが、オホーツク海全体で領域平均して定量的に見たのがこちらの表です（図 2.25）。真ん中に示しているのは、風の効果で、右側が氷の効果です。1 ケース目は風の効果が強いのですが、他の 2 ケースは氷の効果が大きいことが確認できます。したがって、どちらがより強い影響をもたらすのかは、これでは分からないということになりました。

ここまで風と氷の効果を切り分けて評価してきたのですが、実際の自然界では、氷と風は非常に相互に関係し合っていることが、オホーツク海ではないのですが、他の海水域で言われています。なので、オホーツク海でもそういうことが起きているか調べてみました。この左側に示しているのは、海水と氷の関係性を見たものです（図 2.26）。どのデータ

セットも非常に高い関係性にあります。実際にそれぞれの効果を波に換算した場合でも、同じことが言えます。

どうしてこういうことが起きるのかですけれども、基本的に冬は、西高東低というのが気圧配置として保たれているのですが、ここで氷がなくなる、つまり海が温かくなると、より海上での低気圧化が進み低気圧・高気圧の水平的な変化量、水平勾配といいますけれども、それが強くなることで風が強くなるという先行研究があります（図 2.27）。

このようなプロセスが、実際にオホーツク海でも存在し得るのかを検証したのがこちらの結果です（図 2.28）。コンターで示しているのは海水で、カラーで示しているのは海面気圧の変化量です。氷が減っているところで、海面気圧が顕著に減っているということが分かります。さらに、右側に示しているのは、海面気圧の水平勾配を色で示していて、ベクトルあるいはコンターが風の強さを示しています。この図から

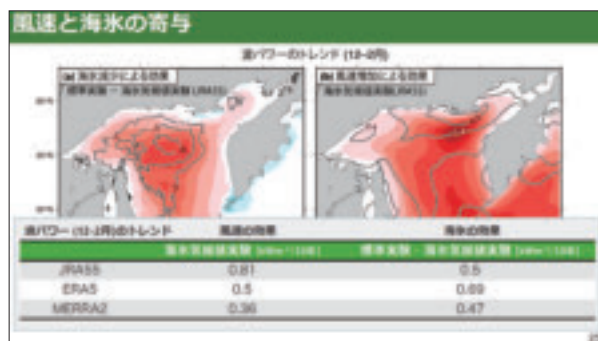


図 2.25

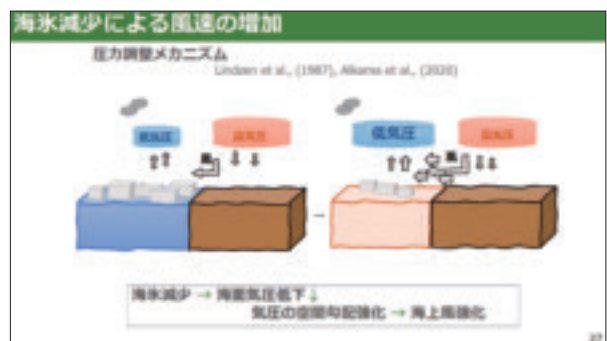


図 2.27

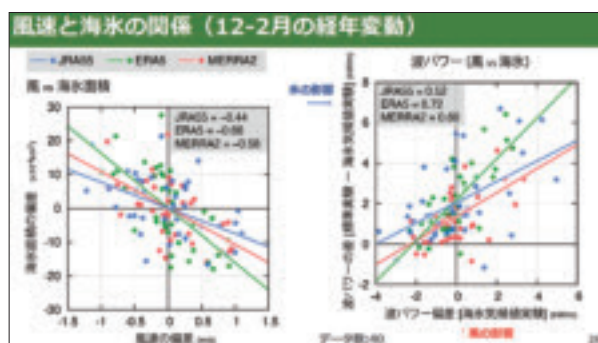


図 2.26

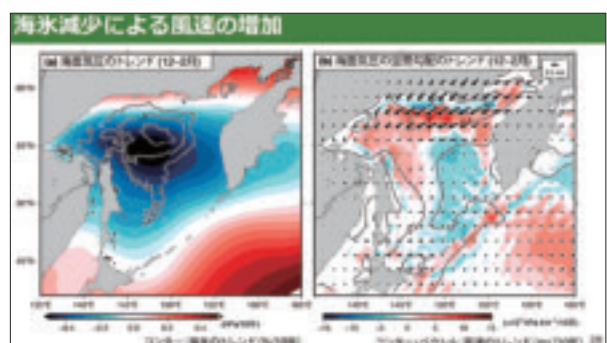


図 2.28

水平勾配が強くなるところでは風が強くなっていることが確認できます。つまり、この結果は、主な波のパワーの増加要因というのは、風の増加ではなくて海水の減少であることを意味しています（図 2.29）。ここまで配布した資料の説

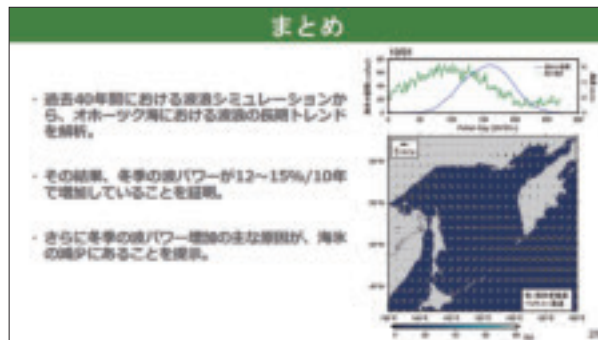


図 2.29

明を終わります。今までは主に過去の計算結果に基づいて研究してきましたが、今後は、将来予測に目を向けながら沿岸の防災対策に貢献していきたいと思っています。それから、オホーツク海の波浪観測が非常に少ないということで、当該海域における観測データをもっと充実化させるべく、実際に波浪観測ブイを、去年の冬から漂流し始めたというところです。海水域での波浪プロセスや長期的な取り組みによる気候変動の影響など新たな知見が得られることを期待しています。以上で発表を終わりたいと思います。ご清聴ありがとうございました。

地球規模の気候振動と北海道周辺海域の波浪の関係 ～苫小牧港を事例として～



(一社)寒地港湾空港技術研究
センター 審議役
平澤 充成

今、御紹介いただきました、寒地センターの平澤でございます。

今日はこのような話題でお話をさせていただきたいと思いますので、よろしくお願いいたします。

先ほど岩崎さんから、地球温暖化の関連で御発表がありました。私のほうのこれからの発表も100%別ではありませんが、基本的には地球温暖化の気候変動の話ではなくて、地球がもとも持っている気候の振動みたいなものを内部変動と呼んでおりますが、そちらのほうを対象にした話題になっています。

気候振動というのは私が名付けた名前ですけども、一体どういうものかというところをま

ず御説明させていただきたいと思います。たまたま先日11月18日に北海道新聞にこんな記事が載ってまして、今年雪が多いかもということで、特にその影響がこのラニーニャの影響ではないかということが書かれておりました。御存知の方も多いと思いますけれども、ラニーニャ、あるいはその反対のエルニーニョというのがあって、ペルー沖の海域で水温の年平均よりも低い温度が発達した時に、ラニーニャというような言い方をしまして、逆の暖かい時にはエルニーニョというようなことでございます。

ここでお示ししたかったのは、これは海水温ではあるのですが、こういうように地球規模で海水を見たときに、暖かくなったり冷たくなったりと、こういうような振動が起きてまして、これが気候のほうにも影響を及ぼしているということになります。

もう一つ、テレコネクションという言葉もありますが、簡単に言うと、どこかで、まさにラ