世界に貢献する港湾空港技術

PARI

VOL.38
JANUARY 2020

Airport

Technology

Port

2 __ Front Line - 特集 -

洋上風力発電の促進を技術面から支えるために

6 __ Focus On 研究活動の最前線へ

洋上風力発電施設の杭基礎の支持力評価に関する研究
杭や周辺地盤の挙動に
大型模型実験と数値解析で迫る！

8 __ Close Up 現場からの報告

風力発電関連産業の総合拠点を目指して
北九州市響灘における
洋上風力発電プロジェクト

10 __ Front People 研究者の広場 挑戦する研究者たち

研究領域を跨いで若い力を集結！
洋上風車という新たな対象に挑む

14 __ CROSS LINE 国際交流レポート

「Coastal Structures 2019」に
港空研の研究者が参加しました

15 __ TOPICS

港空研の緊急災害対策派遣隊が
防災功労者内閣総理大臣表彰を受賞しました

フランス交通科学技術研究所とうみそら研との
協定書延長署名式を行いました

地盤研究領域 高橋グループ長と森川領域長らが
英国土木学会の Telford Premium を受賞

画像提供：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

洋上風力発電の促進を技術面から支えるために

2019年4月に「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」も施行され、港湾区域のみならず一般海域においても、洋上風力発電のプロジェクトが加速。実施段階を迎えつつあります。円滑な導入のための技術支援ニーズに応えるべく、港空研では、改めて「海洋インフラ・洋上風力技術センター」を組織。うみそら研（海上・港湾・航空技術研究所）の3研究所が連携し、本格的に研究に取り組み始めたところです。注目される洋上風力発電の現状と課題について取材しました。

港湾空港技術研究所
海洋インフラ・洋上風力技術センター
下迫健一郎 センター長

港湾空港技術研究所
地盤研究領域 基礎工研究グループ
水谷崇亮 グループ長

港湾空港技術研究所
海洋研究領域
米山治男 領域長
（海洋利用研究グループ長併任）

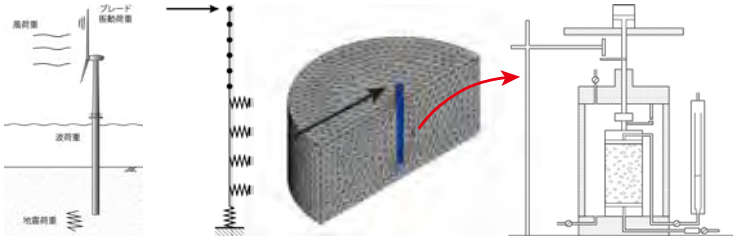
港空研では2014年4月、海洋の開発と利用促進を技術面から支えるべく、「海洋インフラ技術推進センター」を設立。ただしこの段階ではまだ、研究テーマに洋上風力は含まれていませんでした。その後、わが国においても洋上風力発電の重要性が叫ばれるようになり、それに対応するために、2017年10月、「海洋インフラ・洋上風力技術センター」に改組。それから2年が経ちます。

欧州の基準ではカバーできない日本独自の問題に対応

下迫　とはいえ、センターができてすぐ実際の研究が始まったわけではないんですよ。最初にほぼ1年かけて所内で取り組んだのは、アメリカで開発されたFAST（風車の空力-流体力-制御-弾性の連成解析オープンソースコード）の勉強。そのなかで、実際に洋上風力発電施設を現地に造るにあたっての課題が見えてきた。もともと洋上風力発電の研究はヨーロッパが先行していたので、日本に導入するにあたって設けたガイドラインも、ヨーロッパの基準（ヨーロッパの先行事例をもとにした風車の国際規格であるIEC（国際電気標準会議）の61400シリーズ）がベースになっているんです。でも、向こうの基準をそのまま日本にもってくると、いろいろ不十分なところがある。地盤の問題や地震の問題、あるいは波とか台風も。それらの問題に対応するためにはやはり本格的に研究が必要だということで、今年度から研究の実施項目として、波力算定・耐震設計・杭基礎・構造計算に関する4つの具体的なテーマが立ち上がりました。ようやくスタートしたという段階です。

水谷　われわれ基礎工研究グループでは、多様な変動荷重を受けることになる洋上風力発電施設の杭基礎に関する研究（本誌6～7ページ「FOCUS ON」参照）を。これまでやったことのない基礎形式を使うということもあり、個別に民間の方などとも意見交換したりしながら進めています。

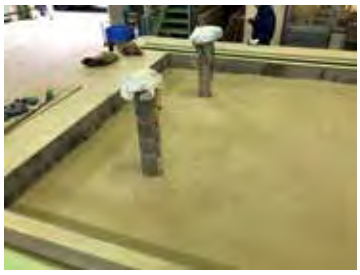
米山　私のほうでは、洋上風力に関する情報収集というのがまず一つ。あとは、鹿島港と北九州港、秋田港・能代港の委員会に出させていただいていて、発電事業者の立てる設計施工計画について、委員の立場から技術的な助言をしたりも。海洋利用研究グループとしては、今年度から加島寛章主任研究官が、FASTを用いた洋上風力発電施設の構造計算の検討に取り組んでいます。



実構造物　梁ばねモデル　FEM解析

杭基礎のモデル化手法

要素試験（応力ひずみ関係）



大型土槽実験

遠心模型実験

洋上風力発電施設の杭基礎に関する研究

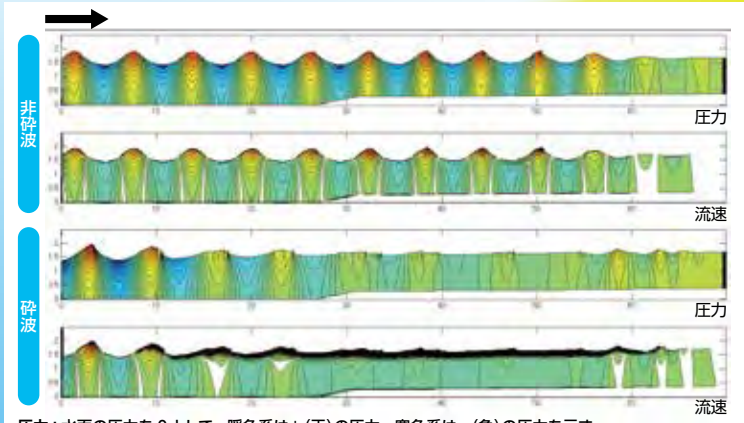
従来の港湾構造物とは異なる設計上の課題に挑む

米山　調査の課題、設計の課題、施工の課題といろいろありますが、いま港空研で取り組んでいるのは、おもに設計に関する課題ですね。例えば、砕波帯に風車を設置しなければならない可能性があるのですが、砕波した波が当たって、おそらく衝撃的な波力がかかる。設計上問題がないかどうかという検討を、耐波研究グループのほうで行っています。一方、耐震についてはヨーロッパではあまり考えられていないので、着床式の洋上風車について耐震設計がきちんとできるか、こちらは耐震構造研究グループが検討。また、FASTは洋上風車の全体構造の弾性応答の解析を行うプログラムなのですが、それが実際に精度よく計算できているかを、われわれ海洋利用研究グループで確認しています。

水谷　他の港湾施設の設計の場合、例えば耐震性能なら過去に被災した事例とか、そういった、所謂〝うまくいかなかった事例〟をベースに検討を行っていたわけです。でも洋上風車はまだこれからなので、そういった事例が限られている。そこをどう考えるか……。模型実験と数値計算で進めていくのは他の構造物と同じですが、その点がちょっと違いますね。

下迫　基礎工研究グループでやっているのは、繰り返しかかる荷重で地盤の条件などが変わるかどうか。地震や津波のように一発でどうこうという話ではなくて、長期間のうちに地盤が徐々に弱く、あるいは強くなってくる。つまり最初に設計で考えていた条件と変わってくるので、そういうときどうなるか、その影響を調べるわけです。いろいろな組み合わせで設計計算するとき、地盤の条件も当然入るのですが、そこが変わってくるとなると、当然結果も変わってくるので。

米山　考え方自体は普通の港湾構造物と



圧力：水面の圧力を0として、暖色系は＋（正）の圧力、寒色系は－（負）の圧力を示す
流速：図の右方向（波が伝播する方向）を＋（正）方向として、暖色系は＋（正）方向（押し波）の流速、寒色系は－（負）方向（引き波）の流速を示す

洋上風力発電施設における砕波・非砕波の計算例

同じ。ただ、洋上風車に対する地震や台風といった外力がちょっと大きいので、それでどれくらい風車がもつかというのを調べるわけです。

風や波の荷重を受け続ける洋上風車の特殊性

水谷　洋上風車は大きいですが、要は発電機だけなので、上にクレーンが載ったりする通常の港湾施設に比べれば、重さ自体は小さいですよ。

下迫　問題になるのは、重さよりも荷重ですよね。当然、受ける波や風の荷重が大きくなるので。杭にかかる波力といった研究は昔からやっている部分がありますが、風荷重というのはあまり港湾で考えたことがなかった。なので、そこはちょっと違うかなと思います。

米山　普通の港湾構造物というのはどちらかというと重くてあまり動かないようなものが多いのですが、洋上風車は縦に長いので、風や波が当たると揺れる。そこが大きな違いですね。なので、これまでとは違ったやり方をしなければいけなくて。われわれのグループでやっているＦＡＳＴを用いた構造計算についても、これまで港湾分野ではあまり使っていないプログラムなので、それを勉強しながら研究していくというかたちになります。

下迫　あと通常、港湾施設というのは、基本的に一つの外力に対して動くのか動かないのかという議論をしますよね。例えば、一番大きい波を一回受けたときどうか、というように。でも洋上風車の設計はそうじゃない。ある一定の時間、不規則な波や風がずっと作用し続けるわけです。そんな連続する力を受けて、その結果どうなるかという解析をするので、そこは港湾のいままでの設計とは大きく違います。

米山　さらに、いまのヨーロッパの基準だと、波や風が当たったとき、たくさんの組み合わせの荷重を考慮して計算しなければならないんですよ。それだと計算ケースが膨大になってしまうので、なるべく減らすようなかたちにできないか、ＦＡＳＴのプログラムを回して検討しているところです。

下迫　実際はその中でも厳しい条件というのはある程度絞られるはずなんですよね。そこをきちんと整理すれば「これとこれだけやれば大丈夫」というのがわかってくるだろうし、そうなれば設計はラクになると思う。それを見極めることが重要です。

施工の地盤への影響など経験値で埋められない難題も

水谷　施工によって地盤が影響を受けるのですが、いままでやったことのない構造物なので、その影響がよくわかっていないというのが一番難しい点。通常の設計は、事前にとったデータから地盤の支持力や反発などを推定して行うのですが、施工後に実際に抵抗しているのはまっさらな地盤ではなく、杭を打った後の地盤ということになります。事前に測るのはまっさらな地盤の特性値ですが、われわれは通常、そこを経験値で埋めているわけです。ところが、洋上風車の杭の直径は、例えばモノパイル（1本杭）式なら5～6ｍにもなる。われわれが普段扱っている杭は大きくても直径1・5ｍですから、そこでの常識が通じるかといったら、まず通じないでしょう。その関係性がよくわからないのが難題で、頭を悩ませているところです。地盤については何事も簡単にわかるものではないので、地道にずっと基礎研究を積み上げていくことになりそうですね。ヨーロッパの基準をよく読んでも、地盤とか杭基礎の部分はけっこう手薄で、いま現在研究が進められているところ。場合によっては、うまく連携できればいいなと思っています。

下迫　港空研が直接やるわけではないのですが、地盤調査も難しいですね。

水谷　範囲が広いんですよ。風車と風車の間隔が、短くても３００ｍ、長いと1㎞くらいになるので。そんなに離して設置するのかと驚かれるかもしれませんが、直径２００ｍ近い風車をぐるぐる回すのですから仕方ない。となると、一つのエリアでウインドファーム事業をやる、風車を20基建てるといっても、その20カ所の地盤はバラバラなわけです。例えば３００ｍの桟橋を造る場合、われわれの常識ではその間に6～10カ所、30ｍピッチとか50ｍピッチとかでボーリングをするのですが、洋上風力発電施設の20カ所全部でそれをやるのか、無理だとすれば、そのあたりをどう補完していくのか。これも難しい問題だと思います。

米山　いまちょっと問題になっているのは大型化。ヨーロッパの洋上風車もかつては定格出力5メガワットくらいのものが主流だったのですが、近年は8メガとか10メガとか、すごく大きいのができています。風車のメーカーはヨーロッパ系ばかりなので、日本でも結局、それを持ってくるしかない。8メガとか10メガの洋上風車を設置したときにどうなるかというのは、実際なかなかわからなくて。ヨーロッパでも設置し始めている段階なので、まだわからないことが多いんですよ。

導入実施に合わせてできるだけ早く成果を

下迫　ここまで造るほうの話をしてきましたが、当然、できたあとの維持管理の話も重要になります。点検は大切ですが、数もあるし範囲も広い。すべてに人が行って点検するのはまず無理なので、港空研が桟橋の点検などでやっているＲＯＶ（遠隔操作式ロボット）や、海技研（海上技術安全研究所）

のＡＵＶ（自律型水中ロボット）を使うのはどうだろうかと。点検についても、海技研と連携しようという話をしているところです。将来的には、そのあたりも研究テーマになりそうですね。うみそら研の取り組みとして、そういうことも入って来ると思います。

水谷　他の港湾施設と違って洋上風力発電は民間事業がメインという点でも難しいですよね。予算についてもシビアだし、あと、通常に増して守秘義務が厳しい。例えば、風車のスペックがわからないと構造計算は難しいわけですが、実はスペックはオープンにされていないんです。そのあたりをどう乗り越えるか、情報をどう集めるか、一般の港湾施設の研究とは違う難しさがあります。複数の会社が同じようなことで悩んでいても、その間の情報交換ができないのももどかしい。そこをつなぐような役割を、港空研が果たせればいいですね。何がどの程度できるかも、これから考えていかなければと思っています。

米山　国の直轄事業でないぶん余計に、いろいろな人たちが絡む世界。港湾だけでなく、電気、機械、船舶、漁業者、地元の自治体など、いろいろな関係者がいて、その調整が難しいのかなという印象もあります。事業実施のためのルールづくりも含め、これからというところも多いでしょうね。

下迫　研究はいままさに始まったばかりですが、やはりできるだけ早く、ヨーロッパの基準に日本独自の研究成果を反映させないといけない。難しい課題も多く、いますぐにとはいきませんが、3年以内とか、がんばって2年とか、そのくらいのスパンで成果が出せるように、一丸となって取り組んでいくつもりです。

2019年は日本における「洋上風力元年」です

国土交通省 港湾局
海洋・環境課長　**松良精三** さん

2019年4月に施行された「再エネ海域利用法」については、促進区域の指定に向けて、既に一定の準備段階に進んでいる11区域を整理。7月にはそのうち4区域を、ただちに協議会の設置などを始める「有望な区域」として公表しました。また、「再エネ海域利用法」の施行後、環境アセスメント手続き中の洋上風力発電プロジェクトの案件が1200万kWを超えるなど、導入に向けた取り組みが急激に加速しています。

一方、洋上風力発電設備の資機材は重厚長大となるため、設置および維持管理に利用される港湾については、それを扱えるだけの耐荷重や広さを備えた埠頭が不可欠です。例えば、柱となる「タワー」や発電機を含む「ナセル」、回転する「ブレード」などを埠頭に仮置きする必要があるのですが、これらの部材は非常に重く、通常の10倍程度の地耐力を要するので、岸壁や埠頭の補強工事を行わなければなりません。さらに、洋上風力発電設備は年々大型化。100mを超えるタワーや80mを超えるブレードが製作されているなか、そういった長尺資機材の保管や組み立てが可能な規模の荷捌き地も必須となります。

このような埠頭を有する港湾の数は、プロジェクト数に比して限定的。さらに、当該埠頭は通常の港湾施設と異なり高度な維持管理が求められます。また、プロジェクトは自治体の行政区域を越えて広域に展開。参入時期の異なる複数の発電事業者間の利用調整も必要となってきます。

このため、洋上風力発電設備の設置等の基地となる港湾、すなわち「海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾（基地港湾）」を国が指定。当該港湾において地耐力を強化した岸壁等の埠頭を、国から「再エネ海域利用法」に基づく選定事業者等に対し長期・安定的に貸し付ける制度を創設するために、港湾法の一部改正を行い、11月29日に成立したところです。

今後、いよいよ洋上風力発電プロジェクトの具体化に移っていくわけですが、わが国特有の地震や台風、波、落雷といった気象・海象・地盤特性を踏まえた、調査、施工、維持管理および撤去方法の検討が極めて重要になってきます。こうした検討では、安全性や信頼性とともに、経済性の確保も重要な観点に。すなわち、再生可能エネルギーの最大限の導入のためには、供給価格の低減による国民負担の抑制が重要な要素となっているためです。港空研には、安全性確保とコスト削減というある意味相反する課題を同時に解決できるような、先進的な研究や技術開発を期待しています。

また、洋上風力発電設備は、例えば浮体式設備の係留チェーン・アンカーでの海藻生育も報告されており、ブルーカーボン蓄積の場にもなり得ると考えられます。着床式設備の基礎周辺での集魚といった漁礁的効果への期待も。こういった広い意味での環境・水産資源にやさしい洋上風力発電導入の評価についても、最新の知見や研究が待たれるところです。

2019年はまさに、わが国における「洋上風力元年」といっても過言ではないでしょう。温室効果ガスの排出削減による地球温暖化対策は、世界的にも待ったなしの課題。こうした環境問題への貢献を含め、温室効果ガスを排出しないわが国独自の再生可能エネルギー源である洋上風力発電については、その導入が一層促進されるよう、引き続き取り組んでまいります。

洋上風力発電施設の杭基礎の支持力評価に関する研究

杭や周辺地盤の挙動に大型模型実験と数値解析で迫る！

風や波などの外力により、複雑な変動荷重を受ける洋上風車。その杭基礎周辺の地盤反力特性については、まだわからないことばかり。杭の施工にともなう地盤の力学特性の変化を解明するとともに、施工履歴および変動荷重履歴の観点から杭の支持力を評価すべく港空研では現在、実験や数値解析の準備を整えているところです。基礎工研究グループの松村聡研究官と中村圭太研究官に、これから進めていく研究について伺いました。

厳しい外力による繰り返し荷重を設計に反映するために

繰り返し荷重を受ける杭基礎周辺の地盤反力特性については、これまで十分な知見がなく、明確な設計法や計算手法も確立されていないのだとか。それが洋上風車の杭基礎ともなれば、異なる周波数特性をもつ多様な変動荷重が複合的に作用。地盤反力特性は、さらに複雑なものになります。

松村「例えば強風が何度も来る。そもそも風車が回っているだけで、常に振動したような状態になります。いろいろな繰り返し荷重を受けるわけです」

中村「いままでほとんど考慮されていなかった繰り返し荷重を、少しでも設計に反映できればと。基礎的な研究になりますが、そこに重点を置いています。あとは、施工地盤面に杭を貫入させるときに回りの地盤が乱されるので、そういったところを数値計算的に解いてやって、杭を打ったあとの地盤がどう変化するのかをみていくつもり。私の担当は、数値解析がメインになりますね。実験などで解明が難しい現象を観察するために、コンピュータ上の計算で再現するというものです」

松村「どちらかというと私は、その計算のもとになるような実験を行うのが主な担当。目的や、やっていることは基本的に同じです。洋上風車の場合、大きな杭基礎が必要ですが、同じようなサイズではできないので縮小した模型を用意し、実際に風車にかかるような外力を与えて、杭や周りの地盤がどう挙動するかを調べるような実験をしていきます」

一般海域に広がりつつある洋上風力発電のプロジェクト。当然、これまで考えられていた風の力、波の力とはまったく違う外力がかかることになります。

松村「先進的に洋上風力発電に取り組んでいるのはヨーロッパですが、そこで考えられている外力は、日本で想定されるような外力とは全然違う。風や波、台風や地震、さらに地盤の条件もまったく異なります。私たちのほうがよっぽど厳しい外力の中で、洋上風力発電施設を建てないといけないわけです。ところが、日本の設計の基準はそれに追いついていない。ヨーロッパの基準を借りてきて建てるしかないんですよ。ヨーロッパで使えていたものが、必ずしも日本で使えるとは限りませんから、そこは、日本に適用した場合に考慮すべきことを、われわれのような研究者が補っていかないと。実際のプロジェクトはもう進行しているので、並行して研究を進めていくことになると思います」

地盤研究領域 基礎工研究グループ
松村聡 研究官

地盤の中での見えない挙動をとらえることの難しさ

地盤の中は見ることができないというのが、やはり一番の障壁に。

中村「模型実験をやっても、地盤がどう変形しているのかは、それが伝わった杭からしか見ることができません。その情報も、例えば杭に貼り付けた歪みゲージから得られるような、わずかな情報でしかないわけです。ならばもう少し模型のスケールを小さくしようかという話にもなりますが、果たして同じような挙動が得られるかという問題も……」

松村「実験で起こったことが必ずしも現地で起こっているかどうかわからないし、実際に現地で起こっていることを実験で再現できるのかというのも難しい。なので、実験で見られないようなものを数値解析で補うわけです。そういう難しさがありますね」

中村「仮に、土がどう動いているか、どう変形しているかというのが見られたとしても、力がどういうふうに働いているかといわれたら、もう測定しようがない。力は目には見えませんから。地盤内の応力状態が結局どうなっているのか、目で見て確認することはできません。やっていて難しいなと思うのはそういうところ」

見えないものを、どうやって設計に落とし込むのでしょう。

中村「必ずしも詳細にわからなくても、杭と土が全体としてどういった挙動になるのかということを調べることはできます。なので、とっかかりとしてはそういうところからになりますね」

杭にかかる複雑な荷重に対し地盤が抵抗する力の解明を目指す

中村「従来の設計では、単純に一方向から力がグッとかかったとき、地盤の抵抗がど

れくらいあるかをみていました。そういったところについてはおそらくデータも豊富だし、ある程度は解明されていると思う。でも、一方向だけでなく今度は逆からも力がかかるとなると、これはもう話が一段階上がってしまう。逆方向に曲がるとき、地盤がどれくらい杭に対して抵抗してくれるのかを考える。非線形地盤反力モデルというのですが、そういうモデルの確立につながる研究です」

実際には、洋上風車にはあらゆる方向から荷重がかかります。そうなったとき地盤がどれくらい耐えられるかをみようとすると、これまでの議論だけでは収まらないということに。

松村「例えるならスプーン曲げ。何度も曲げていると、いずれ小さな力でもパキッと折れる。同じように、力自体は小さいのに繰り返したために壊れるということが、土でも起こるかもしれない。洋上風車はいろいろな繰り返しの荷重を受けるので、それが地盤でも起こったら大変だというのが、そもそもの研究の発端になっています」

中村「風の力や波の力を受け続けたとき、それに耐える土は、どれくらいの強度を発揮してくれるんだろうというのを調べるわけです。洋上風車では、繰り返しの回数がものすごいことになる。例えば供用年数20年としたら桁外れの数に。それを実験で調べようといってもなかなか難しいでしょう。模型は大規模とはいえ実際のものからはスケールダウンしますし、そこで現象が現れなかったからといって、実規模でも現れないとは言い切れない。逆に、実験で現れたから実規模でも現れるかというと、そこもちょっとわかりません。その補完をどうしていくかも課題の一つです」

杭の施工（貫入）過程が地盤に与える影響にも注目

一方、杭の施工それ自体が地盤の力学特性に与える影響については、2018年度に大型土槽を用いて杭の打設と引き抜き実験が行われました。

中村「実際に地盤に貫入させた杭と、貫入させずに杭の周りに土を入れ固めて地盤をつくる方法で立てた杭を用意し、それぞれ引き抜くとき、どれくらい土が抵抗してくれるかを調べたんです。貫入させずに立てた杭なら、周りの地盤を乱していない状態を模擬できるわけで、きっと挙動が違うはずだと考えて。結果としては、実際に貫入させていった杭のほうが、かなり引き抜き抵抗が強かった。周りの地盤が密集化し、そのぶんギュッと杭を締め付けているので、強い抵抗力が発揮されるわけですね。一方、貫入させずに立てた杭はスッと抜けちゃう。かなり差が出たことで、貫入過程の重要性が再確認されました。なので、今回、施工履歴というものもきちんと考慮して、杭の支持力を評価しようということに」

設計の際には、ボーリングして地盤の特性を調べますが、そのとき見るのは杭を打設する前のまっさらな状態の地盤で、それを前提として設計を行うのが常。

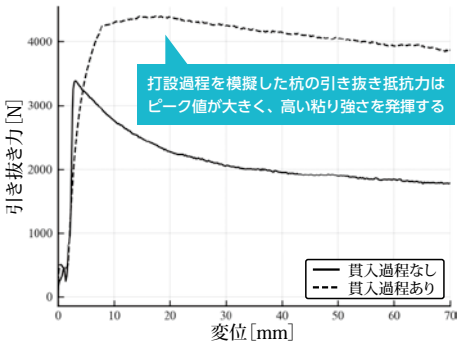
中村「杭を打ち込んだとき、どういうふうに地盤の力学特性が変わって、結果として支持力が出るのか、その過程は一切追っていないわけです。その過程を追い、支持力発揮のメカニズムを解明しないと、実際の杭を打つとき地盤がどれくらいの力を発揮してくれるかきちんと推測できません。2018年度の実験で、明らかに違うことがわかったのは大きいですね。これは、杭基礎を有する構造物すべてに応用できる話だと思います」

松村「われわれが対象にしているものは地盤なので、ここで出てくる成果がこれにしか使えないということはまずない。いろいろな研究をやっていると、持ち札が増えてくるのは強みです。来年度からわれわれが実施することになる実験や解析も、きっと多方面で役立つものになるはず。地道な研究を、着実に進めていきたいですね」

地盤研究領域 基礎工研究グループ
中村圭太 研究官

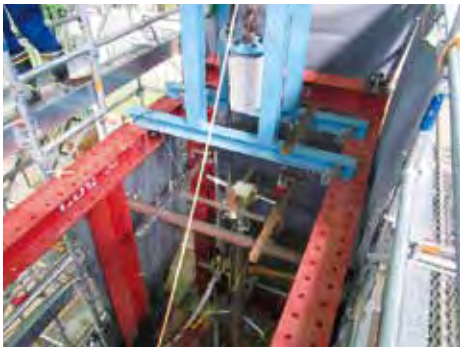
大型土槽を用いた杭の打設、引き抜き実験

大型土槽実験
（土槽：3m×6m×3m　杭径：150mm　杭長：3m）



杭の引き抜き抵抗力の比較

大型土槽を用いた杭の打設、載荷模型実験



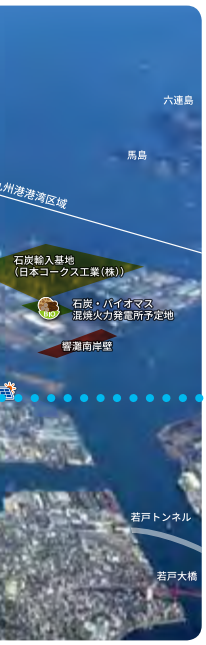
杭の打撃貫入

杭の水平載荷

風力発電関連産業の総合拠点を目指して

北九州市響灘における洋上風力発電プロジェクト

響灘における洋上風力発電事業を進めている北九州市を訪ね、事業を立ち上げた経緯やプロジェクトの内容などについて伺いました。



ひびきウインドエナジー(株)提供

洋上風力発電所（イメージ）

北九州市提供

風力発電産業総合拠点（イメージ）

ひびきウインドエナジー(株)提供

自然エネルギーの風力を使う風力発電は、今後、大きな成長が期待される再生可能エネルギー発電として注目されています。北九州市は響灘地区の充実した港湾インフラや広大な産業用地、安定した風況などのポテンシャルを活かし、洋上風力発電関連産業の振興を推進。2010年には風力発電関連産業の総合拠点を目指す「グリーンエネルギーポートひびき」事業をスタートさせました。

今回は、北九州市が設置した「響灘洋上風力発電施設の設置・運営事業に係る事業者評価・選定委員会」に委員として参加していた港空研の米山治男 海洋研究領域長と共に北九州市に赴き、港湾管理者である北九州市 港湾空港局 理事の光武裕次さんと、市の選定事業者であるひびきウインドエナジー(株)取締役で、本事業の参画事業者の一社である九電みらいエナジー(株)取締役の寺﨑正勝さんにお話を伺いました。

広大な海に目を向けた再生可能エネルギー

北九州市が進めている「グリーンエネルギーポートひびき」は、風力発電事業そのものだけでなく、実証実験施設やサプライヤー拠点の誘致、大規模洋上ウインドファームの誘致、基地港湾の整備など、風力発電事業に必要なものを響灘地区に集積することを目的としています。

光武「北九州市としては、10年程前から響灘の港を使って、環境にやさしい産業を地元企業と協働して統合的に進められないかと検討していたことから、この事業がスタートしました」

発電事業そのものや、それに伴う各種の調査などを実際に行うのは、地元の発電事業者など地域密着の事業を展開している5社（九電みらいエナジー（株）、電源開発（株）、（株）北拓、西部ガス（株）、（株）九電工）から成るひびきウインドエナジー（株）で、2016年の港湾法改正で港湾区域内での長期占用による事業実施が可能になったことから国内で初めて洋上風力発電の事業者公募が行われ、翌年に事業者として市に選定されました。

寺﨑「再生可能エネルギー普及を目的としたFIT制度ができてから、国内でも再生可能エネルギー事業が盛んになりましたが、次第に開発の適地が少なくなっていました。でも日本は目を転じれば広大な海が四方に開けていますから、海洋エネルギーを使わない手はありません。私達のような開発事業者からすると、そこにマーケットが開けてきたと考えています。港湾区域では管理者が明確に決められていますので、事業者としてはとても安心感があります」

北九州市 港湾空港局
理事（エネルギー産業拠点化推進）
光武裕次さん

九電みらいエナジー株式会社
取締役 事業企画本部長 兼
経営企画室担務
寺﨑正勝さん
（ひびきウインドエナジー株式会社
取締役兼任）

港湾空港技術研究所
米山治男 海洋研究領域長
（海洋利用研究グループ長併任）

【 響灘地区洋上風力発電プロジェクト計画概要 】

総合拠点として求められる4つの機能

この事業では洋上風力発電に関する一連の取り組みを通じて、地域の風力発電を支える技術者の育成や、昔から地元で盛んな漁業との協働、また環境にやさしい洋上風車の街としての観光需要など、幅広い分野での発展が期待されています。

光武「港湾管理者で地方行政も行っている立場からすると、最終的にはこの事業によって街に賑わいをもたらしたいということがいちばんです。小さなところでは風車を造るために海運や物流に動きが出ますから、そこにお金が落ち、人が増えます。もう少し広げると、物をつくるサプライヤーさんにも集まってもらうことで、そこでも雇用が広がっていくと考えています。近隣のファームだけでなくいろいろなところにサービスを提供することで、産業の規模をどんどん大きくしていこうという考えで、私達はこれを〝総合拠点〟と呼んでいます」

光武「総合拠点としての機能は大きく分けると4つあり、その一つは部材を組み付けて風車の形になったものを洋上の設置場所まで持っていくという積み出し拠点としての機能。また、それぞれの部材は地場でつくるものもあれば、国内、あるいは海外とやりとりすることもあります。そうした港本来の機能である輸出入・移出入の拠点としても機能させなければなりません。次に、部品をできるだけ地元でつくる風車関連企業の集積です。最後の一つは、風車完成後のオペレーションとメンテナンスです。風車は一旦建てたら365日24時間継続してオペレーションします。さまざまな気象条件の変化もありますが止められません。不具合が起きてもいけない。維持するための〝O&M〟拠点が必要になります」

風車に必要な部品点数は数万点といわれていますが、この事業では、こうした部材を輸入に頼らず国内や地元メーカーの製品を積極的に採用することで、持続可能な産業に発展させたいと考えているそう。

寺崎「電子部品やタワー、基礎のジャケットの部分などは国内生産が可能なものですし、ユーザーとしては日本製のほうが安心感があります。地元の企業さんにも『最初は大変かと思いますがチャレンジしてください』とよく申し上げているところです」

また、日本は風車の先進国であるヨーロッパとは海象条件が異なり、設計・施工でもそれに対応する必要があります。

米山「基本的には台風と地震、もうひとつは地盤の違いがあります。ヨーロッパは遠浅で地盤はほぼ均質ですが、日本は遠浅ではなく地盤もかなり複雑なので、きっちり地盤調査をして、それに合った基礎構造を選定し、洋上風車を設計していくということになると思います」

港空研は、以前、北九州市沖で実施された着床式洋上風力発電の実証実験に携わっており、こうした研究データが今後の設計や施工、保守点検などに活かされていくことになりそうです。

米山「今年度（2019年度）から本格的な研究も進めています。どのような形での協力になるかわかりませんが、港空研としてはこれからも積極的に協力をさせていただきたいと思っています」

最後に洋上風力発電事業を進めていく上でのメッセージをいただきました。

光武「一般海域に向けた新法も施行されて、今年（2019年）を洋上風力の元年とおっしゃる方もいますし、海外からの注目度も高くなっています。こういう時に一番必要なのは政府のメッセージです。はっきりとしたメッセージがあって初めて海外の投資家や民間事業者なども動いてくれると思います。また、基地港湾についてはあちらこちらに数を造るのではなく、しっかり見定めて必要なところに必要なだけ造るという適切な決断をしていただきたいですね」

寺崎「私も同感で、政策がころころ変わってしまうと安心して投資できませんから、国の明確なメッセージを出していただきたいと思っています。また、この事業は課題が非常に大きく、技術的にもシステム的にも一社だけでできるような生易しい事業ではありません。地元の理解や協力というのも必要です。まずは洋上風力事業というものが日本でもできるということを皆さんに知ってもらうためにも、ここをモデルケースとして広めていければいいなと思います。北九州市さんとこれまで手を取り合って進めてきた事業なので、なんとしてもやり遂げたいと思います」

※このページの取材は2019年11月に行いました。

研究領域を跨いで若い力を集結！

洋上風車という新たな対象に挑む

地盤研究領域
基礎工研究グループ
中村圭太 研究官

海洋研究領域
海洋利用研究グループ
加島寛章 主任研究官

地震防災研究領域
耐震構造研究グループ
大矢陽介 主任研究官

海洋研究領域
耐波研究グループ
鶴田修己 研究官

加速する洋上風力発電のプロジェクトと同時並行で、
まだ明らかになっていない
日本の海域ならではの技術課題をクリアにすべく、
進めていくことになる港空研の取り組み。
いままさに、それぞれの専門分野から挑戦を始めた
4人の研究者にお話を伺いました。

それぞれの分野ごとに研究課題は多様

大矢　それぞれ研究分野が違うので、このテーマへの関わり方もさまざまですよね。私はいつも地震について研究しているので、今回はその対象施設として洋上風車が新たに加わったという感じ。ただ、耐震構造研究というのは経験工学的なところがあって、地震で壊れた構造物を調べるという方法がよくとられるわけです。ところが今回の対象は新しい構造物。洋上では建設実績もないし、当然、地震被害もない。何もわからないところからのスタートで、地震のときどうやって壊れるのかとか、いまの設計の仕方で大丈夫なのかといったところを考えていくことになります。

中村　私が担当しているのは洋上風車でも特に杭基礎の部分。今号の「FOCUS ON」（本誌6～7ページ参照）の取材でもお話ししましたが、施工地盤と杭の相互作用について調べ、どれくらい支持力が得られるかといった点を評価していきます。

加島　洋上風車を設計する際には、どういうふうに揺れるかも重要な検討課題に。揺れの要因となる波や風が、風車に当たったときにどういう挙動を示すのか。構造計算モデルを使って応答を解くというようなことをやっています。いまの設計基準の中では風と波の条件を数多く設定し、膨大な数の組み合わせの荷重を計算して風車にかかる力を算出しているのですが、それをもう少し効率的にできないかということも研究課題ですね。

鶴田　われわれ耐波研究グループとしては、波が当たったときの波力をみるわけですが、今回はちょっと難しいんです。通常、設計するとき必要なのは最大波力。つまり、一番大きい波を一つだけピックアップして、どれくらい力がかかるかをみています。ところが洋上風車は、従来の港湾構造物とは違って柱状なので、風や波を受けて揺れる。だから動的な応答特性みたいなものや、波との相互作用、風との相互作用もみていく必要があるんです。ということは、一つの波ではなく、時系列ですべてをみる必要がある。求められる精度も高くなります。従来の設計方法と違うので、どういうふうに解いていくかという課題もちょっと変わってきますから、チャレンジングなテーマだと思っています。

欧州の基準の準用では足りていない部分を検討

大矢　従来の耐震設計法が、洋上風力発電設備で使えないのかというと、実はまだわからない。これまでの港湾構造物は、土の中で、土に押されて壊れることが多かったんです。でも、風車は細長くて、上でびょんびょん揺れるようなものなので……。それがどうやって壊れるのか。まったく違う壊れ方をするのかもしれないし、もしかしたら一緒かもしれない。われわれは実験ではなくシミュレーションをやろうとしているので、いまはシミュレーションのためのツールを開発しているところです。これが完成して動かしてみないことには、まだなんとも言えないというのが正直なところですね。

加島　そもそも洋上風車を造るにあたって日本独自の基準がないんです。ヨーロッパのほうが研究が進んでいて、数多く造

られている実績もある。ただ、ヨーロッパの基準には地震や台風に関することが入っていません。現状、日本でもヨーロッパの基準を準用するしかなく、その範囲であれば問題ないだろうというかたちで造っている状態。でも、それではよくないだろうと。考慮されていない地震や台風が、日本においては大きな外力となってきますから、そこを検討しないわけにはいかないでしょう。港空研、とくに「海洋インフラ・洋上風力技術センター」が担っていくのは、おもにその部分ということになります。

鶴田　日本独自ということでいえば、われわれが時系列的な砕波力の検討にCADMAS-SURF/3D（三次元数値波動水槽）を使おうとしているのは、海外とは異なるアプローチだと思いますね。かなり細かい計算で波の動きを解くもので、計算時間もけっこうかかる。こういった設計で実際に使っている事例は意外と少ないんです。でも先ほど申し上げたように、時系列ですべての波のデータが必要になってくる以上はこうした緻密な手法も必要です。当然その前段階として水理模型実験も行いますが、このやり方で取り組んでいくことが今後の技術発展に繋がるでしょう。

研究は離陸したばかり 目標に向けて計画・準備を

加島　私はこの4月に本省から戻ってすぐ洋上風車をやることになって。準備がない状態でのスタートでしたが、FAST（本誌2ページ参照）というプログラムがあるのでそれを使って、以前から研究していた波のことをやろうかと。特に台風とか大きな波、あるいはヨーロッパでは検討されていない少し周期の長い波（うねり）といったものを、風車の設計のほうにうまく考慮できないかというところに取り組もうとしています。一つは、風車に対して波の影響がどれだけあるのか。あとは、先ほども言ったように、風と波のいろいろな条件を組み合わせて構造物に作用する力を考えるのですが、そのケースがすごく多いので、例えばこのケースに関してはそこまで波は考えなくてもいいとか、なるべく絞り込む方向に。煩雑な計算をやらなくても簡単な方法で同じような結果が出るようなものはそちらを使えばいいと思うので、そういった簡単な方法もあわせて考えようとしています。あくまでも計画ですけど3年以内にやりたいですね。

鶴田　そういう効率のよいやり方と、その一方で、すごく緻密に解いていくやり方。選択肢を2つ設け、両輪でやっていこうというのが方針としてあります。われわれは、まずは精緻に解いていくという方向性でやるにあたってのシミュレーションのベンチマークのデータを得るべく、水理模型実験から始めようと。それが今年度の目標ですね。それだけではなく、従来の設計の計算式の精度も検証していきたい。メインのターゲットは波が砕けてから。通常の数倍から数十倍の大きな波力になるためすごく複雑で、ヨーロッパでもさほど研究が進んでいないんです。そこに注目して、まずは実験を始める計画です。

大矢　現段階ではツールがないので、風を受けながら地震で

揺れるというのをシミュレーションできないんですよね。風で傾きながら揺れるので、たぶんまっすぐのものを揺らすのとは違うのではないかなと。ただ、その差が大きいのか小さいのかは不明。実際、そんなに影響がなければ研究ニーズはないと思うし、まずはツールをつくって調べないことには、何が耐震分野の研究ネタになるのかちょっとわからないんですよ。なので、2年くらいプログラムをつくりながら風車を揺らしてみて調べて、その後、得られた知見から研究課題を見つけていくことになると思う。そういうスタンスで考えています。

中村　僕の場合は新しいことというより、これまでの研究の延長線上ですね。例えばモノパイル（1本杭）だとすごく大口径になるので、打った後、周りの地盤がどんな状態になるかは未知数。その部分を解析で補完しようと思っているんですけど、もし大口径の杭を打った結果、いままでと違う地盤ができあがるのであれば、完成後にどれくらいの水平抵抗力を出してくれるのか気になります。あと、杭を地盤に貫入させていったとき、普通サイズの杭なら先端のほうでだんだん土が詰まって閉塞するのですが、大口径だとおそらくあまり詰まらない。詰まると支持力が大きく出て、強い力に耐えてくれますが、もし閉塞しないとなると、支持力は考えているほど出ないと思うんです。どれくらいの支持力のものが造れるかわからないので、シミュレーションを使って検討していこうと考えています。来年度、小さめの口径と大きいものとで実験をやっていくんですけど、それとあわせて解析も進めていく予定です。

連携しつつ難しい課題に取り組む

中村　分野を跨いでの取り組みになりますが、例えばわれわれ基礎工研究の分野で必要な、杭の頭の部分にどれくらいの荷重がかかるのかということは、加島さんがやっている構造計算の結果からインプットとしていただける。そういった協力体制はできていますね。

加島　あとは情報の共有。例えば大矢さんは地震のことをやっていますが、そのとき風と波の影響がどれだけあるか知りたいと。いま私がやろうとしている中に地震のことはなく、風と波だけなので、そういう情報が共有できていれば、地震を考慮する際にも検討はしやすくなるんじゃないでしょうか。

鶴田　それぞれの研究を全部足し合わせることで、最終的に設計ができるような感じですね。基礎研究もできそうなので、僕としてはワクワクしています。

大矢　今回、若手が中心になって研究に取り組んでいるので、そういう意味でも楽しみですね。

鶴田　もちろん急いで進めますけど、それでもけっこう時間はかかりそうですよね。既にわれわれは、防波堤など従来の港湾構造物でも抱えている最新の課題を知ってしまっているわけで、スタートしたてのこちらの研究でも、その課題をみないわけにはいかない。考えるべきことがありすぎて、課題がどんどん膨らんでいるのが現状です。将来的に、洋上風力発電施設の設計を通常の港湾構造物と近いレベルまで引き上げることになれば、これからすごい道のりになると思う。力を合わせて、コツコツ積み重ねていくしかないですね。

「Coastal Structures 2019」に港空研の研究者が参加しました

セッションにおける論文発表の様子

2019年9月30日～ 10月2日、ドイツのハノーバーで開催された「Coastal Structures 2019」に港空研の研究者が参加しました。「Coastal Structures」は、アメリカ土木学会（ASCE）海岸・港湾・河川協会（COPRI）が主催する海岸・港湾構造物に関する国際会議で、4年ごとに開催されています。前回は2015年9月にアメリカのボストンで開催、前々回は2011年9月にASCEと土木学会の海洋開発委員会・海岸工学委員会の共催で横浜にて開催され、当時土木学会海洋開発委員長であった港空研の高橋重雄理事長（当時）や海岸工学委員長の磯部雅彦東京大学教授（当時）、COPRI代表の小林信久デラウエア大学教授らが共同議長を務め、多くの港空研メンバーが事務局の運営に参加しました。

今回の会議には、ヨーロッパ、アメリカ、アジアなど世界各国から200名以上の研究者･技術者が参加しました。３つの会場で並行してセッションが行われ、基調講演のほか全27のセッションで論文発表が行われました。港空研からは下迫健一郎特別研究主幹、海洋研究領域 耐波研究グループの鈴木高二朗グループ長、鶴田修己研究官、川口真吾研究員、田中敦依頼研修員が参加し、岸壁や護岸に作用する波浪･津波研究などの論文発表を行いました。

2日目の午後は、テクニカルツアーとしてライプニッツ大学ハノーバー（旧ハノーバー大学）とブラウンシュバイク工科大学が共同で運営している実験施設（平面水槽と長大水路）を見学。この長大水路では、港空研の大規模波動地盤総合水路が完成する以前の1996年に、当時の港湾技術研究所とブラウンシュバイク工科大学とで共同研究の実験が行われており、当時使用された大型模型がそのまま残されていました。

今回は論文発表数や参加者は前回よりやや減少していたものの、世界各国の最新の研究成果を知るとても貴重な機会となりました。

平面水槽

長大水路（全長 307m）

1996 年の実験で使用された大型模型

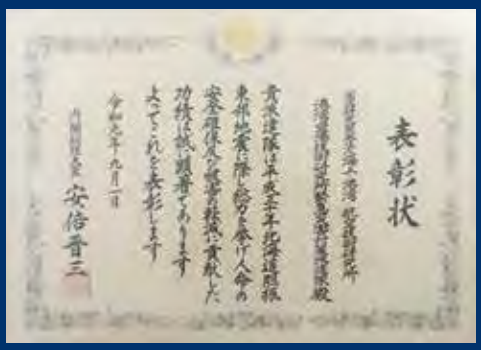
港空研の緊急災害対策派遣隊が防災功労者内閣総理大臣表彰を受賞しました

港空研の緊急災害対策派遣隊が令和元年防災功労者内閣総理大臣表彰を受賞し、2019年9月20日に総理大臣官邸で行われた表彰式に栗山善昭所長が出席しました。

港空研の緊急災害対策派遣隊は、2018年9月6日の北海道胆振東部地震において地震発生の翌日早朝に苫小牧港に派遣され、被害調査を行いました。調査では、1995年の兵庫県南部地震における神戸港の液状化被害をはじめとする国内外での災害調査の経験、大型模型実験による被災メカニズムの解明や対策工法の開発などの研究実績、復旧工事への助言を行ってきた豊富な経験や知見をもとに、港湾施設の被災状況の把握や被災施設の復旧等に関する高度な技術指導を行いました。特に、液状化による広域の噴砂・陥没・沈下・隆起メカニズムを明らかにし、調査結果に基づいて復旧対策や管理指針を速やかに提示したことが、苫小牧港国際コンテナターミナルの早期復旧に大きく貢献したとして、その功績が認められました。

防災功労者内閣総理大臣表彰は、『「防災の日」及び「防災週間」について』（昭和 57 年 5 月 11 日閣議了解）に基づき、災害時における人命救助や被害の拡大防止等の防災活動の実施、平時における防災思想の普及または防災体制の整備に貢献し、その功績が顕著であると認められた団体や個人を表彰するものです。

栗山所長（左）と安倍首相（右）



フランス交通科学技術研究所とうみそら研との協定書延長署名式を行いました

コバリク副所長（左）と大和理事長（右）

2019年10月28日に港空研において、フランス交通科学技術研究所（IFSTTAR）と、うみそら研による協定書延長に関する署名式を行いました。

この協定は、地盤工学分野と土木構造分野における技術協力を促進させることを目的に、IFSTTARの前進であるフランス土木研究所（LCPC）と港空研との間で2009年に締結し、2015年にIFSTTARと港空研との間で締結したものです。2020年2月に現在の協定期間の区切りを迎えることから、このたび改めていくつかの発展的な内容も加え協定の延長を行いました。

新たな協定書には、2機関共同で国際共同研究の研究費申請などができるよう追記され、さらにこれらの研究費申請は2機関に限らず他研究機関を含めてもよいことが追記されました。

当日はIFSTTARのコバリク副所長とうみそら研の大和裕幸理事長が協定書に署名し、その後、気候変動に関する防災対応等についての活発な意見交換なども行われ、技術協力を含めた協力体制を再確認する機会となりました。

地盤研究領域 高橋グループ長と森川領域長らが英国土木学会のTelford Premiumを受賞

地盤研究領域 地盤改良研究グループ 高橋英紀グループ長と森川嘉之地盤研究領域長らが、英国土木学会（ICE）のTelford Premium（論文賞）を受賞し、2019年10月4日に授賞式が行われました。

論文は、深層混合処理工法によって固化された土に関する37年にわたる調査結果をまとめたもので、国土交通省四国地方整備局の藤井愛彦さん（元港空研在籍）、東京工業大学の北詰昌樹教授（元港空研在籍）と連名で受賞しました。

深層混合処理工法は1974年から日本で実用化されましたが、当時どのくらいの年数にわたって土が固化された状態が保たれるかが不明でした。港空研では、長期的な固化状態を調べるため、当時の研究者が1979年に現場で採取した固化処理土の塊を所内の土槽に埋め、調査を開始しました。現在も固化処理土は引き続き管理され、調査が続けられています。北詰教授は港空研在籍時に長期間管理を担当されており、現在は高橋グループ長がそれを受け継いでいます。

受賞論文は、劣化特性の把握に役立つもので、世界的にみてもこれほど長期にわたる調査は事例がないこと、また力学的な特性だけでなく化学分析結果も照らし合わせて考察していることなどが評価されました。

左からワイリー英国土木学会長、高橋グループ長、北詰教授

深層混合処理工法：攪拌翼を用いて、石灰やセメントなどの固化材を地盤の深層まで混合する工法。

Telford Premium：ICE の初代会長 Thomas Telford（在任期間 1820～1834 年）の遺産により設立された賞で、ICE に投稿された優れた論文に対して授与される論文賞。

PARI 世界に貢献する港湾空港技術
VOL.38 JANUARY 2020

もっとよく知ろう 港湾空港 海や空の豆知識

研究者が解説します！

海の上の風力発電

海洋研究領域
海洋利用研究グループ
加島寛章
主任研究官

「風車」と聞いて何を思い浮かべるでしょうか？オランダの田園風景に出てくるような風車でしょうか。もし、田園が海に変わったらどんな光景になると思いますか。今回、そんな海の上の風車**「洋上風力発電」**についてご紹介します。

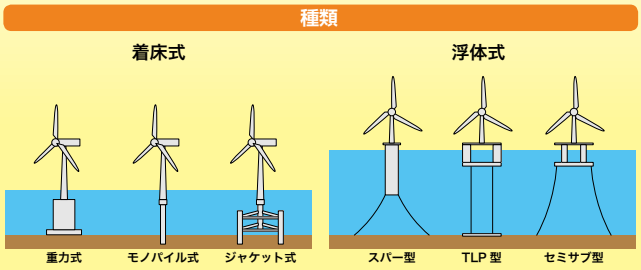
風車は、風の力を使って製粉や干拓地の排水のほかに発電にも利用されており、地上に置かれているものが多いです。しかし、風力発電は風の向きや強さによって発電量が左右されてしまうため、それらが比較的安定している海の上が適していると言われています。近年、環境にやさしいエネルギー源として、日本の広大な海の上に風車を置いて電気を作る洋上風力発電に大きな注目が向けられています。

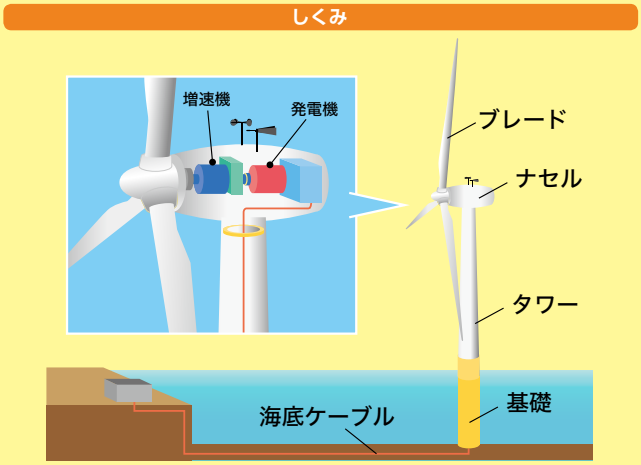
風車を海の上に置く方法は2つあります。「着床式」と呼ばれる風車を海底に固定させる方法と、固定せずに水面に浮かばせた「浮体式」と呼ばれる方法です。一般的に、水深が50mより浅い沿岸域では着床式、水深50mを超える沖合では浮体式が適していると言われています。

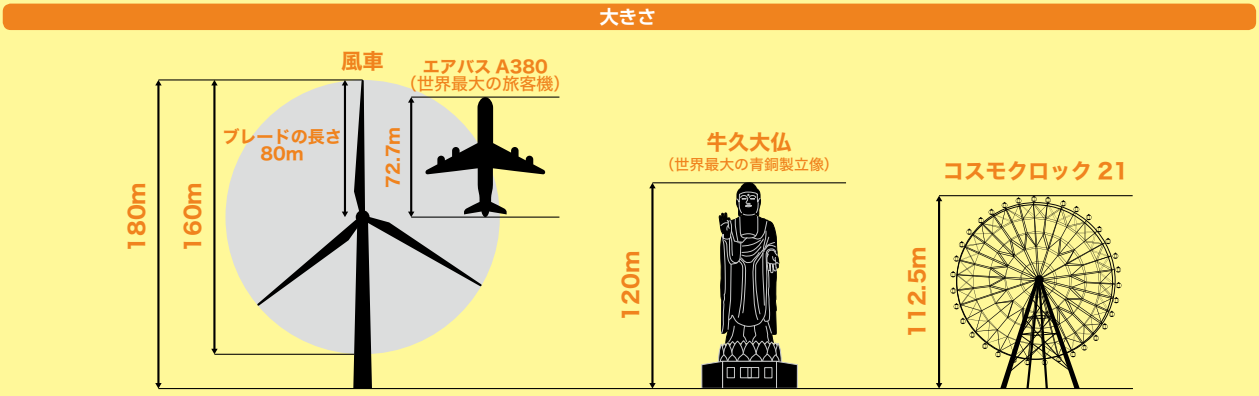
洋上風力発電では、風がブレードと呼ばれる翼に当たると翼が回転し、その回転がナセルと呼ばれる装置の中に伝わります。ナセルの中では、回転のスピードを増速機という歯車で速くし、発電機に伝えて電気に変えています。その後、タワーや海底ケーブル内の送電線を通って電気が地上に届けられます。

大きさは？というと、例えば、世界には高さ180m、翼の長さ80mほどの巨大なものがあります。世界最大の旅客機ほどの大きさのものが海の上で回転していることになります。

私たちの研究所では、海の上で巨大な風車が安全に、安定して発電できるように、台風による波や地震で風車がどのような挙動をし影響を受けるのかを調べています。







企画・発行　国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所　Port and Airport Research Institute（PARI）
〒239-0826　神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　TEL:046-844-5040　FAX:046-844-5072　URL:http://www.pari.go.jp
編集・制作　（株）ホライゾン

本誌の定期送付・送付中止・送付先変更のご依頼、ご意見・ご感想などはこちらまで

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
Port and Airport Research Institute（PARI）
〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　TEL：046（844）5040　FAX：046（844）5072　URL：http://www.pari.go.jp

VEGETABLE OIL INK
グリーン購入法に基づいた
用紙を使用しています。