

# 海洋への いざない



公益社団法人 日本船舶海洋工学会  
創立120周年記念事業

## ご挨拶

日本は、世界で6番目の広さの排他的経済水域 (EEZ) を有する広い海に四方を囲まれており、古来より海の恩恵を享受した暮らしを営んできました。船で外国との貿易や文化交流することによって、より豊かでより文化的な生活を築いてきました。また、造船や海運を含む海事産業や水産業の発展が、日本の経済成長の基盤として大きく貢献して参りました。公益社団法人 日本船舶海洋工学会は、1897年に造船協会として発足し、日本の造船界をリードし、海事産業の発展を支え、2017年に創立120周年を迎えました。この度これを記念して『海洋へのいざない』を発行します。本書は、地球が誕生した46億年前の海の成り立ちから始まって、物流としての船と海の役割、再生可能エネルギー、化石エネルギー、鉱物資源、水産資源、環境問題、海の安全、そして未来の海洋利用に至るまで、海洋に関するすべてを網羅したものであります。

いま、未来を語る上で宇宙に思いを馳せ、夢を抱くのは自然なことであり、多くの人々はその解明に没頭する姿は当然です。そして宇宙に関しては次々と新事実が明らかになっています。一方、海洋に関してはどうでしょうか。諸説ありますが、例えば深海域においては数パーセントしか解明されていません。皆さん、私たちが住んでいるこの地球上で海洋抜きでは生活が成り立ちませんし、特に海洋立国の日本においてはその重要性は増すばかりです。どうぞ本書を読まれることを一つのきっかけとして、海洋への興味を持って頂き、未来へ向けて広く深い開発を進めて頂きたいと思えます。

皆さんが熱狂している三つのF1レース、「陸のF1、モータースポーツのフォーミュラ1」、「空のF1、レッドブル・エアレース」、「海のF1、アメリカズカップ」があります。「アメリカズカップ」は1851年から150年以上続いている国際最高峰ヨットレースですが、現在では、さまざまなハイテク技術が採用され、風速の2倍以上の速力、最高速力70km/hが出ます。要はヨットなのですが、その絶え間ない工夫が他の分野の技術発展にも大いに貢献してきました。これも海のおかげです。

海洋文化を持続的に保持するためには、「海をよく知り、海に親しみを持ち、海を守り、海の豊かな恵みを利用すること」が必要です。日本が現在このように発展してきたのは、海洋が大きく寄与しています。それにもかかわらず、近年、造船、海運、海洋関係の道に進まれる人の数が極端に減っています。それらの分野に若い人たちが興味を持ち、夢を持ち積極的に関与されますことを大いに期待しています。繰り返しになりますが、どうぞ海洋に自分の将来を託して頂きたいと思えます。

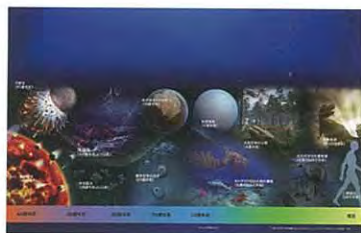
公益社団法人 日本船舶海洋工学会  
会長 原 壽

# 海洋へのいざない Contents

ご挨拶 ..... 2

## 第1章 海とのかかわり ..... 6

- 1 海の成り立ち ..... 8
- 2 海のすがた ..... 10
- 3 海の環境 ..... 12
- 4 海の利用の歴史と今後のあり方 ..... 14



## 第2章 ひとつものを運ぶ ..... 16

- 1 物流における船の役割 ..... 18
- 2 船を造る技術 ..... 22
- 3 運航支援技術 ..... 26
- 4 船の種類 ..... 28
- 5 今後の船 ..... 30



## 第3章 再生可能エネルギー ..... 32

- 1 需給・ポテンシャルマップ ..... 34
- 2 風をエネルギーに変える風力発電技術 ..... 36
- 3 波による発電 ..... 38
- 4 潮汐・潮流・海流発電 ..... 40
- 5 海洋温度差発電 ..... 44
- 6 今後の海洋再生可能エネルギー利用 ..... 46



## 第4章 化石エネルギー・鉱物資源 ..... 48

- 1 資源需給及び海底資源の概要 ..... 50
- 2 調査船・海中ロボット・探査技術 ..... 54
- 3 石油・ガス 生産技術、浮体、係留 ..... 56
- 4 メタンハイドレート ..... 58
- 5 海底熱水鉱床 海底の温泉がつくる鉱物資源 ..... 60
- 6 マンガン団塊・コバルトリッチクラスト ..... 62
- 7 新しい海底鉱物資源 レアアース泥 ..... 64
- 8 海水ウランの採取 ..... 66



## 第5章 水産資源 ..... 68

- 1 水産物の生産と消費の動き ..... 70
- 2 漁業 ..... 72
- 3 養殖業 ..... 74
- 4 今後の水産業 ..... 76



## 第6章 海の環境を守る ..... 78

- 1 船舶による汚染対策 ..... 80
- 2 環境調査 ..... 82
- 3 海の環境を守る一生態系 ..... 84
- 4 開発と環境の調和 ..... 86



## 第7章 海の安全・安心 ..... 88

- 1 国を守る ..... 90
- 2 船を守る ..... 92
- 3 海の災害から国土を守る ..... 94
- 4 海の安全教育 ..... 96



## 第8章 未来の海洋利用 ..... 98

- 1 海洋利用の展望 ..... 100
- 《コラム》海で楽しむ—海洋性レクリエーション ..... 103



もっと知りたい人へ ..... 104

船と海のみめ知識 ..... 108

執筆者 ..... 111

# 1

# 海とのかかわり

月誕生  
(45億年前)

超大陸ユーラシア出現  
(19億年前)

海誕生  
(44億年前より以前)

地球誕生  
(46億年前)

生命誕生  
(38億年前より以前)

真核生物の出現  
(21億年前)

全球凍結  
(6億年前)

大型生物の上陸  
(4億年前)

恐竜絶滅  
(6500万年前)

古生代末の大量絶滅  
(2億5000万年前)

カンブリア紀の生命大爆発  
(5億4300万年前)

人類誕生  
(20万年前)

46億年前

40億年前

30億年前

20億年前

10億年前

現在

太陽系の惑星の中で、海が存在するのは地球だけです。もし地球がもっと太陽に近ければ、海の水は蒸発してしまい、もっと遠かったら海は凍りついていたことでしょう。地球生命の起源は海にあると考えられています。私たち人間をはじめ豊かな生命に満ちあふれた“奇跡の星”地球は、海が育んだといっても過言ではありません。

## 地球46億年の歴史

地球に海が誕生したのは44億年前より以前といわれる。生命は海で生まれ、進化を続け、やがて陸上に進出したと考えられている。海は、私たち地球生物の故郷でもある。

# 1

## 海の成り立ち

### 地球の誕生

今から約46億年前、原始太陽と小さな惑星が形成されました。小さな惑星は、衝突を繰り返すことによって惑星となっていました。そのうちの一つが地球となりました。しかし、原始の地球は、小惑星同士の衝突によるエネルギーと、大気中の水蒸気による保温効果によって、表面の温度が1500℃を超えていたそうです。この高い温度のため、生まれたばかりの地球の表面上は、鉱物や岩石が溶け込んだマグマの海によって覆われていました。これらの鉱物には、現在人類が使用している希少な金属類等も含まれます。原始大気は、水蒸気、二酸化炭素、窒素などのガスで構成されていました。

### 海の誕生

やがて、地球が現在の大きさに近づいていき、地球表面の温度が急に低下すると、原始大気に含まれていた水蒸気が雨となって、地球表面に降り注ぎました。雨が地球表面を冷やすことによって、降雨が加速しました。この降雨は1000年以上続き、原始の海が形成されたと考えられています。当初は、火山ガスに含まれていた塩酸ガスなどが雨に溶け込んでいたため、海は酸性化していました。従って、生物がすめる環境にはありませんでした。しかし、酸性の海水がカルシウム、鉄、ナトリウムなどの鉱物成分を溶かし込んでいき、やがて中性となりました。おおよそ44億年前までには、海の原型ができあがったと考えられています。

### 生物の誕生

その後、海水には、大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が溶け込みました。生命が誕生したのは、38億年前より以前と考えられています。当初の生命は、環境中の硫化水素などを利用していましたが、その後光合成生物が誕生しました。すなわち、光のエネルギーと二酸化炭素、水を使って有機物が生産されるようになりました。これに伴って、海中には酸素(O<sub>2</sub>)が生成されました。

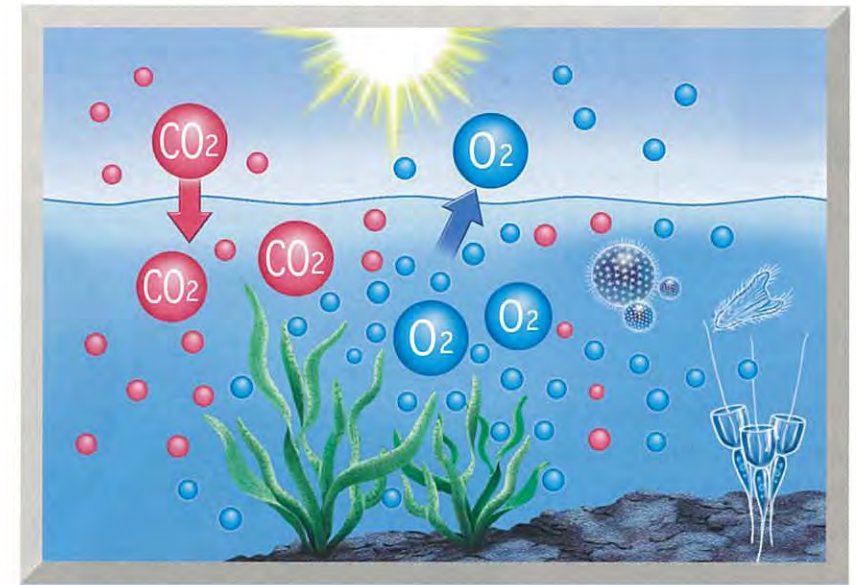


図2 光合成生物の誕生

### 海水の化学組成

海水中の二酸化炭素と酸素の作用によって、原始の海に含まれていたいくつかの成分は沈殿し、少しずつ現在の海水の組成に変化していきました。現在、海水の塩分は3~3.5%程度ですが、淡水が流れ込む沿岸域ではもう少し低くなります。海水に含まれる成分の78%はナトリウムイオンと塩化イオンで、これらは海水が塩辛い原因となっています。その他にも、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、カリウムイオンなどが比較的多く含まれています。また、大変微量ではありますが、ウランイオンなど、人類が使用する成分も含まれています。

リウムイオンと塩化イオンで、これらは海水が塩辛い原因となっています。その他にも、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、カリウムイオンなどが比較的多く含まれています。また、大変微量ではありますが、ウランイオンなど、人類が使用する成分も含まれています。

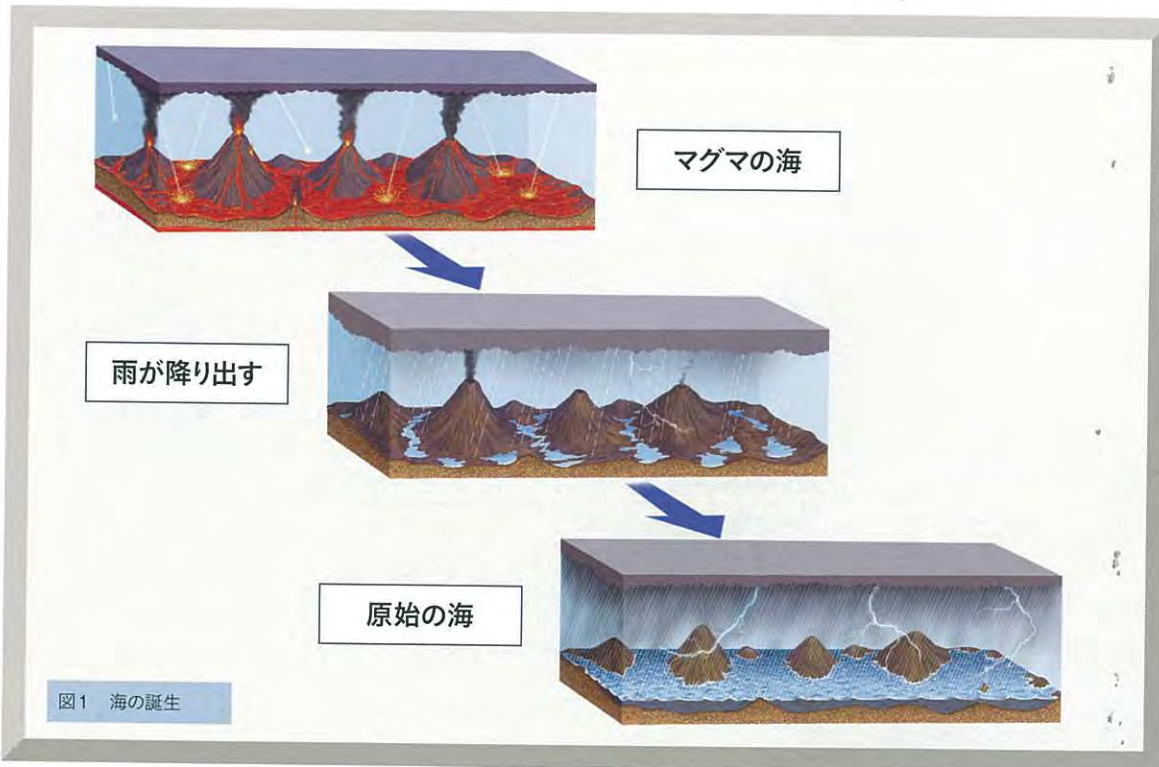
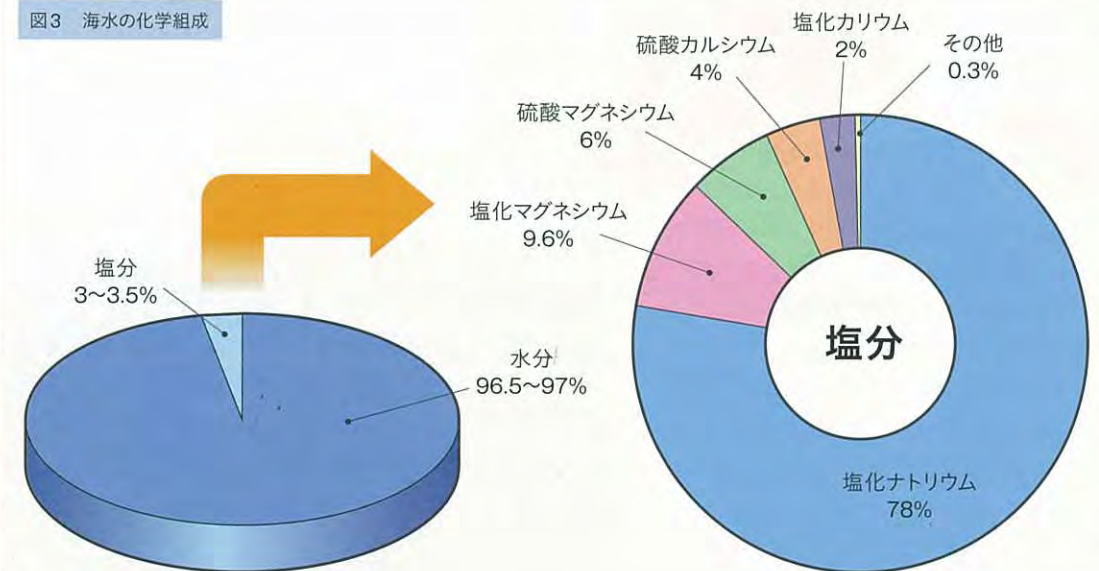


図1 海の誕生

図3 海水の化学組成



# 2

## 海のすがた

### 海の広さ

地球の表面の70%は海で覆われていて、面積にすると3.62億km<sup>2</sup>にもなります。一番広いのは太平洋で、1.66億km<sup>2</sup>ほどの面積を持っています。その他、大西洋、インド洋、北極海、南極海に分けることができますが、すべての海はつながっていますので、船で自由に航行することが可能です。

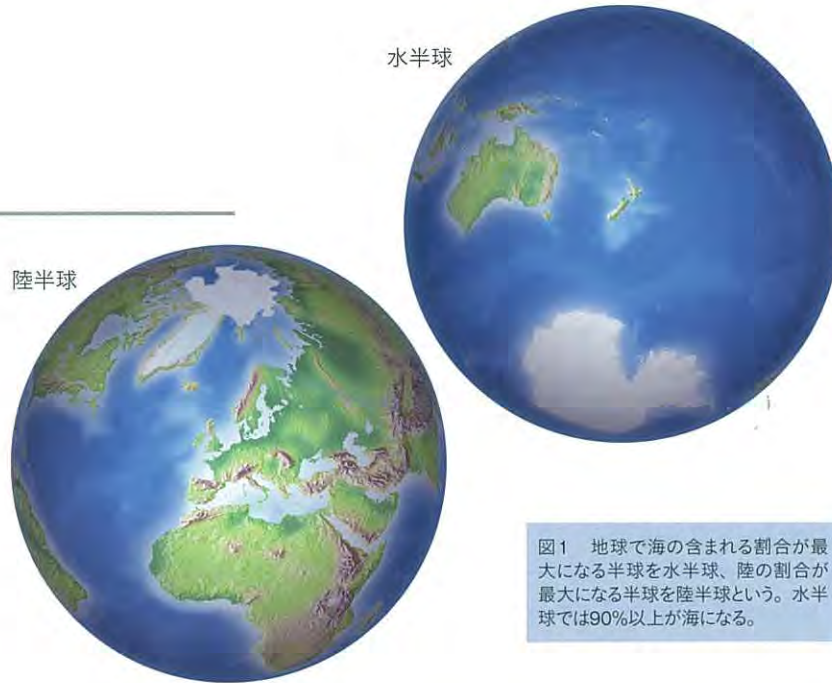


図1 地球で海の含まれる割合が最大になる半球を水半球、陸の割合が最大になる半球を陸半球という。水半球では90%以上が海になる。

### 海の深さ

海底には、山や谷がありますが、平均すると深さは約3729mです。富士山の高さが3776mですので、それより少し小さいくらいです。一番深いところは、太平洋にあるマリアナ海溝で10920mです。大西洋、インド洋についても、それぞれプエルトリコ海溝で8605m、ジャワ海溝で7125mと最も深くなっています。エベレスト山の高さが8848mですので、マリアナ海溝の深さはエベレスト山の高さよりも大きいこととなります。海溝は、プレート同士が衝突して、一方のプレートが地球の内部に沈み込むところで形成されます。日本の周辺では、海洋のプレートが大陸のプレートの下に沈み込んでいる海溝などで、歪みが蓄積して地震が発生し、大きな津波が発生することがあります。一般的には、深さが3000m~6000mの海域が海洋の面積の約70%を占めています。海水の量を計算してみると、約13.5億km<sup>3</sup>になります。

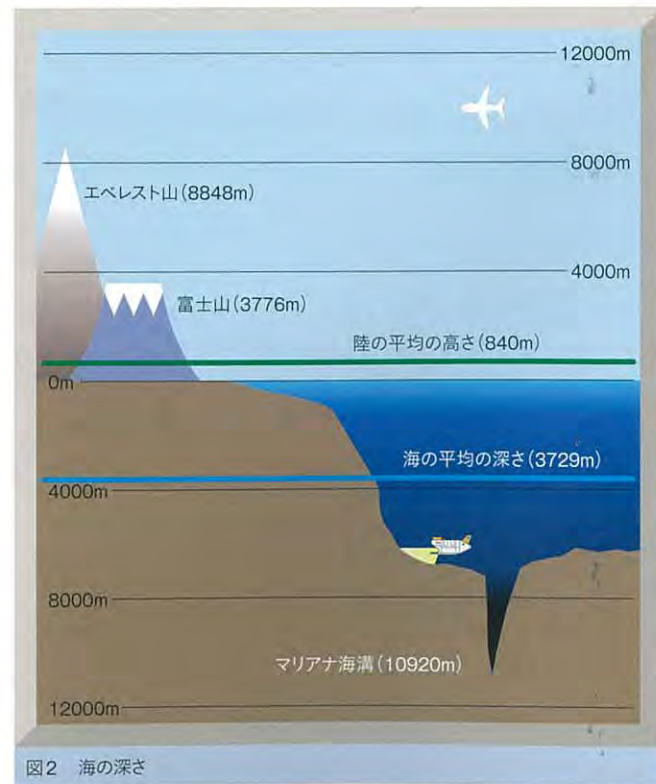


図2 海の深さ

### 海の色と光

太陽からの光は、多くの色の光が重なり合ったものとなっています。太陽の光が海面に届くと、ある光は海水中に吸収され、他の光は海水中の物質に反射します。青い光は、海水中では吸収されにくく、物質に当たって反射しやすい性質を持っているため、その青い光が人間の目に届き、海の色が青く見えます。

一方、太陽からの光は、海面に届いた後、海水中で吸収、反射されながら少しずつ深い方へ進んでいきます。しかし、光合成を行うのに十分な光が届くのは、透明度の高い海水であっても200m程度です。それより深くなると、光はほとんど届かずに暗黒の世界となっています。

### 海水中の音と圧力

大気中では、音は毎秒約314mの速さで進みますが、海水中では、毎秒約1500mの速さで進みます。人は、陸上では、右耳と左耳に届く音の時間差から音が聞こえてくる方向を判断していますが、海水中では音の進む速度が速いので、音が聞こえてくる方向を判断するのは難しくなります。

海面では、約1気圧ですが、海水中では、急速に圧力が高くなっていきます。海水中では、10m下がるごとに圧力が1気圧程度増加します。例えば一番深いマリアナ海溝は、深さが1万920mありますので、約1100気圧もの圧力がかかります。

### 排他的経済水域 (EEZ: Exclusive Economic Zone)

海は、領海、排他的経済水域、公海に大別されます。

領海とは、沿岸国の主権が及ぶ海域のことであり、沿岸国は資源開発などを自由に行うことができ、外国の船は勝手に漁業を行ったり、不必要に錨を下ろして停船したりすることはできません。ただし、いずれの国の船舶も、沿岸国の平和や秩序、安全を害することがない限り、他国の領海を航行することができます。「無害通航権」という権利を持っています。

かつては多くの国が自国の領海を3海里(1海里は1852m)としており、それは18世紀半ばから19世紀に、海岸線から大砲が届く距離を参考にして決められていました。現在は多くの国で、海岸線から12海里を領海としています。

一方、排他的経済水域とは、沿岸国が資源開発などを自由に行うことができ、外国の船も自由に航行できる海域のことをいいます。排他的経済水域は、海岸線から200海里の範囲内ですが、日本はたくさんの島を持っているので、その面積は約405万km<sup>2</sup>となり、世界で6番目の広さといわれています。

公海は、どこの国のものでもありません。



図3 日本の領海、排他的経済水域などの範囲 (本図は外国との境界が未画定の海域における地理的中間線を含め便宜上図示したものです)

国土面積	約 38万km <sup>2</sup>
領海(基線~12海里)	約 43万km <sup>2</sup>
接続水域 <sup>※1</sup>	約 32万km <sup>2</sup>
排他的経済水域(12~200海里)	約405万km <sup>2</sup>
延長大陸棚 <sup>※2</sup>	約 18万km <sup>2</sup>

※1 領海基線からその外側24海里まで(領海を除く)。  
 ※2 排他的経済水域及び大陸棚に関する法律第2条第2号が規定する海域。

図版:海上保安庁ホームページの「日本の領海等概念図」([http://www.1.kaiho.mlit.go.jp/JODC/ryokai/ryokai\\_setsuzoku.html](http://www.1.kaiho.mlit.go.jp/JODC/ryokai/ryokai_setsuzoku.html))を加工して作成

# 3

## 海の環境

### 海の気候と温度

海の環境は、太陽からの光や気圧の変化に伴う風などの影響を受けます。太陽光が強い赤道付近では、海面の水温は高くなり、極地に向かうほど低くなっていきます(図1)。

極地では、結氷温度以下となって、結氷していますが、近年の気候変動によって結氷範囲が狭くなっているといわれています(図2)。結氷範囲は、極地での船舶の航行や資源開発に影響を及ぼします。

一方、深さ方向には、水温が急速に低下していき、赤道付近であっても、深度1000m以上では5℃程度しかありません。途中で、水温が大きく変化する層がありますが、この層のことを「成層」「躍層」などと呼んでおり、海水中の物質循環に大きな影響を及ぼします(図3)。また、海上では、陸上と同様に気圧の変化に伴う風が吹いています。陸上に比べて、山脈やビルがないため、比較的均一で強い風が吹いています。

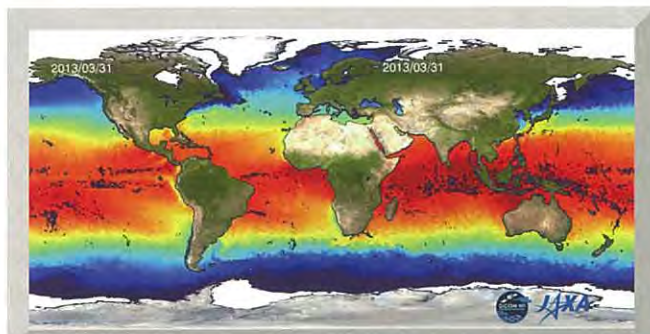


図1 人工衛星で観測した全球海面水温分布。赤くなるほど水温が高く、青くなるほど低いことを表している。提供:宇宙航空研究開発機構(JAXA)

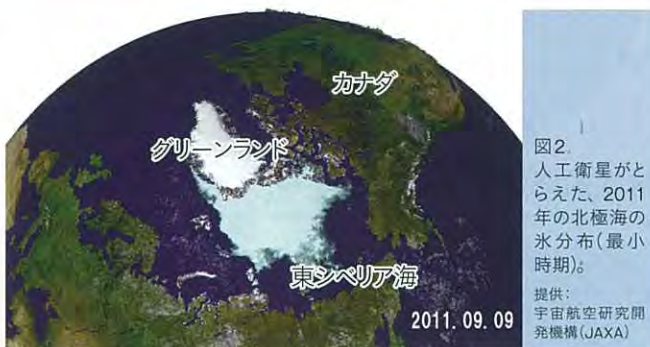


図2 人工衛星がとらえた、2011年の北極海の氷分布(最小時期)。提供:宇宙航空研究開発機構(JAXA)

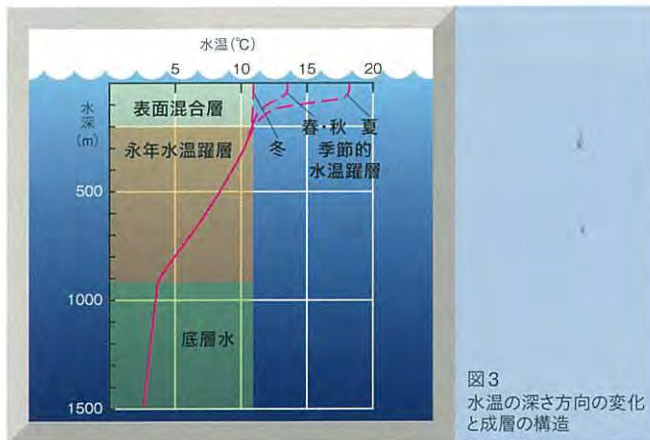


図3 水温の深さ方向の変化と成層の構造

### 海の波と流れ

海の波は、海上を吹く風によって形成されます。皆さんが海岸で観測する波は、周期がおおむね3~25秒の波で、周期によって波の長さが異なっています。いろいろな周期の波が押し寄せるため、全体として

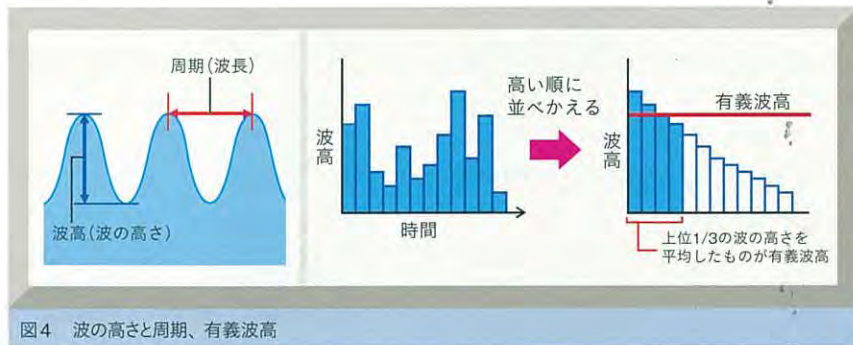


図4 波の高さと周期、有義波高

は不規則な波となっていますが、一つ一つの波を数えて、波の高いものから上位1/3の波の高さを平均したものを「有義波高」と呼んでいます(図4)。これは、人間の目で観測した波高と近い値を示すことから用いられているものです。

また、日本では、台風襲来時には、周期が10秒以上で、高さも10mを超えるような波が発生することがあります。一方、もっと周期の長い波としては、津波や潮汐波が挙げられます。津波は、主に地震や火山活動に伴う海底地形の急変によって、大規模な波が発生するものです。

外洋域ではあまり高くありませんが、沿岸域(津)で急に高くなることから、津波と呼ばれています。潮汐波は、地球と月などの天体との相互作用によって引き起こされるもので、主なものは約半日周期、約1日周期のものです(p.40図1、2参照)。

海の流れには、潮汐に伴う流れに加えて、熱の変化や風の変化によって引き起こされる流れがあります。水平方向に水温が変化することで生じる流れを「密度流」「熱循環」などと呼び、風によって引き起こされる流れを「風成循環」などと呼んでいます。海洋では、さまざまな大きさの循環流や渦が形成されており、時々刻々その大きさと形状を変化させています。また、太平洋や大西

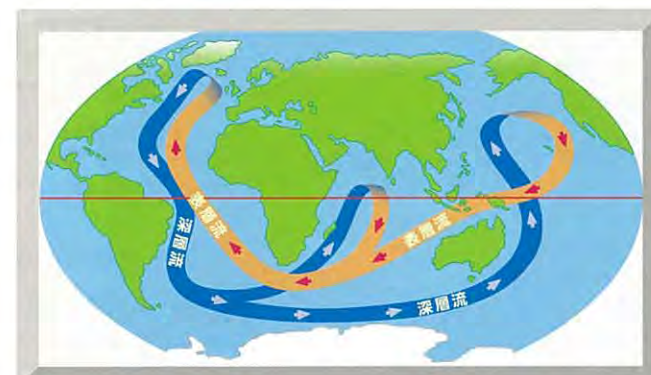


図5 全海洋をめぐる深層海流

洋などの大洋の西海岸では、地球の自転の効果によって強い流れが形成されます。日本の近海を流れる黒潮はその一例です(p.41図3参照)。

深さ方向には、風や地球の自転などの効果によって、「湧昇流」や「沈降流」が引き起こされることがあり、漁業資源の変動などに大きな影響を及ぼしています。より長期的には、北大西洋のグリーンランド近海や、南極海で冷やされた海水が沈み込み、深海底を移動していきます。この深層水は、インド洋の北部や北太平洋でわき上がって、表面の海流となります。グリーンランド近海で沈んだ海水が北太平洋に到着するまで、約2000年かかるといわれています(図5)。

### 海の生態系

38億年前より以前に初めての生命が誕生してから、海にはさまざまな生命が誕生してきました。まず植物プランクトンが太陽の光と海水中のリン、窒素などの栄養分を利用して、有機物をつくり出します。その植物プランクトンを動物プランクトン、魚などが次々と食べていきます。これを「食物連鎖」と呼んでいます。動物は、自分の体重の5~10倍の餌を必要としますので、魚、動物プランクトン、植物プランクトンの順に生物量が多くなります。このような状態を「食物連鎖ピラミッド」と呼んでいます(図6)。一方、これらの生物の排泄物や死骸は、微生物によって分解され、リンや窒素などの栄養分として海水中に戻ります。このように、すべての生物は食う・食われるなどの関係によってつながっており、物質は目まぐるしく循環しています。



図6 海の食物連鎖ピラミッド

# 4

## 海の利用の歴史と今後のあり方

### 海運の歴史

海は、昔から、海運の場として利用されてきました。木材やアシなどの素材でできた船で、自然環境の厳しい海域であっても航海していました。当初は、陸上の大きな木を切り出してきて、これをくり抜くことによって舟を作っていました。先端を尖らすなど、効率よく進むための船型の工夫が積み重ねられました。大きな木がない場合は、アシなどを束ねて舟を作りました。その後は、多くの材料を組み合わせる船を造るようになりました。この組み合わせの技術によって、大きな船を造れるようになりました。

また当初は、人間の手や足、竿などを利用して舟をこいでいましたが、帆を張って、風を利用した船が使用されるようになっていきます。移動できる距離も長くなって、新大陸の発見にもつながりました(サンタ・マリア号)。さらに、産業革命後には、帆船が蒸気船に代わり、木船が鉄船に変わってきました。近年は、東京タワーの高さを超えるような長さを持つ巨大な船舶も造られるようになり、世界各国の海域を航海しています。

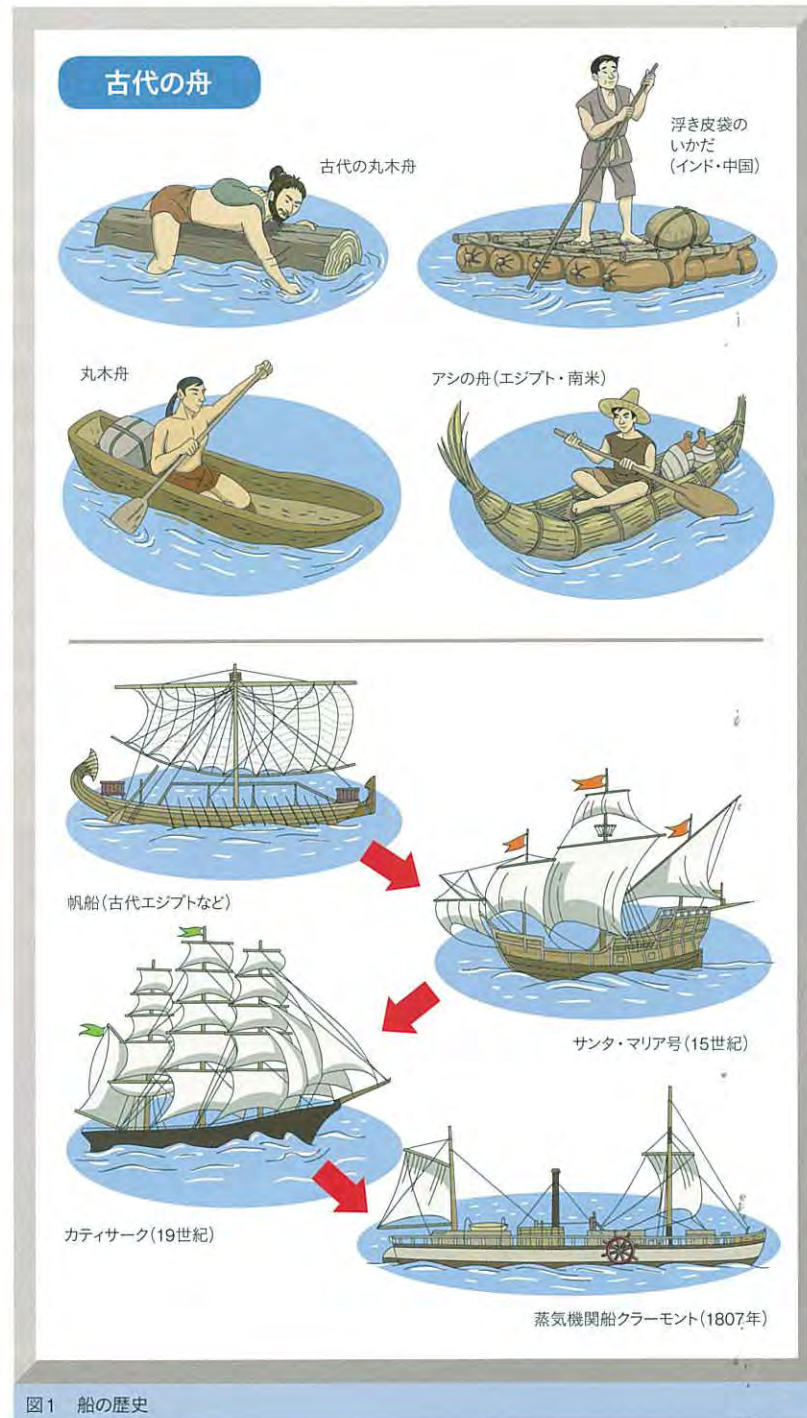


図1 船の歴史

### 資源利用と研究開発の歴史

資源として古くから利用されてきたのは、漁業資源です。日本各地の貝塚の出土遺物から、日本人は縄文時代から魚介類を食べていたようです。江戸時代になると、各地でさまざまな漁法が取り入れられ、漁業が盛んになりました。明治時代以降も、イワシなどを中心とした魚介類は庶民の食生活の重要な位置を占めていましたが、第二次世界大戦後には、質・量ともに魚介類をさらに多く消費するようになりました。

資源開発および資源を開発するための研究は、第二次世界大戦後に本格化したと考えてよいでしょう。例えばアメリカでは、海底油田開発が行われるようになり、北海など他の海域でも海底油田開発が活発化しました。日本では、阿賀沖(新潟県沖合)、磐城沖(福島県沖合)、岩船沖(新潟県沖合)の石油生産プラットフォーム、長崎県上五島地区、北九州市沖合の白島につくられた石油を備蓄するための基地(図2)、深海調査のための有人潜水調査船「しんかい6500」(図3)、海底の掘削調査を行うための地球深部探査船「ちきゅう」(図4)などが開発されてきました。また、マンガン団塊の採鉱システムの開発、沖合養殖システム、浮体式の波力発電である「海明」や「マイティーホエール」、海洋温度差発電システム、海上空港などの海洋空間利用としての「ポセイドン」、「メガフロート」(図5)、深層水を利用した漁場造成技術開発である「拓海」などが開発されてきました。

### 海の利用の今後のあり方

以上のように、これまでも海運や資源開発を通して海を利用してきましたが、まだまだ海のポテンシャルを十分に使いこなせているとはいえません。海は、波浪や流れなど、自然環境が厳しいところです。海で活躍する船や構造物を造るためには、厳しい自然環境を克服しなければなりません。従って、これまで以上に安価で、安全な海運や資源開発のための技術開発を行っていく必要があります。また、近年は、地球温暖化防止のための二酸化炭素排出量の削減、窒素化合物や硫黄化合物などの排ガスの規制、海洋資源開発の周辺生態系への影響評価など、環境保全や持続可能性に配慮した海の利用が求められています。次章以降では、海運やさまざまな資源開発の基礎や動向について解説していきます。



図2 上五島石油備蓄基地 提供:上五島石油備蓄株式会社



図3 有人潜水調査船「しんかい6500」 提供:海洋研究開発機構



図4 地球深部探査船「ちきゅう」 提供:海洋研究開発機構



図5 メガフロート 写真:日本造船技術センター



# 2

# ひとつとものを 運ぶ

ガントリークレーンでコンテナの積み下ろしを行う大型コンテナ船。冷凍コンテナや液体貨物輸送用コンテナなど、貨物の特徴に合わせたコンテナがあり、食料品や日用品、精密機械、電化製品など、さまざまな貨物を世界の海を航行しながら運んでいる。写真の船の全長は約332mで、20フィート（約6m）コンテナを最大9300個積載可能だ。

写真提供：日本郵船

“水の惑星”とも呼ばれる地球は、表面の約70%が海で覆われています。陸で生活する私たち人間は、広大な海を自由に航行できる船や航海術を発展させることによって、活動の場を世界に広げてきました。15世紀半ば、大航海時代の幕開けに始まり、国際間の交流や交易は急速に進行し、拡大を続けてきました。現在、日本の輸出入物資輸送の99%以上が船によって行われています。周囲を海に囲まれた日本の発展は、海運の支えなしには実現しなかったに違いありません。

# 物流における船の役割

1

世界中を動いている物流の量を知っていますか？ 大きなトラックや長い列車が貨物を運んでいる様子を目にすることはあっても、船を見ることはほとんどなく、日常生活の中ではその量を実感することはできないと思います。船で輸送される代表的な貨物で紹介すると、1985～2015年の30年間で総輸送量は約2.9倍に増加しており、2016年には109億トンの貨物が海上輸送されています(図1)。また、この膨大な量を輸送するため、隻数は約1.5倍に増加し、船の大きさを表す1隻当たりの総トン数で約1.9倍と大型化しており、現在、世界で約11万2000隻の船が動いています(図2)。世界規模で運航され、国家の経済を支える船はたくさんの国の人たちが所有し、船の大きさを表す総トン数(Gross-Tonnage)で日本は世界第2位の規模を有しています(図3)。

## 世界の物流

●**三大バルク**…石炭、鉄鉱石、穀物を三大バルク(BULK)と呼びます。特に、鉄を生産するために必要な鉄鋼石は、

近年の世界経済の伸びに従って急激に増加しています(図1右上)。2015年に世界で運ばれた13億6500万トンの鉄鉱石を、23万トン積むことができる専用船で一度に運ぼうとすれば、約5900隻必要という計算になりますが、平均で1年間に6～8航海くらいできますし、船の大きさもさまざまなので、実際の隻数は900隻程度です。図4～6に三大バルクが運ばれている航路を示しています。石炭はオーストラリアやアメリカからアジア、ヨーロッパやブラジルへ、鉄鉱石はブラジルやオーストラリアからアジアやヨーロッパへ、穀物はアメリカ、南米、ロシアからヨーロッパ、中米、北アフリカへ運ばれており、世界の経済活動の動き(生産国と消費国の関係)がよく分かります。

●**原油とLNG**…海上輸送量が最大のものは、油(原油と石油製品)です。中東からアジアとアメリカに動いています(図7)。この資料は2014年の統計ですので、シェールオイルやシェールガスの開発が進めば、その様子が変わってくると思います。LNGは多くの地域と国が生産を始めており、原油よりも複雑な物流となっています。

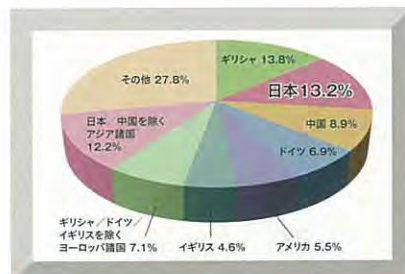


図3 船の所有国籍 日本造船工業会の資料を基に作成

海上荷動き量(2014年)

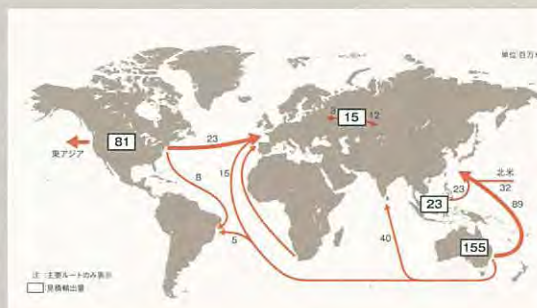


図4 石炭(原料用) 「海事レポート」(国土交通省)を基に作成



図5 鉄鉱石 「海事レポート」(国土交通省)を基に作成



図6 穀物 「海事レポート」(国土交通省)を基に作成



図7 原油 「海事レポート」(国土交通省)を基に作成

●**コンテナ**…近年、急成長した製品輸送の代表として、コンテナが挙げられます。わずか15年の間で輸送量が2.3倍に増加、特にアジア～ヨーロッパ間では約3倍に増加しています。2014年に世界で海上輸送されたコンテナは1億8200万TEU<sup>※3</sup>にもものほり、これを一列に並べると約110万kmもの長さになります。これは地球と月の1.4往復分、地球の約27周分に相当する長さです。前述の原材料やエネルギーと異なり、主に工業製品などの生産国や消費国(ヨーロッパ、アジア、アメリカ)の間で輸送されています。また、近年経済活動が非常に活発になった東アジア域内では、約6000万TEU(1億8200万TEUの約33%)のコンテナが行き来しています(図8)。

## 日本の輸出入量(経済と生活を支える船)

日本の貿易貨物(2015年)は輸出が1.7億トン、輸入が7.8億トン、合計9.5億トンで、その99.7%が船で運ばれています。飛行機で海を渡る貨物は、311万トンに過ぎません。主要品目の輸入量を世界の物流量比率と合わせて、図9に示します。石炭は世界の約17%、原油は約9%、鉄鉱石は約10%とエネルギーと製鉄原料に関係のある品物量が非常に大きいことが分かります。特に、

LNGは世界の海上輸送量の34%と飛び抜けて高く、日本が早くから海外戦略として都市ガスや発電所向けにクリーンエネルギーとして輸入を促進してきた結果といえます。容積に換算すると東京ドーム152杯分にもなります。原油、石炭や鉄鉱石は日本全体の消費量の100%を輸入に依存し、穀物は世界の荷動き量の5.6%と少ないものの、大豆は日本全体の消費量の93%にも上ります。

一方で、輸出貨物で主なものは、鉄鋼製品が4100万トン、一般機械類が1300万トンといったところですので、資源を輸入して、工業製品を製造し、その加工貿易

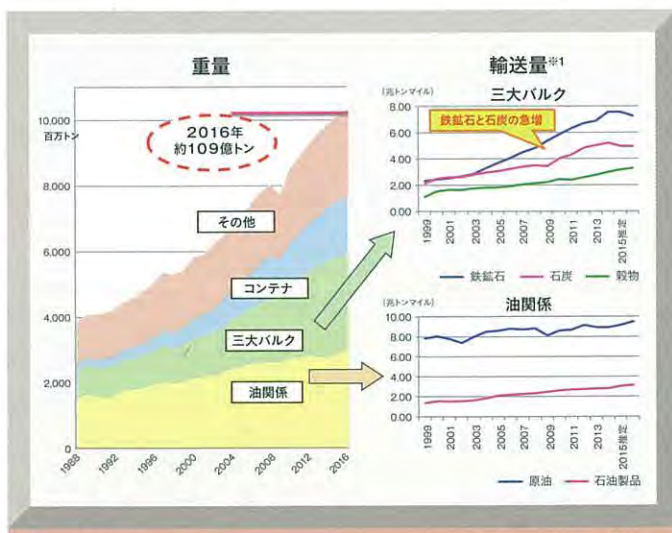


図1 世界の海上荷動き量 日本造船工業会の資料を基に作成



図2 世界の船隻数 日本造船工業会の資料を基に作成

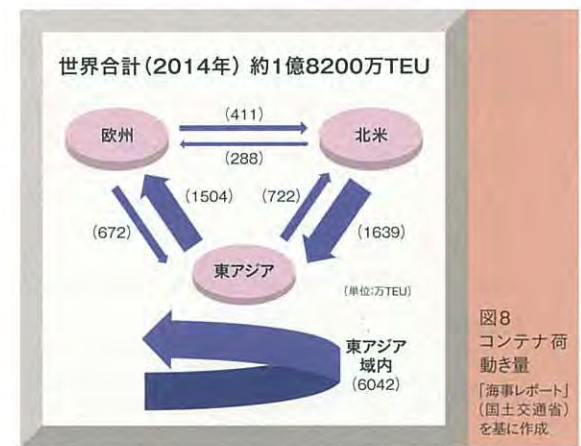


図8 コンテナ荷動き量 「海事レポート」(国土交通省)を基に作成

※1 輸送量(トンマイル)…重量(トン)×距離(マイル)で示す。  
 ※2 LNG(Liquefied Natural Gas)…液化天然ガスのこと。天然ガスを液化すると体積が約1/600になる。

※3 TEU(twenty-foot equivalent unit)…貨物の容量を表す単位。長さが20フィート(約6m)のコンテナ1個分を1TEUと数える。

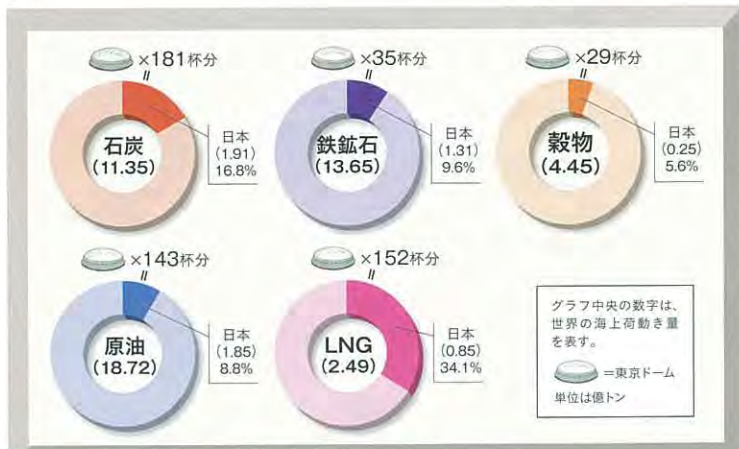


図9 世界の海上荷動き量と日本の輸入量

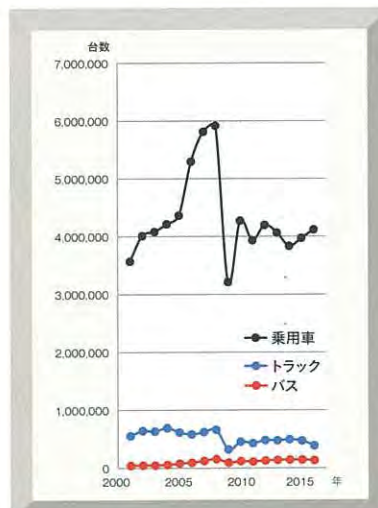


図10 自動車の輸出台数 [統計速報「自動車工業会」を基に作成]

による外貨収入で食糧とエネルギーを調達するといった日本の姿が如実に表れています。つまり、この日本列島に暮らす人々の経済と生活を支えているのが船舶であるといえます。

日本最大の輸出産業となった自動車輸出台数の推移を図10に示します。2008年までは急激な増加でしたが、リーマンショックによる世界金融危機の問題と海外への生産拠点移行により、2010年以降は日本からの輸出台数は乗用車、バス、トラックを合わせて年間約450万台前後で推移しています。

### 船の進化

前述した海上輸送量(経済活動)の拡大に伴い、船は輸送効率をよくするために大型化を行い、貨物の特徴に合わせて専用船化されるなど、日々進化しています。ま



図11 コンテナ船の船型の変遷 [「海事レポート」(国土交通省)を基に作成]

た、船ばかりでなく、港を深くする、大型のクレーンを港に設備するなどといった港湾設備の総合的なインフラ(社会資本投資)と歩調を合わせてゆることが物流にとって重要です。一方で、第2章3(p.26~27)に紹介する運航支援技術の開発も安全に船を運航するために必要とな



図12 1957年 世界初のコンテナ専用船(220TEU)



図13 1980年台 (1500TEU型) 183.00×27.60×14.00m



図14 1990年台 (6300TEU型) 293.00×40.00×24.30m



図15 2016年 (14000TEU型) 364.00×50.60×29.50m

ります。

大型化の例として、コンテナ船を例に挙げ説明します(図11)。海上コンテナ輸送は1957年に始まり、そのときの1隻当たりの積み個数は200TEU程度でした(図12)。新造船の平均積み個数で見ると、1995年には1800TEU型でしたが2015年には7200TEU型と4倍の大きさとなり、現在の最大船型は2万TEU型となっています。60年間で1隻当たり100倍の積み込みが可能な船の大きさになりました(図13~15)。輸送形態も、アジア、ヨーロッパやアメリカに巨大なハブターミナルが建設され、超大型船はこのハブターミナル間の輸送に専従し、ここから各地の小さな港にフィーダー船と呼ばれる小型の船で輸送される形に変化しています。輸送効率を船速一定として、6500TEU型と14000TEU型をコンテナ1個当たりの馬力(馬力/TEU)で比較すると約1:0.55となり、大型化による輸送効率が約45%も向上しています。

専用化した船の代表例として自動車運搬船があります。1975年頃までは普通の貨物船に自動車を積載するためのカーデッキ“Car-Deck”と呼ばれる特殊な装置を取り付けて船に積載していました(図16)。1980年台に建造された船からは、船外ランプと呼ばれる設備を設け、自動車が自走して揚げ下ろしを行う形態が主流となり、港における荷役時間が大きく短縮されました(図17、18)。また、最近では、新パナマ運河の開通により、船の幅を広げることによる大型化が進み、乗用車換算で7500台を一度に積載する船型も建造されています(図19)。一方で、列車や大型重機などの特殊貨物(図20)も輸送できるような構造の自動車運搬船もあります。

### 船に会おう

発電所、製鉄所、自動車会社の輸出ターミナル、そしてLNGの輸入基地、コンテナ・ターミナル、それは私たちの生活の場から遠く、自由に出入りのできない空間であり、それゆえ商船には会えないことが多いのですが、最近では、「海の日」を中心とした夏休みに、造船所での進水式や入渠する船の見学会が盛んに行われるようになりました。第2章4(p.28~29)「船の種類」で紹介するさまざまな船を実際に間近で見ると、やはり、その雄姿に心打たれることでしょう。読者の皆さんの一人でも多くの方が、この魅力ある商船たちに出会えることを心から祈っています。

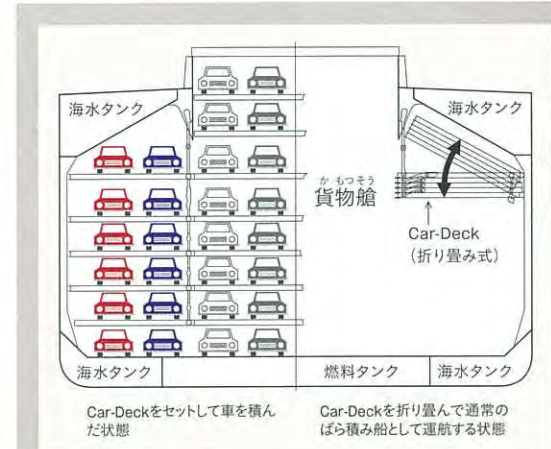


図16 1975年(700台積)



図17 1985年(4000台型)200.00×29.20×28.00m



図18 2005年(6000台型)200.00×32.20×34.50m



図19 2016年(7500台型)200.00×37.50×38.20m



図20 特殊貨物(列車)の積み込み

# 船を造る技術

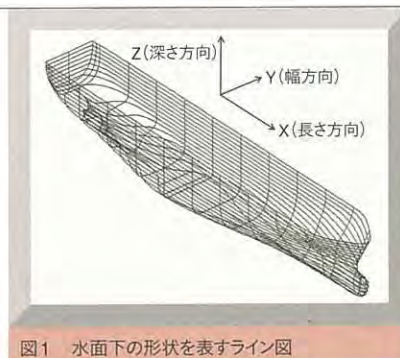


図1 水面下の形状を表すライン図

## 船の開発・設計

動く、大きな構造物の代表的なものとして、“船”と“航空機”が挙げられます。その違いは何でしょうか？それは、航空機は気体(空気)中を移動するのに対して、船は液体(海水)と気体(空気)という性質(比重や粘度)の異なる2つの流体の境(海面)を移動するという点です。海面には不規則で予測が難しい波があります。また、航空機は翼の“揚力”によって重量を支えますが、船は海水による“浮力”でその重量を支えます。そしてその浮力は、船の形と波の形により刻々と変動します。船の開発・設計を行うときは、この点に十分注意する必要があります。

●計画…船には、輸送機器としての経済性が要求されるため、荷物の種類・輸送量・速さとともに、船の大きさを決定する設計計画作業が、船を建造する第一歩となります。船の大きさが大きくなるほど、そして速が遅ければ遅いほど、輸送効率(効率=輸送量×速さ÷燃費)はよくなりますが、港や海域の制限に合わせた大きさにしなければならぬ上、荷物の到着が遅れるほどの遅さにはできません。また、港や航路の水深より深さのある船や、荷物を積み込む陸上のクレーンが届かないような幅の広い船は使えません。

一方、船体がやせて細長くなると、抵抗が小さくなり少ない燃費で速く航行できますが、輸送量は少なくなります。このように、さまざまな条件を考慮して最適な船を決定するのが計画設計です。

一般的に、石炭、鉄鉱石、石油といった原材料を輸送



図2 水槽試験の様子

する船は、大型・肥大型で船速が遅く、自動車やコンテナなどの製品を輸送する船は、やせ型で船速が速い設計になります。

●性能…船の大きさが決まったら、水面下の形状を表すライン図(Lines)を作成します(図1)。大きさが決まっても、水面下の形状は無数に選択できるため、ここでは馬力を極力小さくすることが重要となります。すなわち、(1)水の抵抗を少なくすること、(2)プロペラの効率がよくなるような、船尾の水流をつくること、に主眼をおいて開発が始まります。

次に、大波や強風といった荒れた海象条件下でも船速低下が起きないように荒れた形状にしなければなりません。操縦性能(直進性能や旋回半径など)にも注意が必要で、十分な時間をかけて開発を進め、最終的には模型試験(図2)を行って確認します。ちなみに、船のエンジン馬力は、自動車のように加速・高速性能を求め大馬力ではなく、多くは平水(水が静かな状態)中の抵抗に釣り合う大きさに、海象(波や風)の影響を考慮して15~25%程度の余裕を持たせるようにします。従って、船はほかの輸送機器より省エネ化が進んでいる輸送機器といえます。

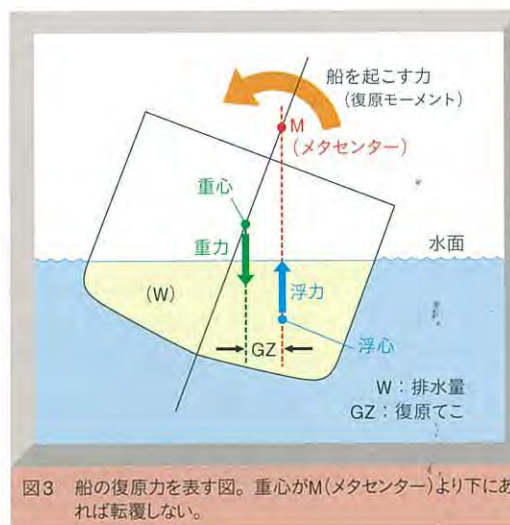


図3 船の復原力を表す図。重心がM(メタセンター)より下であれば転覆しない。

●基本設計…ライン図作成と並行して、必要な輸送量(Dead-Weight)が確保できているか、貨物を積んだときの姿勢や強度計算に必要な荷重分布となっているかなどを確認するため、トリム(Trim)計算と呼ばれる検討が行われます。

また、船が傾斜したときの復原性(Stability)と呼ばれる性能を確認します(図3)。これは、転覆を防止することが目的の、船独特の検証項目で、波や風の影響を考慮すると同時に、衝突や損傷による浸水も想定して、船の安全性を確認する重要な作業です。船の重量(船自体の重量+輸送貨物の重量)は浮力で支えられているため、重量と浮力は釣り合うようにしなければなりません。

●強度計算と船体設計…船体にかかる力は、静かな海面に浮かんでいるときの“静荷重(Static Load)”と、波の中で船が運動するときの“動荷重(Dynamic Load)”に分けると考えやすくなります。静荷重は、鉛直上向きの浮力と鉛直下向きの船体重量との釣り合いから求めることができ、動荷重は、波による浮力の変化と船体運動による加速度の関係などから求めることができます(図4)。

一方、波の繰り返し荷重による疲労強度、巨大な波が船体に衝突したときに生じる衝撃圧、低温の環境を航行するときの脆性強度についても、十分に検討した設計にしなければなりません。曲面の多い船体は、応力集中を発生させない構造・形状とすることと、必要強度に合わせた鋼材の種類を選定が重要です。最近では、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics)を使って船体運動をシミュレーションし、その結果を用いて有限要素法(Finite Element Method)による構造解析を行うことで、より精密で正確な強度計算が可能となり、船の安全性の確保につながっています(図5)。

●艦装設計…船には、“主機関”と呼ばれるエンジン、発電機・ボイラーといった船を動かすための大型機器、これらを作動させるポンプ・熱交換器、クレーンなどの荷役装置、レーダー・無線装置などの航海・通信機器にはじまり、乗組員が生活する居住区設備など、100種類を超える数の機器が搭載されています。これらの機器の組み合わせや配置を行うことを“艦装設計”と呼びますが、ここで重要なのは、機能を損なわないように配管の太さや電線の種類を決定し、乗組員が使いやすくメンテナンスしやすいように配置することで、細かな配慮が必要です。当然、防火構造や消火設備、防音や防熱にも注意を払った設計が行われます。

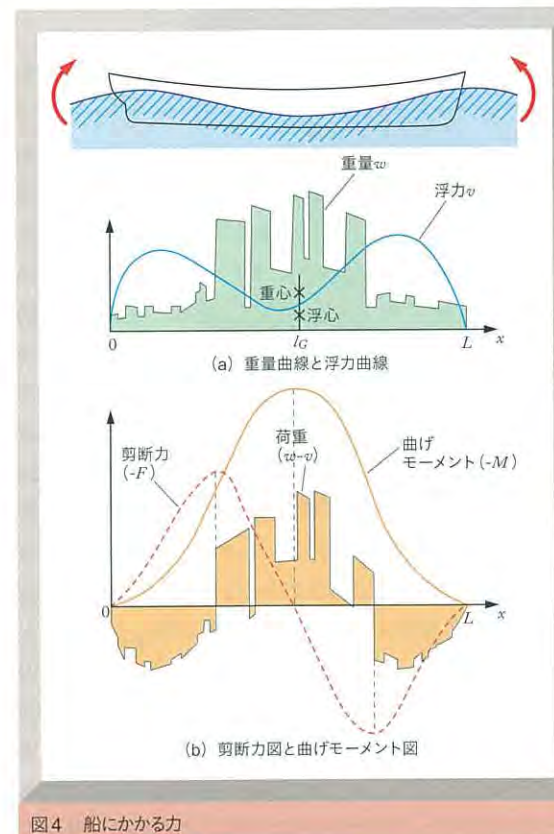


図4 船にかかる力

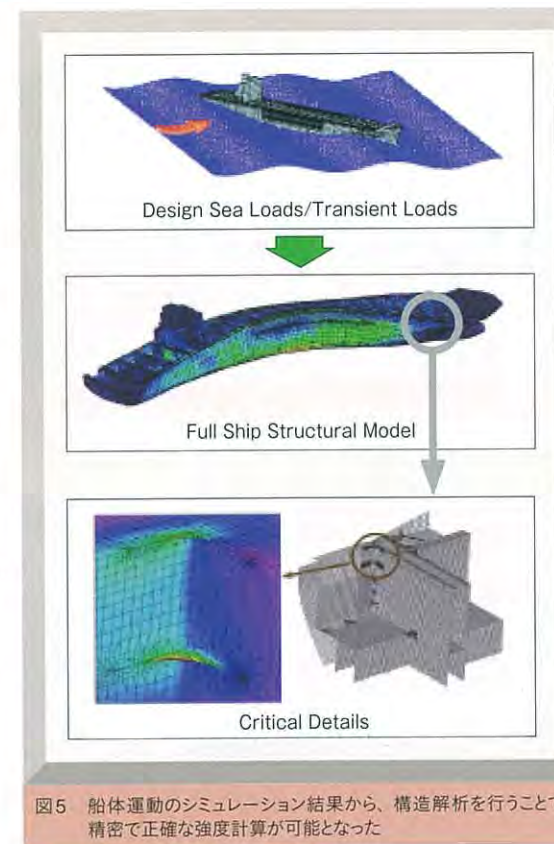


図5 船体運動のシミュレーション結果から、構造解析を行うことで、精密で正確な強度計算が可能となった

## 生産設計

開発・設計作業が終了すると、生産設計と呼ばれる部品図を作成する段階へ進みます。生産設計は、鋼材を加工する「船殻生技」とパイプや艦装品を製作する「艦装生技」と呼ばれる作業に分類されます。

●**船殻生技**…船の構造、特に外板と呼ばれる船体表面は数多くの複雑な曲面で構成されており、金属を溶かして鋳型でつくられる鋳物などの特殊な部分を除いて、ほとんどの曲面は鋼板を曲げてつくらなければなりません。曲面を平面上に表すことを「展開」といいます。現在では、3次元CADと呼ばれるソフトを利用することで船体構造のほとんどの部材がデータベース化され、外板曲面も自動的に平面に展開できるようになっています。特殊な船になると、部材点数は数十万点を超えることもあります(図6)。

●**艦装生技**…艦装設計で決定された機器配置、配管系統、電線系統に基づき、水・油・蒸気などの流体を流すパイプ、換気を行うダクト、動力電線や監視用の計装電線などを船体構造に合わせて詳細に配置し、部品図に展開するのが「艦装生技」と呼ばれる作業です。例えば、タンカー

などは、パイプの総延長が数万キロメートル、配管本数が1万本を超え、電線の長さは数十キロメートル以上になることもあります。このような膨大な部品を機能的に効率よく配置するには、船の構造を熟知していることはもちろん、機器のメンテナンスや部品製作についての知識が必要です。従来は熟練工による時間のかかる作業でしたが、船殻生技と同じく3次元CADの導入によりビジュアル化されて分かりやすくなり、自動化も進み、短時間で精度よく部品展開ができるようになっています(図7)。

## 建造

船は大きく分けて、「鋼材切断」「曲げ・溶接」「組立」「搭載」「進水」「試運転」といった手順で建造されます。

●**鋼材購入・切断**…船には、使用場所に合わせて、強度の異なる複数の種類の鋼板が使われています。これらは、設計・開発段階で決定されており、生産設計で種類ごとに整理された後、鉄鋼メーカーに発注され、加工工程に合わせて造船所に搬入されます。大型コンテナ船では厚さ80mm以上の特殊な高張力鋼(p.109参照)が使用され

ることがあります。鋼材搬入後、NC切断機を用いて部品データに従って、いろいろな形に切断されます。切断方法には、ガス切断・プラズマ切断・レーザー切断などがあります。

●**曲げ・溶接**…切断された鋼材は、プレス曲げ、ローラー曲げや必要に応じて焼き曲げ加工が行われた後、溶接により「ブロック」と呼ばれる部品へと組み立てられます(図8、9)。近年では、曲げや溶接作業にロボットが導入され、作業の効率化が進んでいます。

船の建造においては、ほとんどが溶極式アーク溶接であり、高温影響や溶接姿勢影響による品質確保(強度確保)については長年にわたる実験などから品質は保証されていますが、新しい材質や強度の異なる鋼材を使用するときには、建造前に試溶接や強度試験などを行った検証が必要となります。船全体の溶接長は数十キロメートルにもなることがありますが、溶接不良による損傷を防ぐため、実際の工作現場では、レントゲンや超音波を使った非破壊検査が行われています。

船の強度は鋼板だけでは確保できないため、骨材と呼ばれる補強材を適切な間隔で取り付けますが、この骨材も鋼板の曲面に合わせて曲げ加工を行った後に溶接されます。

●**組立**…「ブロック」は小組立・中組立・大組立へと段階を踏んで大きくなり、最終的に船台に搭載する大きさに仕上げられます(図10)。事前に「搭載ブロック」の重量はクレーンの吊り能力と合わせてその大きさが決定されており、搭載時に事故が発生しないように、重心位置や吊り姿勢についても事前検討が行われます(図12)。ここでも、3次元CADのモデルデータを使って検討できるようになっており、短時間で分かりやすい検討結果を画面に表示できます。

●**搭載**…船台におけるブロック搭載時には、「決め方」と

呼ばれる位置合わせや「見通し」と呼ばれる計測を行い、完成時の船の精度を確認する作業が行われます。巨大な船では、温度差による伸縮の影響を考慮する必要があり、慎重な計測と解析が要求されます(図13)。

小型の機器やパイプ類は、ブロック搭載前の組立の適切な段階で、順次取り付けを行うのが一般的で、この作業は先行艦装と呼ばれます(図11)。エンジンのような大型機器は船台でのブロック搭載中に単品で積み込まれ、船体がほぼ完成した後に、プロペラや回転軸と結合します。この作業は、エンジンとプロペラを回転させたときに損傷を発生させないように、数十ミクロン単位の精度が必要であり、レーザー計測器などを用いて慎重に位置決めされます。

●**進水と試運転**…船が完成状態に近くなると進水を行います(図14)。近年はドック建造方式が多く、ドックに注水して船を浮かせられます。進水後、船は岸壁につながれ、装置の調整や船室の仕上げが行われます。

最後に、海上を実際に走る海上試運転が行われます。ここでは、船内に搭載した各種機器が正常に作動することを実証し、性能(船速、燃費、操縦性能など)の確認を行います。すべての試験に合格すると、船は船主に引き渡され、初めての航海へ向け造船所を出航します。



図14 進水式

生産設計

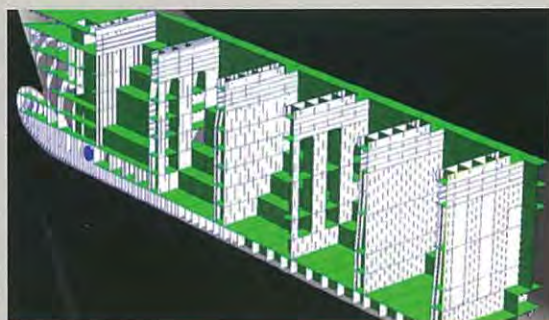


図6 3次元CADによる展開図



図7 3次元CADによる機関室部品の展開図

建造



図8 焼き曲げ加工



図9 溶接作業



図10 組立作業



図11 先行艦装



図12 クレーンで運ばれる搭載ブロック



図13 組み立てられる船体

## 3

## 運航支援技術

## 人と船と航海

地球を覆う広大な海を、今日も大きな船が進んでゆきます。人と船の関係は古く、今から4000年以上前に描かれたとされるノルウェーのアルタ遺跡の岩絵群には、船から漁をする絵が描かれています。また日本においては、約5000~7500年前の縄文時代に作られた丸木舟が千葉県市川市から出土されています(p.14図1参照)。一方で航海については、約5000年前に南アジアでカヌーの原型的なものが生み出され、そのカヌーを使ったポリネシアの人々が星を頼りに島から島へと海を渡り歩き、紀元500年にはハワイ諸島にまでたどり着いたとされています。このように、船はすべての乗り物の中で最も古い歴史を持つ乗り物であり、人はその船を操り、大海原で航海を行ってきたのです。

そして現在、私たちが生活を営む上で、必要な物資の輸送手段として船は必要不可欠なものです。現在の船は、古代の丸木舟やカヌーとは異なり、鋼を用いた大きな船体に大量の貨物を搭載し、荒天の海でも前進可能な、強力な推進機関を持った船舶に進化を遂げました。さらに船そのものの進化もさることながら、安全な輸送を実現するには、洋上で船を操るための必要な情報をどのようにして得るかという課題が存在します。この運航に必要な情報を船上で得るための技術、いわゆる運航支援技術

も船と同様に進化を遂げてきました。

ここでは、世界中を駆け巡るさまざまな船が、どのような運航支援技術で航海しているのか、過去からの変遷も交えながら解説します。

## 安全な航海に必要な情報

●**船位の把握**…航海を行う場合に必要とされる要素については、まず、乗船している船が地球上のどこにいるのかを判断する「船位の把握」が必要となります。船から陸岸が見えている場合は、陸上にある目標物(これを物標と呼ぶ)の形などを手掛かりに、海図上の情報を照らし合わせることで船位を把握することができます。しかしながら、大洋中においては、船の全周がすべて海面であり、水平線に目を凝らしてもその先に物標等は見えません。そこで船を操る航海士は、昼間は太陽を、夜は星を物標として、それらの方位と高度(これは水平線と太陽もしくは星の位置により得られる仰角を意味します)を計測し、その値から計算により船位を求めていました。これを「天文航法」と呼び、高度の計測には「六分儀」を用いていました。しかしこの方法では、天候により太陽や星が見えない場合には計測ができないので、船位を決めることができません。現在は、太陽や星の代わりに、地球の静止軌道上に配置した人工衛星から電波を放射

し、この電波を船の受信装置により受信することにより船位確定する方法がとられています。このような船位決定方法を「衛星航法」と称し、人工衛星からの電波を用いて船位を求めるシステムをGPS(Global Positioning System)と称しています。GPSの発達により、大洋中または沿岸域のいずれにおいても天候にかかわらず、精度のよい船位が常に得られるため、航海士は現在地から目的地への針路の把握や目的地への到着時間の予測が容易に可能となりました。現代の航海においてGPSはなくてはならない存在であるといえるでしょう。

●**衝突の回避**…自動車や飛行機とは異なり、船は針路を簡単に変更できない「曲がりづらい」移動体です。従って、洋上において他の船(他船)の動向を把握するのが遅れた場合には、衝突の危険が伴います。そこで航海士は、自分の船(自船)の衝突の危険を避けるために、船橋(ブリッジ)で常に周囲を警戒し、可能な限り遠い位置にある他船や障害物の有無を、双眼鏡を使いながら自身の目によって確認する「目視」を行います。これを「見張り」といい、航海士はこの見張りを含めた船の運航を交代で行います。これを「当直」\*といい、航海士は当直中に見張りを欠かさずに行います。しかし目視による見張りには限界があり、また海の状態は時々刻々と変化するので、船橋から見る事ができる範囲、いわゆる「視界」は常に一定ではありません。視界が悪くなると、周囲の状況が把握できず、他船と衝突する恐れがあります。そこで視界にかかわらず、遠くにある他船や障害物をいち早く把握し、その動向を確認することで衝突の危険を避ける必要があります。これを可能にしたのが、レーダー(RADAR: Radio Direction And Ranging)です。レーダーは第二次世界大戦中の1940年頃に軍事的で実用化され、遠くにある物体の距離と方位を電波でとらえ、レーダー画面上にて把握できる画期的な装置でした。レーダーは戦後、民間でも利用され、船に搭載されます。視界の状況に関係なく他船や洋上障害物を把握できるレーダーは、航海の安全に役立つものでした。その後、1960年代に船舶のレーダーは、レーダー画像上の他船の軌跡を自動的に追跡することにより、他船との最小接近距離とその距離に至るまでの時間を表示できるアルパシステム(ARPA System: Auto Radar Plotting Aid System)が導入され、他船の動向の把握が容易になりました。

現在はレーダーに加え、船から自船の針路、船速、現在位置および船名、行き先等を電波によって自動的に送

信し、他船が自動的に自船の情報を把握できるシステム、AIS(Auto Identification System)が導入されています(p.92参照)。レーダーは発信した電波の反射を受信することでレーダー画面上に反射物の画像を表示するのですが、島や雨、雪などの障害物の影響で正しいレーダー画像が表示されないことがあります。これに対してAISは、電波が障害物の影響を受けにくいために、レーダーよりも確実に他船の正確な運航情報が得られ、その動向を正確に把握することができます。

## 安全な航海

ここで解説した船の運航技術はその一部であり、船を運航するためにはさらに多くの情報を、可能な限り早く入手できることが望ましいといえます。また、今回の解説によって現在は、人の技術を介することなく洋上の船の上で容易にさまざまな情報を得られていると思われるかもしれません。確かに、今後、船の運航現場においては、科学技術の発達により船を運航するために必要な情報が容易に入手できるように環境が整備されていくことでしょう。しかしながら、得られた情報をもとに、船をどのように進めていくのか、どのように航行させていくのかは船上の航海士である人間が決定しなければなりません。その決定が適切ではない場合、船は大きな危険にさらされる可能性が高くなります。世界で最も古い歴史を持ちそして最も大きな移動体である船。この船の安全な航海のためには、運航に必要な情報に基づく適切な判断と行動が求められ、それを可能にするのは多くの船の知識と経験を有する人であるといえるでしょう。



図1  
アルタ遺跡の  
岩絵  
写真:  
Andreas Haldorsen  
(Creative Commons)



図2  
パーニヤ式  
六分儀  
(東京海洋大  
学所蔵)



図3 船のレーダーアンテナ(左)とレーダー画像(右) 提供:東京海洋大学

# 船の種類

産業に必要な原材料やエネルギー、生活に必要な製品は船が運んでおり、海に囲まれた日本では、輸出入品の99%以上が船によって輸送されています。さまざまな用途で、いろいろな船が活躍しています。

## 資源輸送船

鉄鉱石、石炭、穀物、塩などさまざまな貨物を大量に、梱包せず、そのまま船体内のホールド(船倉)に積載し、輸送するのが「ばら積み貨物船」です。世界の商船の40%を占めており、その大きさはホールドが1つの小型船から、ホールドが複数あり最大40万トンに達する巨大船までさまざまです。



図2 ばら積み貨物船(クレーン付)



図3 大型ばら積み貨物船

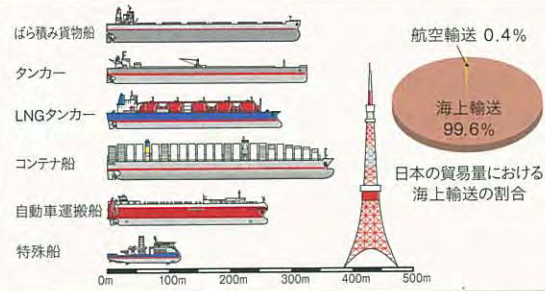


図1 船の大きさ比較 日本船舶海洋工学会関西支部シニアギャラリー「船のカチ子」(神田修治)を基に作成

## エネルギー輸送船

エネルギーの源である原油やガソリンなどの石油精製品、化学品などの液体貨物を輸送するのが「タンカー」です。油タンカーをタンカーと呼ぶことが多く、化学品を輸送する船は「ケミカルタンカー」と呼んで区別しています。貨物が引火性の高い危険物であるため、安全性を考慮した構造配置に特徴を持っています。また、クリーンエネルギーとして需要が増加している天然ガスは、液化して「LNGタンカー」で輸送します。天然ガスの主成分であるメタンは $-162^{\circ}\text{C}$ に冷却しなければ液化しないため、超低温を保ち続けられるLNGタンクなど高度な技術が必要です。



図4 油タンカー



図5 LNGタンカー

## 製品輸送船

資源やエネルギーを運ぶ船とは違い、加工した工業製品を運ぶ船もあります。多種多様な貨物をコンテナに詰めて輸送する「コンテナ船」や、自動車運搬船が挙げられます。定期運航を可能とするため高速



図6 コンテナ船

## 旅客輸送船

多くの人の交通手段となるのが「旅客船」や「カーフェリー」です。また、レジャーとして船旅を楽しむ「クルーズ客船」も就航しています。乗り心地を重視した船型や電気推進装置が採用されています。



図8 カーフェリー



図9 クルーズ客船

性や耐航性に優れた船型が必要とされます。

また、船の前後からランプウェイと呼ばれる可動橋をのぼし、トラックやフォークリフトがランプウェイを渡って直接船内に入り、貨物を積み降ろすことができる、「ロールオン・ロールオフ船」という船もあります。



図7 ロールオン・ロールオフ船

## 特殊船

海洋開発に用いられる「海洋構造物支援船」、海底ケーブルを設置する「海底ケーブル敷設船」、海上工事に欠かせない「クレーン船」、深海を調査する「深海調査研究船」などそれぞれの専門部門で特殊船が活躍しています。自動位置保持装置やさまざまな観測センサーを搭載するなど最新の技術が生かされています。



図10 海洋構造物支援船



図11 多目的作業船

# 5

## 今後の船



図1 実海域の性能向上を目指した研究開発船

海上輸送による物資の輸出入に船舶は必要不可欠です。船舶は鉄道と並んで非常に輸送効率が高い輸送機関であり、より一層、輸送効率を向上するための研究開発が進められています。そこで、「省エネ船」「未来のエンジン」「北極海航路」をキーワードに、最新の研究開発を紹介します。

### 省エネ船

船舶は、航行に伴う水からの力(抵抗)に逆らって、必要な速度を出すためのエンジンを搭載します。これには水中の形状が重要で、最適な形となるように設計されます。一方、外洋では波や風によって抵抗が増加するため、燃費の悪化につながります。特に海洋波によって生じる抵抗(波浪中抵抗増加)は非常に大きいため、水面上の船首部を、理論的に抵抗が最小となる三角形の形状に近づけることで、抵抗を大きく低減し、実海域を航行する船舶の輸送効率を向上することができます。図1は、水面下の形状は変えず、水面上の形状を変えることで、波浪中抵抗増加を40%低減させる研究開発の事例です。

国内輸送に限っても船舶は、排出するCO<sub>2</sub>の量が商用トラックの1/4と環境にも優しいことから、海上輸送の拡大が運輸

分野の環境問題への対応の鍵となります。このため、スーパーエコシップ(Super Eco-Ship [SES])の開発が行われ、革新的な技術開発が行われました。これらの成果を受け、2016年3月時点で、すでに25隻のSESが就航し、普及が進んでいます。セメント船SES(図2)の例では、水の流れにフィットした船尾形状、空船時の推進性能向上のため船底・船首形状などの船型改良、保針性能向上のための整流翼の設置が施され、推進システムは、主機関によって動く主プロペラの直後に電動ポッドプロペラを配置し、前後のプロペラの回転方向を逆にすることで(タンデム型二重反転プロペラ)、推進効率を向上しています。この船は同型の既存船と比較して、18%も輸送効率が向上しました。また、ポッドプロペラを真横に向けてスターンスラスタースト、バウスラスターストと連動させることで、真横移動やその場での旋回を行うことができるようになり、船長や乗組員が最も気を遣う離着岸操船が格段にやり易くなりました。

今後、このような高度な技術が適用された船舶が建造され、運輸分野での環境負荷低減に大きく貢献し、高い経済性と効率的な輸送により日本の産業を支えていくことが期待されます。

### 未来のエンジン~スターリングエンジン~

交通機関のエンジンとしては、小型乗用車では小型・軽量のガソリンエンジン、航空機では大推進力が得られ



図2 セメント船のスーパーエコシップ 興山丸(左)とその推進システム(右)

るジェットエンジン、そして現在の船では高効率なディーゼルエンジンが主流となっています。一方、古くから夢の環境エンジンとして期待されている動力源の一つとしてスターリングエンジンがあります。図

3のように、温度差を持つ2つの空間とピストン、ヒータ・再生器・クーラと呼ばれる熱交換器、さらに平滑な回転運動を可能とするフライホイール等から構成されます。運転時には、ディスプレイサの運動により、エンジン内の作動ガスが高温空間と低温空間の間を往復し、圧力変化を生じさせながら、パワーピストンによって膨脹と圧縮を繰り返します。スターリングエンジンは燃料の爆発を利用しないため、とても静かに運転できます。また、外部から熱交換器を暖めることで運転するため、石油燃料に限らず、あらゆる熱源を利用できるという特徴があります。図3に示す排熱利用のスターリングエンジンでは、船のディーゼルエンジンの排ガスの熱エネルギーを利用して発電することができます。すなわち、今まで棄てていたエネルギーの一部を有効に利用できる省エネ技術です。

現在までに比較的小さい出力レベルのスターリングエンジンが開発されていますが、今後は大出力化の研究開発が進み、船舶分野ばかりでなく、陸上分野でも実用化され、より高度な環境に優しいスターリングエンジンに転換されることが期待されます。

### 北極海航路

北極や南極の海は氷海と呼ばれ、広範囲に海水が存在しています。氷海は海水が凍った氷で、真水からできた氷より弱く、砕氷船は海水を壊しながら進んでいきます。

北極海航路はアメリカとロシアの間のベーリング海峡からロシアのノヴァヤ・ゼムリヤを結ぶロシア沿岸の航路です。実際の運航では砕氷船が先導して氷を割り、その後ろを貨物を積載した耐氷船が船団を組み航行するこ

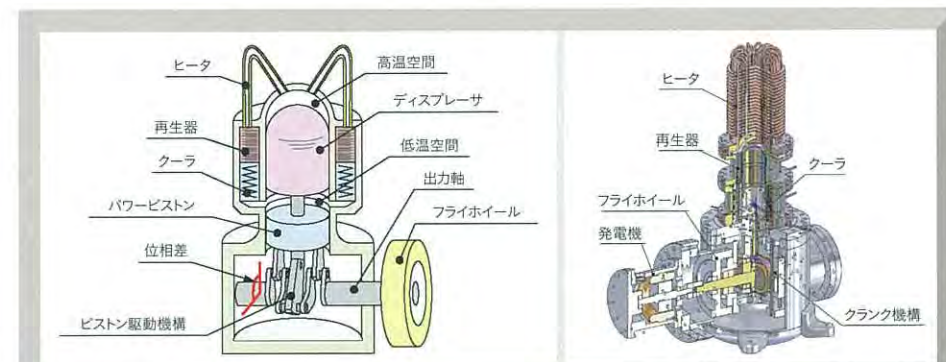


図3 スターリングエンジンの基本構造(左)と排熱利用のスターリングエンジン(右)

とがよく行われます(図4)。この航路のメリットは、アジアとヨーロッパを短距離で結んでいる点です。例えば日本とオランダの距離は、スエズ運河を通行し地中海を通る従来の航路と比べて、約3割短くなります。航海日数や燃料消費量が減れば、その分、経済的な効果がとても大きくなります。

一方、デメリットとして、海水の状況によって安全性や費用が左右される点が挙げられます。海水の状況は変動が大きいので、いつどのように利用するかという判断は常に難しい問題です。海水の正確な情報を集め、それを科学的に正しく分析するためには、人工衛星やレーダー、航空機など、さまざまな手段を総合的に利用することが必要です。従って、北極海航路ではこれらのデータを入手し、それを時々刻々分析しながら運航しなければなりません。この先北極海航路は、高度に情報化された船が開発されることで、その利用が一層活性化していくことでしょう。

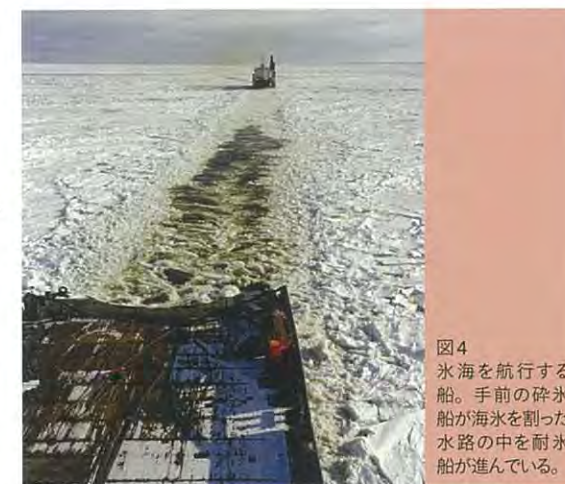


図4 氷海を航行する船。手前の砕氷船が海水を割った水路の中を耐氷船が進んでいる。



# 3

# 再生可能エネルギー

私たちの豊かな生活は、電気・ガスなどの大量のエネルギーに支えられています。現在、日本で使用されているエネルギー資源の約80%が石炭や石油、天然ガスなどの化石燃料ですが、近年、これらに代わるものとして再生可能エネルギーが注目されています。自然界にあふれる光や風などをエネルギー源とする再生可能エネルギーは、化石燃料のように枯渇の心配もなく、環境にもやさしいエネルギーです。海洋にも波力・潮流・海流・温度差などとして豊富に存在しており、これらを有効に活用するための技術開発が進められています。

欧州ですでに稼働している洋上  
ウィンドファーム(デンマーク)。



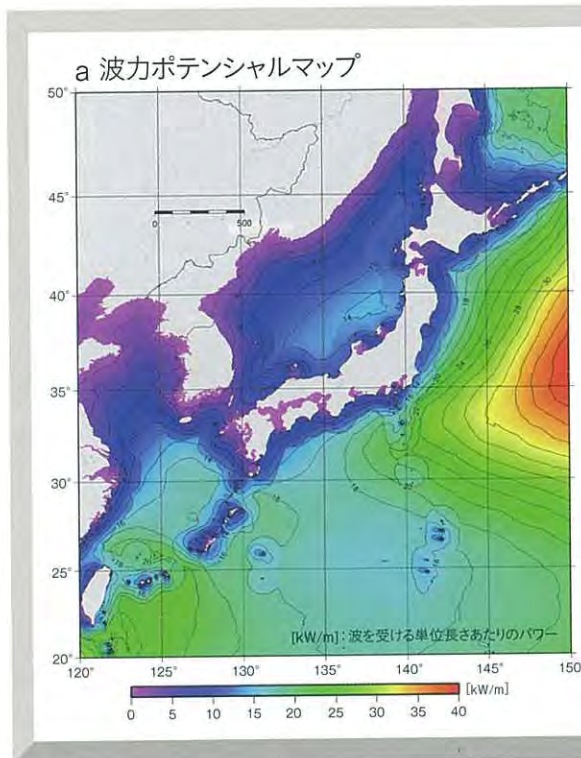
# 1 需給・ポテンシャルマップ

## 政府の再生可能エネルギー導入方針

2016年に閣議決定されたエネルギー基本計画において、再生可能エネルギーは、安定供給面やコスト面でさまざまな課題が存在するものの、重要な低炭素の国産エネルギー源であると位置付けられ、2020年には発電電力量の13.5% (1414億kWh)、2030年には約20% (2140億kWh)の導入を目指す、という政策方向性が示されています(資源エネルギー庁エネルギー基本計画2016)。海洋再生エネルギーを利用した発電も欧米を中心として開発や商業化が進行中であり、今後の導入拡大が見込まれます。そこで海洋再生エネルギーの発電形式ごとの資源賦存量(ポテンシャル)を説明します。

## 洋上風力

図1は、高度80mでの年平均風速を表しています。着床式洋上風力発電装置が2012年より銚子沖と北九州沖に設置され、設置工法、気象条件、発電量など事業化に



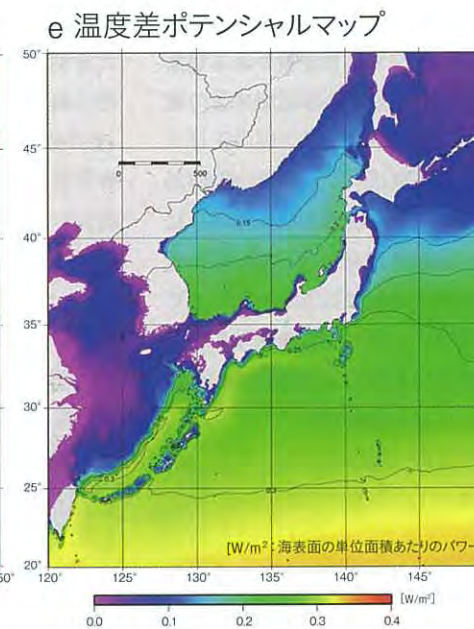
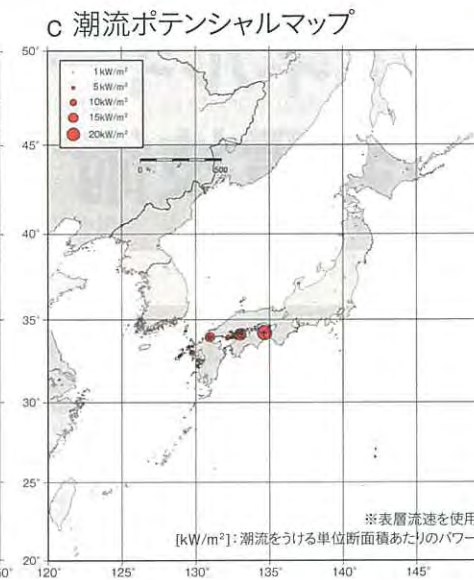
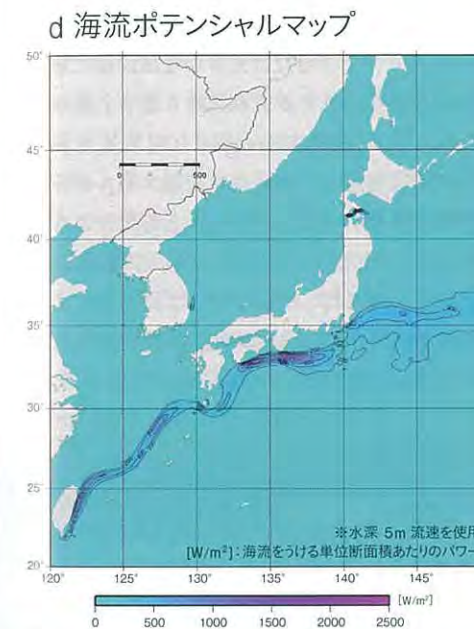
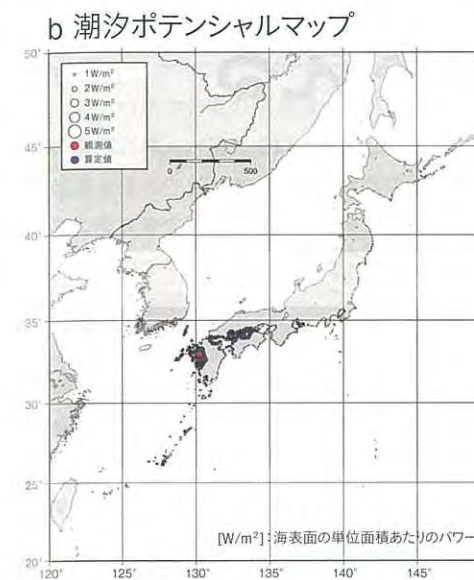
向けた必要なデータの取得が進められています。また、浮体式洋上風力発電についても、世界初の本格的な事業化を目指し、福島沖や長崎県五島市沖で実証実験が進められており、技術開発や安全性・信頼性・経済性の評価、環境アセスメント手法を確立させ商業化を目指しています。(p.36参照)

## 波力

図2aは、波力エネルギーのポテンシャルマップです。日本沿岸では年間およそ10kW/mのポテンシャルがあります。現在提案されている波力エネルギー変換方式は、波エネルギーを空気エネルギーに変換しタービン等を駆動する方式(振動水柱方式)、装置構造の一部を波エネルギーで運動させ、その運動で油圧ポンプ等を駆動する方式(可動物体方式)、波を一度越波させて構造物上部のタンクに貯め、その海水の落下エネルギーでタービン等を駆動する方式(越波方式)に大別されます。(p.38参照)

## 潮汐・潮流・海流

潮汐、潮流、海流エネルギーのポテンシャルマップをそれぞれ図2b~dに示します。潮汐発電は海に堤防を築



## エネルギーの単位と大きさ

エネルギーの単位はJ(ジュール)です。パワーは単位時間に発生あるいは使用されるエネルギーのことで、パワーの単位はW(ワット)、1W=1J/sです。

1kW(キロワット)=10³W  
1MW(メガワット)=10⁶W  
1GW(ギガワット)=10⁹W  
1TW(テラワット)=10¹²W

図2 ポテンシャルマップ 図:NEDO「平成22年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発/洋上風力発電等技術研究開発/海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」を一部改変

いて貯水池を作り、潮の干満によってできる貯水池内外の大きな水位差で堤防に埋め込まれたタービンを駆動させます。潮流発電は潮流により瀬戸や海峡に発生する速い流れで、海流発電は黒潮などの海流で水車を駆動させます。季節や天候に左右されない安定したポテンシャルが期待されます。スコットランドの「MeyGenプロジェクト」では2020年までに多数の潮流発電装置を設置し398MWの系統連携を目指す計画です。(p.41参照)。

## 海洋温度差

図2eは、海洋温度差エネルギーのポテンシャルマップです。海洋温度差発電は、アンモニア等の作動流体を海面近くの温水で蒸発させてタービン・発電機を駆動させ、次に作動流体蒸気を深層の冷水で凝縮させるサイクルを用います。温度差は20度以上必要であり、温度差が大きいほど高い発電効率が得られます。(p.44参照)

## 2

# 風をエネルギーに変える 風力発電技術

## 風のエネルギーと風力発電のしくみ

大気の流れのうち、水平方向の空気の動きを風といいます。風は、大気中にできる気圧の差によって吹きますが、地球の自転や地形などの影響も受けて、複雑に変化します。この風の運動エネルギーを風車によって回転エネルギーに変換し、発電機を回して電気エネルギーを得るしくみが風力発電システムです。風力発電では、風の予測技術が極めて重要で、風力発電装置が置かれる場所の地形や気象条件なども考慮に入れ、いかに効率よく風をとらえるかが発電量を大きく左右します。

風力発電の風車は、「水平軸風車」と「垂直軸風車」の2種類に大別されます。水平軸風車は回転軸が風向きに対して平行な風車で、垂直軸風車は回転軸が風向きに対して垂直な風車です。垂直軸風車は風向きを気にしなくてよいなどの利点がありますが、一般に水平軸風車に比べて効率が劣ることなどから、現在は水平軸風車が主流になっています。図1が水平軸風車の回転メカニズムです。風車のブレードは翼の形で、風を受けて翼が揚力を生み出し、風車が回転

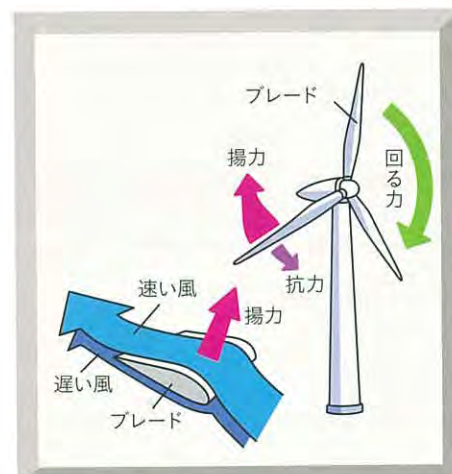


図1 翼断面によって生み出される回転方向モーメント

します。そして、回転軸に取り付けた増速ギアで回転を高め、発電機を回して発電します。さらに、風はさまざまな方向から吹くため、水平軸風車にはヨーギアと呼ばれる風車の向きを変えるためのギアと駆動モーターが備わっています。そのほか、大型の水平軸風車には、強すぎる風を逃がすための風車ブレードピッチ（取り付け角度）制御装置も設置されています。

風の運動エネルギーは受風面積に比例し、風速の3乗に比例します。つまり、できるだけ大きな受風面積にして、風速の速い場所に置くことが有利になります。風車は一般的に風のエネルギーの30~40%を電気エネルギーに変換することが可能で、他の再生可能エネルギーに比べて高効率とされています。小型風力と呼ばれるもので1~50kW程度、大型風力と呼ばれる風車は1000kW以上の発電容量を持っています。さらに近年では、1機10MWすなわち10000kWの発電容量を持つ風車も開発されつつあります。

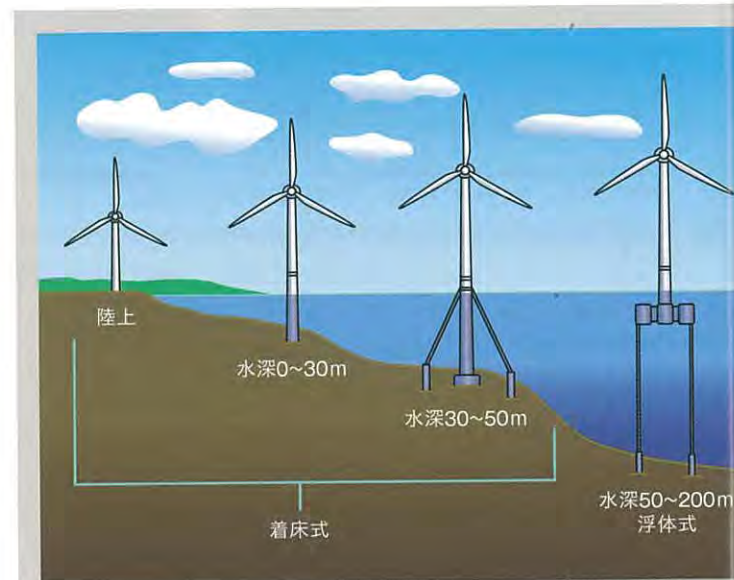


図2 着床式と浮体式の対象水深

## 陸上の風力発電

陸上の風力発電の商業運転の実績は長く、欧米を中心に堅調に導入が進んでいます。なかでもスペインは、発電量全体の18%（2012年）を風力で賄っています。2012年の導入量実績を見ると、世界で最も多かったのは中国で、続いてアメリカ・ドイツ・スペイン・インドの順になっています。

日本では、1990年代後半から風力発電の導入が進み、2012年には累積容量が約2600MkWに達しましたが、世界では第13位でした。しかし、2011年に「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が成立し、風力発電をはじめとする再生可能エネルギーのさらなる導入拡大が期待されています。

## 洋上風力発電

国土が狭く地形も複雑な日本では、風の条件がよい場所はどうしても限られてきます。そうした背景もあり、近年、洋上における風力発電の研究開発が活発に推進されています。日本だけでなく、欧州も同様で、すでに欧州では大規模な洋上ウィンドファーム（複数基を展開する大型施設）の建設も進んでいます。

洋上風力発電には、海底に直接タワーを設置する「着床式」と浮体構造物上に風車を載せる「浮体式」があります。図2は着床式と浮体式の対象水深の大きな違いを示したものです。水深が50mを超えるような海域では、浮体式が効果的とされています。海に浮かんだ風車は、チェーンや繊維ロープなどの係留索によって海底に根入



図3 福島県楡葉町沖約20kmの海域に設置された「ふくしま新風」  
提供：福島洋上風力コンソーシアム

れしたアンカーとつながっています。

欧州で商業運転が始まっている洋上風力発電システムはすべて着床式で、浮体式に関しては、現在はまだ実証試験の段階です。浮体式については、日本でも大規模な実証試験として、福島県沖の「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」（経済産業省）や、長崎県沖の「浮体式洋上風力発電実証事業」（環境省）などが行われています。

## 洋上風力発電の課題

風力発電機の主要な部分は陸上も洋上もほぼ同じですが、洋上風力では、海洋環境に対応するための浸水対策や塩害対策が欠かせません。さらに、着床式であれば波による衝撃波の影響について、浮体式であれば波だけでなく流れや浮体の揺れも検討しなくてはなりません。また、これまでの海上構造物や船舶に比べて、風の影響も非常に大きくなります。こうしたことから、洋上風力発電の最大の課題となっているのがコストです。

日本の陸上風力発電システムの設置コストは、一般的に20万~30万円/kWといわれています。つまり、2MWの風車を建てる費用は4~6億円程度ということになります。一方の洋上風力では、5000MWウィンドファームの総工費はおおよそ2000億円と見積もられ、設置コストは40万円/kWになります。浮体式ではもう少し高いといわれます。設置後も、陸上に比べてアクセスやメンテナンスが難しく、運用・管理のコストも大きくなります。そのため、日本をはじめ欧米各国では、コストダウンのための新しいアイデアを具体化する研究が進められています。



図4 浮体式洋上風力発電の水槽試験の様子  
提供：大阪府立大学 二瓶泰範、横浜国立大学 村井基彦、日本大学 居駒知樹、大阪大学 飯島一博

## 3

## 波による発電



図1 浮体式波力装置マイティーホーエル  
(五ヶ所湾 1998年～2002年)



図2 酒田港での波力発電実証試験(2015年1月～9月)

## 波の力で電気をつくり出す!

波は水面の高低運動で、エネルギーそのものです。海面を波が進むことで、エネルギーが伝播しているわけです。日本列島は海に囲まれており、海辺に行けば大なり小なり波が打ち寄せています。俗に言う土用波は、赤道に近い低緯度域で発生した台風によってつくられた波が日本列島まで届いたものです。遠くの海上から目の前まで、自然のエネルギーが波という形で運ばれてきているのです。

この海の波の位置・運動エネルギーを電気エネルギーに換えるしくみが波力発電です。空気より重い水の運動エネルギーを利用するため、面積当たりでは風力発電より高い発電効率が得られると期待されています。ここでは、海で波ができるメカニズム、波のエネルギーの特徴と発電方法について紹介します。

## 波ができるまで

海の波のほとんどは、風がつくり出します。海面に存在する波は、総称して海洋波と呼ばれます。海洋波には、風による波浪、潮汐現象による潮汐波、台風などの低気圧による海面の盛り上がり起因する高潮、海底地震やがけ崩れなどによる津波などがあります。波力発電に利用する海洋波は波浪です。その波周期は3秒程度から25秒程度の範囲で存在していますが、対象となる波は、主

に5～15秒程度です。

風が吹くと、水面にさざ波が立ちます。水面がさざ波によってデコボコしてくると、風が直接水面に当たる面積が大きくなり、さらに波が立ちやすくなります。同時に波が立つことにより、風のエネルギーが波に姿を変えるわけです。風がたくさん吹いて水面がエネルギーをたくさん受ければ、波が大きくなっていきます。波が発達するには3つの条件があります。それは「風速が大きい」こと、「風が吹く時間(吹送時間)が長い」こと、そして「風が吹く距離(吹送距離)が長い」ことです。風が吹く海域(風域)では波が発達し、見た目は波の表面がギザギザしています。風で表面が乱されるからです。この波を「風浪」といい、風浪が周辺へ移動していくことを伝播といいます。風域の外へ波が伝播すると、水面は乱されなくなり、周期の短い波は消え、全体として滑らかで周期の長い波が残ります。これが「うねり」と呼ばれる波浪です。

## 波のパワーとエネルギー

波浪が進行する速さを波速といい、周期の長い波ほど速くなります。ただしこれは波の見た目の進行速度で、波のエネルギーはこの速さで伝播しません。波のエネルギーが移動する速度は群速度と呼ばれ、やはり周期の長

い波ほどエネルギーの伝播も速くなります。海岸近くのような水深の浅いところでは、波速と群速度はほとんど同じになります。

波を利用して発電することは、つまり「波のパワー(単位:W)で発電機を動かす」ということです。発電機がつくり出した電気が時間的に継続することでエネルギー(単位:J、W/h)になります。例えば、日本の海岸に打ち寄せる波の幅1m当たりの平均波パワーはおおよそ7kW/m、沖合では15kW/m程度で、冬季の日本海の一部では30kW/mに届くような海域もあります。また、ハワイ沖合では100kW/m程度、ヨーロッパでも水深の浅い海で20kW/mを超えます。日本よりも波パワーの大きな海域は世界にたくさんあります。

日本では、日本海側で冬の波浪は大きく、波パワーもとても大きいのですが、夏は全くといっていいほど波がなく、パワーもほとんどありません。それに対して太平洋側では、台風によって波パワーは大きくなりますが、それを除けば、年間を通して比較的波パワーの大きさは安定しています。

## 波力発電の方式

波には、位置エネルギーと運動エネルギーが半分ずつ存在しています。それがどれくらい発電機を動かせるかが重要です。一般に波パワーで直接発電機を動かすことは難しいため、まずは波パワーから発電機を動かす媒体のパワーに変換する必要があります。例えば、油圧だったり空気圧だったりです。この過程を一次変換といいます。その空気圧などのパワーで発電機を動かして電気をつくり出すまでの過程を二次変換といいます。波力発電の性能は、入力のパワーに対して一次変換や二次変換がどれくらいの割合で行われるかで性能が評価されます。こうしたしくみを利用した波力発電システムの一つが「振動水柱型」です。空気室を備え、海面の上下動で

生じる空気室内の圧力差を利用し、空気流を発生させてタービンを回転させるしくみです。また、「可動物体型」は、波で可動物体を動かし、その動きで油圧や水圧をつくり出して発電機を駆動させる方法です。一方、波の力で斜面を駆け上がらせて海面よりも高いところに海水を貯め(位置エネルギー)、管から排水してその際の水圧(運動エネルギー)によってタービンを駆動させて発電する「越波型」という方法もあります。さらに、今日では機械的な発電機ではなく、波で浮体を動かすときに誘電エラストマー(弾性材料)を伸縮させて電気をつくるといった、運動エネルギーを直接電気エネルギーに変換する方法などの研究開発も進められています。

## 波力発電装置と現状

日本では、空気タービンによる振動水柱型波力発電の研究が多く見られました。その代表が浮体式波力装置「マイティーホーエル」でした。2002年に撤去されるまで三重県の五ヶ所湾で実証試験が行われ、世界に誇れる性能を発揮していました。最近ではNEDOの事業として民間のコンソーシアムが山形県酒田港内で二重消波ケーソンを振動水柱型波力発電装置に改造した装置での実証試験を成功させています。また可動物体型では、船舶の舵のシステムを応用した振り子式装置(油圧)の実証試験も始まっています。欧米では油圧や水圧を利用した波力発電装置が数多く見られ、関節を持つ蛇を模した「ペラムス」という装置(油圧)や振り子を逆にしたフラップ方式の「オイスター」(水圧)などの開発が続けられています。

季節や時間で変動する波パワーをいかに効率的に利用できるか、また海上工事のコストをできるだけ下げられるかなどの課題も残っていますが、波力発電は確実かつ永続的に電力をつくり出せることが実証されており、将来性のある再生可能エネルギー技術といえます。

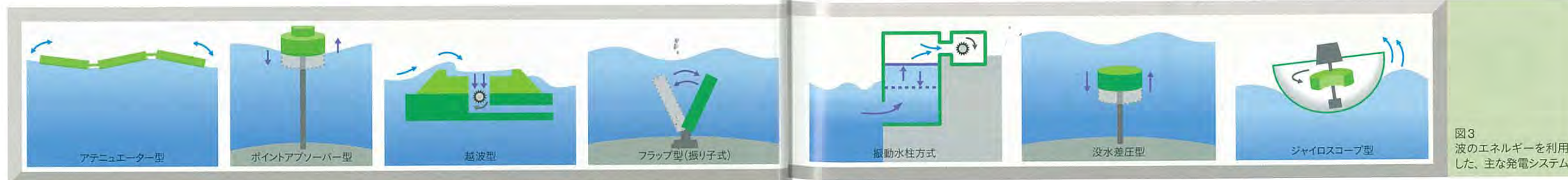


図3 波のエネルギーを利用した、主な発電システム

# 4

## 潮汐・潮流・海流発電

### 潮汐・潮流のしくみ

潮汐は、地球と月・太陽の天体間に作用する力によって起こります。まずは、地球と月の天体運動について考えてみましょう(図1)。月は地球の周りを約27日かけて1周しますが、同時に地球も2つの天体の共通重心の回りを1周(公転)します。そのとき地表の各点には、月からの引力(図1a)と共通重心周りの運動による遠心力(図1b)の合力が作用することになります(図1c)。月からの引力は月に近い方が大きくなりますが、遠心力は地球のどの点でも大きさは同じです。その結果、海面は月側とその反対側の水面が盛り上がることになります。この状態で地球が自転すると、1日に2回ずつ満潮・干潮になります(図1d)。これが、潮汐が起こるしくみです。

また、地球の潮汐力は太陽の引力の影響も受けるため、図2のように、太陽・地球・月が一直線上に並ぶときに大潮(図2a)、太陽と月の位置が地球から見て90度の角度となる場合に小潮(図2b)になります。

潮流は、この潮汐の干満によって発生する海水の流れで、満潮に向かうときの流れを上げ潮、干潮に向かうときの逆向きの流れを下げ潮といいます。

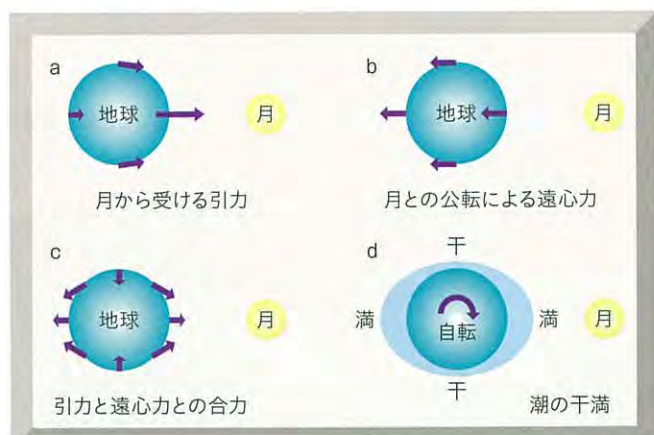


図1 地球と月の潮汐力

### 海流のしくみ

海流は、黒潮やメキシコ湾流に代表されるような定常的な海水の流れです。海水温が比較的高い流れは暖流、冷たい流れは寒流と呼ばれています。この流れは主に海面上の風によって駆動されています。赤道付近では貿易風と呼ばれる東からの風が、中緯度では偏西風と呼ばれる西からの風が海面上で定常的に吹いており、それが海流を生み出しています(図3)。

さらに、海流は地球の自転によって生じる「コリオリ力」という見かけの力(慣性力)によって北半球では時計回りの方向に曲げられます。コリオリ力は赤道ではゼロで、緯度に比例して大きくなります(図4)、大洋の西岸側で強い流れをつくり出します。これが、黒潮やメキシコ湾流のような大規模で強い流れが発生するしくみです。

### 潮汐発電の原理

潮汐発電で最も有名なのは、イギリス海峡にあるフランスの「ランス潮汐発電所」(出力24万kW)です。この辺りの潮位差は最大で13.5m、平均で8.5mもあります。

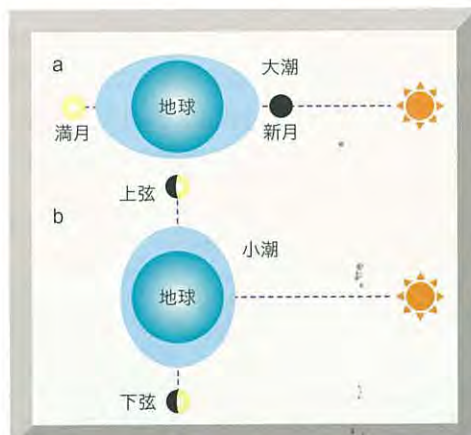


図2 大潮と小潮時の地球と太陽、月の位置関係

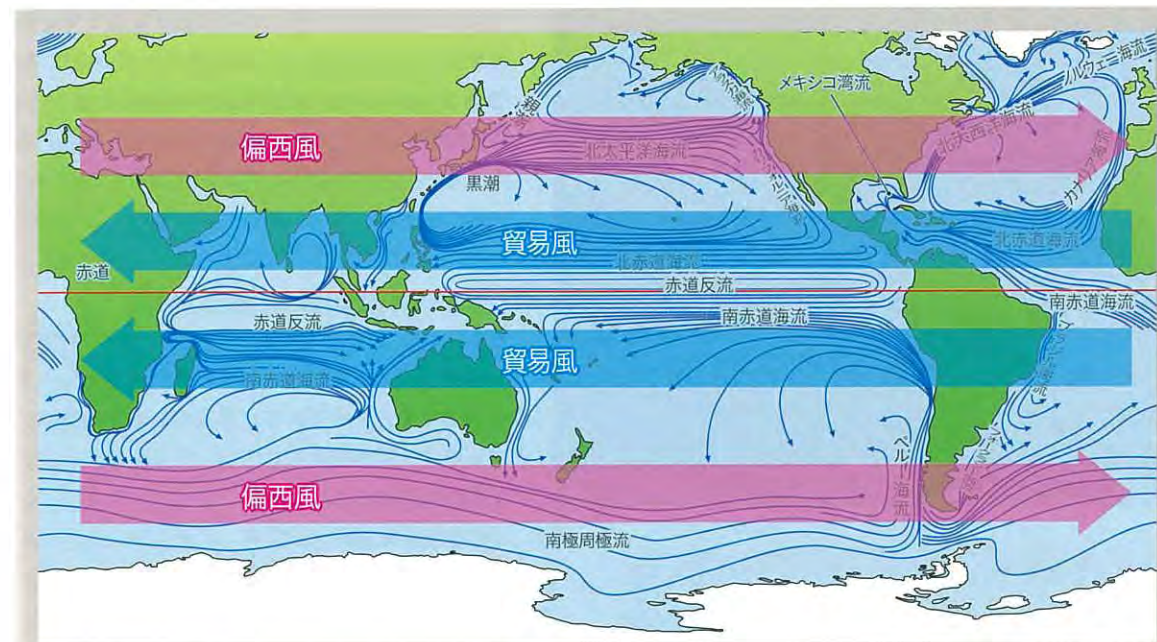


図3 表層海流

図版:C. P. Summerhayes and S. A. Thorpe "Oceanography", MANSON publishing の図をもとに作成

ランス川河口の上流約4kmの地点に長さ750m、高さ13mの潮汐ダムを建設し、1967年から年間約6億kWhの発電を行っています。この発電量は、一般家庭約15万所帯分の電気量に相当します。潮汐発電所の発電原理は、一般の水力発電所と同じで落差(位置エネルギー)を利用して流れをつくり、水車に連結した発電機を回すことによって発電します。ただし落差は数mしかないため、超低落差発電に分類されます。ランス潮汐発電所は「1貯水池2方向発電方式」で、上げ潮時と下げ潮時にダムの下部に設けられた直径5.3mの水車を回して双方向で発電しています。

このような潮汐発電所は、ランス以外にはロシア・カナダ・中国にも設置されていますが、2010年からは、世界最大規模の韓国の始華湖潮汐発電所(図5)が出力25.4万kWで発電を行っています。ただ、ダム建設のための費用が大きすぎて発電コストが高すぎることで、さらにダムによって外海と調整池が隔離されることで発生する環境問題により近隣住民の同意が得られないことなどから、潮汐発電所はそれほど普及していません。

### 潮流・海流発電の原理

潮流・海流発電については、現在まで商業発電は行わ

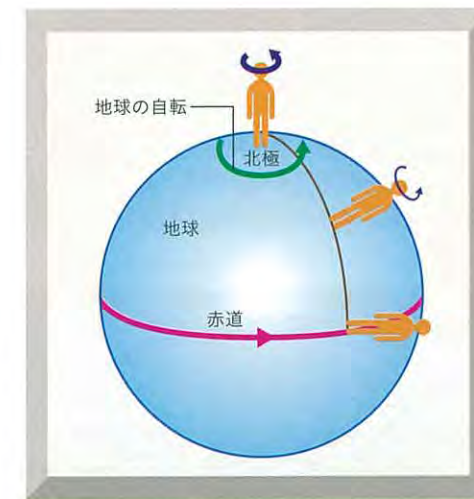


図4 コリオリ力と緯度  
北極に立っている人は自転の速度で回転している。しかし赤道では回転の速度はゼロになる

れていませんが、イギリス北端のスコットランドで実施中の「MeyGenプロジェクト」(p.35参照)が、2017年から出力6000kWの潮流発電システムによる商業発電を開始する予定です。

この発電原理は風車と同じで、流れの中に置かれた水車に連結した発電機を回すことで電力を得ます。風車との大きな違いは、海水の密度が空気の約800倍であるた



図5 韓国の始華湖潮汐発電所

め、小さな水車でも大きな発電量を得ることができるという点です。また、潮流・海流発電は、自然の流れの中に発電装置を設置するため、潮汐発電に比べてコストと環境への影響を抑えることができると期待されています。

潮流と海流の違いは、海流は定常的なのに対し、潮流は約6時間ごとに流れの方向が変わる点です。どちらも流速や流量・流路は季節などによって多少変化しますが、大きな変動はないため、発電計画を立てやすい、大規模で安定したエネルギー源といえます。ただし、海流も常に一定というわけではありません。例えば黒潮は、数年

ごとに「大蛇行」という大きな流路変更をする場合があります。また、海流の流れの強い海域は、陸地から離れた水深の深い場所であることから、送電距離が長くなったり、装置の設置・管理が難しくなったりするなど、実用化には多くの課題があります。

### 潮流・海流発電装置の分類

潮流・海流発電装置は、まだ風力発電に比べて未発達であり、いろいろな形式のものが提案されています。設置方法には、

- ・着底式(図6)
  - ・中層浮遊式(図7)
  - ・浮遊式(図8)
  - ・支柱固定・可動式(図9)
- などがあります。また、水車の形式には、翼型の揚力を利用する揚力型、水流が押す力を利用する抗力型があります。

揚力型は高速回転・高効率であり、回転軸の向きによって水平軸あるいは鉛直軸に分類されます。現在、水平軸が多用されていますが、一般に潮流の方向に合わせて首振り制御をしなければならないため、構造が複雑になります。一方、鉛直軸の代表であるダリウス式水車(図10、図11左)は、流れの方向を選ばない単純な構造に利



図6 着底式潮流発電装置

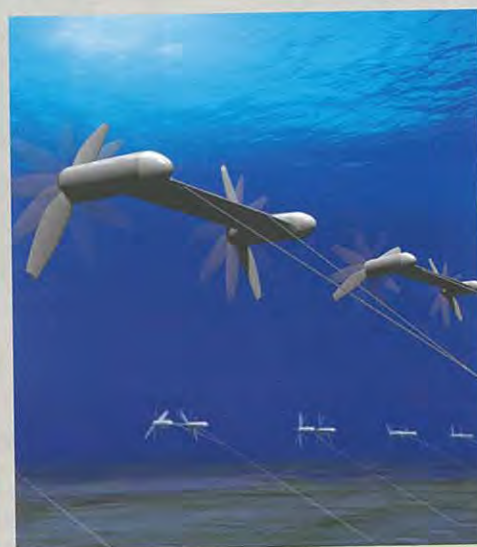


図7 中層浮遊式



図8 浮遊式



図9 支柱固定式



図10 ダリウス式水車式

点があります。抗力型の代表的なものにサボニウス式水車(図11右)があります。その特徴は、構造が単純で、低回転・高トルクのため確実に回転させることができる利点がありますが、低効率であるという欠点もあります。

このほか、魚のひれ状平板で揚力変化を利用するもの、渦励振による揚力変化を利用するものなど、多くのアイデアが提案されています。

### 潮流・海流発電の現状と今後の展望

現在、イギリス・フランス・カナダ・アメリカなどにおいて商業発電を前提とした潮流発電プロジェクトが進行中ですが、これは、潮流発電は再生可能でクリーンであることはもちろん、発電量の予測が可能であり、信頼性・安定性が高いエネルギー源であると評価されているためです。

ただし、実用化のためにはいくつかの問題を解決しなければなりません。まず前提条件としては、海域の潮流・海流が一定以上の流速であり、そこが重要な航路ではないこと、海域の使用について漁業関係者の理解が得られていることなどです。技術的には、設置場所が海中になるため装置が水圧や波浪などの外力に耐えること、海中での腐食や生物付着による影響を受けないこと、設置や回収のための海上工事が円滑に行えることなどの課題があります。

さらに重要なのは、潮流・海流発電の電力価格が他のエネルギー源と比較してどうかということです。現在のところ、明確な答えは出ていませんが、それをはっきりさせるためにも、実際に実証実験をやるのが重要です。

日本は周囲を海に囲まれており、海洋の流れの運動エネルギーの総和は膨大であると試算されています。このような恵まれた立地にある国は、世界でも多くありません。2014年には、日本のいくつかの海域に対して「海洋エネルギー実証フィールド」の認定が行われました。今後、これらの海域における実証実験によって、潮流・海流発電の実用化に向けた研究開発が推進されることに、大きな期待が寄せられています。

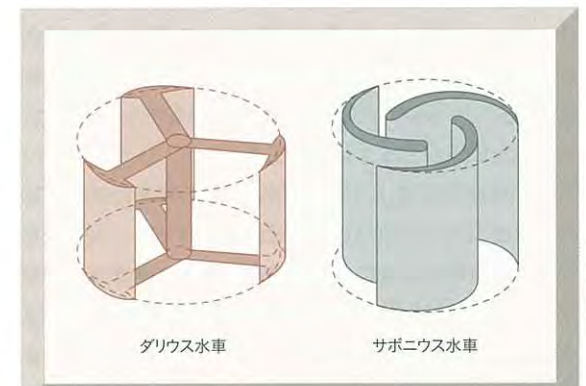


図11 鉛直軸水車

5

# 海洋温度差発電

## 海で温度差ができるしくみと発電

第1章3 (p.12) で説明したように、海の表面の水温は、亜熱帯や熱帯で高くなり、25~30℃に達します。一方で、海には、深さ方向に「成層」や「躍層」が存在し、水温が大きく変化します。深度1000m以上では5℃程度しかないため、表面との水温差は20℃以上に達します。風によって表層の海水がかき混ぜられることがあっても、深度200m以上になれば風による混合の影響が小さくなり、永年的な成層が形成されています。

海洋温度差発電は、表面海水と深度600~1000m付近の海水の温度差を利用して発電するものです。火力発電や原子力発電と同様に、温度差を利用して発電するのですが、化石燃料などを用いることはありません。国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)によれば、世界の海洋温度差発電のポテンシャルは10000TWhと発表しています。また、日本では、47TWhと試算されています(p.34参照)。海洋温度差は、他の再生可能エネルギーに比べて、海域面積を大きく占有することができないため、大規模に利用することができます。また、風速や流速、波浪などの不規則性に左右される他の発電方式

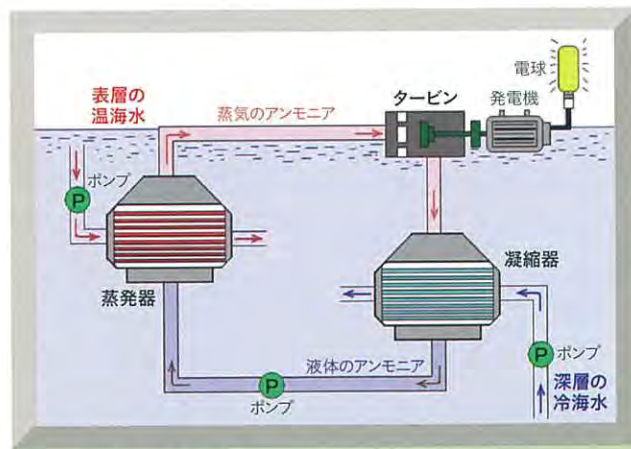


図1 海洋温度差発電の原理

に比べて、水温の変動は小さいので、安定的に電力を得ることができます。ただし、日本では、ポテンシャルが高い海域は、南方海域に限られることや、需要の大きい都市とは離れていることに留意する必要があります。

## 海洋温度差発電の原理

海洋温度差発電に必要な機器は、蒸発器、凝縮器、タービン、発電機、ポンプです(図1)。これらの機器はパイプで連結されています。これらの機器やパイプの中には、深度600~1000mの温度で液体となり、海面の温度で気体となるような物質が用いられます。従って、沸点が低く、熱の伝わりがよい物質が検討されていますが、一例としてはアンモニアが挙げられます。まず、アンモニアなどの作動流体は、液体の状態をポンプによって蒸発器に送られます。蒸発器では、海水と作動流体とで効率よく熱の交換が行われるようになっており、25~30℃で加熱された作動流体は蒸発し、蒸気となります。この蒸気がパイプによってタービンに送られ、タービンと発電機を回転させて発電します。タービンを出た蒸気は、パイプによって凝縮器に送られ、4~10℃で冷却され、再び液体となります。液体となった作動流体は再び蒸発器に送られ、同じサイクルを繰り返すことで発電し続けます。この方式は、作動流体が発電装置内を循環するため、クローズドサイクルと呼ばれていますが、温かい表面海水を作動流体として用い、低圧沸騰器に入れて水を気化させた蒸気によって低圧発電タービンを回すオープンサイクルや、これらを組み合わせたハイブリッドサイクルの研究開発も行われています。

海洋温度差発電の効率を上げるためには、海水と作動流体との間の熱交換を円滑に行うことができる熱交換器の開発が重要です。特に、熱交換を行うためのプレートは、なるべく薄く、伝熱性が

よく、表面積を大きくして熱交換率を高められるものでなければなりません。また、海水と作動流体を隔てていますので、漏れがないようにしなければなりません。さらに、熱交換器の一方の面は、常に海水と接触するため、表面が微生物等によって汚れたり、腐食したりすることがあるので、これらを防ぐことが重要な技術課題となります。

## 海洋温度差発電の現状と今後

海洋温度差発電は、1881年に、フランスの物理学者であるジャック・アルセヌ・ダルソンバールが提唱し、その教え子のジョルジュ・クロードが小規模ながらも実証実験を行ったのが始まりとされています。その後も、ハワイのコナコーストなどで少しずつ開発が進められてきましたが、近年、再生可能エネルギーの重要性が増すに従って、開発が加速しています。現在は、日本に加えてアメリカ、フランス、韓国、中国、インド、インドネシア、フィリピンなどで本格的に検討されています。

日本では、沖縄周辺および南伊豆、小笠原諸島、沖ノ島、南鳥島、奄美大島から高知、和歌山、八丈島にかけての海域が適しています。2013年より、出力50kWの海洋温度差発電の実用実証プラントによる実験が久米島で開始されました(図2)。ここでは、沖縄県海洋深層水研究所が、約2km以上の取水パイプを海底上に設置し、深度600m強よりやや深い所から、約8.5℃の深層水を取水しています。海面の水温は、夏季で29℃程度、冬季で22℃程度で、13.5~20.5℃の水温差を利用することができます。1日の深層水の取水量は1万3000トン程度です。天候、気温、海水温の変化と、そのときの発電量などを計測することによって、なるべく効率よく、かつ安定した電力が得られるような技術の開発と実証実験を行っています。

この実証実験では、発電プラントを陸上に設置していますが、将来的には、海上に設置して、パイプを深さ方向に延ばして、取水することになるでしょう。その場合は、陸域からの距離が大きく、水深が大きい海域であっても、発電が可能となり、よりポテンシャルが高い海域を



図2 海洋温度差発電実証プラント(沖縄県久米島)

選択することができます。水深が大きい海域では浮体の利用が適していますので、浮体の上に発電プラントを設置して発電を行い、得られた電力で海水を電気分解して水素に変換し、水素を浮体上に貯蔵しておく方式などが考えられます。

また、発電した後の取水を二次利用することも重要な課題となっています。取水した深層の海水は、発電に利用した後でも、水温は比較的低いため、この冷水性をエビの養殖や農業、空調などに利用することができます(図3)。特に、深層の海水は清浄性も高いため、養殖や農業などの食料生産への利用に適しています。さらに、深層の海水は窒素、リンなどの豊富な栄養塩を含んでいます。これらを利用して、一次生産を活発化させることができ、例えば海藻類の生育などに使用できます。その他、海水の淡水化、水素の製造、リチウムの回収など、さまざまな複合利用が可能であると考えられています。

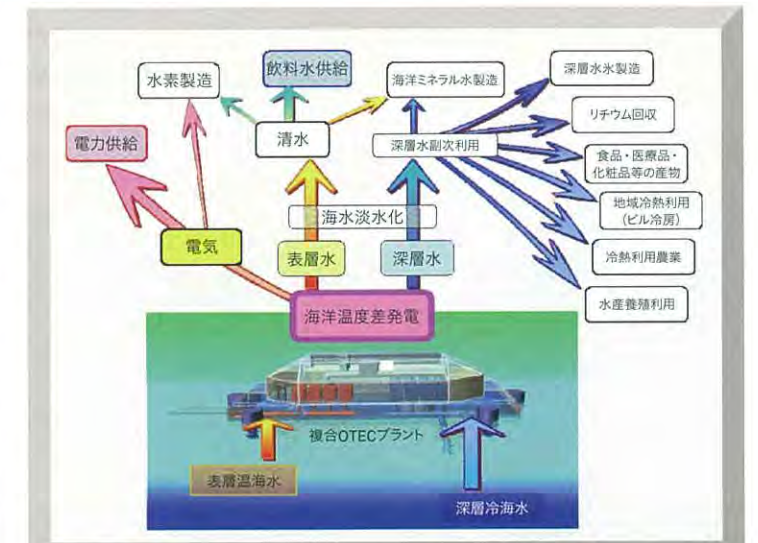


図3 海洋温度差発電の複合利用

6

# 今後の海洋再生可能エネルギー利用

## 海洋再生可能エネルギーの課題

再生可能エネルギーは枯渇することがない上に環境負荷の少ない持続可能なエネルギーですが、利用するには課題もあります。例えば、波力や洋上風力エネルギーは変動が大きく、不安定なまま電力網に接続すると停電の原因となる恐れがあります。また、潮流や海流、海洋温度差といったエネルギーは、多くの場合、発電機の設置場所が電力の需要地から遠く、送電に多大なコストがかかります。この課題を克服するため、発電した電力を水素に転換したり、再生可能エネルギーを組み合わせるなどといったアイデアがあります。

## 水素社会での活躍

現在、ほとんどの車や船や飛行機は化石燃料を使用する機関で動いています。化石燃料は地球温暖化の原因となる二酸化炭素や健康に悪影響がある窒素酸化物(NOx)、硫酸酸化物(SOx)を排出します。そこで、化石燃料を使わない低炭素化社会を目指し、水素を活用しようとする取り組みが世界中で行われています。この水素を、海洋再生可能エネルギーで製造しようという実験



図1 浮体式洋上風車(左)と燃料電池船「長吉丸」(右)

が長崎県で行われました。

長崎県五島市では2012～2015年に環境省による浮体式洋上風力発電の実証実験が行われました。杵島沖約1kmの水深約100mの海域に、2MWの洋上風車が設置され、海底ケーブルを使って陸上に送電されました。洋上風車が発電した電力の一部を活用し、水を電気分解して水素を製造するという世界初の試みがなされました。さらに、洋上風車によって製造された水素を使って、外洋での運航が可能な燃料電池船の実証も行われました(図1)。島の物流や漁業を支える船舶を、海洋再生可能エネルギーを活用して動かそうという試みです。

また、気体の水素を運びやすい液体(MCH)に変えて船で輸送し、輸送先で再び気体の水素を取り出すという実証も行われています。大規模な災害が起きて送電網が分断された場合にも、備蓄した水素を輸送・活用して病院などの施設で非常用電源として使うといった利用方法も期待されています。

## エネルギーの地産地消

海洋再生可能エネルギーは、日本の海岸線の至る所に賦存<sup>みぞん</sup>しています。これを地元で利用する、いわゆるエネルギーの地産地消にはいろいろなメリットがあります。例えば、送電のロスが少ないこと、災害時に独立した電源を確保できること、地域の産業が活性化することなどです。また特に離島では、島周辺に賦存する海洋再生可能エネルギーを活用することで、本土に比べて輸送コストの高い燃料の消費を減らすことができます。

海洋再生可能エネルギーを地元で消費する実証実験が、2016年より岩手県久慈市で行われました。漁港の防波堤の前面に43kWの発電能力を持つ波力発電装



図2 小規模・小型・分散型エネルギーを組み合わせ、導入した漁港のイメージ  
出典：一般財団法人 東京水産振興会「漁村・漁港地域への再生可能エネルギー導入に関するハンドブック」

置が設置され、発電された電力の一部を地元の漁港の漁業施設に供給する計画です。これは、文部科学省の震災復興プロジェクトの一環で、被災地の産業育成のため、装置は地元の造船所が製造しています。

また、海洋再生可能エネルギーを含めたさまざまな電源を組み合わせ、蓄電池を活用して漁港に供給する研究も行われています(図2)。

## 漁業との協調

今後、海洋再生可能エネルギーの利用を発展させるためには、社会的な課題にも取り組む必要があります。海洋では漁業や海運といった既存の産業が営まれており、これらを見捨てて発電装置を設置することはできません。特に我が国は世界有数の水産国であり、沿岸にはくまなく漁業の操業実績があります。漁業との海面利用の調整を行うことは不可欠といえます。海洋で、海洋再生可能エネルギー利用と漁業が共存共栄する方法を考えていくことが重要です。以下に、漁業と協調した海洋再生可能エネルギー利用の取り組み事例を紹介します。

●環境省「浮体式洋上風力発電実証事業」における取り組み…先に紹介した長崎県五島市杵島沖合の実証実験では、地元漁業者の協力を得て、風車周辺の海域の漁獲試験が行われています。これは、風車の基礎部分が魚礁の効果を果たしていることを確認するためです。ダイバーによる潜水調査では、風車の水中部分にサンゴの仲間をはじめ多種多様な生物が確認されており、

漁獲対象となる魚も見られました。また、風車近傍の海域に浮魚礁が設置され、洋上風車が設置された海域を新しい漁場として活用しようとする試みがなされています。

●経済産業省「福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」における取り組み…福島県沖合の水深約120mの海域には、経済産業省が2016年までに異なる発電容量の洋上風車3基(2MW、5MW、7MW)と、浮体式の変電所(サブステーション)を設置しました。この実証研究事業では漁業との共存に向けた取り組みの一環として、海洋観測データの配信が行われています。浮体サブステーションでは水温、塩分、放射線量が、2MWの洋上風車では風向、風速が観測され、配信されています。海洋データは漁場の推定や、出漁の判断、漁具の投入方向の判断などに役立てられています。

●岩手県洋野町における取り組み…岩手県洋野町では、地域活性化のため洋上ウィンドファームを誘致しようという構想があります。2011年に導入可能性調査が行われ、この結果をもとに2013年に岩手県の調査事業として漁業協調型洋上ウィンドファームの机上検討が行われています。この検討では、洋野町沿岸の5つの漁業協同組合の関係者を招いた意見交換会が計3回開催され、漁業者からの要望を反映させた「漁業協調型洋上ウィンドファーム」のイメージが作成されました(図3)。漁業者から、アワビやウニなどの密漁を監視する監視カメラを洋上風車の基礎に設置することや、資源を増やすための魚礁の設置、アワビやウニのエサとなる藻類の養殖などが要望されました。

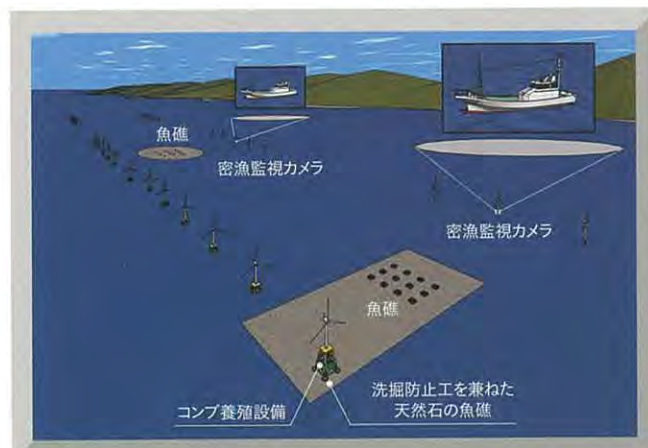


図3 岩手県洋野町における漁業協調型洋上ウィンドファームケーススタディ  
出典：岩手県「海洋再生可能エネルギー導入による漁業海域影響調査」報告書