

海洋資源利用に関する基礎調査

海洋開発研究領域 海洋資源利用研究グループ *大川 豊、高井 隆三、矢後 清和

1. はじめに

これまでの旧海洋開発工学部においては、浮体構造物の性能という面から研究を取り扱ってきたが、「海洋資源利用研究グループ」発足に当たり、海洋資源利用という面から研究を見直す必要が出てきた。そこで、今後の研究の方向を定めるために、海洋資源利用に関する総括的な基礎調査を行うことにした。

海洋で利用できる資源としては、海洋で生ずる自然エネルギー、海洋生物資源、海中・海底の鉱物資源等がある。これらを全てエネルギー資源ととらえると、前2者は再生可能なエネルギー、後者は非再生エネルギーと言うこともできる。初年度は、主として自然エネルギーを利用した各種の発電技術について調査した。

利用可能な海洋エネルギーには、風、波、海流、潮汐・潮流力、温度差、濃度差などがある。まずそれらの利用可能なエネルギーとしての賦存量、密度について比較考察する。しかる後、賦存量は多いがエネルギー密度は圧倒的に薄いと言われるこれらのエネルギー利用の現状と、化石燃料枯渇や地球温暖化という今日の状況から見た利用法の展望を概観する。

2. 自然エネルギーの起源

再生可能な自然エネルギーはすべて太陽にその起源を持つと言ってよい。海流は地球の自転と関係し、潮汐は月の引力も関係するが、それ以外は太陽からのエネルギーによって起こっている。今後、エネルギーの問題を考える上で基礎となる知識と思われるので、参考文献 1)等からの引用で概説する。

太陽から地球に届く放射エネルギーは、地球の大気圏外において太陽光に垂直な面に 1.37kW/m^2 の密度を持っている。これは太陽定数と言われている。これに地球の断面積をかければ大気圏外に

到達する太陽エネルギーの総量、 $175 \times 10^{12}\text{kW}$ となる。このエネルギーは大気圏内に入る前に、その 30 % ($53 \times 10^{12}\text{kW}$) を反射によって失う。残り 70 % ($122 \times 10^{12}\text{kW}$) が大気圏内に入るが、そのうちの 67 % ($82 \times 10^{12}\text{kW}$) が大気、地表面、海面に吸収されて熱に変換され、33 % ($40 \times 10^{12}\text{kW}$) が蒸発、対流、降雨、流水からなる流体循環を形成するためのエネルギーとして費やされ则认为られている。海流や波浪に変換されるエネルギー量は $0.37 \times 10^{12}\text{kW}$ 、光合成に寄与する分は $0.04 \times 10^{12}\text{kW}$ と推定されている。これらは大気圏内に入るエネルギーの 0.3 %、0.03 % にすぎない。

一方、地表面に到達する平均日射量は、散乱光も含めて 165W/m^2 とされている。これに地球の表面積をかけると $84 \times 10^{12}\text{kW}$ となり、大気、地表面、海面に吸収されて熱に変わるエネルギーにほぼ等しいことがわかる。

次に、このエネルギーを年間で積算すると、 $74 \times 10^{16}\text{kWh}$ が得られる。2000 年の世界の一次エネルギー消費量は石油換算で 91.79 億トンと報告されている。これを kWh に換算すると、 $106 \times 16^{12}\text{kWh}$ となる。すなわち、地球に吸収される太陽エネルギーは、世界で消費されるエネルギーの約 7,000 倍ということである。

3. 海洋エネルギーの賦存量

海洋エネルギーの利用を考えると、その賦存量について概観しておく必要がある。賦存量は多くの場合エネルギーを取り出す原理から見た潜在エネルギー量である。その見積もり方は、利用方法毎に異なっている。そのうちのどの位の量がエネルギーとして利用できるかは全く別問題であり、更に実際にエネルギーを取り出すときには、装置の変換効率がかかってくる。以下に、個々の利用方法毎に、これまでに言われている賦存量の推定値について述べる。

3.1 海流^{1), 4)}

流れに垂直な鉛直断面 1 m^2 を通過する海流の運動エネルギー密度は

$$W = (1/2) \rho v^3 \times 10^{-3} \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (3.1)$$

で表される。海流の平均速度 v と断面積がわかれば運動エネルギーが求められる。例えば、平均流速を 1 m/s とすると、 $W = 500 \text{ W/m}^2$ となるので、これに流れの断面積をかければよい。こうして求めた黒潮の持つ運動エネルギーは $1.5 \times 10^7 \text{ kW}$ があるとされている。全世界の海流エネルギーは $5 \times 10^7 \text{ kW}$ 程度と見積もられている。

3.2 波浪^{1), 3), 4)}

海面上の単位幅を単位時間に通過する波のエネルギー流束は

$$P = (\rho g^2 / 32 \pi) H^2 T \quad H^2 T \text{ [kW/m]} \quad (3.2)$$

で表される。ここで、 $T[\text{s}]$ は波周期、 $H[\text{m}]$ は波高である。有義波高 $H_s[\text{m}]$ とゼロ・アップ・クロス周期の平均値 $T_z[\text{s}]$ を用いると、次のように書き換えられる。

$$P = 0.55 H_s^2 T_z \quad (3.3)$$

この波エネルギー流束の大きさは地域によってかなり差がある。スコットランドやアイルランドの西海岸では $70 \sim 90 \text{ kW}$ とされているが、日本周辺の平均値は $7 \sim 10 \text{ kW}$ と 1 桁小さい。これを海岸線に沿って積分すれば波浪エネルギーの賦存量が求められる。全世界では $2.7 \times 10^9 \text{ kW}$ 、日本では $3.6 \times 10^7 \text{ kW}$ と見積もられている。

3.3 潮汐・潮流^{1), 4)}

地球全体の潮汐エネルギーの量は約 $3 \times 10^9 \text{ kW}$ であるが、そのうち利用可能な量は $1 \sim 2 \%$ 程度と言われている。潮汐は太陽と月の引力に起因するものであるため、規則性がはっきりしている。利用法も、位置エネルギーを直接利用する方法と、位置エネルギーが運動エネルギーに変換されるときに生ずる潮流のエネルギーを利用する方法がある。前者は湾口に貯水池やダムなどを建設して利用し、後者は海峡を利用する。当然の事ながら潮位差が大きいことが条件になる。世界では潮位差 5 m を越える湾がいくつかあるが、日本では有明海の 4.5 m が最大であり、潮汐エネルギーに恵まれているとは言い難い。日本ではむしろ鳴門海峡や来島海峡などの海峡における潮流エネルギーの

利用が考えられており、その賦存量は $2.5 \times 10^7 \text{ kW}$ と推定されている。

3.4 海洋温度差^{1), 3), 5)}

海洋温度差発電におけるエネルギー賦存量の推定は非常に難しく、これまでに示されているものにも大きな幅がある。一番大きな値を出しているのは、2. で述べた太陽からの入射光で海面に吸収されるエネルギーの 2% を海洋温度差発電で利用できるとするもので、全世界で $1.1 \times 10^{12} \text{ kW}$ 、日本の経済水域内で $1.14 \times 10^{10} \text{ kW}$ としている。

アメリカの C. Zener は、水温変化が 1°C まで許されるとすると、赤道を挟む南北 20° の範囲内の海洋帯から $6 \times 10^{10} \text{ kW}$ の電力が得られると述べている。また、W. H. Avery は、 1°F の水温下降を許せば、同じような赤道中心のベルト地帯から 10^{10} kW の発電が可能と述べている。

それに対し G. L. Wick らは、連続的に利用可能な海洋熱エネルギー量は、全蓄積熱エネルギー量を海水が循環によって入れ替わるのに要する時間で割った値であるとし、その時間を $1,000$ 年として再生可能な熱エネルギー量を推定した。これより平均的なカルノー効率を 4% と仮定して、電力として取り出しうる利用可能エネルギー量が、 $2 \times 10^{10} \text{ kW}$ であることを示した。

3.5 風力^{3), 6)}

風力エネルギーの利用は陸上ではすでに実用化しており、欧米では急激な勢いで洋上展開が進んでいる。

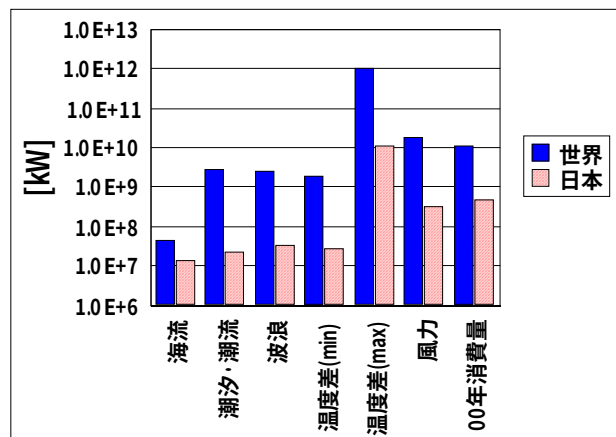
日本における風力資源については、NEDO により 8 年間にわたって実施された風況観測の結果、陸上についてはかなり明らかになっている。これを用いて、設置可能な場所に適当な配置で具体的な風車を設置した場合の利用可能エネルギーを、 $2.5 \times 10^7 \text{ kW}$ と推定している。海上での風況観測はほとんど行われていないが、陸上の 1.4 倍以上の可能性があると研究がある。

3.6 賦存量のまとめ

以上、賦存量の推定方法も意味もまちまちであるが、各利用法に対する目安として比較すると、図-1 のようになる。

一色²⁾ は、従来のエネルギー資源の確認埋蔵量と 1 年間に利用できる自然エネルギーの量につ

いての比較を行っている。また、エネルギー密度に関する比較として、図－2を示している。これらの図から、エネルギー資源としては多量に存在するが、その密度は極めて薄いということが確認できる。



図－1 海洋の自然エネルギー賦存量

4. 海洋エネルギー利用の現状

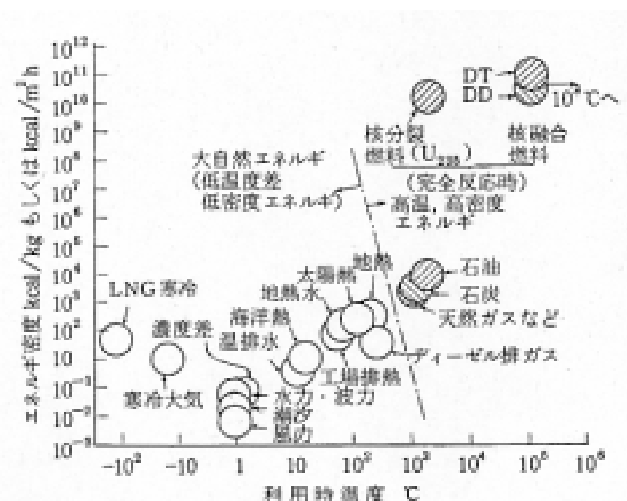
4.1 海流

海流発電についてはいくつかの方法は提案されているが、実際に大規模な実験が行われたことはない。

4.2 波浪

波浪発電は極めて小規模(30 ～ 60W)なものではあるが、航路標識灯用で実用的に使われている。最近、イギリスで『LIMPET』(Land Installed Marine Powered Energy Transformer)という波力発電システム(500kW)が開発され、実用に供されるようになった。

研究開発は70年代から世界でも活発に行われ、実機実験も数多く行われた。表－1に日本で行わ



図－2 エネルギー密度の比較²⁾

れた実機実験を示す。しかしながら、これらは実験機で終了し、その後実機まで発展したものはない。

4.3 潮汐・潮流

潮汐、は風力以外の海洋エネルギー利用の中で唯一大規模な実用発電所が成立しているものである。フランスのランス発電所は、最大潮位差 13.5 mのランス河口にダムを築いて 10MW の水車 24 台、24 万 kW の設備容量を持っている。

日本では鳴門海峡や来島海峡で小規模な潮流発電の実験が行われたことがある。最近のニュースでは、明石海峡航路に潮流発電式灯浮標が設置されたということである。

4.4 海洋温度差

海洋温度差発電は自然エネルギー利用では唯一変動性が少なく、昼夜・天候を問わずに安定した発電が可能である。日本では 1970 年代後半にサンシャイン計画の中で大規模な検討がなされた。

表－1 日本で行われた波浪発電の実験

波浪発電名称	発電効率(%)			定格出力(kW)	設置場所	設置期間	実験主体
	一次	二次	総合				
海明 (第1次)	4.3	50～60	約 3	125kW×8基	山形県由良沖	1978-1980	海洋科学技術センター
振り子式波浪エネルギー吸収装置		約 50	20～25	8kW	北海道室蘭港外防波堤	1983-1985	室蘭工業大学
沿岸固定式波力発電システム		50以上		40kW	山形県三瀬海岸	1983-1984	新技術開発事業団
海陽				10kW	沖縄県西表島	1984-1986	日本造船振興財団
海明 (第2次)	約 11	約 25	約 3	125kW×3基 60kW×1基	山形県由良沖	1985-1986	海洋科学技術センター
定圧化タンク方式波力発電システム				30kW	千葉県九十九里浜	1988-2000	エンジニアリング振興協会
防波堤型波力ケーソン	40 以下	30～40	10～30	60kW	山形県酒田港	1988-1991	第一港湾建設局
水弁集約式波力発電システム				130kW	福島県原町	1996-2000	東北電力
マイティホエール	33～35	40～50	15	30kW×2基 50kW, 10kW	三重県五ヶ所湾	1998-2002	海洋科学技術センター

表－２ OTECの実機実験と実証プラント					
温度差発電名称	洋・陸	出力	設置場所	設置期間	実験主体
Mini OTEC	洋	50kW(定格)、53.6kWの発電に成功	ハワイ	1979.06-1979.11	米国
OTEC-1	洋	発電器は取り付けず	ハワイ	1980.12-1981.04	米国
ナウルプラント	陸	100kW(定格)、120kWの発電に成功	ナウル島	1981.08-1982.08	東京電力
かいおう512t	洋	7.5kW(定格)、最大1.52kW	島根沖	1982.09.04-09.12	長崎大学
徳之島プラント	陸	50kW(定格)、ディーゼルの廃熱との組み合わせ	徳之島	1982.07-1984.09	九州電力
佐賀大プラント	陸	75kW(定格) プラント	伊万里	1985-	佐賀大学
豊洋	洋	3kW(定格)	富山湾	1989	工業技術院電機研
ハワイプラント	陸	210kW(定格)、オープンサイクル	ハワイ	1993	米国(HELH)
SAGA SHAKTHI	洋	1000kW(定格)	Tuticorin沖	2003-	インド

世界的にもこの頃から実機実験や実証プラントの運転が行われている。表－２にこれまでに行われた実機実験またはテストプラントを示す。最後のものはインドにおける実証プラントであるが、インド政府は海洋温度差発電を21世紀の主要エネルギーの一つと位置づけており、この実証プラントによる実験終了後も、50MW、100MWの実証プラントを建設する予定とのことである。

4.5 風力

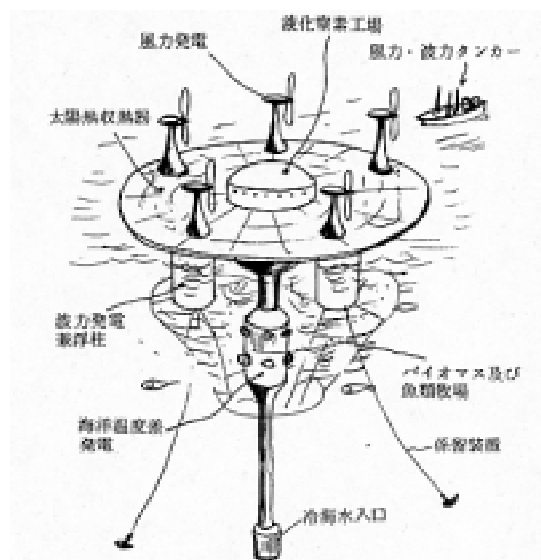
日本における洋上への展開はまだなく、ようやく港湾地域への建設が始まったところである。現段階では、2010年までの風力エネルギー利用の目標である設備容量300万kWの達成は陸上だけでは困難と考えられており、洋上への展開は必至である。更に先のことを考えれば、浮体式の大規模ウィンドファームの開発は必然である。

5. 海洋エネルギー利用の方向性

化石燃料からのCO₂排出が一因と考えられている地球温暖化問題や、いずれは化石燃料は枯渇するということを考えると、再生可能な海洋エネルギーの利用を進めるのは当然の方向である。しかしながら、賦存量は大きいが密度が薄いうえ、海洋温度差発電を除いては変動性が大きく、極めて扱いにくいエネルギーであることも確かである。また、陸から離れた海洋で得たエネルギーをどのように利用するかという問題もある。それ故、実際に利用しようとするコスト高になり、とても従来のエネルギーには太刀打ちできないのが現状である。そこで出てくるのは、いろいろなエネルギーを複合的に利用するという事と、得たエネルギーを化学エネルギーに変換して輸送するという考えである。これらは、エネルギー危機が言われ、省エネルギーや代替エネルギーの研究が盛んになった1970年代から既に言われていたことで

ある。例えば、文献2)には図－3の様な構想が描かれている。また、文献5)でも、水素、アンモニア等の製造や海中溶存ウラン採取システムなどの検討が行

われている。燃料電池の実用化の目途が立ってきた今日、最終的には水素エネルギーへの変換がターゲットになるものと思われる。これらのコスト試算は非常に難しいと思われるが、概略でもそれを示す事が、海洋エネルギー利用の促進に繋がるものと考えている。



図－3 海洋エネルギー複合利用の構想²⁾

参考文献

- 1) 本間琢也、黒木俊郎、梶川武信：海洋エネルギー読本、オーム社、1980年
- 2) 一色尚次：海洋エネルギー、日本船舶機関学会誌(海洋機器特集号) Vol10, No.3, 1981
- 3) 牛山 泉 他：風と太陽と海－さわやかな自然エネルギー、コロナ社、2001年9月
- 4) 高石敬史 他：「海洋エネルギー利用」特集、日本造船学会誌 No.637、1982年6月
- 5) (財)省エネルギーセンター：海洋温度差発電システムの研究(昭和53年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書)、1979年3月
- 6) 牛山 泉：風力発電の現状と展望、第24回海洋工学パネル、2001年7月