わが国沿岸の波エネルギー賦存量と平均波高, 平均周期の頻度分布

Estimation of Existing Wave Power of Japanese Coast, and Frequency Distribution of Mean Wave Height and Mean Wave Period

田中博通¹・山梨 温²・居波智也³

Hiromichi TANAKA, On YAMANASHI and Tomoya INAMI

When developing wave power generation, in order to calculate electric power from the existing wave power and wave energy of the Japanese coast, it is important to grasp the characteristic of a wave. This research has grasped the amount of annual wave energy of the Japanese coast based on the annual data of the Nationwide Ocean Wave Information Network for Ports and Harbors (NOWPHAS). Moreover, frequency distribution of the average wave quantity for 20 minutes of NOWPHAS and an average periods is created, comparison with distribution of the past, such as Rayleigh distribution, is performed, and the concept of still newer frequency distribution is proposed.

1. はじめに

日本沿岸の波エネルギーの賦存量は, 全国平均で 6MW/m と推測されているが (高橋・安達, 1986), この波エネルギーはわが国においてほとんど利活用されていないのが現状である。わが国における波力発電は, 1977 年から世界に先駆けて実験船「海明」(益田, 1987) で実証試験が行われ, その後数々の実証試験が行われたが (田中, 2009a), いまだ実用化に至っていない。一方, 欧米諸国においては 2000 年以降, 欧州委員会の地球温暖化対策としての再生可能エネルギー利用を基本においた政策に支えられ, 様々なタイプの波力発電が開発されている (田中, 2009a)。わが国でも, エネルギー基本計画と海洋基本法の見直しの中で海洋エネルギーの研究開発と実用化が推進されている。

波力発電は, 波エネルギーを電気エネルギーに変換する方式から 8 種類に大別されるが (EMEC), 著者が現在開発しているタイプは越波式に属する (田中ら, 2009b; 田中, 2013)。越波式波力発電の原理は, 図-1 に示すように波が斜面を遡上することにより波エネルギーが位置エネルギーに変換され, 貯水槽水位と周囲海域の水位差によって生じる流水エネルギーをプロペラが受けるトルクにより発電機で発電する方式である。したがって, 設置海域の波エネルギー賦存量を把握した上で, いかに多くの越波量を得るかが最も重要な要素となる。現在開発している越波式波力発電装置は, 波高頻度分布を考慮した多段式である。よって, 設置地点の年間の波高と周期の頻度分布を推定することが必要となる。

本研究では, 全国港湾波浪情報網 (NOWPHAS) の年

間データを基にわが国沿岸の年間波エネルギー賦存量を把握し, 発電効率を仮定して発電量の試算をするとともに, NOWPHAS の 20 分間の平均波高と平均周期の頻度分布を作成し, Rayleigh 分布などの既往の分布との比較を行い, さらに新たな頻度分布の概念を提案することを目的とした。発電装置設置地点の波浪特性を把握することによって, その地点における波エネルギーを活かす越波式波力発電装置の形状を定められることから各地の波エネルギーの算出は有用である。また, 波高と周期の頻度分布は, 海洋波浪に関する研究の黎明期に Longuet-Higgins (1952), Puts (1952), Bretschneider (1959) らにより実測値を基に研究され, 多くの知見が得られているが, 越波式波力発電装置を設計するために, より観測データに即した簡便な頻度分布が必要となることから今回の研究を行った。

2. わが国沿岸の波エネルギー賦存量

(1) 年間波エネルギーの求め方

全国の波エネルギーの算定は, 全国に 63 箇所の波浪観測所を有する全国港湾波浪情報網 (NOWPHAS) の 2008 年観測データのうち, 欠損データの少ない 61 箇所について算定した。NOWPHAS の公開している波高・周期別出現頻度統計は 2 時間ごとの観測データである。2 時間ごと

図-1 越波式波力発電の概要図

1 正会員 工博 東海大学教授海洋学部環境社会学科
2 学生会員 修(工) 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻
3 修(工) 東海大学特定研究員

の有義波高 ($H_{1/3}$) と有義波周期 ($T_{1/3}$) を用いて Bretschneider-光易スペクトルから求められる不規則波の波エネルギー式である次式から単位幅当たりの波パワー (P_w) を求めた。

$$P_w = 0.441 H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (\text{kW/m}) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

なお、波高・周期別出現頻度統計は、データ収録間隔が2時間ごと、波高階級は2.0mまで0.25m間隔で2m以上は0.5m間隔、周期間隔は2sごとになっている。各階級の平均有義波高 ($H_{1/3}$) は階級の中間値とし、その階級の有義波高に対する平均有義波周期 ($T_{1/3}$) は、各階級の中心周期にその周期階級のデータ数を掛けて総和をとり、波高階級のデータ総数で割ることで重みを考慮した平均有義波周期とした。また、求めた各波高階級の平均有義波高と平均有義周期から式 (1) よりその階級の波エネルギーを算定し、その波高階級の総波データ数を掛けることで各波高階級の波エネルギーとし、同様の計算を各階級で行い、その総和が表-1に示す観測地点のデータ総数による年間波エネルギーである。観測データに欠損があることから、データ取得率を考慮するために総波エネルギーをデータ総数で除した1データ当たりの波エネルギーに24時間と366日を掛けて年間波パワーを求めた。この値が、表-1に示す年間波エネルギーである。

(2) わが国沿岸の年間波エネルギー賦存量分布

日本各地における年間波エネルギー賦存量を図-2に示す。今回算定した年間波エネルギーについて、地方ごとの特徴について述べる。

北海道地方の全ての観測所において、年間波エネルギー量が20,000kWh/m以上である。中でも日本海に面する瀬棚観測所は60,000kWh/mを超えていた。東北地方では、ほぼ全ての観測所の年間波エネルギー量が30,000kWh/mを超え、日本海側では40,000kWh/mを超える観測所が多い。中でも深浦、酒田観測所は80,000kWh/mを超える。なお、青森観測所は内湾であるため1500kWh/mと小さい。関東地方は、常陸那珂観測所および波浮観測所の年間波エネルギー量は70,000kWh/mを超えている。なお、アスカ島観測所および第二海堡観測所の値は10,000kWh/m以下であった。中部地方の日本海側では、年間波エネルギー量が50,000kWh/mを超える観測所が多くみられる。ただし、内湾の伏木富山観測所および敦賀観測所は10,000kWh/m以下であった。太平洋側では下田観測所および御前崎観測所は18,000kWh/mを超えている。なお、清水観測所は10,000kWh/m以下であった。近畿地方の日本海側の柴山観測所における年間波エネルギー量は60,000kWh/mを超えているが、港内に設置された柴山港内観測所は10,000kWh/m以下であった。太平洋側の潮岬観測所は30,000kWh/mを超えている。なお、内湾の伊勢湾観測所および神戸観測所は10,000kWh/m以下であっ

表-1 観測値と年間波エネルギー (2008年)

地名	年間有義波高 (m)	年間有義波周期 (s)	データ数	欠測データ数	年間観測率 および欠測月	データ総数による年間波エネルギー (kWh/m)	1データ当たりの波エネルギー (kWh/m)	年間波エネルギー (kWh/m)
留萌	0.98	5.3	4340	52	98.8%	51,452	5.93	52,068
石狩新港	0.81	4.6	4337	55	98.7%	31,396	3.62	31,794
潮棚	1.07	5.6	4329	63	98.6%	61,086	7.06	61,975
青森	0.30	3.7	4355	37	99.2%	1,526	0.18	1,539
深浦	1.16	5.7	4378	14	99.7%	79,912	9.13	80,168
秋田	0.86	5.2	3515	877	80.0% 1~2月欠測	43,824	5.44	47,786
酒田	1.17	5.8	4387	5	99.9%	85,668	9.76	85,766
新潟津	0.96	5.4	3989	403	90.8%	44,862	5.62	49,394
直江津	0.95	5.4	4304	88	98.0%	50,388	5.85	51,418
富山	0.49	5.0	4391	1	100.0%	20,100	2.29	20,105
伏木富山	0.40	5.0	4009	383	91.3%	7,004	0.87	7,673
輪島	1.15	5.8	4267	125	97.2%	68,386	8.01	70,389
金沢	1.07	5.7	4285	107	97.6%	60,954	7.11	62,476
福井	1.06	5.9	4383	9	99.8%	60,746	6.93	60,871
敦賀	0.22	5.1	4352	40	99.1%	1,470	0.17	1,484
柴山	1.08	6.0	4292	100	97.7%	60,652	7.07	62,065
柴山港内	0.34	5.8	4392	0	100.0%	4,788	0.55	4,788
鳥取	1.04	5.9	2418	1974	55.10% 8~12月	30,120	6.23	54,709
境港	0.36	4.6	4145	247	94.4%	3,328	0.40	3,526
浜田	1.08	5.9	4389	3	99.9%	52,590	5.99	52,626
藍島	0.62	4.7	4379	13	99.7%	12,650	1.44	12,688
玄界灘	0.92	5.4	3904	488	88.9% 12月欠測	29,486	3.78	33,172
伊王島	0.56	5.3	4278	114	97.4%	10,448	1.22	10,726
熊本	0.15	3.7	4383	9	99.8%	478	0.05	479
名瀬	1.14	6.6	4387	5	99.9%	57,646	6.57	57,712
那覇	0.95	6.4	4356	36	99.2%	42,078	4.83	42,426
紋別 (南)	0.73	5.9	3934	458	89.6%	25,224	3.21	28,161
釧路	0.98	7.1	4374	18	99.6%	34,976	4.00	35,120
十勝	0.94	7.5	4361	31	99.3%	37,182	4.26	37,446
苫小牧	0.73	6.9	4343	49	98.9%	21,030	2.42	21,267
むつ小川原	1.09	7.6	4384	8	99.8%	52,244	5.96	52,339
八戸	0.97	7.4	4391	1	100.0%	42,826	4.88	42,836
久慈	1.22	7.8	4101	291	93.4%	59,908	7.30	64,159
宮古	0.55	6.9	4344	48	98.9%	11,740	1.35	11,870
金石	0.90	7.8	4085	307	93.0%	35,328	4.32	37,983
石巻	0.64	6.9	4390	2	100.0%	14,150	1.61	14,156
仙台新港	0.79	8.3	4390	2	100.0%	28,404	3.24	28,417
相馬	1.00	8.5	4388	4	99.9%	46,766	5.33	46,809
小名浜	1.13	8.0	4359	33	99.2%	56,720	6.51	57,149
常陸那珂	1.32	7.7	4111	281	93.6%	69,422	8.44	74,167
鹿島	1.24	7.0	100	4292	2.28% 2~12月欠測	1,098	5.49	48,224
第二海堡	0.38	3.6	4365	27	99.4%	2,446	0.28	2,461
アスカ島	0.46	4.5	4354	38	99.1%	4,786	0.55	4,828
波浮	1.43	7.3	4364	28	99.4%	77,024	8.82	77,518
下田	0.85	7.2	3225	1167	73.4%	20,946	3.25	28,526
清水	0.41	6.0	4281	111	97.5%	5,088	0.59	5,220
御前崎	0.80	6.2	3951	441	90.0%	17,121	2.17	19,032
伊勢湾	0.31	3.7	4391	1	100.0%	1,326	0.15	1,326
潮岬	1.03	7.3	4382	10	99.8%	38,510	4.39	38,598
神戸	0.28	3.4	4391	1	100.0%	1,232	0.14	1,232
小松島	0.36	5.0	3703	689	84.31% 2月欠測	2,600	0.35	3,084
室津	0.66	6.8	4385	7	99.8%	16,224	1.85	16,250
高知	0.62	7.2	4342	50	98.9%	15,152	1.74	15,326
上川口	0.61	7.7	4389	3	99.9%	16,108	1.84	16,119
苅田	0.28	3.0	4372	20	99.5%	1,056	0.12	1,061
細島	0.93	7.3	4284	108	97.5%	37,058	4.33	37,992
志布志湾	0.53	6.8	4210	182	95.9%	9,140	1.09	9,535
鹿児島	0.16	3.5	3744	648	85.25% 2月欠測	54	0.01	63
中城湾	0.99	7.3	4378	14	99.7%	36,668	4.19	36,785
平良沖	0.65	6.0	1545	2847	35.18% 7~12月欠測	6,442	2.08	18,313
石垣沖	0.43	5.0	3623	769	82.49% 8月欠測	5,056	0.70	6,129

図-2 日本全国の年間波エネルギー量

た。中国地方では、鳥取観測所および浜田観測所における年間波エネルギー量は5,000kWh/mを超えている。なお、境港観測所は10,000kWh/m以下であった。四国地方の多くの観測所の年間波エネルギー量が15,000kWh/m以上であったが、小松島観測所は10,000kWh/m以下であった。九州地方の日本海側の玄界灘観測所における年間波エネルギー量は30,000kWh/mを超えているが、藍島観測所および伊王島観測所では15,000kWh/m以下であった。太平洋側では細島観測所のみ35,000kWh/mを超えている。その他の観測所は10,000kWh/m以下であった。沖縄・奄美地方では、石垣沖観測所における年間波エネルギー量は10,000kWh/m以下であったが、それ以外の観測所は20,000kWh/m以上であった。

総じて日本海側の観測所において波エネルギーが大きい地点が多くみられる。また、東北地方では日本海側、太平洋側とも波エネルギー賦存量は多く、日本海側の年間波エネルギー量の平均は71,240kWh/mであり、太平洋側では37,321kWh/mであった。

(3) 年間波エネルギー賦存量の推移

各観測所における2001～2010年までの年間波エネルギー量の推移を示した一例を図-3に示す。波エネルギー量は式(1)に示すように有義波高の2乗と有義波周期の積によって計算するため、突出した年間波エネルギー量が生じた年は、台風等気象変化による高波高、長周期の波の発生に起因していると考えられるが、それらの波を考慮すれば波エネルギーには地域性があるものの長期にわたってはほぼ一定であると言える。しかし、釜石観測所における2004年の年間波エネルギー量の低下は、波高階級100cm以下の波が出現する割合は2004年では84%、2005年には69%と差があり、波高階級101～200cmの波が出現する割合は2004年が13%であり、2005年は27%である。このような差が年間波エネルギー量の差に起因していると考えられる。

図-3 北海道・東北地方の年間波エネルギー量の推移

波力発電を設置する際に必要となる条件は、構造的に安全であること、発電コスト、安定して電力が得られることである。構造的な問題は既往の海洋構造物建設の技術があり、建設コストはおもに建設費と維持管理費に係る。図-3より、年間を通してほぼ一定の波エネルギーが期待できることから、ほぼ一定の電力が得られるものと考えられる。図-3より、酒田の年間波エネルギーを約90,000kWh/mとし、稼働率95%、発電効率15%と仮定すると年間12,825kWh/mの電力が得られることがわかる。

3. 平均波高、平均周期の頻度分布

著者ら(田中, 2010)は、不規則波の場合、斜面板の勾配が20°の時が最も高く波が打ちあがることを示した(田中, 2010)。また、越波量も斜面板の勾配が20°の時が最も多く得られることを示した(田中, 2013)。多段型越波式波力発電装置の越波量を推定するためには、設置地点の波高と周期の頻度分布を知ることが重要である。そこで、2005年～2010年の20分ごとのNOWPHASデータの平均波高(H)と平均周期(T)の頻度分布を12観測所について作成し、それぞれの頻度分布関数について考察した。一般的に、波高、周期の頻度分布の研究は、生の波形データを対象とするものであるが、ここでは越波式波力発電の越波量を推定することを目的とすることから、20分ごとの平均波高と平均周期に関する頻度分布について考察することは意義あるものとする。

(1) 平均波高の頻度分布

20分ごとの平均波高(H)と年間平均波高(H_m)の波高比(H/H_m)の区切りを0.25とし、それぞれの区切り間のデータ数を求めて頻度分布を作成した。Longuet-Higgins(1952)は、海洋波の波高の頻度分布を式(2)に示す一般的なRayleigh分布とした。

$$p\left(\frac{H}{H_m}\right) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{H_m} \exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H_m}\right)^2\right\} \dots\dots\dots (2)$$

図-4に示す御前崎観測所(2006年)の実測値の頻度分布と式(2)を比較すると、最も重要なピーク値に差が生じた。分布形状の傾向は良いものと考えられるので、波高の頻度分布はRayleigh分布として、分布の係数について以下考察する。

図-4 年間平均波高 (H_m) と標準偏差 (σ) との関係 図-5 $p(H/H_m)$ の分布と Rayleigh 分布 (御前崎 2006 年)

不規則現象の確率密度関数は、ほぼ平均値を中心とした対称または非対称の関数形となり、統計量の標準偏差 (σ) と分布のモーメント (m_i) の値により歪んだ関数形状となる。ここでは、標準偏差に着目して、20分ごとの平均波高の頻度分布を求めることとする。

12観測所の年間平均波高と標準偏差を図-4に示す。この図より、年間平均波高が大きくなれば標準偏差も大きくなる傾向があることが分かる。久慈、小名浜と波浮観測所だけ他の9観測所と異なる傾向となった。図-4に久慈、小名浜と波浮観測所を除いて求めた式(3)で表される関係式を併記した。

$$\sigma = 1.030H_m - 0.138 \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、連続観測した100波前後の海洋波浪から求めた Putz (1952), Longuet-Higgins (1952), Bretschneider (1959) の平均波高と標準偏差の関係式を m 単位に換算した式は、

それぞれ式(4)、式(5)、式(6)である。

$$\sigma = 1.621H_m + 0.394 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma = 1.716H_m \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma = 1.716H_m \quad \dots\dots\dots (6)$$

当然ながら、連続観測した海洋波の統計量と20分ごとの平均波高を基に処理した統計量では傾向が異なるが、図-4に示す関係から、年間平均波高と平均波高の標準偏差は関係があることが分かる。

そこで、年間平均波高と標準偏差の比を係数とした式(7)を用いて観測値の頻度分布と比較検討した。

$$p\left(\frac{H}{H_m}\right) = \left(\frac{H_m}{\sigma}\right)^2 \frac{H}{H_m} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{H_m}{\sigma}\right)^2 \left(\frac{H}{H_m}\right)^2\right\} \quad \dots\dots (7)$$

図-5は、2006年の御前崎観測所の平均波高を年間平均波高の比で無次元化したときの頻度分布である。この図には式(2)と式(7)で算定したRayleigh分布を示してある。ピーク値は異なるが、式(7)は比較的観測値と一致している。他の観測所の平均波高の頻度分布も式(7)から求めた分布とよく一致した。

(2) 平均周期の頻度分布

20分ごとの平均周期 (T) と年間平均周期 (T_m) の周期比 (T/T_m) の区切りを0.20とし、それぞれの区切り間のデータ数を求めて頻度分布を作成した。平均周期の頻度分布を検討する前に、年間平均周期と標準偏差 (σ) との関係について論じることとする。

12観測所の年間平均周期と標準偏差を図-6に示す。この図より、年間平均周期と標準偏差との間には明確な関係がないことがわかる。

海洋波の周期の頻度分布に関する研究として、Bretschneider (1959) は式(8)を、岩垣ら (1975) は Weibull分布である式(9)を提案した。式(8)は4次の Weibull分布である。岩垣らの研究では、周期の平均値 (T_m) でなく周期の標準偏差を用いている。

$$p\left(\frac{T}{T_m}\right) = 2.7 \left(\frac{T}{T_m}\right)^3 \exp\left\{-0.675 \left(\frac{T}{T_m}\right)^4\right\} \quad \dots\dots (8)$$

$$p\left(\frac{T}{T_m}\right) = \beta m \left(\frac{T}{T_m}\right)^{m-1} \exp\left\{-\beta \left(\frac{T}{T_m}\right)^m\right\} \quad \dots\dots (9)$$

図-7に Weibull分布の形状母数 (m) を $m=2\sim6$ まで変化させて計算した分布を併記した。この図から、 $m=5$ の分布は観測値のピーク値とよく一致するが、頻度分布全体では $m=4$ の場合が観測値の頻度分布と一致する。この時の相関係数は0.955であった。今回は、12観測所の2005～2010年の20分ごとの平均周期の頻度分布が、図-7に示すように既知であることから、観測値の頻度分布のピーク値となる (T/T_m) p と β との関係式(10)より β を求めた。

$$\beta = \frac{m-1}{m} \frac{1}{(T/T_m)_p^m} \quad \dots\dots\dots (10)$$

観測値の頻度分布のピーク値から式(10)より β を求めたところ、留萌観測所の2009年の β 値を除き、年ごと

図-6 年間平均周期 (T_m) と標準偏差 (σ) との関係 図-7 $p(T/T_m)$ の分布と Bretschneider の分布、Weibull 分布比の較 (御前崎 2006 年)

の観測所の β 値にそれほどの変異はなかった。すなわち、各観測所の β 値はほぼ一定であるとみなすことができる。図-8 に Weibull 分布の周期の標準偏差 (σ_T) と年間平均周期 (T_m) との比と β との関係を示す。図より β は一定でなく、 σ_T/T_m に関係することがわかる。その関係式は、式 (11) となる。

$$\beta = 2.94\sigma_T/T_m + 0.406 \dots\dots\dots (11)$$

4. 結論

以下に主要な結論を述べる。

1) NOWPHAS の波浪観測データを基に 61 地点の年間波エネルギー量を算定した結果、東北地方の年間波エネルギーが 30,000kW/m を超え、特に日本海側では 40,000kW/m を超える観測所がある。稼働率 (95%)、発電効率 (15%) として年間発電量を求めると酒田では 12,800kW/m

図-8 Weibull 分布の β と σ_T/T_m の関係

となる。

2) 波高の頻度分布は、標準偏差を考慮した Rayleigh 分布 (式 (7)) で表すことができる。

3) 周期の頻度分布は、Weibull 分布 (式 (9)) の 4 次が観測値と一致する。また、各観測所の β は一定でなく、 σ_T/T_m に関係する式 (11) で求めることができる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B)) と独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「海洋エネルギー技術研究開発」による成果であることを付記し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 岩垣雄一・木村 晃 (1975)：不規則波浪の周期の確率特性に関する研究，第 22 回海岸工学講演会論文集，pp.295-300。
- 高橋重雄・安達 崇 (1989)：日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察，第 36 回海講演会論文集，pp.874-878。
- 田中博通・鈴木厚志・淀川巳之助 (2009a)：波力発電の現状と重力式 (越波型) 波力発電装置の開発，海洋開発論文集，第 25 巻，pp.359-364。
- 田中博通・鈴木厚志・淀川巳之助 (2009b)：沿岸 5 地点の波エネルギー賦存量と越波型波力発電装置の開発，第 21 回海洋工学シンポジウム講演論文集，日本海洋工学会，pp.1-6。
- 田中博通・淀川巳之助・鈴木厚志 (2010)：越波型波力発電装置開発に向けた波の打上げ特性に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66，No.2，pp.1271-1275。
- 田中博通 (2013)：波力発電の現状と将来展望，日本エネルギー学会誌，Vol.92，日本エネルギー学会，pp.241-247。
- 益田善雄 (1987)：日本の波力発電，霞出版社。
- Bretschneider, C. L. (1959): Wave Variability and Wave Spectra for Wind-generated Gravity Waves, Technical Memorandum No.118, Beach Erosion Board, Corps of Engineering, pp.1-192。
- EMEC: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
- Longuet-Higgins, M. S. (1952): On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Wave, J. of Marine Research, Vol.11, No.3, pp.245-266。
- Putz, R. R. (1952): Statistical Distribution for Ocean Waves, Trans. American Geophysical Union, Vol.33, No.5, pp.685-692。