潮流・海流発電に向けた津軽海峡の流況特性及び エネルギー賦存量に関する研究

A Study on Flow Characteristics and Energy Potential in Tsugaru Strait Toward Tide and Ocean Current Power Generation

本間翔希¹・宮武 誠²・猿渡亜由未³

Syoki HONMA, Makoto MIYATAKE and Ayumi SARUWATARI

The water current characteristics and energy potential in Tsugaru Strait were investigated through field observation and numerical simulation. Using an ADCP, time series of multilayer velocity were measured during 31 days. As a result, the flow of Tsugaru Strait in the direction of southeast accompanied by periodic variations is constructed by combining the southeastward residual current to the tidal current in the direction of northwest-southeast. The ocean and tidal current in this strait were analyzed using MITgcm. The energy potential distribution estimated from the analysis results indicates that the most appropriate location of power generation is around the side of Shimokita Peninsula coast waters.

1. はじめに

近年の海洋再生エネルギーに脚光が浴びている中、日本周辺海域における潮流や海流の流況特性やエネルギー賦存量を現地観測や数値解析により評価する研究が活発化している（井内ら，2011；小牧ら，2013）。新エネルギー・産業総合開発機構（NEDO）（2010）が推定した日本周辺海域における潮流に関するエネルギー賦存量によれば、津軽海峡は他の海域の中でも高く推移することが示されている。しかし、上記の検討は津軽海峡全域での流速の代表値を用いた概略値であり、実際に津軽海峡を流れる海流や潮流を利用して発電を行うにあたり、適地選定や計画策定するためには、津軽海峡を流れる海流・潮流のより詳細な流況特性を把握することが重要である。潮流・海流発電を念頭に置いた津軽海峡の流況特性やエネルギー賦存量の推定に関しては、既に数多くの研究が行われており、例えば、猿渡ら（2013）は非静水圧3次元モデルであるMIT General Circulation Model（MITgcm，例えばMarshallら，1997a, 1997b）を用いて、津軽海峡における潮流エネルギー・リソースに与える海流の影響を考察している。しかし、これらの研究は数値解析を主体とした検討に留まっており、実際に現地観測を行い、その結果に基づき潮流や海流の流況特性を検討した研究は少ない。

本研究は、既往の研究から津軽海峡内で比較的流れの

速い海域を選定し実施した流況観測から、観測期間中の恒流と潮流の流況特性について解明する。また、得られた観測結果に基づき、猿渡ら（2013）と同様な方針のもと、MITgcmによる津軽海峡の潮流と海流に関する数値計算を行い、その再現性及び妥当性を検証する。また、観測期間中における津軽海峡全域の流況特性を把握するとともに、その結果に基づき推定したエネルギー賦存量の平面分布の両面から、津軽海峡における潮流・海流発電の可能性について検討するものである。

2. 津軽海峡における流況に関する現地観測

潮流・海流発電を念頭に置いた津軽海峡の流況観測を実施するにあたり、比較的流速の速い沿岸域を既往の文献から把握する。猿渡・田島（2012）が行ったMITgcmによる津軽海峡の潮流最大流速分布によれば、津軽海峡で比較的流れの速い海域は、狭窄水路となる白神岬－竜飛崎間及び汐首岬－大間崎間になることが示されている。この結果に加え、将来的に発電装置を設置する水深を勘案して、本研究は図-1のSt.1に示す汐首岬沿岸海域（水深-25m地点）を対象として流況観測の位置を決定した。

観測は、2013/3/18～2013/4/18の31昼夜にわたり実施し、計測項目はADCP（超音波式ドップラー流速計）による多層流速・流向である。当該海域の水深を上層、中層、下層の3層に分割し、観測期間中の各層における流速・流向を測定した。流況観測の諸元を表-1に示す。流速・流向データはサンプリング間隔を1秒とし、20分間の連続計測を1時間間隔（定時）で行い収集した。

3. 観測期間中における津軽海峡の流況特性

図-2(a), (b) 及び (c) は、観測期間中に得られた上・

1 学生会員	函館工業高等専門学校専攻科環境システム工学専攻
2 正会員	博(工) 函館工業高等専門学校准教授社会基盤工学科
3 正会員	博(工) 北海道大学大学院工学研究院助教

図-1 流況観測位置 (等深線の単位: m)

表-1 流況観測の諸元

観測期間	函館市汐首岬沖合約800m (水深-25m) 北緯41°43'1.9" 東経140°56'30.7"
使用機器	2013年3月18日～2013年4月18日の31昼夜間
観測層	ADCP (超音波式ドップラー流速計) 発信周波数: 300kHz
測定間隔	上層: 海底から23.3m 中層: 海底から12.2m 下層: 海底から3.2m
測定時間	60分
サンプリング間隔	20分
観測位置	1秒

図-2 観測期間中における各層の流速ベクトル及び潮位の経時変化

中・下層における流速ベクトルの経時変化をそれぞれ示す。観測期間中における津軽海峡の流れは、流速・流向ともに水深方向にほぼ等しく分布し、図-1で示した等深線方向に沿って汐首岬に向かう南東方向の流れが、全層にわたり周期的な消長を伴いながら卓越する。観測期間中における南東方向の流向発生頻度は70%以上に達し、観測期間内で測定された最大流速も卓越流向と同じ南東方向で発生している。図-2(d)は、観測期間中における気象庁による日本海側(深浦)及び太平洋側(下北)の実測潮位の経時変化を示す。月齢により小潮となる図中Aの前後数日間は大潮となる図中Bの前後数日間に比較して、前述した南東方向に向かう流れの周期的な消長が大きくなる傾向にあり、特に南東方向の流れが弱まる時間帯の一部では、南東方向とは逆向きの北西方向へ転じる流れが生じている。この月齢による潮汐の変化は、津軽海峡の周期的な流れの変動に影響を及ぼしているものと推察される。

図-3は、上層で得られた北方流速及び東方流速にFFTによるスペクトル解析を行った結果を示す。パワースペクトルは周期10秒以下の高周波成分で多少変動するものの、12時間及び24時間周期で明確なピークを示す。このことから、前出の図-2で見られた南東方向に周期的な消長を伴う流れは、12時間もしくは24時間周期で変動することがわかる。また、この両者のパワースペクトルのピーク値を比較すると、12時間よりも24時間周期の方が大きくなることから、津軽海峡の流れは24時間周期の変動成分による流れに強く影響されていると考えられる。なお、この結果は、中層及び下層においても同様になることを確認している。

図-4(a)は、前出の図-2(d)で示した実測潮位において日本海側から太平洋側を差し引いた潮位差と各層における北方流速と東方流速の合成流速との相互相関をとったものを示す。各層の合成流速は潮位差に対して3時間ほど遅れて応答していることがわかる。図-4(b)は、こ

図-3 上層における北方及び東方流速のスペクトル解析結果

図-4 潮位差と合成流速の関係

図-5 各層における主要4分潮及びそれらと恒流を合成した潮流楕円

図-6 計算領域

の3時間遅れを考慮した潮位差と各層の合成流速の関係を示す。これより、太平洋側よりも日本海側の潮位が高くなり潮位差が大きくなると、合成流速は全層ともに大きくなる。このことから、日本海側と太平洋側で生じる潮位差が津軽海峡の各層で生じる流速に及ぼす影響は大きいものと推察される。

図-5は各層で得られた観測流速に調和分解を施し、主要4分潮及びそれらと恒流を合成した潮流楕円を示す。図中 (a)～(d) 中の●印で示す観測値による主要4分潮の潮流楕円はいずれも、北西－南東方向に長軸を有している。各分潮における潮流楕円の軌道長半径を比較すると、半日周期であるM2及びS2分潮よりも日周期であるK1及びO1分潮の方が大きくなり、これは前述したスペクトル解析で得た傾向に一致する。これより観測期間中における津軽海峡の流れは、北西-南東方向に長軸を有す

表-2 計算グリッドの諸元

計算領域	北緯 41° 11' 00" ～北緯 41° 50' 00" 東経 140° 00' 00" ～東経 141° 23' 00"
グリッド間隔	30" × 20" × 10.0-15.0m (Lon. × Lat. × Vert.)
時間ステップ	10秒

る日周潮による潮流の影響を強く受けることがわかる。また、この観測期間中に得られた恒流成分は全層ともに南東方向に作用する。そのため、図中 (e) に示す主要4分潮と恒流を合成した潮流楕円において、各分潮による北西方向の潮流は南東方向の恒流により打ち消され、その重心が原点から南東方向にシフトした結果、南東方向に向かって周期的に消長する流れが形成されるものと推察される。

4. MITgcmによる津軽海峡の流況解析

(1) 計算方法及び条件

観測期間における津軽海峡全域の流況特性を把握するため、圧縮性流体に対するNavier-Stokesの式を有限体積法により解法する非静水圧三次元流れモデルMITgcmを用いて再現計算を行った。計算領域は図-6に示す津軽海峡全域を包含する海域とし、計算グリッドの諸元を表-2に示す。計算は猿渡ら (2013) が行った方法と同様の方針のもと、日本海側及び太平洋側の境界には、海面高度

図-7 各ケースの上層における恒流流速ベクトル分布

測定衛星TOPEX/Poseidonの測定データによる調和解析とデータ同化を組み合わせることにより得られた全球海洋潮汐モデルTPXO7.2の解のうち主要8分潮 (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1) の潮流流速を補間して与えている。また、海流流速は海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が短期気候変動応用予測研究プログラムの中で計算された再解析データFRA-JCOPE2を流入境界条件として入力している。計算期間は、現地観測と同一とし、潮流のみを計算したcase1, 潮流と海流を同時に計算したcase2, 海流のみを対象としたcase3の3ケースを計算対象とした。

前出の図-5中に示す実線は、潮流と海流を同時に計算したcase2による主要4分潮及びそれらと恒流を合成した潮流楕円の計算値を示す。これより、本計算による潮流楕円は、K1分潮においてやや過小評価になるものの、各分潮及びそれらと恒流を合成した現地観測の潮流楕円を、ともに概ね良好な結果で再現する。

(2) 津軽海峡東部海域の流況特性

図-7は前出の図-6中の□で囲んだ津軽海峡東部海域に

おける恒流流速ベクトル分布を示す。図中 (a) に示す潮流のみ考慮したcase1の場合、流速は微小であり、潮汐残差流として津軽海峡東部海域を恒常的に流れる成分は小さいといえる。これに対し、図中 (b) の潮流と海流を考慮したcase2では、日本海側から北東方向に流入し、下北半島を回り込み、太平洋側に向かって南東方向に流向を転じる流れが生じ、case1の場合とは異なる結果となる。一方、図中 (c) に示す海流のみを考慮したcase3と図中 (b) を比較すると、両者による流れは、流速・流向ともにほぼ同様な分布となる。このことから、観測期間中に津軽海峡東部海域を流れる恒流は、海流による影響が大きいものと考えられる。

図-8及び9は、潮流のみを考慮したcase1及び潮流と海流を考慮したcase2における主要4分潮のうち、流況観測の結果から流れに与える影響が大きかったK1, O1, M2分潮の潮流楕円分布をそれぞれ表示したものである。津軽海峡東部海域の中でも流れが速くなる汐首岬沿岸海域 (図中Aの○) と下北半島沿岸海域 (図中Bの○) に着目

すると、潮流と海流を考慮した場合、汐首岬側では海流の影響を受け、潮流のみを考慮した場合に比して、潮流楕円の長軸方向自体に大きな変化はないものの、軌道長半径が海流の流れる方向に伸長し、各分潮の潮流流速を増加させている。一方、下北半島側では、潮流と海流を考慮したことにより、汐首岬側よりも軌道長半径が更に大きく伸長しているが、それに加えて潮流楕円長軸の向きも変化し、各分潮の流向にも影響が及ぶ。以上のように津軽海峡東部海域を恒流として流れる海流は、各分潮における潮流流速や流向に大きな影響を与えていることがわかる。

(4) 津軽海峡東部海域の流れエネルギー賦存量

図-10はcase2の計算期間中の最大流速を用いて、観測期間中の単位断面面積あたりの最大流れエネルギー密度 $D[\text{W/m}^2]$ を次式によって求めた分布を示す。

$$D = \frac{1}{2} \rho |U|^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ は海水の密度であり、 1030kg/m^3 とした。春期において津軽海峡が有する最大でのエネルギーポテンシャルを把握するため、 U は計算期間中で最大となる北方及び東方流速の合成流速を水深平均した値を示す。発電装置を設置する水深を勘案すると、下北半島沿岸部及び汐首岬沿岸部では、潮流に海流が加わることで、浅海域でも比較的大きな流速が発生するため、最大流れエネルギー密度は両沿岸部で高く分布する。この最大流れエネルギー密度のみに着目して、潮流・海流発電を行う場合の適地を選定すれば、津軽海峡東部海域では、エネルギー密度の最も高い下北半島沿岸部となる。しかし、前述したように下北半島沿岸海域では、恒流として流れる海流によって潮流流速に加え、その流向にも大きな影響が及ぶことを考慮すると、年間通じた流況観測により季節的な海流の変動とそれらが潮流流速・流向に与える影響に十分配慮する必要があるものと考えられる。

4. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 観測期間中の津軽海峡の流れは、北西－南東方向に長軸を有する日周期による潮流の影響を強く受けると同時に、南東方向に向かう恒流が加わることで、南東方向に向かって周期的に消長する流況特性を有している。
- (2) MITgcmによる潮流と海流を考慮した津軽海峡の流れ計算の結果、本計算による潮流楕円は、K1分潮においてやや過小評価になるものの、各分潮およびそれらと恒流を合成した現地観測の潮流楕円を概ね良好な結果で再現することができる。

図-10 case2(潮流+海流)の最大流れエネルギー密度分布

- (3) 津軽海峡東部海域において、最大流れエネルギー密度のみに着目して潮流・海流発電を行う場合の適地を選定すれば、最も高くエネルギーが分布する下北半島沿岸部となる。しかし、当該海域は海流によって潮流流速に加え、その流向にも大きな影響が及ぶことを考慮すると、季節的な海流の変動とそれらが潮流流速・流向に与える影響に十分配慮する必要がある。

今後は、夏期～秋期に渡る津軽海峡の流況観測から、季節的な流れ特性について把握するとともに、年間通じた津軽海峡のエネルギー賦存量の平面分布特性を明らかにする所存である。

謝辞：現地観測を行うにあたり、函館市の本吉勲氏、並びに、同市の溝江隆紀氏には、多大なご協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 井内国光・中村孝幸・安井 孝・二宮一成 (2011)：来島海峡周辺海域における潮流エネルギー賦存量の推定，土木学会論文集B3（海洋開発），vol.67, No.2, pp.I.1901-I.1905.
- 小牧祐幸・山城 徹・城本一義・仁科文子・中村啓彦・広瀬直毅 (2013)：海流発電適地選定のためのトカラ海峡周辺海域における黒潮潮差，土木学会論文集B3（海洋開発），vol.69, No.2, pp.I.109-I.113.
- 猿渡亜由未・田島 悠 (2012)：潮流エネルギーの平面及び鉛直分布の特徴，土木学会論文集（海岸工学），B2, vol.68, No.2, pp.I.1271-I.1275.
- 猿渡亜由未・田島 悠・米子佳広・齊藤 樹 (2013)：津軽海峡の潮流エネルギーソースに海流が与える影響，土木学会論文集B2（海岸工学），vol.69, No.2, pp.I.1296-I.1300.
- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2010)：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把握に関する業務，pp.23-26.
- Marshall, J., C., Hill, L., Perelman and A. Adcroft (1997a): Hydrostatic, quasi- hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling, J. Geophys. Res. Oceans, 102, C3, pp.5733-5752.
- Marshall, J. A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman and C. Heisey (1996b): A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers, J. Geophys. Res. Oceans, 102, C3, pp.5753-5756.