

津軽海峡における流況およびエネルギー賦存量の季節変動特性

Seasonal Fluctuations of Flow Characteristics and Energy Potential in Tsugaru Strait

函館工業高等専門学校 ○学生会員 本間 翔希 (Shouki Honma)
函館工業高等専門学校 正会員 宮武 誠 (Makoto Miyatake)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 猿渡 亜由未 (Ayumi Saruwatari)

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¹⁾²⁾³⁾。新エネルギー・産業総合開発機構 (NEDO) が推定した日本周辺海域における海流・潮流に関するエネルギー賦存量⁴⁾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・潮流の年間通じた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⁵⁾は非静水圧3次元モデルである MIT General Circulation Model⁷⁾⁸⁾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数値解析を主体として考察している。

本研究は、本間ら⁶⁾が行った方法と同様の方針のもと、年間を通じた津軽海峡の流況観測を実施し、恒流と潮流の流況およびエネルギー賦存量の季節的変動特性を検討する。

2. 津軽海峡における流況に関する現地観測

観測は、図-1のSt.1に示す汐首岬沿岸海域(水深-25m地点)を対象として春期(2013/3/18～2013/4/18)の31昼夜、夏期(2013/7/31～2013/9/4)の35昼夜、秋期(2013/10/19～2013/12/4)の45昼夜、冬期(2013/12/4～2014/1/20)の47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. 年間を通じた津軽海峡の流況特性

現地観測によって得られた流速・流向データのうち、春期の観測結果に関しては既に本間ら⁶⁾によって、その流況特性が解明されている。そこで、年間を通じた流況の変動特性を把握するため、夏期、秋期、冬期の流況特性について検討する。

図-2は、各層の観測流速に調和分解を施し、日周期分潮K1およびO1の合成潮流楕円を描いたものを示す。これまでの検討から日本海側と太平洋側の潮位差によって生じる津軽海峡の潮流は、全層にわたり日周期分潮の影響が大きいことを明らかにしている。冬春期における日周期分潮の潮流楕円は北西-南東方向へ長軸方向を有し、図中の矢印で示す観測

期間内で得られた恒流流速ベクトルの流向にほぼ一致する。この恒流の主成分は、これまでの検討から主に海流であることがわかっている。この結果、北西方向へ向かう日周期の潮流成分は恒常的に南東方向へ向かう海流に打ち消され、この期における観測流速ベクトルは全層ともに南東方向へ消長を伴い、周期的な変動を有する流況となる。一方、夏秋期において、潮流楕円は全層ともに冬春期に比べて軌道長半径が萎縮し、日周期分潮の潮流流速は弱まり、逆に恒流流速が大きくなる傾向にある。また、上層において潮流楕円の長軸方向が大きく変化することで、恒流成分の流向と

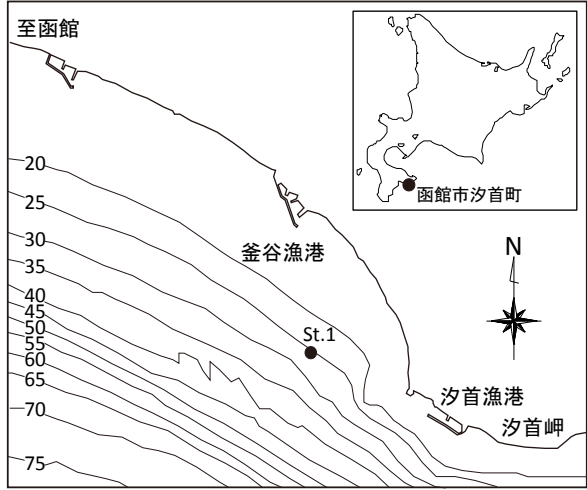


図-1 流況観測位置(等深線の単位:m)

表-1 流況観測の諸元

観測位置	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"
観測期間	2013年3月18日～2013年4月18日(春期) 2013年7月31日～2013年9月4日(夏期) 2013年10月19日～2013年12月4日(秋期) 2013年12月4日～2014年1月20日(冬期)
使用機器	ADCP(超音波式ドップラー流速計) 発信周波数:300kHz
観測層	上層:海底から23.3m 中層:海底から12.2m 下層:海底から3.2m
測定間隔	60分(定時)
測定時間	20分
サンプリング間隔	1秒

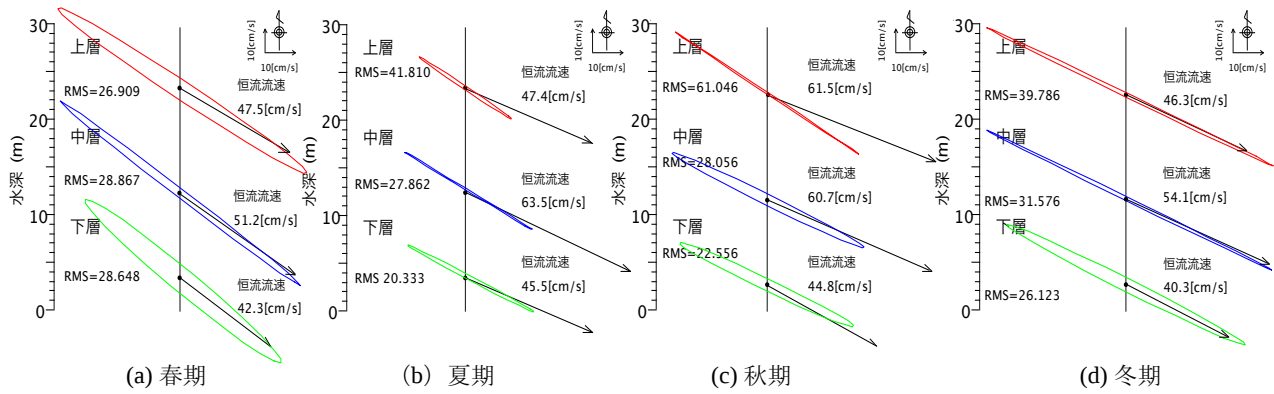


図-2 各観測期間中の全層における日周期分潮の合成潮流楕円

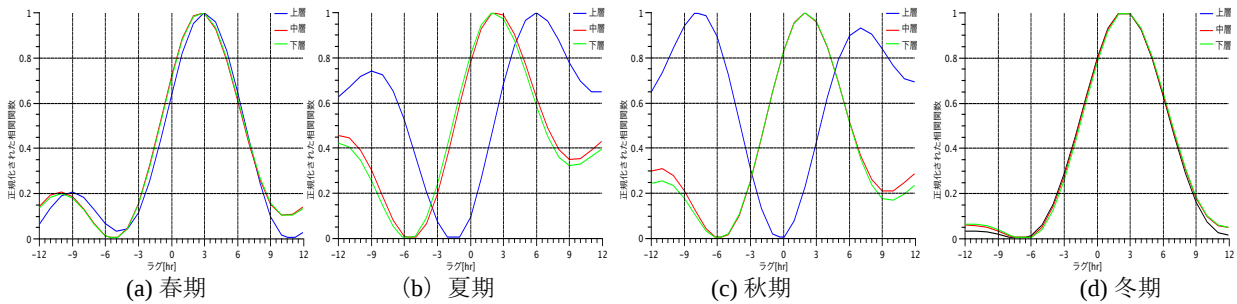


図-3 各観測期間中の潮位差と合成流速の関係

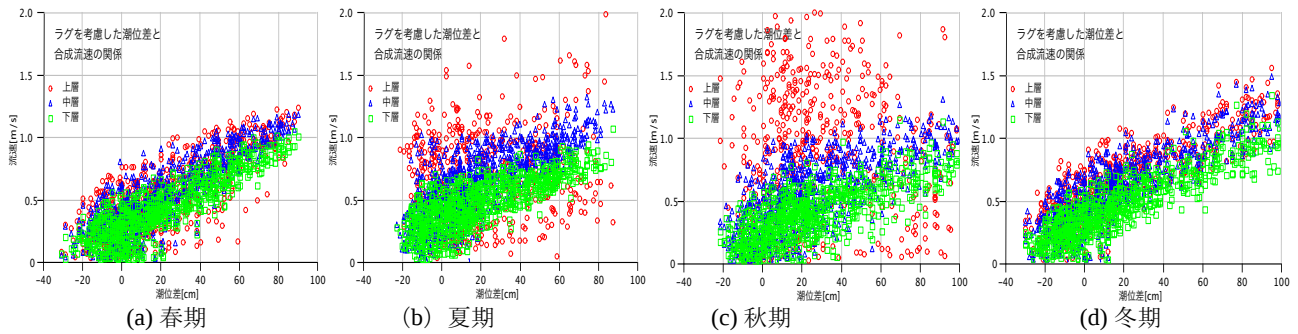


図-4 ラグを考慮した潮位差と合成流速の関係

相違する。この期の上層の観測流速ベクトルは冬春期と同様に南東方向へ向かう変動を伴う流れが形成されるものの不規則で、かつ冬春期でみられた周期性は消失する。

同図中には、観測期間中の変動流速強度を示す観測流速の二乗平均平方根(以下、RMS と略す)を表示する。冬春期のRMSは、全層ともに合成前における日周期分潮の潮流楕円の軌道長半径にほぼ等しく、この期に変動する流速成分は、ほぼ日周期の潮流流速成分に支配されていると考えられる。一方、日周期分潮の潮流成分が弱まる夏秋期のRMSは、中層、下層で冬春期とほぼ同様な値となっているが、上層では冬春期に比較して増大し、潮流楕円の軌道長半径と比較しても大きくなる傾向にある。このことから、夏秋期では潮流以外の流速の変動成分が流れに大きな影響を及ぼしていることが考えられる。

図-3は、観測期間中における気象庁による日本海側(深浦)および太平洋側(下北)の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の合成流速との相互相関をとったものを示す。年間を通じ、中層及び下層では潮位差が生じてから約3時間の時間遅れで潮流が応答する流況特性を有してい

る。一方、流速の変動強度の高い夏秋期の上層では、日本海側と太平洋側の潮位差に対して、上述の中層および下層よりも更に3時間、潮位差より6時間遅れで応答していることがわかる。

図-4では、図-3で示す応答時間を考慮した潮位差と各層の合成流速の相関をとったものを示す。応答時間が6時間程度であった夏秋期の上層を除くすべての期では合成流速と潮位差に良い相関がみられることから、この期の観測流速は潮位差により生じる日周期分潮の潮流成分による影響が大きいといえる。これに対して、応答時間が6時間と大幅に遅れる夏秋期の上層では、相関が著しく低下しており、潮流成分以外の流速の変動成分が、この期の流れに与える影響が大きいことがわかる。また、前述の観測流速によるRMSにおいて高い変動強度が示されることや、潮流と海流の流向が異なっていることを勘案すると、夏秋期の上層で生じる潮流以外の変動流速成分は、恒流や潮流の流速・流向、ならびに日周期分潮の潮流の位相に大きな影響を及ぼすことが推察される。

図-5では、各観測期間中の上層で得られた北方流速および東方流速にFFTによるスペクトル解析を行った結果を示

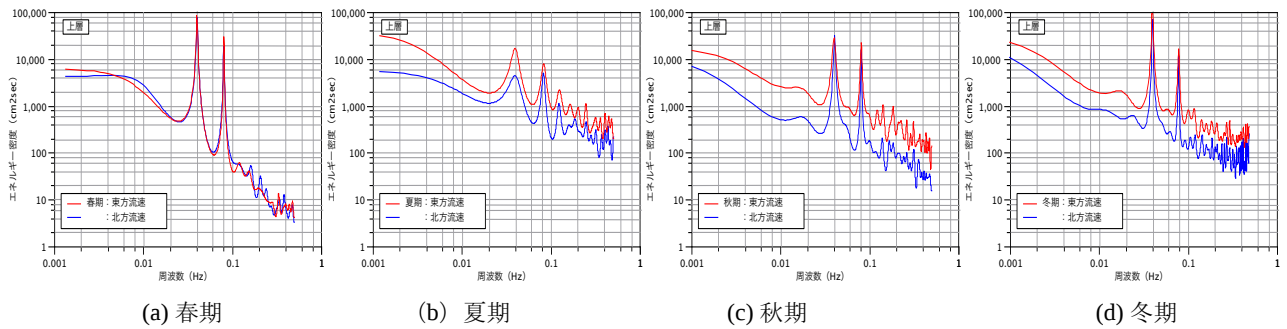


図-5 各観測期間中の上層における北方及び東方流速のスペクトル解析結果

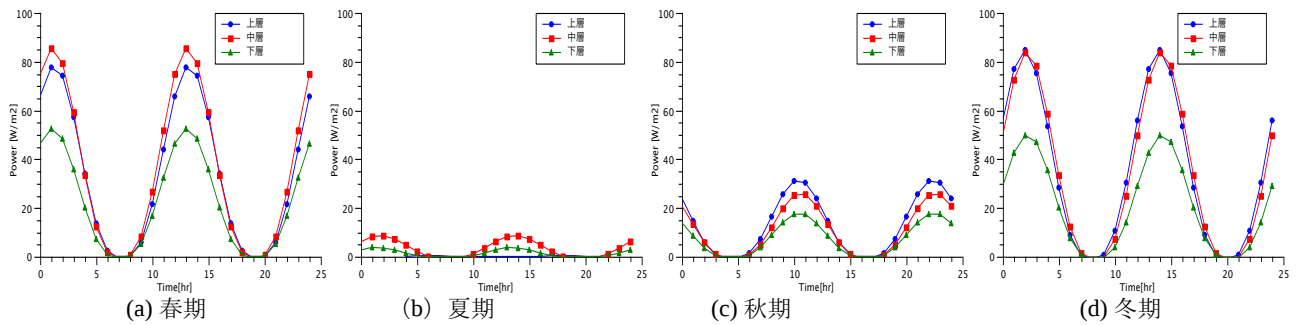


図-6 K1 および O1 を合成した日周期分潮によるエネルギー賦存量

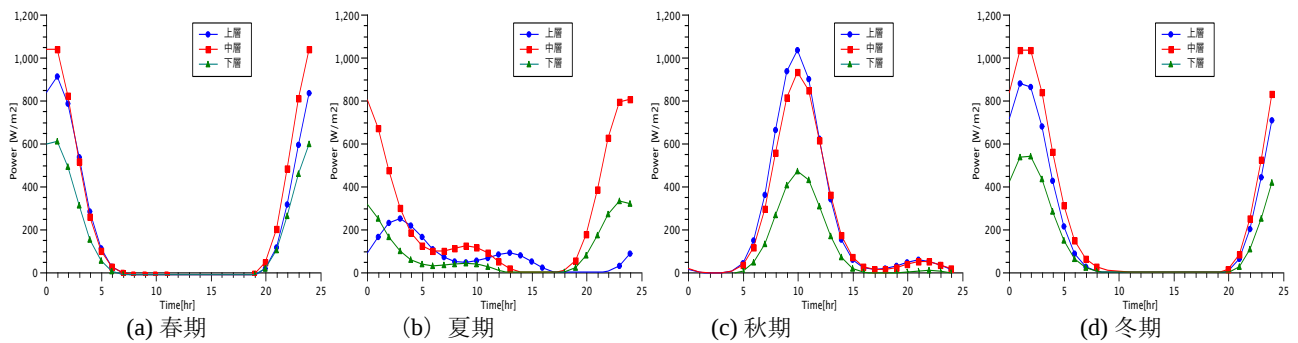


図-7 主要4分潮に恒流を合成したエネルギー賦存量

す。冬春期では、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、24時間および12時間周期で明確なスペクトルピークがみられる。一方、夏秋期では、冬春期と同様に24時間および12時間周期でピークとなるものの、そのピーク値は冬春期より減衰し、12時間周期以下の短周期成分が増加することで、冬春期に比べ日周期および半日周期の潮流による流れの影響が小さくなる傾向がみられる。このことから、夏周期では日周期および半日周期の潮流の影響が弱まり、高周波成分のピーク値と均衡する事によって、全エネルギー密度に占める高周波成分の割合が相対的に大きくなり、観測流速の流れに影響を及ぼしていると考えられる。

4. 津軽海峡の季節的なエネルギーポテンシャルの評価

図-6は、前述の調和分解で得られたK1およびO1分潮を合成した日周期分潮流速を用いて、観測期間中のエネルギー密度 $D[\text{W/m}^2]$ を次式によって求めた結果を示す。

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

ここに、 ρ は海水の密度であり、 1030kg/m^3 とした。U は各層の流速を示す。エネルギー密度の位相は年間を通じて

全層ともにほぼ同位相となっており、潮流楕円の軌道長半径の小さな差異が大きな差となって現れる結果となる。冬春期では日周期の潮流流速が大きく、軌道長半径の最も大きい中層で、エネルギー密度はこの期で最大となる $80[\text{W}]$ 程度に達する。一方、日周期の潮流が弱まる夏期では冬春期に比べエネルギー密度は $1/8$ 以下に低下するが、秋期にかけて潮流が強まることで、下層から上層に向かって潮流流速が増加し、最大で $20[\text{W}]$ 程度となる。

図-7は、主要4分潮に恒流を合成したエネルギー密度を示す。冬春期は全層で同様の位相を有しており、潮流と恒流の流向が一致することで、高いエネルギー密度を示す。この期における潮流楕円の軌道長半径は上層と中層でほぼ同程度となるものの、恒流の最も大きい中層で最大となり、エネルギー密度は $1000[\text{W}]$ に達する。一方、潮流が最も減衰する夏期において恒流と合成したエネルギー密度は、恒流の流向が潮流と異なる上層では大きく低下するが、流向が一致し、恒流流速が大きく発達する中層では最大 $800[\text{W}]$ となり、冬春期に迫るエネルギー密度の最大値が発生している。秋期では、夏期から潮流流速が強まるとともに、上層で恒流流速が発達することで、エネルギー密度は潮流流速と恒流流速の足し合わせが最も大きくなる上層

で 1000[W] におよび、中層においても同程度のエネルギー密度を示す。夏期の上層においてみられるエネルギー密度の大幅な低下や、下層で年間通じて低く推移することを勘案し、中層に着目すればエネルギー密度は最大で 1000[W] 程度となり、24 時間の平均値では 200[W] 程度で安定する。

5. 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) 各層の観測流速を調和分解して得られる日周期分潮の潮流楕円より、潮流楕円の長軸方向が恒流流速ベクトルの流向にほぼ一致する冬春期では、観測流速ベクトルは全層ともに南東方向へ消長を伴い、周期的な変動を有する流れ特性を有している。一方、夏秋期では、日周期分潮の潮流流速は弱まり、逆に恒流流速が大きくなることに加え、上層において潮流楕円の長軸方向が大きく変化することで、恒流成分の流向と相違し、冬春期と同様に南東方向へ向かう変動を伴う流れが形成されるものの、冬春期でみられた周期性は消失する。以上により、津軽海峡の流況は、冬春期・夏秋期に分類することができる。
- (2) 日周期の潮流楕円の長軸方向が恒流成分の方向と異なる夏秋期の上層では、変動流速強度が高く、潮位差に対する合成流速の応答時間が大幅に遅れる。これは、冬春期に比べ日周期および半日周期の潮流による流れの影響が小さくなり、全エネルギー密度に占める割合が相対的に大きくなる高周波成分による観測流速への影響であると考えられる。
- (3) エネルギー密度は、潮流流速が大きく恒流と潮流の流向が一致する冬春期で最も高く、全層でほぼ同様な位相になる。一方、潮流が弱まる夏期では、一時的に低下するが、夏期から秋期にかけて潮流が再度強まるとともに、恒流が発達することで最大エネルギー密度は冬春期と同程度になる。
- (4) 潮流・海流発電の発電機の設置水深は、夏期の上層においてみられるエネルギー密度の大幅な低下や、下層で年間通じて低く推移することを勘案し、年間通じて高いエネルギー密度を示す中層（海底より 12.2m）付近が適している。

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

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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リ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.
- 6) 本間翔希・宮武誠・猿渡亜由未 (2014)：潮流海流発電に向けた津軽海峡における流況特性およびエネルギー賦存量に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学), vol.70, No.2, pp.I_1291-I_1295.
- 7) 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.
- 8) Marshall, J. A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman and C. Heisy (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