

海峡の潮流と日本海の潮汐応答特性†

小田 巻 実*

Relation of Tidal Response and Tidal Currents of the Connected Straits of Japan Sea†

Minoru Odamaki*

Abstract

Tidal current in the strait is induced by the difference of independent tides of both sides, and its strength depends on the combined impedance. In here, independent tides mean the tides occurred in both side of boundary if the strait is closed.

In this paper, independent tides and impedances of the straits connected to Japan Sea are discussed using the simple one dimensional model and the observed data. Resultingly, the combined impedance of Tusima Strait is larger than those of other straits. And in Tusima Strait, the gulf impedance Z_g of Japan Sea is larger than the ocean impedance Z_o of the outer sea, East China Sea. In other Straits, Tugaru and Soya Straits, Z_g is much smaller than Z_o . Then it is made clear that in Tusima Strait, tidal current is caused by the co-oscillation of Japan Sea, and in others, Tugaru and Soya Straits by those of the outer seas.

1. はじめに

日本海の潮汐(第1図)について、小倉伸吉(1933)は「半日周潮は対馬海峡を湾口とした双節の振動で説明されるが、日周潮については対馬海峡による単節振動に加えほかの海峡の影響も大きい」こと、さらに寺本(1985)は、起潮力及び荷重変形による独立潮汐も考えられることを指摘した。従来の考え方(Defant 1961)では、「共振潮汐は湾口部に外の潮汐を与えてできる潮汐、独立潮汐は湾口部の潮汐をゼロとして起潮力を与えてできる潮汐」と定義されていた。この定義では、日本海の日周潮のように海峡に無潮点や振動の節ができる場合、独立潮汐だけになって共振潮汐がなくなってしまうジレンマが生じる。Garrett(1975)の新しい定義によれば、「共振潮汐は他の海峡を閉じて起潮力のない状態でその海峡に潮流の流量を与えてできる潮汐、独立潮汐は全部の海峡を閉じて起潮力を与えてできる潮汐」とされる。日本海の各海峡には、水路部が長年蓄積してきた潮流資料があり、潮流の流量を見積もることは難しくない。また、この定義では、接続する海峡が複数ある場合でも、共振潮汐と独立潮汐を容易に重ね合わせることができる。そこで、筆者(Odamaki 1989)は、この定義を用いて、「日本海の半日周潮は対馬海峡による双節の共振潮汐と日本海北部に効く独立潮汐で説明されること、日周潮は対馬海峡による単節の共振潮汐とともに津軽・宗谷海峡から

† Received 17th December 1992

* 海上保安大学校 Hydrographic Division, Maritime Safety Academy

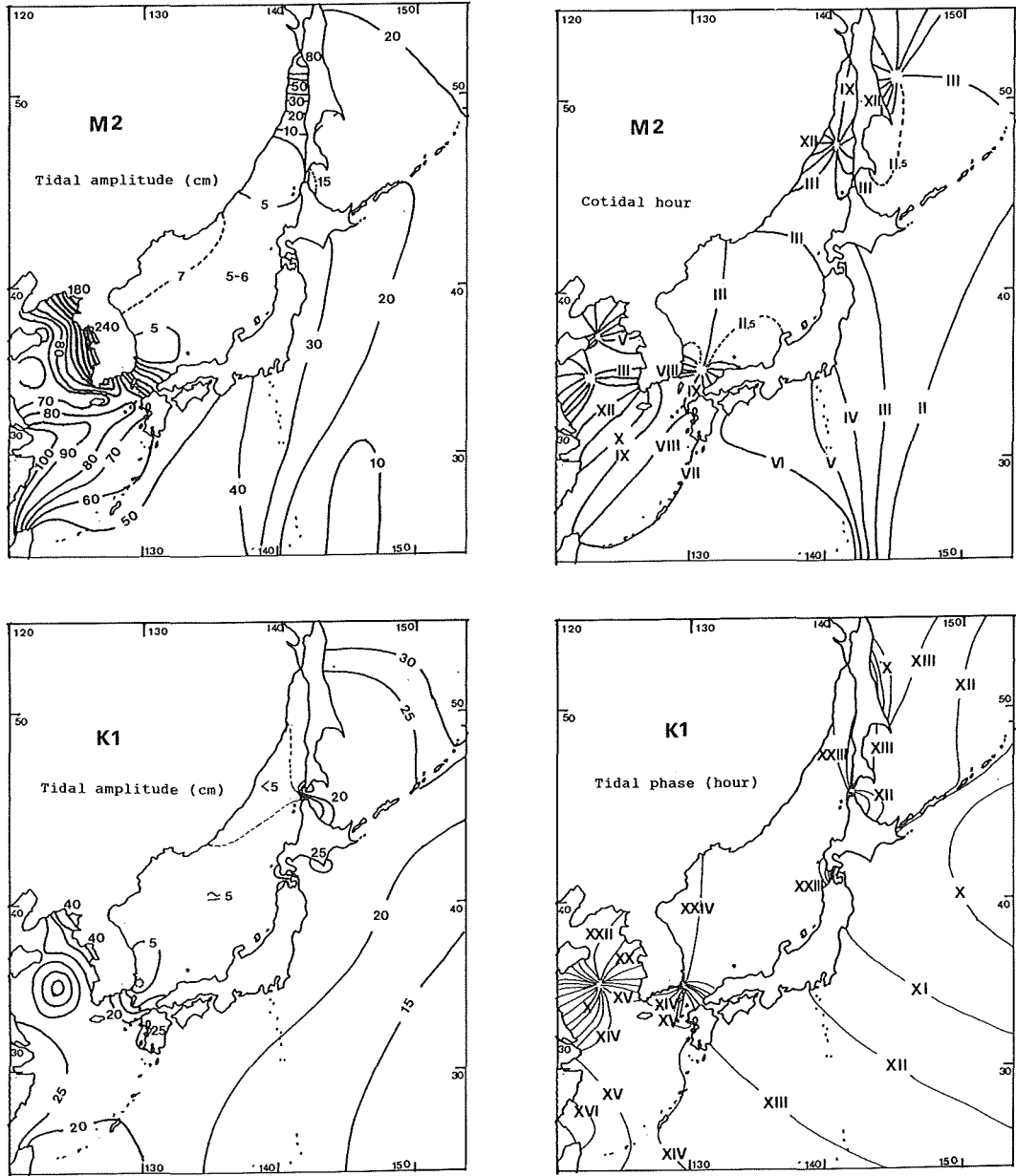


Figure 1. M2 and K1 cotidal charts for Japan Sea.

の寄与が大きいこと、さらにその影響で対馬海峡の無潮点の位置が韓国側に偏っていること」を明らかにした。

以上によって、各海峡の日本海の潮汐に対する寄与はあきらかになったが、それではその起源である海峡の潮流はどのようにして発生しているのだろうか。本稿では、潮流の起源について論ずる。

2. 海峡の潮流の起源

Garrett(1975)に従って考える。湾内外の潮汐を二つの成分に分けて、

(1)海峡を薄い固定壁で塞いだときの潮汐 e_1

(2)海峡に潮流を与えたときの潮汐 e_2

とする。 e_1+e_2 が実際の潮汐を表している。いま、 g と o で湾内側と外洋側を区別することにして、潮汐は連続しているから海峡のところの潮汐 e_m は、

$$e_m = e_{g1} + e_{g2} = e_{o1} + e_{o2}, \tag{1}$$

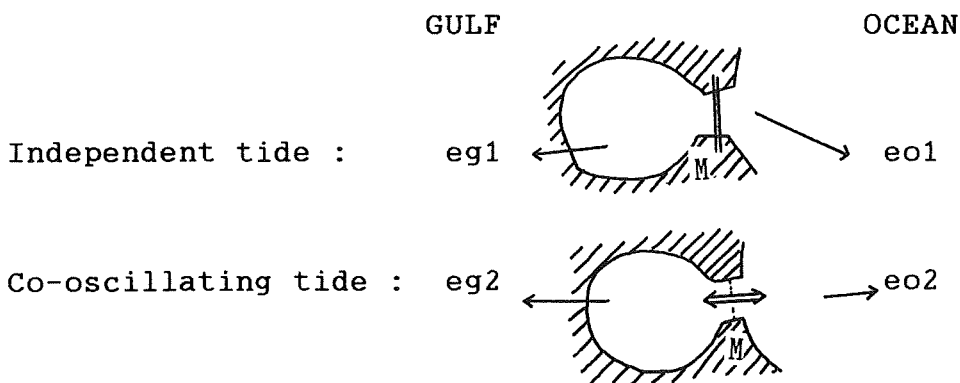


Figure 2. Conceptual model for tidal current generation in the mouth of gulf according to Garrett (1975).

すなわち、海峡の両側それぞれに、海峡の潮流によって生じる共振潮汐(e_{g2} と e_{o2})、海峡を閉じたときに生じている潮汐成分 (e_{g1} と e_{o1}) の和として表すことができる(第2図)。sを海峡を横断する方向の軸として、潮流分布を $F(s)$ とおく。 $e_m, e_{g1}, e_{o1}, e_{g2}, e_{o2}$ もs の関数となっている。単位長さの単位潮流流量 $h_u(s)$ が湾内側と外洋側に起こす潮汐を $K_g(s,c), -K_o(s,c)$ とすると

$$e_{g2}(s) = \int_M K_g(s,c) F(c) dc, \quad e_{o2}(s) = - \int_M K_o(s,c) F(c) dc \tag{2}$$

となる。ここで \int_M は海峡横断方向の積分を表す。さらに潮流の分布関数を $f(c)$ 、潮流の総流量をIとして、

$$F(s) = I \cdot f(s), \quad I = \int_M F(c) dc, \quad 1 = \int_M f(c) dc, \tag{3}$$

とおき、(1)式に $f(s)$ を掛けて海峡の横断方向で積分して平均すると、

$$H_m = H_g + I \cdot Z_g = H_o - I \cdot Z_o, \tag{4}$$

となる。ここで、 H_m, H_g, H_o は平均した潮汐で、 Z_g, Z_o は海峡の潮流と発生する潮汐の比率を表すインピーダンスを意味しており、

$$Z_g = \int_M \int_M K_g(s, c) \cdot f(s) \cdot f(c) dc \cdot ds, \quad Z_o = \int_M \int_M K_o(s, c) \cdot f(s) \cdot f(c) dc \cdot ds \quad (5)$$

である。(4)式を変形すると、

$$I = (H_o - H_g) / (Z_g + Z_o), \quad (6)$$

となる。これは、「海峡の潮流は、海峡を閉じたときに残っている両側の独立した潮汐の差によって励起され、その比率は両側に対するインピーダンスを合わせたものになる」ことを示している。さらに、(6)を(4)式に代入すると、

$$\begin{aligned} H_m &= H_g + (H_o - H_g) \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) \quad (7) \\ &= H_g + H_o \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) - H_g \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) \quad (7)' \\ &= (H_o \cdot Z_g + H_g \cdot Z_o) / (Z_g + Z_o) \quad (7)'' \\ &= H_o \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) + H_g \cdot Z_o / (Z_g + Z_o) \quad (7)''' \end{aligned}$$

となり、海峡の潮汐は、両側の独立潮汐の荷重平均によって表されることがわかる。

3. 日本海の海峡の潮汐インピーダンス

(1) 日本海の場合

以上の概念を日本海の各海峡に適用してみる。Odamaki 1989に従って、日本海の潮汐JSTを、独立潮汐IND、対馬・津軽・宗谷海峡の共振潮汐TSM, TGR, SUYにわけ、

$$JST = IND + TSM + TGR + SUY \quad (8)$$

と表す(第3図)。H_gは、その海峡を閉じたときに生じる潮汐だから、1次元モデル(第4図)による計算から<全体の解-その海峡の共振潮汐>として計算される。例えば、対馬海峡の場合、

$$H_g = JST - TSM = IND + TGR + SUY \quad (9)$$

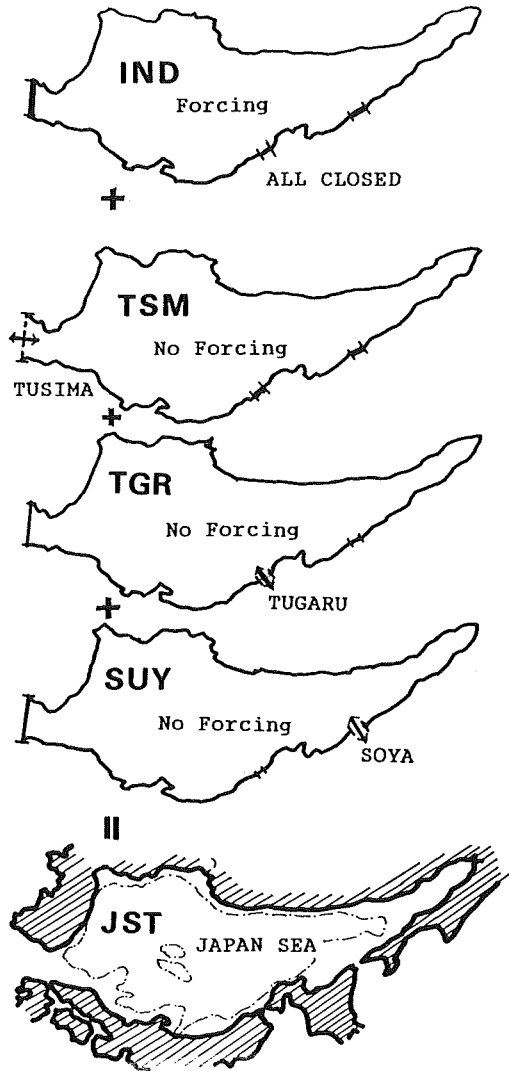


Figure 3. Composition of Independent tide and Co-oscillating tides induced by the straits for Japan Sea tides.

となる。Hoは、同じく海峡を閉じたときに外側の海に生じる潮汐なので、既往の同時潮図(第1図)から海峡の影響がなくなる程度離れた地点の潮汐を採用する。潮流の総流量Iは、観測資料から見積る(第5図)。Zgは、各海峡の共振潮汐の解で、接続するボックスの潮汐振幅と与えた潮流流量の比を取ることによって計算される。以上によって(4)式を用いてZoを計算することができる。第1表に計算結果を示す。

半日周潮(M2, S2)のZg+Zoは、宗谷海峡が最も大きく、対馬海峡や津軽海峡に比べて、潮汐差が大きくても潮流が大きくなりにくいことを示している。日周潮(K1, O1)のZg+Zoでは、対馬海峡が小さく、宗谷海峡や津軽海峡の半分であり、同じ水面差であっても2倍の潮流流量を生じていることを示している。

(2)各海峡の潮汐・潮流特性

(対馬海峡) 海峡両側の潮汐差は、半日周潮の方が日周潮よりも倍以上大きいものに対し、発生する潮流は同程度になっている。これは、日周潮の連結インピーダンスZo+Zgが半日周潮の1/4になっているからである。ZgとZoの大きさを比較すると、4分潮ともZgの方が大きく、東シナ海よりも日本海に対する影響が大きいことを示している。言い換えると、 $|Zg| > |Zo|$ だから、対馬海峡の潮流は、日本海の振動モードに依存して発生していることになる。

(津軽海峡) 振幅だけの差を比較すると日周潮よりも半日周潮の方が大きいけれども、日周潮では遅角が両側で180°近く異なっているため、潮汐差Ho-Hgにすると日周潮の方が大きくなっている。また、連結インピーダンスZo+Zgも日周潮の方が半日周潮よりも小さくなっているため、励起される潮流は日周潮が半日周潮よりも倍近く大きくなっている。ZgとZoを比較すると、Zoが圧倒的に大きくなっており、同じ潮流で励起される潮汐は外側の方が大きいことを示している。ただし、このモデルでは第4、5図のように津軽海峡西口に境界を設定しているため、励起される潮汐は津軽海峡内に影響するのみで、太平洋側まで及ぶことはないようである(小田巻1984)。また、 $|Zg| < |Zo|$ 、 $|Hg| < |Ho|$ を考慮すると、(6)式は、

$$I = (Ho-Hg)/(Zg+Zo) \rightarrow (Ho-Hg)/Zo \rightarrow Ho/Zo \tag{6'}$$

となるので、津軽海峡の潮流は、あきらかに日本海側よりも外側の条件に依存しており、外から「ふいご」のように海水を押し込んだり引き抜いたりして潮流を発生させていると考えられる。

(宗谷海峡) 津軽海峡と同様、振幅差は半日周潮も日周潮も同じ程度なのに対し、遅角を考慮すると潮汐差は日周潮が大きくなり、さらに、日周潮の連結インピーダンスZo+Zgに比べて圧倒的に大きいので、外から潮流を発生させているものと考えられる。ただ、宗谷海峡は、津軽海峡と違って、ほとんど長さのな

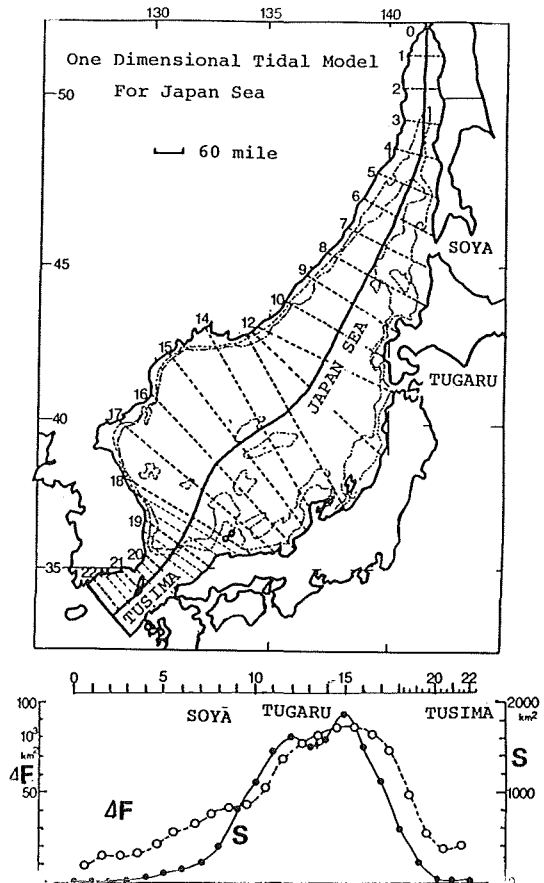


Figure 4. One-dimensional tidal oscillation model for Japan Sea.

Table 1 Tidal Impedances in the straits.

Ho: tides in outer seas, Hg: tides in inner gulf (Japan Sea), I: tidal current flux, Zg: gulf impedance, Zo: ocean impedance.

		Ho	Hg	Ho-Hg	I	Zo+Zg	Zg	Zo					
Tusima	M2	85 270	2 174	87 271	2.14 351	0.41 280	0.43 270	0.07 21					
	S2	35 300	3 44	36 295	0.92 1	0.39 294	0.52 269	0.23 45					
	K1	25 218	3 320	26 212	2.01 294	0.13 278	0.11 270	0.02 323					
	O1	20 187	3 281	20 187	1.71 258	0.12 289	0.10 270	0.04 345					

Tugaru	M2	30 90	7 94	23 88	0.83 167	0.28 282	0.01 91	0.29 282					
	S2	15 135	3 104	12 142	0.28 226	0.44 276	0.00 178	0.44 277					
	K1	25 150	5 4	29 155	1.34 206	0.22 309	0.01 90	0.22 308					
	O1	20 165	11 294	28 147	1.04 196	0.27 311	0.06 259	0.24 323					

Soya	M2	20 90	5 345	22 104	0.36 112	0.61 351	0.00 271	0.61 352					
	S2	8 120	3 110	5 125	0.09 216	0.56 269	0.00 189	0.55 269					
	K1	20 195	4 350	24 191	1.01 236	0.24 315	0.00 90	0.25 313					
	O1	20 165	5 325	24 161	1.03 193	0.24 328	0.01 90	0.24 326					
	cm	°	cm	°	cm	°	$\times 10^6$	°	$\times 10^{-6}$	°	$\times 10^{-6}$	°	$\times 10^{-6}$
					m^3/s	s/m^2	s/m^2	s/m^2					

い海峡なので、潮流で励起される潮汐 $Z_o \cdot I$ は、第1図のようにオホーツク海に広がっているものと考えられる。

4. 日本海の応答特性

共振潮汐は、ある種の振動系へ外部入力を与えたものと同じなので、当然、日本海の固有振動に潮汐が近ければ共鳴して大きくなることが想像される。ここでは、日本海の固有振動をみるため、上述の1次元モデルを使っていろいろな周波数に対するモードとインピーダンスについて試算した。

(1)周波数に対する振動モード

各海峡に単位潮流流量を与えて0.2cpd (cycle per day) から2.1cpdまでの周波数に対する振動モードを計算した。対馬海峡(第6-1図)では、0.4cpd (60hour) でちょうど湾口部に節ができる単節振動(Helmholtz mode)となり、周波数が高くなるに従って節が日本海の内部に移動する。そして1.8cpd付近で2番目の節が湾口部にでき、より高周波では双節の振動となる。津軽海峡(第6-2図)では、0.2cpdから1.7cpdまで日本海は一樣に上下振動し、周波数が高くなるほど振幅が小さくなり、1.8cpdで日本海北部に節が現れる。この節は、高周波数になるとさらに北側にゆく。宗谷海峡(第6-3図)では一樣な上下振動が1.4cpd付近で最も小さくなり、1.6cpdで日本海北部に節が現れ初め、2.0cpd付近では日本海北部に二つの節が現れる振動になっている。潮汐周期に対応するモードを見ると、対馬海峡では、日周潮は南部に節のある単節モード、半

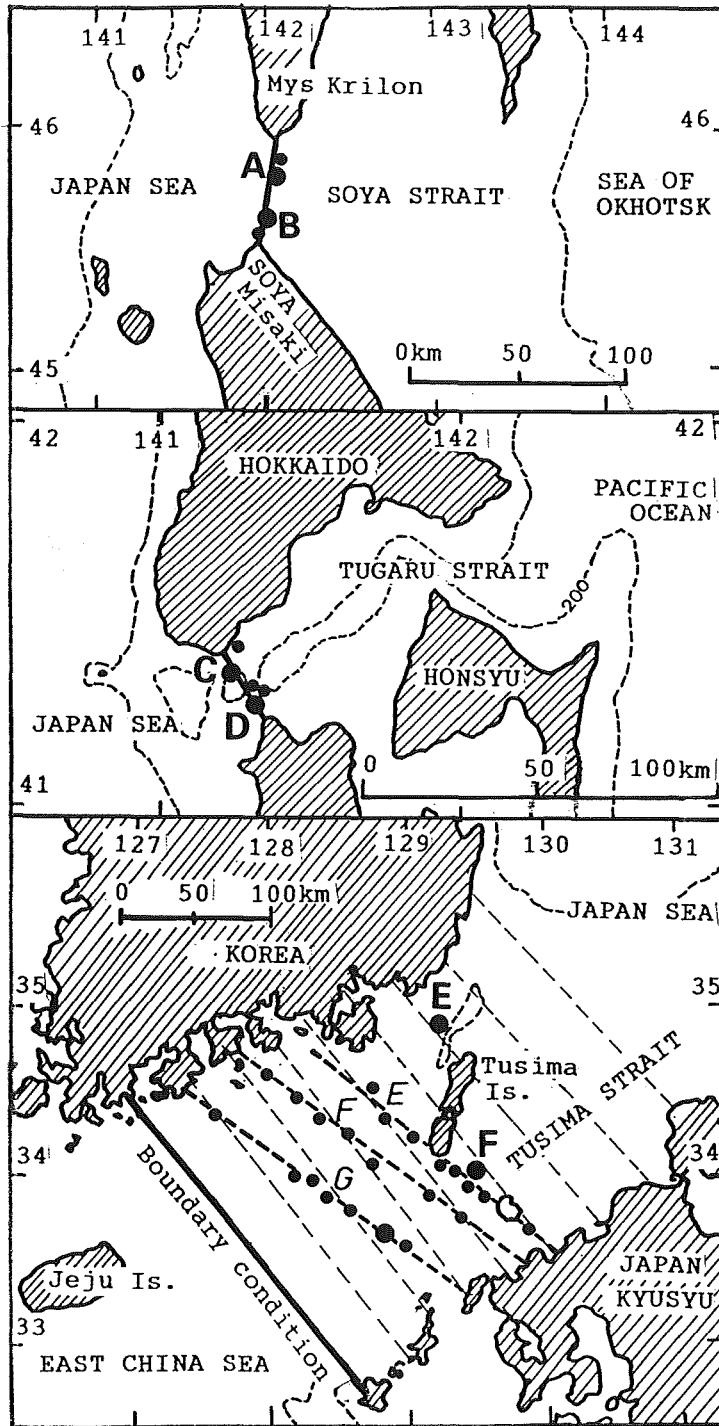


Figure 5. Examined sections of three straits.

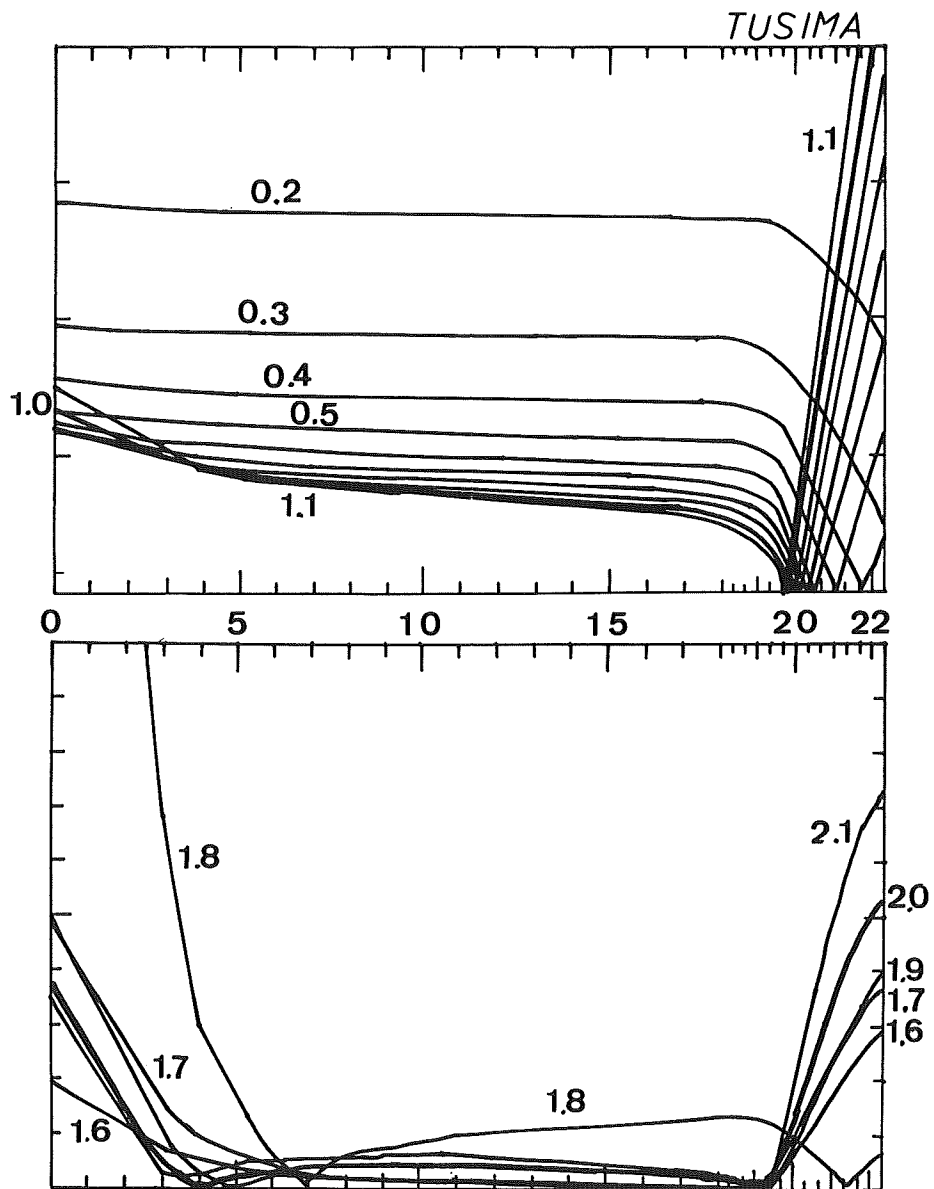


Figure 6-1. Oscillation modes of Japan Sea according to various frequencies for Tusima Strait. Numeral attached to line means frequency which unit is cpd (cycle per day). Vertical axis means amplitude which scale is arbitrary.

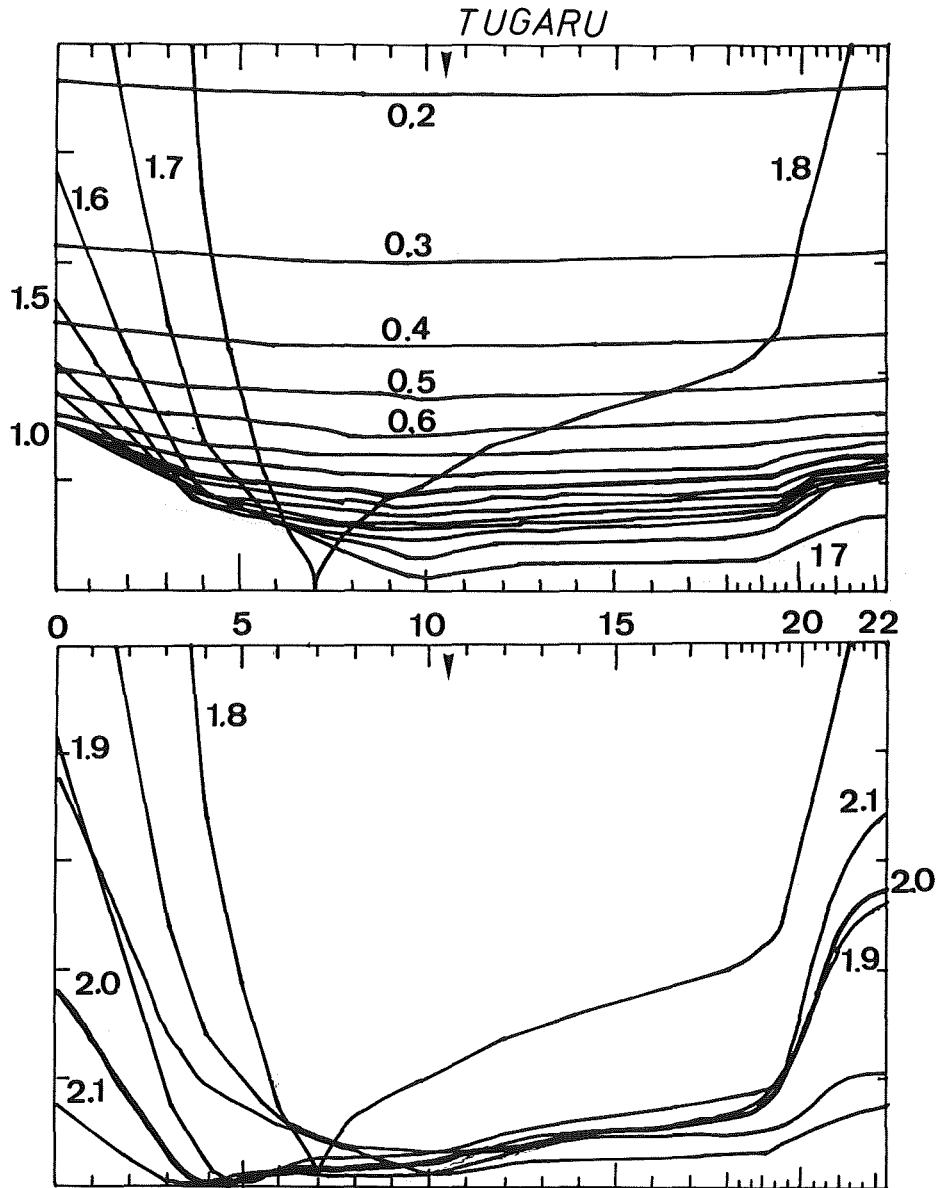


Figure 6-2. Same as 6-1, except for Tugaru Strait.

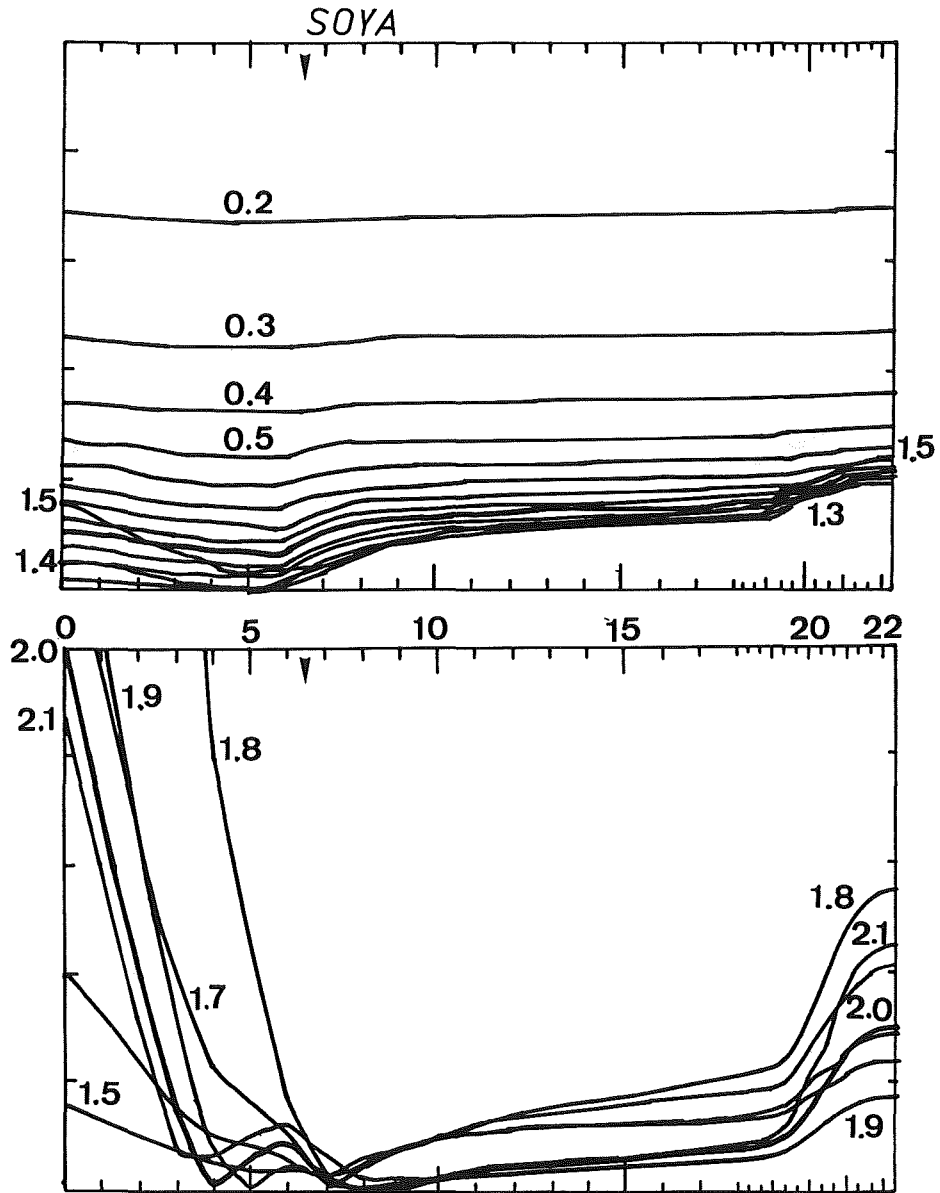


Figure 6-3. Same as 6-1, except for Soya Strait.

日周潮は北部と南部に節のできる双節モードとなっている。津軽海峡では、日周潮は全体一様に上下する均一モード、半日周潮は北部に一つ節のできる単節モードとなっている。宗谷海峡では、日周潮は均一モード、半日周潮は日本海北部に二つの節ができるモードとなっている。

(2)各海峡のインピーダンス

各モードの各海峡における潮汐振幅と潮流流量の比、インピーダンス Z_g を第7図(後の都合で逆数 $1/Z_g$ で表している)に示す。 Z_g がいくら大きいとしても、 $Z_g/(Z_g+Z_o)$ はたかだか1程度であり、

$$Hg + (H_o - H_g) \cdot Z_g / (Z_g + Z_o) \rightarrow Hg + H_o - Hg \rightarrow H_o \quad (10)$$

で外側の潮汐程度にしかならず、共鳴が起きるわけではない。湾の中に大きな振動を励起するのは $Z_g + Z_o$ を最小にするときである。外側の状態による Z_o の分布はいまのところわからないので、 $1/Z_g$ の分布を調べてみた。対馬海峡の $1/Z_g$ では、前述のように0.4cpdにHelmholtz modeのピークがある。津軽海峡の $1/Z_g$ では、一つめの節が日本海北部にできるモードの1.7cpd (13.7hour) に小さなピーク、2.2cpd (11hour) により大きいピークが現れている。宗谷海峡では1.7cpd (14hour) と1.85cpd (13.0hour) に $1/Z_g$ のピークがあり、前者は日本海北部に一つ節ができる単節モード、後者は二つの節ができ始める双節モードに対応している。

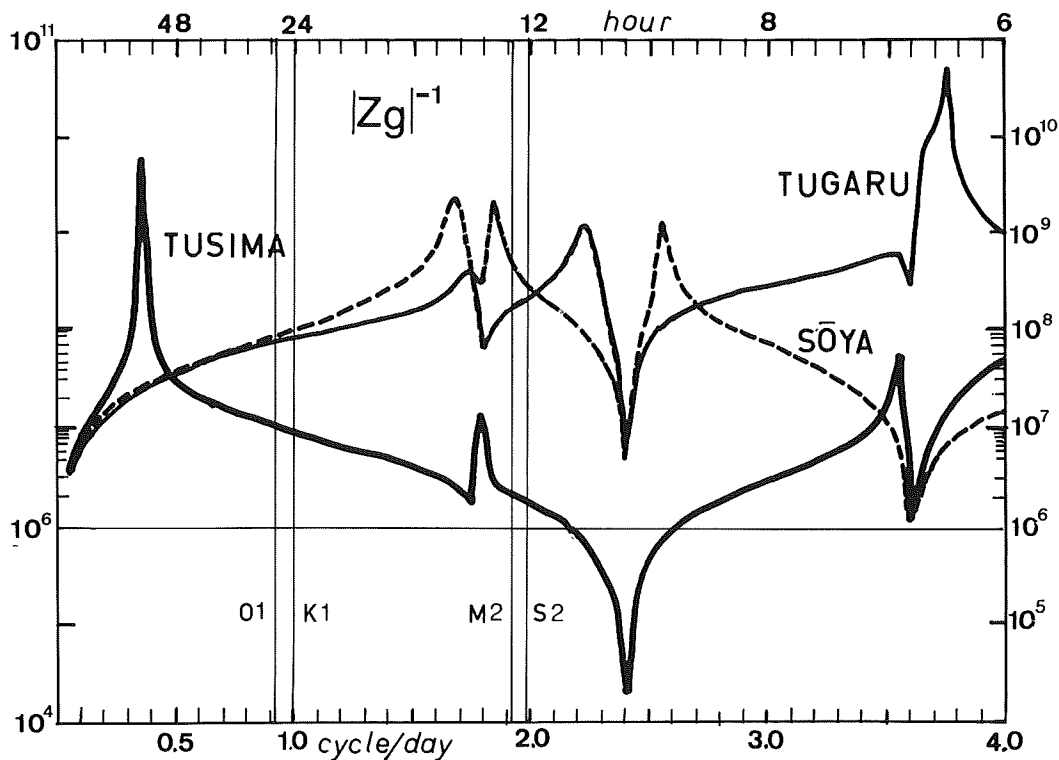


Figure 7. Gulf impedance of Japan Sea.

5. まとめ

各海峡では、(6)式のように両側の潮汐差によって潮流が発生し、それがさらに湾内の共振潮汐を励起する。潮流が発生する程度は、連結インピーダンス $Z_o + Z_g$ によって決まる。今回は、観測値と簡易なモデルからインピーダンスを見積った。

結果の第1表を見てみると、日本海の潮汐は海峡を閉じたとしても大きくないので、 $|H_o| > |H_g|$ だから発生する潮流 I は、 $H_o/(Z_o+Z_g)$ によって決まっている。対馬海峡では、 $|Z_g| > |Z_o|$ なので日本海の Z_g が効いており、いわば外の潮汐 H_o に湾内が呼応して潮流が発生している。津軽・宗谷海峡では、 $|Z_g| < |Z_o|$ なので潮流 I は、外部の潮汐 H_o と Z_o 、 H_o/Z_o で決まっており、いわば外の潮汐が押したり引いたりして潮流を発生させていると考えられる。

本論では、各海峡の潮流発生イメージを掴むために簡単なモデルで検討した。今回のモデルは対馬海峡に重点があり、津軽・宗谷海峡は副次的な役割となっていてモードの計算などに限界があった。今後、現地観測資料を詳しく解析するとともに、モデルの2次元化などによって、さらに津軽・宗谷海峡の寄与を明確にしてゆくこととしたい。

参考文献

- Defant, A. : Physical Oceanography, vol.2, Pergamon Press. Oxford, 598p, (1961).
Garrett, C. : Tides in gulfs. Deep-Sea Res., 22, 23-35 (1975).
小田巻実 : 津軽海峡の潮汐・潮流, 沿岸海洋研究ノート, 第22巻, pp12-22, (1984).
Odamaki, M. : Co-Oscillating and Independent Tides of the Japan Sea, J. Oceanogr. Soc. Japan, vol. 45, No.1, pp65-82, (1989).
小倉伸吉 : 日本近海の潮汐に就て (其の2), 水路要報, 第12年第6号, pp227-240, (1933).
寺本俊彦 : 世界海洋潮汐の数値モデリングと日本近海の潮汐, 沿岸海洋研究ノート, 第23巻, pp60-72, (1985).