

## 朝鲜海峡潮汐和潮流的数值计算\*

杨景飞

(国家海洋局海洋科技情报研究所,天津)

方国洪

(中国科学院海洋研究所,青岛)

**提要** 本文依据二维长波方程,用有限差分方法计算了朝鲜海峡的半日潮和全日潮,得到与实际观测符合良好的结果。文章给出了潮汐、潮流和能通量的分布。计算显示,在朝鲜半岛东南方的全日潮无潮点位置比历史同潮图上的位置更靠近朝鲜海岸。计算还发现在五岛列岛西北方向存在一个  $M_2$  潮流的圆流点。能通量计算表明,潮能系从济州岛和九州之间的通道进入本海区。除本海区消耗外,部分能量通过对马岛和九州之间的通道进入日本海,部分则通过济州岛和朝鲜半岛之间的通道流向黄海。

朝鲜海峡是连接东海和日本海的一条重要通道。掌握这里潮波运动情况对于我国的海上交通运输,渔业捕捞和军事方面都有现实意义。1974—1975年间,我们曾采用二维线性流体动力学方程对该海峡进行过潮波运动的数值模拟,并用数值计算结果出版了该区的潮流永久预报图表集。

本文是在上述工作的基础上,作了一些调整和改进,重新计算的结果。这次计算同时模拟了全日、半日和浅水潮。全日和半日潮计算结果与实测值符合良好。由于缺乏实测资料,对于  $M_4$  分潮的计算结果难以给出全面的评价,为此本文暂不讨论浅水潮计算结果。这次计算还给出了全日和半日潮波的能通量。

### 一、计算方法

#### 1. 支配方程

我们采用下列直角坐标系的二维潮波基本方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{k(u^2 + v^2)^{1/2} u}{h + \zeta} - A \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{k(u^2 + v^2)^{1/2} v}{h + \zeta} - A \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(h + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h + \zeta)v]}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

其中,  $t$ ——时间;  $x, y$ ——Cartesian 坐标, 本计算中其正向分别取向东和向北;  $u, v$ ——

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1392 号。  
收稿日期: 1985 年 12 月 16 日。

潮流在  $x, y$  方向的分量;  $\zeta$ ——从未扰动海面起算的水位高度;  $h$ ——未扰动水深,  $g$ ——重力加速度;  $f$ ——Coriolis 参量, 由于朝鲜海峡尺度较小, 本计算中取为常数:  $8.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ;  $k$ ——海底摩擦拖曳系数, 计算中取 0.003;  $A$ ——水平涡动粘滞系数, 计算中取  $10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

## 2. 网格和差分方程

采用有限差分方法离散方程(1)–(3), 差分网格见图 1。

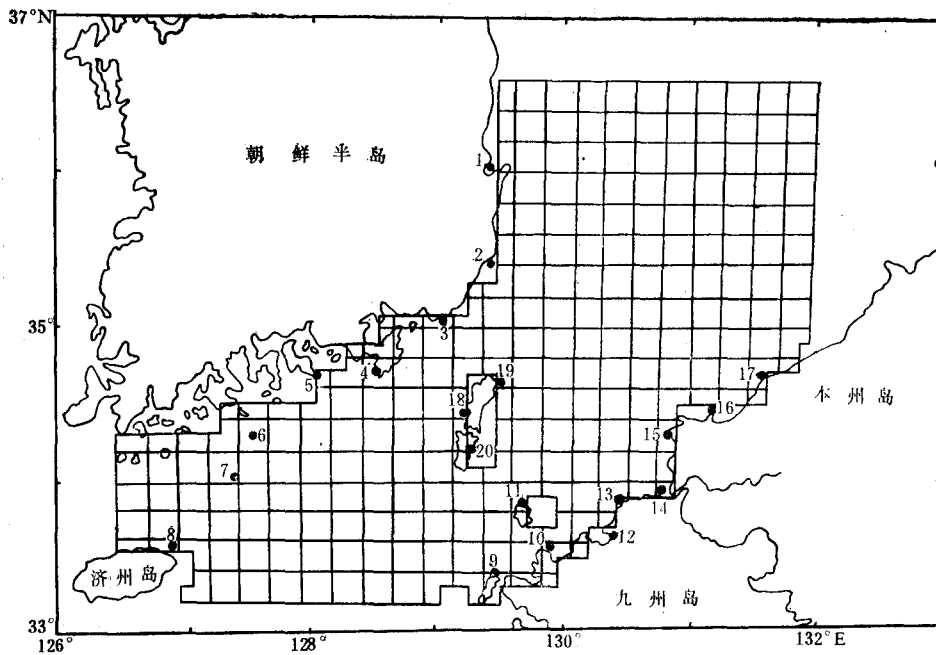


图 1 计算网格(站名见表 1)  
(黑点表示验潮站)

计算采用正方形网格, 两条网格线之间的距离为  $2\Delta s$ , 本计算中  $\Delta s = 6 \text{ n mile}$ 。为了得到  $u, v, \zeta$  的中心差分, 使它们相间布点。两条网格线的交点为  $\zeta$  点, 在东西方向上离  $\zeta$  点  $\Delta s$  处为  $u$  点, 在南北方向上离  $\zeta$  点  $\Delta s$  处为  $v$  点。对边界之内的全部  $u, v$  点都给出了水深  $h$  值。

对时间  $t$  的离散也采用交错网格。当  $t = n\Delta t$ ,  $n = \text{偶数}$  时, 为  $u, v$  层;  $n = \text{奇数}$ , 为  $\zeta$  层。于是对  $l = \text{奇数}$ ,  $m = \text{偶数}$ ,  $n = \text{偶数}$  时, 得到内点  $u$  的差分方程为:

$$\begin{aligned}
 u_{l,m,n} = & u_{l,m,n-2} - \frac{\Delta t}{2\Delta s} [u_{l,m,n-2}(u_{l+2,m,n-2} - u_{l-2,m,n-2}) \\
 & + \bar{v}_{l,m,n-2}(u_{l,m+2,n-2} - u_{l,m-2,n-2})] \\
 & + 2\Delta t f \bar{v}_{l,m,n-2} - \frac{\Delta t}{\Delta s} g(\zeta_{l+1,m,n-1} - \zeta_{l-1,m,n-1}) \\
 & - \frac{2\Delta t k(u_{l,m,n-2}^2 + \bar{v}_{l,m,n-2}^2)^{1/2} u_{l,m,n-2}}{\left| h_{l,m} + \frac{1}{2}(\zeta_{l+1,m,n-1} + \zeta_{l-1,m,n-1}) \right|}
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{\Delta t}{2\Delta s^2} A(u_{l+2,m,n-2} + u_{l-2,m,n-2} + u_{l,m+2,n-2} + u_{l,m-2,n-2} - 4u_{l,m,n-2}) \quad (4)$$

对于  $l = \text{偶数}$ ,  $m = \text{奇数}$ ,  $n = \text{偶数}$  得到内点  $v$  的差分方程为:

$$\begin{aligned} v_{l,m,n} = & v_{l,m,n-2} - \frac{\Delta t}{2\Delta s} [\bar{u}_{l,m,n-2}(v_{l+2,m,n-2} - v_{l-2,m,n-2}) \\ & + v_{l,m,n-2}(v_{l,m+2,n-2} - v_{l,m-2,n-2})] \\ & - 2\Delta t f \bar{u}_{l,m,n-2} - \frac{\Delta t}{\Delta s} g(\zeta_{l,m+1,n-1} - \zeta_{l,m-1,n-1}) \\ & - \frac{2\Delta t k (\bar{u}_{l,m,n-2}^2 + v_{l,m,n-2}^2)^{1/2} v_{l,m,n-2}}{\left[ h_{l,m} + \frac{1}{2} (\zeta_{l,m+1,n-1} + \zeta_{l,m-1,n-1}) \right]} \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta s^2} A(v_{l+2,m,n-2} + v_{l-2,m,n-2} + v_{l,m+2,n-2} \\ & + v_{l,m-2,n-2} - 4v_{l,m,n-2}) \end{aligned} \quad (5)$$

对于  $l = \text{偶数}$ ,  $m = \text{偶数}$ ,  $n = \text{奇数}$  得到内点  $\zeta$  的差分方程为:

$$\begin{aligned} \zeta_{l,m,n} = & \zeta_{l,m,n-2} - \frac{\Delta t}{\Delta s} \left\{ \left[ h_{l+1,m} + \frac{1}{2} (\zeta_{l+2,m,n-2} + \zeta_{l,m,n-2}) \right] u_{l+1,m,n-1} \right. \\ & - \left[ h_{l-1,m} + \frac{1}{2} (\zeta_{l-2,m,n-2} + \zeta_{l,m,n-2}) \right] u_{l-1,m,n-1} \\ & + \left[ h_{l,m+1} + \frac{1}{2} (\zeta_{l,m+2,n-2} + \zeta_{l,m,n-2}) \right] v_{l,m+1,n-1} \\ & \left. - \left[ h_{l,m-1} + \frac{1}{2} (\zeta_{l,m-2,n-2} + \zeta_{l,m,n-2}) \right] v_{l,m-1,n-1} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} \bar{u}_{l,m} &= \frac{1}{4} (u_{l-1,m-1} + u_{l+1,m-1} + u_{l+1,m+1} + u_{l-1,m+1}), \\ \bar{v}_{l,m} &= \frac{1}{4} (v_{l-1,m-1} + v_{l+1,m-1} + v_{l+1,m+1} + v_{l-1,m+1}). \end{aligned}$$

$\Delta t$  为时间步长, 为了使差分计算稳定,  $\Delta t$  需满足 Courant-Friedrichs-Lewy 条件:

$$C_r \equiv \frac{\Delta t}{\Delta s} (2gh_{\max})^{1/2} \leq 1 \quad (7)$$

$h_{\max}$  为计算海区中最大水深, 本计算中采用  $\Delta t = 53.23125s$ , 即一个太阴日的 1/1680。

### 3. 边界条件

在海岸边界线上我们取法向速度等于零, 即

$$\text{对闭边界 } u \text{ 点, } u = 0; \text{ 对闭边界 } v \text{ 点, } v = 0 \quad (8)$$

在与日本海及东海相沟通的开边界上, 取  $\zeta$  为已知的时间  $t$  的函数,

$$\zeta = \sum_{i=1,2} H_i \cos(\sigma_i t - \theta_i) \quad (9)$$

其中  $H_i$ ,  $\theta_i$ ,  $\sigma_i$  分别为全日, 半日代表分潮的振幅、迟角和角速率。与文献[1]作法

一样,在这里我们取  $M_1$  分潮为半日潮的代表分潮。取

$$H_1 = (H_{K_1} + H_{O_1})/2, \theta_1 = (\theta_{K_1} + \theta_{O_1})/2, \sigma_1 = (\sigma_{K_1} + \sigma_{O_1})/2$$

作为全日潮的代表分潮。这样处理不仅能够同时模拟全日和半日的潮汐运动,对于节约计算机时间和存贮量都会收到满意的效果,同时,由于全日潮波的周期  $T = 2\pi/\sigma_1$ ,正好为半日潮波的 2 倍,所以对于判断我们模拟的潮汐振动是否达到稳定以及在用模拟数据计算调和常数时,都带来很大的方便。

朝鲜海峡除日本和南朝鲜沿岸有潮汐调和常数外,南、北口的开边界上都没有实测水位记录,这对于开边界水位  $\zeta$  值的给定带来很大困难。计算中采用尝试法对边界条件进行了多次调整,最后获得满意结果。

#### 4. 计算过程

对于潮汐潮流的数值模拟来说,给出接近实际情况的初值,能够节省计算机时间,使计算很快达到稳定。但是,一般来说,这样做是困难的。我们在计算中取初始“冷状态”,即,

$$\text{当 } n = 0 \text{ 时, 取 } u = v = 0 \quad (10)$$

$$\text{当 } n = 1 \text{ 时, 取 } \zeta = 0 \quad (11)$$

从  $n = 2$  开始,分别按(4)–(6)计算  $u$ ,  $v$  场和  $\zeta$  场的内点。按(8), (9) 计算闭边界点和开边界点。

我们预先给定一个稳定程度的判据  $\epsilon$ , 本计算中对于潮位取  $\epsilon = 0.5 \text{ cm}$ , 对于潮流取  $\epsilon = 0.5 \text{ cm/s}$ , 每计算三分之一周期,保留一片  $u$ ,  $v$  场和一片  $\zeta$  场。当计算进行一个周期之后,每计算三分之一周期,就将计算所得的潮位和潮流值与前一个周期相应值进行比较,求出最大差值。若最大差值连续三次小于预先给定的  $\epsilon$ , 则认为初始扰动已经消失,潮汐振动达到稳定状态。

在计算前需预先选定好一定数目的  $\zeta$  点。选定这些点的数目和位置应根据计算结果的用途,绘制同潮图是否方便,潮汐、潮流性质随空间的分布以及计算机的容量来确定。当计算达到稳定以后,再继续计算一个周期,并于每一太阴时,保留选定  $\zeta$  点的  $\zeta$ ,  $u$ ,  $v$  计算结果。其中  $u$  采用  $\zeta$  点左右两个  $u$  点的平均值,  $v$  采用  $\zeta$  上下两个  $v$  点的平均值。将保留下的 24 个太阴时的  $u$ ,  $v$ ,  $\zeta$  计算值分别记为  $u^{(i)}$ ,  $v^{(i)}$ ,  $\zeta^{(i)}$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 23$ ), 然后利用这些保留下来的值计算选定的  $\zeta$  点的调和常数,公式如下:

$$(U_0, V_0) = \frac{1}{24} \sum_{k=0}^{23} (u^{(k)}, v^{(k)}) \quad (12)$$

$$(U_j \cos \xi_j, V_j \cos \eta_j) = \frac{1}{12} \sum_{k=0}^{23} \left[ (u^{(k)}, v^{(k)}) \cos \frac{jk\pi}{12} \right] \quad (13)$$

$$(U_j \sin \xi_j, V_j \sin \eta_j) = \frac{1}{12} \sum_{k=0}^{23} \left[ (u^{(k)}, v^{(k)}) \sin \frac{jk\pi}{12} \right] \quad (14)$$

$$H_0 = \frac{1}{24} \sum_{k=0}^{23} \zeta^{(k)}, \quad (15)$$

$$H_j \cos \theta_j = \frac{1}{12} \sum_{k=0}^{23} \left[ \zeta^{(k)} \cos j \left( \frac{k\pi}{12} + \sigma_1 \Delta t \right) \right] \quad (16)$$

$$H_j \sin \theta_j = \frac{1}{12} \sum_{k=0}^{23} \left[ \zeta^{(k)} \sin j \left( \frac{k\pi}{12} + \sigma_1 \Delta t \right) \right] \quad (17)$$

( $j = 1, 2, \dots, 11$ )

式中,  $U, \xi$  为潮流  $x$  分量的振幅和迟角;  $V, \eta$  为  $y$  分量的振幅和迟角。

## 二、计算结果与实测值的比较

计算中我们取  $K_1$  和  $O_1$  分潮的平均值作为全日潮的代表分潮,如同文献[1]和[2],我们把这个分潮记为  $m_1$ 。我们分别统计了图 1 中所标出的 20 个站的计算所得  $m_1$  和  $M_2$  分潮的调和常数,与这些站用实测资料分析所得调和常数振幅和迟角偏差的绝对值  $\Delta H$  和  $\Delta \theta$ ,列在表 1 中。可以看出,计算结果与实测结果很接近。

表 1  $m_1$  和  $M_2$  分潮计算和实测结果比较

No.	站 名	$m_1$		$M_2$	
		$\Delta H$	$\Delta \theta$	$\Delta H$	$\Delta \theta$
1	迎日湾	0	3	1	11
2	蔚山湾	0	5	3	2
3	釜山	2	10	6	2
4	猪仇味	1	2	3	3
5	弥助湾	1	8	5	4
6	巽竹岛	3	4	1	10
7	巨文岛	1	5	5	2
8	牛岛水道	0	1	2	6
9	薄香湾	0	0	2	2
10	呼子	0	7	4	5
11	胜本浦	2	13	1	6
12	福冈湾	3	7	4	2
13	神凑	4	0	6	2
14	南风泊	2	2	2	6
15	特牛	4	2	6	3
16	濑户崎	2	4	2	5
17	江崎	2	1	1	12
18	網	1	5	4	3
19	佐须奈	3	5	7	6
20	严原	3	4	6	7
平 均		2	4	4	5

注:  $\Delta H$  的单位为 cm,  $\Delta \theta$  的单位为 ( $^{\circ}$ )。

## 三、计算结果的讨论

### 1. 半日分潮

图 2 是  $M_2$  分潮的等振幅线和等迟角线的分布图。从图 2 可推断,朝鲜海峡的半日潮波主要是通过东海传入的太平洋潮波来维持的。潮波由济州岛和日本西南海岸之间北上,进入朝鲜海峡后分成两股,一股经对马海峡继续北上;另一股经济州海峡进入黄海。

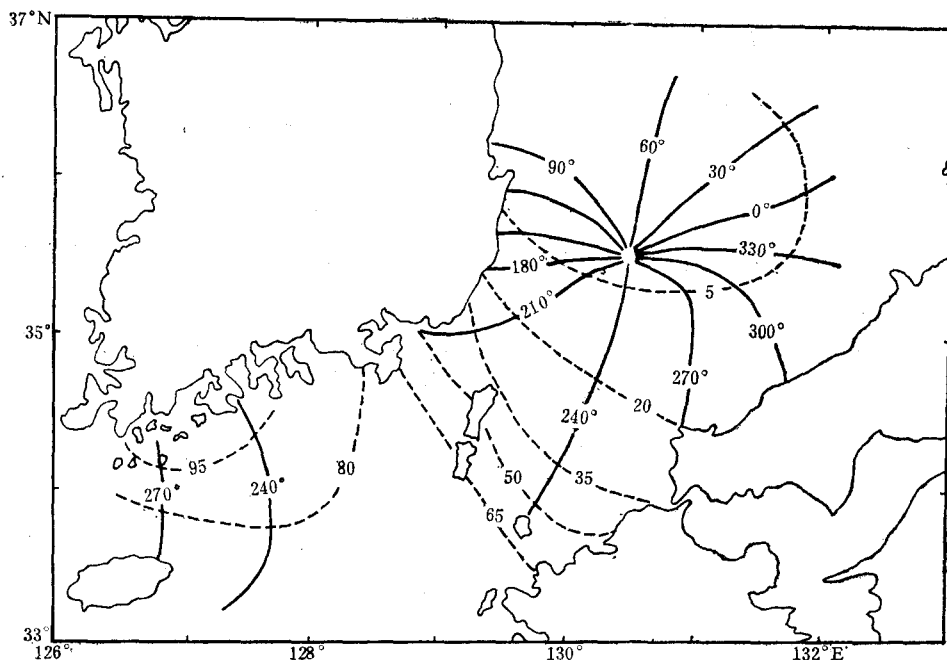


图2  $M_2$  分潮的等振幅线和等迟角线

--- 等振幅线(单位: cm); — 等迟角线[单位: (°)]

从图中还可看出,北上潮波进入日本海后能量消耗很小,形成一支沿朝鲜半岛东岸南下的反射波。北上潮波和南下潮波互相迭加,约在  $35^{\circ}32'N$ ,  $130^{\circ}30'E$  附近形成一个  $M_2$  分潮的无潮点,同潮时线呈逆时针方向旋转。总的来看,潮差由西向东北逐渐减小,在无潮点附近及其以北的深水海区,  $H_{M_2}$  一般不超过 5cm。最大振幅出现在济州岛对岸的朝鲜半岛南岸,  $M_2$  分潮最大振幅约 100cm。

$M_2$  分潮高潮时,在九州西北岸和本州西北岸的西南段,由西南向东北逐渐推迟,外之浦比薄香湾约推迟 2.5h。在朝鲜半岛东海岸,  $M_2$  分潮高潮时由北向南逐渐推迟;例如巽竹岛比迎日湾约推迟 5h。朝鲜半岛南岸则由东向西推迟,其西段尤为显著。 $M_2$  潮流计算结果如图 3, 4。

图 3 明显地显示出地形对潮流的制约作用,海峡中绝大部分海区潮流主要方向与海峡走向相一致。沿海峡两岸各有一条狭长的海区,其潮流为逆时针方向旋转。其余绝大部分海区潮流为顺时针方向旋转。在计算海区北部有一逆时针旋转海区,但这里潮流十分弱,且靠近计算海区的开边界,其可靠性较差。

从图 4 可以看出,海峡中  $M_2$  潮流有三个强流区。最强流出现在朝鲜半岛西南角。 $M_2$  潮流椭圆长半轴达  $60\text{cm/s}$  以上。另外两个强流区位于对马岛的两侧,流速约  $40\text{cm/s}$ 。流速最弱的区域一个在日本五岛列岛西北,范围不大,流速小于  $10\text{cm/s}$ ; 另外一个在海峡北口与日本海相连接的海区,由于海面变得开阔,水深骤然变深,形成一个范围较大的弱流区,在深海处  $M_2$  潮流一般不大于  $5\text{cm/s}$ 。

在海峡的中部  $M_2$  潮流的等潮时线稀疏。但在海峡的两口等潮时线密集。在北口,

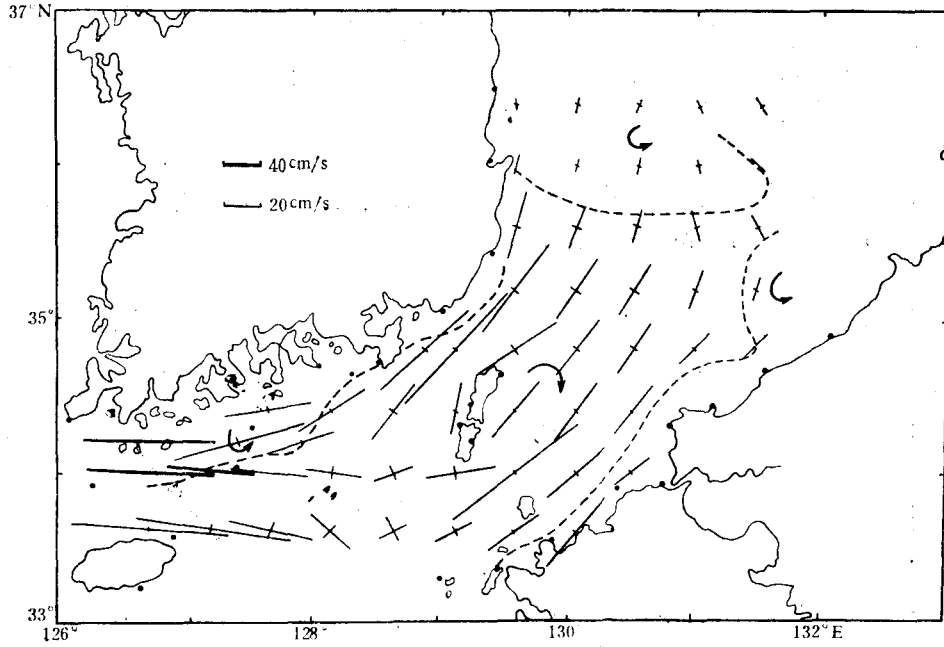


图 3  $M_2$  潮流椭圆长短轴分布  
(虚线表示潮流旋转方向不同区域的分界线; 箭头表示潮流的旋转方向)

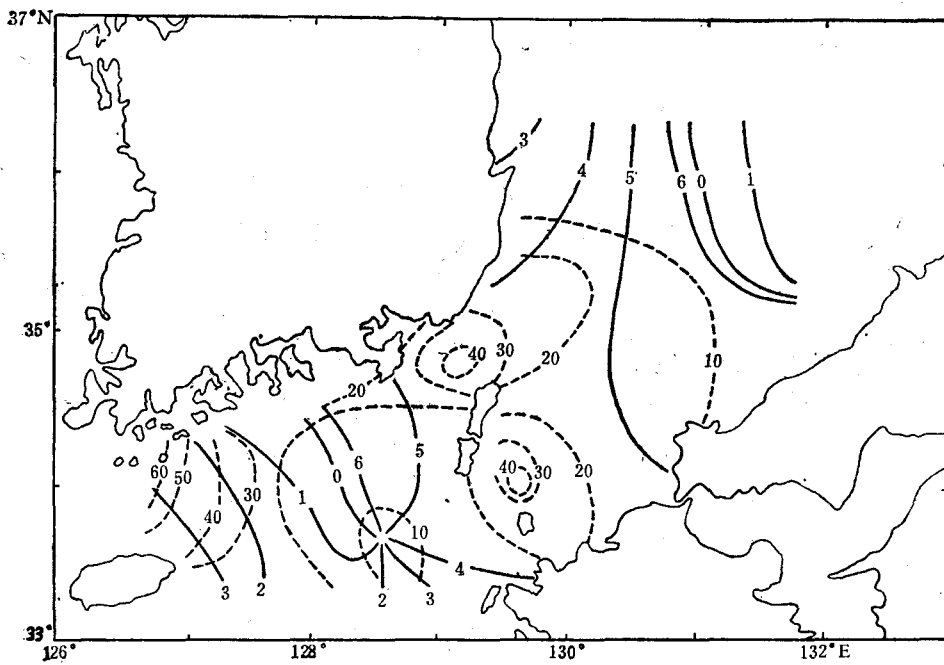


图 4  $M_2$  潮流椭圆等振幅线和等迟角线  
----- 等振幅线(单位: cm/s); —— 等迟角线(单位: h)

由朝鲜半岛向日本沿岸最大流出现的时间逐渐推迟。在南端约  $33^{\circ}40'N$ ,  $128^{\circ}35'E$  附近出现一个逆时针方向旋转的等潮流时线的圆流点。我们认为, 这个计算得到的圆流点在实际上很可能也是存在的。但是, 这里距离南部开边界很近, 边界值导入的误差可能对该圆流点的位置产生一定的影响, 圆流点的确切位置尚需进一步验证。

## 2. 全日分潮

如同文献[1],[2]一样, 我们这里所讨论的全日潮波系指  $K_1$  和  $O_1$  分潮的平均值, 记为  $m_1$  分潮。图 5 为  $m_1$  分潮的同潮图。

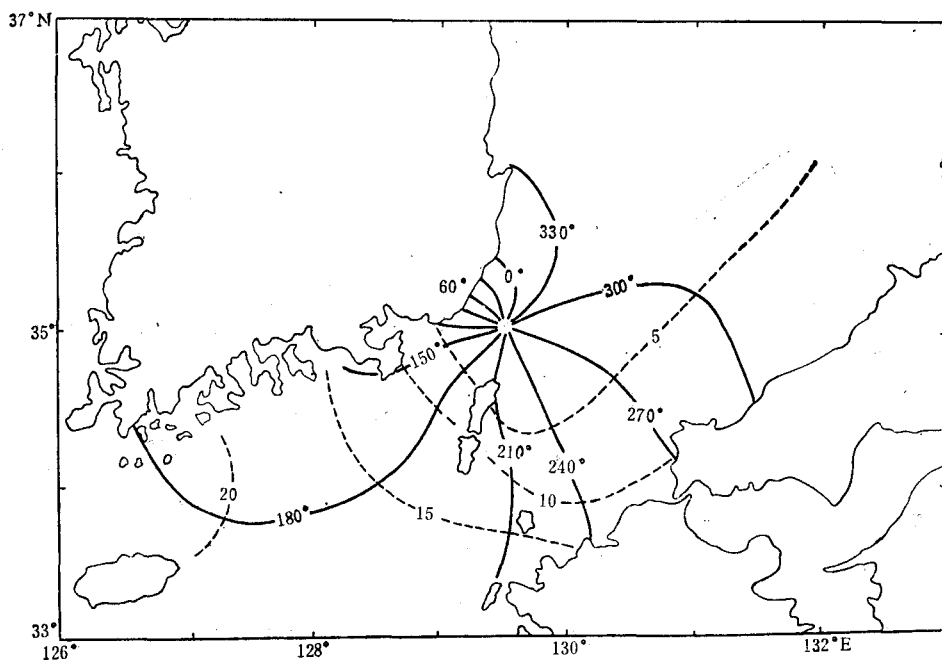


图 5  $m_1$  分潮等振幅线和等迟角线

----- 等振幅线(单位: cm); — 等迟角线(单位:  $^{\circ}$ )

朝鲜海峡全日潮波运动与  $M_2$  潮波大体相似, 由西南向东北传播的太平洋潮波与从日本海沿朝鲜半岛南下的反射波相迭加, 形成一个逆时针方向旋转的无潮点。无潮点的位置约在  $35^{\circ}02'N$ ,  $129^{\circ}30'E$  附近, 这个无潮点要比 Nishida<sup>[3]</sup> 给出的相应无潮点更靠近朝鲜海岸。 $m_1$  分潮振幅由西南向东北减小。无潮点附近及其以北海区, 全日潮振幅很小。大部分海区不大于 5cm。济州岛以北海区全日潮振幅在 20cm 以上。

沿朝鲜海峡东南海岸由西南向东北, 全日潮高潮时逐渐推迟。在海峡的西北岸, 全日潮高潮时由东北向西南推迟。

图 6, 7 是  $m_1$  潮流椭圆长短轴以及等振幅和等迟角线的分布。

全日潮流主要方向与海峡走向大体一致, 呈西南-东北方向。除海峡两岸各有一狭长区潮流为左旋以外, 整个海峡全日潮流基本上为顺时针方向旋转。

在对马岛的两侧, 与半日潮流强流区相对应, 存在着两个全日潮流强流区。在这两个强流区中,  $O_1$  与  $K_1$  之和可达 1kn 左右。与半日潮流强流区不同, 济州岛以北区域中  $m_1$



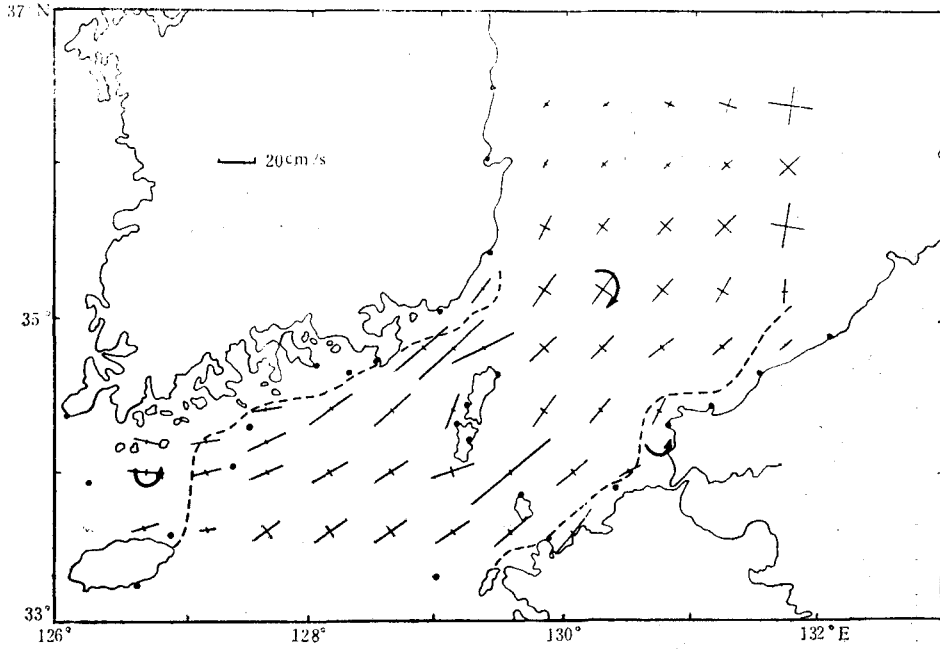


图 6  $m_1$  潮流椭圆长短轴分布  
(虚线表示潮流旋转方向不同区域的分界线；箭头表示潮流的旋转方向)

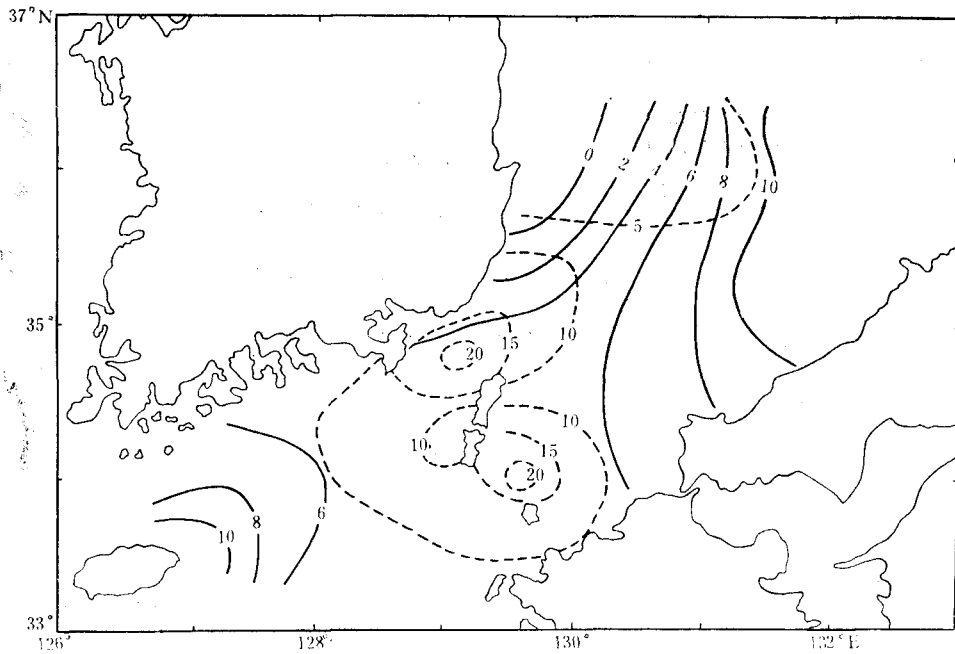
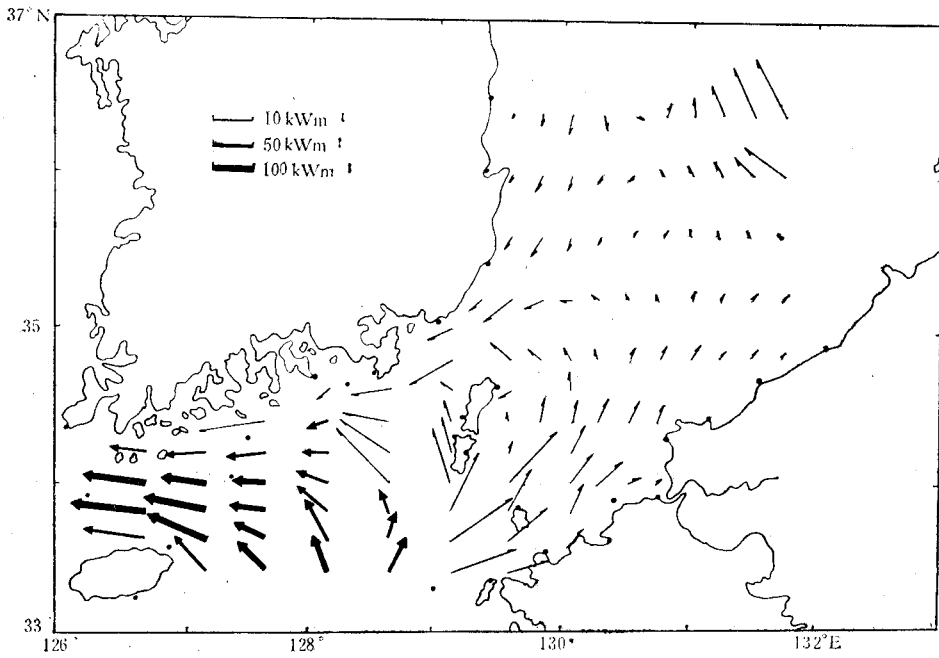
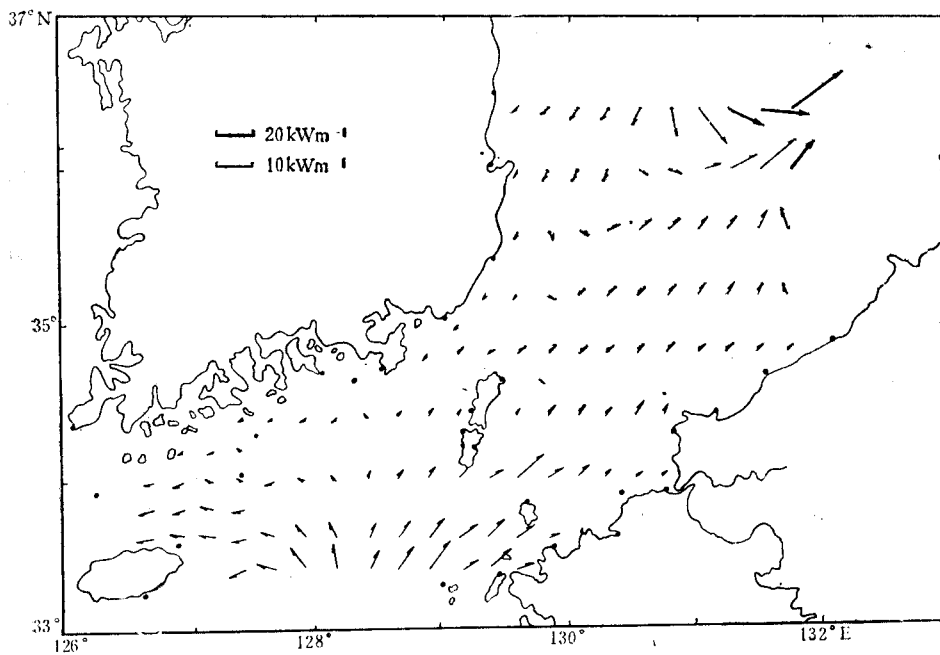


图 7  $m_1$  潮流椭圆等振幅线和等迟角线  
---- 等振幅线(单位: cm/s); —— 等迟角线(单位: h)

潮流椭圆的振幅一般不超过 10cm/s。海峡北部深水区是全日潮弱流区。海峡北口，最大潮流同潮时线密集。

图8  $M_2$  分潮能通量密度图9  $m_1$  分潮能通量密度

### 3. 能通量

朝鲜海峡  $m_1$  和  $M_2$  的能通量密度分布见图 8, 9。半日潮能量主要由海峡南口进入, 中部较两侧为强。从南口进入的能量分成三股: 一股直接经济州岛以北流入黄海; 一股

流向北,在对马岛的左侧逆时针旋转,沿朝鲜半岛南海岸流入黄海;左侧的一股经对马海峡沿日本海岸流向东北。左侧一股约在  $34^{\circ}50'N$  附近又分成两个分支:一支继续北上,在海峡北口逐渐偏向西北,流入日本海;另一支向左绕过对马岛沿朝鲜半岛南海岸流向黄海。

此外,在海峡北口,还有一股较弱的半日潮能沿朝鲜半岛由北向南,然后转向西与沿朝鲜半岛南岸流入黄海的潮能相汇合。

全日潮在南口进入的能量流动方向与半日潮相仿,主要通过对马岛和九州之间的通道进入日本海。沿朝鲜半岛南下的能流只能抵达对马海峡北部,对马海峡南部的能流则由西南向东北进入日本海。在图 9 可看到在计算海区的东北角,能通量值颇大。由于此地处于两个开边界的交汇处,计算的可靠性可能较差。准确结果有待将朝鲜海峡与日本海联合计算来确定。

总的来看,潮能系从济州岛和九州之间的通道进入日本海,部分则通过济州岛和朝鲜半岛之间的通道流向黄海,在对马海峡,能流向西(对半日潮)或很弱(对全日潮)。

### 参 考 文 献

- [1] 方国洪、杨景飞, 1985。渤海潮运动的一个二维数值模型。海洋与湖沼 16(5): 337—346。
- [2] 方国洪、杨景飞、赵绪才, 1985。台湾海峡潮汐和潮流的一个数值模型。海洋学报 7(1): 12—20。
- [3] Nishida, H., 1980. Improved tidal charts for the western part of the North Pacific Ocean. *Report of Hydrographic Researches* 15: 55—70.

## NUMERICAL COMPUTATION OF TIDES AND TIDAL CURRENTS IN THE KOREA STRAIT\*

Yang Jingfei

(*Institute of Marine Scientific and Technological information, SOA, Tianjin*)

Fang Guohong

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

### ABSTRACT

A finite difference solution of the diurnal and semidiurnal tides and tidal currents in the Korea Strait is obtained with satisfactory agreement to the observed distribution. The computed diurnal tide-amphidromic point to the southeast of the Korean Peninsula is located closer to the Korea coast than that plotted in the historical cotidal charts. An  $M_2$  current-amphidromic point is found to the northwest of Goto-retto. The energy fluxes for diurnal and semidiurnal tides are also calculated.

\* Contribution No. 1392 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.