

港灣操船運動模擬計算系統之研究

執行單位

海岸工程組

計畫主持人

洪憲忠副研究員

參與人員

楊怡芸技工

中文摘要

本所與台大造船及海洋工程研究所邱逢琛教授合作發展進出港操船模擬計算系統。該系統擴充數年前（邱、曾）採用日本的深水域 MMG 數學模式所發展的平靜開闢深水域中之操船模擬系統。

目前該操船模擬系統能在給定港池佈置及其內外風、浪、流分布下進行階段式操船指令，以供港埠規劃時進行進出港操船評估之用。

本文，先將日本的深水域 MMG 操船模式做一簡要的整理。其次利用此操船模擬計算系統，參考蘇澳港現行之進出港操船習慣，進行蘇澳港船舶在各種海況下進出港之操船模擬計算，藉此操船模擬增進對操船問題之掌控及了解，以供更進一步解決操船問題之依據及未來發展之方向。

目錄

中文摘要.....	1
目錄.....	II
表目錄.....	V
圖目錄.....	IV
符號說明.....	IX
第一章 前言.....	1
第二章 操船模擬數學模式.....	3
第三章 環境外力.....	7
3-1 主船體流體動力.....	7
3-2 螺旋力.....	9
3-3 舵力.....	11
3-4 主機特性.....	14
3-5 風力.....	16
3-6 波浪漂流力.....	17
3-7 潮流力.....	18
第四章 模式之驗證.....	19
4-1 驗證用船舶.....	19
4-2 計算結果與比較.....	19
第五章 港埠座標及風浪流資料之處理.....	21
第六章 模擬計算流程.....	22
第七章 計算實例.....	24

7-1	供試港埠	24
7-2	操船模擬用船舶	24
7-3	蘇澳港現行操船方式	25
7-4	模擬操船之環境條件	26
7-5	計算結果之探討	27
第八章	結論	30
參考文獻	31

表目錄

表 4-1	ESSO OSAKA 油輪主要尺寸.....	33
表 7-1	78 年進出蘇澳港船舶之船長統計.....	34
表 7-2	供試油輪之主要尺寸.....	35
表 7-3	模擬操船海況之 1.....	36
表 7-4	模擬操船海況之 2.....	37

圖目錄

圖 2-1	座標系	38
圖 2-2	三維船舶運動	39
圖 3-1	舵力圖	40
圖 4-1	水深船深比為 4.2 時, ESSO OSAKA 35° 左迴旋試驗之實 船試航及模擬計算結果	41
圖 4-2	水深船深比為 4.2 時, ESSO OSAKA 10° Zig-Zag 試驗之 實船試航及模擬計算結果	42
圖 4-3	水深船深比為 4.2 時, ESSO OSAKA 10° 螺旋試驗之實船 試航及模擬計算結果	43
圖 5-1	港埠座標系統	44
圖 6-1	風浪流資料之取法	45
圖 6-2	操船系統流程圖	46
圖 7-1	蘇澳港平面佈置圖	48
圖 7-2	78 年進出蘇澳港船舶之船長統計	49
圖 7-3	蘇澳港現行進港操船航線圖	50
圖 7-4	蘇澳港漲潮流況	51

圖 7-5	蘇澳港退潮流況	52
圖 7-6	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	53
圖 7-7	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..	54
圖 7-8	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	55
圖 7-9	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	56
圖 7-10	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	57
圖 7-11	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	58
圖 7-12	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	59
圖 7-13	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	60
圖 7-14	為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度， 週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡	61

- 圖 7-15 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡62
- 圖 7-16 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..63
- 圖 7-17 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..64
- 圖 7-18 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..65
- 圖 7-19 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..66
- 圖 7-20 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..67
- 圖 7-21 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..68
- 圖 7-22 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡69
- 圖 7-23 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 ..70
- 圖 7-24 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡71

- 圖 7-25 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，
週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 .. 72
- 圖 7-26 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡 73
- 圖 7-27 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 74
- 圖 7-28 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡 75
- 圖 7-29 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 76
- 圖 7-30 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡 77
- 圖 7-31 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 78
- 圖 7-32 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡 79
- 圖 7-33 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週
期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡 80

符號說明

A_f	水面上船體正向投影面積
\bar{A}_f	水面下船體正向投影面積
A_s	水面上船體側向投影面積
\bar{A}_s	水面下船體側向投影面積
A_R	舵面積
C_p	螺槳之流動校正係數
C_s	主船體之流動校正係數
C_N	舵正向力係數
F_D	舵之阻力
F_L	舵之升力
F_N	舵之正向作用力 (normal force)
F_R	舵之總受力
F_T	舵之切向作用力 (tangential force)
g	重力加速度
Gxyz	船體固定座標系 (body-fixed coordinate)
I_{xx}	船體繞 Gx 軸之質量慣性矩 (mass moment of inertia)
I_{prop}	螺槳在空氣中之極慣性矩
I_{ps}	軸系(不含螺槳)之極慣性矩
I_{zzG}	船體繞 Gz 軸之質量慣性矩 (mass moment of inertia)
J_{xx}	橫搖附加質量慣性矩
J_{pp}	螺槳之附加極慣性矩 (added polar moment of inertia)
J_{zz}	平擺附加質量慣性矩
J_{zzG}	相對於重心G之平擺附加質量慣性矩
K	作用於船體之x向力矩(橫搖力矩)
K'_W	風力係數
K'_C	潮流力係數
m	船體質量

m_x	縱移附加質量
m_y	橫移附加質量
n	螺槳轉速(軸系轉速)
\dot{n}	軸系轉動加速度
N	作用於船體之Z向力矩(平擺力矩)
N'_W	風力係數
N'_{WV}	波浪漂流力係數
N'_C	潮流力係數
N'_β	線性流體阻尼力矩係數
N'_r	線性流體阻尼力矩係數
N'_{NL}	無因次非線性流體阻尼力矩
$-N(\dot{\phi})$	橫搖阻尼力矩
N_p	誘導產生之作用於船體之不平衡平擺力矩
$O_xO_yO_zO_0$	地面固定座標系 (earth-fixed coordinate)
p	螺槳節距
P	船體固定座標系之轉動角速度在Gx軸之分量
PS^*	主機所產生之馬力
Q	作用於軸系(含螺槳)之扭矩
r	船體固定座標系之轉動角速度在Gz軸之分量
s	滑流比 (slip ratio) $(=1-u_p/n_p)$
t_p	螺槳推力減少係數
t_R	舵之阻力減少係數
u	船體重心移動速度在Gx軸的分量
\dot{u}	船體重心移動加速度在Gx軸的分量
u_p	螺槳之有效軸向入流 $(=u(1-\omega_p))$
u_R	舵之軸向有效入流速度
u_{RO}	螺槳後流 (Propeller race) 外舵之有效軸向入流
u_{RP}	螺槳後流內舵之有效軸向入流
U	船重心移動速度
U_R	舵之有效入流速度

v	船體重心移動速度在 Gy 軸的分量
\dot{v}	船體重心移動加速度在 Gy 軸的分量
V_R	相對風速
\bar{V}_R	相對潮流速度
v_R	舵之橫向有效入流速度
x_R	舵之 X 座標
X	作用於船體之 X 向力(縱移力)
$X_0(u)$	船舶直進阻力
X'_W	風力係數
X'_{wv}	波浪漂流力係數
X'_C	潮流力係數
X'_{ww}	由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數
X'_{vr}	由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數
X'_{rr}	由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數
X'_{wvv}	由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數
X_{\odot}	船舳之 X 座標
Y_{HO}	流體阻尼力
Y	作用於船體之 y 向力(橫移力)
Y'_W	風力係數
Y'_{wv}	波浪漂流力係數
Y'_C	潮流力係數
Y_P	螺槳倒轉時，產生反向流，誘導產生之作用於船體之不平衡側向力
Y'_β	線性流體阻尼力係數
Y'_r	線性流體阻尼力係數
Y_{NL}'	無因次非線性流體阻尼力
Z_H	主船體流體橫移力作用點與重心 G 之垂直距離
Z_R	舵之 Z 座標
α_R	舵之有效入流攻角
α_C	相對流向角
δ	舵角

ω_p	螺槳之有效跡流係數
ω_R	舵之有效跡流係數
Δu	螺槳後方無窮遠與入流處之流速差 ($= np - u_p$)
β_p	入射水動力角 (hydrodynamic angle of incidence)
η	螺槳直徑與舵高之比
β	船體偏流角
ω_{RO}	船舶直進時舵之有效跡流係數
Λ	舵之幾何展弦比
ζ_a	有義波振幅
β_R	相對波向角
γ_R	相對風向角
ρ	水的密度
ρ_a	空氣的密度
ϕ	橫搖角
$\dot{\phi}$	橫搖角速度
$\ddot{\phi}$	橫搖角加速度
ψ	平擺角
$\dot{\psi}$	平擺角速度
$\ddot{\psi}$	平擺角加速度

第一章 前言

傳統上的港埠規畫普遍著重於港池遮蔽效應的考量上，而較忽略對船舶進出港操船的考慮，因此有可能形成進出港操船不易的港口佈置，而使港的功能大受影響。國外如日本港灣技術研究所早於十幾年前即注意及此，而導入了簡易式的操船模擬計算系統應用於港埠規畫上，而國內於近年對這方面的問題也已逐漸重視，並有利用大型操船模擬機進行操船模擬以檢討港埠碼頭佈置之案例。惟大型操船模擬機之主要功能是在於操船訓練，且由於使用成本頗高，故較適用於最終佈置的確認或操船方法的檢討上，至於初步階段的規畫評估則以使用簡易式操船模擬計算系統應是較佳的選擇。

台灣大學造船及海洋工程研究所(邱、曾)曾於數年前為了檢討船舶操縱性能建立了以日本的深水域 MMG 為數學模式，以評估平靜開闊深水域中的船舶操縱性能為目的之模擬計算系統，並附加簡易碼頭幾何輸入及階段式操船指令輸入功能而構成一在平靜深水的港內操船運動模擬計算系統。

本所於「蘇澳港防波堤改善工程規畫」之研究計劃內，與台大造船及海洋工程研究所邱逢琛教授合作發展進出港操船模擬計算系統。該系統擴充數年前(邱、曾)採用日本的深水域 MMG 數學模式所發展的平靜開闊深水域中之操船模擬系統。

擴充後之操船模擬系統能在給定港池佈置及其內外風、浪、流分布下進行階段式操船指令，以供港埠規劃時進行進出港操船評估之用。

本研究利用此操船模擬計算系統，參考蘇澳港現行之進出港操船習慣，進行蘇澳港船舶在各種海況下進出港之操船模擬計算，並藉此操船模擬增進對操船問題之掌控及了解，以供更進一步解決操船問題之依據及未來發展之方向。

本文共分八章。第一章前言，第二章介紹本操船模式，第三章對操船時所受外力個別簡略敘述，第四章說明本模式之驗證情形，第五章說明相關資料之輸入，第六章說明程式之計算流程，第七章為計算實例，第八章為結論。

第二章 操船模擬數學模式

本數學模式[1][2]主要參考日本MMG之研究成果，運動方程式乃縱移、橫移、平擺及橫搖四個自由度之藕合運動方程式。此外，並考慮操縱過程中不同型式之主機(蒸汽渦輪機(steam turbine)及低速柴油機(low speed Diesel engine))之主機轉速變動。

目前本模式適用於深水中之操船模擬外，根據Yoshimura[8]之研究，若能適當考慮相關流體力係數之淺水效應，則亦可適用於淺水中之操縱運動模擬。

座標系如圖2-1所示。地面固定座標系(earth-fixed coordinate)為 $Ox_0y_0z_0$ ，船體固定座標系(body-fixed coordinate)為 $Gxyz$ 。其中 O 為地面上任一點， G 為船體重心， Oz_0 軸垂直指向地心， Gx 軸位於船體左右對稱面上，並與水平面平行。假設：

- (a) 地球自轉及公轉運動對船舶操縱運動之影響甚小，可忽略。
- (b) 操船過程中之起伏(heave)與縱搖(pitch)運動甚小，可忽略，三維船舶運動如圖2-2所示。
- (c) $Gxyz$ 軸近似於船體之慣性主軸(principal axes)，由牛頓第二運動定律(Newton's second law of motion)推得以船體固定座標系來描述之操縱運動方程式如下：

$$m(\dot{u} - vr) = X$$

$$m(\dot{v} + ur) = Y \quad (2-1)$$

$$I_{zzG} \dot{r} = N$$

$$I_{xx} \dot{p} = K$$

(2-1) 式中 X, Y, N, K 分別代表作用於船體之 x 向力, y 向力, z 向力矩及 x 向力矩; m 為船體質量; I_{zzG} 與 I_{xx} 分別為船體繞 Gz 軸與 Gx 軸之質量慣性矩 (mass moment of inertia); u, v 分別為船體重心 G 之移動速度在 Gx 軸與 Gy 軸之分量; p, r 分別為船體固定座標系之轉動角速度在 Gx 軸與 Gz 軸之分量。一般而言, 船舶航行速率不大, 地球曲率 (curvature) 之影響可忽略, 故 p 與橫搖角速度, r 與平擺角速度之關係可簡化如下:

$$p = \dot{\phi}$$

$$r \cos \phi = \dot{\psi} \quad (2-2)$$

因一般操船運動橫搖角 ϕ 不大, $\cos \phi \approx 1$, 故 $r \approx \dot{\psi}$ 。因此, (2-1) 式可近似表成:

$$m(\dot{u} - vr) = X$$

$$m(\dot{v} + ur) = Y \quad (2-3)$$

$$I_{zzG} \ddot{\psi} = N$$

$$I_{xx} \ddot{\phi} = K$$

至於螺槳轉動方程式可表示如下:

$$(I_{prop} + I_{ps}) \dot{n} = Q \quad (2-4)$$

(2-4) 式中 Q 為作用於推進軸系 (含螺槳) 之扭矩； I_{prop} 為螺槳之極慣性矩 (polar moment of inertia)； I_{ps} 為連接主機與螺槳之軸系之極慣性矩。

(2-3) 及 (2-4) 式等號右邊諸外力，可進一步分解為：

$$\begin{aligned}
 X &= X_H + X_P + X_R + X_W + X_{WV} + X_C \\
 Y &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_W + Y_{WV} + Y_C \\
 N &= N_H + N_P + N_R + N_W + N_{WV} + N_C \\
 K &= K_H + K_P + K_R + K_W + K_{WV} + K_C \\
 Q &= Q_E + Q_P
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

(2-5) 式中下標 H, P, R, W, WV, C, E 分別代表船體 (hull)，螺槳 (propeller)，舵 (rudder)，風 (wind)，波浪 (wave)，潮流 (current)，主機 (engine)。由 (2-3) 式，(2-4) 式及 (2-5) 式可得考慮船舶縱移、橫移、平擺、橫搖及螺槳轉動之藕合運動方程式如下：

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr) &= X_H + X_P + X_R + X_W + X_{WV} + X_C \\
 m(\dot{v} + ur) &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_W + Y_{WV} + Y_C \\
 I_{ZZG}\ddot{\psi} &= N_H + N_P + N_R + N_W + N_{WV} + N_C \\
 I_{XX}\ddot{\phi} &= K_H + K_P + K_R + K_W + K_{WV} + K_C \\
 (I_{prop} + I_{ps})\dot{n} &= Q_E + Q_P
 \end{aligned} \tag{2-6}$$

(2-6) 式為一初始值問題，則於給定初始條件後，即可利用數值積分法 (numerical integration) 聯立解得每一瞬間之船舶運動與螺槳轉動狀態。於解出聯立運動方程式 (2-6) 式後，進行空間座標系與船體固定座標系之轉換如下

$$\dot{x}_0 = u \cos \psi - v \sin \psi$$

$$\dot{y}_0 = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (2-7)$$

經由 (2-7) 式之轉換，得船舶重心G相對於地面固定座標系之速度，最後可積分得重心G之運動軌跡。而相關資料如航向、航速之變化及偏流角 (drift angle) 大小等亦可由每瞬間之運動狀態一一求得。

第三章 環境外力

以下將分別對各環境外力之數學模式【1】【2】作一簡單的描述。

3-1 主船體流體動力

由於主船體流體力微係數(hydrodynamic derivatives of hull forces)之頻率相依性(frequency dependence)，導致船舶之瞬間運動狀態受過去運動歷程(past time history of motion)之影響，亦即所謂的記憶效應(memory effect)。若考慮此種效應，則運動方程式(2-6)式將變成積微分方程式(integral differential equation)，形式複雜，求解不易。然一般之操船運動頻率甚低，以往學者研究顯示，平靜深水中操縱運動之記憶效應甚小，可以忽略。因此，流體力係數可視為只與船舶之瞬間運動狀態有關，此即所謂的準定態(quasi-steady)處理方式。本文中所採用之數學模式即依此方式考慮主船體流體動力。

考慮縱移、橫移、平擺及橫搖運動時，主船體流體動力可表示為

$$\begin{aligned}
 X_H &= -m_x \dot{u} + (m_y + X_{vr})vr + 1/2 \rho L^2 U^2 (X'_{vv} v'^2 + X'_{rr} r'^2 + X'_{vvv} v'^4) + X_0(u) \\
 Y_H &= -m_y \dot{v} - m_x ur + 1/2 \rho L^2 U^2 (Y'_{\beta\beta} \beta' + Y'_{r'} r' + Y'_{\beta|\beta} \beta' |\beta'| + Y'_{\beta|r} \beta' |r'| + Y'_{r|r} r' |r'| + Y'_{\phi} \phi' \\
 &\quad + Y'_{\beta|\phi} \beta' |\phi'| + Y'_{r|\phi} r' |\phi'|) \quad (3-1) \\
 N_H &= -J_{zz} \dot{r} + 1/2 \rho L^3 U^2 (N'_{\beta\beta} \beta' + N'_{r'} r' + N'_{r|r} r' |r'| + N'_{\beta\beta r} \beta'^2 r' + N'_{\beta r} \beta' r'^2 \\
 &\quad + N'_{\phi} \phi' + N'_{\beta|\phi} \beta' |\phi'| + N'_{r|\phi} r' |\phi'|) \\
 K_H &= -J_{xx} \ddot{\phi} - N(\phi) - mg \cdot \overline{GZ}(\phi) - Y_H \cdot Z_H
 \end{aligned}$$

上式中 $\beta' = -\tan^{-1}(v/U)$, $r' = rL/U$, $X' = X/\frac{1}{2}\rho L^2 U^2$, $Y' = Y/\frac{1}{2}\rho L^2 U^2$,
 $N' = N/\frac{1}{2}L^3 U^2$, $v' = v/U$ 。

m_x : 縱移附加質量

m_y : 橫移附加質量

J_{xx} : 平擺附加質量慣性矩

X'_{ww} : 由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數

X'_{vr} : 由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數

X'_{rr} : 由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數

X'_{www} : 由於船舶平面運動所引起之阻力增加係數

Y'_β : 線性流體阻尼力係數

Y'_r : 線性流體阻尼力係數

N'_β : 線性流體阻尼力矩係數

N'_r : 線性流體阻尼力矩係數

$X_0(u)$: 船舶直進阻力

式中 $m_{y,vr}$ 是由於附加質量 m_y 所引起之x向離心力 (centrifugal force) , 也是造成操縱運動中船速降低之主因。 $-m_{x,ur}$ 是由於附加質量 m_x 所引起之y向離心力。

J_{xx} 代表橫搖附加質量慣性矩 ; $-N(\phi)$ 代表橫搖阻尼力矩 ; Z_H 為主船體流體橫移力作用點與重心G之垂直距離。

若運動方程式係依原點為船艏之船體固定座標系而立 , 則 (3-1) 式中轉動慣性矩及諸流體力係數均應為相對該座標系所求得者。

本文中船體固定座標系取為重心G，相對於此座標系平擺力矩之表示法為

$$N_{HG} = -J_{ZZG} \dot{\theta} + 1/2 \rho L^3 U^2 \left(N'_{\beta} \beta' + N'_{r'} r' + N'_{r|\phi} r' |\phi'| + N'_{\beta\beta r} \beta'^2 r' + N'_{\beta r} \beta' r'^2 \right. \\ \left. + N'_{\phi} \phi' + N'_{\beta|\phi} \beta' |\phi'| + N'_{r|\phi} r' |\phi'| \right) + Y_{HO} X_{\odot} \quad (3-2)$$

式中 J_{ZZG} 為相對於重心G之平擺附加質量慣性矩， X_{\odot} 為船舫之x座標， Y_{HO} 代表流體阻尼力，

$$Y_{HO} = 1/2 \rho L^2 U^2 \left(Y'_{\beta} \beta' + Y'_{r'} r' + Y'_{\beta|\beta} \beta' |\beta'| + Y'_{\beta|r} \beta' |r'| + Y'_{r|r} r' |r'| \right) \quad (3-3)$$

(3-2) 式與 (3-3) 式中，阻尼力係數均為相對於船舫所求得者。

3-2 螺槳力

3-2-1 螺槳 C_T 、 C_Q 曲線

螺槳之運轉狀態可分為四個象限。定義螺槳 0.7 R 處之入射水動力角 (hydrodynamic angle of incidence) $\beta_p = \tan^{-1} \left(\frac{V_A}{0.7 \pi n D_p} \right)$ ，則一、二、三、

四象限分別對應於

第一象限：	$u > 0, n > 0$	$0^\circ \leq \beta_p \leq 90^\circ$
第二象限：	$u > 0, n < 0$	$90^\circ \leq \beta_p \leq 180^\circ$
第三象限：	$u < 0, n < 0$	$180^\circ \leq \beta_p \leq 270^\circ$
第四象限：	$u < 0, n > 0$	$270^\circ \leq \beta_p \leq 360^\circ$

螺槳在四個象限中之推力與扭矩可表示為

$$X_p = (1-t_p) \frac{1}{2} \rho \left\{ [u(1-\omega_p)]^2 + (0.7\pi n D_p)^2 \right\} \times \frac{\pi}{4} D_p^3 C_T(\beta_p) \quad (3-4)$$

$$Q_p = -2\pi J_{pp} \dot{n} - \frac{1}{2} \rho \left\{ [u(1-\omega_p)]^2 + (0.7\pi n D_p)^2 \right\} \times \frac{\pi}{4} D_p^3 C_Q(\beta_p) \quad (3-5)$$

式中 t_p 為推力減少係數。Troost-B 系列螺槳試驗之迴歸資料參考文獻【10】【11】。進行停船運動模擬時，因 $u > 0$ ， $n < 0$ ，必須採用上述 C_T ， C_Q 曲線。

(3-5) 式中 J_{pp} 表螺槳之附加極慣性矩 (added polar moment of inertia)，一般可取為螺槳極慣性矩之 0.25 倍。

3-2-2 螺槳 K_T ， K_Q 曲線

正常航行狀況下 $u > 0$ ， $n > 0$ ，螺槳推力與扭矩可表示為

$$X_p = (1-t_p) \rho n^2 D_p^4 K_T(J_p) \quad (3-6)$$

$$Q_p = -2\pi J_{pp} \dot{n} - \rho n^2 D_p^5 K_Q(J_p) \quad (3-7)$$

Troost-B 系列之 K_T ， K_Q 性能迴歸資料參考文獻【12】，MAU 系列之 K_T ， K_Q 性能迴歸資料參考文獻【7】。若已有供試船螺槳單獨性能資料，則 K_T ， K_Q 可以下列二次多項式表示

$$K_T(J_p) = a_0 + a_1 J_p + a_2 J_p^2$$

$$K_Q(J_p) = b_0 + b_1 J_p + b_2 J_p^2 \quad (3-8)$$

3-2-3 螺槳倒轉時作用於前進船舶之不平衡力

前進中之船舶，當螺槳正轉時，螺槳力主要為推力及扭矩，橫移力與平擺力矩甚小。但當螺槳倒轉，產生反向流 (reverse flow) 流經船尾部時，船體左右二舷不對稱之壓力分佈，誘導產生一不平衡側向力 Y_p 及伴隨該力作用於船體之平擺力矩 N_p 。 Y_p 與 N_p 受螺槳負荷度及船體平面運動之影響，若暫不考慮平面運動之影響，則 Y_p 及 N_p 可表示如下：

$$Y_p = \rho n^2 D_p^4 Y_p^*(J_s)$$

$$N_p = \rho n^2 D_p^4 L_{pp} N_p^*(J_s) \quad (3-9)$$

式中 $J_s = U/nr$ 。數種船型之 Y_p^* ， N_p^* 模型試驗結果參考文獻【14】。

3-3 舵力

舵乃傳統船舶賴以操船之重要設備，影響船舶之轉向能力與航向安定性甚鉅。操船時舵力大小主要乃由舵之幾何形狀與有效入流決定。因舵乃位於船體與螺槳後方，故舵之入流受船體與螺槳之影響甚大，此種影響兼及舵之有效入流速度與有效入流攻角。

3-3-1 舵之有效入流速度及攻角

就一般操縱運動而言，舵之橫向有效入流速度不大，偏流角亦不大。

若忽略單螺槳轉動對舵橫向入流之影響，則 $u \doteq U$ 。舵之有效入流攻角可寫成

$$\alpha_R \doteq \delta - C_p \cdot C_s \left(\beta + \frac{\ell_R \cdot r}{U} \right) \quad (3-10)$$

式中， δ 為舵角， C_p 及 C_s 分別為螺槳與主船體之流動校正係數
 $C_p = [1 + C_1 g(s)]^{-1/2}$ ， $C_s = \gamma_R / (1 - \omega_R)$ ， $g(s) = \eta k [2 - (2 - k)s] s / (1 - s)^2$ 。操右舵
 時 C_1 取 0.935，操左舵時 C_1 取 1.065。 s 為螺槳滑流比 (slip ratio)， ω_R 為
 舵之有效跡流係數， η 為螺槳直徑與舵高之比。對單螺槳單舵船而言，
 $k = \frac{0.6(1 - \omega_p)}{(1 - \omega_R)}$ ， ω_p 為螺槳之有效跡流係數。實驗結果， $\ell_R = (0.9 \sim 1.0)L_{PP}$ 。
 γ_R 為實驗係數，且 $\gamma_R < 1.0$ 。 r 為船體固定座標系之轉動角速度在 Gz 軸之分
 量。 U 為船體重心移動速度。 β 為船體偏流角。 u 為船體重心移動速度在 Gx
 軸之分量。

因一般操船運動時，舵之橫向有效入流速度遠較舵之軸向有效入流速度
 小，而偏流角又不大，故舵之有效入流速度可如下估算：

$$U_R = U(1 - \omega_R)[1 + C_1 g(s)]^{1/2} \quad (3-11)$$

舵之有效跡流係數受平面運動之影響甚大，可表示為

$$\omega_R = \omega_{RO} \exp(-4\beta_p^2) \quad (3-12)$$

式中 ω_{RO} 為船舶直進時舵之有效跡流係數。 ω_{RO} 約為 0.3 左右。此外，
 $\beta_p = \beta + \frac{1}{2} \frac{\ell_R \cdot r}{U}$ 。

3-3-2 舵力表云法

參閱圖 3-1，圖中

F_R ：舵之總受力

F_L ：舵之升力

F_D ：舵之阻力

F_N ：舵之正向作用力 (normal force)

F_T ：舵之切向作用力 (tangential force)

舵引起之縱移力可如下估算

$$X_R \doteq -(1-t_R)F_N \sin \delta \quad (3-13)$$

式中， t_R 稱為舵之阻力減少係數， $(1-t_R)$ 約介於0.7與0.8之間。

實際操舵產生舵力時，會在舵前方之主船體上誘導產生另一交叉流 (cross flow)，而有額外之橫移力與平擺力矩作用於主船體上。設此誘導作用力作用點之X、Z座標分別為 x_{HR} ， z_{HR} 。而誘導力與舵橫向力 $F_N \cos \delta$ 之比值為 a_H ，則舵引起之橫移力可如下估算

$$Y_R \doteq -(1+a_H)F_N \cos \delta \quad (3-14)$$

舵引起之繞Gz軸與Gx軸之力矩可各別如下估算

$$N_R \doteq -(1+a_H)x_R F_N \cos \delta \quad (3-15)$$

$$K_R \doteq -(1+a_H)z_R F_N \cos \delta \quad (3-16)$$

(3-15) 式及 (3-16) 式中， x_R 、 z_R 為舵之X、Z座標。舵正向力 F_N 之表示法如下：

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 C_N \quad (3-17)$$

(3-17) 式中 C_N 為舵正向力係數， A_R 為舵面積。據Fujii【15】之實驗研究， C_N 可表成

$$C_N = \frac{6.13\Lambda}{\Lambda + 2.25} \sin \alpha_R \quad (3-18)$$

(3-18)式中 Λ 為舵之幾何展弦比，(3-17)式中 U_R 與(3-18)式中 α_R 可依(3-11)式與(3-10)式求得。

3-4 主機特性

3-4-1 正轉時之主機扭矩

正轉時之主機扭矩特性，因主機型式而異。針對低速柴油機與蒸汽渦輪機，分別討論如下：

(a) 低速柴油機

低速柴油機之扭矩特性可表示如下：

$$Q_E = \begin{cases} |Q_P|, \dot{n} = 0, \text{if } (Q_E)_{\max} \geq |Q_P| \\ (Q_E)_{\max}, \dot{n} < 0, \text{if } (Q_E)_{\max} < |Q_P| \end{cases} \quad (3-19)$$

$(Q_E)_{\max}$ 為柴油機之扭矩極限。

(b) 蒸汽渦輪機

正轉時蒸汽渦輪機之轉速與扭矩關係可表示如下：

$$n^* = \left(\frac{PS^*}{PS_{NOR}} \right)^{1/3} \cdot n_{NOR} \quad (3-20)$$

$$Q^* = \left(\frac{PS^*}{PS_{NOR}} \right)^{2/3} \cdot Q_{NOR} \quad (3-21)$$

$$Q = \left(\frac{-n + 2n_{NOR}}{-n^* + 2n_{NOR}} \right) Q^* \quad (3-22)$$

式中， PS^* 表主機所產生之馬力。 NOR 表主機正常出力。

3-4-2 倒轉時之主機特性

(a) 低速柴油機

停船時，主機作停止、倒轉之操作。若主機係採用低速柴油機，則其倒轉過程一般可分為下列三階段：

第一階段：下令倒車後，切斷主機之燃料供給，軸系轉速自由降低，

$$Q_E = Q_F(n, t_e)$$

第二階段：待軸系轉速降至某大小，約為15~30RPM，起動煞車空氣 (braking air)，以加速停止軸系之正轉，並使軸系倒轉， $Q_E = Q_A(n, t_e)$

第三階段：待軸系倒轉轉速增加至某大小時，開始噴油燃燒，加速軸系倒轉， $Q_E = Q_o(n, t_e)$

故主機倒轉時之扭矩大小因軸系轉速及下令倒車之後多久時間 t_e 而異。若依上述三階段倒車，則由正轉至完全倒轉約需1分20秒至2分30秒。一般低速柴油機之最大倒車馬力約為最大正車馬力之85%。

(b) 蒸汽渦輪機

停船時，切斷正轉渦輪機 (ahead turbine) 之蒸汽供給，採用倒轉渦輪機 (astern turbine)。通常由正轉至完全倒轉約需60秒。

倒轉時蒸汽渦輪機之轉速與扭矩關係可表示如下：

$$\begin{aligned}
 n^* &= \left(\frac{PS^*}{PS_{CON}} \right)^{1/3} \cdot n_{CON} \\
 Q^* &= \left(\frac{PS^*}{PS_{CON}} \right)^{2/3} Q_{CON} \\
 Q &= \left(\frac{2.5n_{NOR} + n}{2.5n_{NOR} + n^*} \right) Q^*
 \end{aligned} \tag{3-23}$$

式中下標 CON 代表倒車連續最大輸出 (continuous maximum astern) 。

3-5 風力

作用於船舶之風力與力矩可表示如下：

$$\begin{aligned}
 X_W &= X'_W (\gamma_R) \cdot \frac{1}{2} \rho_a A_f V_R^2 \\
 Y_W &= Y'_W (\gamma_R) \cdot \frac{1}{2} \rho_a A_s V_R^2 \\
 N_W &= N'_W (\gamma_R) \cdot \frac{1}{2} \rho_a A_s L_{PP} V_R^2 \\
 K_W &= K'_W (\gamma_R) \cdot \frac{1}{2} \rho_a (A_s^2 / L_{PP}) V_R^2
 \end{aligned} \tag{3-24}$$

式中， X'_W 、 Y'_W 、 N'_W 、 K'_W 為風力係數，是相對風向角 γ_R 的函數， A_f 及 A_s 分別代表水面上船體之正向及側向投影面積， V_R 為對船的相對風速， ρ_a 為空氣密度。

模擬計算所需之供試船的各项係數可由實驗求得，若無法得知各項係數之實驗數據，則 Isherwood[13] 亦提供了相當數量之各型船舶試驗結果，依船型主要參數回歸得出各項係數之經驗公式，可供初步估算之用。

在進行風力估算時，Isherwood 之經驗預估法[13]提供了風力係數預估經驗式，供估算船體之特性參數 A_f 、 A_s 及 C ，其中 A_f 為水面上船體正向投影面積， A_s 為水面上船體側向投影面積， C 為水線以上側向投影面積中心至船艙的距離。

由於 Isherwood 經驗公式估算之船體正向及側向投影面積較實際值大了許多，若以此估算結果帶入風力與風力矩之計算，則計算所得之風力與力矩亦會較實際值大上許多，故建議在作風力與力矩之估算時最好能有 A_f 、 A_s 及 C 之實際資料，以免因模擬計算時估算之風力與力矩遠大於實際所受之風力與力矩而影響了計算結果之準確性。

3-6 波浪漂流力

作用於船舶之波浪漂流力與力矩可表示如下：

$$\begin{aligned} X_{wv} &= X'_{wv}(\beta_R) \cdot \frac{1}{2} \rho g L_{PP} \zeta_a^2 \\ Y_{wv} &= Y'_{wv}(\beta_R) \cdot \frac{1}{2} \rho g L_{PP} \zeta_a^2 \\ N_{wv} &= N'_{wv}(\beta_R) \cdot \frac{1}{2} \rho g L_{PP}^2 \zeta_a^2 \\ K_{wv} &= 0 \end{aligned} \quad (3-25)$$

式中， ζ_a 為(有義)波振幅， X'_{wv} 、 Y'_{wv} 、 N'_{wv} 為波浪漂流力係數，是船速、(有義)波長船長比及相對波向角 β_R 的函數， ρ 為海水密度。

目前考慮船速效應的波浪漂流力實驗值或理論計算仍不多見，故本研究採用之波浪漂流力係數為文獻[16]所提供之數種船型在靜止狀態下的波浪漂流力係數之實驗結果。

3-7 潮流力

作用於船舶之潮流力與力矩可表示如下：

$$\begin{aligned}X_C &= X'_C(\alpha_C) \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{A}_f \bar{V}_R^2 \\Y_C &= Y'_C(\alpha_C) \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{A}_s \bar{V}_R^2 \\N_C &= N'_C(\alpha_C) \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{A}_s L_{PP} \bar{V}_R^2 \\K_C &= K'_C(\alpha_C) \cdot \frac{1}{2} \rho (\bar{A}_s^2 / L_{PP}) \bar{V}_R^2\end{aligned}\tag{3-26}$$

式中， X'_C 、 Y'_C 、 N'_C 、 K'_C 為潮流力係數，是相對流向角 α_C 的函數， \bar{A}_f 及 \bar{A}_s 分別代表水面下船體之正向及側向投影面積， \bar{V}_R 為對船的相對潮流速度， ρ 為海水密度。

以相對速度計算潮流力與力矩時，此力與力矩中亦包含了船舶航行在平靜水域時主船體所受的力與力矩，故在此為重複計算需予以扣除。

第四章 模式之驗證

4-1 驗證用船舶

1979年Crane【9】發表了278,000DWT VLCC ESSO OSAKA於三種水深中之系列操縱性能實船試航結果，以便國際間共同針對ESSO OSAKA進行相關之操縱性能研究。為驗證本操船模擬計算系統之可靠性，文獻【1】、【3】亦針對ESSO OSAKA進行若干實船試航項目之模擬計算，並比較模擬計算與實船試航實測結果。ESSO OSAKA之主要尺寸如表4-1。

4-2 計算結果與比較

模擬計算項目包括：深水域 35° 左迴旋試驗， $10^\circ - 10^\circ$ Z形試驗及螺旋試驗。

4-2-1 深水域 35° 左迴旋試驗

35° 左迴旋試驗之模擬計算結果與實船量測結果之比較，如圖4-1【3】所示。結論如下：

1. 定性上，模擬計算與試航量測結果趨勢相同。
2. 定量上，模擬計算之迴旋性能較實船性能略差，故前進量、側移量及戰術直徑之模擬值均較實測值稍大。

4-2-2 深水域 10° - 10° Z形試驗

10° - 10° Z形試驗之模擬計算結果及實船量測結果，如圖4-2【3】所示。

比較結果如下：

1. 比較顯示，模擬值與實測值均相當接近。
2. Z形試驗後期之模擬結果雖較實測結果之反應略慢，但定性表現則與實測一致。

4-2-3 深水域螺旋試驗

深水域螺旋試驗模擬計算結果與實船量測結果之比較，如圖4-3【3】所示。

模擬計算顯示，在0度舵角附近有一寬度甚小之不安定圈存在，顯示該船具航向不安定性。唯實船量測結果顯示並無明顯之不安定圈存在。唯Crane〔17〕指出，若進行微小舵角試驗之時間加長，則可能會有一微小不安定圈出現。

第五章 港埠座標及風浪流資料之處理

5-1 港埠座標及風浪流資料之輸入

本研究採用的港埠座標為地面固定座標系，原點訂於港埠的最左下角，正北向的方位角為 0° (或 360°)，正東向的方位角為 90° 並分別定義為 Y_0 及 X_0 軸的正向，如此整個港埠佈置及船體運動皆位於第一象限，如圖 5-1 所示。

基於此座標系統，則可將港埠佈置圖之座標輸入電腦內建檔。在座標點之選取上，港埠佈置圖之轉折點為必要選取之點。

風速及風向可於操船過程中任意改變大小及方向。

波高、波向及波長也可於操船過程中隨時修正。

流場之資料，須事先量測或以數值方法計算，再以網格點之方式輸入電腦建檔供操船之用。

風、波及流之資料用以提供操船過程中，船體在港池內外任一位置時所受風、浪及流之作用力大小及方向。

5-2 風浪流資料之處理

為了估算船體所受之環境外力，必須得到船體所在位置之環境資料 (風、浪、流)，目前的作法為以船體重心做為原點，搜尋一適當邊長之正方形面積內所涵蓋的所有網格點 (如圖 6-1)，將所有網格點上之環境資料 (風、浪、流) 取平均值當作船體所在位置之平均風、浪、流數值。

第六章 模擬計算流程

為期使模擬計算能簡便的應用在操船命令頻繁的進出港操船上，本系統建立在 PC 架構下，能夠方便使用者操作並能即時顯示港埠佈置、船體運動軌跡、運動狀態以便於使用者能即時修正船舶之航向與速度之模擬計算程式。

程式是以 Lahey Fortran 配合 Uniplot 繪圖函數庫發展，程式架構主要可分為三個階段：起始階段、計算階段與輸出階段，系統流程【5】【3】如圖 6-2 所示。

起始階段：首先輸入船體、舵、螺槳及主機等基本特性參數，而後再由程式中之經驗式或資料庫估算模擬計算時所需的數據，如船體阻力、推進因子、螺槳單獨性能、主船體流體力係數及舵力係數等。(如果上述資料已有其他更確實的來源，亦可由程式選擇另外輸入)

計算階段：起始階段中輸入的初始條件，由前節所述之多變數牛頓法求解模擬計算所需之其餘初始條件而後即可進行操船模擬，由程式控制介面輸入所欲進行之操船參數如主機轉速、舵角、舵速等操控變數或迭代週期 Δt 等計算變數及是否考慮風、浪、流等條件變數，於每個時刻依數學模式計算出作用於船舶的外力及流體力，而後再由 Newmark- β 時間積分法解聯立運動方程式，求得各個時刻船體的運動狀態，再轉換至地面固定座標系上，得到船體所在之位置與方位。

輸出階段：計算程式的結果輸出可由電腦螢幕即時顯示出港埠佈置、船體的運動軌跡、運動狀態、時間歷程及船體所在位置流場狀態供使用者參考便於即時修正各項操船參數，並將模擬計算之結果記錄於檔案中，以供稍後進行分析處理或列印。

第七章 計算實例

本操船模擬計算系統配合流體力係數之經驗式預估法，對於一般船舶在平靜開闊之深水域已可提供一可信度良好之預估結果[1,2]。本研究以此操船模擬計算系統結合風、浪、流等外力之作用，參考蘇澳港現行之進出港操船習慣，進行蘇澳港船舶在各種海況下進出港操船之模擬計算。

7-1 供試港埠

供試港埠為蘇澳港，其港埠佈置平面圖如圖 7-1 所示。

7-2 操船模擬用船舶

蘇澳港主要為一散貨港。78 年進出蘇澳港船舶之船長統計，如表 7-1 及圖 7-2 所示【4】。由表 7-1 及圖 7-2 可知，進出蘇澳港船舶，船長以 100 ~ 120 公尺者最多。船長大於 200 公尺者有 23 艘，約佔總船次之 4%，其中最長者達 230 公尺。

以下針對一艘全長 191m，排水量 55,500 噸之油輪進行各種海況下之進出港操船模擬。

該船的主要尺寸，如表 7-2 所示。

在進行模擬計算時，其螺槳 K_T 、 K_Q 曲線選用 Troost-B 系列螺槳資料估算，採用此特性曲線需特別注意其僅可用以計算正常狀況($u > 0$ ， $n > 0$)下的螺槳性能。線性流體阻尼力係數採用 Wagner 公式預估，附加質量採用 Matora's Chart 估算；以上各資料之預估均為本次模擬計算實例所選用，

亦可在程式中選用其他經驗式估算或選用確知之實驗值輸入。

7-3 蘇澳港現行操船方式

蘇澳港依領港人之經驗有一獨特之操船方式【4】，概述如下。

蘇澳港進港船舶，以 200m 船長為區分，200m 以上船舶須在外港池停車後再以拖船帶入碼頭區，200m 以下之船舶則自行駛入內港池或船澳區後，再以拖船協助靠泊碼頭，其航行路徑，如圖 7-3 所示，敘述如下。

首先船舶以 288.5° 為入港方向(即北內堤紅燈塔與七星嶺標杆之連線方向)，駛入港口後，船身稍微左轉以便避開北內堤頭，經倒車使船舶停於外港池，其中 200m 以上船舶(皆停靠北方澳水域碼頭)以四條拖船拖航至內港池迴船後停靠碼頭。200 以下船舶則先將船舶在外港池穩住，欲進入北方澳水域者，則將船身右轉對準水域入口逕行駛入內港池，到達迴船池再以拖船協助停靠，而欲進入南方澳水域者，則沿北內堤燈塔與北方澳標杆連線約 30° 方向進入船澳區，再以拖船協助停靠碼頭。

7-4 模擬操船之環境條件

7-4-1 風速及風向

蘇澳港【4】，冬季鋒面過境時，氣象局蘇澳港行政大樓測站所測風速皆小於7m/sec，主要集中於1m/sec～5m/sec之間；北方澳軍方測風站所測風速最大曾達18m/sec左右，但一般而言，其風速皆小於15m/sec。而軍港#7～#8碼頭測站所測風速則多集中於1m/sec～5m/sec之間。

另由文獻【4】得知，台電三仙台測站及蘇澳港港區測站所測得之風向，冬季以WNW為主，NW次之，但氣象局蘇澳港行政大樓測站所測之冬季風向以W為主，WSW次之；夏季除北方澳軍方測風站以ESE為主，其餘各站皆以SSE及S向為主。

7-4-2 波高及波向

蘇澳港【4】地區全年之示性波高值97.3%小於3m，主要之週期集中於6～8秒之間，為典型之風浪。冬季波浪之示性波高主要介於0.5m～2m之間，週期集中於6～8秒；夏季波浪示性波高主要介於0.5m～1.5m之間，週期亦集中於6～8秒；一般而言，除了颱風期外，蘇澳港地區冬季季風波高大於夏季之波高。

由【4】所測波向記錄統計得知，該地區於冬季期間，其波浪之方向大多來自90°～130°之間；夏季波向則來自115°～140°之間。主要之大浪，包括冬季季風期及觀測期間測得之颱風，其波向約為120°～135°之間。

7-4-3 流速及流向

本研究所用之流速及流向分為漲潮及退潮兩個不同且流速較大的海況。流速及流向資料來自「蘇澳港防波堤改善工程規劃」之一子計劃「蘇澳港暴潮模式之建立」【6】。

7-5 計算結果之探討

根據以上資料，選擇以下風速、風向、波高、週期、波向、流速及流向進行操船模擬。風速分 7m/sec 及 15m/sec。風向分 W、S 方向。波高 3m。週期 8 秒，波向來自 90°。流速及流向各別來自漲潮(如圖 7-4)及退潮(如圖 7-5)兩海況。各操船模擬海況如表 7-3 及表 7-4 所示。除了海況不同之外，船舶進港路線又分船舶進港至南方澳及進港至內港池之迴船池等二種。船舶均以 288.5° 為起始入港方向。起始船速為 5 節。船入港後均假設為無浪狀態，即不受波浪漂流力之作用。

圖 7-6 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡。

圖 7-7 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡。

圖 7-8 至圖 7-15 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡及各階段之操船指令。由各圖可清楚看出各操舵階段的舵角、主機轉速、船艏向及其它風浪流資料。

圖 7-16 至圖 7-21 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡及各階段之操船指令。

圖 7-22 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡。

圖 7-23 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡。

圖 7-24 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡。

圖 7-25 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡。

圖 7-26 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡。

圖 7-27 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡。

圖 7-28 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡。

圖 7-29 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡。

圖 7-30 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡。

圖 7-31 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡。

圖 7-32 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡。

圖 7-33 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡。

由圖 7-6 至圖 7-33 之操船軌跡，顯示本操船模擬系統可概略地模擬蘇澳港之現行操船方式。亦即本操船模擬系統可做為港灣初步規劃時，了解在各種不同港灣佈置及海況下，船舶進出港難易度之參考。

港灣規劃時，在各個港池已穩靜方案中，個別以此操船模擬系統再進行船舶進出港難易度之評估，選出港池可穩靜且船舶容易進出港之方案，然後再以真時(Real Time)操船模擬機進行最後之確認定案。

第八章 結論

經以上之操船模擬，可知本操船模擬系統可概略地模擬蘇澳港之現行操船方式。亦即本操船模擬系統可做為港灣初步規劃時，了解在各種不同港灣佈置及海況下，船舶進出港難易度之參考。

港灣規劃時，在各個港池已穩靜方案中，可個別以此操船模擬系統再進行船舶進出港難易度之評估，選出港池可穩靜且船舶容易進出港之方案，然後再以真時操船模擬機進行港池佈置方案之最後確認及定案。大型操船模擬機之主要功能是在於操船訓練，且由於使用成本高，故較適用於最終佈置的確認或操船方法的檢討上，至於初步階段的規畫評估則以本簡易式操船模擬計算系統應是較佳的選擇。

然而，由於本模擬系統仍為深水域之操船模式。但港灣則多為淺水域。故由本系統模擬之操船軌跡與淺水域者將有一些差異。因此為了得到更精確的淺水域港灣操船軌跡，本系統有待更進一步發展成淺水域之操船模式。

此外，由於估算操船時之外力所須之相關資料，在已知文獻上仍不充份，因此相關操船資料之收集，仍須加強，以改進操船模擬之精確度。

參考文獻

1. 邱逢琛、曾國正“船舶操縱性能預估法之探討”，NTU-INA-Tech. Rept 275, 1988。
2. 邱逢琛、曾國正“港內操船運動模擬計算系統”，中華民國第十屆海洋工程研討會論文集，1988。
3. 邱逢琛、蔣德普、郭乃文，“環境外力下進出港操船模擬計算系統之研發與應用”，國立台灣大學造船及海洋工程學碩士論文，1997。
4. “蘇澳港消波問題研究(第二期及第三期)”，中華顧問工程司，1990。
5. 邱逢琛、蔣德譜、洪憲忠，“進出港操船及繫纜船舶運動計算系統之研究—蘇澳港防波堤改善工程規劃第十子計劃”，港灣術研究所專刊第 143 號，1997。
6. 許泰文、莊文傑，“蘇澳港暴潮模式之建立—蘇澳港防波堤改善工程規劃第七子計劃”，港灣技術研究所專刊第 142 號，1997。
7. 黃正利、丁肇隆、施純暉，“高速艇及排水型船螺槳設計之研究”，NTU-INA Tech. Rept. No.217, Aug., 1987。
8. Yoshimura, Y., “Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water”, Jour. Kansai Soc. Nav. Archit. Japan, No.200, 1986.
9. Crane, C.L., “Manoeuvring Trials of a 278,000DWT Tanker in Shallow and Deep Waters”, Trans. SNAME, Vol.87, 1979.
10. van Lammeran, W.P.A., van Manen, J.D. and Oosterveld, M.W.C., “The Wageningen B-Screw Series”, Trans. SNAME, Vol.77, 1969.

11. Dien, R. and Prien, J., "Die rechnerische Ermittlung von Stoppmanovern auf Schiffen mit Propeller-antrieb", Schiff und Hafen, Heft 8/1973, 25, Jahrgang.
12. Kose, K., "On a New Mathematical Model for Manoeuvring Motion of a Ship in Low Speed", Naval Architecture and Ocean Engineering, Japan, Vol.23, 1985.
13. Isherwood, R.M., "Wind Resistance of Merchant Ships", Trans. RINA, Vol.115, 1973.
14. Fujino, M. and Kirita, A., "On the Manoeuverability of Ships while Stopping by Adverse Rotation of Propeller (Part 1)", Jour. Kansai Soc. Nav. Archit. Japan, No.169, 1978.
15. Fujii, H. and Tuda, T., "Experimental Researches on Rudder Performance (Part 2)", Jour. Soc. Nav. Archit. Japan, Vol.110, 1961.
16. Hirano, M., Takashina, J., Takashi, Y. and Sarut, T., "Ship Turning Trajectory in Regular Waves", Trans. West-Japan Soc. Nav. Archit., No.60, 1980.
17. Crane, C.L., "Manoeuvring Trials of the 278,000DWT ESSO OSAKA in Shallow and Deep Waters", Exxon International Co. Report No.MA-RD-940-76018, 1979.

表 4-1 ESSO OSAKA 油輪主要尺寸

Hull	
Length overall	343.00m
Length between perpendiculars	325.00m
Breadth molded	53.00m
Depth, molded	28.30m
Draft, extreme	21.79m
Block coefficient	0.8310
Prismatic coefficient	0.8323
Midship coefficient	0.9984
Waterplane coefficient	0.8600
Rudder	
Number of rudders	1
Rudder area	119.82m ²
Rudder height	13.85m
Aspect ratio	1.539
Propeller	
Number of propellers	1
Number of blades	5
Expanded area ratio	0.682
Diameter	9.10m
Pitch	6.507m
Engine	
Type	Steam turbine

表 7-1 78 年進出蘇澳港船舶之船長統計

船長(M)	艘數	百分比(%)
10 ~ 20	0	0
20 ~ 30	1	0.172
30 ~ 40	16	2.744
40 ~ 50	1	0.172
50 ~ 60	3	0.515
60 ~ 70	4	0.686
70 ~ 80	18	3.087
80 ~ 90	63	10.806
90 ~ 100	37	6.346
100 ~ 110	113	19.383
110 ~ 120	154	26.415
120 ~ 130	30	5.146
130 ~ 140	3	0.515
140 ~ 150	33	5.660
150 ~ 160	11	1.887
160 ~ 170	14	2.401
170 ~ 180	15	2.573
180 ~ 190	25	4.288
190 ~ 200	19	3.259
200 ~ 210	1	0.172
210 ~ 220	3	0.515
220 ~ 230	18	3.087
230 ~ 240	1	0.172
>240	0	0

表 7-2 供試油輪之主要尺寸

Hull	
Length overall	191.00m
Length between perpendiculars	181.00m
Breadth molded	29.50m
Depth, molded	15.76m
Draft, extreme	12.13m
Block coefficient	0.8310
Prismatic coefficient	0.8306
Midship coefficient	0.9984
Waterplane coefficient	0.8600
Rudder	
Number of rudders	1
Rudder area	37.15m ²
Rudder height	7.71m
Aspect ratio	1.539
Propeller	
Number of propellers	1
Number of blades	5
Expanded area ratio	0.682
Diameter	5.07m
Pitch	3.62m
Engine	
Type	Steam turbine

表 7-3 模擬操船海況之 1

編號	風		波浪				海流		註
	風速 (m/s)	風向 (deg)	波高 (m)	波向 (deg)	週期 (s)	波長 (m)	漲潮	退潮	
EX1	15	270	3	90	8	99.84	✓		船進港至南方澳
EX2	15	270	3	90	8	99.84	✓		船進港至內港迴船池
EX3	15	270	3	90	8	99.84		✓	船進港至南方澳
EX4	15	270	3	90	8	99.84		✓	船進港至內港迴船池
EX5	15	180	3	90	8	99.84	✓		船進港至南方澳
EX6	15	180	3	90	8	99.84	✓		船進港至內港迴船池
EX7	15	180	3	90	8	99.84		✓	船進港至南方澳
EX8	15	180	3	90	8	99.84		✓	船進港至內港迴船池

表 7-4 模擬操船海況之 2

編號	風		波浪				海流		註
	風速 (m/s)	風向 (deg)	波高 (m)	波向 (deg)	週期 (s)	波長 (m)	漲潮	退潮	
EX9	7	270	3	90	8	99.84	✓		船進港至南方澳
EX10	7	270	3	90	8	99.84	✓		船進港至內港迴船池
EX11	7	270	3	90	8	99.84		✓	船進港至南方澳
EX12	7	270	3	90	8	99.84		✓	船進港至內港迴船池
EX13	7	180	3	90	8	99.84	✓		船進港至南方澳
EX14	7	180	3	90	8	99.84	✓		船進港至內港迴船池
EX15	7	180	3	90	8	99.84		✓	船進港至南方澳
EX16	7	180	3	90	8	99.84		✓	船進港至內港迴船池

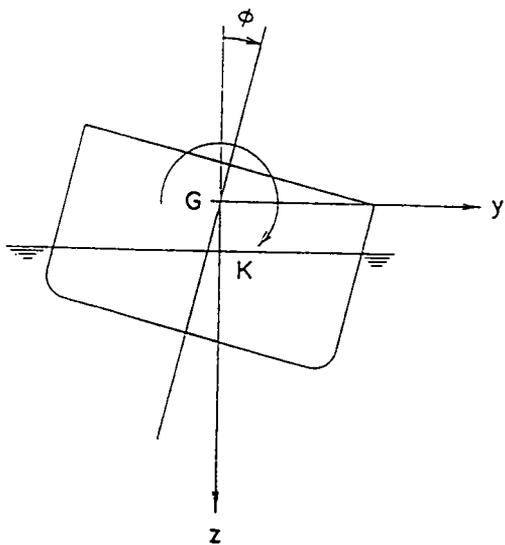
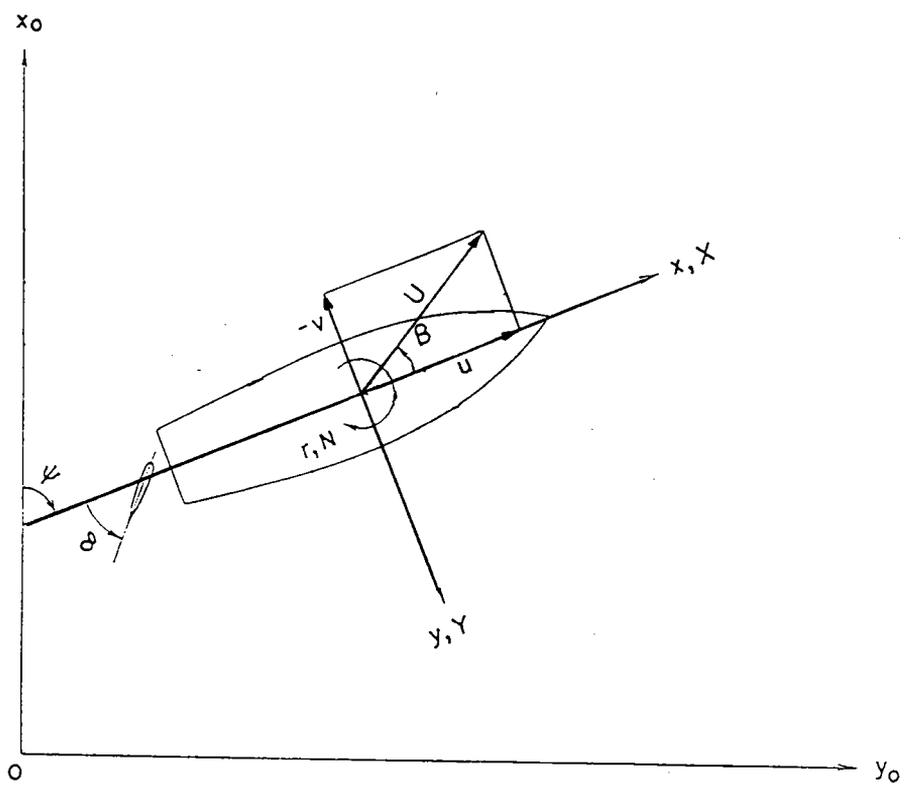


圖 2-1 座標系

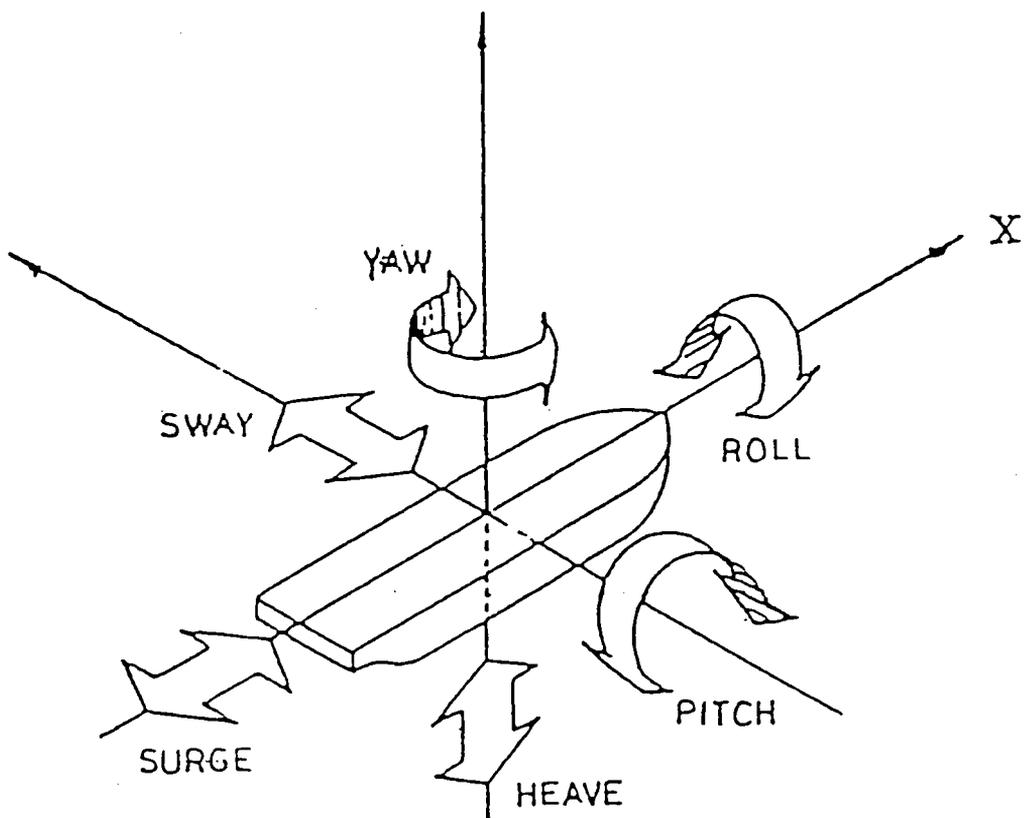


圖 船舶運動座標系

圖 2-2 三維船舶運動

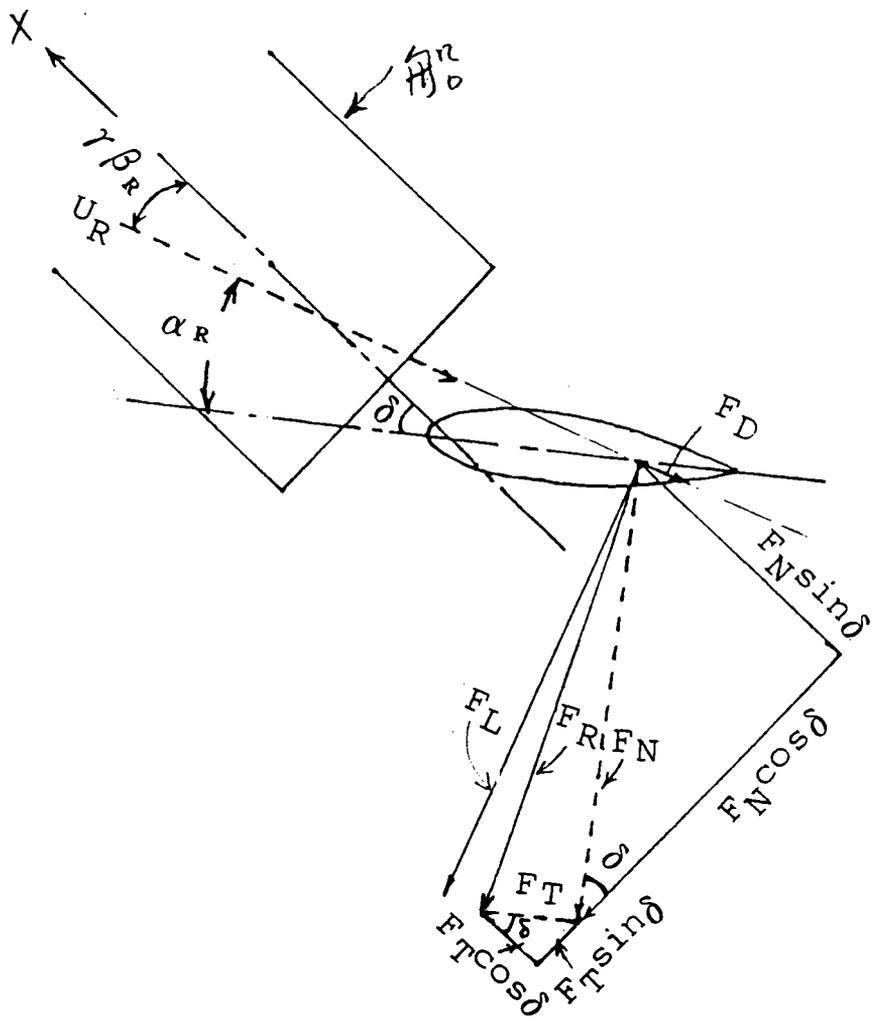


圖 3-1 舵力圖

ESSO OSAKA Turning Motion

Approach Speed = 7.0 (Kt)
Rudder Angle = P35.0 (Deg)
Deep (H/d = 4.2)

△ Measured

— Simulated

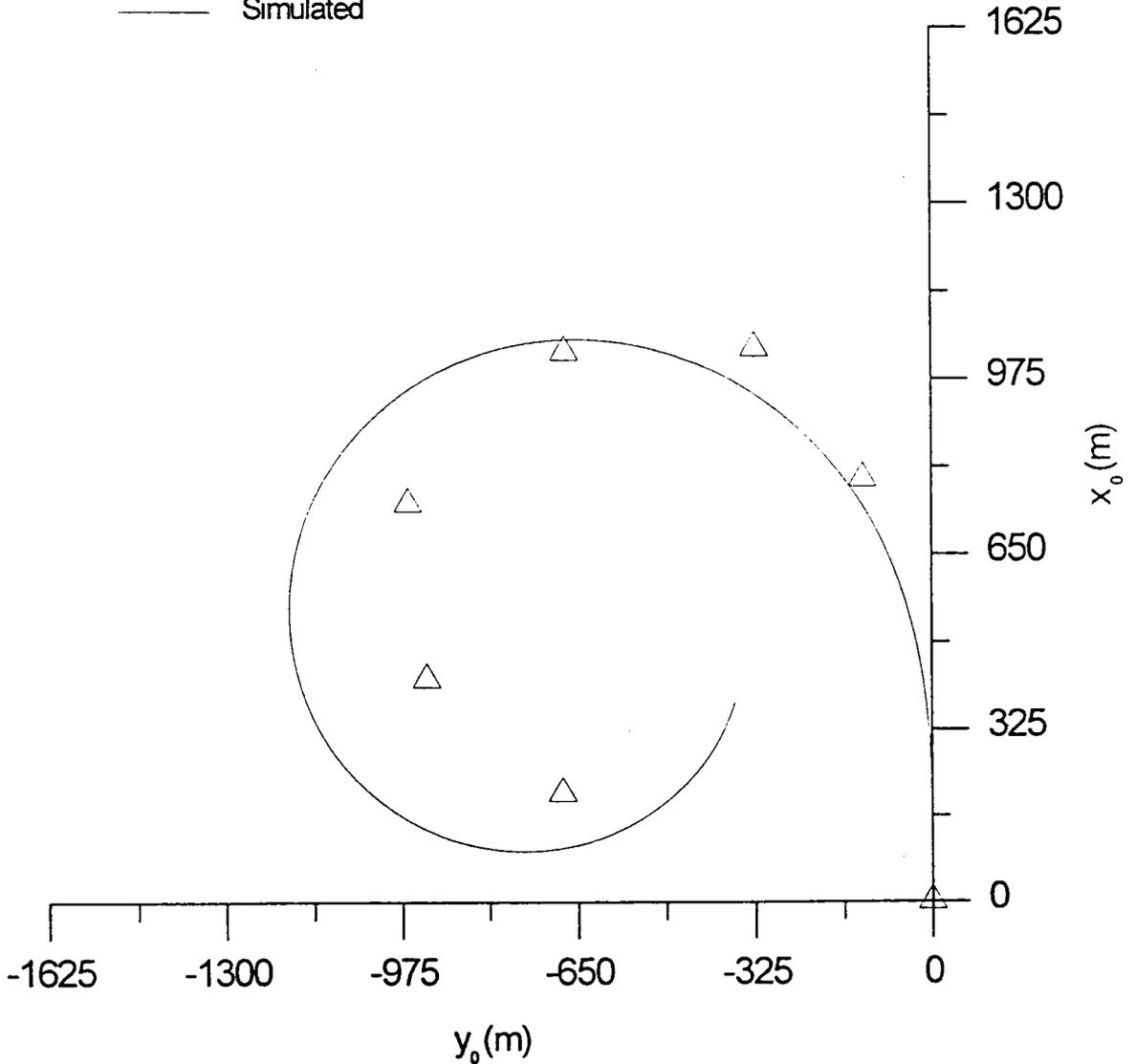


圖 4-1 水深船深比為 4.2 時，ESSO OSAKA
A35° 左迴旋試驗之實船試航及模
擬計算結果

ESSO OSAKA 10/10 Zig-Zag

Approach Speed = 7.0 (Kt)
Deep (H/d = 4.2)

● Measured

— Simulated

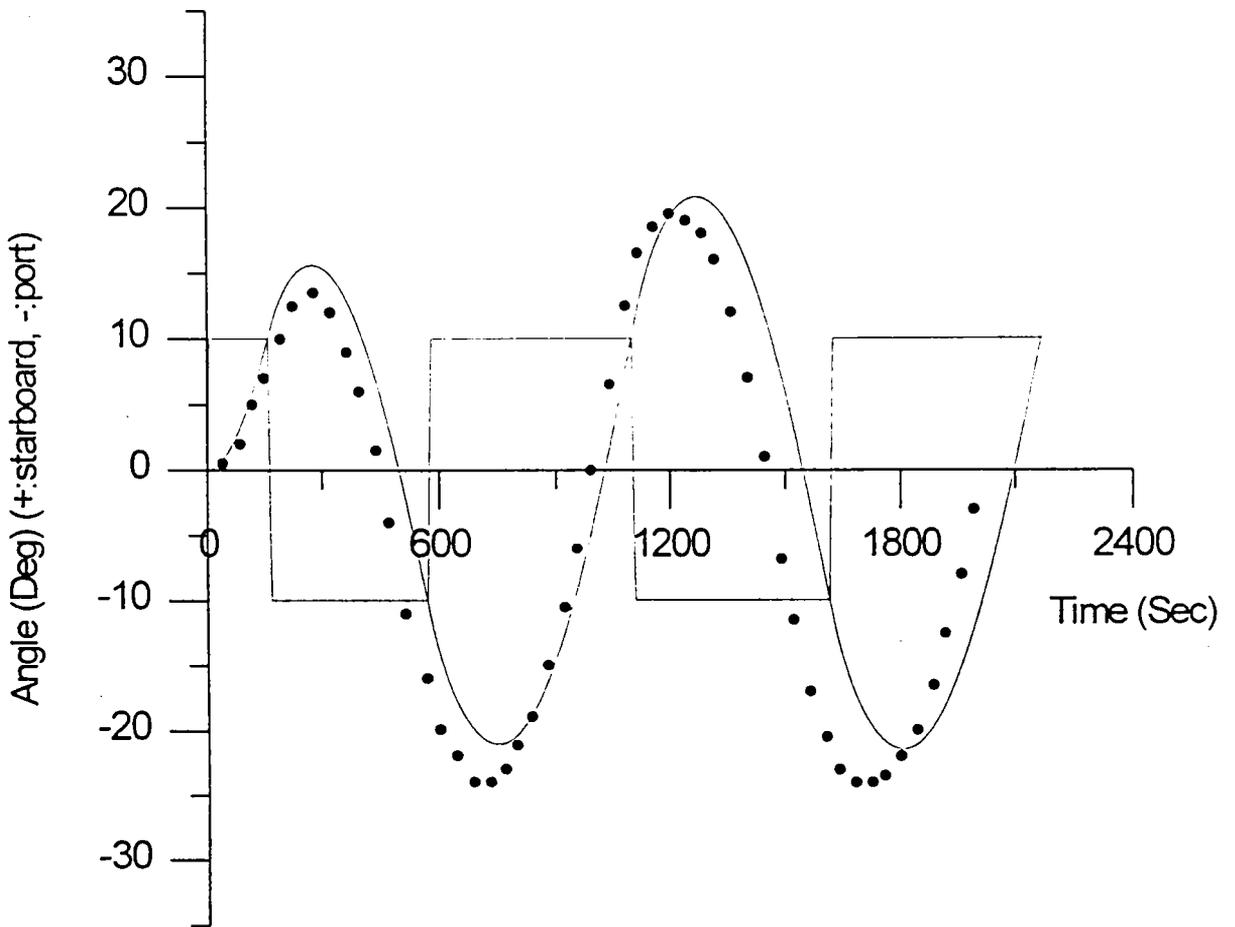


圖 4-2 水深船深比為 4.2 時，ESSO OSAK
A10° Zig-Zag 試驗之實船試航及模
擬計算結果

ESSO OSAKA ITTC Spiral

Approach Speed = 7.0 (Kt)
Deep (H/d = 4.2)

○ Measured
— Simulated

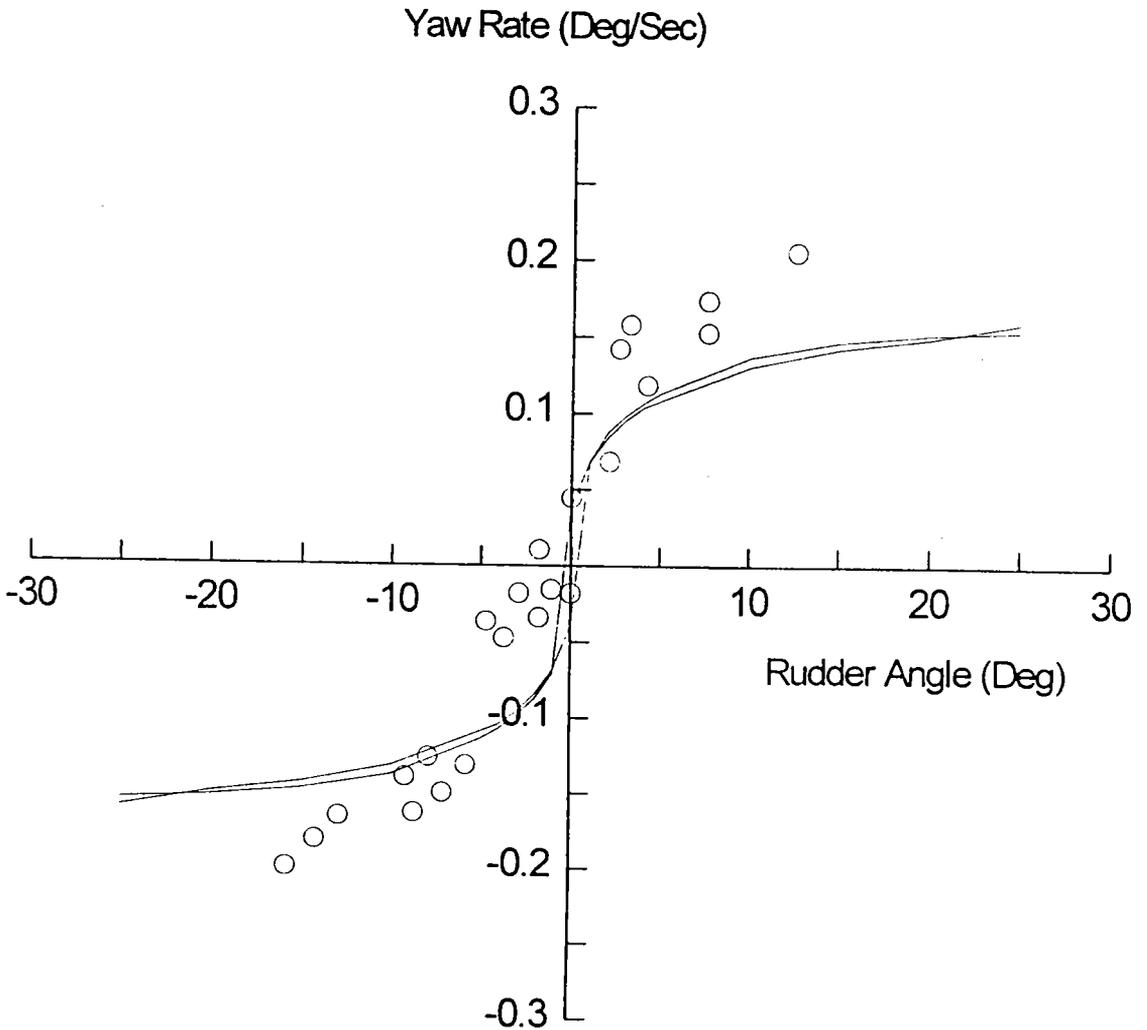


圖 4-3 水深船深比為 4.2 時，ESSO OSAK A10° 螺旋試驗之實船試航及模擬計算結果

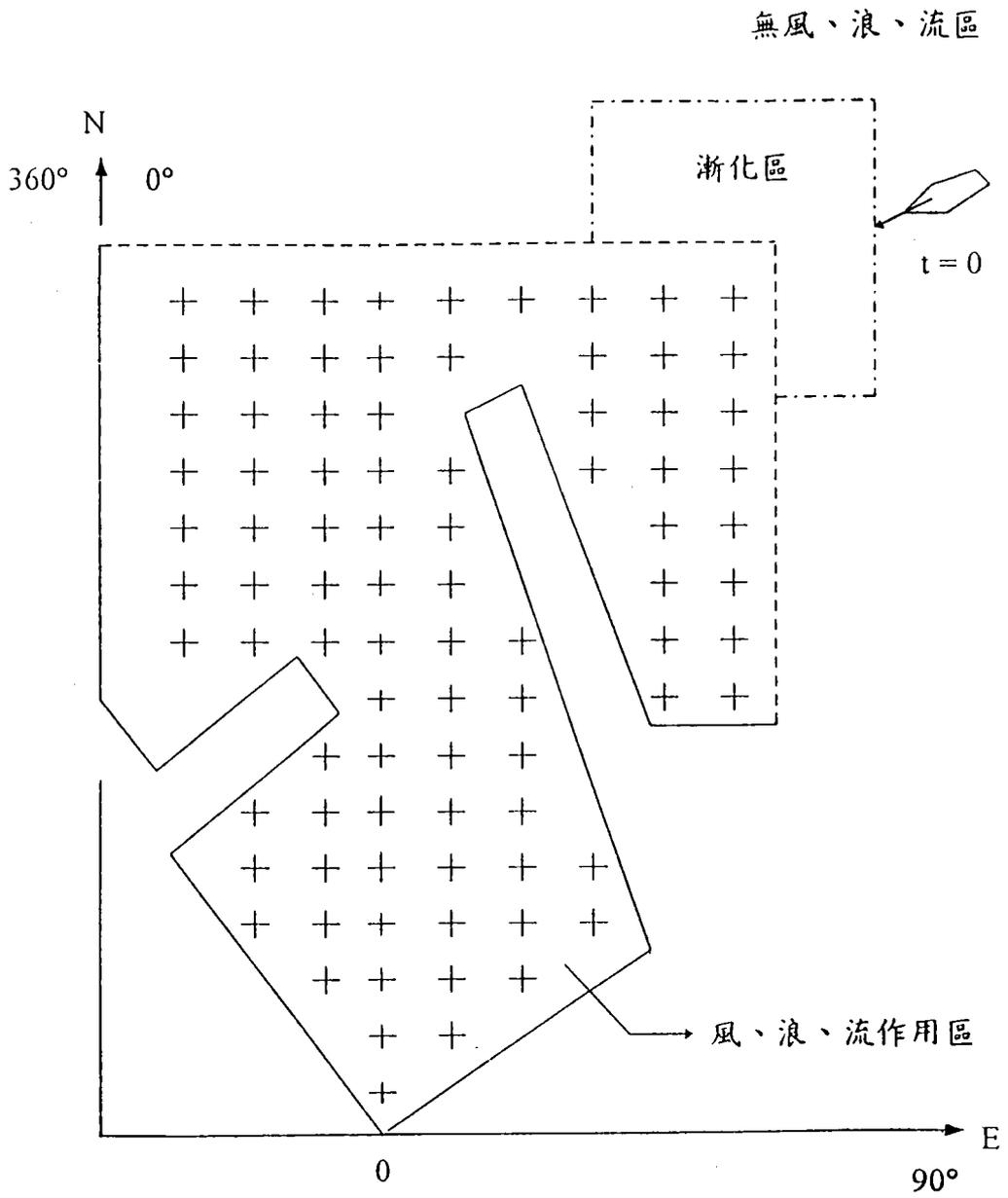


圖 5-1 港埠座標系統

圖中 G 表船體重心，虛線為所欲搜尋之正方形區域，各小圓點則代表環境資料網格點。

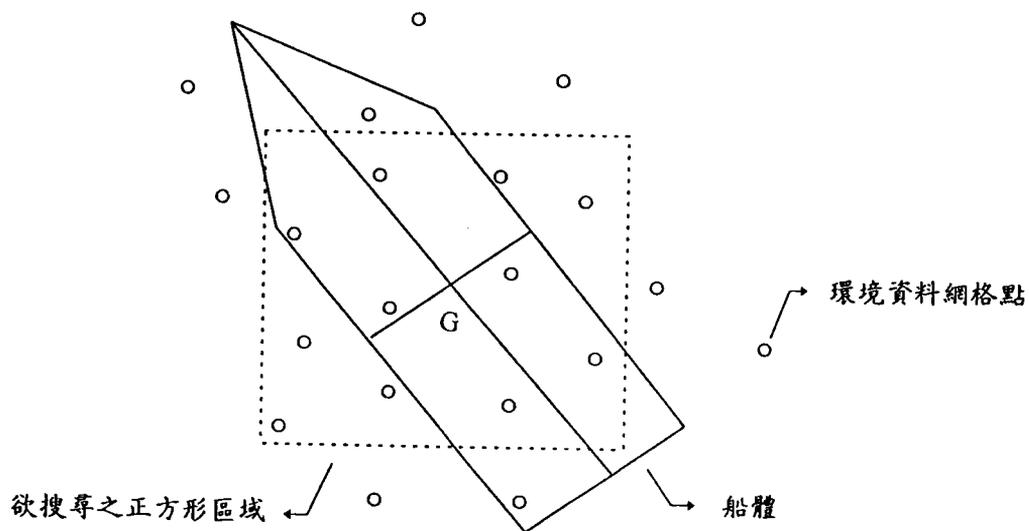


圖 6-1 風浪流資料之取法

起始階段

計算階段

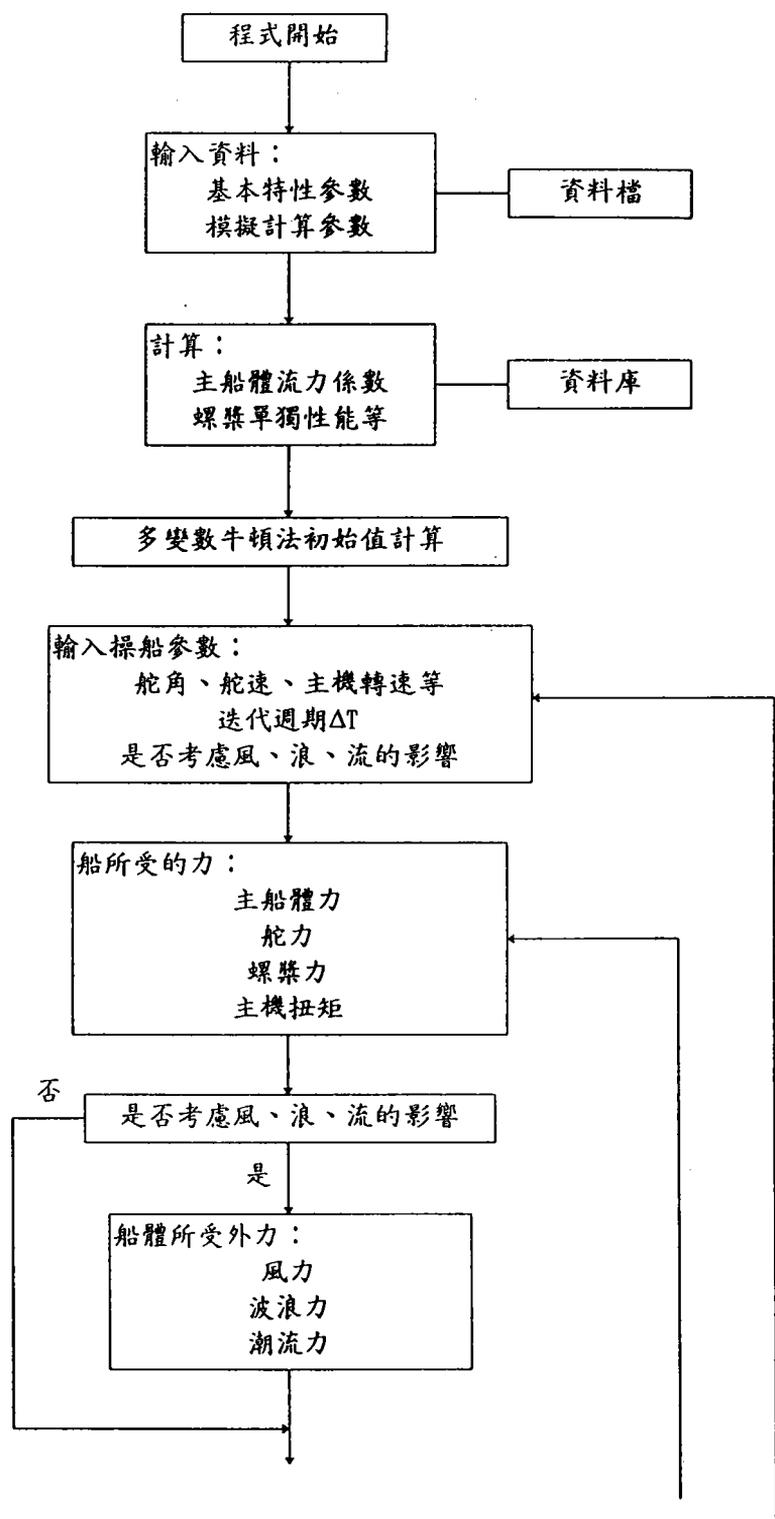


圖 6-2 操船系統流程圖

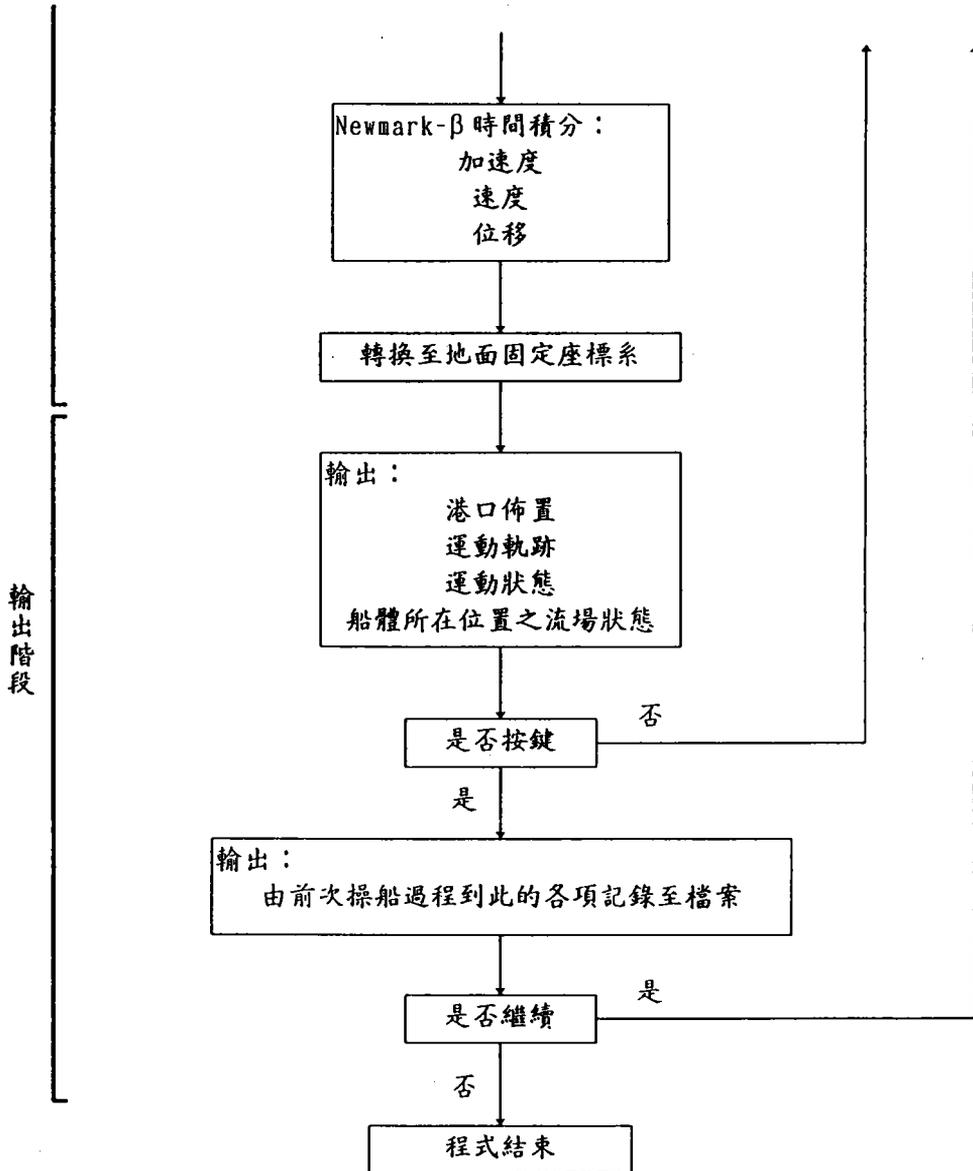


圖 6-2(續) 操船系統流程圖

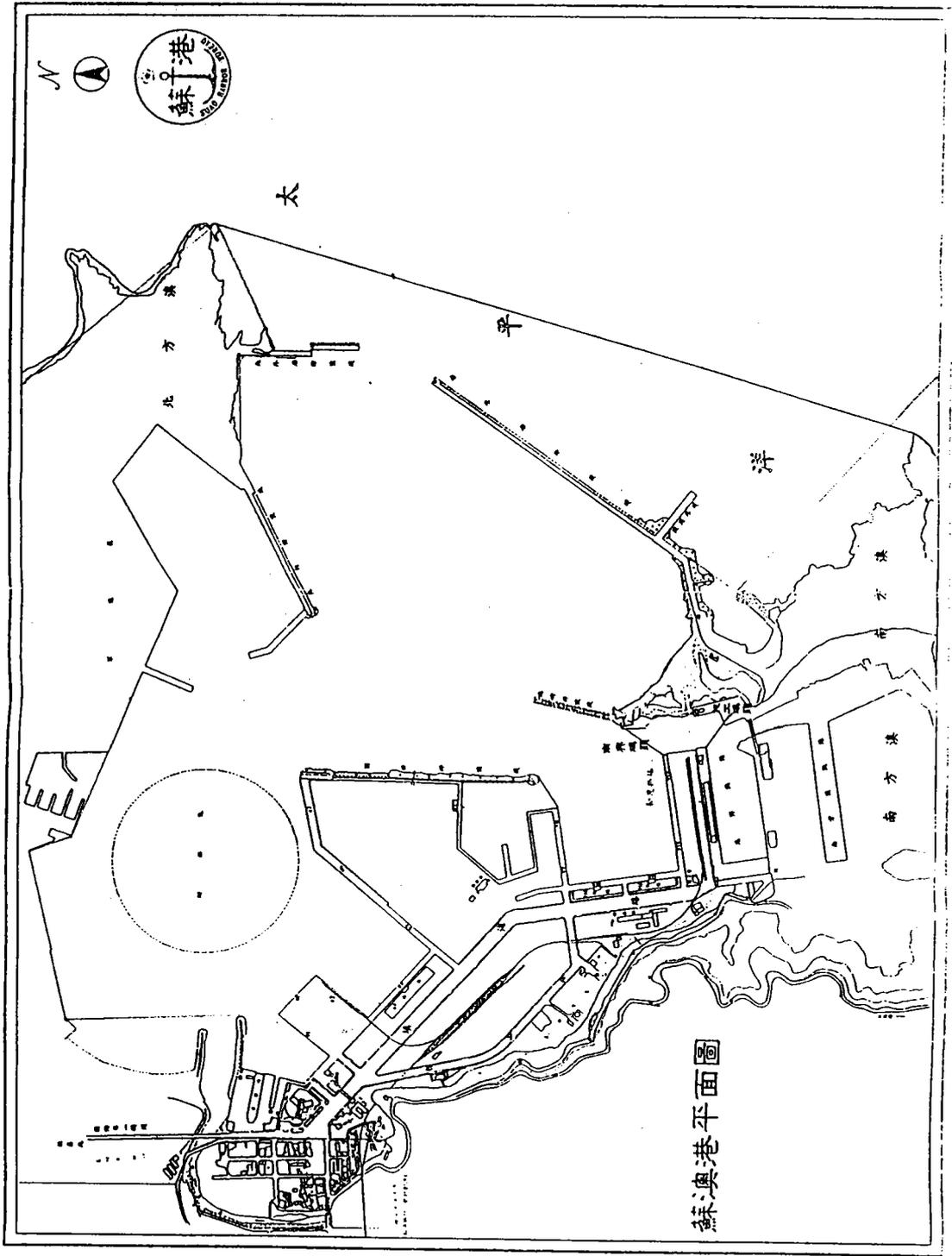


圖 7-1 蘇澳港平面佈置圖

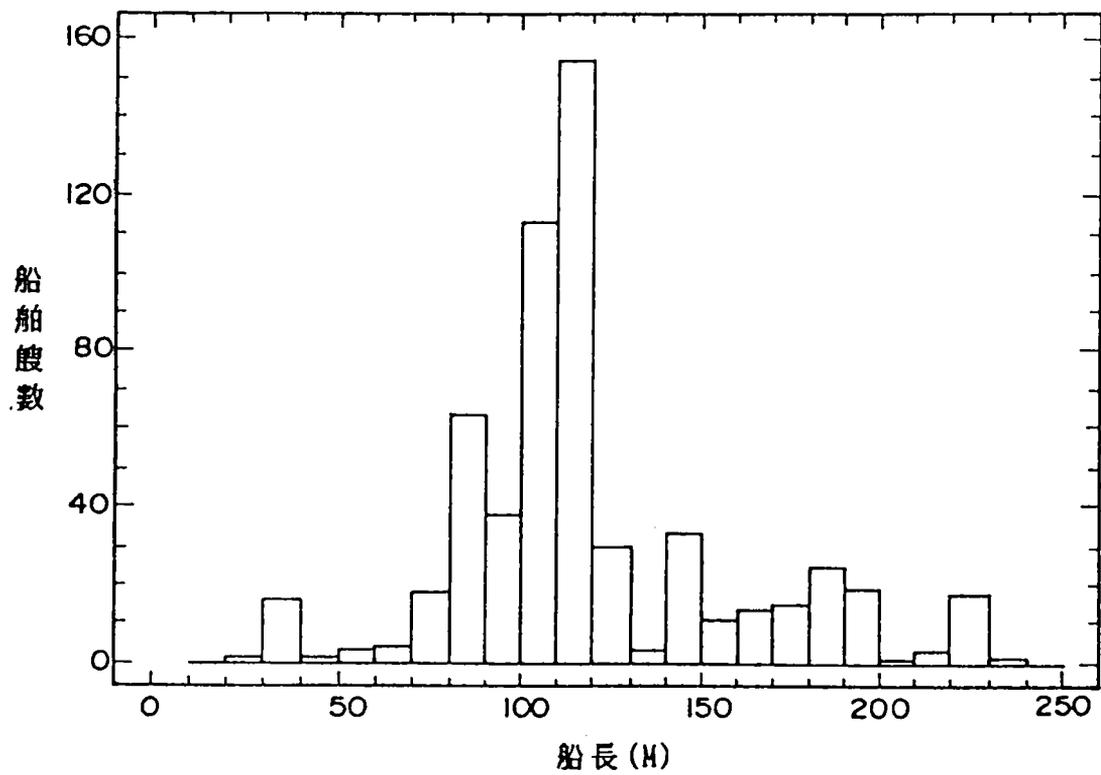


圖 7-2 78 年進出蘇澳港船舶之船長統計

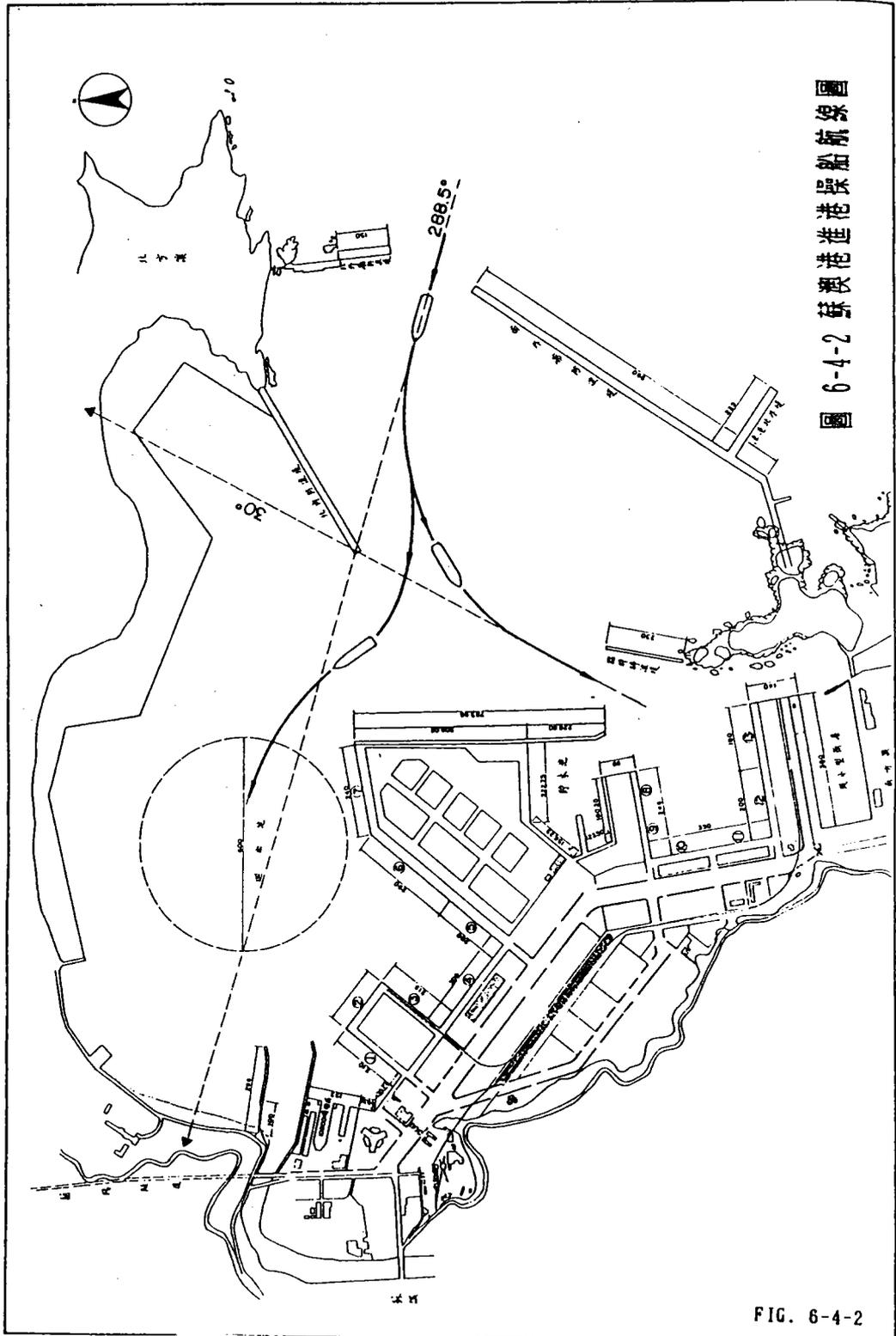


圖 7-3 蘇澳港現行進港操船航線圖

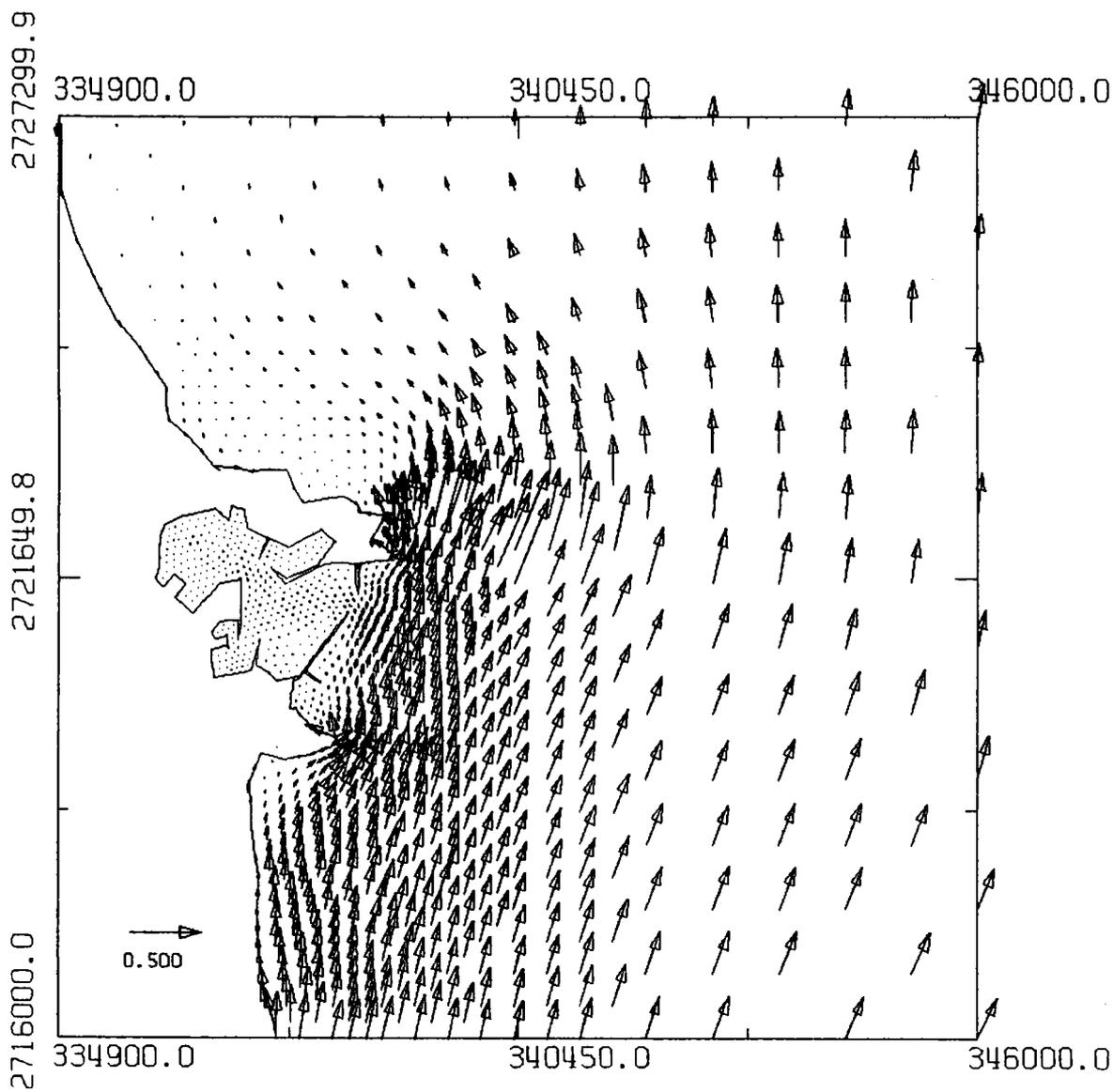


圖 7-4 蘇澳港漲潮流況

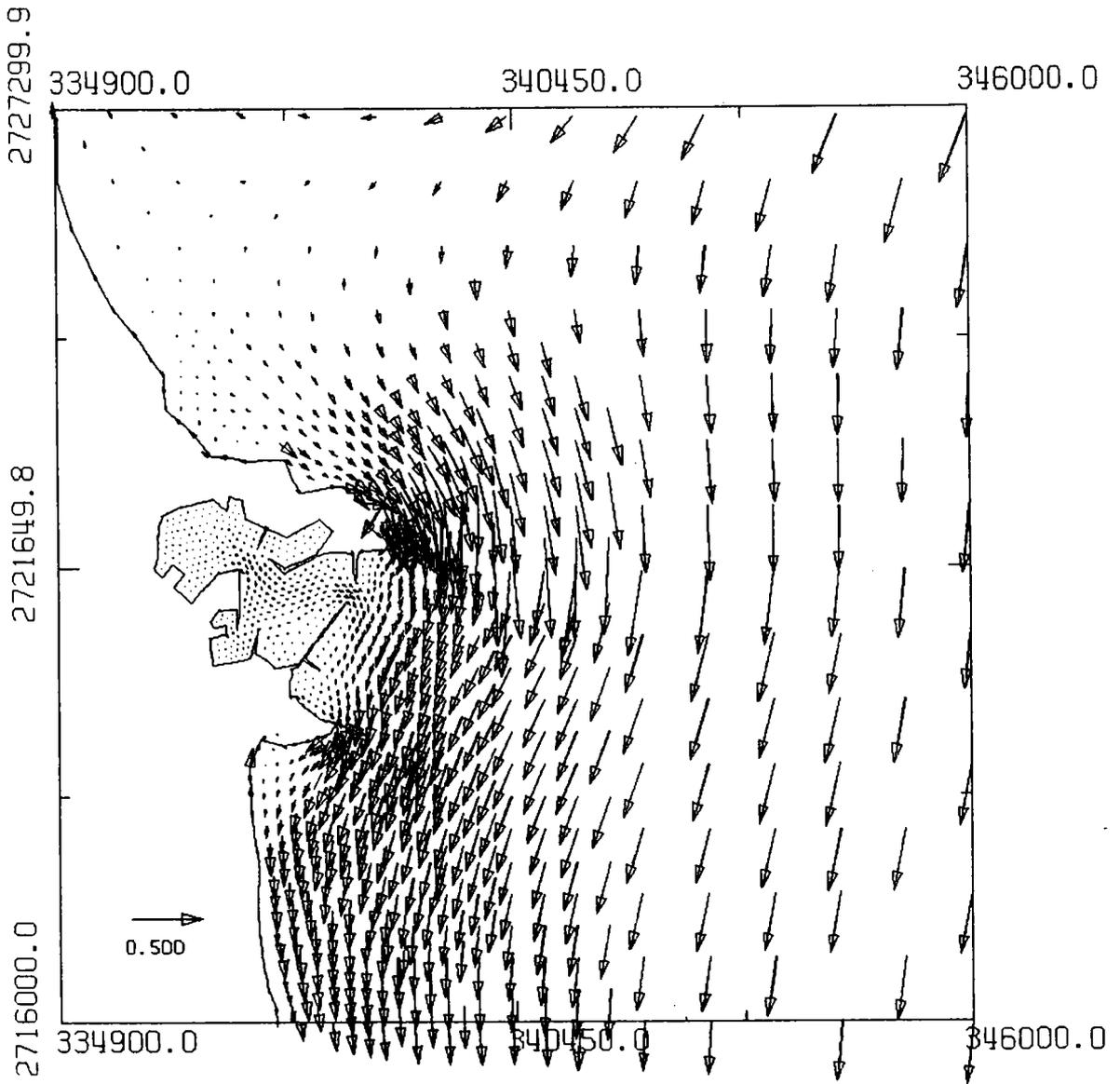
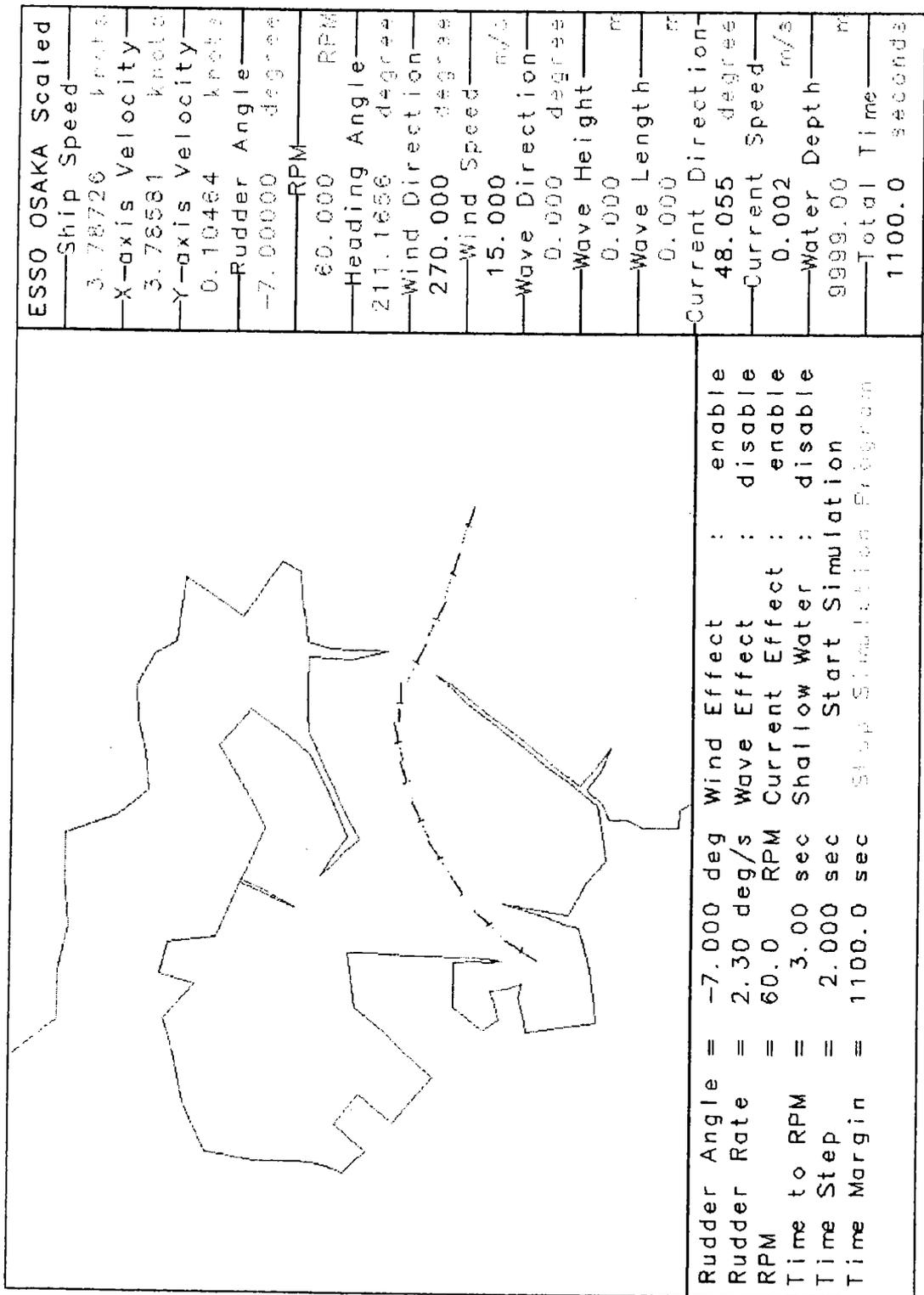
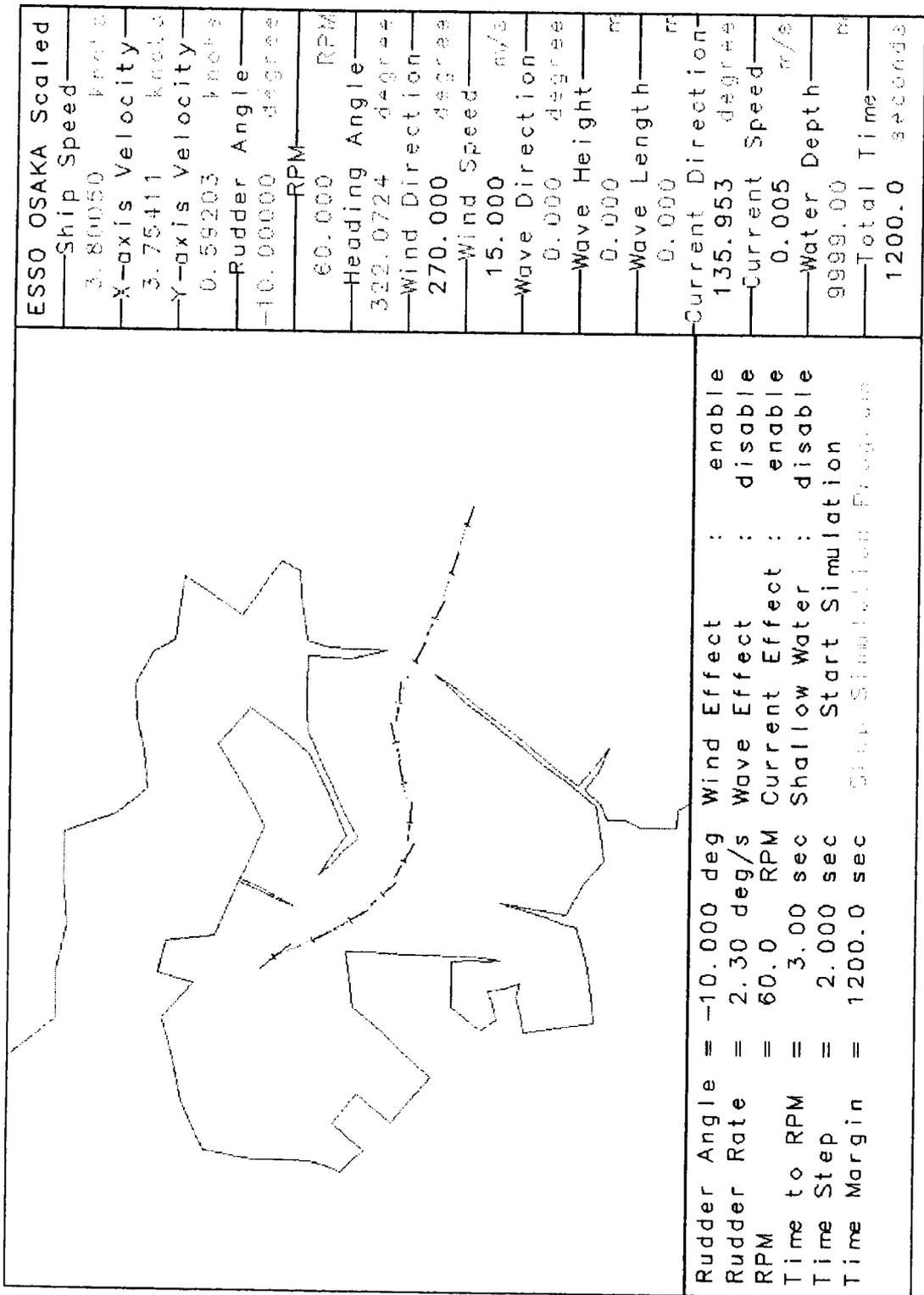


圖 7-5 蘇澳港退潮流況



UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-6 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-7 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡

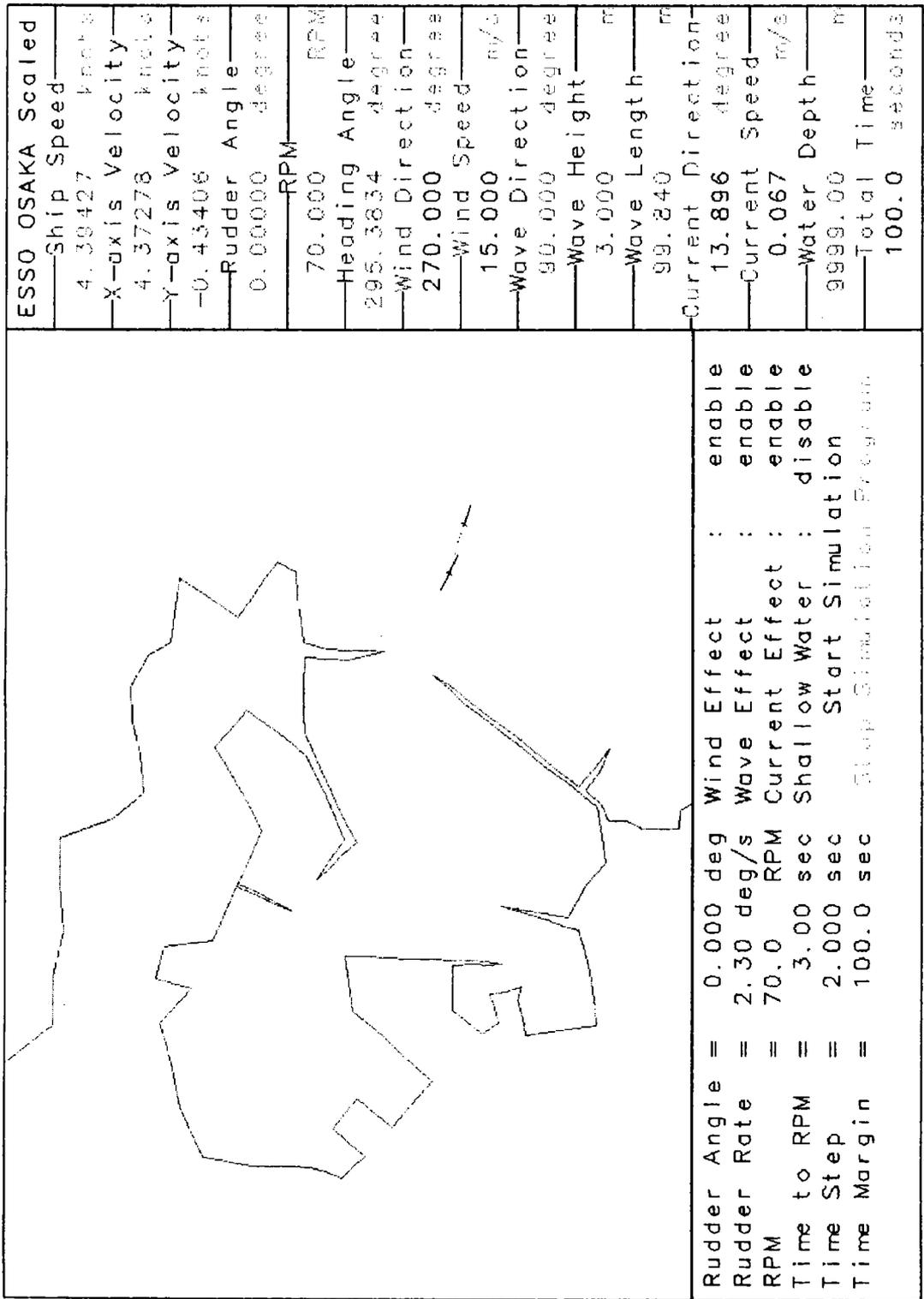
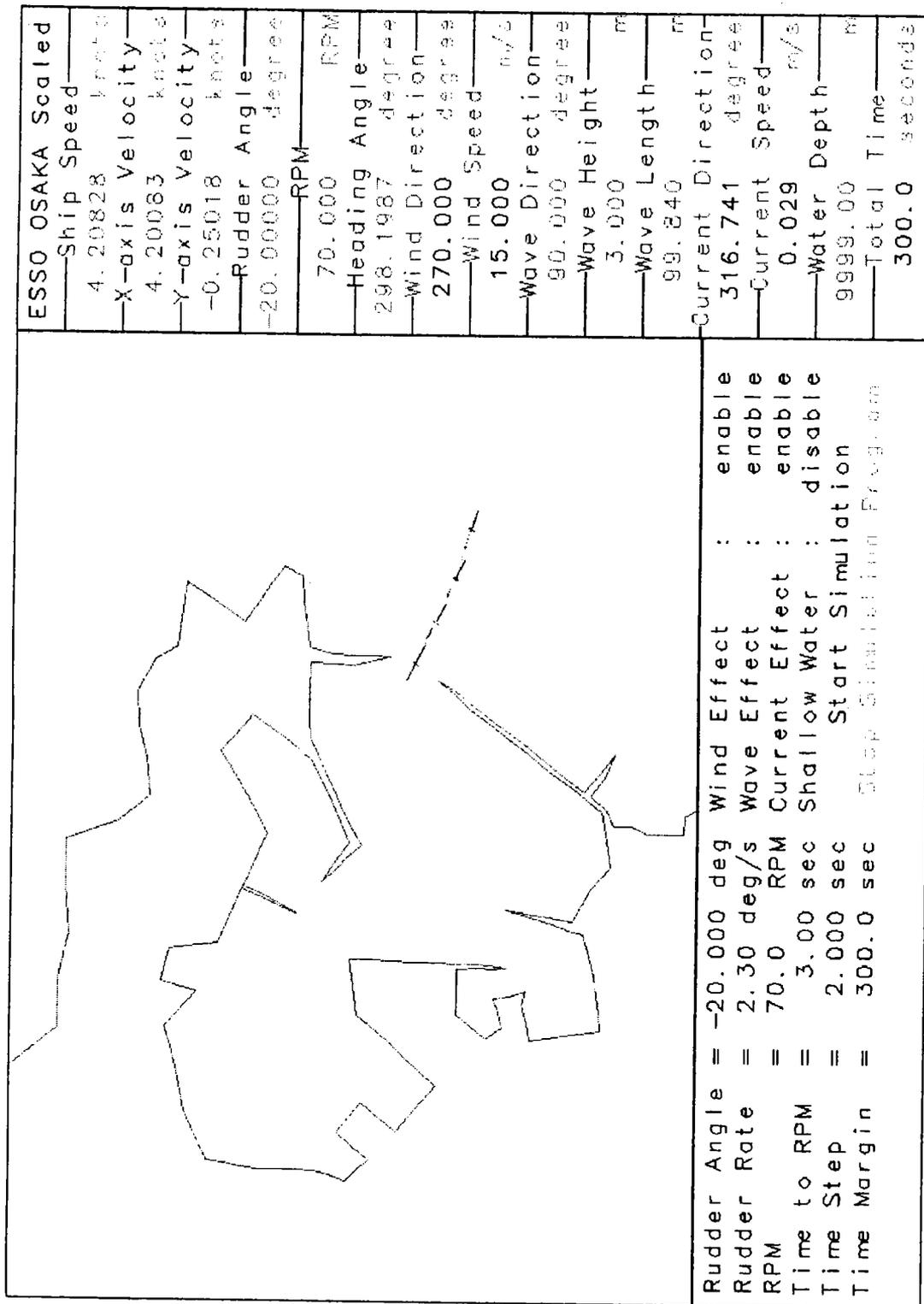
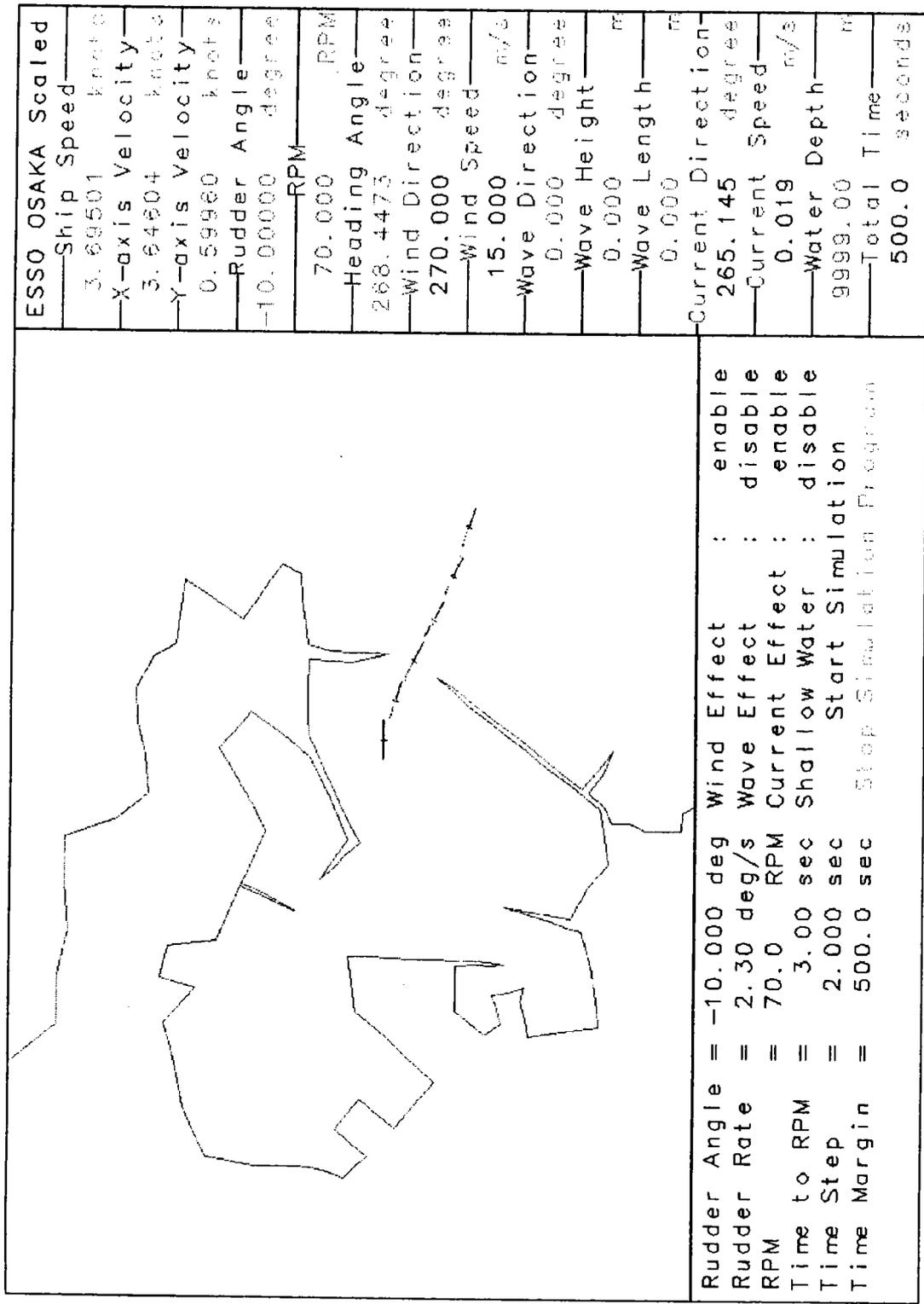


圖 7-8 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



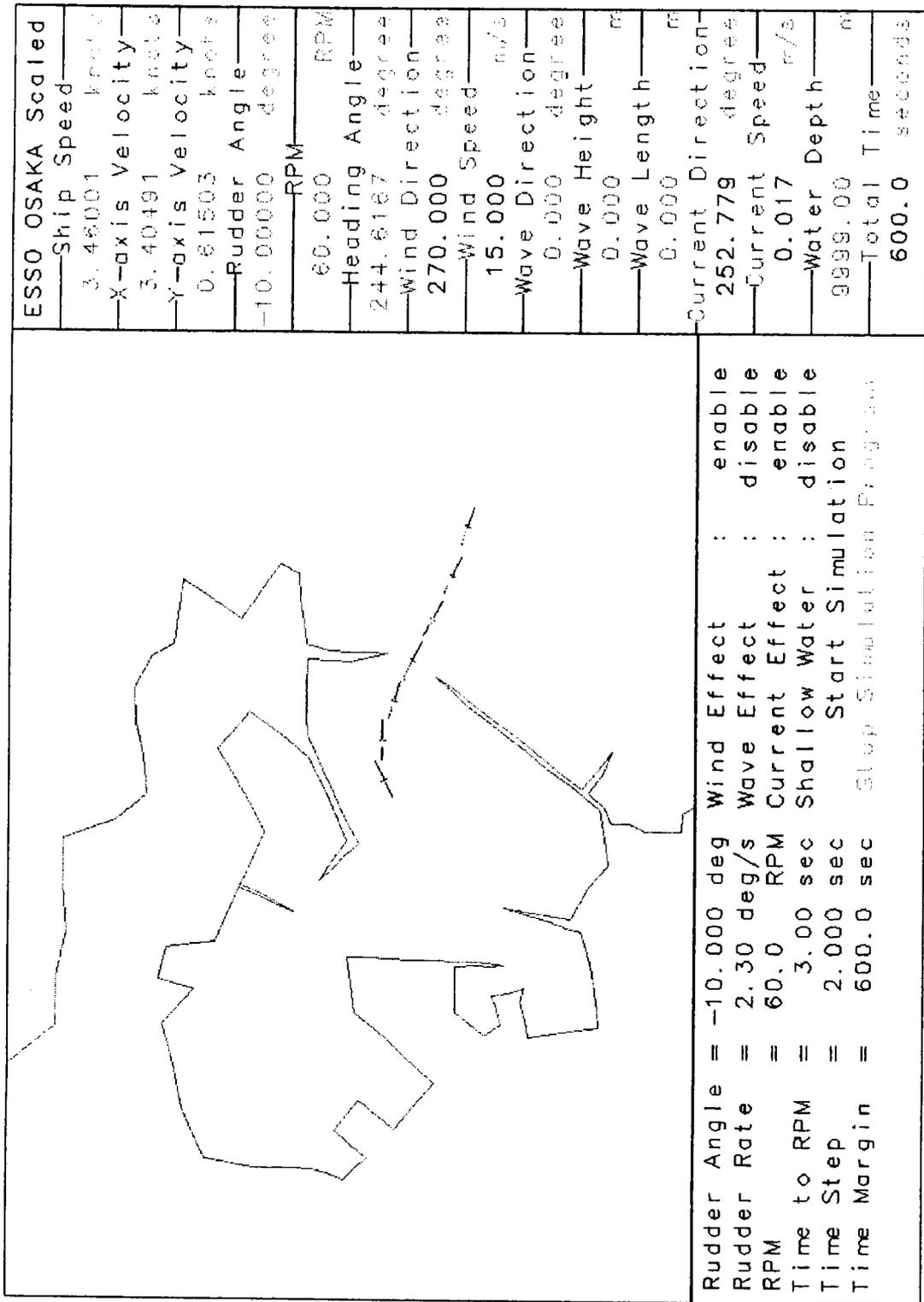
UNI-Plot Sys. 1996, v5.00

圖 7-9 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



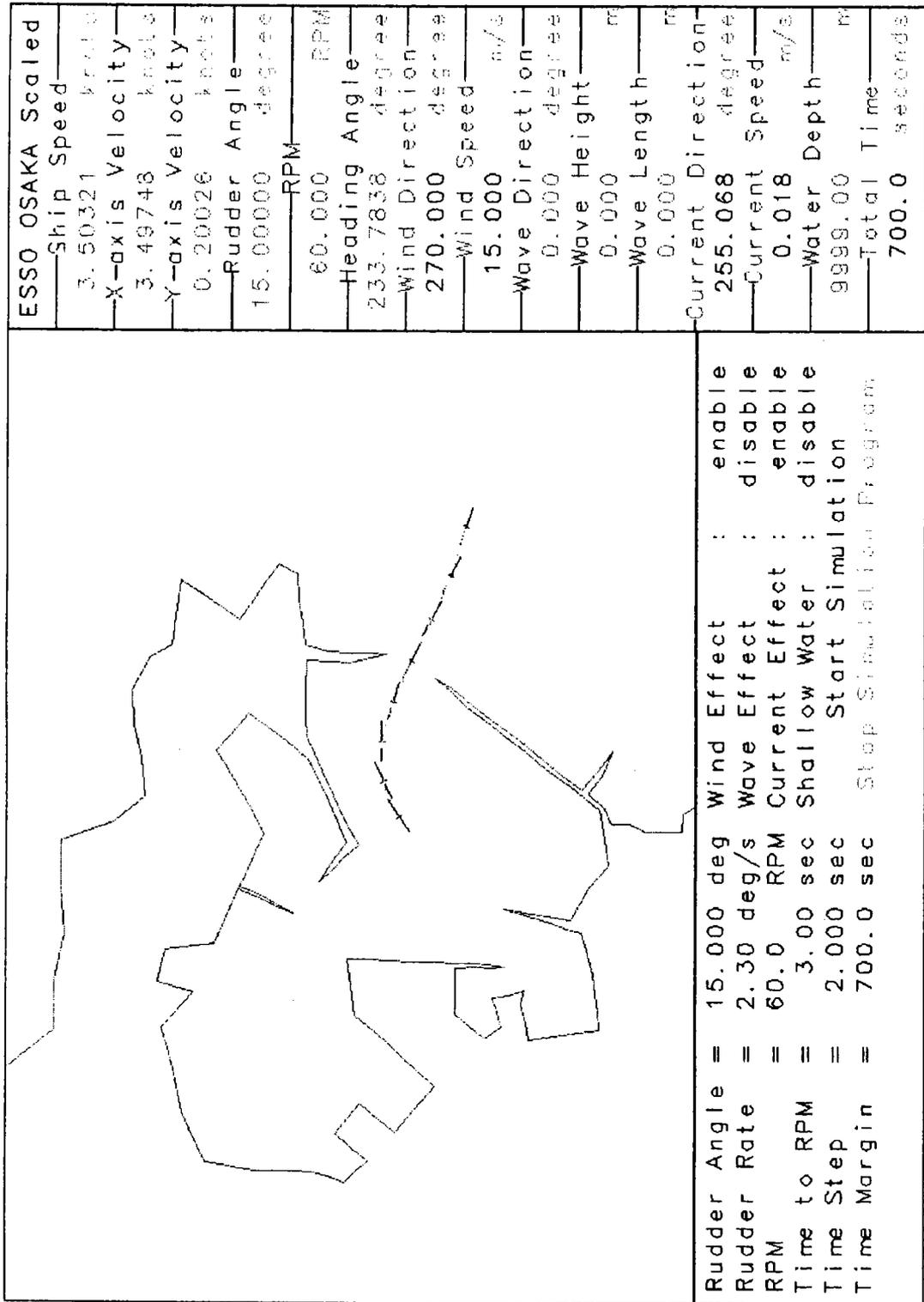
UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-10 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



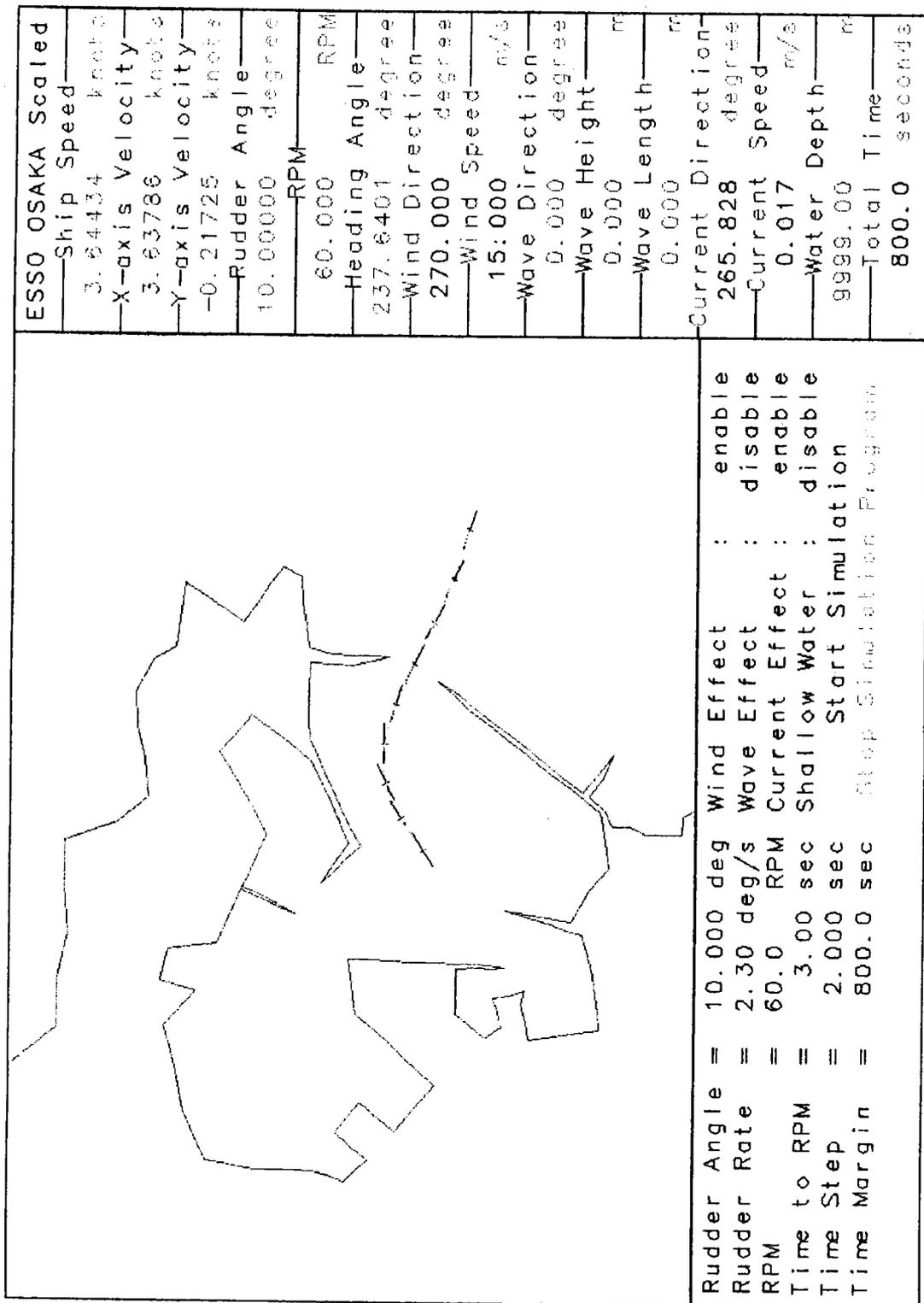
UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-11 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



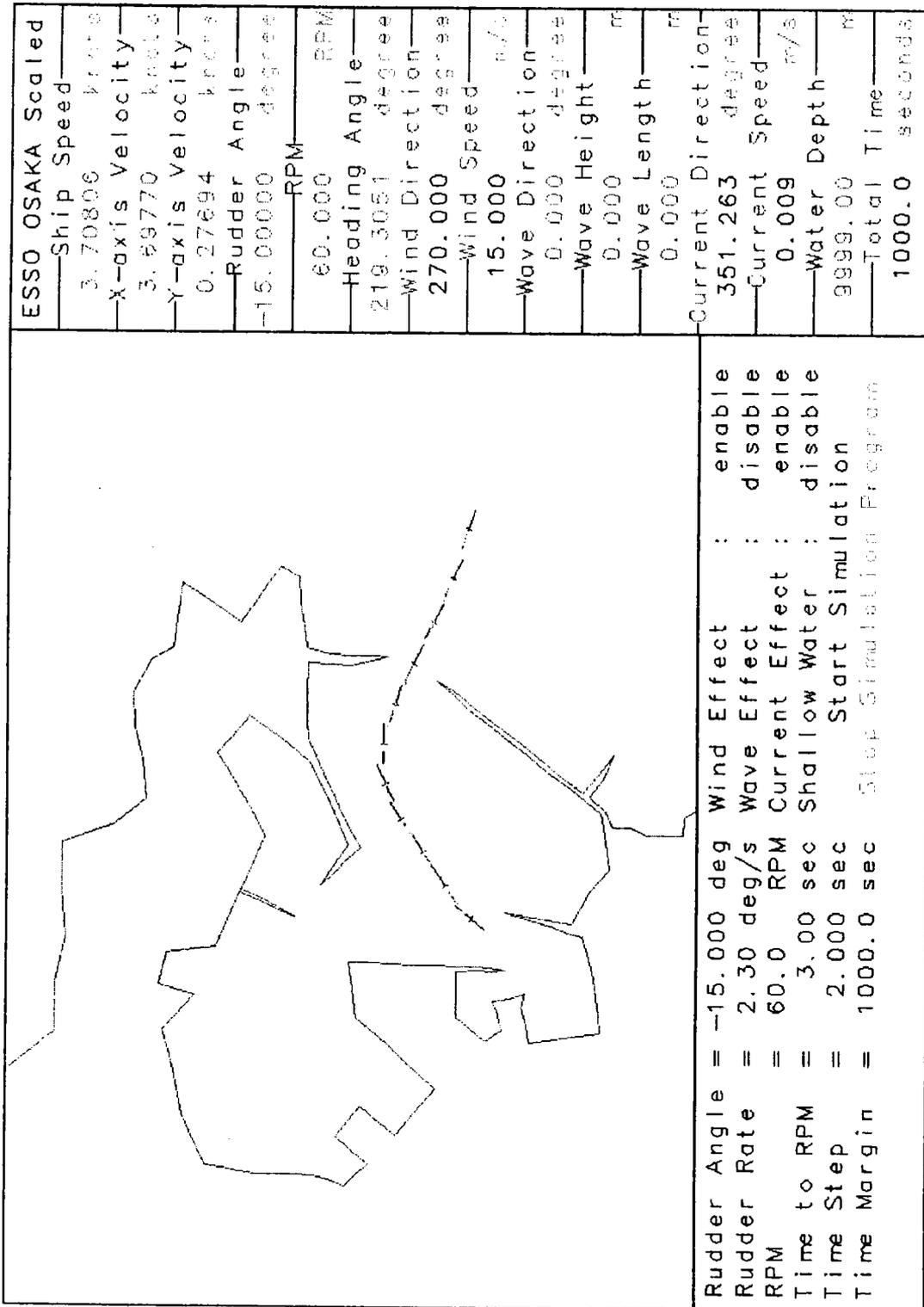
UNI-Plot Sys. 1996, 05.00

圖 7-12 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



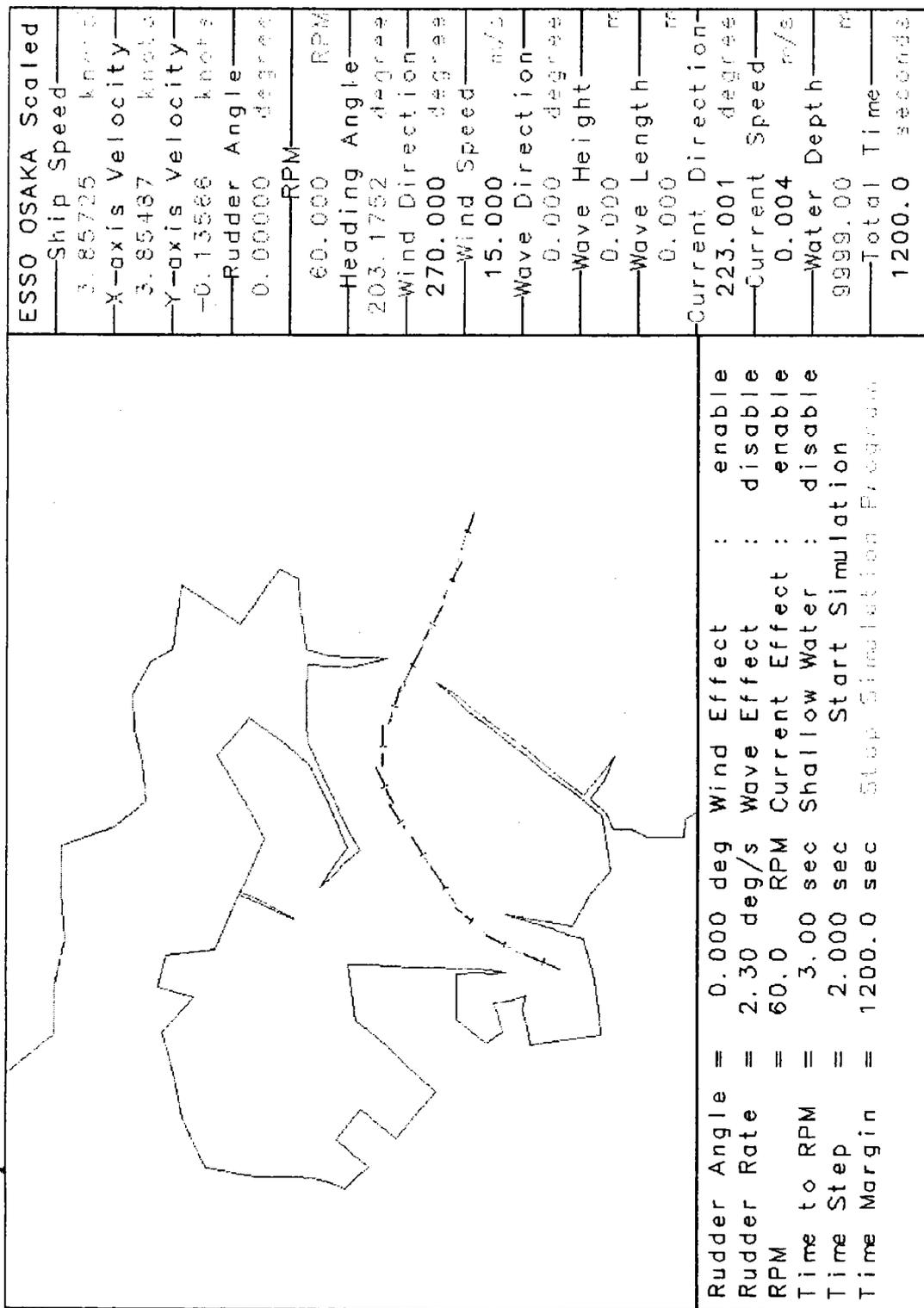
UMI-Plot Sys. 1996, 05.00

圖 7-13 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



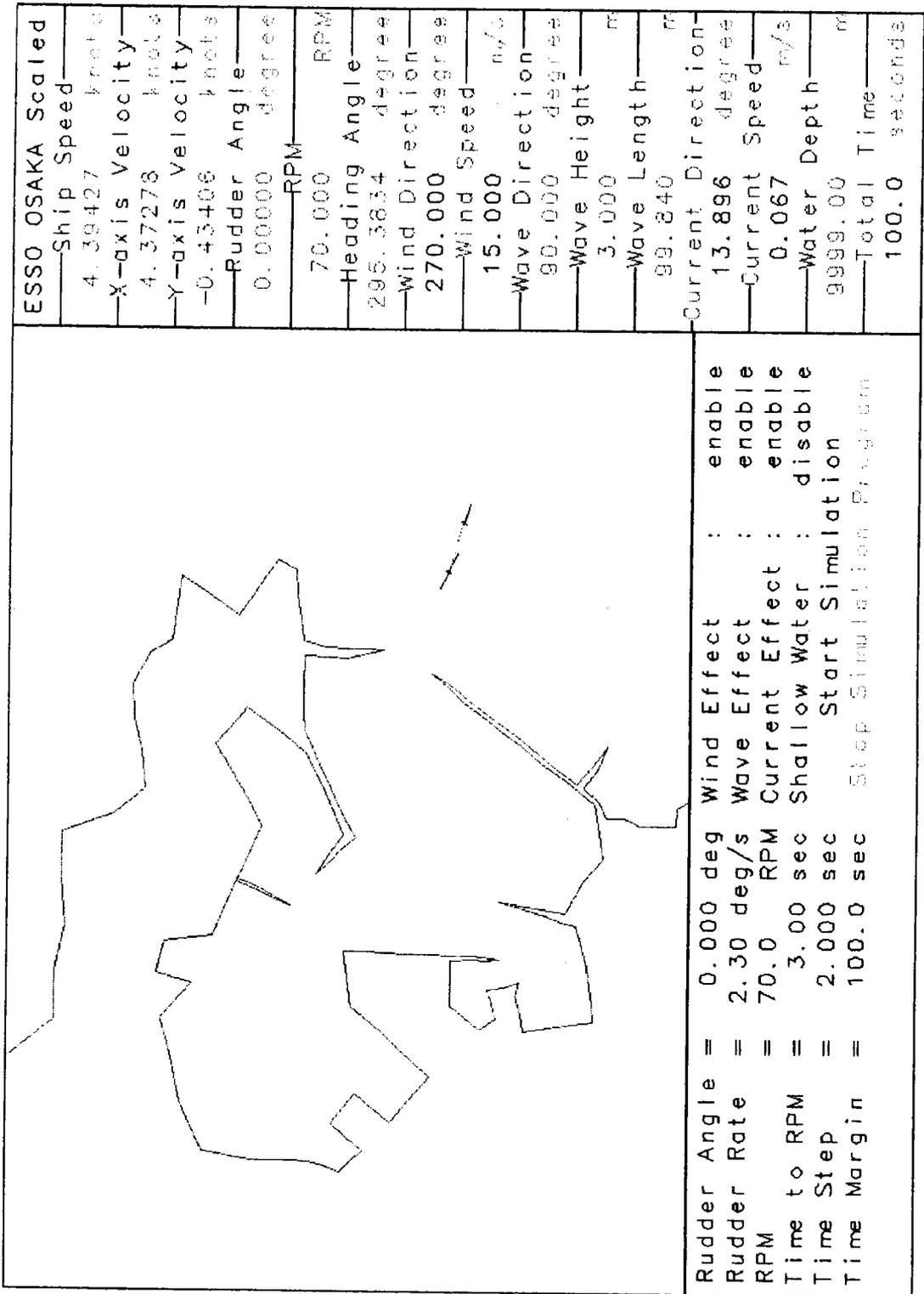
UNI-Plot Sys. 1996, v5.00

圖 7-14 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



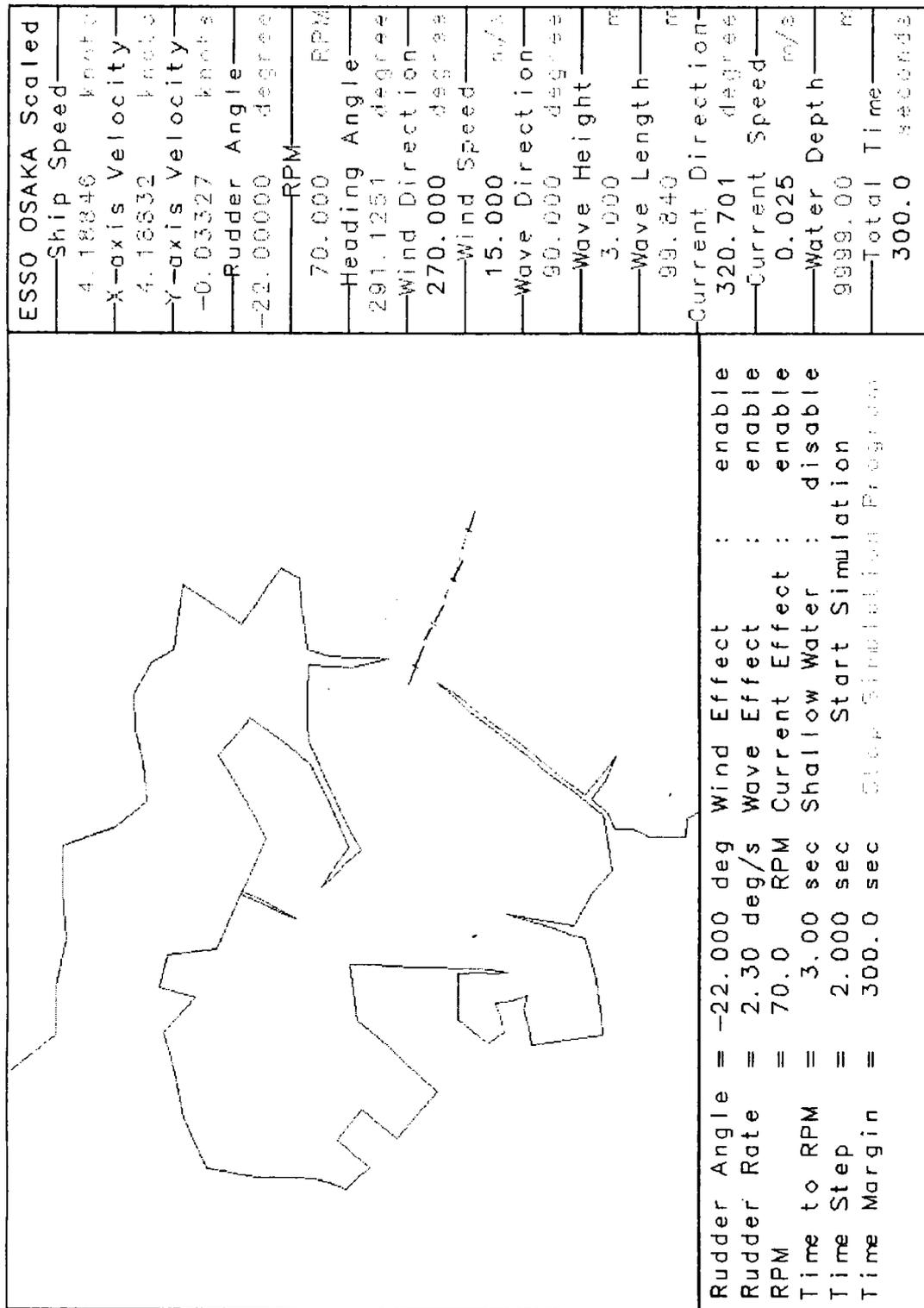
UNI-Plot Sys. 1996, \$5,000

圖 7-15 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



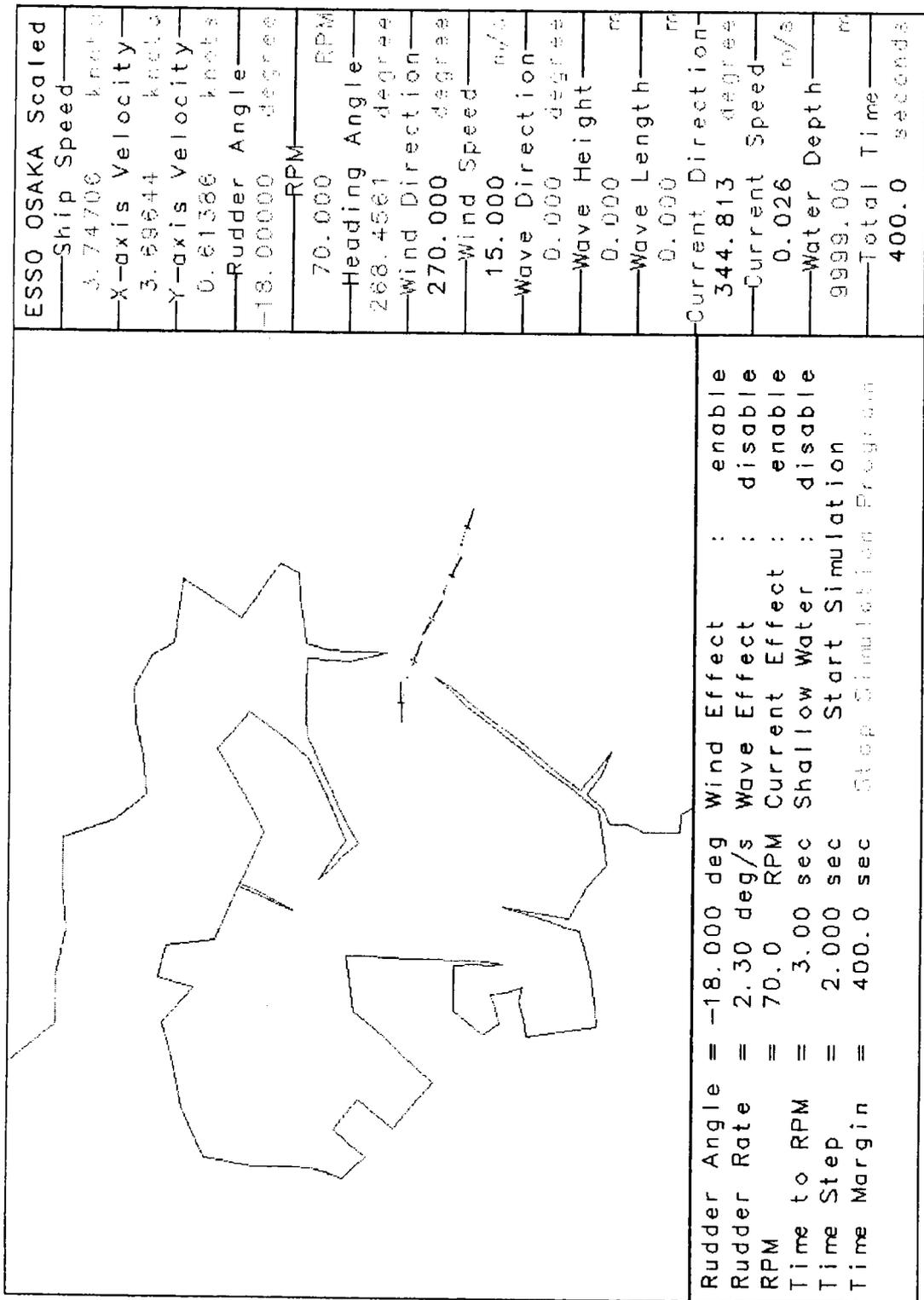
UMI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-16 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



UNI-Plot Sys. 1996, US.00

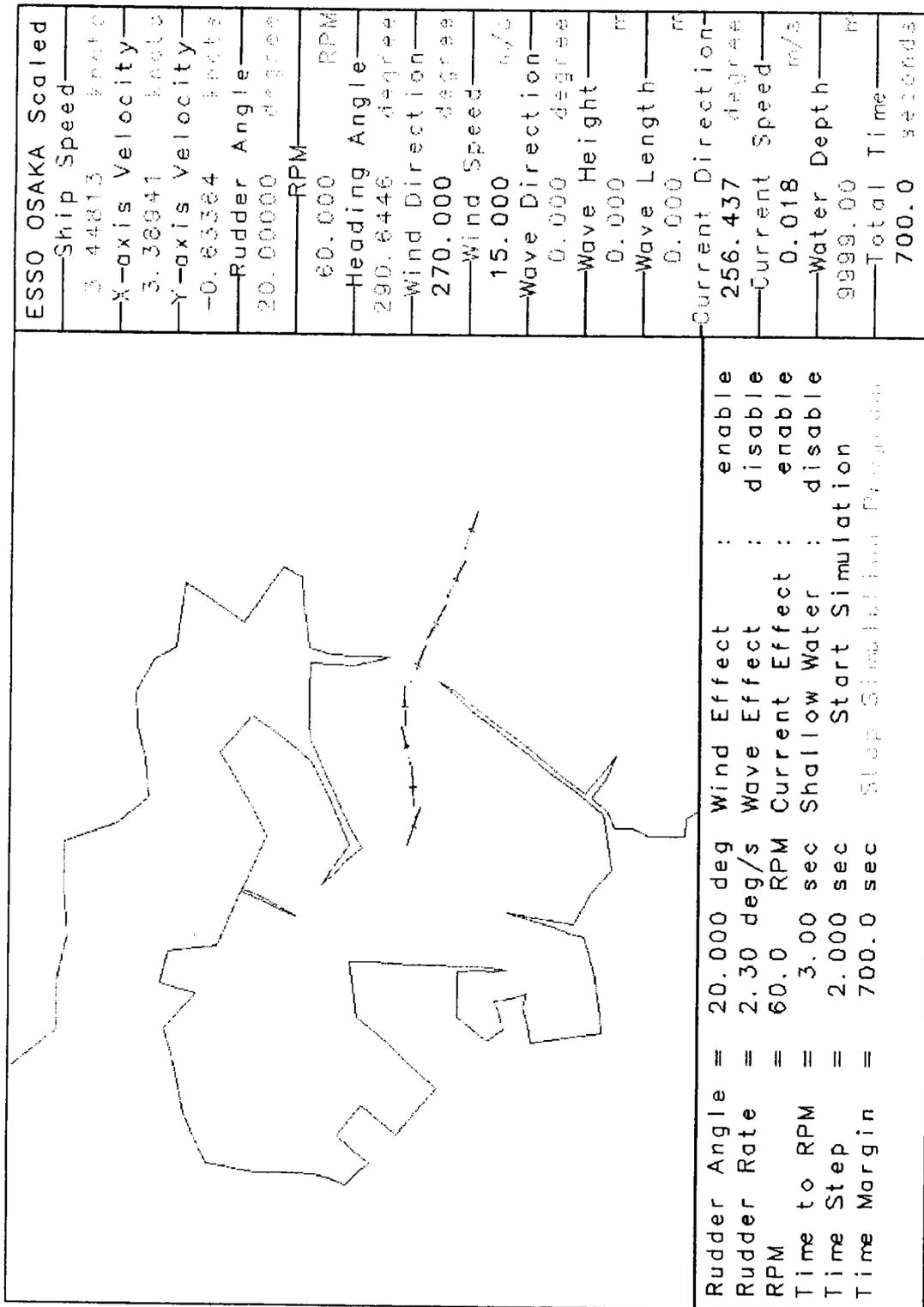
圖 7-17 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



ESSO OSAKA Scaled	
Ship Speed	3.74706 knots
X-axis Velocity	3.99644 knots
Y-axis Velocity	0.61366 knots
Rudder Angle	-18.00000 degree
RPM	70.000 RPM
Heading Angle	268.4561 degree
Wind Direction	270.000 degree
Wind Speed	15.000 m/s
Wave Direction	0.000 degree
Wave Height	0.000 m
Wave Length	0.000 m
Current Direction	344.813 degree
Current Speed	0.026 m/s
Water Depth	9999.00 m
Total Time	400.0 seconds

UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-18 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



UNI-Plot Sys. 1996, \$5,000

圖 7-19 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡

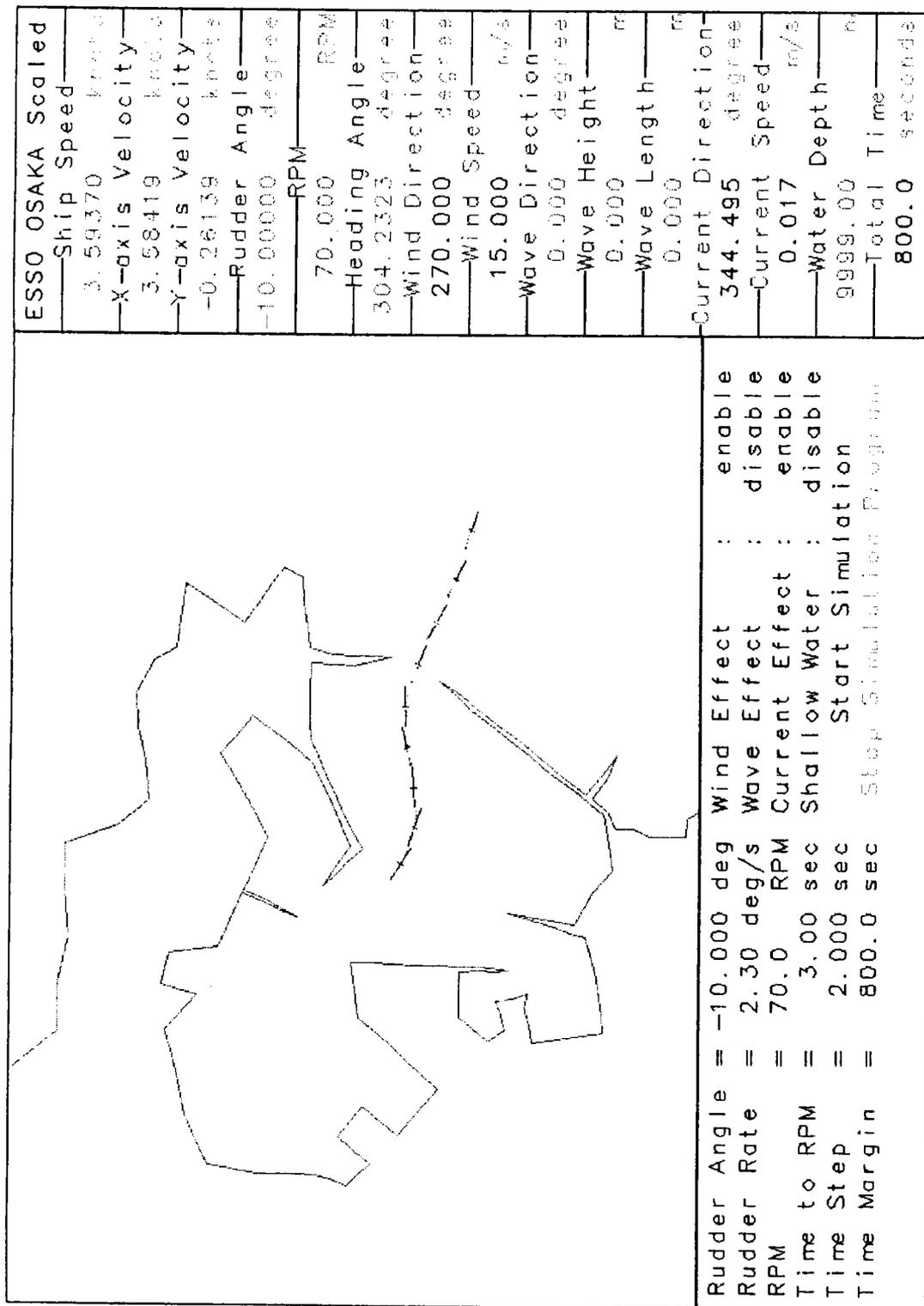
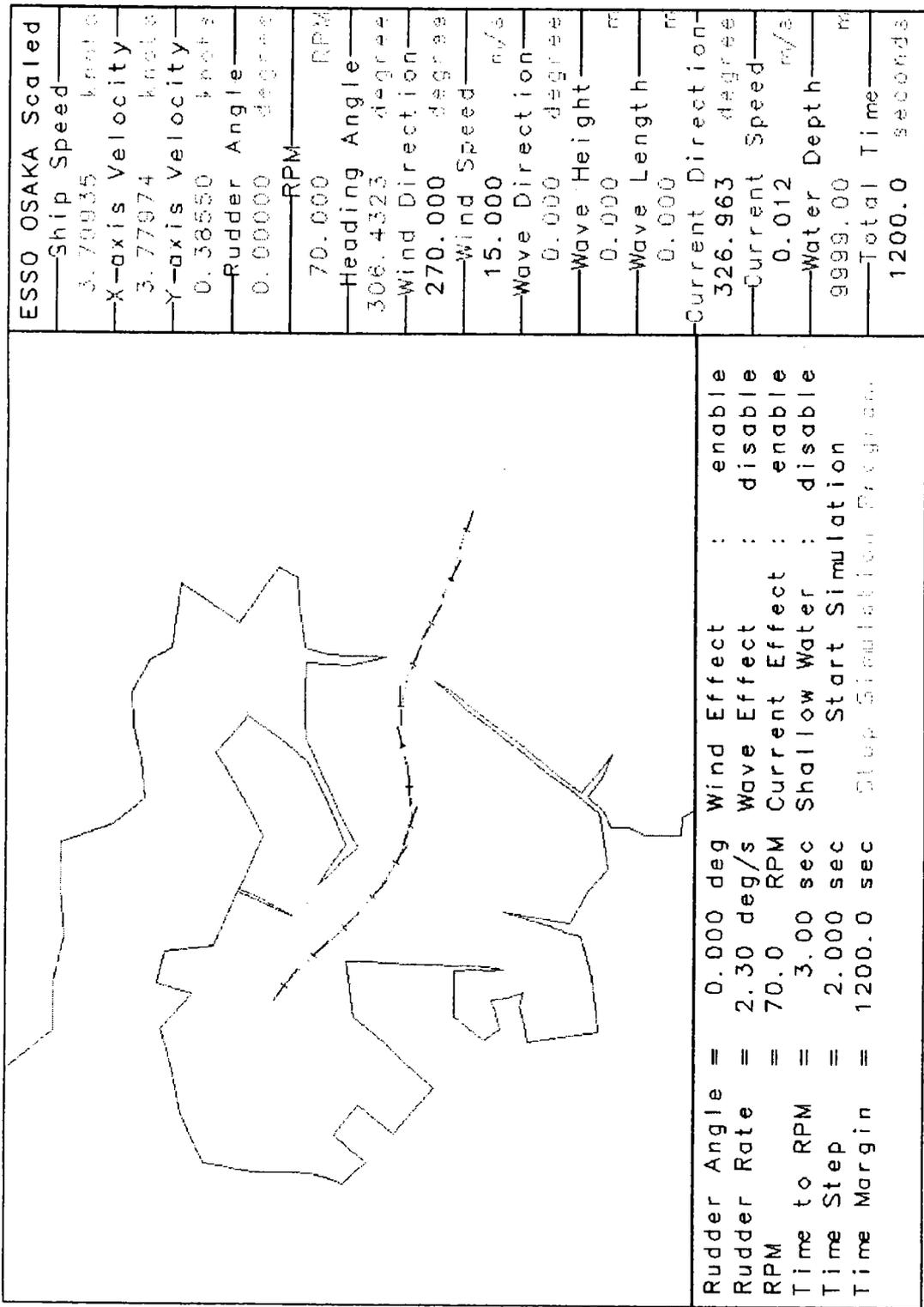
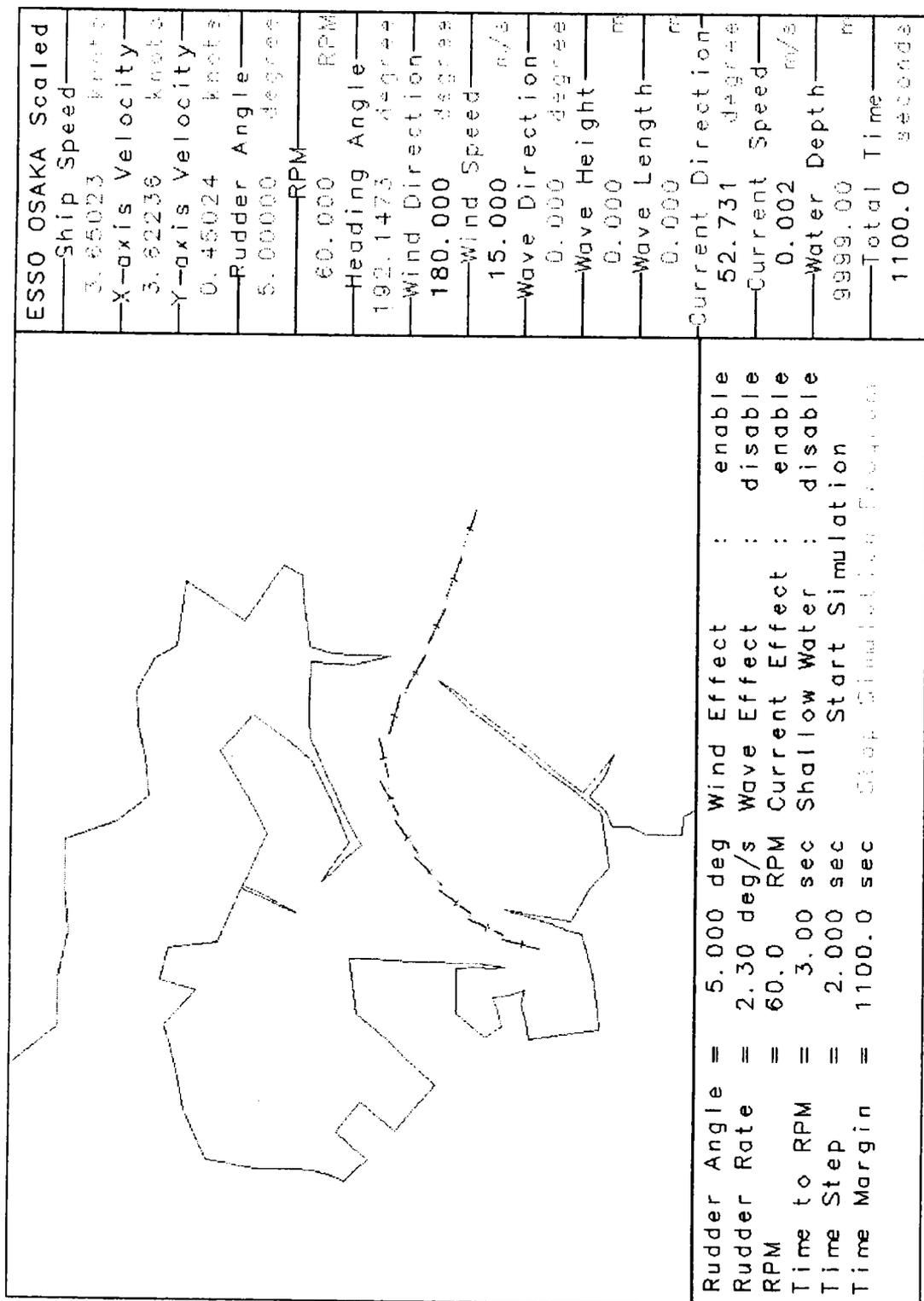


圖 7-20 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



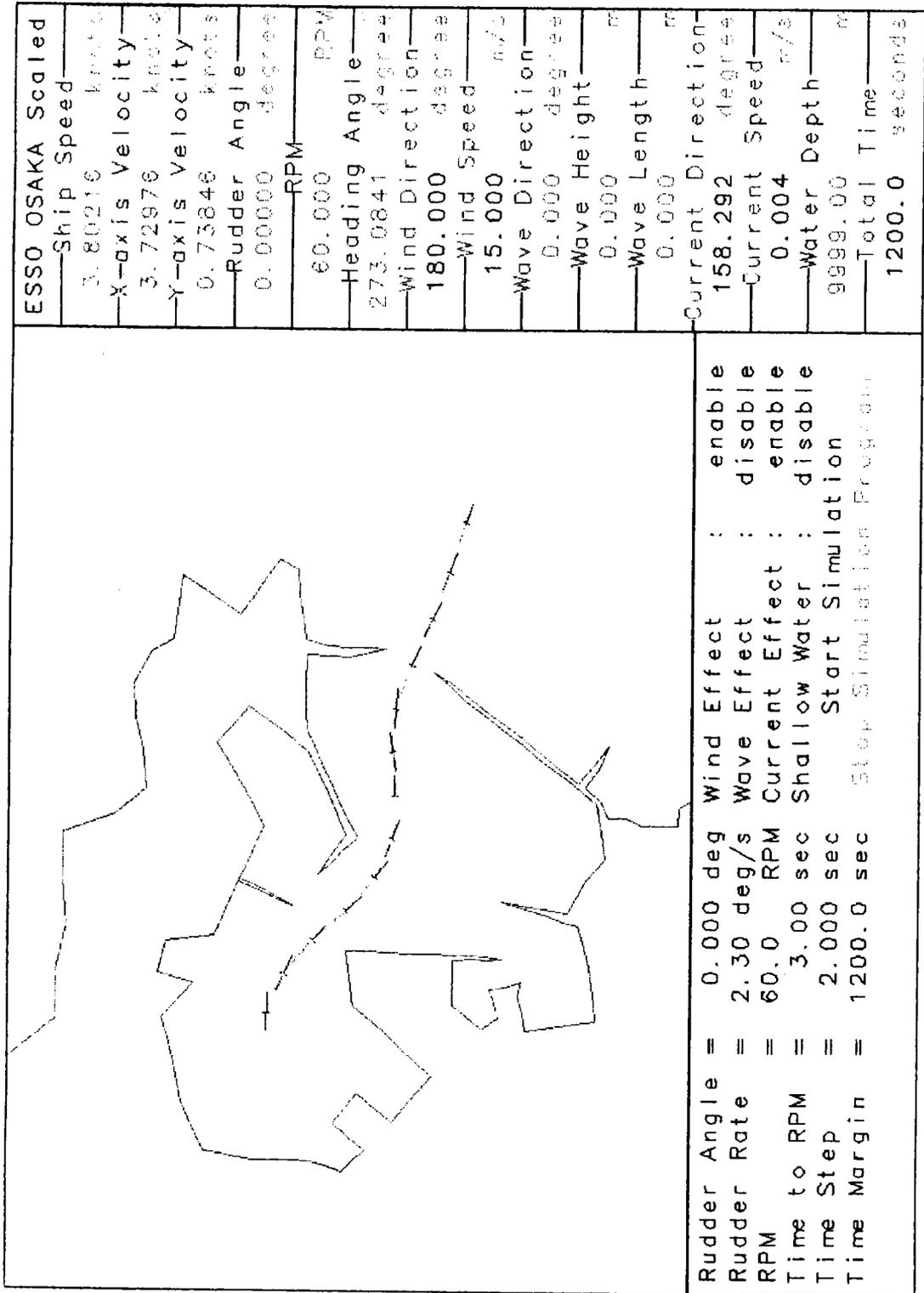
UMI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-21 為風速 15m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-22 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



UNI-Pilot Sys. 1996, v5.00

圖 7-23 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡

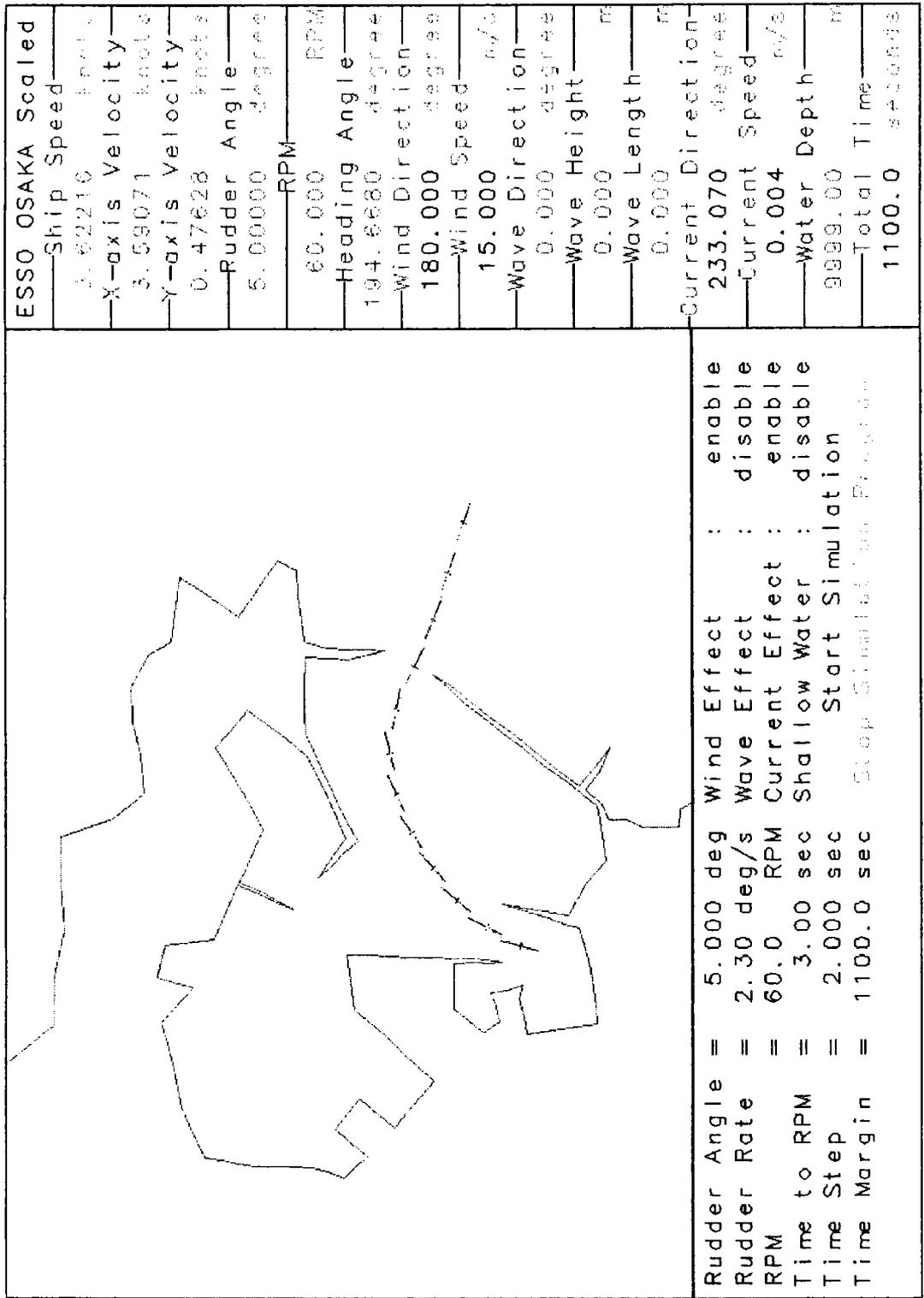
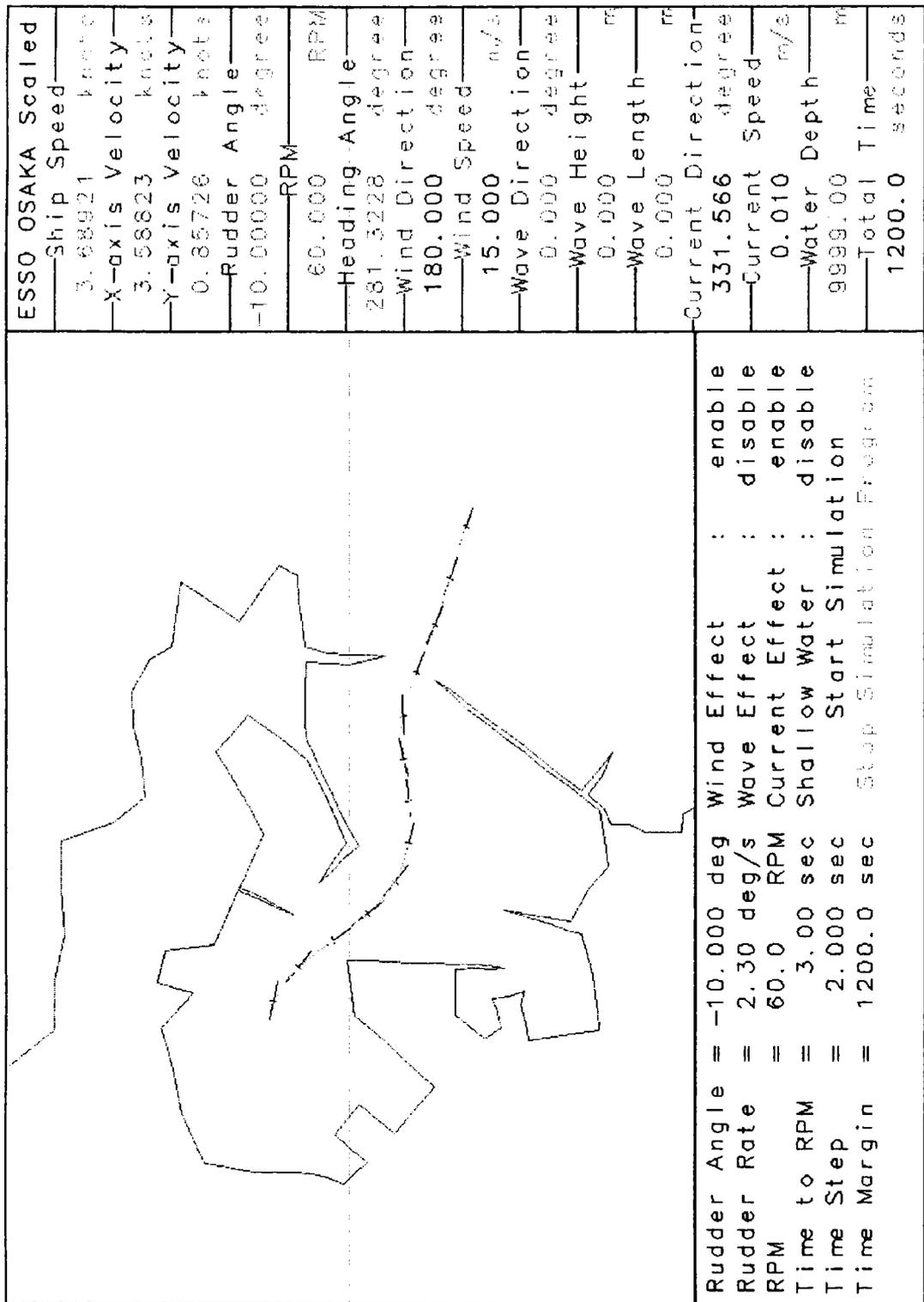
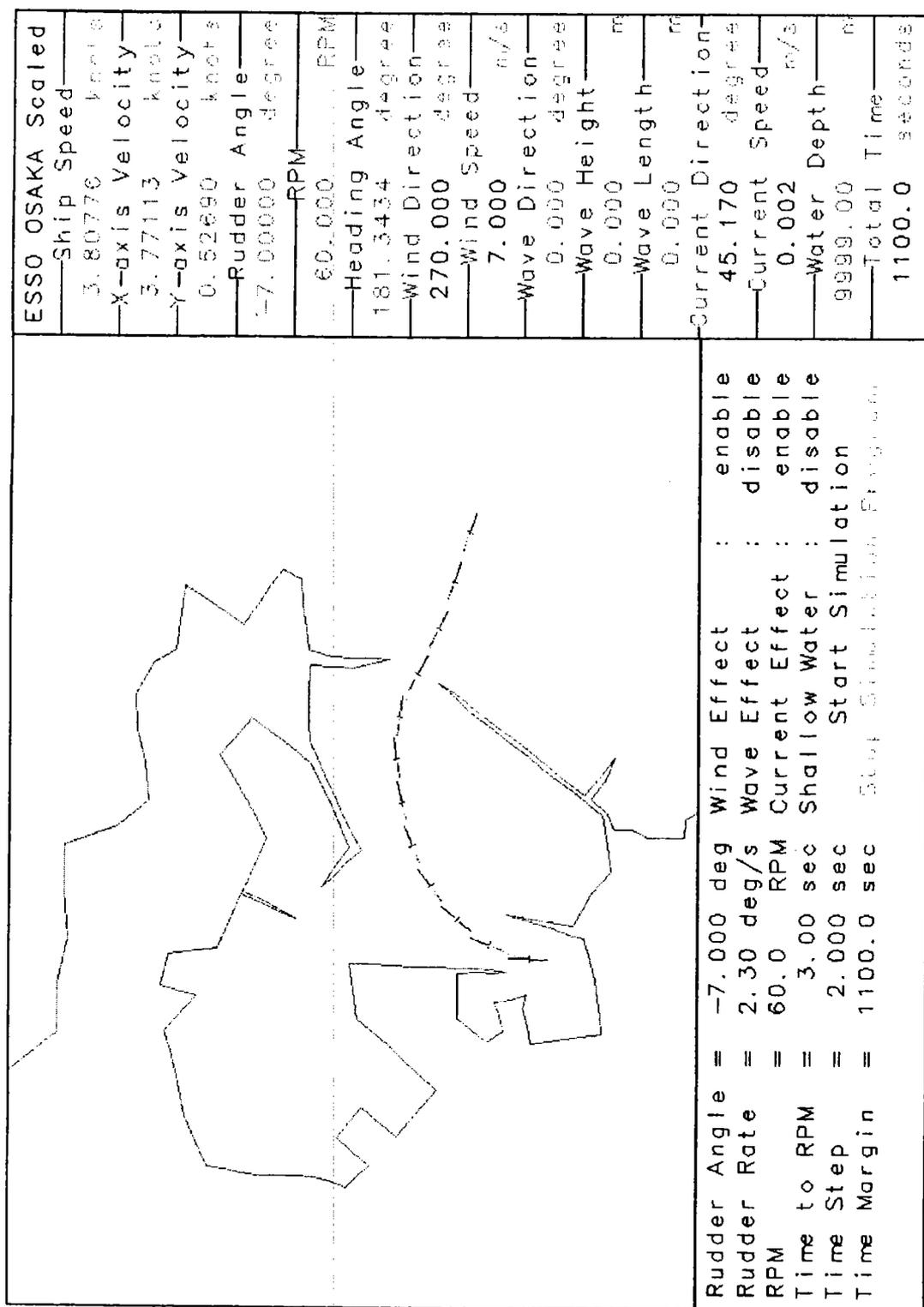


圖 7-24 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



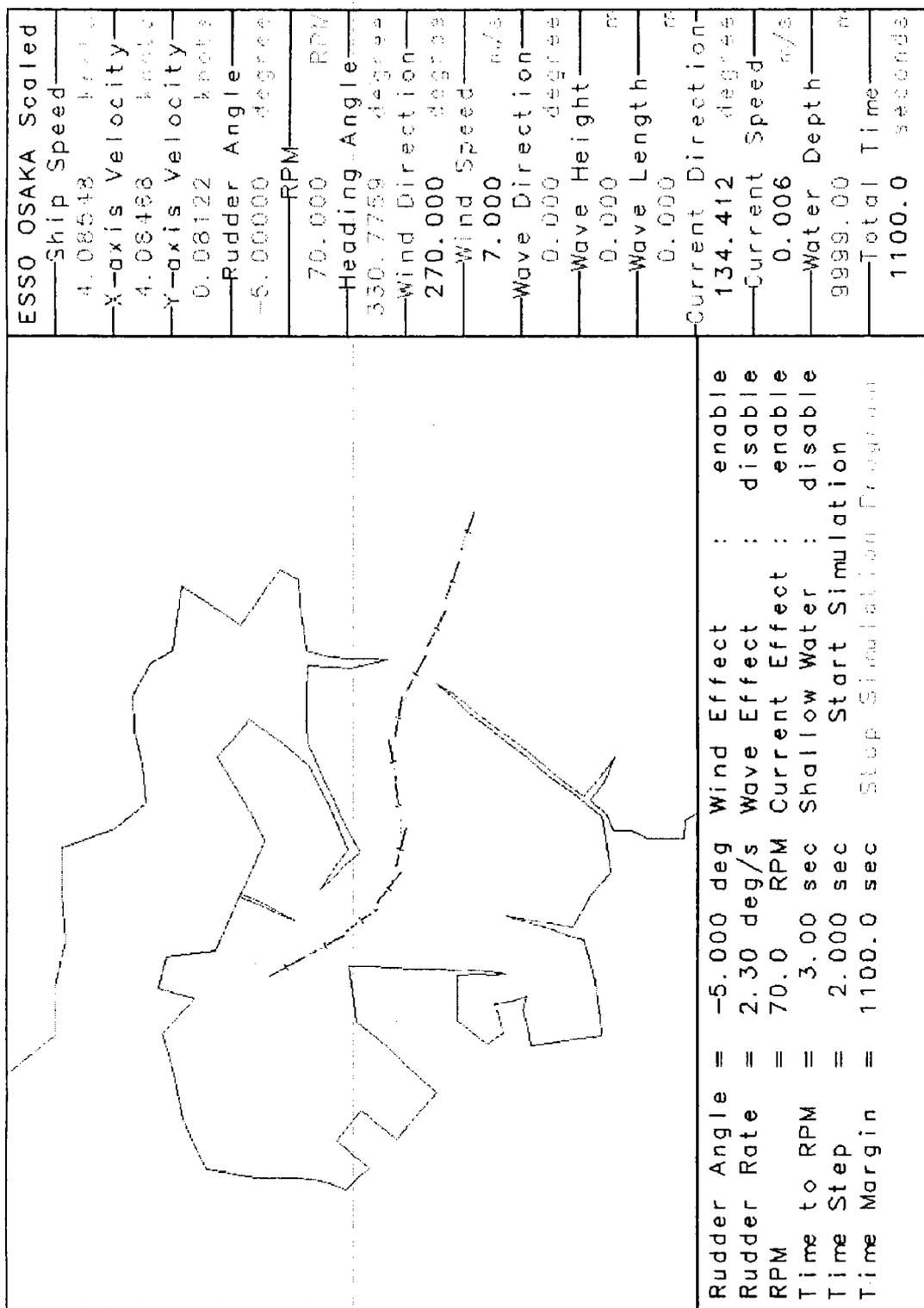
UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-25 為風速 15m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



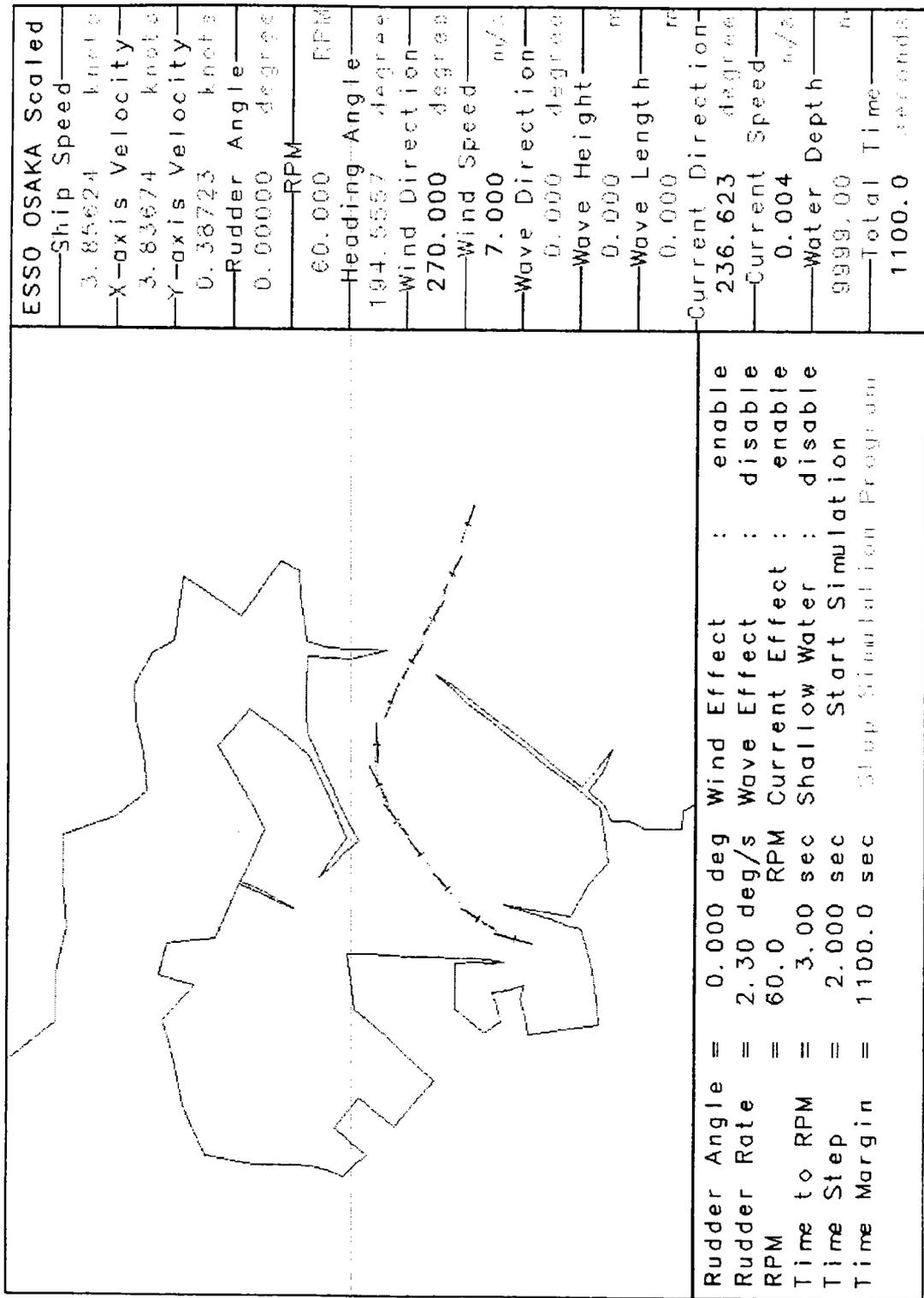
UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-26 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



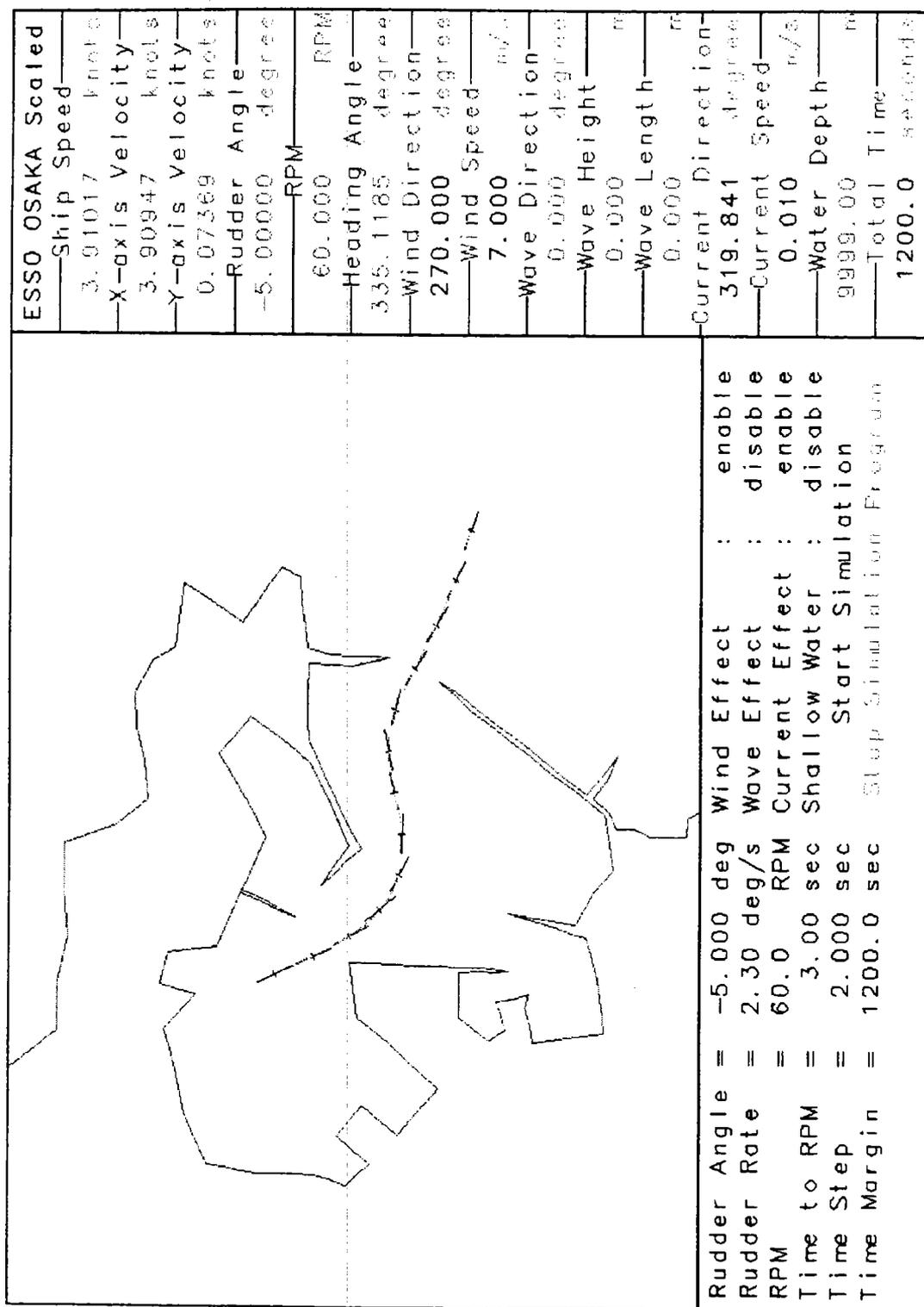
UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-27 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



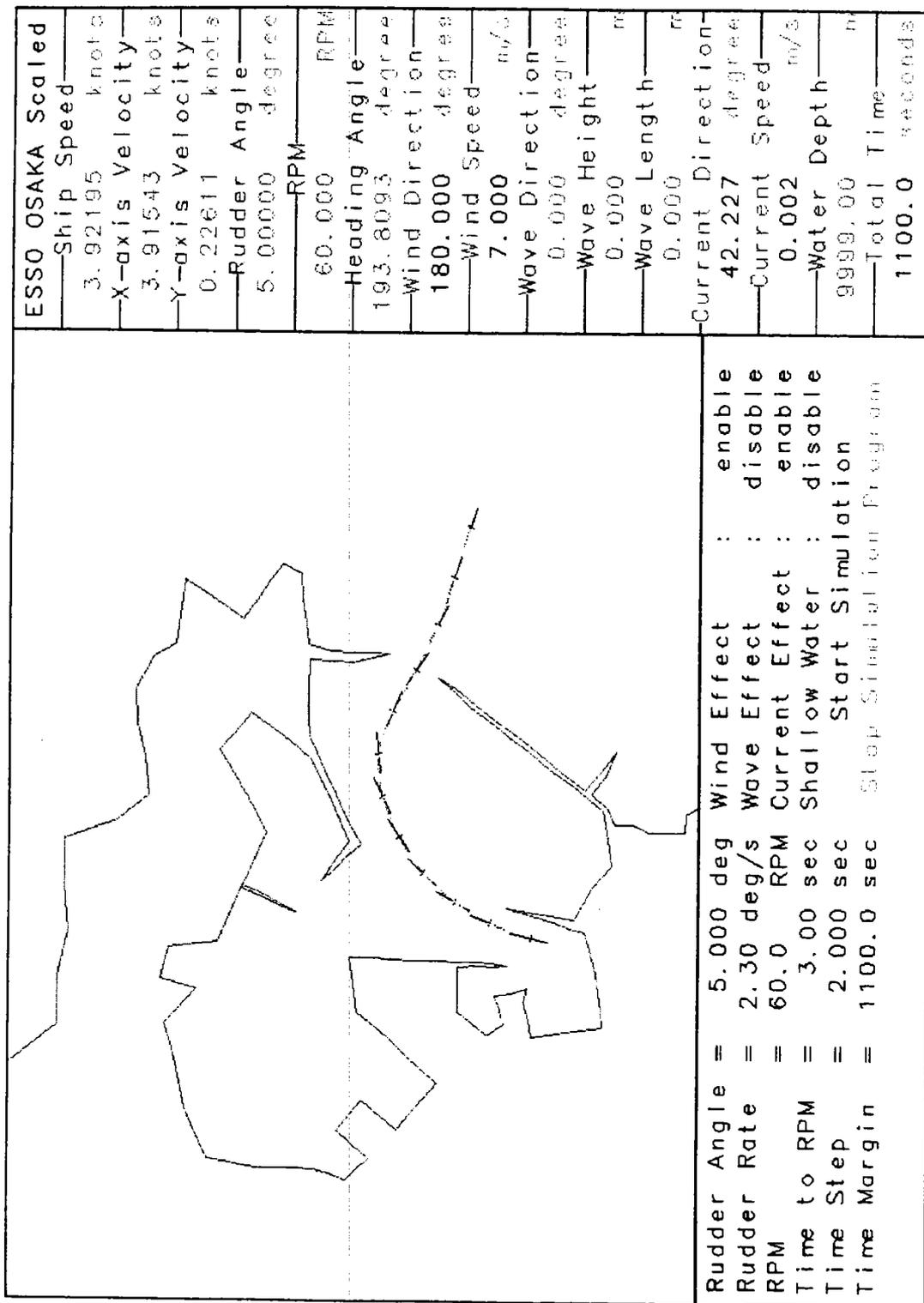
UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-28 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



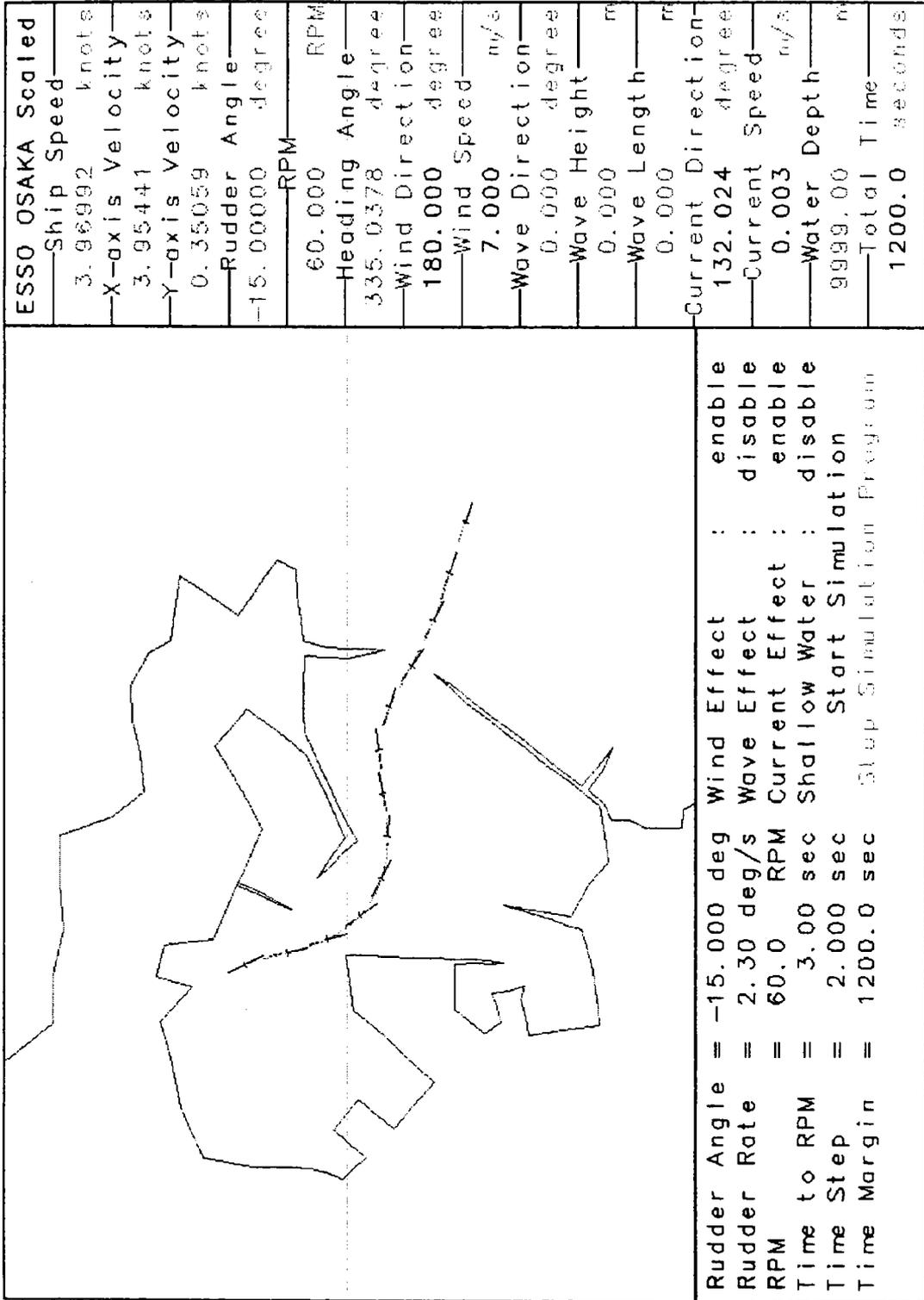
UNI-Plot Sys. 1996, V5.06

圖 7-29 為風速 7m/s，風向 W 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



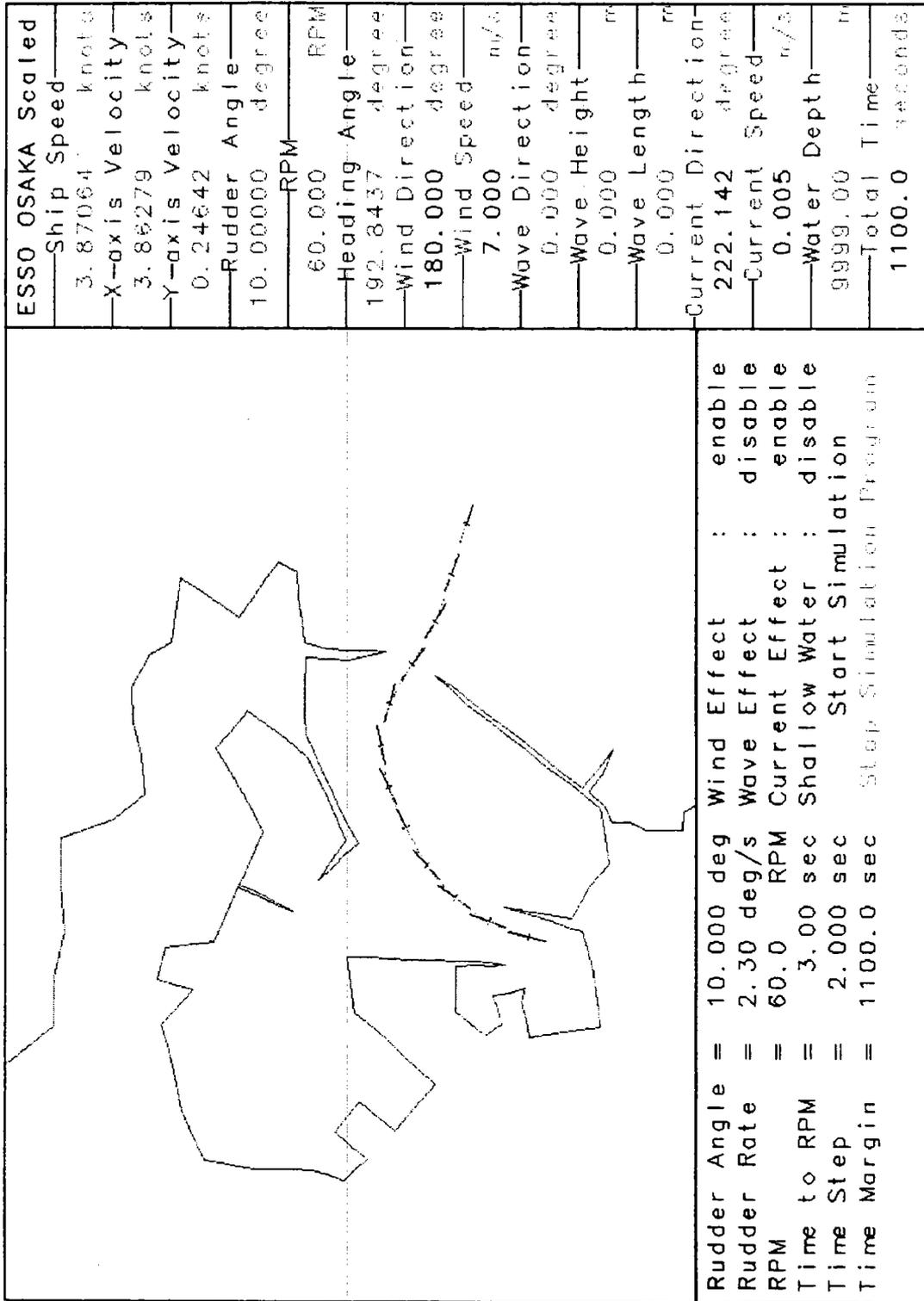
UNI-Plot Sys. 1996, v5.00

圖 7-30 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



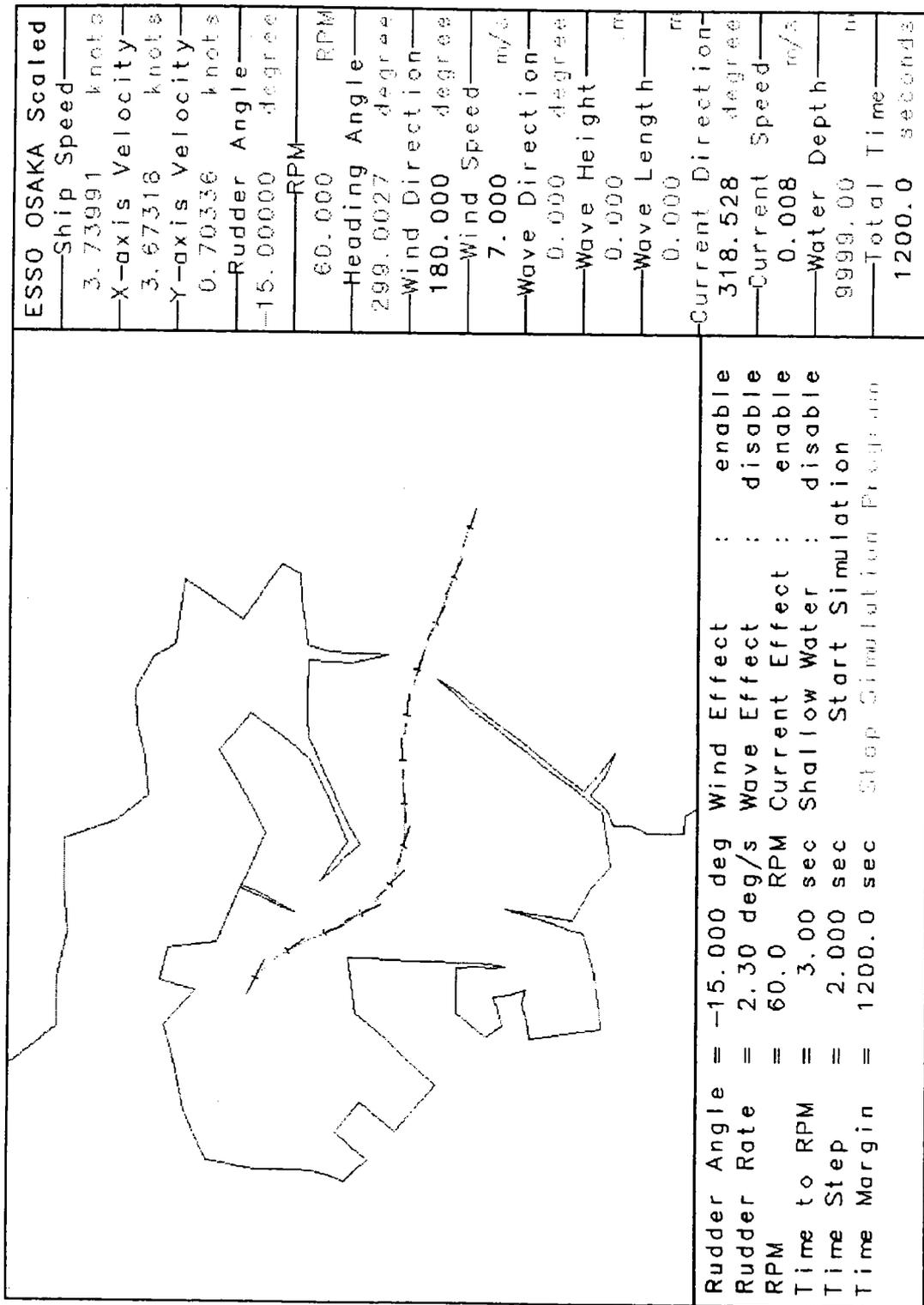
UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-31 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，漲潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡



UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖 7-32 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至南方澳之操船軌跡



UNI-Plot Sys. 1996, 05.00

圖 7-33 為風速 7m/s，風向 S 方向，波高 3m，波向來自 90 度，週期 8 秒，退潮且船由港外進港至內港迴船池之操船軌跡