

96-42-7259

MOTC-IOT-95-H3DB005

海嘯模式建置研究



交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

96-42-7259

MOTC-IOT-95-H3DB005

海嘯模式建置研究

著 者：陳冠宇、陳陽益、簡仲璟

交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

海嘯模式建置研究 / 陳冠宇, 陳陽益, 簡仲璟
著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所,

民96

面 ; 公分

參考書目:面

ISBN 978-986-00-9379-7(平裝)

1. 海嘯 - 模擬方法

351. 9791

96007080

海嘯模式建置研究

著 者：陳冠宇、陳陽益、簡仲璟

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 96 年 4 月

印 刷 者：承亞興企業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 110 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：100 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書坊臺視總店：臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話：(02)25781515

五南文化廣場：臺中市中山路 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN：1009600938

ISBN：978-986-00-9379-7 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

96

海嘯模式建置研究

交通部運輸研究所

GPN : 1009600938

定價 100 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：海嘯模式建置研究			
國際標準書號 978-986-00-9379-7 (平裝)	政府出版品統一編號 1009600938	運輸研究所出版品編號 96-42-7259	計畫編號 95-H3DB005
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：陳陽益、陳冠宇、簡仲璟 研究人員：林佳豪、劉玉萍、劉清松 聯絡電話：04-26587131；07-5252000 轉 5353 傳真號碼：04-26571329；07-5255359			研究期間 自 95 年 5 月 至 95 年 12 月
關鍵詞：數值模式、日本、海嘯模擬			
摘要： 2004年南亞海嘯造成的重大傷亡，讓國人進一步的正視海嘯可能造成的威脅。由於我國地震頻仍，若大海嘯萬一發生，可能造成重大傷亡；因此建立海嘯數值模式實為當務之急。由於我國上次發生海嘯災害已超過一個世紀以上，無論是政府或是民間都缺乏相關的資料與經驗，建立海嘯數值模式後，模式的校驗與修正都有極大的困難，自行發展建立海嘯數值模式不易成功；較理想的方式則是與國外進行交流，利用國外已發展成熟的技術與數值模式為基礎，逐步建立本土的海嘯數值模式。本計劃即以此為宗旨，以海嘯研究最發達且海嘯災害的資料與經驗最豐富的日本為對象，逐步引進其已發展成熟的模式，並與其研究人員進行廣泛交流，進一步學習其模擬海嘯的技術，以作為建立本土的海嘯模式之基礎，並進而使海嘯模擬的技術在我國生根發展。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
96年4月	84	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： 密 機密 極機密 絕對機密 （條件： 年 月 日解密， 公布後解密， 附件抽存後解密， 工作完成或會議終了時解密， 另行檢討後辦理解密） 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Establishment of Tsunami Model			
ISBN (OR ISSN) 978-986-00-9379-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009600938	IOT SERIAL NUMBER 96-42-7259	PROJECT NUMBER 95-H3DB005
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Yang-Yih Chen, Guan-Yu Chen, Chung-Ching Chien PROJECT STAFF: Chia-Hao Lin, Ching-Song Liu PHONE: 886-4-26587131 ; 886-7-5252000-5353 FAX: 886-4-26571329 ; 886-7-5255359			PROJECT PERIOD FROM May 2006 TO December 2006
KEY WORDS: numerical model, Japan, tsunami simulation			
ABSTRACT: <p>The tragedy of South Asia in 2004 reminds people in Taiwan that tsunami is a real threat. Because of the frequent earthquakes, the possibility of a giant tsunami is not negligible and a tsunami simulation model is urgently in need. However, it has been more than a century since the last disastrous tsunami attacked Taiwan; the in-situ data necessary for model tuning and validation is absent. The lack of both experience and field information makes the establishment of a tsunami model different unless we can cooperate and learn from other countries. Being the most experienced country in tsunami research and tsunami mitigation, Japan is the target we plan to cooperate with. This project aims at exploring the numerical model and the technology developed in Japan and the experience of Japanese scientists in tsunami simulation as well. In the future, these elements will comprise a solid basis for a more advanced tsunami model in Taiwan.</p>			
DATE OF PUBLICATION April 2007	NUMBER OF PAGES 84	PRICE 100	CLASSIFICATION RESTRICTED CONFIDENTIAL SECRET TOP SECRET UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

海嘯模式建置研究

目 錄

中文摘要.....	
英文摘要.....	
目錄.....	
第一章 緒論	1-1
第二章 研究範圍與對象	2-1
第三章 研究方法與進行步驟	3-1
第四章 實例模擬(南亞大海嘯、北海道大海嘯)	4-1
第五章 結論與建議	5-1
參考文獻.....	6-1
附錄一 海嘯、暴潮數值計算模式使用說明書	A-1
附錄二 期末審查意見處理情形表	B-1
附錄三 期末審查簡報	C-1

第一章 緒 論

2004 年南亞海嘯造成的重大傷亡，讓國人進一步的正視地震與海嘯可能造成的威脅；由於我國地震頻仍，若地震於鄰近海域發生，極可能引發大海嘯，造成重大損失。事實上，南亞海嘯後可能受地震與海嘯威脅的世界各國亦多開始致力於海嘯預報系統之引進與研究；我國若無因應措施，對國人心理與國際視聽皆有不良影響。再者，若大海嘯萬一發生，民眾未能即時逃離海灘等危險區域，可能造成重大傷亡；因此建立海嘯數值模式實為當務之急。

海嘯的發生十分罕見，因此任何相關的資料都可能對海嘯之研究有相當的助益。然而由於我國上次發生海嘯災害已超過一個世紀以上，無論是政府或是民間都缺乏相關的資料與經驗，建立海嘯數值模式後，模式的校驗與修正都有極大的困難，自行發展建立海嘯數值模式不易成功；較理想的方式則是與國外進行交流，利用國外已發展成熟的技術與數值模式為基礎，逐步建立本土的海嘯數值模式。本計劃即以此為宗旨，以海嘯研究最發達且海嘯災害的資料與經驗最豐富的日本為對象，逐步引進其已發展成熟的模式，並與其研究人員進行廣泛交流，進一步學習其模擬海嘯的技術，以作為建立本土的海嘯模式之基礎，並進而使海嘯模擬的技術在我國生根發展。

第二章 研究範圍與對象

根據已有的史料記載，台灣地區上次發生海嘯災害已有超過一個世紀之遙，無論是政府相關單位或是民間研究機構都缺乏相關的資料與經驗，故建立海嘯數值模式後，模式的校驗與修正都有極大的困難，自行發展建立海嘯數值模式不易成功；較理想的方式則是與國外進行交流，利用國外已發展成熟的技術與數值模式為基礎，逐步建立本土的海嘯數值模式。本計劃即以海嘯研究最發達且海嘯災害的資料與經驗最豐富的日本為對象，逐步引進其已發展成熟的模式，並與其研究人員進行廣泛交流，進一步學習其模擬海嘯的技術，以作為建立本土的海嘯模式之基礎，並進而使海嘯模擬的技術在我國生根發展。本計劃引進日本港灣空港研究所(PARI)所研發之海嘯模式，並研究其操作方式及轉譯操作說明書，做技術移轉之用，並用以實際執行 2004 年南亞海嘯及 1993 年日本北海道大海嘯。

第三章 研究方法與進行步驟

由於台灣地區實際發生海嘯之紀錄甚少，故本計劃先行收集台灣地區海嘯發生之歷史紀錄，評估台灣地區可能發生之海嘯區域。

本計劃引進日本港灣空港研究所(PARI)所研發之海嘯模式，此模式以淺水線性長波方程式為基礎，並應用 Mansinha 和 Smylie (1971) 所提出之彈性理論作為計算地震的基礎方法，除可用來模擬地震所引發的海嘯外，另可用來計算暴潮模式、線形長波計算、非線形長波計算及非線形長波的陸上遡上計算 (包含防波堤、防潮堤的越流計算)等。

首先，本計劃先開始蒐集有關於世界各地與台灣地區所發生海嘯或是疑似海嘯之歷史紀錄，例如 1896 年日本日本三陸大海嘯、1755 年葡萄牙里斯本海嘯等。另根據中央氣象局及歷史相關文獻記載，台灣地區海嘯或是疑似海嘯之事件共有六起，例如 1867 年發生於基隆及台灣北部之海嘯。由此說明台灣地震發生頻率及強度雖不如日本，但歷史上卻也發生幾起海嘯或是疑似海嘯之紀錄，尤以基隆、安平及高雄為曾經發生海嘯之地點，亦造成為數不少之死傷情況，這說明了台灣本島地區確有發生海嘯之風險。基於海嘯與地震息息相關，亦有其不可預測性，但兩者最大的差異，卻在於海嘯往往是發生逆斷層地震時才會發生且加以必須於大洋中傳播，故如事先了解及蒐集可能發生地震之逆斷層等資料，透過模擬之方式，是可以提供相當充裕的預警及防範時間，將災害降到最低，故尋找適當的海嘯模式是本計劃之首要課題。

同時，地震行為與海嘯發生有關，與台灣同屬環太平洋地震帶之日本，亦飽受海嘯襲擊之苦，是故對海嘯與地震之研究亦獨步於世界，故於引進本模式時，亦同時邀請日本港灣空港研究所之研究人員來台進行技術及學術交流，行程如表 1。另外，利用「南亞大海嘯」及「北海道大海嘯」作為本模式實際操作之案例。

此外，將編輯簡要之操作說明，並將模擬結果以及模式適用性作成

結論，並進一步討論應用於本土海嘯防災之實務上。詳細之流程請見圖 1。

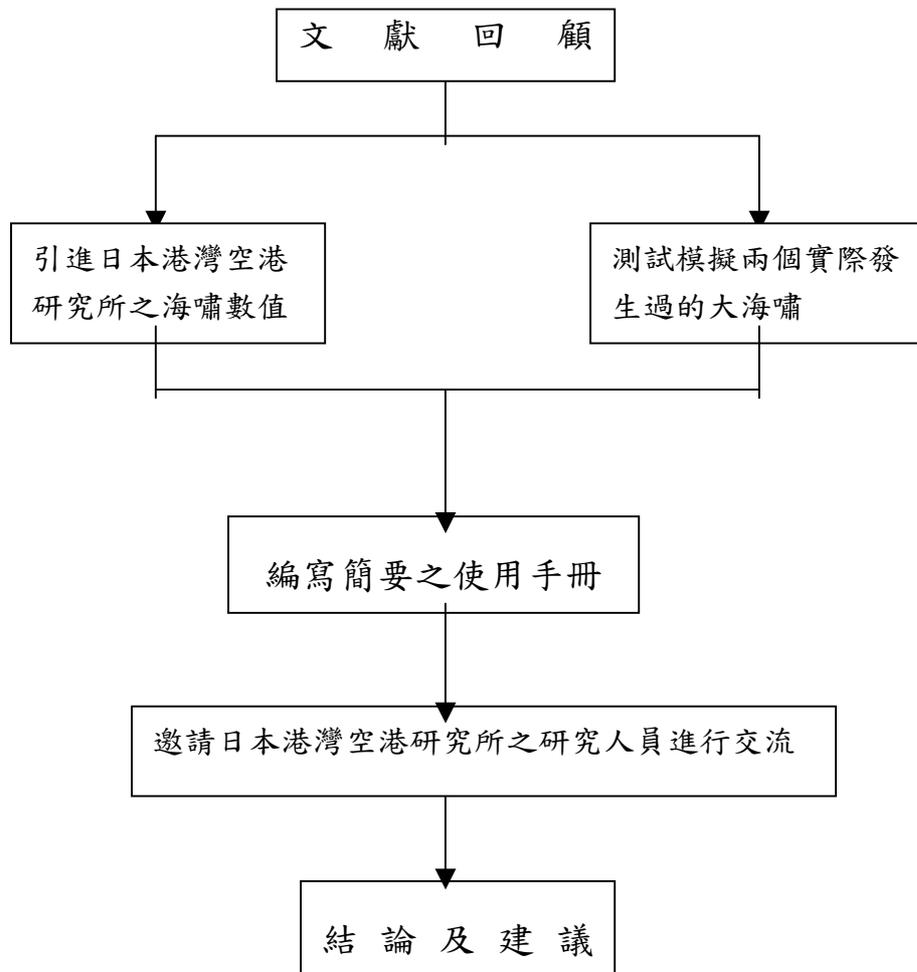


圖 1. 計畫流程圖

表 1. 日本港灣空港研究所之研究人員來台行程表(2006)

Date	Brief Description	Hotel
7/3 (MON)	From Narita to Taoyuan Chiang Kai Shek International Airport, change plane to Kaohsiung. Look around Kaohsiung/旗津	Kaohsiung
7/4 (TUE)	Visit National Sun Yat-Sen University and give a speech in the afternoon. Go to Taitung (台東)	知本 Hot Spring
7/5 (WED)	Taitung (台東) coast	Hua-Lien
7/6 (THU)	Hua-Lin Coast and 太魯閣 national park	Wuchi
7/7 (FRI)	Visit Center of Harbor and Marine Technology, give a speech in the morning. Leave for Taoyuan Chiang Kai Shek International Airport after lunch	

第四章 實例模擬(南亞大海嘯、北海道大海嘯)

4.1 南亞大海嘯

2004 年 12 月 26 日清晨，印尼發生 9.0 級大地震，震央位於蘇門答臘島西北部的亞齊省西南外海 160 公里處。地震引發南亞大海嘯，巨浪沖向印尼、泰國、斯里蘭卡、印度這些印度洋周邊國家，甚至沖向遠在五千公里外的非洲東岸，其影響範圍及所在地之地震規模如圖 2 所示。

本模式必須先行輸入地震相關物理參數於 smatra.fault 檔中，供副程式 DEFORM 執行地震模式運算。首先將斷層運動分成三段，其斷層的端點位置經緯度分別為北緯 2.5 度東經 95.75 度、北緯 5 度東經 94 度、北緯 10 度東經 92 度，斷層長度分別為 330KM、570KM、300KM。斷層面的寬度皆為 150 KM，斷層面上緣的深度皆為 7KM，斷層面的向下傾斜角皆為 15 度，滑動量皆為 11 公尺。分別計算普吉島(Phuket)、班答亞齊(Banda Aceh)及可倫坡(Colombo)等印度洋沿岸之主要城市水位變化，模式測試結果如圖 3 至圖 5。



圖 2. 印度洋大地震影響範圍及所在地之地震規模

4.1.1 模式測試結果

圖 3 表示泰國普吉島(Phuket) 印尼班答亞齊(Banda Aceh)及可倫坡(Colombo)於地震發生後 20 小時內之水位變化情形，由本圖可得知由於鄰近地震震央，故印尼之班答亞齊(Banda Aceh)與泰國普吉島(Phuket)迅速發生劇烈水位變化，其最大波高約為 6-7 公尺。

由於斷層上方的水體先流向下沈斷層，因此被抬升的斷層後方的海岸先發生大退潮，之後才會遭到海浪侵襲，亦即此時波谷會先發生。由圖3可發現印尼班答亞齊(Banda Aceh)及泰國普吉島(Phuket)均發生此一現象，同時，這樣的行為也符合倖存的泰國普吉島遊客對於海嘯來臨前先有大退潮的描述。位於另一側的可倫坡(Colombo)因為於逆斷層另一側，其水位描述正好與上述兩城相反，均是波峰先到達海岸。由以上結果顯示，故本模式應可適用模擬海嘯發生時之水位變化。

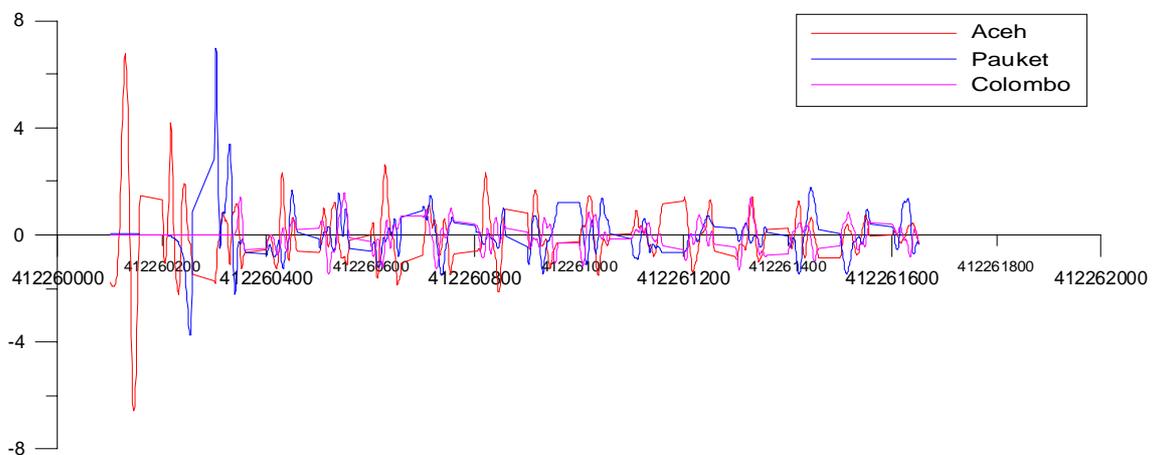


圖 3 班答亞齊(Banda Aceh)、泰國普吉島(Phuket)及可倫坡(Colombo)於海嘯發生時之水位變化

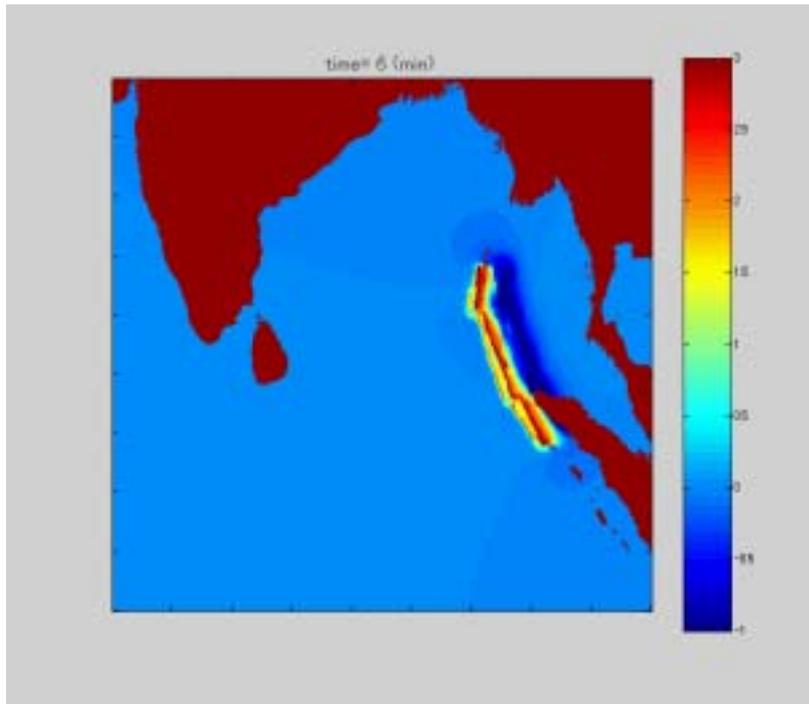


圖 4. 南亞大海嘯因三段斷層運動造成之水位變化

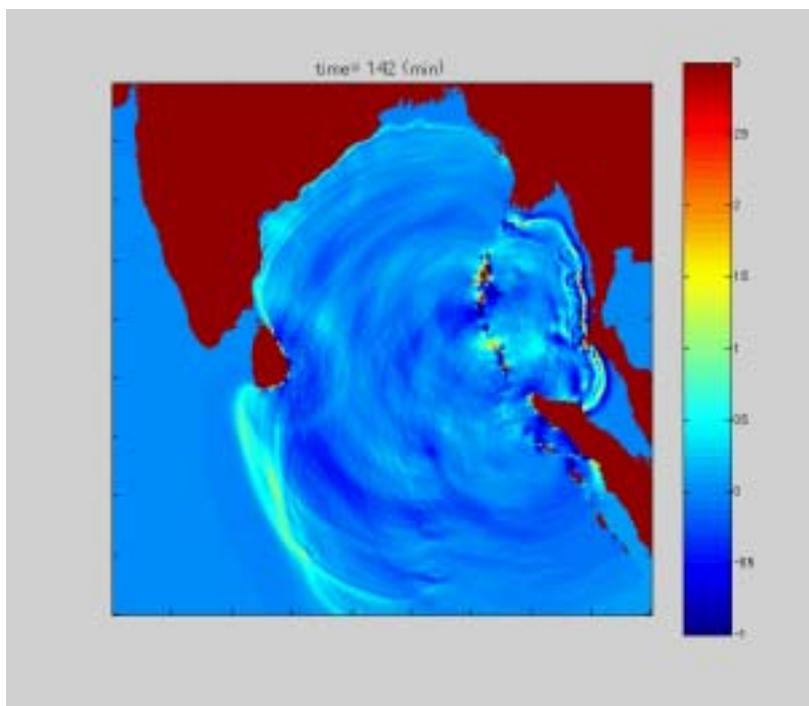


圖 5. 南亞大海嘯斷層錯動 142 分鐘後之水位變化

4.2 北海道大海嘯

北海道大海嘯發生在 1993 年 7 月 2 日，震源在北海道外海，主要受災地點為 Okushiri Island (北緯 42 度 10 分; 東經 139 度 31 分)。首先將斷層運動分成兩段，其斷層的端點位置經緯度分別為北緯 40.24 度、東經 138.8 度與北緯 40.67 度、東經 139.18 度。斷層長度皆為 60KM, 斷層面的寬度皆為 40 KM, 斷層面上緣的深度皆為 1KM, 斷層面的向下傾斜角分別為 30 度與 40 度，滑動量分別為 5 公尺與 4 公尺。其水位變化參見圖 6 與圖 7。

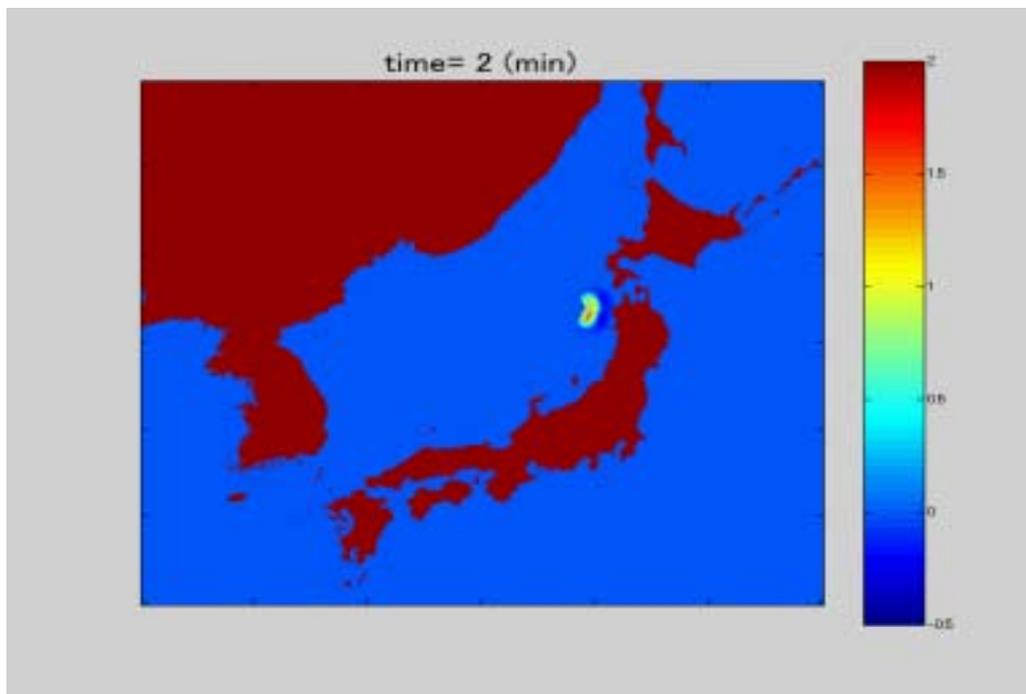


圖 6. 北海道大海嘯因兩段斷層運動造成之水位變化

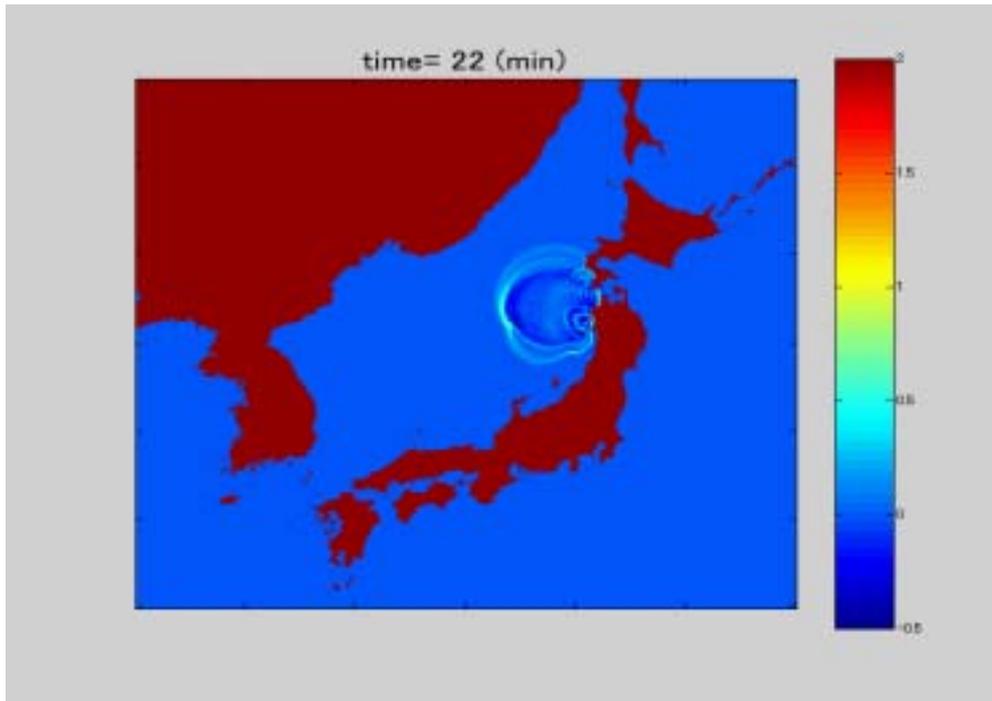


圖 7. 北海道大海嘯斷層錯動 22 分鐘後之水位變化

第五章 結論與建議

1. 以災害發生機率而言，暴潮與海嘯幾乎不可能同時發生，故本模式目前並不包含潮位之影響；但就防災角度，未來可在模式中合併考慮暴潮的影響。
2. 就目前通報系統而言，並無法在地震發生後於有限時間內掌握地震之斷層型態；但若針對台灣有可能發生海嘯的潛勢地區，先進行附近斷層帶之研究，模擬當海嘯發生時，其可能的災害範圍及溢淹區或是另一可行之方式。
3. 以一般 PC 規格而言，本模式計算模擬海嘯約需 24 小時左右，目前離達成預警目標尚有一段距離；其模式所得出之水位變化均已經過原研究單位進行實例驗證。
4. 由於台灣東西兩側海底地形有明顯的差異，故可利用海科中心之水深資料作為地形輸入之依據。

參考文獻

1. K. Abe, Modeling of the Runup Height of the Hokkaido Nansei-Oki Tsunami of 12 July 1993, Pure and Applied Geophysics, 1995, Vol. 144, pp. 735--745.
2. G. F. Carrier, The Dynamics of Tsunamis, AMS1970, 1970, pp. 157--187.
3. Choi B.H., Pelinovsky E., Riabov I., Hong S.J. Distribution functions of tsunami wave heights. Natural Hazards, 2002, vol. 25, No. 1, 1 - 21.
4. Hammack, A on Tsunamiis:their Generation and Propagation in an Ocean of Uniform Depth, Journal of Fluid Mechanics, 1973, Vol. 60(4), pp. 769--799.
5. L. S. Hwang and D. Divoky, Tsunami Generation, Journal of Geophysical Research, 1970, Vol. 75, pp. 6802--6817.
6. D. R. King and P. H. LeBlond, The Lateral Wave at a Depth Discontinuity in the Ocean and its Relevance to Tsunami Propagation, Journal of Fluid Mechanics, 1982, Vol. 117, pp. 269--282.
7. S. Iwasaki, Experimental study of a tsunami generated by a horizontal motion of a sloping bottom, 1982, pp. 239--262.
8. T. S. Murty, Seismic Sea Waves--Tsunamis, Fishery Research Board of Canada, 1977.
9. Nagai, T., Ogawa, H., Nukada, K. and Kudaka, M.(2004), Characteristics of the Observed 2003 Tokachi-Off Earthquake Tsunami Profile, Coastal Engineering Journal, Vol.46, No.3, pp.315-327.

10. Satake and Tanioka, Tsunami Generation of the Hokkaido Nansei-Oki Earthquake, Pure and Applied Geophysics, 1995, Vol. 144, pp. 804--821.
11. SATAKE, K. and TANIOKA, Y. (1999), Sources of Tsunami and Tsunamigenic Earthquakes in Subduction Zones, Pure Appl. Geophys. 154, 467–483.
12. Sato et al., Onshore Tsunami Deposits Caused by the 1993 Southwest Hokkaido Earthquake and the 1983 Japan Sea Earthquake, Pure and Applied Geophysics, 1995, Vol. 144, pp. 693--717.
13. Shuto et al., Field Survey of the 1993 Tsunami Disasters Caused by Hokkaido Nansei-Oki Earthquake Tsunami, Pure and Applied Geophysics, 1995, Vol. 144, pp. 649--663.
14. Shimamoto et al., Field Survey Report on Tsunami Disasters Caused by the 1993 Southwestern Hokkaido Earthquake, Pure and Applied Geophysics, 1995, Vol. 144, pp. 665--691.
15. Y. Tony Song, Chen Ji, L.-L. Fu, Victor Zlotnicki, C. K. Shum, Yuchan Yi, and Vala Hjorleifsdottir, The 26 December 2004 tsunami source estimated from satellite radar altimetry and seismic waves, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 32, L20601, doi:10.1029/2005GL023683, 2005
16. Takahashi et al., Source Models for the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake Tsunami, Pure and Applied Geophysics, 1995, Vol. 144, pp. 747--767.
17. Tomita et al., Report on 2004 Tsunami in the India Ocean, PARI, 2005 (in Japanese).

18. Akito Tsutsumi and Toshihiko Shimamoto and Eiko Kawamoto and John M. Logan, Nearshore Flow Velocity of Southwest Hokkaido Earthquake Tsunami, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2000, pp. 136--143.
19. S. S. Voit, Tsunamis, *Annual review of fluid mechanics*, 1987, Vol. 19, pp. 217--236.
20. Philip Watts, Wavemaker Curves for Tsunamis Generated by Underwater Landslides, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1998, Vol. 124, pp. 127--137.
21. Philip Watts, Tsunami Features of Solid Block Underwater Landslides, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2000, pp. 144--153.
22. Wiegel, Tsunamis along West Coast of Luzon, *International Conference of Coastal Engineering*, pp. 672--694, 1980.
23. Yeh, H., Liu, P. L.-F., Briggs, M., and Synolakis, C., 1994 Propagation and Amplification of Tsunamis at Coastal Boundaries, *Nature*, 372, 353-355.
24. 陳冠宇,「假警報恐引來觀潮人」, *中國時報時論廣場*, 2004年12月28日.

附錄一

海嘯、暴潮數值計算模式使用說明書

1. 海嘯及暴潮的數值計算程式

海嘯及暴潮的數值計算模式是科學技術用的一種利用數值方法來進行演算的方法。在本計算模式中，可以同時進行多層水層及多網格的數值計算，其中也可以選擇線形長波計算、非線形長波計算及非線形長波的陸上遡上計算（包含防波堤・防潮堤的越流計算）。本章首先將概括性地介紹有關於海嘯的數值計算理論，本模式的操作方法將於下一章做說明。

2. 數值計算理論

2.1 基本方程式

連續方程式可被表示為：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

若從海底 $z = -h$ 積分至海面 $z = \eta$ 處，則方程式(1)可成為下列型態：

$$\int_{-h}^{\eta} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] dz = -(w_{z=\eta} - w_{z=-h}) \quad (2)$$

在深度 $D = h + \eta$ 之範圍內，以斷面平均流速 (U, V) 代表每一點之流速 (u, v) ，則

$$(h + \eta)U = \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (h + \eta)V = \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (3)$$

利用萊布尼茲定理，對連續方程式(2)之左項作積分，

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - u \frac{\partial h}{\partial x} \\ \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz &= \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

右邊海面垂直方向的流速 w ，依據波形連續條件則有：

$$w_{z=\eta} = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (5)$$

同樣地，利用底床邊界條件，海底垂直方向的流速 w 也可以表示成：

$$w_{z=-h} = -\frac{dh}{dt} = -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

將式(4)、(5)、(6)代入式(2)，則方程式(3)若用斷面平均流速 (U, V) 可被改寫為：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{(h+\eta)U\}}{\partial x} + \frac{\partial \{(h+\eta)V\}}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

另外，運動方程式為

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{dv}{dt} &= -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \frac{dw}{dt} &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (8)$$

式中， (x, y, z) 代表卡氏座標軸， (x, y) 表示水平面， z 表示平均海水面垂直向下， (u, v, w) 為代表 (x, y, z) 之流速分量， p 為壓力， f 為折向係數 ($f = 2\omega \sin \phi$ ， ω 表示地球自轉角速度， ϕ 是緯度)， A_h 、 A_v 分別代表水平及垂直方向之渦動黏性係數。

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (9)$$

$\frac{dw}{dt}$ 與其他項相比之下甚小，故可予以忽略；故 z 方向運動方程式沿水深方向作積

分，壓力 p 可得：

$$p = -\rho g z + f(x, y) \quad (10)$$

現在，若考慮離平均海水面高 η 處之氣壓 p_0 ，可寫為：

$$p = \rho g(\eta - z) + p_0 \quad (11)$$

則式(11)分別計算 $\frac{\partial p}{\partial x}$, $\frac{\partial p}{\partial y}$ ，代入運動方程式(8)，可得：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + A_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + A_h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \end{aligned} \quad (13)$$

同樣地， y 方向亦可做同樣的表示。

此外，將式(12)中的流速 (u, v) 從海底 $z = -h$ 積分至海面 $z = \eta$ 處，則可得 (x, y) 方向的流量 (M, N)

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h + \eta) = uD, \quad N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h + \eta) = vD \quad (14)$$

再一次使用萊布尼茲積分定理，將式(13)中的局部項及慣性項沿垂直分項作積分，可得：

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial h}{\partial t}, \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \\ \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(u^2)}{\partial x} dz &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz - u^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} - u^2 \frac{\partial h}{\partial x} \\ \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(uv)}{\partial x} dz &= \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial y} - uv \frac{\partial h}{\partial y} \\ \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(uw)}{\partial x} dz &= (uw)_{z=\eta} - (uw)_{z=-h} = u \left[\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right] + u \left[u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

同樣地， y 方向亦採用相同的處理方法

此外，利用垂直渦動黏性項，海面剪應力 τ_s 及海底剪應力 τ_b 可被表示如下：

$$\begin{aligned} A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz &= A_v \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=\eta} - \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=-h} \right\} = \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \\ A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz &= A_v \left\{ \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=\eta} - \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=-h} \right\} = \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \end{aligned} \quad (16)$$

故以上所述，若使用 (M, N) 來表示，則沿垂直方向積分後之連續方程式及運動方程式可被表示如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{MN}{D} \right] &= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right] \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{MN}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{N^2}{D} \right] &= fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left[\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

然後，如果把垂直方向之水深分為上下兩層，則每層之間各有獨立的連續方程式及運動方程式；如果以 D_1 及 D_2 分別代表上下層之水深厚度，則有：

$$D_1 = h_1 + \eta, D_2 = D - D_1 = h - h_1 \quad (18)$$

則各層之間的流量可分別表示為：

$$\begin{aligned}
M_1 &= \int_{-h_1}^z u dz = u(h_1 + \eta) = uD_1, \quad N_1 = \int_{-h}^z v dz = v(h_1 + \eta) = vD_1 \\
M_2 &= \int_{-h}^{-h_1} u dz = u(h - h_1) = uD_2, \quad N_2 = \int_{-h}^{-h_1} v dz = v(h - h_1) = vD_2
\end{aligned} \tag{19}$$

(19)式可用來表示上下層的連續方程式及運動方程式；另外，上下層間的慣性項亦可表示如下：

$$\begin{aligned}
\int_{-h_1}^{\eta} \frac{\partial(uw)}{\partial x} dz &= (uw)_{z=\eta} - (uw)_{z=-h_1} = (uw)_{z=\eta} - (uw)_{z=i} \\
\int_{-h}^{-h_1} \frac{\partial(uw)}{\partial x} dz &= (uw)_{z=-h_1} - (uw)_{z=-h} = (uw)_{z=i} - (uw)_{z=-h}
\end{aligned} \tag{20}$$

若(20)式中的 $z=\eta$ 及 $z=-h$ 等項，因其他慣性項的垂直方向積分有出現相同的項次時，可互相抵消；如此，僅會剩下 $z=-h_1$ 的項。同樣地，垂直方向的渦動黏性項，

$$\begin{aligned}
A_v \int_{-h_1}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz &= A_v \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=\eta} - \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=-h_1} \right\} = \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{ix}) \\
A_v \int_{-h}^{-h_1} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz &= A_v \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=-h_1} - \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=-h} \right\} = \frac{1}{\rho_w} (\tau_{ix} - \tau_{bx})
\end{aligned} \tag{21}$$

如同之前的各項， y 方向也可以採用同樣的方式。

分別使用式(21)、(22)，則上下兩層個別的連續方程式及運動方程式可被表示如下：

上層表示式：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} &= w_i \\
\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M_1^2}{H_1} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{M_1 N_1}{H_1} \right] + (uw)_i &= fN_1 - gH_1 \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H_1}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{ix}) + A_h \left[\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right] \\
\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M_1 N_1}{H_1} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{N_1^2}{H_1} \right] + (uw)_i &= -fM_1 - gH_1 \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H_1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{iy}) + A_h \left[\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right]
\end{aligned} \tag{22}$$

下層表示式：

$$\begin{aligned}
w_i + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} &= 0 \\
\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M_2^2}{H_2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{M_2 N_2}{H_2} \right] - (uw)_i &= fN_2 - gH_2 \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H_2}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{ix} - \tau_{bx}) + A_h \left[\frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right] \\
\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M_2 N_2}{H_2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{N_2^2}{H_2} \right] - (vw)_i &= -fM_2 - gH_2 \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H_2}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{iy} - \tau_{by}) + A_h \left[\frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_2}{\partial y^2} \right]
\end{aligned} \tag{23}$$

2.2 各項的公式化

(1) 海面上的剪應力

海面上因風作用所產生的剪應力：

$$\begin{aligned}\tau_{sx} &= \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{sy} &= \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}\end{aligned}\quad (24)$$

式中， ρ_a 是空氣密度， C_D 是海面的阻抗係數， (W_x, W_y) 是海平面上 10 公尺高之速度分量。

(2) 海床上的剪應力

海床上因摩擦所引起的剪應力：

$$\begin{aligned}\tau_{bx} &= \frac{\rho_w g n^2}{H_2^{7/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} \\ \tau_{by} &= \frac{\rho_w g n^2}{H_2^{7/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}\end{aligned}\quad (25)$$

式中， ρ_w 是海水密度 (1.03 g/cm^3)， g 是重力加速度， n 是粗糙係數 ($n=0.026$)。

(3) 交界面上的剪應力

上下層間的剪應力，依式(21)的定義可改寫如下：

$$\begin{aligned}\tau_{ix} &= 2\rho_w A_v \frac{U_1 - U_2}{D} \\ \tau_{iy} &= 2\rho_w A_v \frac{V_1 - V_2}{D}\end{aligned}\quad (26)$$

式中， (U_1, V_1) 是上層兩方向的平均流速分量； (U_2, V_2) 是下層兩方向的平均流速分量。

(4) 交界面上的動量

交界面上的動量傳輸是以 $(uw)_i$ 、 $(vw)_i$ 來表示。交界面上的流速假設為

$$u_i = \frac{U_1 + U_2}{2}, v_i = \frac{V_1 + V_2}{2}\quad (27)$$

下層有以下的連續方程式關係存在：

$$w_i = \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y}$$

則動量可被表示如下的計算方式：

$$\begin{aligned}(uw)_i &= \frac{U_1+U_2}{2} \left[\frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \right] \\ (vw)_i &= \frac{V_1+V_2}{2} \left[\frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \right]\end{aligned}\quad (28)$$

2.3 線性長波的理論方程式

連續方程式及運動方程式可被表示如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (29)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right] \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left[\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right]\end{aligned}\quad (30)$$

2.4 差分離散化

在 2 層暴潮模式中其連續式及運動方程式必須以差分形態表示，其中空間差分採用。如圖 2-2 所表示，水位 η 及個別計算點上的水平流量 (M_1, M_2, N_1, N_2) 如圖所定義，直角座標 (x, y, z) 分別對應至離散化中之代號 (i, j, k)，圖中的流量 (M, N) 分別對應至上層 (M_1, N_1) 及下層 (M_2, N_2)，同位置之垂直方向的流速 w 及水位 η 則是相同的定義方式。連續方程式 (1) 中各項的差分式及中央差分式可寫成下列的形式。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\eta^{k+1}_{i,j} - \eta^{k,j}] \quad (31)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (M_1 + M_2) = \frac{1}{\Delta x} [(M_1 + M_2)^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} - (M_1 + M_2)^{k+\frac{1}{2}}_{i,j-\frac{1}{2}}] \quad (32)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (N_1 + N_2) = \frac{1}{\Delta y} [(N_1 + N_2)^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} - (N_1 + N_2)^{k+\frac{1}{2}}_{i,j-\frac{1}{2}}] \quad (33)$$

另外，為了將運動方程式的差分簡單化起見，將線性項與非線性項分別考慮。其中，(x, y) 方向的線性項可被表示為：

$$(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} = (M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} - g(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k \frac{\Delta t}{\Delta x} [\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k] \quad (34)$$

$$(N_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = (N_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - g(H_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^k \frac{\Delta t}{\Delta y} [\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k] \quad (35)$$

此處，x 方向的流量 (M1.2) 代表 M1、M2，y 方向的流量 (N1.2) 代表 N1、N2，水深 (H1.2)

代表上下兩層的厚度 H1、H2；非線性項則使用上風法表示，如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{(M_{1,2})^2}{(H_{1,2})} \right] &= \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k\}^2}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k} \right. \\ &\quad \left. + \lambda_{21} \frac{\{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k\}^2}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k} + \lambda_{31} \frac{\{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k\}^2}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k} \right] \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{(M_{1,2})(N_{1,2})}{(H_{1,2})} \right] &= \frac{1}{\Delta y} \left[\nu_{11} \frac{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1}^k (N_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1}^k}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1}^k} \right. \\ &\quad \left. + \nu_{21} \frac{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k (N_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j}^k} + \nu_{31} \frac{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j-1}^k (N_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j-1}^k}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j-1}^k} \right] \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{(M_{1,2})(N_{1,2})}{(H_{1,2})} \right] &= \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k (N_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k} \right. \\ &\quad \left. + \lambda_{22} \frac{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k (N_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k} + \lambda_{32} \frac{(M_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k (N_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k}{(H_{1,2})_{i+\frac{1}{2},j+1/2}^k} \right] \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{(N_{1,2})^2}{(H_{1,2})} \right] &= \frac{1}{\Delta y} \left[\nu_{12} \frac{\{(N_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^k\}^2}{(H_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^k} \right. \\ &\quad \left. + \nu_{22} \frac{\{(N_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^k\}^2}{(H_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^k} + \nu_{32} \frac{\{(N_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^k\}^2}{(H_{1,2})_{i,j+\frac{1}{2}}^k} \right] \end{aligned} \quad (39)$$

在式(36)至(39)中的係數 λ 、 ν 是類似上下層中流量的方向，它們的定義可用下列

式子來表示：

$$\begin{aligned}
(M_{1,2}) \quad & \begin{cases} \nu_{11} \geq 0 & \lambda_{11}=0 & \lambda_{21}=1 & \lambda_{31}=-1 \\ \nu_{12} < 0 & \lambda_{11}=1 & \lambda_{21}=-1 & \lambda_{31}=0 \end{cases} \\
(N_{1,2}) \quad & \begin{cases} \nu_{11} \geq 0 & \nu_{11}=0 & \nu_{21}=1 & \nu_{31}=-1 \\ \nu_{12} < 0 & \nu_{11}=1 & \nu_{21}=-1 & \nu_{31}=0 \end{cases} \\
(M_{1,2}) \quad & \begin{cases} \nu_{12} \geq 0 & \lambda_{12}=0 & \lambda_{22}=1 & \lambda_{32}=-1 \\ \nu_{13} < 0 & \lambda_{12}=1 & \lambda_{22}=-1 & \lambda_{32}=0 \end{cases} \\
(N_{1,2}) \quad & \begin{cases} \nu_{12} \geq 0 & \nu_{12}=0 & \nu_{22}=1 & \nu_{32}=-1 \\ \nu_{13} < 0 & \nu_{12}=1 & \nu_{22}=-1 & \nu_{32}=0 \end{cases}
\end{aligned} \tag{40}$$

運動方程式中的海底剪應力項，使用隱式法可以表示如下：

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_w} = \frac{g n^2}{\{(H_z)_{i+1/2, j}\}^{7/2}} \cdot \frac{1}{2} \times \frac{(M_z)_{i+1/2, j} + (M_z)_{i-1/2, j}}{\sqrt{\{(M_z)_{i+1/2, j}\}^2 + \{(N_z)_{i+1/2, j}\}^2}} \tag{41}$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_w} = \frac{g n^2}{\{(H_z)_{i+1/2, j}\}^{7/2}} \cdot \frac{1}{2} \times \frac{(N_z)_{i+1/2, j} + (N_z)_{i-1/2, j}}{\sqrt{\{(M_z)_{i+1/2, j}\}^2 + \{(N_z)_{i+1/2, j}\}^2}} \tag{42}$$

水平渦動黏性項也可以用下式表示：

$$\begin{aligned}
A_h \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (M_{1,2}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (M_{1,2}) \right] &= \frac{A_h}{\Delta x^2} \times \left[(M_{1,2})_{i+1/2, j} \right. \\
&\quad \left. + (M_{1,2})_{i-1/2, j} + (M_{1,2})_{i+1/2, j+1} + (M_{1,2})_{i+1/2, j-1} - 4 (M_{1,2})_{i+1/2, j} \right] \tag{43}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_h \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (N_{1,2}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (N_{1,2}) \right] &= \frac{A_h}{\Delta y^2} \times \left[(N_{1,2})_{i+1/2, j} \right. \\
&\quad \left. + (N_{1,2})_{i-1/2, j} + (N_{1,2})_{i+1/2, j+1} + (N_{1,2})_{i+1/2, j-1} - 4 (N_{1,2})_{i+1/2, j} \right] \tag{44}
\end{aligned}$$

不同層間相互作用的剪應力，

$$\frac{\tau_{ix}}{\rho_v} = \frac{3 \epsilon_v}{h_{i+1/2, j}} \left[\frac{(M_1)_{i+1/2, j}}{(H_1)_{i+1/2, j}} - \frac{(M_2)_{i+1/2, j}}{(H_2)_{i+1/2, j}} \right] \quad (45)$$

$$\frac{\tau_{iy}}{\rho_v} = \frac{3 \epsilon_v}{h_{i, j+1/2}} \left[\frac{(N_1)_{i, j+1/2}}{(H_1)_{i, j+1/2}} - \frac{(N_2)_{i, j+1/2}}{(H_2)_{i, j+1/2}} \right] \quad (46)$$

交界面上的動量傳輸，

$$(uw)_i = \frac{1}{2} \left[\frac{(M_1)_{i+1/2, j}}{(H_1)_{i+1/2, j}} - \frac{(M_2)_{i+1/2, j}}{(H_2)_{i+1/2, j}} \right] \times \left[\frac{1}{2 \Delta x} \{ (M_2)_{i+1/2, j} - (M_2)_{i-1/2, j} \} + \frac{1}{2 \Delta y} \{ (N_2)_{i, j+1/2} - (N_2)_{i, j-1/2} \} \right] \quad (47)$$

$$(vw)_i = \frac{1}{2} \left[\frac{(N_1)_{i, j+1/2}}{(H_1)_{i, j+1/2}} - \frac{(N_2)_{i, j+1/2}}{(H_2)_{i, j+1/2}} \right] \times \left[\frac{1}{2 \Delta x} \{ (M_2)_{i+1/2, j} - (M_2)_{i-1/2, j} \} + \frac{1}{2 \Delta y} \{ (N_2)_{i, j+1/2} - (N_2)_{i, j-1/2} \} \right] \quad (48)$$

式(31)到式(48)都採用類似的差分方式。連續方程式及(x,y)方向的運動方程式

(22)(23)，則利用下列的差分式表示：

$$\eta_{i+1, j} = \eta_{i, j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} [(M_1 + M_2)_{i+1/2, j} - (M_1 + M_2)_{i-1/2, j}] - \frac{\Delta t}{\Delta y} [(N_1 + N_2)_{i, j+1/2} - (N_1 + N_2)_{i, j-1/2}] \quad (49)$$

$$\begin{aligned} (M_1)_{i+1/2, j} = & (M_1)_{i+1/2, j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\{(M_1)_{i+1/2, j}\}^2}{(H_1)_{i+1/2, j}} + \lambda_{21} \frac{\{(M_1)_{i+1/2, j}\}^2}{(H_1)_{i+1/2, j}} \right. \\ & \left. + \lambda_{31} \frac{\{(M_1)_{i+1/2, j}\}^2}{(H_1)_{i+1/2, j}} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\nu_{11} \frac{(M_1)_{i+1/2, j} \cdot (N_1)_{i, j+1/2}}{(H_1)_{i+1/2, j+1}} \right. \\ & \left. + \nu_{21} \frac{(M_1)_{i+1/2, j} \cdot (N_1)_{i, j+1/2}}{(H_1)_{i+1/2, j}} + \nu_{31} \frac{(M_1)_{i+1/2, j-1} \cdot (N_1)_{i, j+1/2}}{(H_1)_{i+1/2, j-1}} \right] \\ & - g(H_1)_{i+1/2, j} \frac{\Delta t}{\Delta x} [\eta_{i+1, j} - \eta_{i, j}] + \Delta t f(N_1)_{i+1/2, j} \\ & - (H_1)_{i+1/2, j} \frac{\Delta t}{\rho_v} \frac{\partial p}{\partial x} + \Delta t \frac{\tau_{ix}}{\rho_v} \\ & + \Delta t \frac{A_s}{\Delta x^2} [(M_1)_{i+1/2, j} + (M_1)_{i-1/2, j} + (M_1)_{i+1/2, j} + (M_1)_{i-1/2, j} \\ & - 4(M_1)_{i+1/2, j}] - \Delta t \frac{3 \epsilon_v}{h_{i+1/2, j}} \left[\frac{(M_1)_{i+1/2, j}}{(H_1)_{i+1/2, j}} - \frac{(M_2)_{i+1/2, j}}{(H_2)_{i+1/2, j}} \right] \\ & - \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{(M_1)_{i+1/2, j}}{(H_1)_{i+1/2, j}} - \frac{(M_2)_{i+1/2, j}}{(H_2)_{i+1/2, j}} \right] \left[\frac{1}{2 \Delta x} \{ (M_2)_{i+1/2, j} - (M_2)_{i-1/2, j} \} \right. \\ & \left. + \frac{1}{2 \Delta y} \{ (N_2)_{i, j+1/2} - (N_2)_{i, j-1/2} \} \right] \quad (50) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(N_1)_{i,j+1/2}^{t+\Delta t} = & (N_1)_{i,j+1/2}^t - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{(M_1)_{i,j+1/2}^t \cdot (N_1)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} \right. \\
& \left. + \lambda_{22} \frac{(M_1)_{i,j+1/2}^t \cdot (N_1)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} + \lambda_{22} \frac{(M_1)_{i,j+1/2}^t \cdot (N_1)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} \right] \\
& - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\nu_{12} \frac{\{(N_1)_{i,j+1/2}^t\}^2}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} + \nu_{22} \frac{\{(N_1)_{i,j+1/2}^t\}^2}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} + \nu_{22} \frac{\{(N_1)_{i,j+1/2}^t\}^2}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} \right] \\
& - g(H_1)_{i,j+1/2}^t \frac{\Delta t}{\Delta y} [\eta_{i,j+1}^t - \eta_{i,j}^t] + \Delta t f(M_1)_{i,j+1/2}^t \\
& - (H_1)_{i,j+1/2}^t \frac{\Delta t}{\rho_v} \frac{\partial p}{\partial y} + \Delta t \frac{\tau_{xy}}{\rho_v} \\
& + \Delta t \frac{A_h}{\Delta y^2} [(N_1)_{i,j+1/2}^t + (N_1)_{i,j+1/2}^t + (N_1)_{i,j+1/2}^t + (N_1)_{i,j+1/2}^t \\
& - 4(N_1)_{i,j+1/2}^t] - \Delta t \frac{3\epsilon_v}{h_{i,j+1/2}} \left[\frac{(N_1)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} - \frac{(N_2)_{i,j+1/2}^t}{(H_2)_{i,j+1/2}^t} \right] \\
& - \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{(N_1)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} - \frac{(N_2)_{i,j+1/2}^t}{(H_2)_{i,j+1/2}^t} \right] \left[\frac{1}{2\Delta x} \{(M_2)_{i,j+1/2}^t - (M_2)_{i,j+1/2}^t\} \right. \\
& \left. + \frac{1}{2\Delta y} \{(N_2)_{i,j+1/2}^t - (N_2)_{i,j+1/2}^t\} \right] \quad (51)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(M_2)_{i,j+1/2}^{t+\Delta t} = & \frac{1}{1 + \mu_{i,j+1/2}^t} \left\{ (1 - \mu_{i,j+1/2}^t)(M_2)_{i,j+1/2}^t \right. \\
& - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\{(M_2)_{i,j+1/2}^t\}^2}{(H_2)_{i,j+1/2}^t} + \lambda_{21} \frac{\{(M_2)_{i,j+1/2}^t\}^2}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} \right. \\
& \left. + \lambda_{21} \frac{\{(M_2)_{i,j+1/2}^t\}^2}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\nu_{11} \frac{(M_2)_{i,j+1/2}^t \cdot (N_2)_{i,j+1/2}^t}{(H_2)_{i,j+1/2}^t} \right. \\
& \left. + \nu_{21} \frac{(M_2)_{i,j+1/2}^t \cdot (N_2)_{i,j+1/2}^t}{(H_2)_{i,j+1/2}^t} + \nu_{21} \frac{(M_2)_{i,j+1/2}^t \cdot (N_2)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} \right] \\
& - g(H_2)_{i,j+1/2}^t \frac{\Delta t}{\Delta x} [\eta_{i,j+1}^t - \eta_{i,j}^t] + \Delta t f(N_2)_{i,j+1/2}^t \\
& - (H_2)_{i,j+1/2}^t \frac{\Delta t}{\rho_v} \frac{\partial p}{\partial x} \\
& + \Delta t \frac{A_h}{\Delta x^2} [(M_2)_{i,j+1/2}^t + (M_2)_{i,j+1/2}^t + (M_2)_{i,j+1/2}^t + (M_2)_{i,j+1/2}^t \\
& - 4(M_2)_{i,j+1/2}^t] + \Delta t \frac{3\epsilon_v}{h_{i,j+1/2}} \left[\frac{(M_1)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} - \frac{(M_2)_{i,j+1/2}^t}{(H_2)_{i,j+1/2}^t} \right] \\
& + \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{(M_1)_{i,j+1/2}^t}{(H_1)_{i,j+1/2}^t} - \frac{(M_2)_{i,j+1/2}^t}{(H_2)_{i,j+1/2}^t} \right] \left[\frac{1}{2\Delta x} \{(M_2)_{i,j+1/2}^t - (M_2)_{i,j+1/2}^t\} \right. \\
& \left. + \frac{1}{2\Delta y} \{(N_2)_{i,j+1/2}^t - (N_2)_{i,j+1/2}^t\} \right] \quad (52)
\end{aligned}$$

另外，式中的底面摩擦速度和上層水層厚的關係可用下式表示：

$$u_{b, i+1/2, j} = \frac{\Delta t}{2} \frac{g n^2}{\{(H_2)_{i+1/2, j}\}^{7/2}} \sqrt{\{(M_2)_{i+1/2, j}\}^2 + \{(N_2)_{i+1/2, j}\}^2} \quad (54)$$

$$u_{b, i, j+1/2} = \frac{\Delta t}{2} \frac{g n^2}{\{(H_2)_{i, j+1/2}\}^{7/2}} \sqrt{\{(M_2)_{i, j+1/2}\}^2 + \{(N_2)_{i, j+1/2}\}^2} \quad (55)$$

$$(H_1)_{i+1/2, j} = \frac{1}{2} \{(H_1)_{i+1, j} + (H_1)_{i, j}\} = \frac{1}{2} (\eta_{i+1, j} + \eta_{i, j}) + h_{i+1/2, j} \quad (56)$$

$$(H_1)_{i, j+1/2} = \frac{1}{2} \{(H_1)_{i, j+1} + (H_1)_{i, j}\} = \frac{1}{2} (\eta_{i, j+1} + \eta_{i, j}) + h_{i, j+1/2} \quad (57)$$

$$(H_1)_{i+1/2, j} = \frac{1}{4} \{(H_1)_{i+1, j} + (H_1)_{i+1/2, j} + (H_1)_{i, j} + (H_1)_{i-1, j}\} \quad (58)$$

$$= \frac{1}{4} (\eta_{i+1, j} + \eta_{i+1/2, j} + \eta_{i, j} + \eta_{i-1, j}) + h_{i+1/2, j}$$

$$(H_1)_{i, j+1/2} = \frac{1}{4} \{(H_1)_{i, j+1} + (H_1)_{i, j+1/2} + (H_1)_{i, j} + (H_1)_{i, j-1}\} \quad (59)$$

$$= \frac{1}{4} (\eta_{i, j+1} + \eta_{i, j+1/2} + \eta_{i, j} + \eta_{i, j-1}) + h_{i, j+1/2}$$

3 計算條件：

3.1 計算海嘯的條件

近地海嘯數值計算的初始條件是使用地震斷層模式所計算的海底地殼變動垂直位移。

(1) 初始條件 (推斷地震斷層模式的初始水位)

如果地球內部因為其他原因積蓄而造成地層發生扭曲，進一步產生龜裂 (斷層)，沿著這條交界面兩側的地殼如果發生劇烈的位移，這現象就是斷層運動，斷層發生相對運動的時候就會發生地震。如果在海底下發生斷層運動，沿海底垂直方向發生沉降或隆起，這就成為海嘯發生的原因。

斷層運動本身如以微觀的角度觀之，有非常複雜的過程，巨觀的看，整體的運動能簡單的模式表示。最單純的模式如圖 3.1 所示，長度 L 、寬度 W 的曲面斷層。一般以 D (滑動量或者稱為交錯量)。圖 3.2 表示在水平方向位移的橫向斷層 (右邊分歧·左分歧) 在垂直方向位移的縱向斷層 (正·逆斷層)。根據斷層幾何學特性，滑動方向 λ 、斷層走向 ϕ 和斷層面傾斜角 δ 等 6 個斷層參數，可以由分析地震波推斷。

如果能給予上述的斷層參數，那鄰近斷層帶的海底 (地表方面) 垂直位移變化可以利用 Mansinha and Smylie (1971) 所提出以彈性理論作為基礎的方法計算。圖 3.3 表示斷層的動向和地表變化的概念。將垂直位移作為海面的水位變化，作為海嘯數值計算的初始條件。

通常，是把海底瞬時間的變化直接傳遞給海面上。而實際上的地震斷層運動，有的是瞬間產生變動，有的會持續 100 秒左右。由相田(1969)的研究顯示利用瞬間的變位及長延時變化完畢時之變位作為海嘯的初始水位變動，這兩者的差異並不大。

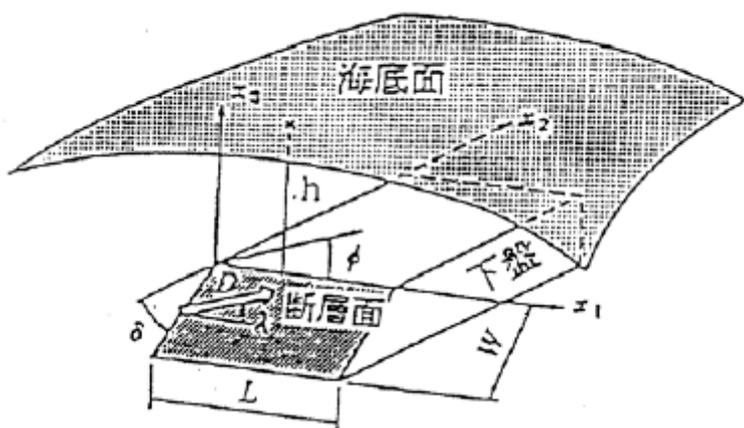


圖 3.1 斷層運動最單純的模式

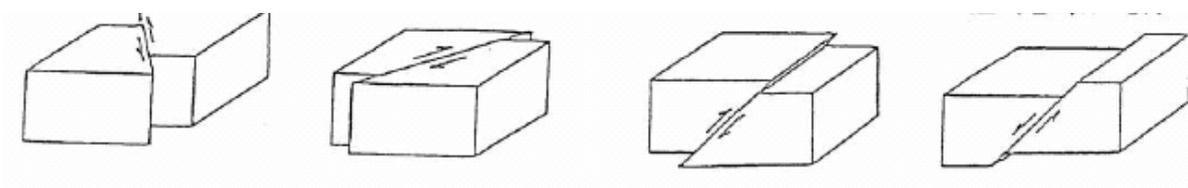


圖 3.2 由左至右分別為水平方向位移的右分歧、左分歧橫向斷層、在垂直方向位移的正斷層、逆斷層

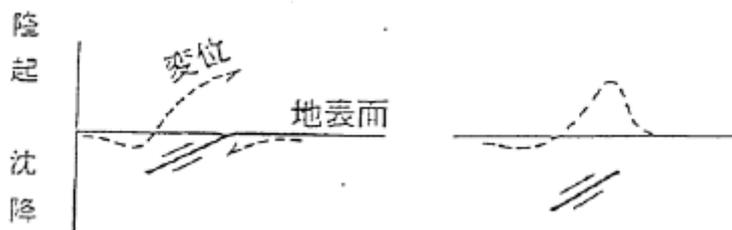


圖 3.3 斷層的動向和地表變化

(2)邊界條件

(2.1)離岸邊界條件

關於海嘯計算區域內離岸邊界條件，根據長波理論的特性曲線准許其自由通過邊界。以下整理離岸邊界條件的設定方法。只考慮入射波的強製邊界，以下採用特性曲線法來討論此一現象。

在相同水深的海域中，假定從離岸邊界條件使用sin形波作為入射的波浪，則在此一海域中傳播的波浪可用線形長波來近似。

考慮一維的線形長波方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (60)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (61)$$

式 (60) 及(61) 如果使用特性量 $\sqrt{\frac{g}{h}}\eta$ 加以改寫，

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g}{h}} \eta \right) = 0 \quad (62)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sqrt{\frac{g}{h}} \eta \right) + \sqrt{gh} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (63)$$

再把式 (62) (63)相加，就得到

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} \pm \sqrt{gh} \frac{\partial}{\partial x} \right\} \left(u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \right) = 0 \quad (64)$$

若基於特性曲線法的想法，則式 (64) 的物理意義可以被表示如下：

$$\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{gh} \quad \text{上式} \quad u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta = \text{const.} \quad (65)$$

即在 $\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{gh}$ 的特性曲線上有 $u \pm \sqrt{\frac{g}{h}}\eta = \text{const}$ 之解存在。

如下圖 3.4 所示， $x = x_0$ 表示在海平面上之點位，x 軸的負方向是表示 Sin 形波來源方向

以此作為波浪入射。從圖 3.4 可知特性量 $u \pm \sqrt{\frac{g}{h}}\eta$ 沿著正方向有下列關係存在：

$$u_2 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_2 = u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1 \quad (66)$$

同時，沿著負方向的特性曲線為：

$$u_2 - \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_2 = u_0 - \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_0 \quad (67)$$

沿著負號的特性曲線因為是表示來自離岸邊的行進波，所以 u_0 、 η_0 有以下的關係式

$$u_0 = -\sqrt{\frac{g}{h}} \eta_0 \quad (68)$$

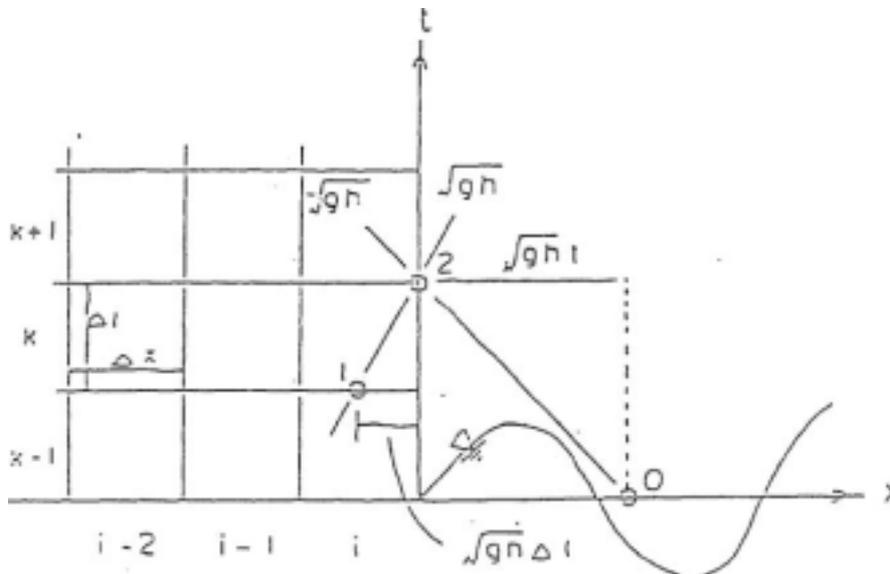


圖 3.4 特性曲線法在離岸邊界處理之概念圖

應用(68)式，(67)式可寫成如下：

$$u_2 - \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_2 = 2u_0 \quad (69)$$

然後和式(66)聯立可消去 η_2 ，則得到：

$$u_2 = u_0 + \frac{1}{2} (u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1) \quad (70)$$

如果，假設在外海有一 Sin 波，

$$\eta_0 = a \cdot \sin(k_0(x - x_0)) \quad (71)$$

代入式(68)中，可以得到(式(62)的 k_0 是入射波的波數)

$$u_0 = -a\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(k_0(x-x_0)) = a\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(k_0\sqrt{gh} \cdot t) \quad (72)$$

再將式(72)代入式(70)，則流量就可以表示成

$$u_2 = -a\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(k_0\sqrt{gh} \cdot t) + \frac{1}{2} (u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1) \quad (73)$$

式(73)即為海嘯數值計算所使用的流量 M ，用離散方式可表示如下：

$$M_{i,j}^{n+1} = -a\sqrt{gh} \sin(k_0\sqrt{gh} \cdot (k + \frac{1}{2}) \Delta t) + \frac{1}{2} (M_{i,j}^n + \sqrt{gh} \eta_{i,j}^n) \quad (74)$$

在這兒，式(74)的 M_1 、 η_1 在符合格點的定義下，可用內插法得到(75)、(76)式。

$$M_1 = \frac{1}{\Delta x} [\sqrt{gh} \cdot \Delta t M_{i,j}^{n+1} + (\Delta x - \sqrt{gh} \cdot \Delta t) M_{i,j}^n] \quad (75)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{1}{2} (\sqrt{gh} \cdot \Delta t - \frac{\Delta x}{2}) (\eta_{i-1,j}^n + \eta_{i,j}^n) + \frac{1}{2} (\frac{3}{2} \Delta x - \sqrt{gh} \cdot \Delta t) (\eta_{i,j}^n + \eta_{i+1,j}^n) \right] \quad (76)$$

到目前為止，都是指一維方向的傳播，至於二維方向的傳播上述的離散式會更為擴張。在二維方向的傳播，有關於特性曲線法成立的特性是屬於一般化的，所以此處應用擴展一維傳播的結果。與一維傳播最大的不同是在於波浪的進行方向。因為一般波浪的入射方向是固定的，負的特性線也是有固定的方向。但是，在計算網格內表示反射波的正特性線有時和入射方向不同。不過，如果考慮正負兩特性線的方向的時候，則就有可能按照一維傳播模式同樣的方式計算。在海嘯的計算中，反射波的特性線可由 $M_{i,j}^{n+1}$ 、 $N_{i,j}^{n+1}$ 的合成方向決定之。

(2.1.2) 自由透過境界

自由透過境界是用來計算來自計算網格內的反射波，能讓其自由通過邊界。此時，只考慮採用前述入射波的特性曲線法的關係來表示反射波成分即可。圖 3.4，在境界位置 $x = x_0$ 處，考慮讓自由透過反射波的方法的地點在境界條件式

$$u_0 = \eta_0 = 0, \quad u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1 \quad (77)$$

入射波條件即為

$$u_2 = u_1 \quad \text{または} \quad M_{i+1/2} = M_1 \quad (78)$$

近地海嘯中例如昭和南海地震海嘯中的南海道海嘯傳播計算，就是以前述的離岸邊界條件處理。

(2.2) 沿岸邊界條件

(2.3) 溯上邊界條件

有關於海嘯所引起陸地的溯上，在採用非線形長波理論式的時候只考慮往陸地的溯上。此時是採用

岩崎・真野(1979)的方法。如圖 3.5，考慮一波浪的前緣在一類似樓梯地形的傳遞，陸地格點的地表高程為 h ，海域格點的水位為 η ；把兩者差作為實水深 D ，方程式(17)是用來計算流量的方法。程式中，是以 $D > 10^{-5} \text{ m}$ 作為計算最小水深，在此值以上均可用格點計算。

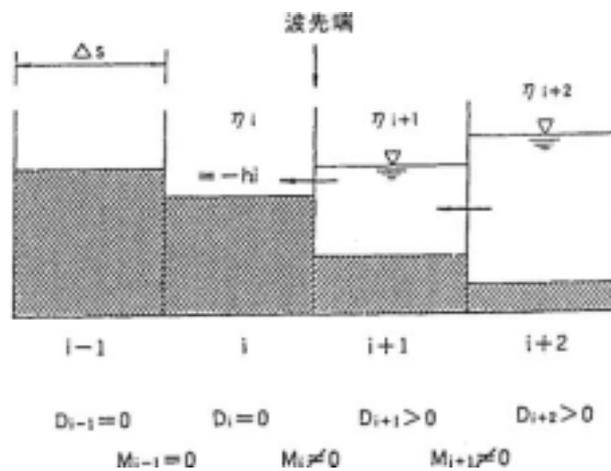


圖 3.5 溯上邊界條件的概念圖

(2.4) 越流邊界條件

在計算網格內若有防波堤或者突堤時，水位越過堤頂時，使用下面本間公式可計算每單位寬度的越流量 Q 。

$$Q = 0.35 H_1 \sqrt{2gH_1}, \quad H_2 \leq \frac{2}{3} H_1, \quad (\text{完全越流}) \quad (79)$$

$$Q = 0.91 \sqrt{2g(H_1 - H_2)} H_1, \quad H_2 > \frac{2}{3} H_1, \quad (\text{もぐり越流}) \quad (80)$$

式中， H_1 和 H_2 是以堤頂高度為基準時，堤前後的水深， $H_1 > H_2$ 。

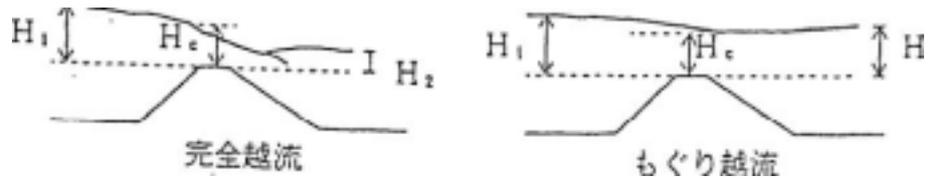


圖 4.8 越流的模式圖

(2.5)和其他網格進行結合的計算條件 (接續境界)

海嘯數值分析模式中，需要從海上至計算地點沿岸依序細分化，併合其他網格進行計算。

計算網格間隔細分化、可以考慮採用 1:2 分割法及 1:3 分割法並用。結合不同間隔計算格點的網格進行計算時，可採用如下的處理。

大網格計算所得之流量以內插方式給予小網格。

以小網格計算所得之水位作為大網格之內之值。

與其他網格的結合處理，包括非線形項在內可以採用的方法接續，具體的計算方法在以下進行說明。

(2.5.1)計算網格參數

在海嘯模式計算中，為了近似地形作為模式計算所需的參數，用 MP_{ij} (地圖資訊) 兩組整數下標來表示：

$MP_{ij} = \$\$$: 2 位數的整數 個位=計算或非計算及接續訊息

十位數=線邊界訊息

換句話說，計算格子和非計算格子的判定、其他網格接續的判定以及防波堤、突堤的線境界的判定都可以被表示出來。在這兒，在陸域溯上計算中，海域部份成為計算網格、陸域就成為非計算用網格。圖 3.7 是計算格子參數種類

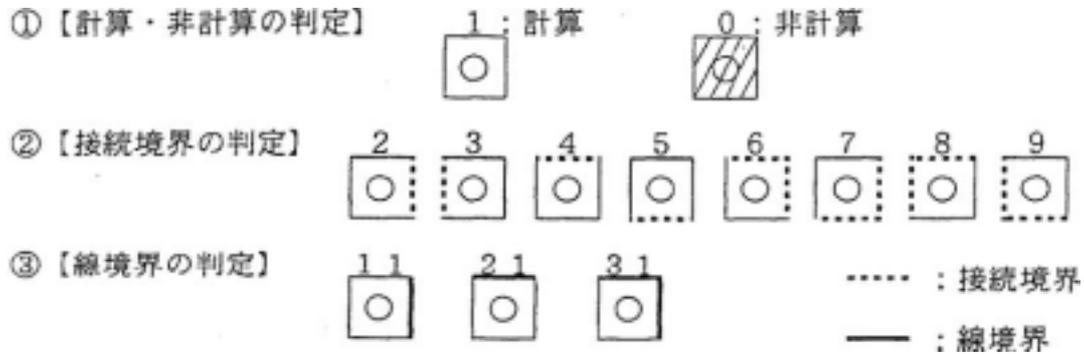


圖 3.7 計算格子參數種類

(2.5.2)而海嘯模式中各個計算網格中所有未知變數的定義可用下列說明。 x 、 y 座標 (i, j) 是計算用的網格，水位 $\eta_{i, j}$ 而 $M_{i+1/2, j}$ ， $N_{i, j+1/2}$ 分別代表兩個方向的流量。圖3.8即是表示未知數之定義與網格之間的關係圖，流量的定義位置是指每個網格的1/2處。

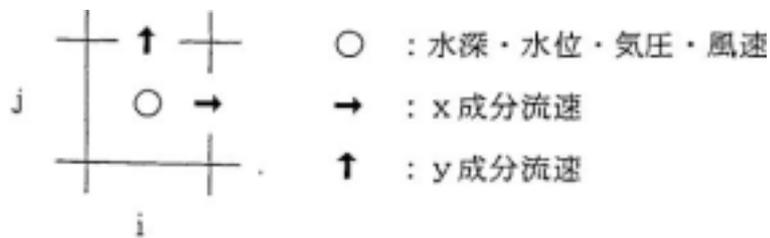


圖-3.8 計算格子と計算變數の定義位置の關係

(2.5.3)網格之間的接續關係

有關於不同計算網格間的接續，根據以往的研究顯示，相鄰兩不同網格間的接續配置若能採用 1:2 或 1:3 來進行數值運算，則可以將計算誤差值降到最小。接續比例如果過小則有可能反倒加大誤差。圖 3.9 是表示不同網格之間的配置關係。在不同網格內放置 2 行 2 行之預備網格被，則在接續境界方面的非線形計算是有可能的。

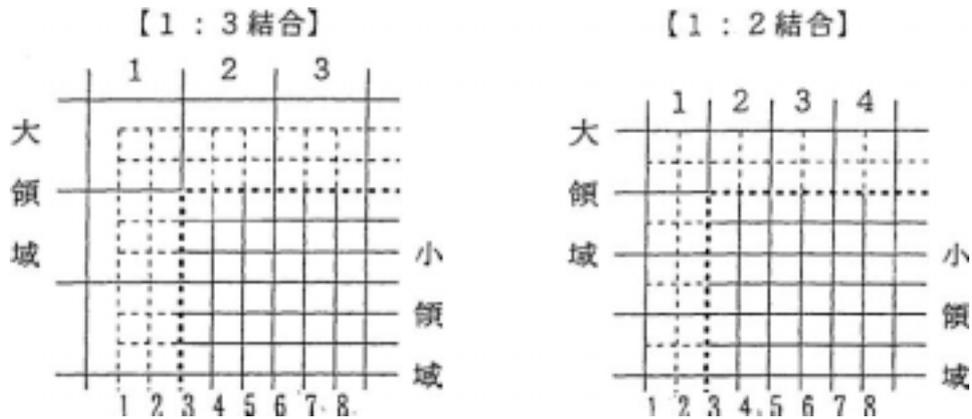


圖 3.9 網格之間的接續模式圖 (1:3 或 1:2 結合)

(2.5.4) 水深的接續

若要和其他網格的水深值進行接續時，可採用以下方式進行。

- (1) 位置在大網格內的小網格之水深，全部採用大格子之水深。
- (2) 小網格內的大網格，採用該儲在內小網格的_{最大}水深。

圖 3.10 網格的接續狀況與置換的水深及該點的位置

(2.5.5) 水位及流量的接續

大格子和小格子的接續，為了計算前述的運動方程式中的非線形項，故得到接續參數是必要的。

在圖 3-11 中， x 、 y 座標 (i,j) 的流量分量 $M_{i,j}$, $N_{i,j}$ 的計算 (運動方程式的數值解法)，對於計算非線形項而言是必要的變數。在圖中使用的記號如下：

- : 在接續邊界方面的 x 方向流量 (未知數)
- ↑: 在接續邊界方面的 y 方向流量 (未知數)
- : 週遭網格內重疊的網格水深
- ◎: 週遭網格內重疊的網格水深和水位
- : 週遭網格內重疊的網格 x 方向流量
- ⋮: 週遭網格內重疊的網格 y 方向流量

週遭網格內的水位 $\eta_{i,j}$ 和 x, y 流量 $M_{i,j}$, $N_{i,j}$, 由週遭網格內的值以空間內插方式求之。非線性計算時若與其他網格接合時，這些變量必須全部為已知。

以下在8種邊界條件下各變量之傳遞方式

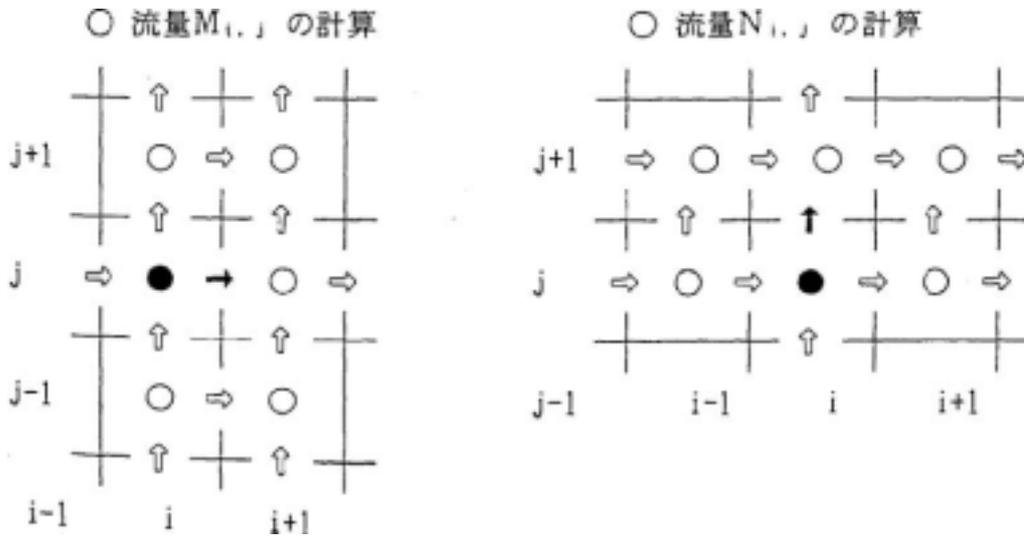
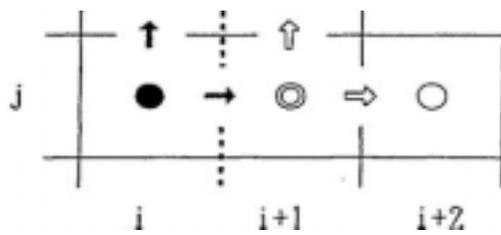


圖 3.11 非線性項計算使用的變數之位置

接續參數2

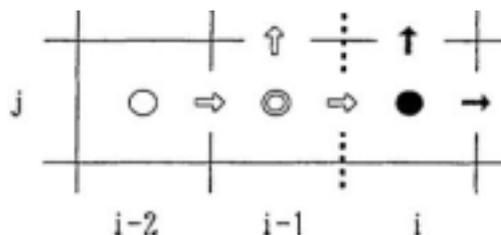


未知量: $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

- $h_{i+1,j}, h_{i+2,j}$
- $\eta_{i+1,j}$
- $u_{i+1,j}$
- $v_{i+1,j}$

接續參數3

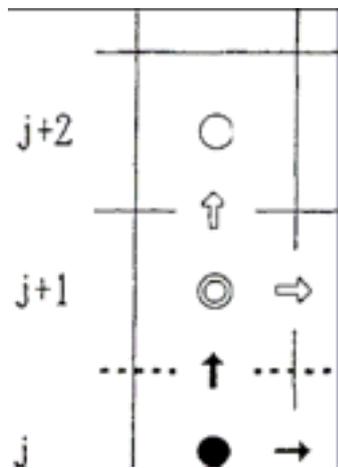


未知量: $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

- $h_{i-2,j}, h_{i-1,j}$
- $\eta_{i-1,j}$
- $u_{i-2,j}, u_{i-1,j}$
- $v_{i-1,j}$

接續參數4

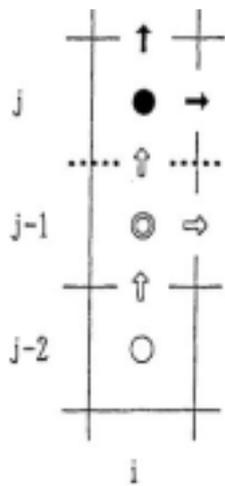


未知量： $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

$h_{i,j+1}, h_{i,j+2}$
$\eta_{i,j+1}$
$u_{i,j+1}$
$v_{i,j+1}$

接續參數5

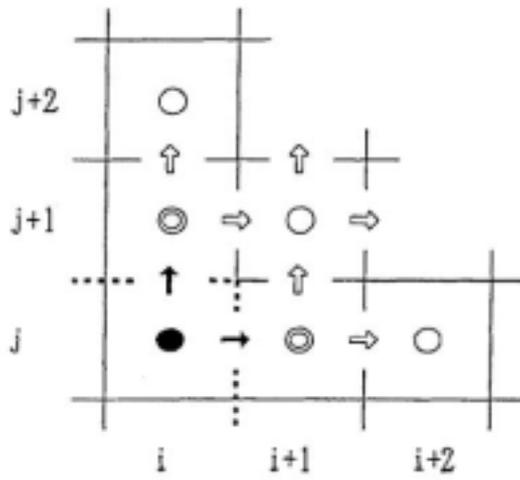


未知量： $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

$h_{i,j-2}, h_{i,j-1}$
$\eta_{i,j-1}$
$u_{i,j-1}$
$v_{i,j-2}, v_{i,j-1}$

接續參數6

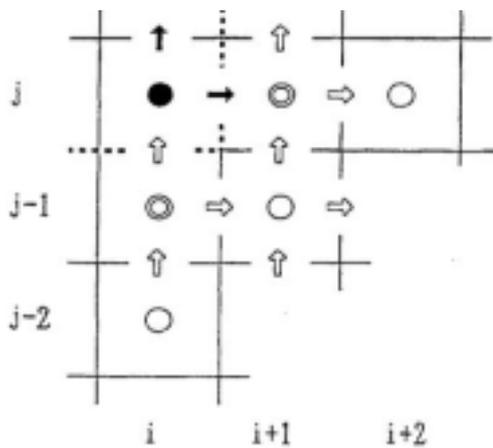


未知量： $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

$h_{i,j+1}, h_{i,j+2}, h_{i+1,j}, h_{i+1,j+1}, h_{i+2,j+1}$
 $\tau_{i,j+1}, \tau_{i+1,j}$
 $u_{i,j+1}, u_{i+1,j}, u_{i+1,j+1}$
 $v_{i,j+1}, v_{i+1,j}, v_{i+1,j+1}$

接續參數7

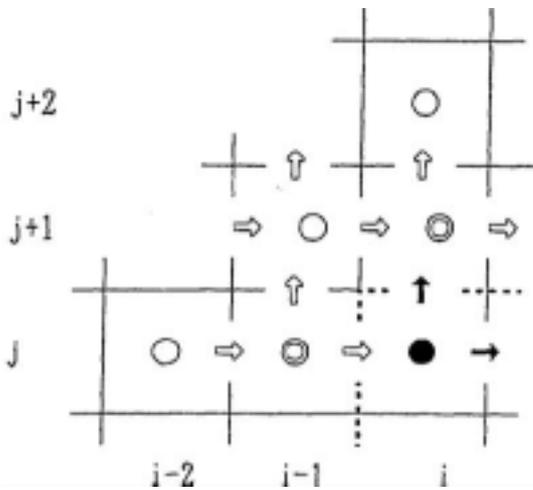


未知量： $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

$h_{i,j-2}, h_{i,j-1}, h_{i+1,j-1}, h_{i+1,j}, h_{i+2,j}$
 $\tau_{i,j-1}, \tau_{i+1,j}$
 $u_{i,j-1}, u_{i+1,j-1}, u_{i+1,j}$
 $v_{i,j-2}, v_{i,j-1}, v_{i+1,j-2}, v_{i+1,j-1}, v_{i+2,j-1}$

接續參數

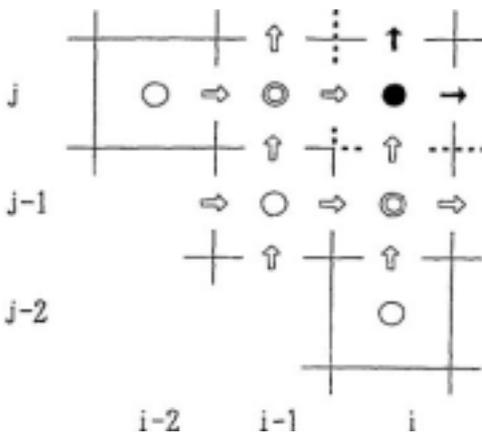


未知量： $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

$$h_{i-2,j}, h_{i-1,j}, h_{i-1,j+1}, h_{i,j+1}, h_{i,j+2}, \tau_{i-1,j}, \tau_{i,j+1}, u_{i-2,j}, u_{i-2,j+1}, u_{i-1,j}, u_{i-1,j+1}, u_{i,j}, v_{i-1,j}, v_{i-1,j+1}, v_{i,j+1}$$

接續參數



未知量： $u_{i,j}, v_{i,j}$

週遭網格接合時必要知道的變數

$$h_{i-2,j}, h_{i-1,j-1}, h_{i-1,j}, h_{i,j-2}, h_{i,j-1}, \tau_{i-1,j}, \tau_{i,j-1}, u_{i-2,j-1}, u_{i-2,j}, u_{i-1,j-1}, u_{i-1,j}, u_{i,j}, v_{i-1,j-2}, v_{i-1,j-1}, v_{i-1,j}, v_{i,j-2}, v_{i,j-1}$$

(2.5.6) 網格內位置計算法

計算網格內的位置座標中，是設定為直角座標系統，其全計算網格的基準計算原點為 (X_0, Y_0) 座標 $(0.0, 0.0)$ 。但如果有許多計算網格存在，每個計算網格的原點 (X_{Gm}, y_{Gm}) 和區域內的計算網格位置 (im, jm) 如果均為已知，那麼就可以知道該區域的中點座標位置 (xP, yP) 。網格間的關係可用簡易的方式求出。

網格中點的座標位置 (xP, yP) 可用下列方式求出：

$$xP = (im - 0.5)$$

$$yP = (jm - 0.5)$$

此處， m 是區域號碼。全計算網格的座標系統和任意計算網格 m 的計算網格的座標位置 (x_p, y_p) 的關係，可由圖 3.13 說明。

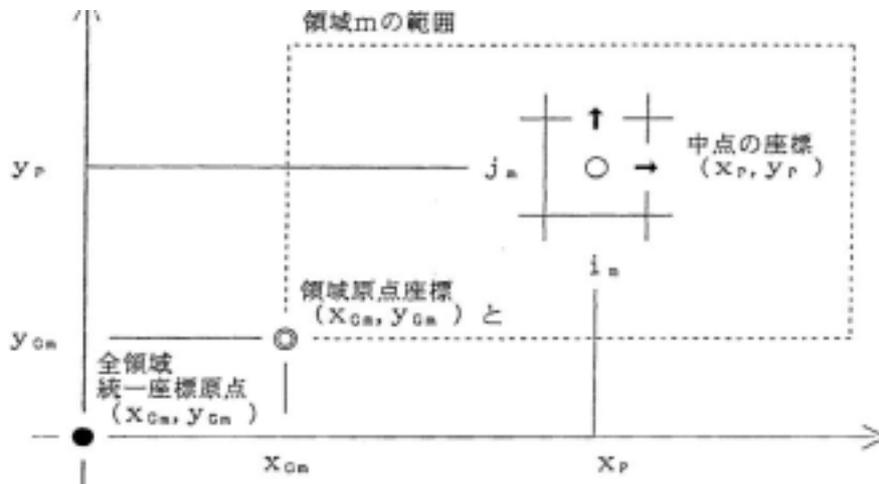


圖-3.13 全網格的直角座標和任意網格的計算網格的位置座標之關係

(3) 其他的計算條件

(3.1) 計算時間間隔

在全網格計算中，為了差分模式的穩定性，必須採用相同的時間間隔 Δt ，即是(C.F. L.條件)

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} > \sqrt{2gh_{max}} \quad , \quad \Delta t < \frac{\Delta s}{\sqrt{2gh_{max}}} \quad (81)$$

Δt 之設定，必須在每個地點都滿足此條件。這時候， Δs 為網格間距， h_{max} 為各計算網格中最大水深值。

(3.2) 摩擦係數

在非線性長波理論中，考慮利用(曼寧)マニング的粗糙係數來評估海底摩擦。在本模式中，海底是被考慮為一個具有大規則斷面之流路，此時(曼寧)的粗糙係數 $n=0.025m^{(-1/3)}s$ ，海底摩擦運動量損失係數 f 為：

$$f = g n^2 / D^{1/3} \quad (82)$$

但是，本模式可以容許 f 隨空間變化。有關底床的種類和(曼寧)的粗糙係數值如表3.1 所列。

表 3.1 底床的種類和(曼寧)的粗糙係數值

[摘自土木學會之水理公式集]

流路形態		概略值
平野的小流路	雜草叢生、滿水位狀態及深淵	0.025~0.033
	同上，但是石頭較多	0.03 ~0.04
	雜草叢生，蜿蜒蛇行還有一些較淺的部份	0.033~0.044
	同上，但是含有一些石頭雜草及蟻窩	0.35~0.05
	同上，但是水位較低	0.04~0.055
	同上，並且石頭相當多	0.045~ 0.06
	水流緩慢，深淵中含有雜草	0.05~0.08
	山地流路	底面有細沙、玉石及若干大玉石
	大玉石與玉石互相交錯	0.04~0.07
大流路	規則的断面含有大玉石與灌木	0.025~0.06
	不規則的粗糙断面	0.035~0.10

3.2 計算暴潮的條件

(1)海上風場推算

推算暴潮所使用的風場，是指海面上10 m 度的風速，由颱風模式可以推估出來。

以下，整理對自由大氣的風場推算和海面風場的變換法。

(1.1.1)梯度風模式

從天氣圖上可以獲得基本的氣壓分佈，使用傾度風模式計算所得是近似不受到海面摩擦效應的自由大氣風場。但需要注意，氣象圖的值一般是使用在地面上，而不是用來表示上空大氣的正確性。

梯度風如果結合氣壓梯度，就得到下面的表示式

$$V_{gr} = \frac{fR}{2} + \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} + \frac{R}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r}} \quad (83)$$

式中， G 是梯度風速， f 是科氏力係數或是折向係數($f=2\omega \sin \theta$)， ω 是地球自轉的角速度， θ 是緯度， R 等壓線曲率半徑和 ρ_a 是空氣密度。梯度模式的力學平衡可用圖3.14表示。

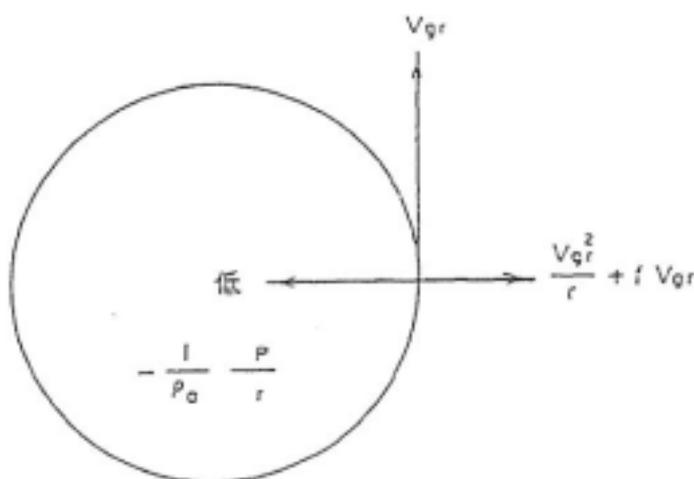


圖 3.14 梯度模之式力學平衡

(1.1.2)在颱風模式中，颱風影響範圍內的氣壓分佈，依 Myers 的公式，

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (84)$$

式中， r 是距颱風中心的距離， $P(r)$ 是在 r 地點的氣壓， P_c 颱風中心的氣壓， ΔP 是壓力差， r_0 是颱風半徑。颱風半徑是指颱風中心到梯度風速最大點位之距離，由式(84)可知氣壓 $P(r)$ 與距離颱風中心 r 有關在颱風模式中，假定等壓線是呈同心圓

狀，其梯度風速 $U_1(r)$ 可被表示為：

$$U_1(r) = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial P(r)}{\partial r}} \quad (85)$$

式中， f 是科氏力係數或是折向係數， ρ_a 是空氣密度。距颱風中心的距離、所在地的壓力梯度 $\frac{\partial P}{\partial r}$ 均能給予的話，則梯度風速 U 可被求出。將式 (84) 代入式

(85)，就變成

$$U_1(r) = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(\frac{r_0}{r}\right)} \quad (86)$$

對颱風移動時所產生的風場 $U_2(r)$ 而言，可用式(86)的傾度風速 $U_1(r)$ 和颱風的行進速度依比例進行估算。

$$U_2(r) = \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V \quad (87)$$

4. 數值計算流程圖

4.1 程式構成

圖 4.1 為數值計算節目的流程圖。另外圖 4.2 表示次程式的構成

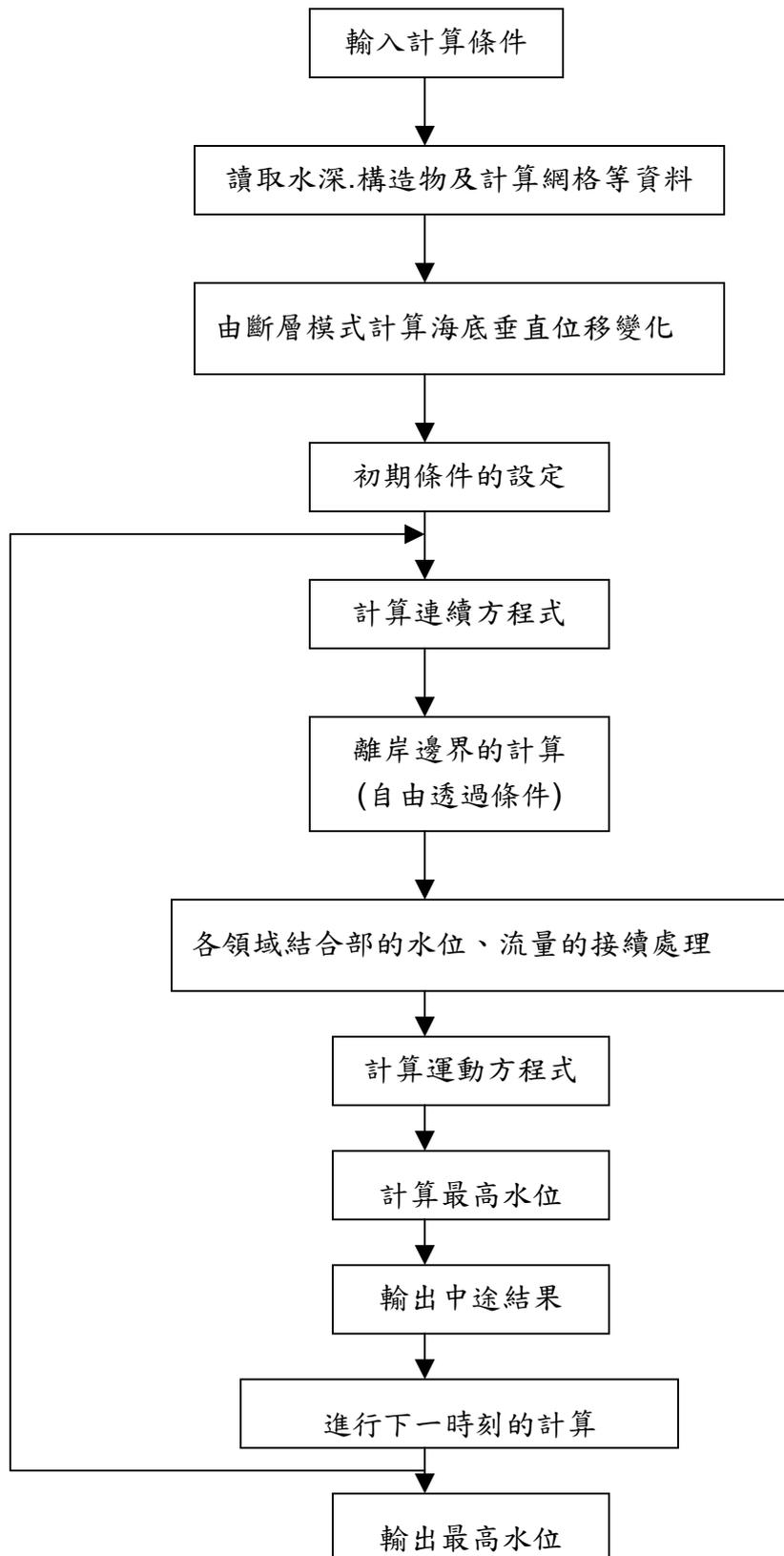
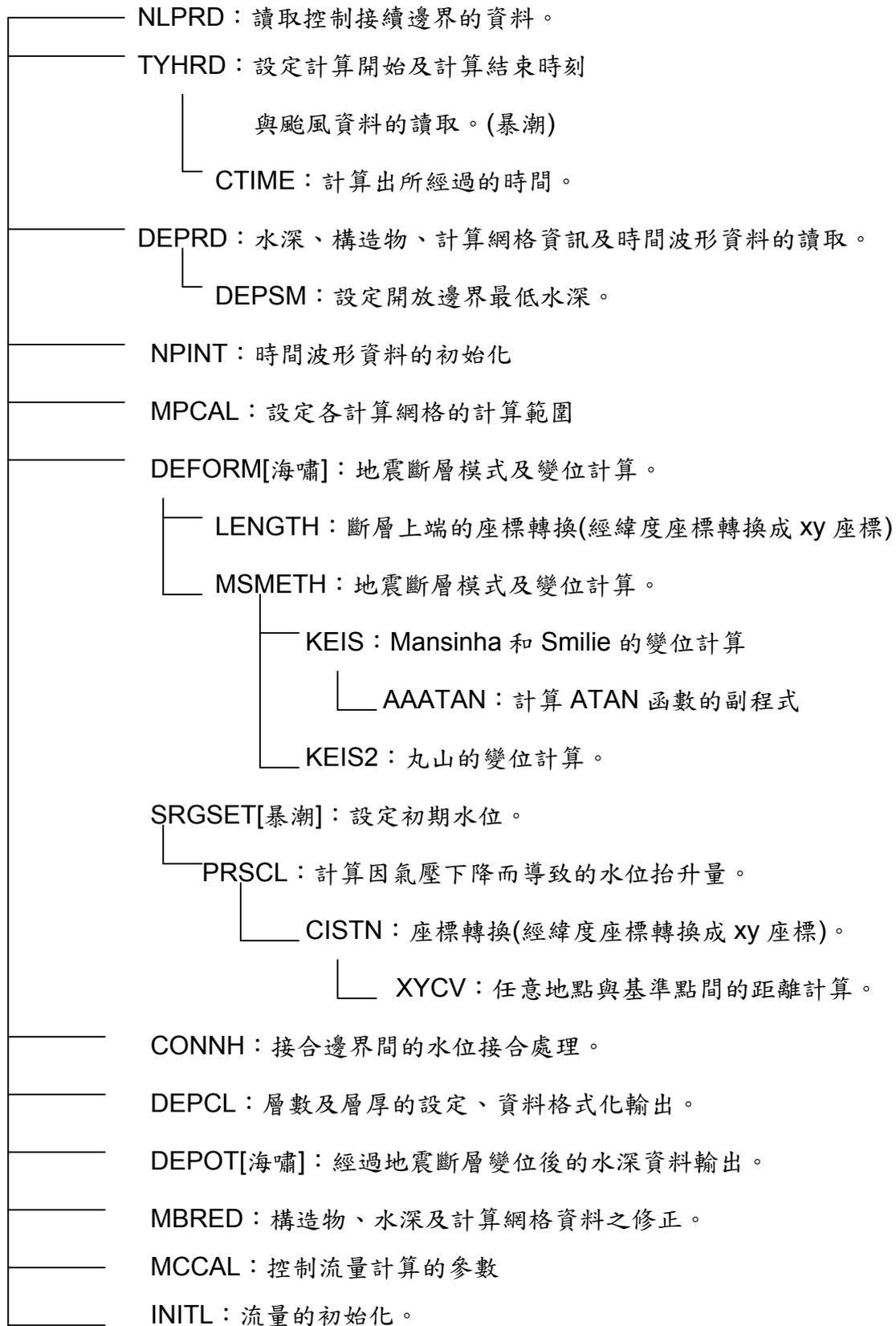


圖 4·1-海嘯計算的流程

主要的程式



CONNC: 水位、層厚、流量的接續處理。

圖-4.2 (1) 副程式的構成

迴圈計算

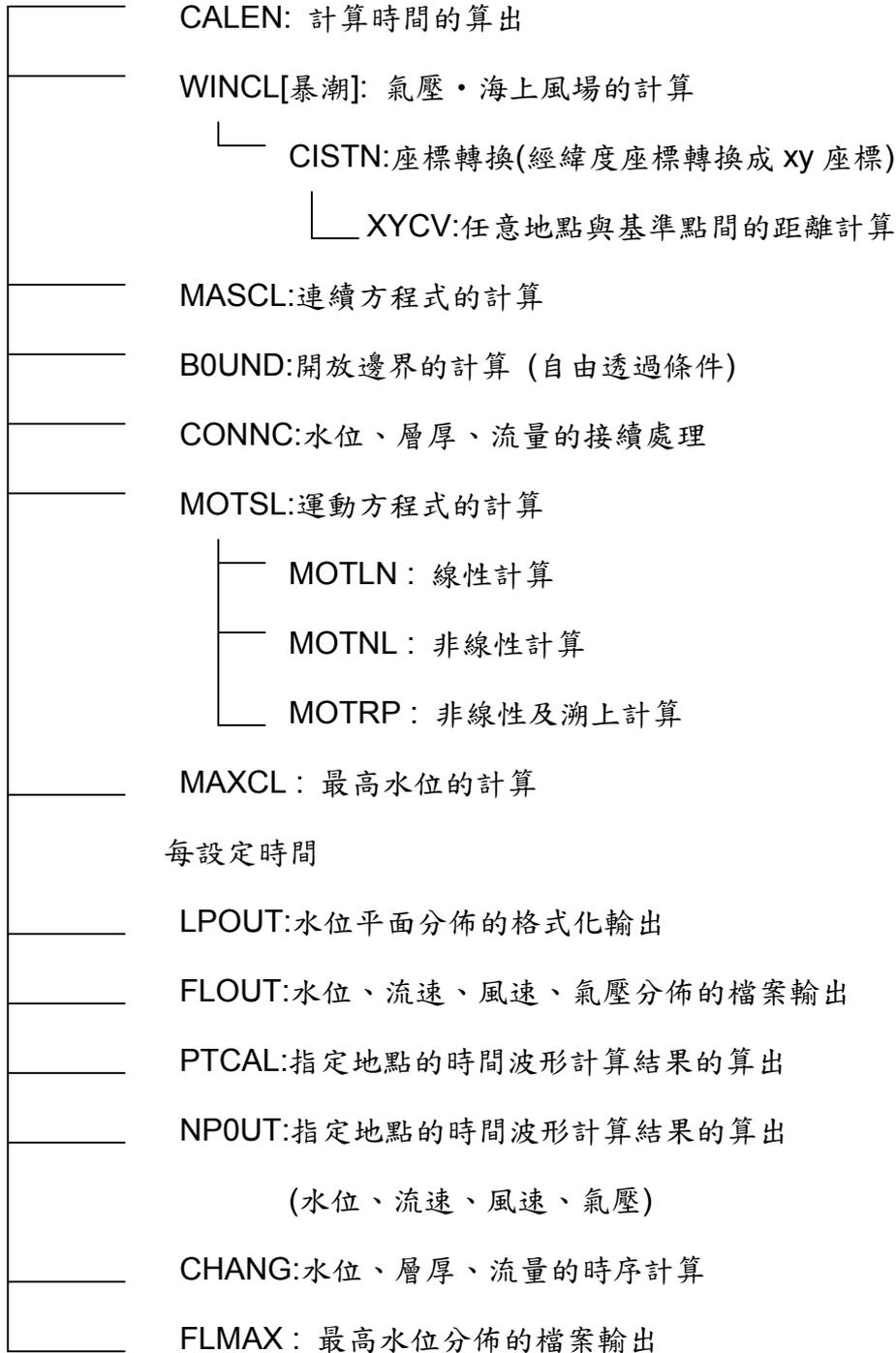


圖-4.2 (2) 副程式的構成

4.2 輸入輸出的格式

(1) 輸入的內容格式

表 4.1 為資料輸入格式一覽表。各別的檔案內部的格式將在下頁說明。

圖 4.3 表示計算網格訊息和時間波浪變化圖之輸出地點位置，依順序加以排列。

圖 4.4 是表達計算網格水深以及構造物資料。各項輸入的辦法則用表單 1.1~1.6 來表示。

表 4.1 輸入資料與內容

機番	裝置	I/O	內容	標準檔案名稱
1	文字格式	輸入	計算網格水深的資料	Sample.dph
2	文字格式	輸入	計算網格訊息的資料	Sample.map
3	文字格式	輸入	颱風數據 (高潮計算)	ts5915.dat (本範例不使用)
4	文字格式	輸入	接續邊界參數	nlpara.dat
5	文字格式	輸入	時間波形輸出地點的位置資料	Sample.pnt
7	文字格式	輸入	計算網格訊息數據 (判定海陸用網格數據)	tokyo.mag (本範例不使用)
8	文字格式	輸入	構造物 (頂部高) 的基準高資料	Tokyo.reg (本範例不使用)
9	文字格式	輸入	構造物 (頂部高) 資料	Sample.bdh

表單 1・5： 颱風資料

台風5915号 (伊勢湾台風)

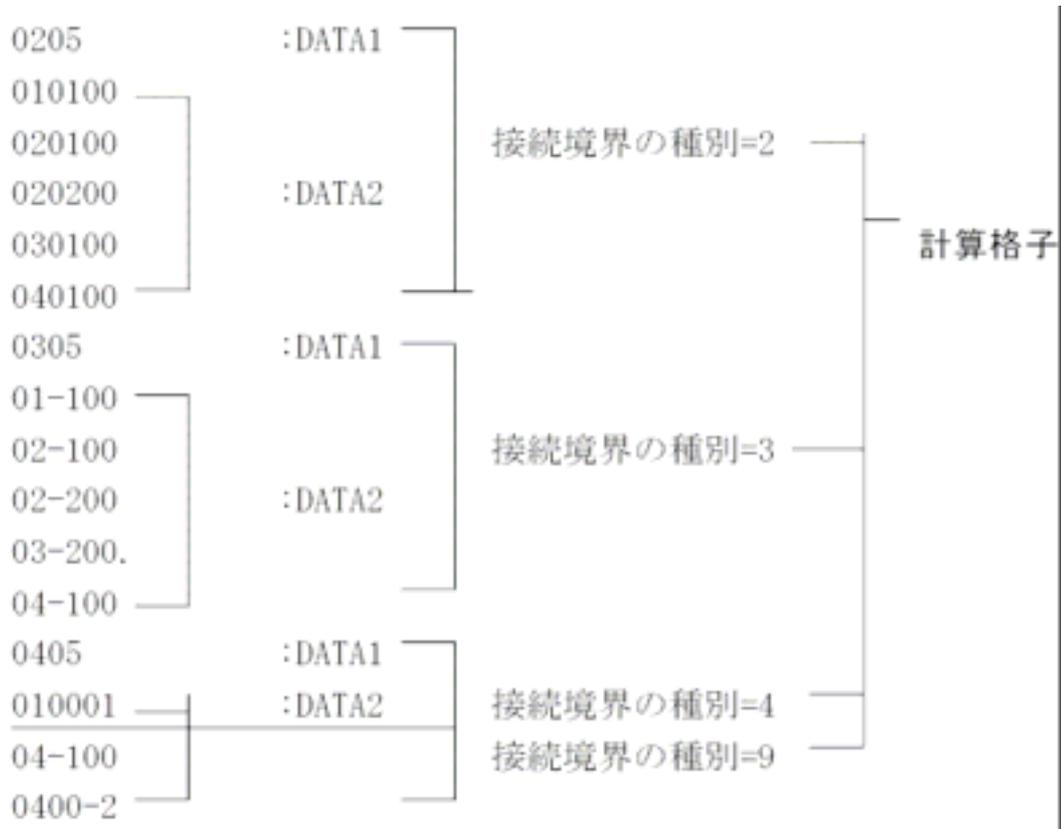
年月日時分	経度	緯度	中心示度	台風半径	移動速度
5909240900	140.000	20.800	0.0	40.0	22.0
5909241500	139.200	21.500	100.0	40.0	25.0
5909242100	138.200	22.200	100.0	40.0	28.0
5909250300	137.200	23.000	100.0	40.0	30.0
5909270600	139.700	40.100	32.0	205.0	20.0
5909270700	140.000	40.200	30.0	175.0	15.0
5909270800	140.100	40.300	28.0	145.0	15.0
5909270900	140.300	40.300	26.0	120.0	23.0
	(°)	(°)	(hPs)	(km)	(km/時)

コメント行

DATA1

DATA1 の格式： (4I2,2X, 2F10.3, 3F10.1)

表單 1.6： 接續邊界參數



DATA1 : (2I2) 接續邊界の種類、個數

DATA2 : (3I2) 接續計算項目、X、Y 方向的計算網格位置 (接續網格為基準)

1: 水位

2: 層厚

3: X 方向的流量分量

4: Y 方向的流量分量

接續邊界按種類區別有 2~9 共 8 種。

(2)輸出資料的格式

輸出資料內容請詳見表 4.2

表 4.2 輸出資料一覽表

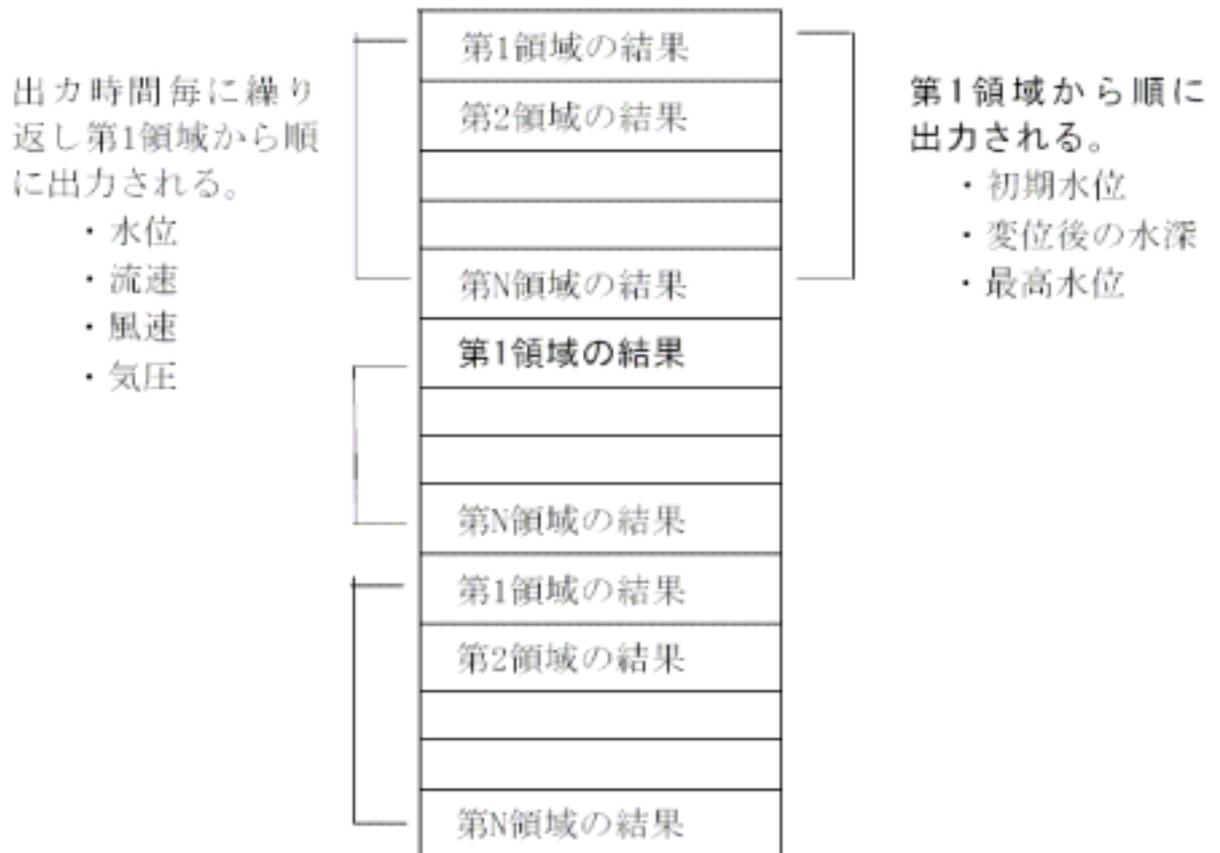
機番	裝置	I/O	內容	標準檔案名稱
6	檔案名稱	輸出	計算條件目錄 (1)輸入資料 (2)計算的中途結果	glisa\$\$\$
10	檔案名稱	輸出	代表地點的歷時變化資料 (1)計算延時(2)氣壓(3)風速(4)水位 (5)流速	glpnt\$\$\$ \$\$\$是計算案例的代號
11	檔案名稱	輸出	水位平面分布資料 (1)計算延時(2)水位	gl suf\$\$\$ \$\$\$是計算案例的代號
12	檔案名稱	輸出	流速平面分布資料 (1)計算延時(2)流速	glvel\$\$\$
13	檔案名稱	輸出	風速平面分布資料(暴潮) (1)計算延時(2)流速	glspd\$\$\$
14	檔案名稱	輸出	氣壓平面分布資料(暴潮) (1)計算延時(2)流速	glprs\$\$\$
15	檔案名稱	輸出	最高水位平面分布資料 (1)計算延時(2)水位	glmax\$\$\$
16	檔案名稱	輸出	初期水位平面分布資料(海嘯) (1)計算延時(2)初期水位流速	gl su0\$\$\$
17	檔案名稱	輸出	地層變位後的水深資料(海嘯) (1)計算延時(2)水深	gldep\$\$\$
21	檔案名稱	輸出	最大值發生時刻平面分布 (1)計算延時(2)最大值發生時刻	gltmx\$\$\$
22	檔案名稱	輸出	第 1 波到達時刻平面分布(海嘯) (1)計算延時(2)最大值發生時刻	gltat\$\$\$
23	檔案名稱	輸出	最大流速平面分布 (1)計算延時(2)初期水位流速	glvmx\$\$\$

(注)檔案名稱中的\$\$\$是表示計算案例的代號。

各平面分布計算結果之組成，如圖 4-5 所示。

表單 1.6 是水位平面分布的計算結果，表單 1.7 是代表地點的歷時變化。

關於詳細的輸出格式，將在程式說明的時候解釋。



表單 1.6：平面分布資料(水位)

2	600	90	1	1	0	10	DATA1		
999.000999	000999	000999	000999	000999	000999	000999	000		
999.000999	000999	000999	000999	000999	000999	000999	000		
0.008	0.014	0.019	0.023	0.027	0.028	0.030	0.032	0.035	0.037
0.039	0.042	0.045	0.047	0.049	0.052	0.055	0.057	0.060	0.063
0.066	0.068	0.071	0.073	0.075	0.078	0.080	0.081	0.082	0.083
0.083	0.084	0.084	0.085	0.085	0.086	0.087	0.086	0.085	0.086

[水位分布資料]

DATA1 : (7I10) 範圍代號、計算步驟、年月日時分

DATA2 : (10F7.3) 水位(公尺：T.P.為基準，平均靜水位向上為正)非計算網格的水位，是以 999.000M 做輸出。

DATA2 為重複輸出計算領域中所須的格子數。

表單 1.7：代表地點的歷時變化

9001010001	1	2	37	134	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9001010001	2	2	41	139	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9001010001	3	2	45	147	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9001010001	4	3	36	31	0.0	0.00	0.00	1.05	0.00	0.01	0.00	0.00
9001010001	5	3	27	113	0.0	0.00	0.00	0.62	0.00	0.02	0.00	0.00
9001010002	1	2	37	134	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9001010002	2	2	41	139	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9001010159	5	3	27	113	0.0	0.00	0.00	0.29	0.01	-0.09	0.00	0.00
9001010200	1	2	37	134	0.0	0.00	0.00	0.61	0.00	-0.06	0.00	0.00
9001010200	2	2	41	139	0.0	0.00	0.00	0.11	0.06	-0.01	0.00	0.00
9001010200	3	2	45	147	0.0	0.00	0.00	-0.06	-0.01	0.02	0.00	0.00
9001010200	4	3	36	31	0.0	0.00	0.00	-0.07	0.10	0.04	0.00	0.00
9001010200	5	3	27	113	0.0	0.00	0.00	0.31	0.02	-0.05	0.00	0.00

年月日時分 格子位置 (X, Y方向)
 領域番號
 代表地点の 通し番號

氣壓 X成分 Y成分 水位 X成分 Y成分 X成分 Y成分

風 速 第 1 層 第 2 層

流 速 (m/s)

輸出格式： FORMAT(5I2, 2X, 4I4, 2X, F7.1, F9.2)

1行代表1處地點的資料，所有的地點資料均按所設定的時間重複計算

(3) 主程式內的輸入數據格式

1. 選取計算方法

DATA1：計算方法，FORMAT(I5)

指定計算方法的代號，1：海嘯計算 2：暴潮計算

DATA2：計算層數，FORMAT(I5) 1 以上之整數。通常是內設 1

2. 設定各層的層厚

DATA3：各層的水深(M)，FORMAT(5F10.0)

3. 設定計算範圍

DATA4：計算基準點的緯度(度分秒)，FORMAT(3F5.0)

DATA5：計算基準點的經度(度分秒)，FORMAT(3F5.0)

DATA6：計算範圍數，FORMAT(I5)

DATA7：設定計算領域，FORMAT(2I5，F5.0，2F10.0，F5.0，I5)

(A) X 方向的計算網格數

(B) Y 方向的計算網格數

(C) 網格間隔

(D) 計算網格距基準點的距離[X 方向(m)]

(E) 計算網格距基準點的距離[Y 方向(m)]

(F) 計算範圍內的最低水深，溯上計算範圍以 0.0M 輸入

(G) 計算範圍的計算範圍

指定計算方法的代號

91：線性計算 92：非線性計算 93：非線性計算+溯上計算

DATA3是輸入計算網格數目。DATA7是重複讀取所需資料。

4.設定計算時間

DATA8：設定計算開始及完成時間(分)，FORMAT(F6.0)

DATA9：時間間隔(秒)，FORMAT(F6.0)

DATA10：中途結果的輸出時間間格(秒)，FORMAT(F6.0)

DATA11：中途結果的輸出時間間格(秒)，FORMAT(F6.0)

DATA12：代表地點的輸出時間間格(秒)，FORMAT(F6.0)

5.輸出的設定

DATA13：水深值的輸出資料

DATA14：計算值的輸出資料

DATA15：浸水計算判斷

6.數值黏性的設定

DATA16：潮位

DATA17：數值黏性

DATA18：垂直方向渦動黏性係數

DATA19：水平方向渦動黏性係數

DATA20：空氣密度(g/m³)

DATA21：海水密度(g/m³)

DATA22：科氏力係數

DATA23：風的衰減率

DATA24：吹入的角度(°)

DATA25：粗度係數

7. 地震斷層模式

DATA30：地震時同時發生運動的斷層數，FORMAT(I5)

也有2個以上的斷層同時動的時候，最大可以設定5個斷層。若是多數斷層的場合

DATA17~25和斷層數必要重複輸入的數據。

DATA31：斷層的修正係數 通常是 1

計算值和痕跡高相差甚大的時候，可考慮設定補正係數。

DATA32：斷層方向的端點位置經緯度，FORMAT(F5.0)

DATA33：斷層面的寬度(KM)，FORMAT(F6.2)

DATA34：斷層面上緣的深度(KM)，FORMAT(F6.2)

若不知道斷層面上緣的深度的時候，可設定1 km左右。

DATA35：斷層面的傾斜角(度)，FORMAT(F6.2)

DATA36：滑動量的橫向分量(公尺)，FORMAT(F6.2)

DATA37：滑動量的縱向分量(公尺)，FORMAT(F6.2)

分別使用斷層的滑動量(D)及滑動量的方向(λ)；走向方向(即橫向分量)和傾斜方向(即縱

向分量)二個分量將分開使用。

8. 輸入資料檔案名稱

DATA40：水深資料，FORMAT(A15)

DATA41：計算網格資料，FORMAT(A15)

DATA42：颱風資料(暴潮計算)，FORMAT(A15)

颱風資料是用來計算暴潮用

DATA43：FORMAT(A15)

DATA44：計算網格資料(判別海域及陸地用)，FORMAT(A15)

DATA45：構造物的基準高程資料，FORMAT(A15)

DATA46：構造物的頂部高程資料，FORMAT(A15)

9. 輸出資料檔案名稱

DATA50：代表地點資料，FORMAT(A15)

DATA51：水位資料，FORMAT(A15)

DATA52：流速資料，FORMAT(A15)

DATA53：最高水位資料，FORMAT(A15)

DATA54：氣壓資料(暴潮計算)，FORMAT(A15)

DATA55：風速資料(暴潮計算)，FORMAT(A15)

風速以及氣壓數據，在計算海嘯時是沒有被輸出的。

DATA56：初期水位資料，FORMAT(A15)

DATA57：地盤高資料，FORMAT(A15)

經由地盤變化後的水深資料據以計算海嘯發生的初期水位。

DATA58：第一波到達時刻資料，FORMAT(A15)

DATA59：最大水位發生時刻資料，FORMAT(A15)

DATA60：最大流速資料，FORMAT(A15)

輸出數據的檔案名可改變每次計算最後的 3 個文字，以方便檔案管理

1.文字排列一覽表

(1) HLV(K)

(2) HT\$\$ (I,J) : \$\$網格的水深資料(M)

(3) MP\$\$s : \$\$網格的計算網格資料

(4) ZF\$\$ (I,J), ZP\$\$ (I,J) : 2 個步驟(N,N+1)的平均水面的水位(M)(向上為正)

(5) DF\$\$ (I,J,L), DP\$\$ (I,J,K) : 2 個步驟(N,N+1)的 K 層層厚

(單層是全水深，單層和最上層的關係是=HT+ZF)

(陸上的場合中，層厚 DF=0.0，水位可設定為 ZF=HT)

(6) UF\$\$ (I,J,K), UP\$\$ (I,J,K) : 2 個步驟(N,N+1)的 K 層 X 方向流量

(7) VF\$\$ (I,J,K), VP\$\$ (I,J,K) : 2 個步驟(N,N+1)的 K 層 Y 方向流量

(8) WF\$\$ (I,J,K-1) : K 層的 Z 方向流量(垂直方向)

(9) ZM\$\$ (I,J) : 網格內最大水位(M)

(10) SU\$\$ (I,J,K), SV\$\$ (I,J,K) : \$\$範圍內 X、Y 方向之風速(暴潮計算用)

(11) PS\$\$ (I,J) : \$\$範圍內的氣壓(hps)(颱風的氣壓分布適用 Myers 模式)

(12) MB\$\$ (I,J) : \$\$範圍內的構造物頂部高

(13) MC\$\$ (I,J) : \$\$範圍內的流量

(第一行：0=1，表示 J 不計算，1=I 計算，2=J 計算，3=IJ 都計算)

(第二行:判別 MN 移流項 X 分量計算)

0=上下都不用計算，1=下計算，2=上計算，3=上下計算

(第三行：判別 NM 移流項 Y 分量計算)

0=左右都不用計算，1=左計算，2=右計算，3=左右計算

(14) MD\$\$ (I,J) : \$\$範圍內的計算網格層數

(15) TM\$\$ (I,J), TA\$\$ (I,J) : \$\$範圍內的最高水位發生時刻，第一波到達時刻

第一波到達時刻是海嘯計算所用的

(16) $UM_{i,j}$, $VM_{i,j}$: i,j 範圍內的 X、Y 方向最大流速(M/S)

(17) $DU_{i,j,mn}$, $DV_{i,j,mn}$:

附錄二

期末審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫
□期中 期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：海嘯模式建置研究

執行單位：國立中山大學

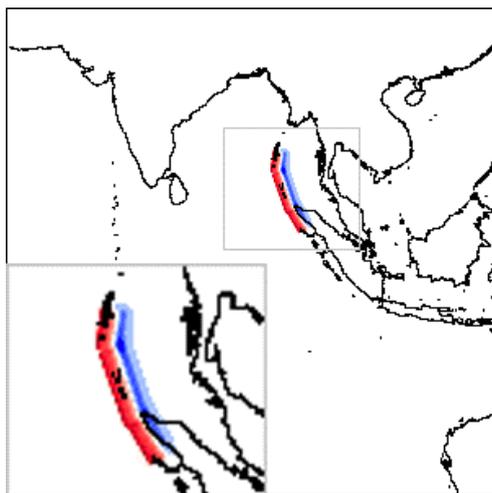
參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>簡主席仲璟</p> <p>一、 海嘯數值模式是否包含潮位的影響？在模式輸入參數中之斷層型態如何在地震發生後立即得知？</p> <p>二、 海嘯模式的計算，以一般規格之 PC 而言大約需時多久？是否具有預警功能？報告中有模式的測試結果，但缺乏實測資料之驗證，可否補充？</p> <p>三、 模式是否可引進本中心？與日本港灣空港研究所有無智慧財產權問題？該所研究人員至本中心交流及演講之簡報資料也請補充。</p> <p>四、 報告格式不符合本所出版品相關規定，請修正。另切結書與研究無關，請刪除。</p>	<p>謝謝委員之指正。請見報告中之第五章 P11 頁中說明。</p> <p>謝謝委員之指正。請見報告中之第五章 P11 頁中說明。</p> <p>謝謝委員之指正。 (1)本模式可引進至貴中心。 (2)日本港灣空港研究所表示引進時並無智慧財產權之問題</p> <p>謝謝委員之指正。已按貴所出版品之格式修正；切結書已刪除。</p>	<p>已補充修正。</p> <p>已補充修正。</p> <p>已引進本中心。</p> <p>已修正。</p>
<p>梁委員乃匡</p> <p>本計畫所採策略正確，和日本港灣空港研究所合作，引進已成功運作的模式，可在極短期間內獲得有用的工具，已達成預定任務。</p>	<p>謝謝委員之指正。</p>	

<p>高委員家俊</p> <p>1、本計畫引進日本港灣空 港研究所海嘯模式，並針對 兩個海嘯進行試算，證明具 有模式操作的能力。</p> <p>2、海嘯之生成與地形有密 切的關聯，模式中台灣近海 的地形是否精確輸入是關 鍵問題，宜嚴肅面對。</p> <p>3、報告第五頁提到邀請日 本專家進行交流，請在報告 中記載交流成果，以求報告 完整。</p>	<p>謝謝委員之指正。</p> <p>謝謝委員之指正。請見報告中 之第五章 P11 頁中說明。</p> <p>謝謝委員之指正。請見報告中 之第五章 P.5 頁中說明。</p>	<p>已補充修正。</p> <p>已補充修正。</p>
<p>張委員憲國</p> <p>本計畫較為單純，只是 模式之引進，請執行單位配 合主辦單位之任務，讓主辦 單位能執行後續操作工作。</p>	<p>謝謝委員之指正。</p>	
<p>蔡委員立宏</p> <p>1. 報告格式請依本所規定 編寫。</p> <p>2. 第二章~第四章內容有 許多為重複，內容建議 依標題定義編寫。</p> <p>3. 圖 1 計畫流程圖，報告 中建議說明。</p> <p>4. 建議增加測試過程及模 擬結果討論。</p> <p>5. 建議增加結論及建議。</p> <p>6.P-11 下標題 “平成 8 年……” 是否恰當。</p>	<p>謝謝委員之指正。已按貴所出 版品之格式修正。</p> <p>謝謝委員之指正。內容已修正。</p> <p>謝謝委員之指正。請見報告 P3-4 頁說明。</p> <p>謝謝委員之指正。請見報告 P7 頁說明。</p> <p>謝謝委員之指正。請見報告第 五章說明。</p> <p>謝謝委員之指正。該下標題已 刪除。</p>	<p>已補充修正。</p> <p>已補充修正。</p> <p>已補充。</p> <p>已補充修正。</p> <p>已補充修正。</p>

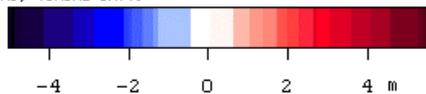
<p>主席結論:</p> <ol style="list-style-type: none">1、本次期末報告經全体委員審查後原則上通過。2、有關審查委員之意見請納入期末報告修正稿。3、所有委員提出之意見及建議，合作單位之處理情形也需納入期末報告書。		
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

交通部運輸研究所合作研究計畫
海嘯模式建置研究
(MOTC-IOT-95-H3DB005)

報告人：
國立中山大學海洋物理研究所
陳冠宇



Initial Water Surface
DCRC, Tohoku Univ.



南亞海嘯
造成的重
大傷亡，
讓國人進
一步的正
視海嘯可
能造成的
威脅

•斷層上下運動可達十公尺以上(台灣九二一大地震)



我國地震頻仍，若大海嘯萬一發生，可能造成重大傷亡；因此建立海嘯數值模式實為當務之急



海嘯數值模式

- 需要強大的電腦運算能力
- 資訊不足 – 海嘯是十分罕見的事件
- 我國上次發生海嘯災害已超過一個世紀以上，無論是政府或是民間都缺乏相關的資料與經驗
- 建立海嘯數值模式後，模式的校驗與修正都有極大的困難
- 較理想的方式則是與國外進行交流，利用國外已發展成熟的技術與數值模式為基礎，逐步建立本土的海嘯數值模式

計劃宗旨

- 以海嘯研究最發達且海嘯災害的資料與經驗最豐富的日本為對象，逐步引進其已發展成熟的模式
- 與其研究人員進行廣泛交流，進一步學習其模擬海嘯的技術，以作為建立本土的海嘯模式之基礎，並進而使海嘯模擬的技術在我國生根發展。

- 日本研究海嘯的各單位中，港灣空港研究所（PARI）之目標即為徹底瞭解已發生的海嘯災害並模擬之，並據以研擬防災、減災的策略和方法，因此擁有最多有關海嘯災害的資料，最適合我國目前海嘯研究所需。

研究內容與工作項目

- 1. 引進日本港灣空港研究所之海嘯數值模式。
- 2. 模擬實際發生過的大海嘯。
- 3. 編寫簡要之海嘯數值模式使用手冊。
- 4. 邀請日本港灣空港研究所之研究人員進行交流。

引進日本港灣空港研究所之海嘯數值模式

General Numerical Model

(Horizontally Two-dimensional Numerical Model)

Governing Equations

Equation of Continuity

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

x and y: horizontal axes

z: vertical axis (z = -h at sea bottom, z = η at sea surface)

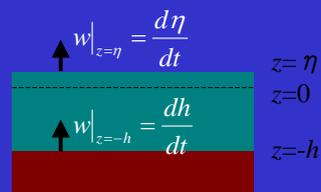
u, v, and w: components of velocity in the directions of x, y, and z

Integrate with respect to z

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz = - \left(w|_{z=\eta} - w|_{z=-h} \right)$$

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz, \quad N = \int_{-h}^{\eta} v dz$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$



Governing Equations

Equation of Motion

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \ll g$$

$$\nabla^2 w \approx 0$$

- f : Coriolis coefficient
- ρ : density of sea water
- p : water pressure
- p_0 : atmospheric pressure on the water surface
- ν : kinematic viscosity coefficient

$$p = \rho g(\eta - z) + p_0 \quad \text{Hydrostatic Pressure Assumption}$$

Governing Equations

Equation of Motion

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

Integrate with respect to z

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho}$$

- $\tau_{sx} \tau_{sy}$: tangential stress along the water surface
- $\tau_{bx} \tau_{by}$: tangential stress along the sea bottom

Governing Equations

Non-linear Equations

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho}$$

Linear Equations

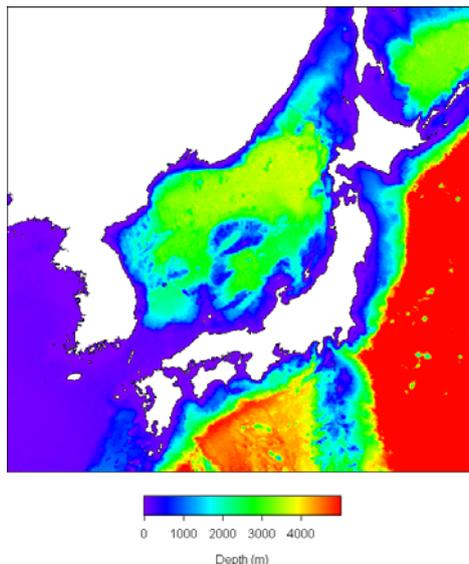
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho}$$

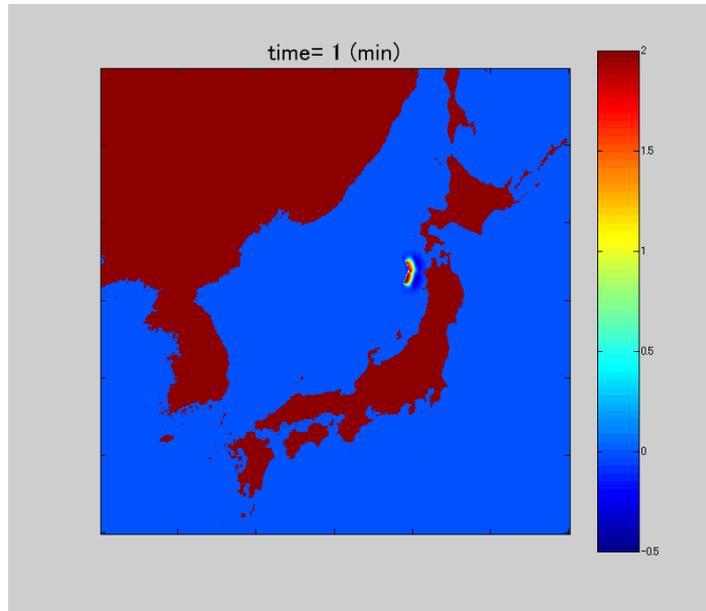
$$\frac{\partial N}{\partial t} = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho}$$

模擬實際發生過的大海嘯 (1)

Nihonkai-Chubu Earthquake Tsunami

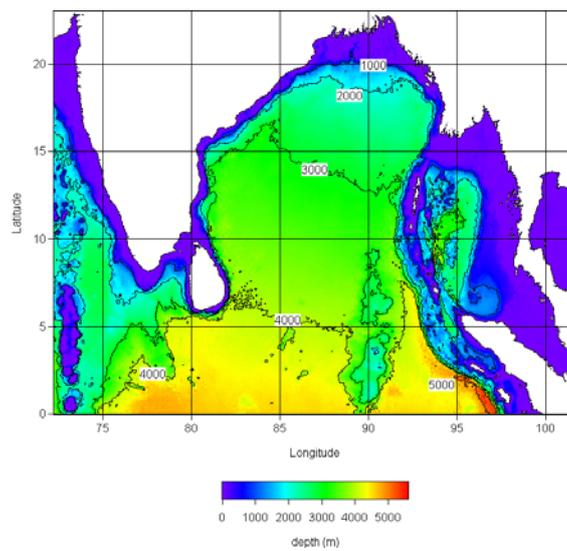


Nihonkai-Chubu Earthquake Tsunami

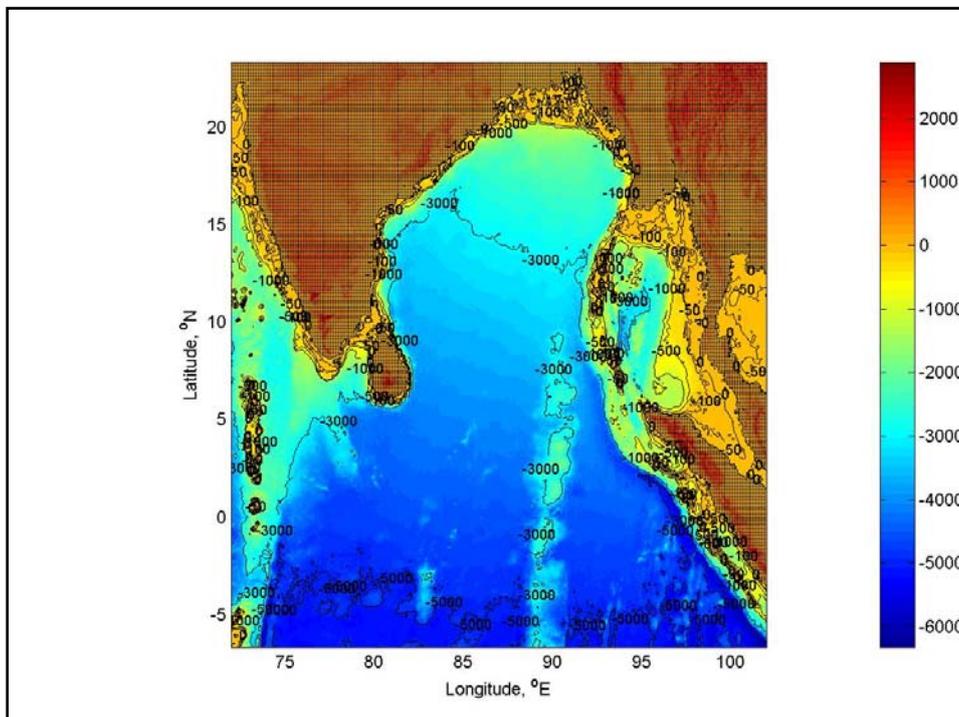
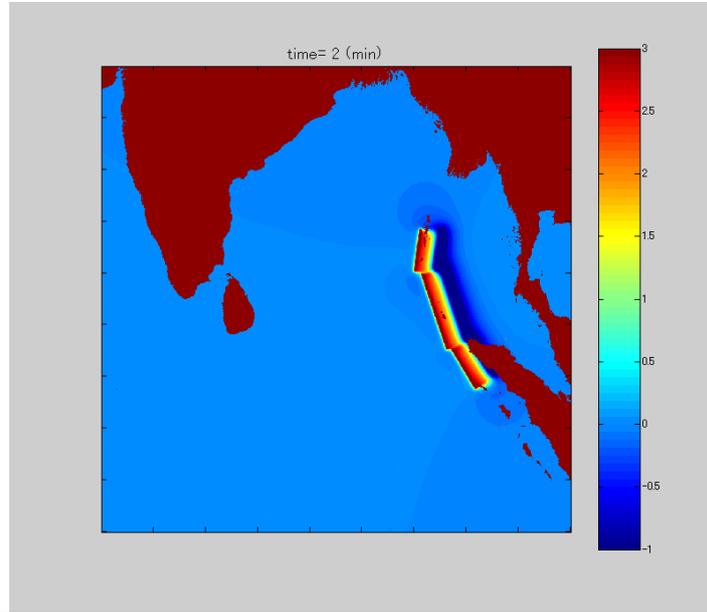


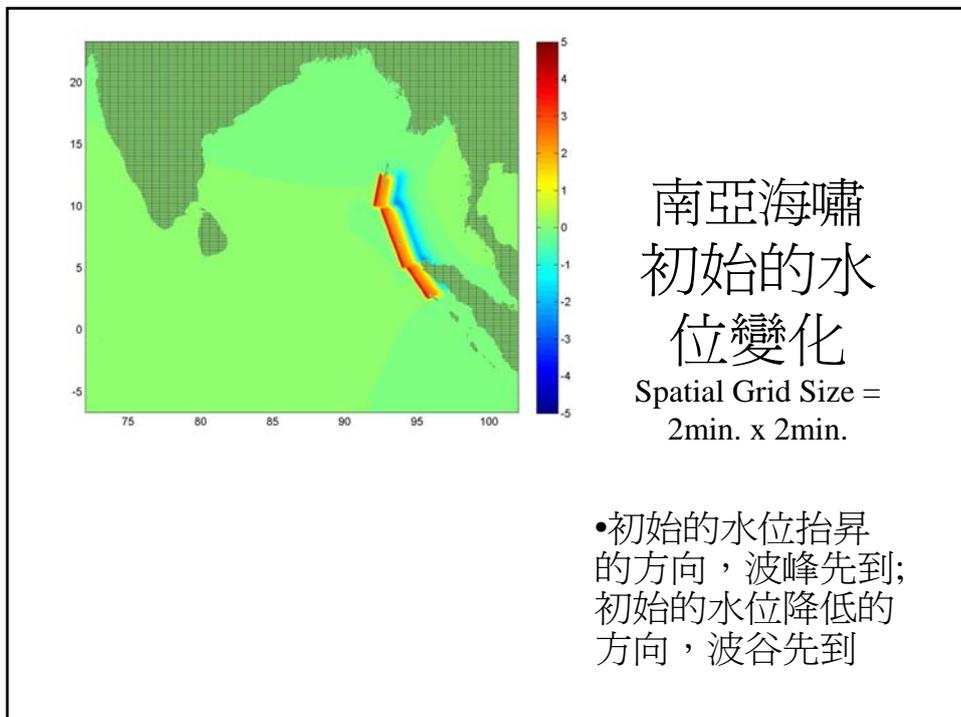
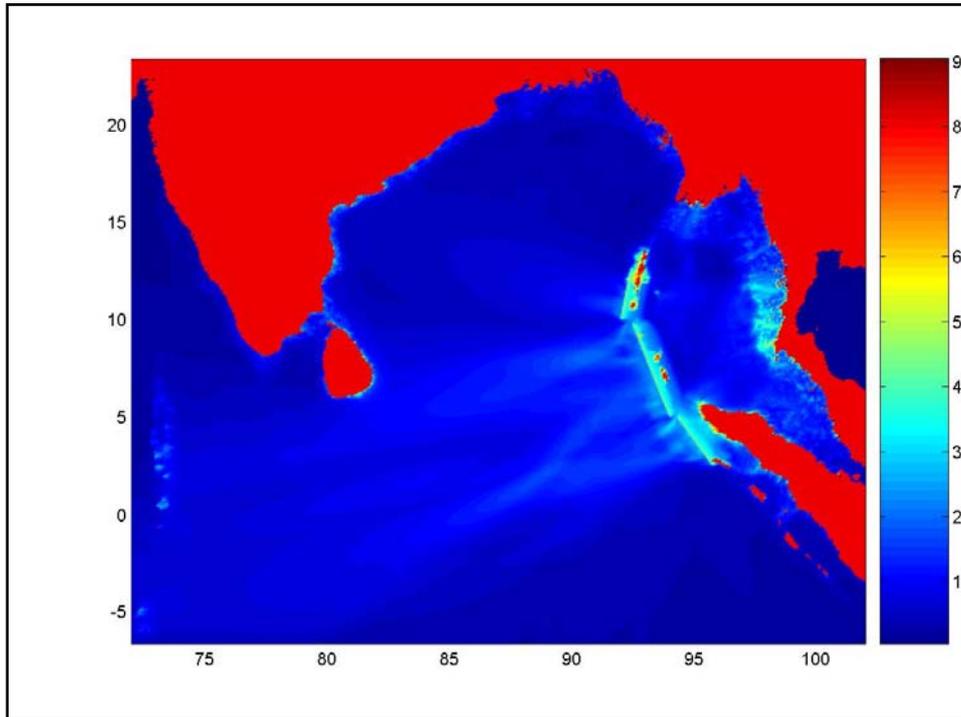
模擬實際發生過的大海嘯 (2)

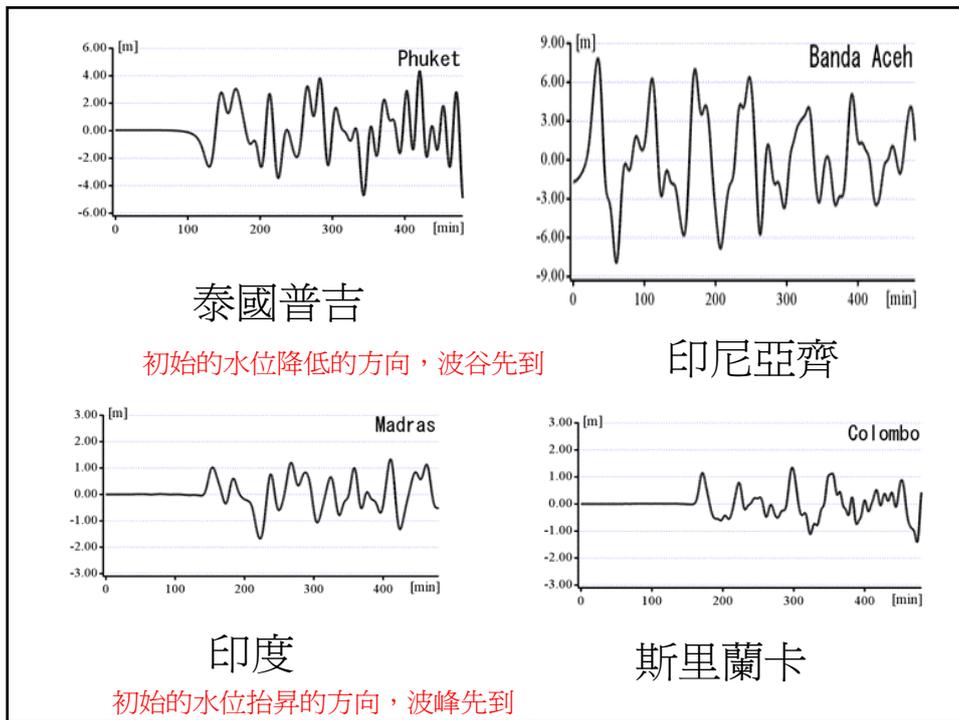
Indian Ocean Tsunami



Indian Ocean Tsunami







邀請日本港灣空港研究所之研究人員進行交流



Institute of Physical Oceanography
 (IPO-NYU)

National Sun Yat-Sen University
 Republic of China

專題演講
 國立中山大學
 海洋物理研究所

演講者：Dr. Takashi Tomita (高田孝史博士)
 Tsunami Research Director
 Port and Airport Research Institute, Japan

演講題目：Damage caused by 2004 Indian Ocean Tsunami

時間：95年7月4日(二) AM 10:00~12:00
 地點：海科院會議室(海A2016室)

※※※ 歡迎踴躍參加 ※※※