

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

微溶性氣體通過海面流體動力機制的研究(三) A Study on the Transfer Process of Slightly Soluble Gases Across the Ocean Surface (3)

計畫類別： 個別型計畫 ∧整合型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2611 - M - 009 - 004

執行期間：八十九年八月一日至九十年七月三十一日

計畫主持人：蔡武廷

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

∧赴國外出差或研習心得報告一份

∧赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

∧國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學土木工程學系

中 華 民 國 九 十 年 七 月 三 十 一 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

微溶性氣體通過海面流體動力機制的研究(三)

A Study on the Transfer Process of Slightly Soluble Gases Across the Ocean Surface (3)

計畫編號：NSC 89-2611-M-009-004

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：蔡武廷 國立交通大學土木工程學系

中文摘要

本計畫為探討「影響『微溶性氣體』通過海面傳輸之微尺度紊流場機制」系列研究之第三階段研究，其研究重點為界面更新渦旋與水面特徵結構之關聯性，以及更新渦旋之生成與維持機制之探討。我們更進一步以此更新渦旋結構為基礎，建立流場之平均速度（動量傳輸）、溫度（熱量傳輸）與氣體濃度分佈之參數化模式。此參數化模式與數值計算有極佳之比較結果。

關鍵詞：邊界層紊流場、數值模擬、海洋-大氣氣體交換、更新渦旋

Abstract

This is the third-year project of our proposed research effort to have a better understanding of the hydrodynamic processes governing the transfer of slightly soluble gases across the atmosphere-ocean interfaces. The focus in this stage of study is to identify the correlation between the underlying coherent vortices and the feature of surface streaming as well as the self-sustaining mechanism of these coherent vortices. These coherent vortices serve as the renewal eddies which pump the submerged fluids toward the water surface and bring down the upper fluids, and therefore enhance the scalar exchange between the atmosphere and the water body. The vertical distributions of the computed mean velocity, temperature and dissolved gas concentration compare well with the parameterizations based on surface renewal model.

Keywords: Turbulent boundary layer, Numerical simulation, Air-sea gas exchange, Surface renewal eddies

前言

本計畫為探討「影響『微溶性氣體』通過海面傳輸之微尺度紊流場機制」系列研究之第三階段研究。在87年度的第一階段計畫中，我們發展了受定常風剪力作用所引致之海面下邊界層剪紊流場的直接數值模擬模式，並開始流場數值計算(Tsai, 2001a)。88年度第二階段計畫之重點為邊界層剪紊流場中組織性流場結構的探討(Tsai, 2001b)。以飄浮於水面之質點可視化水面流場發現，水面存在一與風剪力平行之高速條痕結構，飄浮之質點向條痕

聚集而沿著高速條痕運動。另一類之水面結構為隨機出現之區域性低速發散流場，當高速條痕遭遇此低速流場時，沿著高速條痕運動之飄浮質點即分歧為兩支流。依質量守恆之原則，以上兩類水面流場結構之形成必伴隨著水面與水下流場間的流場傳輸與流體交換，此流場過程即相當於一般所稱之「介面更新渦旋」(surface renewal eddy)，且被認為是決定通過水面氣體或熱量傳輸速率之主要機制。此更新渦旋之存在一直是一概念之模式，而仍無實驗或數值計算之驗證。

由第二階段研究成果中有關介面更新渦旋之發現，本年度計畫之研究重點為以上述渦旋結構為基礎，參數化流場之平均速度（動量傳輸）、溫度（熱量傳輸）與氣體濃度分佈。

參數化模式

海面下之平均速度、溫度與氣體濃度分佈，依傳輸機制之不同，自海面下依序為：以分子運動為主要傳輸機制之 laminar sublayer（或稱 viscous、diffusion sublayer）分子運動與紊流混合傳輸同等重要之 logarithmic buffer layer 以及完全以混合為主之 turbulent layer。有關 laminar sublayer 與 logarithmic buffer layer 在海面下之存在，已有現場實測（如 Csanady, 1984）以及實驗水槽（如 Wu, 1975; 1984）之驗證。通過 laminar sublayer 之傳輸速率遠較紊流混合緩慢，故為大氣與海洋間熱量或氣體交換之瓶頸。此傳輸瓶頸可因底下更新渦旋之接近，暫時減小 laminar sublayer 局部之厚度，而瞬間促進傳輸。以此更新模式為基礎 Liu & Businger (1975) 提出 laminar sublayer 之平均速度 \bar{u} 之垂直（ z 方向）分佈應呈指數函數：

$$\frac{u_s - \bar{u}}{u_*} = \zeta_u \left[1 - \exp\left(-\frac{z_+}{\zeta_u}\right) \right]$$

其中 u_s 為表面流速，摩擦速度 $u_* = \sqrt{\tau_0 / \dots}$ ， τ_0 為風剪應力， \dots 為海水密度，無因次座標 $z_+ = \zeta_u z / \epsilon$ ， ϵ 為海水黏滯係數， ζ_u 為代表 sublayer 厚度之參數，其值決定於更新渦旋之生成速率與留滯時間。laminar sublayer 以下 logarithmic buffer layer 之平均流速則如傳統之對數函數分佈：

$$\frac{u_s - \bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\zeta_u} \ln z_+ + a_u$$

式中 $\kappa \cong 0.41$ 為 von Karman 常數, a_u 為象徵海表面粗糙度之參數, 其數值可以近似數值模式結果求得。上述之指數與對數分佈, 在一深度 $z_+ = \kappa z_+$ 需相重疊 (數值與梯度), 因此可得兩求解 κ_u 與 κ_+ 之非線性方程式。平均溫度與氣體濃度亦呈現以上類似之指數與對數函數垂直分佈。

結果與討論

為驗證以上介面更新渦旋傳輸為基礎之參數化模式, 我們將原有之數值模式加上熱量與氣體傳輸之計算。下圖為水深方向之平均流速、溫度與氣體濃度垂直分佈之數值計算與理論模式比較, 其結果顯示兩者間極佳之吻合度。在平均流速之比較, 更新模式之指數函數分佈遠較傳統之線性分佈吻合數值計算結果, 而所求得之 laminar sublayer 厚度參數 κ_u 亦接近 Wu (1984) 於實驗水槽之量測值。

海表面粗糙度之參數 a_u 之計算值 (≈ 1) 遠小於傳統 no-slip 邊界之 5.5, 表示臨近海表面之紊流強度遠大於 no-slip 邊界之流場, 此與 Csanady (1984) 所整理分析之現場實測以及 Wu (1984) 之水槽實驗結果一致。

以上有關數值計算與理論模式以及實驗之比較, 顯示介面更新渦旋之組織性流場確實為主控海 - 氣間傳輸的機制。為能更實際探討海 - 氣間傳輸之參數化模式, 我們將在下一階段的研究中, 開始大氣-海洋耦合紊流場數值模式之發展。

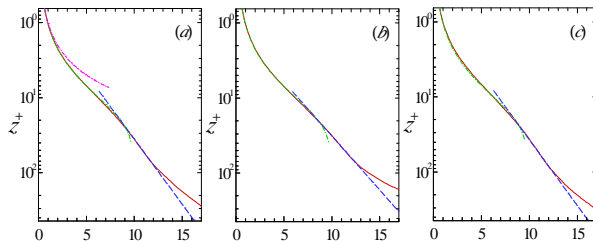


Figure 1. Instantaneous distribution of the surface floating Lagrangian particles at times $t =$ (a) 4.3 and (b) 6 s from the start of the simulation. 128^2 uniformly distributed particles are released at time $t = 3.6$ s.

參考資料

- Csanady, G.T., The free surface turbulent shear layer, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 402-411, 1984.
- Liu, W.T., and J.A. Businger, Temperature profile in the molecular sublayer near the interface of a fluid in turbulent motion, *Geophys. Res. Lett.*, 2, 403-404, 1975.
- Tsai, W.-T., Numerical simulation of hydrodynamic processes beneath a wind-driven water surface, To appear in AGU Geophysical Monograph: *Gas Transfer at Water Surfaces*, edited by M.A. Donelan, W.M. Drennan, E.S. Saltzman and R. Wanninkhof, 2001a.
- Tsai, W.-T., On the formation of streaks on wind-driven water surfaces, *Geophys. Res. Lett.*, 28,

3959-3962, 2001b.

- Melville, K., R. Shear, and F. Veron, Laboratory measurements of the generation and evolution of Langmuir circulations, *J. Fluid Mech.*, 364, 31-58, 1998.
- Wu, J., Wind-induced drift currents, *J. Fluid Mech.*, 68, 49-70, 1975.
- Wu, J., Viscous sublayer below a wind-distributed water surface, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 138-144, 1984.