

新型海洋紊流剖面儀的測試與評估

葉俊德¹、曾若玄²、邵煥傑³

摘要

海洋中公分級微小尺度的紊流結構之瞭解與測量對於工程應用和海洋混合過程極為重要，隨著科技日新月異的發展與進步，紊流的觀測也漸趨成熟。海水中的擾動程度可以由渦動能消散速率 (ϵ) 以及熱變異消散速率 (χ_t) 的大小來判斷：其值越大，代表海水的動能經由黏滯力轉換為熱的速率越快，也反應出海水擾動越劇烈。

本研究利用兩套紊流觀測儀—Vertical Microstructure Profiler (VMP) 以及自記式紊流模組 (Self-Contained Turbulence Package) 於高雄外海水深約 250 公尺處進行測量實驗，並計算出該測站的 ϵ 剖面分佈進行比較。VMP 測量方法屬於自由落下 (free-fall)，而自記式紊流模組則是掛載在 CTD 採水架上，隨著 CTD 一起下放。兩者皆搭載剪切探針 (shear probe) 和熱敏電阻 (thermistor)。自記式紊流模組的操作簡便，適合例行性的海洋探測；但由於剪切訊號易受到絞車纜線震動的干擾，因此本研究採用溫度訊號來推算 χ_t 。VMP 為商業化的剖流儀，配有專屬的絞機，操作過程也較繁瑣，一般是利用剪切探針直接量測。

資料經過快速傅立葉轉換後可得出能量對頻率分佈，進而對波數積分得到 ϵ 值，其大約落在 4.5×10^{-8} 到 $2.2 \times 10^{-6} \text{W/Kg}$ 間。利用 VMP 測得的 shear 計算出的 ϵ 剖面值，與利用自記式紊流模組測得的 χ_t 計算出的 ϵ 剖面值趨勢相似，峰值所相對應的深度也相同，惟絕對值有些許差異。結果證明 VMP 以及自記式紊流模組皆能良好的反應出海水的擾動情況，也代表海水中微小的溫度變動以及剪切變化有著密不可分的關係。

一、緒論

海洋中紊流大多是由垂直剪切所引起，在水團藉由紊流的混合過程中，時常伴隨著熱與能量的交互變化，同時也會改變水團的特性。紊流除了增強海水中層化的現象，對於全球溫鹽環流的趨動也扮演其重要的角色。紊流量測也對於海流發電渦輪機的設計、海洋結構物在流場中的受力十分重要。

本次研究使用兩套紊流儀—VMP-250 (圖 1) 以及自記式紊流模組 (micro-Rider) (圖 2)，在同一地點進行紊流擴散測量，兩者解析度均測量到公分級的微結構紊流。

由於紊流結構十分細小，為了保持探測資料的準確性，測量時需特別注意是否受到其他訊號干擾

的影響。Goodman et al. (2006) 提出了濾除儀器下放時震動所造成訊號誤差的方法，通過與儀器下放時三軸加速度的相關性，可有效的修正剪切訊號，提升資料品質。

由於 VMP 等 free-fall 式的紊流儀大幅度的減低了訊號被干擾的機率；其通過雜訊濾波後的資料十分貼近海洋真實狀況，所以在近年來海洋紊流的研究中被科學家廣泛的利用。至於自記式紊流儀使用時需搭載在 CTD 架上，收集到的剪切訊號容易受到絞線震動的影響，即使通過濾除雜訊的步驟後資料品質仍不理想；所以一般都是取熱敏電阻所測量到的溫度資料進行分析。

1. 國立中山大學海洋科學系碩士生

2. 國立中山大學海洋科學系教授

3. 國立中山大學海洋生物科技暨資源學系博士生



圖 1 自記式紊流模組



圖 2 VMP-250

二、紊流量測與估算

2.1 儀器介紹

自記式紊流模組 (micro-Rider) 如 (圖 1) 所示。自記式紊流模組為一高頻的自記式儀器，採樣頻率最大可達 512Hz，最大下放深度為 1000 公尺。使用時需掛載在 CTD 架上，隨著 CTD 一起下放。其配有壓力計、三軸加速度計、剪切探針、溫度探針、導電度探針等。

VMP-250 如 (圖 2) 所示，操作方式為 free-fall 自由落下，使用時須搭配纜繩以及絞車，採集到的數據可同步顯示時電腦螢幕上，採樣頻率最大可達 512Hz，最大下放深度為 1000 公尺。VMP-250 配有

壓力計、三軸加速度計、剪切探針、溫度探針、導電度探針以及葉綠素探針等。

2.2 儀器與分析方法

2.2.1 剪切探針與資料分析

本次實驗使用 VMP 的剪切資料。VMP 所搭載的剪切探針為一外部為橡膠、內接感應原件壓電陶瓷的設計，採樣頻率為 512Hz；當探頭通過海流時，會給與探頭一側向壓力，探頭接收到壓力時則會轉成一電壓值，經過計算後得到流速剪切訊號。剪切訊號經過雜訊濾除後，可由公式 (1) 積分計算出渦動能消散速率。

其中 ε 為渦動能消散速率、 ν 為黏滯係數、 $\psi(k)$ 為頻譜動能密度、 K_{max} 為積分最波數範圍。

$$\varepsilon = 7.5 \nu \left(\frac{du}{dz} \right)^2 = 7.5 \nu \int_0^{K_{max}} \psi(k) dk \quad (1)$$

2.2.2 溫度探針與資料分析

本次實驗使用自記式紊流模組的溫度資料。micro-Rider 所搭載的快速反應溫度探針 FP07-38，探針前端為一微珠型的熱敏電阻，探針本體由不鏽鋼製成，反應時間可達 0.007 sec。由公式 (2) 計算出

溫度變動量消散率。

其中 D 為分子擴散係數、 $\langle \theta_z^2 \rangle$ 為位溫的垂直變化，溫度擴散係數 K_t 可由公式(3) 獲得

$$\chi = 6D \langle \theta_z^2 \rangle = 6D \int_0^\infty \psi_t(k) dk \quad (2)$$

$$K_t = \chi / 2(\partial \theta / \partial z)^2 \quad (3)$$

在計算 χ 值時，必須找出溫度變動的能譜積分範圍的波數最大值 Batchelor wavenumber，又因為 Batchelor wavenumber 必須利用紊流消散率 ε 來計算

$(k_b = (\frac{\varepsilon}{\nu D^2})^{\frac{1}{4}})$ ，因此在這我們假設如果流體充分的混合並處在擾動的狀態下， $K_o = K_t$ ，由上述方法可

推得下列 (4) 式

$$\varepsilon_{\chi} = \frac{N^2 \chi}{2\Gamma(\partial\theta/\partial z)^2} \quad (4)$$

Γ 為混合效率。其中在計算 χ 時， ψ_t 的波數範圍會

坐落在 $K_{min} < K < K_{max}$ ，再利用 Batchelor spectrum 計算出理論值的 K_{max} ，然後利用疊代的方式計算出實測資料的 K_{min} 與 K_{max} ，結果將會與實測值相近 (如圖 3)。

$$\int_{K_{min}}^{K_{max}} [\psi_t(k)]_{obs} dk = \int_{K_{min}}^{K_{max}} [\psi(k)]_{theory} dk \quad (5)$$

$[\psi_t(k)]_{obs}$ 為實際觀測資料、 $[\psi(k)]_{theory}$ 為理論值。

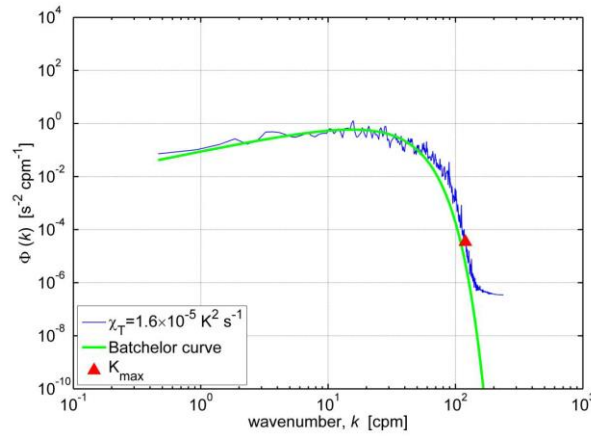


圖 3 溫度變異量頻譜圖(temperature variance spectrum)示意圖，

藍線為溫度梯度頻譜，綠線為 Batchelor 經驗曲線，紅色三角形為積分最大波數

2.2.3 震動訊號

VMP 以及自記式紊流模組皆搭載三軸加速度儀，可記錄儀器下放時的三軸加速度 A_x 、 A_y 、 A_z ，可推算儀器的偏轉角度，如 (圖 4)。再把三軸加速度與剪切訊號利用 Goodman et al. (2006) 的方法濾除儀器下放時震動所造成訊號誤差加以修正。

2.3 現場實測

本研究在 2014 年 2 月 27 日搭乘海研三號，於高屏外海水深 250 公尺處進行實驗。在同一個測站位置分別下放數次 VMP 以及一次搭載自記式紊流模組的 CTD。我們取前兩次 VMP 與自記式紊流模組的數據拿來分析比較。

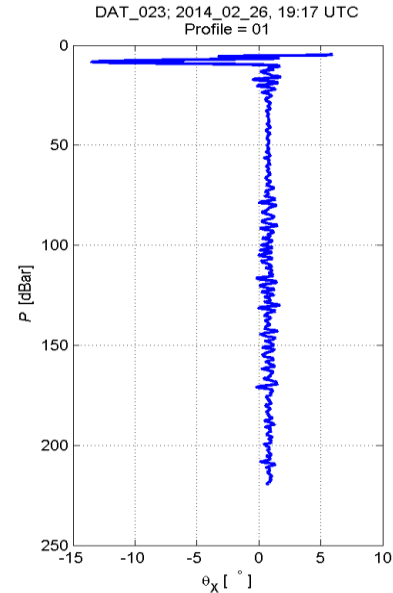


圖 4 VMP 三軸加速度計所記錄之儀器偏轉角度

三、結果與比較

VMP 剪切訊號經由濾除雜訊以及計算過後，可以得到以下兩張流速剪切能譜圖 (Shear spectrum)，圖 5 是第一次 VMP 的資料，圖 6 是第二次 VMP。計算深度從表層 5 公尺到 200 公尺。

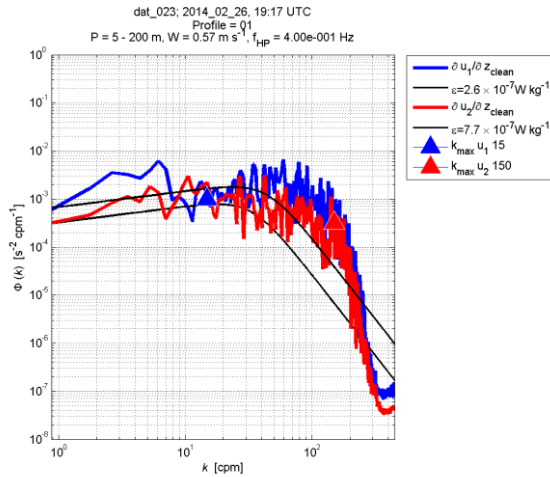


圖 5 第一次 VMP 剪切能譜圖

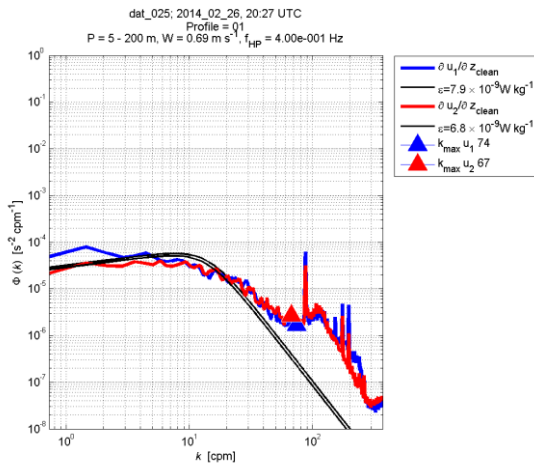


圖 6 第二次 VMP 剪切能譜圖

圖 5 及圖 6 中，黑線為 Nasmyth 經驗曲線、紅線以及藍線為 VMP 兩個剪切探針，經過 Goodman 方法濾除雜訊後之結果，三角形為積分最大波數 (kmax)。經過雜訊濾除後，剪切能譜分布十分貼近 Nasmyth 經驗曲線。

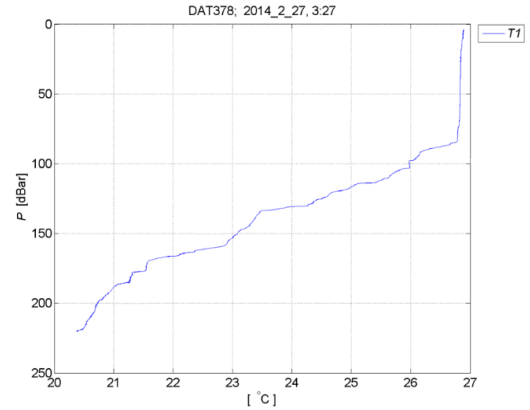


圖 7 自記式紊流模組 FP07 所測量到的溫度剖面，可看出來表面 90 公尺為混合層，底下為斜溫層。

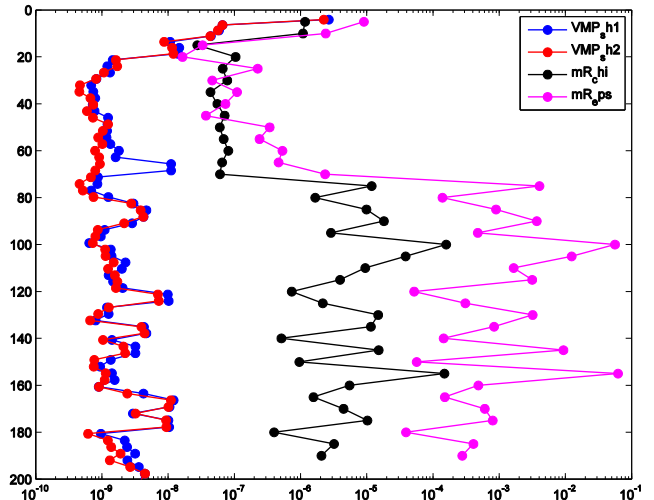


圖 8 第一次 VMP 以及自記式紊流模組消散率比較圖

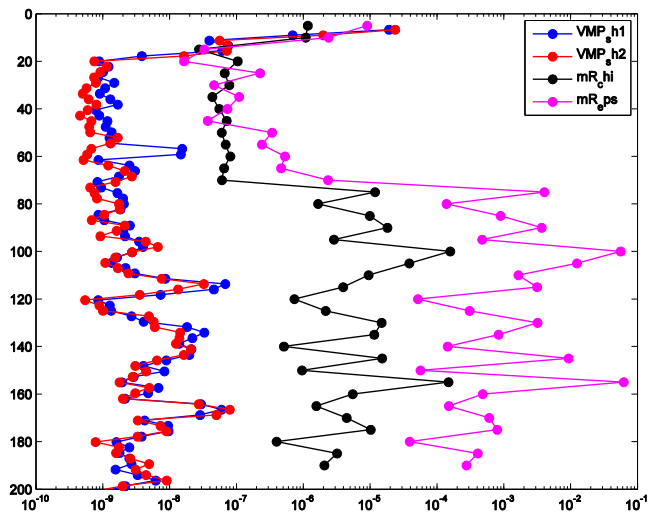


圖 9 第二次 VMP 以及自記式紊流模組消散率比

圖 8 及圖 9 為兩次 VMP 以及自記式紊流模組資料消散率的剖面比較圖。圖中，黑色曲線為自記式紊流模組溫度資料積分計算過後所得到的 χ 、桃紅色為由 χ 再反推回來而得到的 ε_χ 。紅色以及藍色曲線為 VMP 兩個剪切探針所測得的數據積分過後的渦動能消散速率 ε ，可看出兩個探針所測量的結果十分接近。自記式紊流模組所測得溫度資料圖中 χ 與 ε_χ 的剖面深度在計算時做過平均的處理，所以圖上深度要來的比實際深度淺一些。圖中可看的出來雖然深度有一點差異，但 χ 以及 ε_χ 剖面曲線皆與 VMP 所測量的 ε 趨勢相同，峰值出現深度也十分吻合。

以 VMP 的渦動能消散速率剖面來看，表層水 (5~20 公尺) 的 ε 值約為 $10^6 \sim 10^5$ ，因為風所攪動上層水團，使之混合十分均勻，也使此區域紊流消散情況較強。中層水 (30~100 公尺) 離開直接受風應力量影響的區域，此區 ε 值明顯下降，約為 $10^9 \sim 10^8$ ，但此區域仍混合均勻，溫度變動小 (圖 7)。到了較底層 (110~180 公尺) ε 值快速增加 ($10^9 \sim 10^7$)，且隨深度跳動劇烈，推測應是內潮引起的紊流情況 (Lozovsky et al. 2013)。

四、討論

由於 VMP 測量時不易受到外界訊號干擾的特性，其剪切訊號一直以來受研究學者的採信，這次實驗同時施放 VMP 以及自記式紊流模組，目的是希望藉由 VMP 的剪切資料當標準，來與自記式紊流模組所測得的溫度資料經過計算所推得的渦動能消散率比較。分析結果發現兩個儀器雖然資料分析方法不同，但所計算出的消散率剖面結果趨勢一致，惟絕對值有些許差異。日後希望能蒐集到更多資料，再做進一步的討論。

謝誌

本論文為行政院國科會專題研究計畫(編號 NSC101-2611-M-110-006)之研究成果，感謝國科會經費之補助讓本研究得以順利完成，僅致謝忱。

參考文獻

1. 汪建君(2013)“利用 CTD 搭載紊流儀直接觀測海洋紊流混合”，國立中山大學海下海物所碩士論

文。

2. Batchelor, G. (1959). “Small-scale variation of convected quantities like temperature in turbulent fluid,” J. Fluid Mech., 5, 113–133.
3. Goodman, L., Levine, E.R. and Lueck, R.G. (2006). “On measuring the terms of the turbulent kinetic energy budget from an AUV,” J. Atmos. Ocean. Tech., 23, 977–990.3.2.
4. Lozovsky, I., Liu, Z. and Joseph S, H. (2013). “The TKE dissipation rate in the northern South China Sea,” Ocean Dynamics., 63, 1189–1201.
5. Wolk, F., Lueck, R.G. and Laurent, L. St. (2009). “Turbulence measurements from a glider,” Workshop on Physical processes in Natural Waters.