

以濁度計量化立體式九孔養殖池固形物濃度之研究

Study of Using Turbidimeters to Quantify Suspended Solids Concentration in Small Abalone Sulculus diversicolor Multilayer Culture Pond

國立台灣大學生物環境系統工程學系
副教授兼水工試驗所副研究員

侯文祥
Wen-Shang Hou

國立台灣大學生物環境系統工程研究所
碩士

侯棋麟
Chee-Jin How

摘 要

近六年內放養密度增加至 2.6 倍，而換肉效率並未提高的流水式立體式九孔養殖法造成池中殘餌及排泄物累積速度大增，大量換水的養殖法影響沿岸海域生態日趨明顯。本研究以宜蘭縣一流水式養殖池為對象，比較三種光學式濁度計的儀器感應特徵，率定濁度讀值與固形物濃度之關係，並探討氣泡、流速等水管理因子對濁度計測的影響以及對於水中有機與無機固形物種類別與粒徑別之感應特性等，以率定出日後可發展適用於九孔池固形物自動監測系統的濁度與固形物濃度關係式。研究結果顯示，兩種無法發展成自記系統的濁度計中，以濁度計 Model 2100P 對九孔池的有機固形物之感應靈敏度最高，適合作為現場檢測使用；而可自記的濁度計 Model OBS-3 的感應效果佳，率定得適用於九孔池的濁度(FTU, Y)與固形物濃度(mg l^{-1} , X)關係式為線性 $Y=0.5451X+7.462$ ， $R^2=0.997$ 。日後將可製作一控制器，連接濁度感測計、電壓記錄器與水處理設備，成為可自記固形物濃度且即時去除的水處理自動化管理系統，以開發循環水立體式九孔養殖法。

關鍵詞：濁度，固形物濃度，粒度，立體式九孔養殖。

ABSTRACT

As a result of raise of breeding density and the same food conversion rate in small abalone multilayer culture, the accumulation rate of residues and feces increased in recent years. Water samples for laboratory calibration of three optical turbidimeters were collected from a multialyer culture pond in I-Lan. The linearity between turbidity and suspended solids concentration, effects of bubbles and velocity on turbidity, and different

performance in organic or inorganic solid were investigated in order to establish the relationship between turbidity and suspended solids concentration in small abalone culture ponds. The results showed that turbidimeter Model 2100P, which is unable to automatically record data, is the most sensitive to suspended solids in abalone ponds and is suitable for field measurement. Another turbidimeter, Model OBS-3, which is able to be equipped as an automated recorder, has a linear regression relationship between turbidity (FTU, Y) and suspended solids concentration (mg l^{-1} , X) : $Y=0.5451X+7.462$, $R^2=0.997$. For further application to recycled water culture, a combination of controller, turbidimeter, data logger and water treatment device is proposed to supervise suspended solids concentration and provide real time solid removal.

Keywords: Turbidity, Suspended solids concentration, Size distribution, Small abalone multilayer culture.

一、前言

漁業局 (1995) 及漁業署 (2000) 之漁業年報資料顯示, 自 1994 年至 1999 年的九孔年生產面積、產量、產值等五年間的變遷中, 全國總生產面積大致相同, 但年產量卻增加了 1.66 倍, 從每平方公尺 0.85 公斤增加至 2.25 公斤。由於九孔的飼料換肉效率近幾年並無提高, 增加放養密度的集約式養殖方法將使池水中殘留的有機污濁物負荷速度增高。至今國內的九孔養殖用水管理均採用流水式養殖法, 亦即此高負荷物質產物的養殖廢水也同時被快速排放至沿岸海域, 隨時衝擊著沿岸生態環境。侯, 張 (1998) 指出宜蘭縣一個 60 噸水容積的流水式九孔立體養殖池每日換水 23 回, 飼料換肉效率約 28:1, 池中的固形物濃度在清池前約為 100 mg l^{-1} , 而清池後為 50 mg l^{-1} , 一回清池期間約累積一倍量。冬季約 7 天清池一次, 夏季由於溫度高, 有機物分解較快, 約 4~5 天就必須清池。侯, 張 (1998) 也指出流水式養殖法池中固形物的物性特徵為粒徑小於 $100\mu\text{m}$ 以排泄物為主的個數濃度佔 99%, 而大於 $300\sim 600\mu\text{m}$ 以龍鬚菜殘餌為主的體積濃度卻高達 95% 等。流水式九孔養殖池現場均採大量抽取海水供應且迅速排出, 消耗極多的電力, 且水體中殘留飼料及排泄物中營養鹽也未能充分再利用, 不但形成浪費, 甚至因排出廢水而造

成鄰近海域營養鹽之污染現象。陳 (2000) 以循環水式九孔立體養殖法進行小規模試驗, 經歷冬、春、夏初季節共 153 日養殖後收成, 總平均日增重速度約 $37\text{mg}/\text{個}\cdot\text{日}$, 此結果與 Liu 及 Chen (1999) 以密度及深度效應試驗九孔成長影響得到的成長結果 $15\sim 35\text{mg}/\text{個}\cdot\text{日}$ 相近。而存活率約 96% 比目前流水式養殖法約 70% 為高, 且由於夏、秋季節水溫高, 九孔在成長後期的增重速度較快, 存活率也較穩定, 再加上可節省 99% 的用水量及 50% 的用電量且可節省清池的人力, 收集得之有機物質又可以考慮充分再利用, 因此, 可確認如能開發可監控水體環境且即時處理的循環水養殖法, 其整體收益將優於目前的流水式養殖法, 且可減少對海域環境生態的衝擊。

二、文獻探討

陳 (2000) 指出可節省用電用水量的循環水養殖法, 應用於立體式九孔養殖是可行的, 亦是未來可開發的養殖技術, 而能夠即時又快速監測水中固形物濃度變化的自記系統, 將成為循環水養殖必備的固形物自動監測及處理系統中不可缺少的一部分。利用濁度計量化水中固形物濃度的研究在國外已相當普遍, 可是大部份均應用於河川、湖泊及淺海海域, 以養殖池水中固形物的物理及化學性質特徵為對象的研究至今鮮少被探討, 國內對此方面研究亦尚未見。Suk *et al.*

(1998) 指出，應用濁度計以「濁度－固形物濃度」關係式來對水體固形物濃度作長期而連續的監測是可行的，不僅方便、省時又可以即時量測得固形物的濃度變化。

濁度計因使用目的不同可分為沈水式、攜帶式及實驗室用桌上型等幾種不同款式，沈水式可發展成使用於水質的長期監測，攜帶式則因輕便及具有高機動性，方便於野外作即時檢測使用。Suk *et al.* (1998) 利用沈水式濁度計 Model OBS-3 來量測受潮汐影響小河的濁度，得到固形物濃度與濁度間的線性迴歸關係式，斜率為 1.584 (mg l^{-1} per FTU)， R^2 為 0.827。Lewis (1996) 採集集水區中某一河川中的固形物，並將所採集的固形物過篩，分為 0~63 μm 及 63~125 μm 兩不同固形物粒徑區間，然後以濁度計 Model OBS-3 進行濁度與固形物濃度之檢量線率定實驗。結果顯示兩者與濁度都有良好的線性關係， R^2 分別為 0.999 及 0.995。濁度計 OBS 亦被 Downing *et al.* (1981) 用於量測淺海水域環境中的固形物（中位徑為 165 μm ）濃度，針對濃度在 10000 mg l^{-1} 以下者， R^2 為 0.989，而濃度在 1000 mg l^{-1} 以下者， R^2 為 0.915；Sternberg *et al.* (1986) 用於量測海灣底部邊界層水體中的固形物濃度，斜率為 0.159 (mg l^{-1} per mV)， R^2 為 0.945；Lunven 及 Gentien (2000) 用於量測受潮汐影響的河口水域的固形物濃度，斜率為 0.122 (mg l^{-1} per mV)， R^2 為 0.875。Packman *et al.* (2000) 利用攜帶式濁度計 Hach Model 2100P 來量化某都市區溪流內的固形物濃度，得到斜率為 1.32 ($\ln[\text{mg l}^{-1}]$ per $\ln[\text{mV}]$) 的線性關係式， R^2 為 0.96。Muyima 及 Ngcakani (1998) 亦應用此濁度計量測飲用水處理過程中的濁度。Fukamoto *et al.* (1998) 及 Juvonen *et al.* (1999) 於蘋果汁的淨化過程及啤酒的製造過程中，應用桌上型濁度計 Hach Model Ratio/XR 來量測飲料中的濁度。

Thompson (1997) 指出氣泡、泡沫、肥皂液等對光學濁度計都會造成影響，造成高估的濁度值。Clifford *et al.* (1995) 於實驗室中觀察 0.5cm、0.25cm 及 0.1cm 三種不同直徑的氣泡對濁度測值的影響，實驗結果顯示直徑 0.1cm 的氣

泡對濁度測值之影響很小，直徑 0.25cm 的氣泡影響最大。Downing *et al.* (1981) 研究指出氣泡對濁度計 OBS 測值所造成的誤差很小，不會影響其與固形物濃度間的相關性，然而，Greenwood (1990) 卻指出當氣泡的濃度高於所測水樣中的固形物濃度時就會造成相當大的誤差。

在自然環境下，流速多為複雜的亂流，至今尚未見文獻探討流況變化對濁度測值所造成的影響。原因可能是因為在自然環境下有其他的因子會同時影響流速與濁度測值，例如：水位高差、水中固形物濃度等，所以文獻中指出濁度增加時，有時是在流速增加狀況，有時卻是在流速減少時產生（Krause and Ohm, 1984；Sternberg *et al.*, 1988；Suk *et al.*, 1998）。

由於市售濁度計種類不少，本文乃經由上述文獻確認，比較常被使用的三種機型，先探討出具有可能被開發為自動監測功能的儀器類型；再對上述儀器在感應不同顆粒種類與不同顆粒濃度變化的特徵，以及改變計測位置時水中的氣泡、流速變化對量測值的影響作探討。由於市售各廠牌的計測儀器在開發成商品化前，其感應方式、監測角度、顆粒形狀、感應延時、靈敏度與訊號強度及濁度讀值等關係，均已被儀器開發者檢量化，且在儀器內部的晶片設計中予以程式化。因此，不論以不同廠牌濁度計、不論其散射監測角度不同、感應得的訊號強度(mV)可能不同，但經檢量化後的濁度讀值(FTU)均應近似。然而，在使用任一種濁度計時，由於顆粒包括有機、無機種類，對光的吸收反射透過等特徵是否一致；計測時選擇不同計測位置是否會影響讀值等則必須予以確認。因此本研究主要目的是率定出可適用於九孔池固形物特徵之計測器及其「感測器訊號強度(mV)－濁度(FTU)－固形物濃度(mg l^{-1})」關係式，以期日後能與資料記錄器組成可快速自記的監測系統，可由一控制器與水處理設備連結成自動化的管理系統，以應用於長期監測與即時處理。為了明確化感測器的選擇、自記系統的設計、計測點的決定等目的，需探討濁度計對固形物的有機無機種類別、粒徑別等感應特徵以及氣泡、流速等因子對濁度量測的影響。

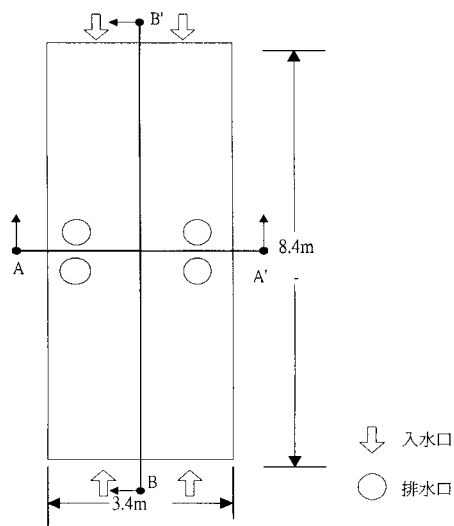


圖 1 九孔養殖池平面圖 (AA'及 BB'斷面示於圖 2)

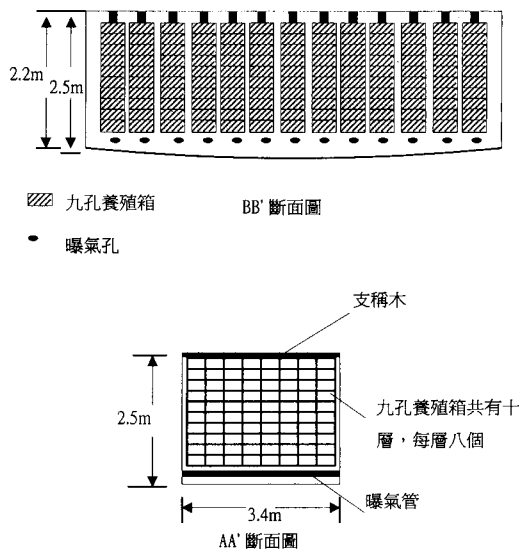


圖 2 九孔養殖池立面配置圖

三、材料與方法

(一) 養殖池選定

以宜蘭縣頭城一水深 2.2~2.5m，池尺寸 8.4 × 3.4m，扣除養殖箱體積後得知池水有效容積 60m³，水面積 27.88m²的鋼筋混凝土構造養殖池為探討對象，如圖 1 及圖 2。池內共 13 組養殖槽，每槽 80 個養殖箱，分為垂直 10 層，每層 8 個，全池中共放置 1040 個養殖箱。池中有 4 個入水口分別自寬向兩側上水面流入，4 個排水口於池中央下方以溢流方式自水面流出。每養殖箱尺寸為 45 × 36cm、高 17cm。每箱內於春季放入 80 個 3~4 個月大的九孔幼苗，經過 7~8 個月的飼養後收成，全池共放養 8.64 萬個九孔，存活率約 80%。在養殖期間每隔約 8~10 日投入箱內預估九孔全體重三倍的龍鬚菜作為餌料。每日更換池水 23 回，池水停留時間約 1 小時。夏季每隔 3~5 日冬季每隔 7 日清洗養殖池，先將池水放乾，再沖洗養殖箱之附著沉積物及池底的堆積物，排出池外，一池清掃時間約需一小時。

(二) 實驗水樣

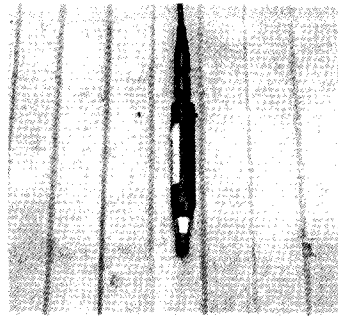
在一個鋼筋混凝土構造的九孔池中，顆粒的增減主要為飼料產生的殘餌、九孔排泄物、流入

水混入的藻體與泥砂等。除泥砂外，前三者均為有機性固型物。由於九孔為濾食性生物，由沿海引入的原水在分流入池內之前已經過沉澱濾砂及大型藻體的淨水設備，因此可以確認九孔池存在的固型物均為有機性。上述內容在文獻侯 (1998) 已有實證。本研究使用的實驗水樣乃包括九孔池有機固形物水樣及高嶺土無機固形物水樣兩種。九孔池水樣採自上述民間立體式九孔養殖池，依現池固形物濃度範圍，於 0 至 250 mg l⁻¹ 間調配出 10 種不同的濃度。無機性高嶺土固形物也調配 10 種濃度來比較探討濁度計對不同化學性質固形物的感應特徵。且分別以粒度分析儀計測其個數濃度及體積濃度分佈狀況，據以得到可描述固形物物理性質特徵的分布最頻徑 (peak size) 及 50% 累積分布中位徑 (median size) 等 (侯, 1997)。

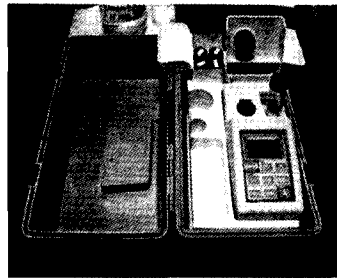
(三) 實驗用濁度計

(1) D & A Instrument Company, Model OBS-3

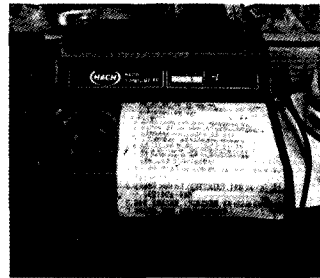
濁度計 Model OBS-3 是 OBS (optical backscatter sensor) 系列的其中一型，如圖 3(A) 所示，屬沈水式儀器，可用於水中濁度自記。以紅外光感測，計測散射光的角度為 140°~165°，



A



B



C

圖 3 實驗用濁度計 Model OBS-3 (A)、Model 2100P (B)及 Model ratio/XR (C)示意圖

所測得之散射光強度依一定比例轉換為電流訊號 (mA)，在輸出端加上電阻 (100Ω)，以電壓訊號 (mV) 輸出。

(2) HACH Instrument Company, Model 2100P

如圖 3(B)所示，屬攜帶式儀器，以可見光感測，無法用於水中濁度自記。當光經過樣本瓶，儀器內的微處理機會計算 90°散射光與透射光的比值，再將比值換算為濁度值 (nephelometric turbidity units, NTU)。

(3) HACH Instrument Company, Model Ratio/XR

如圖 3(C)所示，屬桌上型儀器，以可見光感測，無法用於水中濁度自記。儀器計測 90°散射光、透射光以及散射角小於 90°的散射光強度，並由微處理機計算 90°散射光與其他兩項總和的比值，再將比值換算成濁度值 (NTU)。

(四) 檢量線率定實驗

實驗流程如圖 4 所示，先將不同濃度的九孔池水樣及高嶺土水樣各 10 升，分別依濃度由稀到濃倒入塑膠桶內，啟動桶內的沈水馬達，使桶

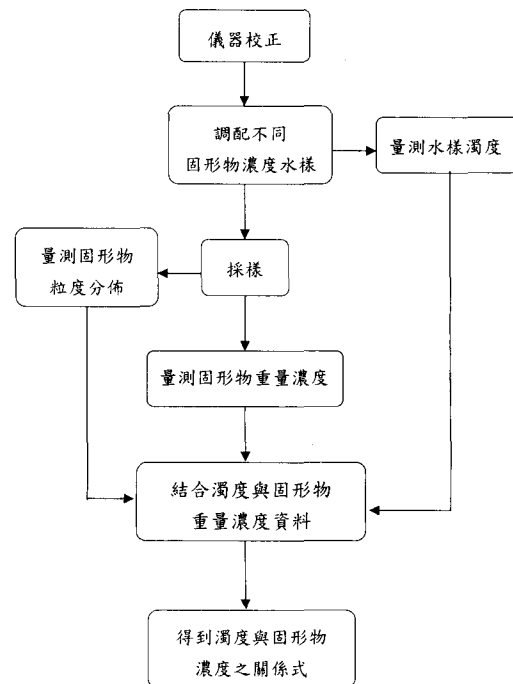


圖 4 檢量線率定實驗流程

內水體流動保持固形物達懸浮均勻分佈狀態，再將可作為自記用的濁度計 Model OBS-3 置於桶內進行量測，並連接資料記錄器 (Campbell Scientific, CR10)，記錄水樣濁度的電壓讀值。採桶內水樣分別裝入濁度計 Model 2100P 及 Model Ratio/XR 的樣品瓶 (sample cell) 內，選擇適當濁度量測範圍，再將樣品瓶置入儀器內進行量測，待讀值穩定後記錄濁度讀值。採桶內水樣 250ml 進行過濾、烘乾、秤重等步驟後求出固形物重量濃度。採桶內水樣，利用光學式 (Mastersizer X Long Bed Laser Safety Labels – CDRH) 及電阻式 (Coulter Counter Multisizer II. Analyser) 粒度分析儀來計測水樣固形物的體積濃度及個數濃度等粒度頻率分佈情形。濁度值重覆量測 10 次、重量濃度值及粒度值則重覆量測 3 次，均取其平均值與標準偏差。

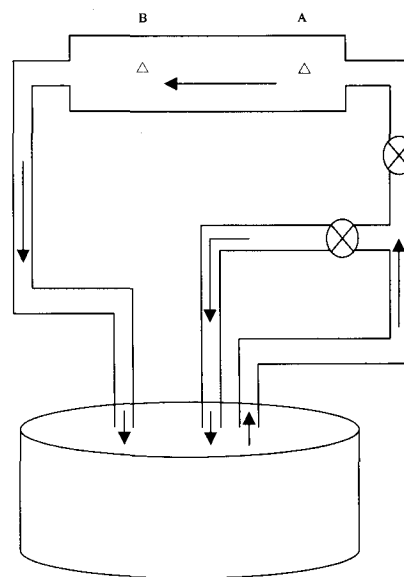
將每一個水樣所得到的實測資料，包括感測計連接微電壓記錄器的訊號強度讀值 (mV) 與濁度計的讀值 (FTU) 及固形物重量濃度值 (mg l^{-1}) 等三者關係，經單位換算整合後可得到各種濁度計測器的 ($\text{FTU} / \text{mg l}^{-1}$) 與 ($\text{mV} / \text{mg l}^{-1}$) 關係。

(五) 氣泡對濁度之影響實驗

將曝氣設備固定於一水箱底部，然後將可作為自記用的濁度計 Model OBS-3 感測頭置於氣泡分散石釋出氣泡處進行量測，再以氣泡出口為中心向外移動，量測氣泡與濁度計間不同距離時，氣泡對濁度測值的影響。

(六) 流速對濁度之影響實驗

如圖 5 所示，系統是由直徑 5cm 和 10cm 的 PVC 管以及一個容積 0.5 噸的水槽組裝而成，水槽內有一沈水馬達與進水管線連接。實驗時將水抽進系統，水由小管 (ψ 5cm) 流進大管 (ψ 10cm)，再由大管經小管流回水槽中，形成一循環系統。當水經由小管進入大管時，因為管徑突擴的關係會產生亂流，參考 Street *et al.* (1996) 得知經由管徑突擴所造成的亂流於距離為小管管徑 50 倍處 (約 2.5m)，亂流的發展才會完成，



- 註：1. A、B 兩點為濁度計位置
 2. A 點位於發展中的亂流區內，
 B 點為發展完成的亂流區內
 3. ⊗：閘門，→：水流動線，△：濁度計測點

圖 5 流速對濁度影響實驗之系統示意圖

為了解不同流況下流速對濁度所造成的影響，所以設計 A 點 (距管徑突擴處 0.5m) 及 B 點 (距管徑突擴處 3m) 為濁度量測點，A 點位於發展中的亂流區內，B 點則位於發展完成的亂流區內。分別改變流速為 0.1 ms^{-1} 、 0.2 ms^{-1} 、 0.3 ms^{-1} 、 0.4 ms^{-1} 及 0.5 ms^{-1} ；水樣中固形物濃度為 0 mg l^{-1} 、 100 mg l^{-1} 及 200 mg l^{-1} ，於不同濃度及流速下進行組合實驗。

四、結果與討論

(一) 九孔池固形物及高嶺土粒徑特徵

從圖 6 及表 1 可知有機九孔池固形物及無機高嶺土之個數濃度及體積濃度分佈情形。九孔池固形物的個數濃度最頻徑及中位徑分別為 $4.9 \mu\text{m}$ 及 $4.2 \mu\text{m}$ ，體積濃度最頻徑及中位徑分別為 $394.7 \mu\text{m}$ 及 $495.5 \mu\text{m}$ ，主要以小粒徑固形物居多，大粒徑固形物的數目雖然少，但在體積濃度方面卻佔了很高的比例。而無機高嶺土水樣固形物幾乎都分佈在 $10 \mu\text{m}$ 以下，且由表 1 可知個數

表 1 九孔池水樣及高嶺土水樣中固形物之物性特徵

固形物種類	個數濃度		體積濃度	
	最頻徑(μm)	中位徑(μm)	最頻徑(μm)	中位徑(μm)
九孔池水樣	4.9 ± 0.3	4.2 ± 0.7	394.7 ± 40.1	495.5 ± 38.7
高嶺土水樣	2.0 ± 0.2	2.8 ± 0.4	4.5 ± 0.5	6.1 ± 0.5

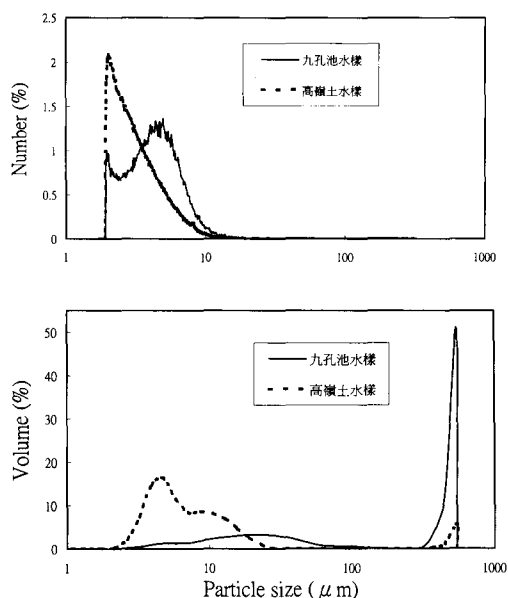


圖 6 九孔池水樣及高嶺土水樣固形物粒徑分佈

濃度與體積濃度之最頻徑及中位徑都很接近，表示高嶺土的粒徑相當近似。以上可知，兩種有機和無機固形物在個數濃度粒度分佈特徵方面極為相似，可作為濁度計感應差異比較用。

(二) 濁度與固形物濃度的關係

濁度與二種不同化性固形物濃度的關係如圖 7 及 8 所示，從圖中可看出在有機的九孔池水樣及無機的高嶺土水樣中，濁度與固形物濃度都有明顯的線性關係， R^2 均在 0.99 以上。雖然三種不同的濁度計對固形物的感應特徵均呈現不同而造成檢量線斜率相異，但是由於其線性相關均良好，全部適合用來計測水中的固形物濃度。

(三) 各濁度計之間的關係特性

三種濁度計由於計測原理不同，因此對固形

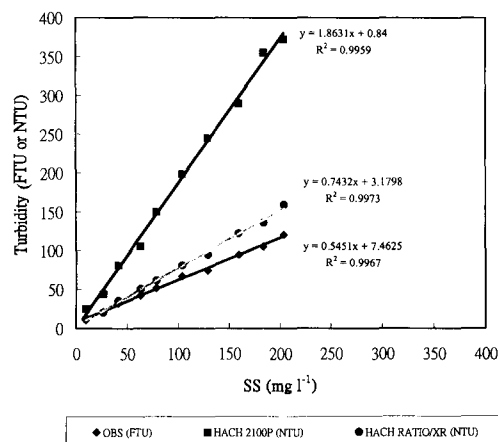


圖 7 三種濁度計對九孔池水樣固形物濃度的相關性

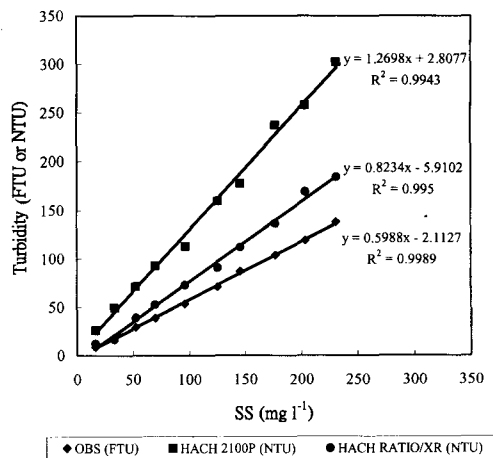


圖 8 三種濁度計對高嶺土水樣固形物濃度的相關性

物濃度所得的檢量線斜率亦相異，從圖 9 中可得知濁度計 Model OBS-3 分別與濁度計 Model 2100P 及濁度計 Model Ratio/XR 在兩種不同固形

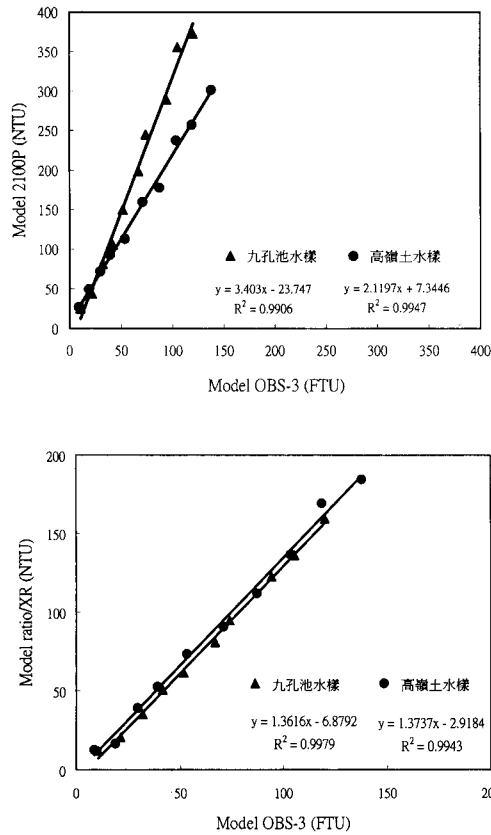


圖 9 三種濁度計對九孔池水樣及高嶺土水樣濁度測值相關性

物化性水樣中濁度量測值的率定關係，均有良好的相關性 ($R^2 > 0.99$)。因此，日後在利用濁度計 Model OBS-3 於九孔池進行濁度自動監測期間，可不定期採取池水，以濁度計 Model 2100P 及濁度計 Model Ratio/XR 量測其濁度值，再由圖 9 中的儀器別關係特性，檢驗得知濁度計 Model OBS-3 所測得之濁度值的正確性。

(四) 不同化性固形物對濁度計之影響

圖 10 是三種濁度計分別使用於計測有機和無機固形物水樣中的濁度感應值之關係圖。由圖中兩條斜線斜率值可知以 Model 2100P 濁度計對有機的九孔池固形物之感應靈敏度比對無機的高嶺土固形物為高，且斜率差將近 50%，顯示此儀器欲利用於顯示特定性質的固形物時，對測值

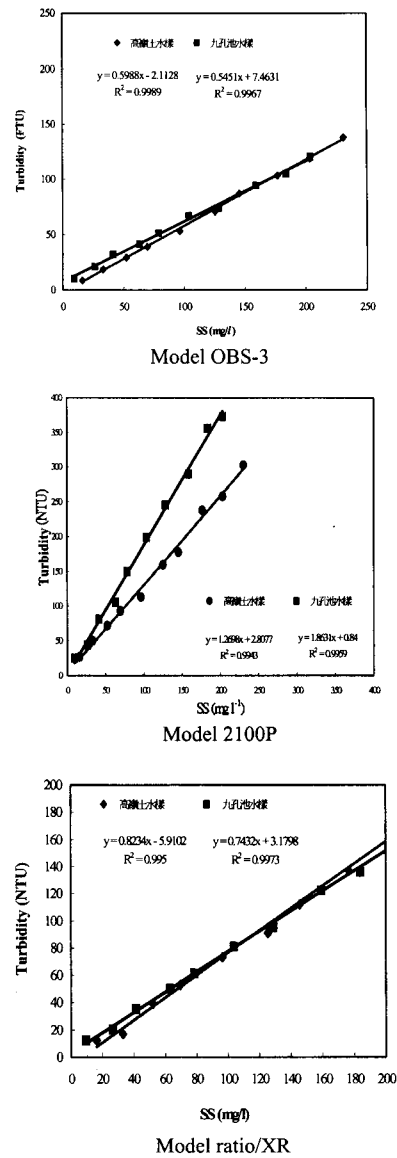


圖 10 各濁度計之測值與不同化性固形物的相關性

需要謹慎判讀。而其他二種濁度計則對有機、無機固形物的感應特徵非常類似，顯示 Model OBS-3 和 Model ratio/XR 兩種儀器的適用性可更廣泛。

(五) 氣泡對濁度之影響

圖 11 為氣泡在不同距離下對濁度計 Model

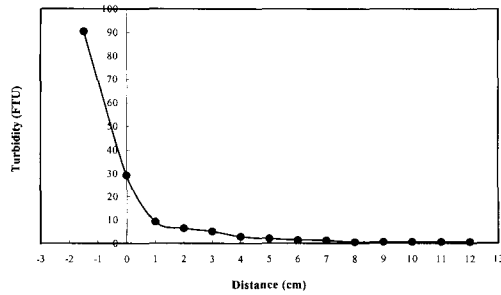


圖 11 濁度計 Model OBS-3 測值與氣泡出口距離的關係圖

OBS-3 測值的關係圖，由於氣泡分散石長度為 3cm，所以圖中橫座標-1.5cm 表示濁度計感測頭剛好就在氣泡分散石中央，而 0cm 則表示感測頭位於氣泡分散石的邊緣。從圖中可知氣泡過於接近會使濁度計 Model OBS-3 的測值產生高估，可是一離開氣泡釋出處，測值就變得穩定許多，距離大於 8cm，測值可趨於穩定。Downing *et al.* (1981) 指出氣泡對濁度計 OBS 測值所造成的誤差很小，影響不大，而本研究結果卻顯示氣泡對濁度量測有一定的影響，於實際應用時應避開。

(六) 流速對濁度之影響

圖 12 為流速對濁度計 Model OBS-3 測值的關係圖。水樣濃度為 0 mg l^{-1} 時，流速改變對濁度計的測值的影響很小。在 100 mg l^{-1} 及 200 mg l^{-1} 的水樣濃度、流速由 0.1 ms^{-1} ~ 0.5 ms^{-1} 的情況下，不論是在發展中的亂流區或是發展完成的亂流區，測值變化的趨勢都相當平緩，其差異在 5~8% 間。在流速不變的情況下，發展中的亂流區及發展完成的亂流區的測值差會隨水樣濃度增加而增大，而且前者的測值較後者小。此顯示濁度計測點的選擇對測值仍有約 5~8% 的影響。

(七) 與前人研究結果比較

表 2 為本研究及文獻中部分學者以濁度計 OBS 來量化不同類別固形物濃度所得到檢量線斜率及相關係數之比較。濁度計 OBS 的 ($\text{FTU} / \text{mg l}^{-1}$) 與 ($\text{mV} / \text{mg l}^{-1}$) 關係為 $1 \text{ FTU} /$

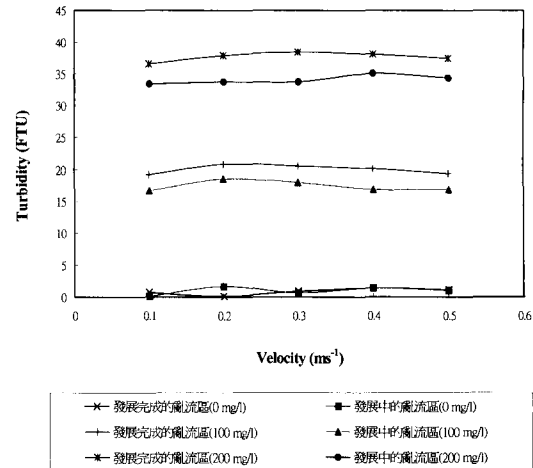


圖 12 流速對濁度計 Model OBS-3 測值的影響

$\text{mg l}^{-1} = 0.6936 \text{ mV} / \text{mg l}^{-1}$ 。由相關係數 R^2 可看出，利用濁度計感測訊號轉換法適合用來量測水中固形物濃度，除了可以即時且連續量測得固形物濃度變化外，還可作為長期監測用途。由表 2 可知本研究所得之檢量線斜率與 Suk *et al.* (1998) 所得的結果相近，而與 Sternberg *et al.* (1986)、Lunven 及 Gentien (2000) 所得結果卻相差甚遠，由於本研究所探討的對象為立體式九孔養殖池內之固形物，多為殘餌及排泄物等有機固形物且以小粒徑居多（侯，1998），而文獻中學者們主要是針對自然水域作探討，固形物包括泥沙無機物、浮游生物、死亡動植物被分解後的碎屑等有機物，且粒徑分佈範圍函蓋甚廣。因此成分相異的固形物組成會對濁度的量測造成影響。綜合以上結果可知欲應用濁度計時，針對不同物理化學性質特徵的固形物，必須要得到適合的「濁度—固形物濃度」檢量線，才能有效應用於固形物濃度的量測工作。

五、結 論

(一) 濁度計 Model OBS-3 針對九孔池的濁度 (FTU) 與固形物濃度 (mg l^{-1}) 的關係式具有明顯的線性關係， R^2 在 0.99 以上，因此適合作為九孔池現場循環水處理系統中自動監測池中固形物濃度的感測器。

表 2 應用濁度計 OBS 量化固形物濃度所得之檢量線資料

固形物來源	斜率	R ²	資料來源
海灣底部邊界層水體	6.289 (mV /mg l ⁻¹)	0.945	Sternberg <i>et al.</i> (1986)
受潮汐影響的小河	0.631 (FTU/ mg l ⁻¹)	0.827	Suk <i>et al.</i> (1998)
感潮河口	8.197 (mV /mg l ⁻¹)	0.875	Lunven & Gentien(2000)
立體式九孔養殖池	0.545 (FTU/ mg l⁻¹)	0.997	本研究所得結果
高嶺土	0.599 (FTU/ mg l⁻¹)	0.999	

註: 1. 九孔池水樣個數濃度: 最頻徑 4.9 μ m, 中位徑 4.2 μ m

高嶺土水樣個數濃度: 最頻徑 2.0 μ m, 中位徑 2.8 μ m

2. 濁度計 OBS 適用: 1 FTU/ mg l⁻¹ = 0.6936 mV /mg l⁻¹ (本研究所得結果)

(二) 率定出適用於九孔池中濁度計 Model OBS-3

的濁度 (FTU, Y) 與固形物濃度(mg l⁻¹, X) 關係式 $Y=0.5451X+7.462$, $R^2=0.997$, 可與資料記錄器組合成固形物濃度自動監測及記錄系統。日後, 在完成製作一控制器, 連接濁度計、資料記錄器與氣泡柱水處理系統, 可使其成為具有自動化管理的系統, 有效保持九孔池中有機固形物濃度的穩定, 以減低九孔單位增重的使用水電量。

(三) 本研究發現, 濁度計對於小粒徑的有機與無機固形物種類別感應特性沒有明顯的差異, 除了濁度計 Model 2100P 於有機的九孔池水樣中反應比無機的高嶺土水樣中靈敏, 其他濁度計於此兩種水樣中的感應特徵都極相近。由於有機與無機物的種類繁多, 後續可用其他種類固形物重覆進行實驗, 以使本研究結果的比較討論更嚴謹。

(四) 氣泡會對濁度計測造成干擾, 使濁度測值出現高估的情形。在使用濁度計 Model OBS-3 量測池水濁度時, 只要離開氣泡 8cm 以上距離, 測值就不會被影響。因此於現場決定濁度計裝設的代表測點時應謹慎, 以使曝氣造成的氣泡影響降至最低。

(五) 本研究發現流速大小會影響濁度計的量測值, 其差異約在 5~8%間。而固形物濃度愈大, 計測點選擇的影響程度愈大。且固形物濃度變化的影響較流速變化影響應更明顯。至於計測點選在發展完成的亂流區與發展中的亂流區, 也會產生約 5~8%測值差異。

參考文獻

1. 台灣省農林廳漁業局 (1995) 中華民國台灣地區漁業年報(八十三年度)。
2. 行政院農業委員會漁業署 (2000) 中華民國台灣地區漁業年報(八十八年度)。
3. 侯文祥, 陳川林 (1996) 海水魚養殖場內污染物的生成負荷考察, 中國水產, 517: 7-26。
4. 侯文祥 (1996) 養鰻池中污濁固型物運動實態解析—I 鰻池固型物分布及其生成通量, 台灣水產學會刊, 23 (3) : 223-244。
5. 侯文祥 (1996) 養鰻池中污濁固型物運動實態解析—II 固型物物性計測法, 台灣水產學會刊, 24 (1) : 33-47。
6. 侯文祥, 張維均, 陳錫金 (1998) 流水式九孔立體養殖池之物質收支特徵, 中國水產, 551: 39-57。
7. 侯文祥 (1998) 流水式九孔立體養殖池之固型物物化性質及去除設計, 中國水產, 552: 17-34。
8. 陳忠平 (2000) 循環水系統應用於九孔立體養殖之養殖成果及顆粒、總氮淨化效率評估。國立台灣大學農業工程研究所碩士論文, 48 頁。
9. 張維均 (1998) 集約立體式九孔養殖池之總氮與固形物收支及物性特徵。國立台灣大學農業工程研究所碩士論文, 76 頁。
10. Clifford, N.J., Richards, K.S., Brown, R.A. and Lane, S.N. (1995) Laboratory and field assessment of an infrared turbidity probe and its

- response to particle size and variation in suspended sediment concentration. *Hydrological Sciences*, Vol.40(6), pp.771-791.
11. Downing, J.P., Sternberg, R.W. and Lister, C.R.B. (1981) New instrumentation for the investigation of sediment suspension processed in the shallow marine environment. In: *Sedimentary dynamics of continental shelves*. C.A. Nittrouer, editor. *Marine Geology*, Vol.42, pp.19-34.
 12. Fukumoto, L.R., Delaquis, P. and Girard, B. (1998) Microfiltration and ultra-filtration ceramic membranes for apple juice clarification. *J.Food Science*, Vol.63(5), pp.845-850.
 13. Greenwood, B., Osborne, P., Bowen, A.J., Hazen, D.G. and Hay, A.E. (1990) C-Coast: the Canadian coastal sediment transport programme. *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, Kingston, pp.319-336.
 14. Juvonen, R., Satokari, R., Mallison, K. and Haikara, A. (1999) Detection of spoilage bacteria in beer by Polymerase Chain Reaction. *J.Am.Soc.Brew.Chem.* Vol.57(3), pp.99-103.
 15. Krause, G. and Ohm, K. (1984) A method to measure suspended load transports in estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.19, pp.611-618.
 16. Lewis, J. (1996) Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resources Research*, Vol.32(7), pp.2299-2310.
 17. Liu, K.M. and Chen, W.K. (1999) Examining the effects of stocking density and depth on growth of intensive cultured abalone (*Haliotis diversicolor supertexta lischke*). *J.Fish. Soc. Taiwan*, Vol.26, pp.23-33.
 18. Lunven, M. and Gentien, P. (2000) Suspended sediments in a macrotidal estuary: comparison and use of different sensors. *Oceanologica Acta*, Vol.23, pp.245-260.
 19. Muyima, N.Y.O. and Ngcakani, F. (1998) Indicator bacteria and regrowth potential of the drinking water in Alice, Eastern Cape. *Water S.A.* Vol.24(1), pp.29-34.
 20. Packman, J.J., Comings, K.J. and Booth, D.B. (2000) Using turbidity to determine total suspended solids in urbanizing streams in the Puget Lowlands. *United State Environmental Protection Agency, Waters and Watersheds Program*, R-82528-01-0.
 21. Sternberg, R.W., Johnson II, R.V., Cacchione, D.A. and Drake, D.E. (1986) An instrument system for monitoring and sampling suspended sediment in the benthic boundary layer. *Marine Geology*, Vol.71, pp.187-199.
 22. Sternberg, R.W., Kranck, K., Cacchione, D.A. and Drake, D.E. (1988) Suspended sediment transport under estuarine tidal channel conditions. *Sedimentary Geology*, Vol.57, pp.257-272.
 18. Street, R.L., Watters, G.Z. and Vennard, J.K. (1996) *Elementary Fluid Mechanics*, 7th edition. John Wiley & Sons, INC. New York. pp.358-361.
 19. Suk, N.S., Guo, Q. and Psuty, N.P. (1998) Feasibility of using a turbidimeter to quantify suspended solids concentration in a tidal saltmarsh creek. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol.46(3), pp.383-391.
 20. Thompson, L. (1997) Turbidity and conductivity sensors in wash process applications. *Sensors*. Vol.14(10), pp.88-90.

收稿日期：民國 91 年 2 月 1 日
 修正日期：民國 91 年 5 月 13 日
 接受日期：民國 91 年 5 月 20 日