

養鰻池中污濁固形物運動實態解析— I · 鰻池固形物分布及生成通量

侯文祥¹

(1995 年 9 月 25 日收件； 1996 年 6 月 7 日接受)

摘 要

由於鰻魚養殖為耗用淡水資源最多的養殖魚種。在考慮養殖用水有效利用及循環水與環境平衡管理目標下，對於水體負荷有極大影響的污濁固形物之運動及生成解析與實態，乃本文探討重點。本研究乃應用物質平衡理論，設計鰻池中流速、底質厚度、懸浮物等物質分布之計測及固形物運動通量計測方法，以解析在給餌前後、日夜間及放養初期末期之間固形物的生成累積、分解、沈降和再懸浮等變動通量；並從飼料換肉率、單位生產用水量等環境管理方法檢討其對養殖水體中固形物的累積。選定鹿港日本鰻及美國鰻養殖等兩池為例，在兩次選別放養期間，經數個月無清池換水。分別包括放養初期、中期和選別前進行三次現場計測。每次依據物質分布計測結果得到等物質分布線圖，選擇近給餌處下游作為池中固形物通量觀測之參考測點，進行連續兩日間固形物堆積、分解、再懸浮及生成等通量計測。結果顯示，兩種池的固形物在給餌後均較給餌前增為 1.5 ~ 2.5 倍。且大多為殘餌及糞。又日本鰻池中固形物的分解速率極小，僅 0.1 ~ 4.5%/ 日，但美國鰻池則相反，大到 17 ~ 30%/ 日。又兩種鰻魚的成長速度與單位生產用水量均相近。本文應用物質運動理論設計的計測法，可瞭解魚池中污濁固形物質的動態，以作為循環水系統設計及管理的參考資料。

關鍵詞：污濁固形物，鰻池，沉澱，分解，再懸浮。

前 言

從每人每年可用降水量來看，台灣僅佔世界平均值的五分之一，況且台灣可成為有用水資源的水量尚不及全年逕流量的四分之一，水資源問題相當急迫。再從過量抽取地下水造成地層下陷的速度來看，在 1991 年一年間，本省最大沉陷量達 37 公分。這些事實使得節約用水、用水

調配及廢水回收再利用等觀念及措施的推動成為近年來全國共同努力的方向。在 83 年 12 月農委會發行台灣第一冊農業政策白皮書中，也清楚的在漁業發展策略內提出配合水土資源之管理建立並推廣循環水養殖設施及管理自動化等內容。

由於日本鰻苗每年捕獲量不穩定並遭受亞洲其他國家養鰻業興起與鰻苗搶購的競爭，導致日本鰻苗成本已達將近總成本

之半(陳、余, 1992)。如此因素, 促使本省最近幾年開始嘗試使用美國鰻及歐洲鰻之養殖。對於不同種類鰻苗, 其養殖方式、環境管理方式、水質特性等各有何異同, 如能有所瞭解, 將能對飼養效率的提高與環境水體的把握更能得心應手。

從環境保護及養殖用水有效利用觀點來看, 造成水體中環境惡化的最主要原因乃由於殘餌、糞等固形物的殘留、分解所致。如能瞭解污濁粒子在未分解前, 在水域中的運動狀態, 將能合理的考量水域中物質的有效處理與利用及適當放養規模等。至今為止, 國內尚無對養殖水域進行不同季節、不同放養階段水體中固形物的生成及運動通量的調查研究。本文乃根據筆者推導的固態物質平衡及運動理論(侯, 1994), 設計一可行的計測實驗方法, 探討日本鰻與美國鰻池給餌前後及日夜間物質的收支、物性變動及一次收穫期間內固形物的生成變動通量實驗, 且探討季節性的差異等。期能得知在兩種鰻魚養殖期間造成水中污染固形物的生成與運動通量實態。

模式理論

一、物質生成通量理論：

在魚池中物質之運動過程, 受曝氣狀態、水收支及流動特性與環境管理狀態等影響, 欲求知其通量(flux), 必先瞭解以上問題。圖一乃為包括魚池進出流水及固形物運動平衡關係圖。可整理出以下兩個平衡關係式：

魚池內懸浮態固形物(ss)的平均變動速度=魚池內ss的【全流入量-全流出量】/池內水容積的時間變動-----(1)

魚池內懸浮態固形物平均變動速度=水體內ss的【生成速度-減少速度】=水體內【流入與殘餌、殘骸、藻體、再懸浮等生成速度】-【流出及分解、沈降等減少速度】-----(2)

在式(1)中表示魚池內外水流出入伴隨固形物變動關係, 而式(2)則表示魚池內部由於給餌及日夜間管理等造成固形物運動與增減之關係。若以差分法數學式表示, 可分別整理如式(3)至式(5)

$$\Delta SS / \Delta t = [-(SS_1 \times e + SS_2 \times a) + SS_4 \times d + SS_3 \times b] /$$

$$[V + (b + d - a - e - c - f) \times \Delta t] \text{ --- (3)}$$

$$\Delta SS / \Delta t = \Delta SS_u / \Delta t - \Delta SS_n / \Delta t = [\Delta R_t + \Delta F_t + \Delta A_t - \Delta DSt] + [\Delta Mt - \Delta St] \times A / V \times 10 \text{ --- (4)}$$

$$\Delta SD / \Delta t = \Delta St - \Delta Mt - \Delta DDt \times A / V \times 10 \text{ --- (5)}$$

$$\text{其中, } \Delta R_t = I_r \times R_t, \Delta F_t = I_f \times F_t, \Delta A_t = I_a \times A_t,$$

$$\Delta Mt = \Delta P_m \times SDt, \Delta St = \Delta Ps \times SSt$$

$$\Delta DSt = (Ds) \times SSt \times 100$$

$$\Delta DDt = (Dd) \times SDt \times 100$$

ΔSt 、 ΔMt ：堆積速度及再懸浮速度 (mg/c m² /hr)

ΔR_t 、 ΔF_t 、 ΔA_t ：池內包括殘餌、糞、藻體增殖等固形物生成速度 (mg/l/hr)

I_r 、 I_f 、 I_a ：池內殘餌生成、魚排糞及藻體增殖等增加速率 (%/hr)

R_t 、 F_t 、 A_t ：t 時間, 池內單位水容積的給餌量、魚飼養量及藻體濃度 (mg/l)

ΔP_m 、 ΔPs ：再懸浮率及沈降堆積速率 (%/hr)

Ds 、 Dd ：懸浮態與沈積態固形物分解速率 (ss.%/hr, sd.%/hr)

ΔDSt 、 ΔDDt ：懸濁態與沈積態固形物分解速度 ($mg/l/hr$ ， $mg/c\ m^2/hr$)

SS_t ：t 時間，懸浮態固形物存在濃度 (mg/l)

SD_t ：t 時間，沉積態固形物存在量 ($mg/c\ m^2$)

V ， A ：池水容積 (m^3) 及水面積 (m^2)

$a \sim f$ ：各流出入口之水流量 (l/hr)

SS_i ：各流出入口水流中固形物含量 (mg/l)， $i=1 \sim n$

對魚池而言，系統間流出入物質變動量等於系統內變動量，即式(1) = 式(2)。如此，不論給餌有無，均可推計各時間的固形物變動速度。當採樣期距短（即 Δt 小，以小時為單位），將能對任意 Δt 時間內沈降、再懸浮、分解和懸浮態物質變動等作計測，以對殘餌、排糞及藻體等增加速度及日夜間變動有所瞭解。尤其在給餌前後和夏季日間固形物變動速度將關係著水環境管理的調節。另外也可對各季節內，每一階段養殖期間中（ Δt 大，以日為單位）全投入餌料量、水產物增重量資料及包括放養初期、中期與選別收穫前三次各二日間作計測。包括底質增厚、流速分布特性、懸浮物濃度分布變動等資料計測。如此，將可研析每一飼養期內所生成固形物的可能殘留量及其與水循環系統內設備操作效率的可能關係。

二、實驗設計法：

(一). 物質分布計測法設計：

如何以少數幾個位置的計測資料來客觀的反應水體環境實態，達節省實驗設備、人力和時間的研究首先需被考慮。本實驗包括從流動狀態、堆積物厚和 ss 濃度等物質分布狀況來決定代表測點，以進行生成通量計測實驗。在物質分布計測設計方面，考慮所要精度，池中依水深及流

動方向等比例分割池水容積，測定每一區塊內流速、堆積物、 ss 濃度等。並使用電腦 surfer 軟體繪製等物質量曲線圖。再配合水車位置與打氣時間，考慮緩流速區和快流速區域，決定出具代表性及後續實驗之測點，提供作為通量測定實驗參考。

(二). 物質通量計測法設計：

在養殖過程中，一回換水期間歷經多個月，儘可能包括換水後初期、中期及收穫選別換水前共三次，每次二日間進行日夜間二重覆的通量實驗。包括水流量、懸浮性固形物濃度、固形物沈降堆積速度、分解速度及堆積物再懸浮速度等計測實驗。

1. 沈降堆積速度實驗法：

由圖一知，固形物分別以懸浮狀態及沈澱狀態存在於養殖池中，而二者又以沈澱作用、再懸浮作用及分解作用彼此交換，固形物通量實驗乃是以設計捕集器 (Trap)，置於養殖池底部，於一定的時間內取出，過濾水樣，乾燥秤重，而得知在此單位時間內，池底單位面積的沈澱物堆積速度。

2. 再懸浮速度實驗法：

懸浮固形物經由沈澱作用變成沈澱物，會由於水車攪水、魚群運動等影響再變成為懸浮固形物，因此須了解已沈澱入捕集器中之固形物有多少比例會再懸浮出來。其原理如圖二所示。

圖二中，有蜂巢結構的捕集器在 N 小時內的再懸浮量 (mg/cm^2) 為 $T_n = a + c - b$ ，有蜂巢結構的捕集器在 N 小時內的減少再懸浮量 (mg/cm^2) 為 $T_n^* = c - d$ ，若以池中每單位面積、每單位時間的懸浮百分比來反應池底的實際情況，可推導出再懸浮速率，如下式：

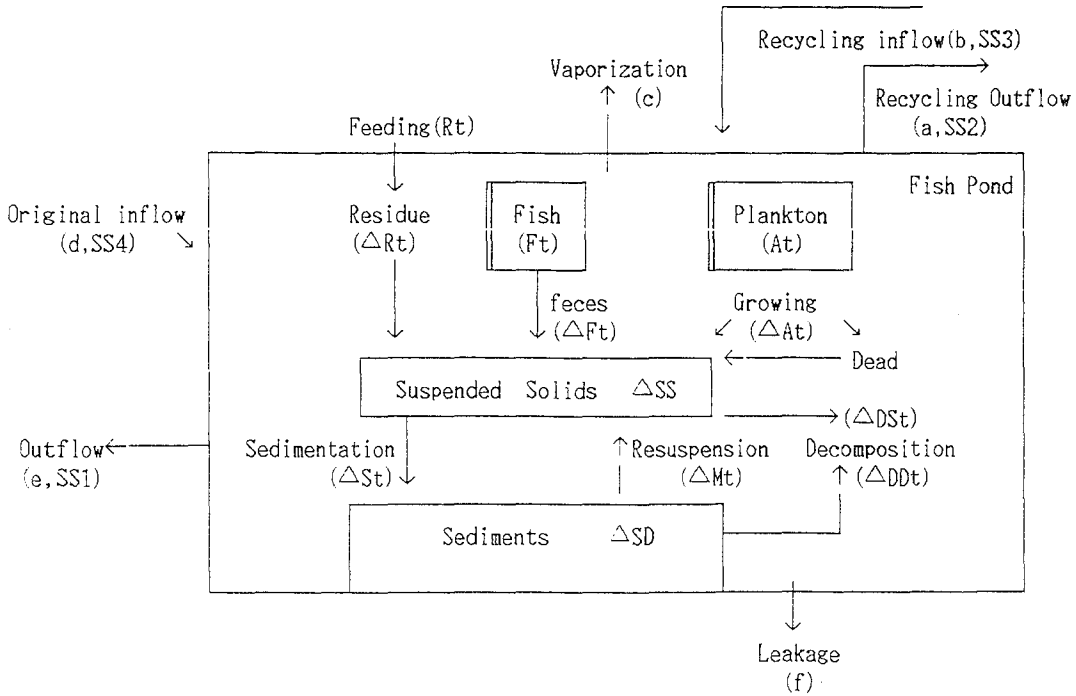


Fig. 1. The relationship of water flow and particle motion fluxes in fish pond.

PS: : fish and plant
 : solid type
 → : motion path
 a~f : flow rate

ss : suspended solid concentration
 (Δ) : with "Δ" mark means solid flux condition
 () : with no "Δ" mark means solid compartment condition



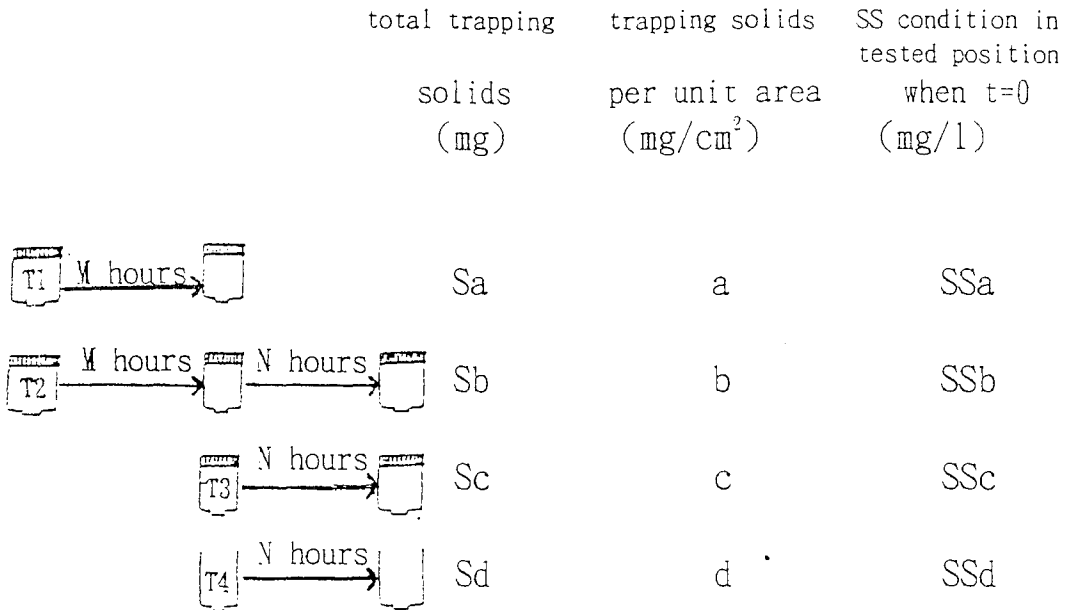


Fig. 2. The flow chart of resuspension rate test

- PS: a: mean trapping solids per unit area after M hours with a beehive type trap
 $(\text{mg}/\text{cm}^2) = (S_a - SS_a \cdot V_1) / A$
- b: mean trapping solids per unit area after M+N hours with a beehive type trap
 $(\text{mg}/\text{cm}^2) = (S_b - SS_b \cdot V_2) / A$
- c: mean trapping solids per unit area after N hours with a beehive type trap (mg/cm^2)
 $= (S_c - SS_c \cdot V_3) / A$
- d: mean trapping solids per unit area after N hours with a no beehive type trap
 $(\text{mg}/\text{cm}^2) = (S_d - SS_d \cdot V_4) / A$
- A: trap mouth area (cm²)
- V_i: trap volume (l)
- S_a~S_d: mean trapping solids with three traps (mg)
- T1~T4: four sets traps, every set used 3 traps on a stand.



$$Rd(\text{Sedi}\%/hr) = T_n / (T_n + c) / N + T_n^* / d /$$

$$N = \frac{C}{N} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{T_n + c} \right] \text{----- (6)}$$

3. 分解速度實驗法：

水體中的污濁固形物會由於水流擾動、微生物存在等現象進行破壞分解作用，此過程會消耗水中的溶氧。因此，有必要設計實驗，將浮游生物的增殖與消滅作用及污濁固形物的分解作用分離，以確實瞭解污濁固形物的分解速率。其步驟如下所述。

(1) 收集池水中含多量固形物的樣本水於水桶中，邊均勻攪拌邊分水於九個 150 ml 透明試瓶中。

(2) 分別記錄每個瓶中實際採取水量。其中三個作為基準資料用，馬上進行過濾。其固形物平均量 (T_b , mg/l) = $\sum (T_i/V_i)/n$ 。

(3) 另外六瓶分別作為明瓶和暗瓶試驗之用。其中三瓶置於透明塑膠袋內，另三瓶則以錫箔紙及黑色塑膠袋兩層包裝後，六瓶同時放入池中。使其經 24 小時分解及增殖作用後，取出馬上進行過濾。由此可知，明瓶的固形物平均量 (T_1 , mg/l) = $T_b(1 + \text{增殖}\% - \text{分解}\%)$ 。暗瓶的固形物平均量 (T_d , mg/l) = $T_b(1 - \text{分解}\%)$ 。

以上， T_i 為每瓶固形物量 (mg/l)， T 為平均量， V_i 為樣本水容積 (l)， n 為樣本數。

經過過濾乾燥秤重之後可各得平均值 T_b , T_1 , T_d 。進而可求得全日平均分解速率 $Dd(ss\%/日)$ 及日間平均增殖速率 $Gd(ss\%/日)$ 。

材料與方法

一、實驗用材料：

(一) 濾紙選定：模擬固形物乾重計秤的操作程序，比較濾紙經兩次乾燥前後重量變化的安定性，並考慮在野外實驗中過濾所費時間的減省，選定 Toyo GS-25 濾紙 ($0.45 \mu m$, $\phi 47 mm$) 作為本研究用材。詳細內容請參考文獻三。

(二) 流速計：東邦電探 CM-25 型及小型電氣式中淺型測器兩種。測定水面下 20 cm 及 70 cm 處流速分布用。計測範圍分別為 $<5 \sim 30 cm/sec$ 及 $22 \sim 154 cm/sec$ 。

(三) 堆積物厚度測定計：自製。製作兩支可相對活動的標尺，外標尺使用透明壓克力細圓柱，內標尺則使用細不銹鋼條。活動式外標尺下端連結一壓克力平板，可輕觸底質上表面。而內標尺則接觸至池底。由內外標尺上刻度差值可測定出各位置的底質堆積物厚度分布。

(四) 採水器：自製 0.5 升、1 升、5 升等三種，可採得任意深度水樣。

(五) 橡皮筏：為保持水體環境原貌且不影響飼養生物生長，在池中任何實驗工作均在橡皮筏上操作。

(六) 沈降物捕集裝置：實驗比較兩種不同形狀的捕集效率，詳細內容參考文獻三。在決定採用如漏斗型之裝置後，依相同外型比例，各製作約 850ml (收集口面積 $52.8cm^2$, 高 21cm) 及 130ml (收集口面積 $20.4cm^2$, 高 10cm) 兩種大小收集器各 60 個，且計量每個的水容積。於開口處裝置蜂巢結構，避免再懸浮現象發生及過大雜質進入。每 3 個固定於一支鐵製平台，收集距池底 10 cm 的沈降物，可得單位時間、單位面積的平均收集速度及偏差值，視為一個位置資料。在三回現場計測中，日本鰻及美

國鰻池第一回因放養初期池水濃度尚清，採用大型收集器，第二及第三回時已因為池中累積固形物多，改為採用小型收集器進行捕集試驗。

(七)過濾用器具：加壓式過濾器 4 組

(Sartorius SM 165)、自行車用打氣筒 2 支。濾紙 600 枚，純水過濾、乾燥 (105 °C，1 小時)、秤重後備用。

(八)其他：無粒子純福馬林液、pvc 樣瓶、水箱、量筒等。

二、實驗方法：

(一)選擇中部鹿港地區民間養鰻場日本鰻池及美國鰻池各一，於 84 年 8 月至 85 年 1 月間，在兩種鰻魚一回放養選別期間，分別進行日本鰻池三次及美國鰻池兩次現場計測工作。

(二)兩種魚池構造、尺寸、材料及管理方法等調查結果，整理於表一及圖四、圖五。

(三)物質分布測定：兩池均依水深方向及流動方向分割池水容積，分別計測日本鰻池 19 ~ 24 個及美國鰻池 10 個位置之流速、ss 濃度及堆積物等資料，並輔以電腦 surfer 程式繪製出等物質濃度線圖，整理於圖六至圖十四及表二。考慮其分布差異程度，再配合水車位置，決定選擇近給餌場下游 1 至 2 公尺處為代表性測點，作為通量測定實驗用。

(四)包括夏、冬季節，在一回換水期間歷經近五個月，包括換水後初期、中期及收穫選別換水前共三次，每次二日間進行日夜間各一重覆的通量實驗。

(五)通量測定實驗：包括水流量、懸浮物濃度、固形物沈降堆積速率、分解速率及堆積物再懸浮速率等實驗。詳細實驗步驟乃依照模式理論 (二) 中所述。在二

日間的實驗中，視每日給餌回數，涵蓋給餌前後變動期約每 4 ~ 5 小時期距採樣一次，共計測 9 ~ 16 回，採得水樣在現場即進行過濾工作。將濾紙攜回學校進行乾燥、秤重工作。工作內容及時間分配設計簡略示於圖三。計測結果經整理於表三至表五。

(六)另外，考慮池中固形物生成累積速度與每日投餌量、放養密度及水管理方式等有直接關係。因此，收集現場養殖記錄，包括計測期間魚增重、飼料日投入量、期間總投入量等，計算其養殖效率，示於表一，以作為檢討之用。

結 果

一、由表一及圖十三、十四知，由於日本鰻池中每 1 HP 水車管理的池水體積達 583m³，較美國鰻池的 341m³/HP 高出很多，使得日本鰻池中除非在四部水車全開狀況才能使池中流速分布大多超過 10 cm/sec。但一日中，將近 14 個小時水車全關或半開狀態使得全池中超過 50% 面積的流速分布小於 5 cm/sec，且中央位置並無大流速。至於 ss 濃度分布的位置別及水平層差異，由表二知，在兩回計測時，水面下 50 cm 的層內差異高達 23 ~ 44%。亦即固形物明顯具有部分集中分布特性，且並無向中央處集中的明顯現象。另從底質分布三回計測結果，標準偏差高達近 50% 以上至 91% 之間，也明顯顯示其堆積分布不均勻事實。至於美國鰻池內固形物的堆積雖也明顯具有這些特徵，但並無日本鰻池現象的明顯。主要

差別應在於該池每單位水體積獲得較大的攪水動力之故。

- 二、由表四及表五知，從日本鰻池及美國鰻池的水車管理方法來看，在上午水車停止運轉期間，並無池水流動造成堆積物再懸浮影響。然而兩池均發現上午的堆積速度較下午或夜間為多的現象。此狀況明顯表示出多出的堆積生成固形物為給餌影響造成魚的攪動底質，甚或乃直接由於殘餌多量生成而增加的因素。此現象應可由堆積物的物性與成分別資料來瞭解。
- 三、由表三知，在日本鰻池，不論白天或夜間，池中 ss 濃度變動除給餌後達 1.1 ~ 2.3 倍增加的變動外，其餘時間並不甚明顯，白天約 ± 10%，夜間僅 ± 8% 間變動，並無明顯因沈澱而減少懸浮量現象。而沈降堆積方面，兩個池子均在給餌期間新生成增加的固形物濃度增至 1.5 ~ 2.5 倍。因此，我們可確定在給餌後，由於殘餌的關係，造成 ss 明顯的提高。
- 四、表四顯示，在日本鰻池，不論夏、冬季節，固形物分解速度都很小，在夜間無浮游生物增殖影響狀況下僅達固形物量的 0.1 ~ 4.5%/ 日。此池中，白天由於浮游生物增殖影響亦僅為 0.5 ~ 2.9%/ 日，亦即固形物成分絕大多數為殘餌及糞等污濁物。此資料可作為固形物的物性研究之參考資料用。而表五則顯示在美國鰻池表現出與日本鰻池很明顯相反的現象，即分解速度很大，達到 17 ~ 30%/ 日，增殖現象也很明顯，達 30 ~ 54%/ 日。
- 五、由表一中，在日本鰻池，從調查期間鰻放養量 862.8 kg 與全增重量

1469.2 kg，全投餌量 3004 kg 等資料，依理論公式 (1) 及 (2) 來估算殘餌及排糞可能量，可知每增重魚體 1 公斤，約產生殘餌 1.045 公斤。而包括排糞、浮游生物等的生成量為每增重 1 公斤約產生 1.222 公斤。且在水車曝氣期間，懸浮固形物與沈澱固形物量之比約 1 : 1.4。表示於表四中。

- 六、同理，在美國鰻池，從表一調查期間放養量 83 kg 與全增重量 93 kg，全投餌量 273.6 kg 等資料估算，每增重魚體 1 公斤，約產生殘餌 1.942 公斤。而殘餌以外固形物部分的生成速度則僅約殘餌量的五分之一。整理於表五中。
- 七、針對日本鰻與美國鰻，雖然計測了各自不同成長階段之成長速度變化，大致可知這兩種有相似的成長速度。且單位增重生產的耗水量也大致相同。

討 論

- 一、從底質分布計測結果，偏差均在 35% 以上，大致可知這些池均有堆積分布多處集中現象，這將增加收集排出處理的困難。因此，流動狀態的設計考慮將是重要的。
- 二、此次調查結果，由 ss 分布及底質分布資料表現出的分布偏差程度值及緩流速區域佔全池面積百分比值等資料顯示，應可作為評估魚池形狀設計及池形長寬適當比值，以及每單位水車馬力適當的供應魚池水面積之相互關係的參考。此乃屬於設施與水體環境間數值化關係考量的一部分，應可繼

續深入探討。本文則提供了對環境實態解析上一個適當的計測設計方法。然而，仍需更多的資料建立才可能進行此工作。

- 三、在一回放養選別期間內，由於每回給餌期間增加的固形物濃度達 1.5 ~ 2.5 倍，使得池中固形物明顯可見生成現象。且造成懸浮性固形物濃度與堆積性固形物量均明顯增加。以日本鰻對象池為例，由於水車台數與池中佈置方式以及每日開關操作管理關係，使得堆積量的增加比例明顯比懸浮量增加比例為多。因此，關於池大小、水車數量及操作管理方式與池中固形物分布、運動方式，甚且造成池中溶氧日變動等之互動關係，將是日後需要探討的一個重點。
- 四、就一個放養週期而言，此次在日本鰻池三回調查結果，放養中期、末期之固形物濃度明顯高於放養初期，達 2 ~ 3 倍左右。在美國鰻池，也明顯發現增加近 1 倍。由此可知，由於殘餌量及魚體的排泄現象，會造成固形物在池中的累積作用。此資料將可作為對循環水系統利用於養殖池時，其管理操作因應方法之參考。
- 五、本研究建立物質運動理論並設計計測方法且經現場操作，證明可客觀的解析一魚池中物理性污濁固形物的生成及運動實態。此成果將可繼續應用於化學性水質的變動探討方面，以完整的把握其間之互動關係。
- 六、在模式理論中筆者提出固形物的各種運動路徑及參數。由於試驗工作涉及時間、人力與經費因素，尚無法廣泛且長期的現場調查，以累積足夠的基本資料來進行各參數值的量化界定工

作。然而，筆者以為，這將是一項值得持續努力的研究。

誌 謝

本研究承行政院國科會 NSC 84-2321-B-002-018 號計畫及大棟工程科技研究發展中心分別補助部分經費，特此致謝。研究期間，得台大農工系王鼎盛教授支持及學生陳全政、陳威光、李端、李仲昀、林崇賢、毛樂民等在現場協助調查，謹表謝意。最後，對多位審查者之寶貴意見及指正，亦表示由衷之謝忱。

參考文獻

- 陳瑤湖、余廷基 (1992). 降低鰻魚生產成本之方法。台灣省水試所鰻魚產銷問題研討會專輯, pp.65-73.
- 侯文祥 (1994). 循環式養鰻系統水環境管理與污濁固形物通量之關係。農工農報, 40(1):55-63.
- 農委會 (1994). 農業政策白皮書, 66 頁。
- Staresinic, N.(1978). Measurement of the vertical flux of particulate organic matter with a free-drifting sediment trap。 *Limnol. Oceanogr*, 23(3):559-563。
- Wilford D. Gardner(1980). Sediment trap dynamics and calibration in a laboratory evaluation。 *J. Marine Res.*, 38(1):17-39.
- 佐野和生 (1958). 養鰻池の生産環境に關する研究。東京大學博士論文, 104 頁。
- 長田芳和 (1970). 湖における沈んだ物量の測定について。陸水學會誌, 21:27-35.
- 植松光夫 (1978). 海水中の懸濁粒量の測定法。北海道大學水產彙報, 29(2):164-172。
- 堆積物研究會 (1978). 內灣沿岸域における沈降・堆積過程。日本水產資源保護協會, 148 頁。
- 門協秀策 (1980). 淺海養殖場における沈降性物質量との關係。鹿兒島大學水產學部記要, 29: 217-224。
- 養鰻研究協議會 (1991). 日本第 21 回養鰻研究協議會要錄:132 頁。

Table 1. Structures and managements of two tested ponds.

Place		Private eel culture in Lu-Kan	
Culture fish		<i>Aguilla japonica</i>	<i>Anguilla rostrata</i>
Fish pond	L * W , m	50.9*45.8	37.3*10.5
	Area , m ²	2332	392
	Depth , m	0.6-1.20	0.6-1.07
	Mean Depth , m	1.0	0.87
Structure and material		Concrete wall and soil base	
Pump		Four paddlewheel (1 HP)	One paddlewheel (1 HP)
Water environmental management		Just put in evaporated water everyday, no cleaning pond within testing period.	
Culture period		<ul style="list-style-type: none"> • 83.8.16 culture meddium size • 84.2.19 get large size • Culture 187 days. 	<ul style="list-style-type: none"> • 83.8.22 culture little size • 83.11.2 size select, change water • culture 72 days
Culture	Pieces tot.weight	<ul style="list-style-type: none"> • 83/8/16 culture 722kg, 18.5~20 pieces per kg. • 83/9/10 culture add 140.8 kg, 12.4~20 piece per kg, about 1806 pieces. • 84/2/19 get 2332kg, 14382 pieces. 	<ul style="list-style-type: none"> • 83/8/23 culture 83kg, about 8547 pieces, 6~7g per piece. • 83/8/26 about 90kg in pond. • 83/10/28 about 168kg in pond. • 83/11/2 get 176kg, about 7942 pieces.
Feeding per day	Time	One time per day	83/8 two times per day 83/10 one time per day
	Foods	About 6% fish weights	
	Type	a r r a n g e	
Tot. feeding foods within a culture		3004kg	273.6kg
Tot. increase weight within a culture		1469.2kg	93kg
Living rate		92.7%	95.5%
Feeding efficiency		2.045	2.874
Culture density		0.37~1.0kg/m ³	0.24~0.52kg/m ³
Growth rate		3.37g/m ² /day	3.30g/m ² /day
Used water per increased weight		6.248m ² /kg	6.162m ³ /kg
Tested period		83/8/26-28 83/10/26-28 84/1/22-24	83/8/26-28 83/10/26-28

Table 2. Distribution of sediments and suspended solids

Pond		<i>Anguilla japonica</i> pond			<i>Anguilla rostrata</i> pond	
Tested time (within one culture)		in the beginning of a culture 83/8/26	in the middle 83/10/26	in the before of size select 84/1/22	in the beginning of a culture 83/8/27	in the before of size select 83/10/26
SS distribution	Range, mg/l	4.0~22.8	68.8~153.6	—	6.4~11.2	14.6~25.2
	Mean, mg/l	12.06	99.87	—	8.00	19.45
	SD, mg/l(%)	5.38 (44)	23.08 (23)	—	1.4 (18)	4.5 (23)
Sediment thick distribution	Range, cm	0~13.0	0~15.0	0~19.5	0~2.0	1.5~3.5
	Mean, cm	5.44	6.65	8.18	1.20	2.25
	SD, cm(%)	3.44 (63)	6.03 (90)	3.93 (48)	0.48 (42)	0.78 (34)
Flow speed distribution	Range, cm/sec.	The lower course near a poddlewheel: <22 the great part: <10				
Tested data no.		23	19	24	10	10

PS: 1. SD: standard diversion.

2. Tested point: ss was tested at 50cm below of the surface, flow velocity was tested at 20cm and 70cm below of the surface.

3. Mean ss and sediment thick distribution were calculated by area division from tested points.

Table 3. Flux of suspended solids

Pond	<i>Anguilla japonica</i> pond						<i>Anguilla rostrata</i> pond			
	In the beginning 83/8/27-28		In the middle 83/10/27-28		In the before of the size select 84/1/23-24		In the beginning 83/8/27-28		In the before of size select 83/10/27-28	
Range, mg/l	16.8~47.8		55.05~106.4		57.2~122.0		5.8~15.6		10.0~25.2	
Mean, mg/l	24.41		80.73		80.36		10.28		18.60	
SD, mg/l(%)	8.31 (34)		14.55 (18)		20.22 (25)		2.6 (24)		3.5 (19)	
(within 2 days) 30 minutes before a feeding ↓ 1 hr after a feeding	(1) 19.4 ↓ 20.4	(2) 20.6 ↓ 47.8	(1) 65.6 ↓ 73.6	(2) 62.6 ↓ 106.4	(1) 58.4 ↓ 122.0	(2) 62.0 ↓ 106.0	(1) 7.4 ↓ 10.7	(2) 10.7 ↓ 14.2	(1) 18.2 ↓ 21.0	(2) 22.4 ↓ 25.2
Data no.	4	4	7	7	7	6	6	6	7	7

PS: 1. The flux test point was choiced to 1m lower of the feeding place.

2. The flux was tested at any two days.

Table 4. The sedimentation flux and creation of solids in *Anguilla japonica* pond.

Within a culture period			Sedimentation rate g/m ² /hr (SD, %)		Resuspension rate sedi%/day (SD, %)	increase (+), decomposition (-) rate SS% day (SD, %)	Solid increases per fish growth weight within a culture kg/kg	Appendix
			1st day	2nd day				
B.C. — 83 / 8 / 26 ↓ 28 —	N.	B.M.	11.38 (17)	16.51 (20)	25.50	+1.26 (6) -1.47 (7)		1. Feeding at AM 8 per day 2. Fish weights in pond: 862.8 kg
		T.	L.M.	8.08 (10)				
	D.	A.M.	12.75 (32)	17.29 (74)				
		T.	P.M.	14.27 (31)				
M.C. — 83 / 10 / 26 ↓ 28 —	N.	B.M.	97.80 (15)	39.71 (9)	11.70 (9)	+2.94 (1) -0.09 (1)	<ul style="list-style-type: none"> • (for residues) 1.045 • (for other particles beside residues) 1.222 • (be calculated) 	1. Feeding at AM 8 per day
		T.	L.M.	45.60 (13)				
	D.	A.M.	48.17 (4)	93.86 (3)				
		T.	P.M.	45.28 (4)				
S.C. — 84 / 1 / 22 ↓ 24 —	N.	B.M.	37.83 (21)	77.07 (8)	6.56 (8)	+0.52 (2) -4.48 (4)		1. Feeding at AM 8 per day 2. Fish weight in pond: 2078 kg
		T.	L.M.	11.41 (68)				
	D.	A.M.	105.0 (25)	121.79 (6)				
		T.	P.M.	36.90 (7)				

PS: 1. Four paddlewheel were managed at a day: 7:30~12:30 all closed, 12:30~17:30 half opened, 17:30~7:30 all opened.

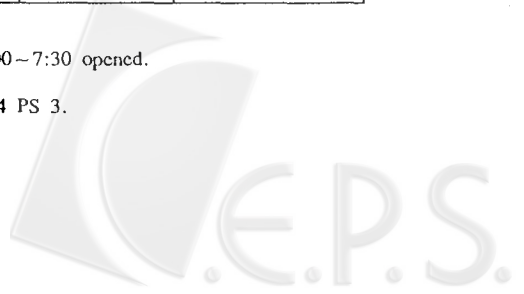
2. Tested point: 1m lower of the feeding position.

3. B.C.: in the beginning of a culture, M.C.: in the middle of a culture, S.C.: in the before of a size select.
N.T.: night time (18:00~7:30), D.T.: day time (7:30~18:00), B.M.: before midnight (18:00~23:00), L.M.: last half midnight (23:00~7:30), A.M.: (7:30~12:30), P.M.: (12:30~18:00)

Table 5. The sedimentation fluxes and creation of solids in *Anguilla rostrata* pond.

Within a culture period			Sedimentation rate g/m ² /hr (SD, %)		Resuspension rate sedi%/day (SD, %)	increase (+), decomposition (-) rate SS% day (SD, %)	Solid increases per fish growth weight within a culture kg/kg	Applendix				
			1st day	2nd day								
B.	N.	B.M.	12.1	14.7	11.1	+29.9 (13)	• (for residues) 1.942	1. Feeding at AM 8 and PM 5 per day 2. Little size eel culture. 3. Fish weights in pond: 90 kg.				
C.			(20)	(30)								
—												
83		T.	L.M.	10.8					9.6			
/			(6)	(1)	14.6	-16.9 (28)	• (for other particles beside residues) 0.375	1. Feeding at AM 8 per day 2. Middle size eel culture. 3. Fish weights in pond: 168 kg.				
/	D.	A.M.	7.2	6.9								
26			(13)	(0)								
↓												
28	T.	P.M.	22.2	—	(11)	-29.9 (4)	• (be calculated)					
—			(8)	—								
S.	N.	B.M.	10.20	14.25					14.6	+54.3 (6)		
C.			(7)	(3)								
—												
83		T.	L.M.	17.22	9.52							
/			(11)	(10)	(11)	-29.9 (4)						
/	D.	A.M.	19.07	28.61								
26			(3)	(5)								
↓												
28	T.	P.M.	7.20	8.08	(11)	-29.9 (4)						
—			(8)	(13)								

PS: 1. One paddlewheel were managed at a day: 7:30~16:00 closed, 16:00~7:30 opened.
 2. Tested point: 2m lower of the feeding position.
 3. B.C., S.C., D.T., N.T., B.M., L.M. means the same with Table 4 PS 3.



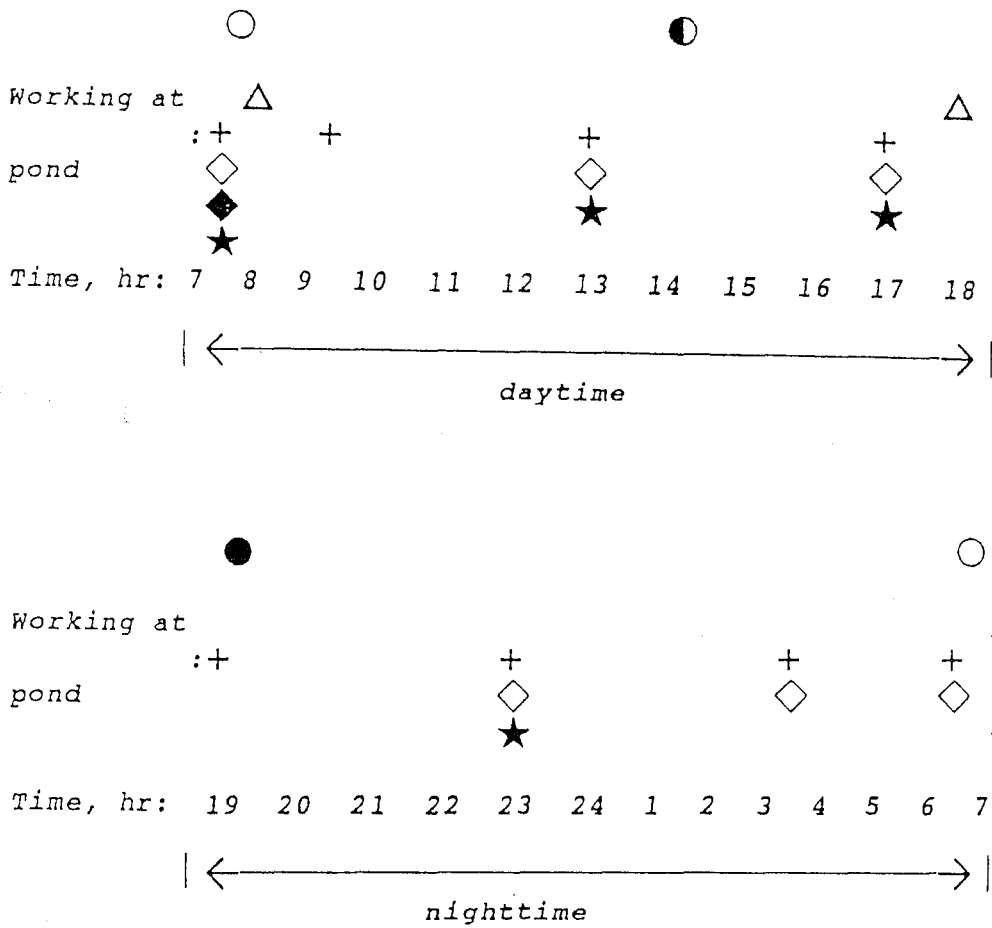
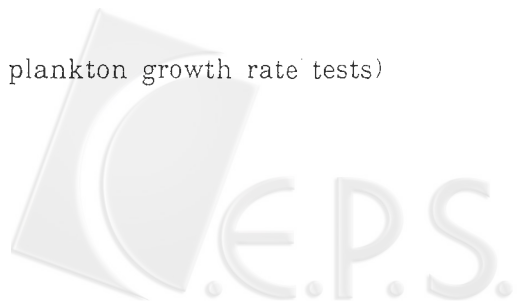


Fig. 3. The flux tests working at one day

- PS: △ : Feeding time
 ● : Pumping time
 (○ : no pumping, ○ : half pumping, ● : all pumping)
 + : Sampling time (for SS concentration variation rate tests)
 ◇ : Trapping time (for sedimentation rate tests)
 ★ : Trapping time (for resuspension rate tests)
 ◆ : Decomposition time
 (for particles decomposition rate and plankton growth rate tests)



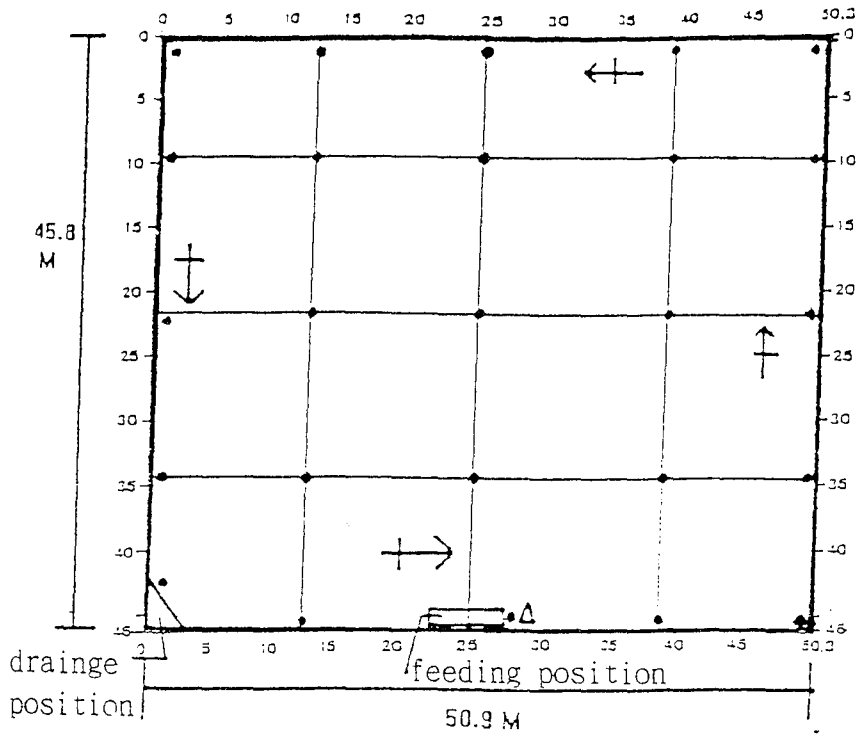


Fig. 4. Schematic presentation of pond structure on the *Anguilla japonica*.
 「•」: distribution test position, 「△」: flux test position,
 「←」: paddlewheel

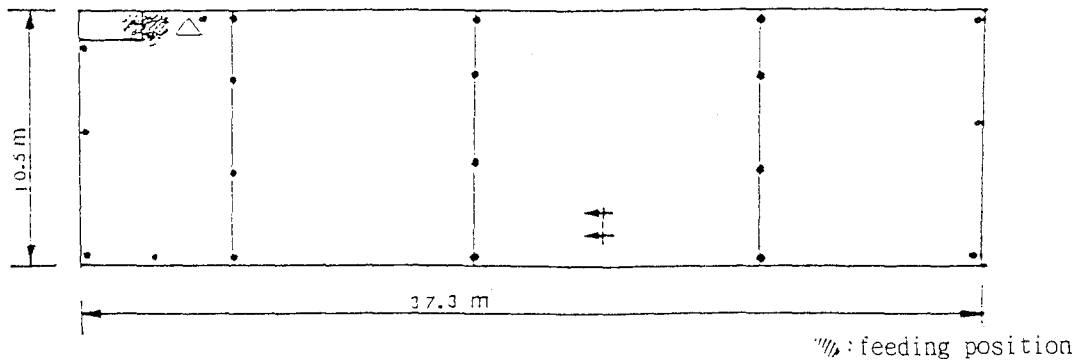


Fig. 5. Schematic presentation of pond structure on the *Anguilla rostrata*.
 「•」: distribution test position, 「△」: flux test position,
 「←」: paddlewheel



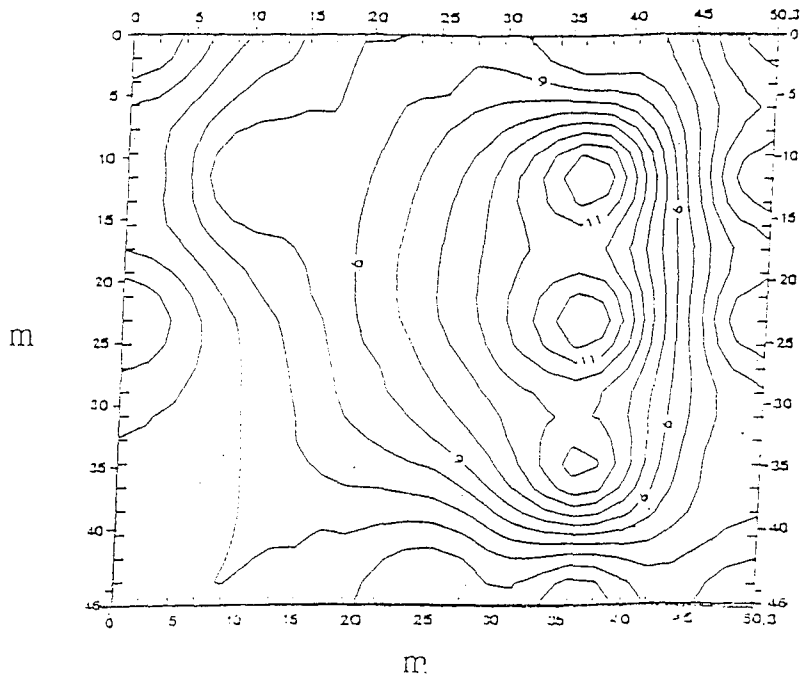


Fig. 6. The equal sediments distribution diagram of the *Anguilla japonica* pond. (1994.8.26.1st tested).
(unit: cm)

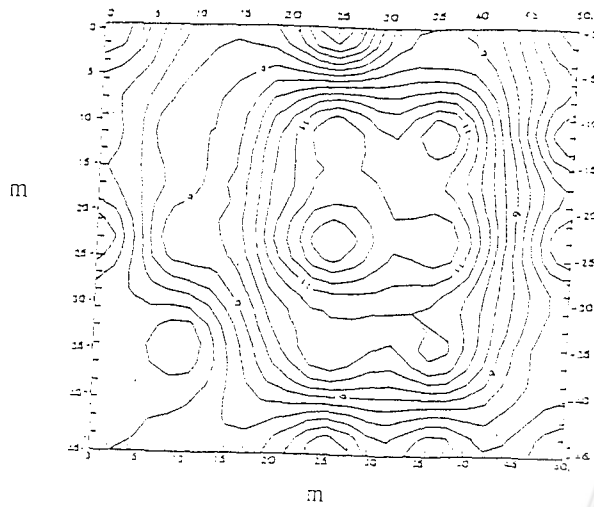


Fig. 7. The equal sediments depth distribution diagram of the *Anguilla japonica* pond. (1994.10.26.2nd tested)
(unit:cm)

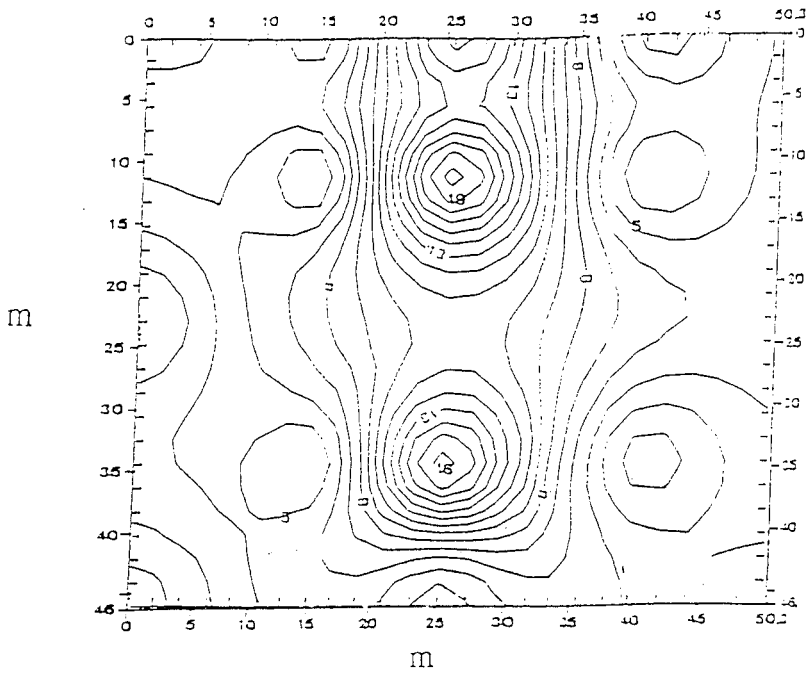


Fig. 8. The equal sediments depth distribution diagram of the *Anguilla japonica* pond. (1995.1.22.3rd tested)
(unit:cm)

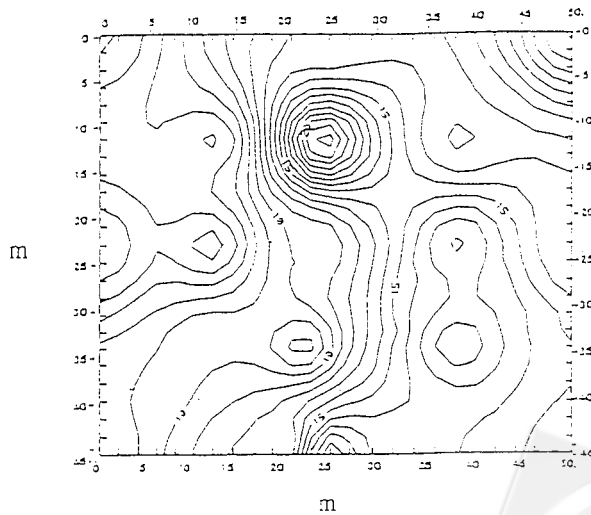


Fig. 9. The equal suspended solids concentration distribution diagram of the *Anguilla japonica* pond. (1994.8.27.1st tested)
(unit:mg/l)

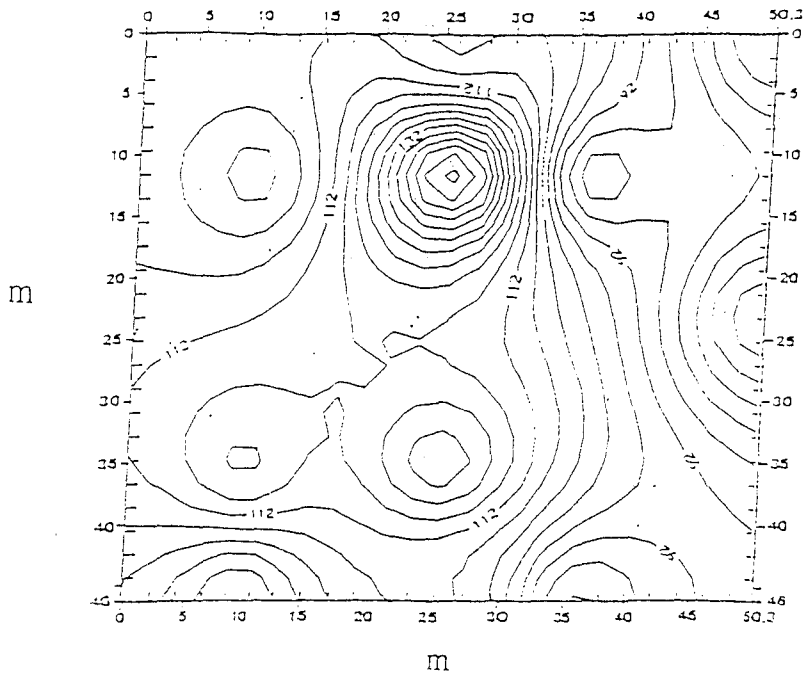


Fig. 10. The equal suspended solids concentration distribution diagram of the *Anguilla japonica* pond. (1994.10.26.2nd tested). (unit:mg/l)

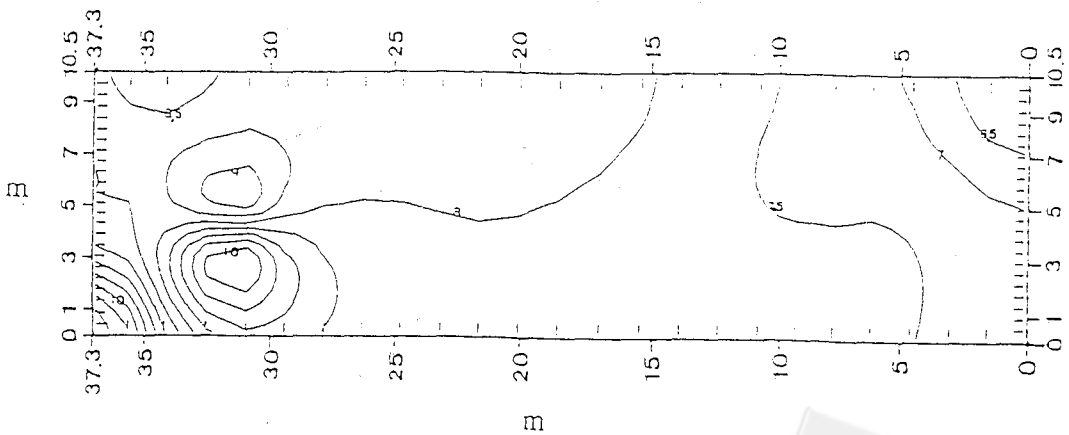


Fig. 11. The equal suspended solids concentration distribution diagram of the *Anguilla japonica* pond. (1994.8.27.1st tested). (unit:mg/l)

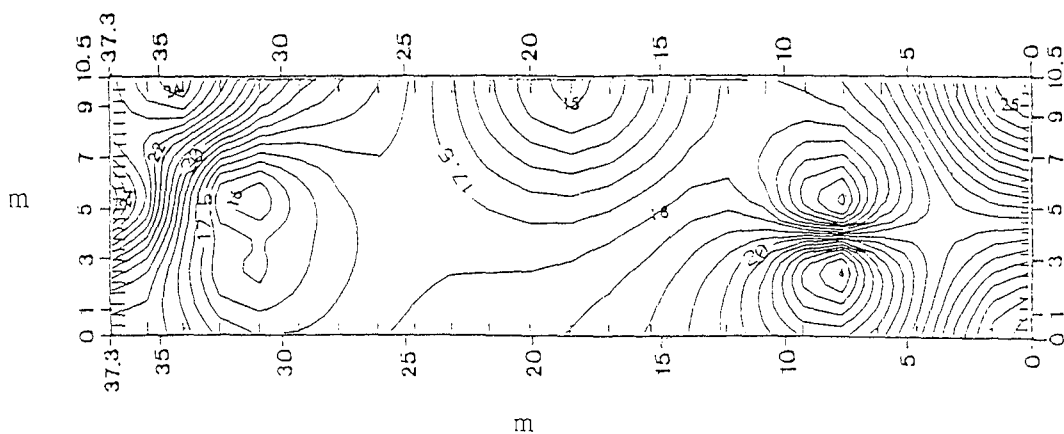


Fig. 12. The equal suspended solids concentration distribution diagram of the *Anguilla rostrata* pond. (1994.10.26.2nd tested).
(unit:mg/l)

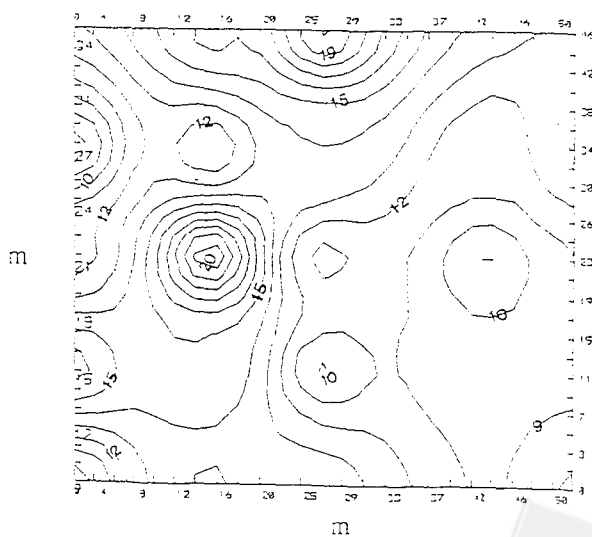
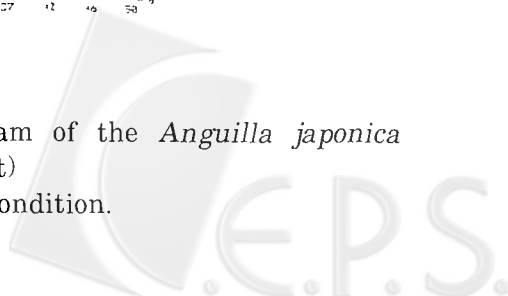


Fig. 13. The flow velocity distribution diagram of the *Anguilla japonica* pond.(1994.8.26.test)
(unit:cm/s), all pumping condition.



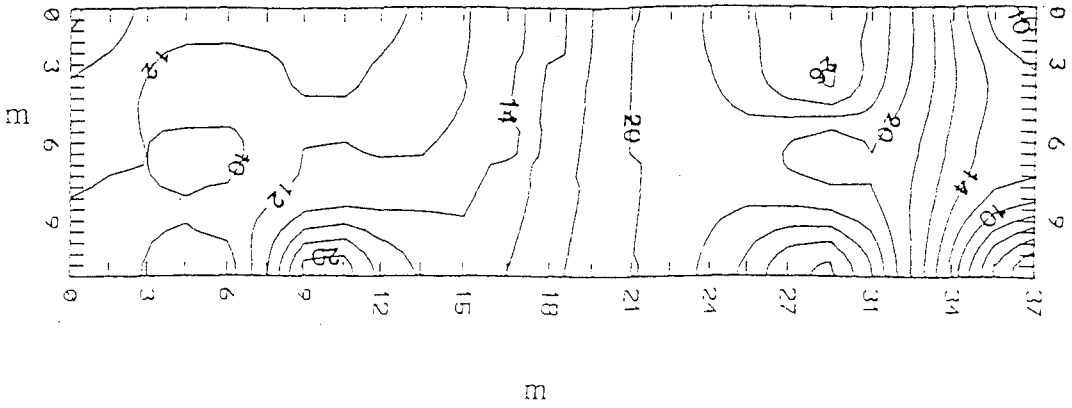


Fig. 14. The flow velocity distribution diagram of the *Anguilla rostrata* pond. (1994.8.26.test)



The Motion and Modeling of Contaminated Solids in Eel Pond — I. Solid Compartments and Creation Fluxes

Wen-Shang Hou

(Received September, 25, 1995; Accepted June 7, 1996)

The purpose of this study was to characterize and modeling the relationship between the water environmental managements and contaminated solid fluxes for an *Anguilla japonica* and an *Anguilla rostrata* culture pond. A measuring technique was also presented to determine the solid fluxes on these two ponds. Experimental designs included mass distribution and flux tests in this study. The mass distribution tests based upon the relations among water mass balance, flow rate, sediments and suspended solid concentrations to locate the reference positions for flux tests. The flux tests investigated the solids change rates and its moving rates of the sedimentation, decomposition and resuspension in day/night and before/after the feeding within two days testing interval, and three repeats on *Anguilla japonica* pond, two repeats on *Anguilla rostrata* pond were tested within the same culture period included summer and winter. The water consumption, weight increased, and feeding rate were also investigated. The results showed that the difference of the particle concentration flux was 1.5 to 2.5 times before and after a feeding on two ponds, so it was clearly found that the particles included suspended solid and sediment increased on these ponds. The particles are mostly residues and feces. The decomposition rate of solids was only 0.1 ~ 4.5% / day on *Anguilla japonica* pond, but it was 17 ~ 30% / day on *Anguilla rostrata* pond. The modeling of materials motion and its measure technique methods could be used to reveal the real state of the contaminated solids flux on any fish pond.

Key words: Contaminated solid, Eel pond, Sedimentation, Decomposition, Resuspension.