

礫石河床泥砂入滲與溶氧傳輸模式 SIDO 在河川生態環境評估之應用

Application of SIDO Model on Evaluation of Eco-Environment in Gravel-Bed Rivers

國立台灣大學農業工程學系副教授

兼水工試驗所副研究員

吳 富 春

Fu-Chun Wu

國立台灣大學農業工程學研究所

碩士生

張 偉 陞

Wei-Sheng Chang

摘 要

礫石河床泥砂入滲與溶氧傳輸模式 SIDO (Sediment Intrusion and Dissolved Oxygen Transport Model) 為美國農業部之自然資源保育局與農業研究所為了評估泥砂沖刷對鮭鱒魚產卵區的衝擊，共同開發之數值模式，可用以預測礫石河床鮭鱒魚類產卵區內之水力特性（如水力傳導係數及孔隙率）地下水流動情形、泥砂濃度分佈、溶氧濃度分佈、及魚卵存活率等。SIDO 模式包含六個子模式：（1）明渠水理、（2）渠道輸砂、（3）孔隙水流、（4）泥砂傳輸、（5）溶氧傳輸、及（6）魚卵存活模式。明渠水理模式利用迴水演算，以計算水深、流速及水力幾何特性；渠道輸砂模式分別計算河床載及懸浮載，前者使用 Einstein-Brown 公式計算，後者則綜合 Alonso 及 Engelund 等學者之理論及實驗數據，推導出公式以估算河床介面之泥砂入滲濃度；孔隙水流模式採用達西公式及有限差分法計算孔隙水流速度及水頭高，並以 Successive Overrelaxation (SOR) 及 Gauss-Seidel 法數值求解；泥砂及溶氧的傳輸模式則使用對流擴散方程式，泥砂方面考慮到孔隙的填充狀態，溶氧方面考慮的則是泥砂及魚卵的耗養量；魚卵存活模式利用河床底質粒徑與魚苗冒出礫石河床的回歸公式計算其成功率。本文將 SIDO 模式實際應用於礫石底床之河川，模擬鮭魚產卵區中的泥砂與溶氧之傳輸及分佈，並推估該產卵區之魚卵存活率，模擬結果經初步驗證，顯示 SIDO 模式可應用於河川之生態環境評估與棲地復育之規劃。

ABSTRACT

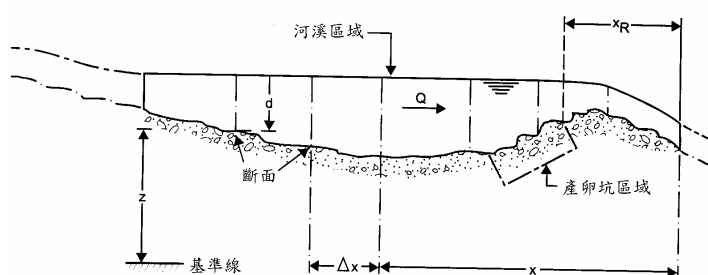
The Sediment Intrusion and Dissolved-Oxygen Transport Model (SIDO) was a numerical model developed by the NRCS and ARS of USDA to evaluate the impacts of sediment erosion and deposition on the salmonid spawning redd. This model can be used to predict the hydraulic properties of spawning redd, intragravel flow, distributions of sediment deposition and dissolved-oxygen (DO), and embryo survival rate. SIDO model includes six sub-models, they are: (1) Open-channel hydraulic model; (2) Sediment transport model; (3) Intragravel flow model; (4) Sediment intrusion model; (5) DO transport model; and (6) Embryo survival model. The hydraulic model uses backwater computation to calculate flow depth and velocity. The sediment model uses Einstein-Brown formula to determine bedload. The near-bed infiltration concentration is estimated by the suspended load formula developed by Alonso and Engelund. The intragravel flow is calculated with Darcy's Law using Successive Overrelaxation (SOR) and Gauss-Seidel method. Sediment intrusion and DO transport are simulated with the advection-diffusion equation. The intrusion of sediment depends on the filling status of the gravel interstices. The biotic and abiotic DO consumptions are both considered in the DO transport model. The embryo survival is evaluated with the substrate size distribution. SIDO model is then applied to the spawning area in the study site to simulate the sediment and DO transport and the resulting embryo survival. The results indicate that SIDO model is applicable to the evaluation of eco-environment and the planning of restoration for gravel-bed rivers.

一、前言

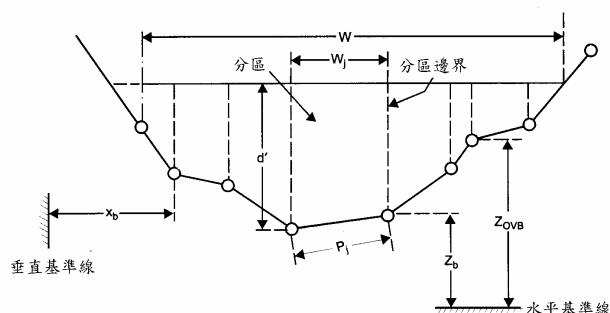
礫石河床泥砂入滲與溶氧傳輸模式 SIDO (Sediment Intrusion and Dissolved Oxygen Transport Model) 為美國農業部(USDA)之自然資源保育局(NRCS)與農業研究所(ARS)為了評估泥砂入滲對鮭鱒魚產卵區的衝擊，所開發之數值模式。泥砂之入滲一方面會堵塞礫石河床之孔隙，降低其孔隙率及滲透性，並使得魚苗不易從孔隙中冒出；另一方面會降低其導水係數 K ，使孔隙水流之流速變慢，影響其溶氧及新陳代謝廢棄物之交換率。本文將 SIDO 模式應用於礫石底床之河川，模擬集水區在施行復育方案前後，鮭魚產卵區中泥砂與溶氧之傳輸及分佈，並評估該產卵區復育前後魚卵存活率之差別。

二、理論

SIDO 模式之計算區域分成兩個部分 (如圖一所示), 即河溪區域 (Stream domain) 與產卵坑區域 (Redd domain), 分別說明如下:

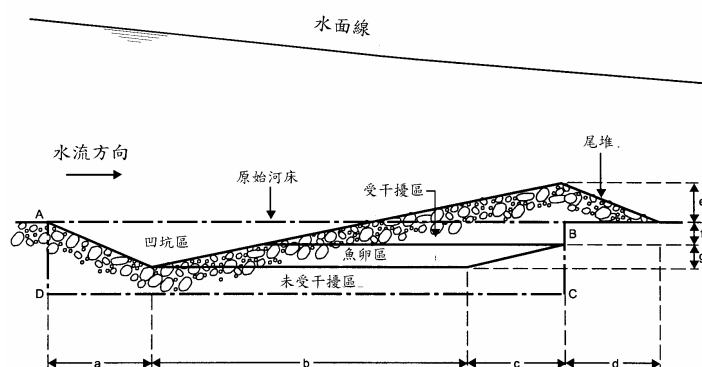


圖一 計算區域軸向剖面圖

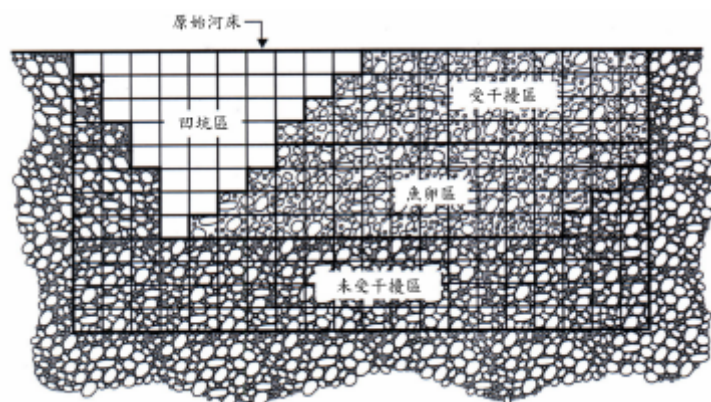


圖二 河溪斷面分區圖

1. 河溪區域：本區域中河道以橫斷面分成若干河段（如圖一所示），而每個斷面又分成數個分區（如圖二所示）。
2. 產卵坑區域：鮭鱒魚的產卵坑可分為四個區域（如圖三所示），分別為：



圖三 產卵坑分區圖



圖四 產卵坑區域格網圖

- (1) 未受干擾區(undisturbed zone)：即鮭鱒魚在挖掘礫石河床製造產卵坑時，未接觸到之區域。
- (2) 受干擾區(disturbed zone)：鮭鱒魚在挖掘礫石河床時，拍打之礫石堆積形成之區域。

(3) 魚卵區(egg zone)：魚卵所在之區域。

(4) 凹坑區(pit zone)：產卵坑的凹陷處。

河溪區域之計算包括明渠水理及渠道輸砂兩部分；而產卵坑區域之計算則包括孔隙水流及泥砂與溶氧之傳輸。其理論基礎分別說明如下：

1. 明渠水理計算

採用明渠水流之迴水演算計算各段面之水深與流速，如下所示：

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_r^2} \quad (1)$$

其中： V =流速， $F_r^2 = V^2 / gy$ ， g =重力加速度， S_f =能量坡降= $\frac{n^2 V^2}{R^{4/3}}$ ， R =水力半徑， n =曼寧摩擦係數，

S_o =渠道坡度， x =軸向距離， y =水流深度。

2. 渠道輸砂計算

渠道輸砂包括河床載(Bedload)及懸浮載(Suspended load)兩部分，計算河床載之輸砂量是為了檢查產卵區是否會因為過大之輸砂量而改變形貌或甚至被破壞；而計算懸浮載之目的在於由近床泥砂濃度推估入滲泥砂濃度，分別說明如下：

(1) 河床載利用 Einstein-Brown(1950)公式計算：

$$q_s = \gamma_w S_g F F_B [g D_{50}^3 (S_g - 1)]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中： $F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g D_{50}^3 (S_g - 1)} \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{36v^2}{g D_{50}^3 (S_g - 1)} \right]$ ， $F_B = 40Y_{50}^3, Y_{50} \geq 0.073648797$ ， $F_B = 1.846 \times 10^{-7} Y_{50}^{8.06}, Y_{50} < 0.073648797$ ， $Y_{50} = D_{50}$ 之

無因次剪應力= $\frac{dS_f}{(S_g - 1)D_{50}}$ ， q_s =單位寬、單位時間之輸砂量(kg/s/m)， γ_w =水之比重量(kg/m³)， v =

水之運動黏滯性(m/s²)， S_g =泥砂之比重 (=2.65)。

(2) 懸浮載之泥砂濃度則是綜合多位學者之理論及實驗數據，包括 Coleman(1970)、Kerssens et al.(1977)、Coleman and Alonso(1983)、Engelund(1974)、Zippe and Graf(1983)、Bayazit(1976)、和 Carling(1984)等，推導出下面的公式：

$$\frac{\bar{C}}{C_a} = \frac{u_*}{V} \left(\frac{\zeta_a}{1 - \zeta_a} \right)^{\beta} F(\zeta_a) \quad (3)$$

其中： $\bar{C}$ =平均泥砂濃度(mg/L)， C_a =近床泥砂濃度(mg/L)， u_* =剪力速度(m/s)， ζ_a =近床之無因

次高度 $\frac{y}{d}$ ，其中 y =距離底床之高度(ft)， d =水流深度(ft)，入滲泥砂濃度 $C_b = f_c C_a$ ，其中 f_c 為一需檢
定之參數。

3. 孔隙水流計算

整個產卵坑區域可劃分成數值計算格網(如圖四所示)，計算每個格網之孔隙率、水力傳導係數、水頭高度及孔隙水流之流速，分別說明如下：

(1) 孔隙率

$$\varepsilon = 1 - \frac{\gamma_t}{\gamma_w S_g} \quad (4)$$

其中： ε =孔隙率， γ_t =泥砂之比重量(lb/ft³)， $\gamma_t = \frac{\gamma_g}{1 - P_f}$ ， γ_g =礫石河床之初始比重量(lb/ft³)，

$P_f = \frac{W_f}{W_t}$ ， W_f =入滲泥砂之總重(lb)= $W_s + W_c$ ， W_s =入滲泥砂之砂(sand)重(lb)， W_c =入滲泥砂之坩土及黏土(silt and clay)重(lb)， W_t =總重(lb)。

(2) 水力傳導係數

由 Chevalier and Carson (1985)的公式：

$$K = af(\varepsilon)d_e^2 \quad (5)$$

其中： K =水力傳導係數(ft/min)， $f(\varepsilon)$ =孔隙率函數= $\frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2}$ ， d_e =有效半徑(mm)， a =待檢定之係數(=0.0105)。

(3) 水頭高度

利用達西公式及質量守恆律可得下式：

$$S_h \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

其中 S_h =儲水係數= $\frac{\partial \theta}{\partial h}$ ， q =含水量，SIDO 模式利用 Successive Overrelaxation (SOR)及 Gauss-Seidel 方法求解上式。

(4) 孔隙水流速度

待解出每個格網之水頭高 h 後，可利用達西定律求各格網之孔隙水流流速。

4. 泥砂及溶氧傳輸計算

使用對流擴散方程式，由於對流項遠大於延散項，故僅保留對流項得到下式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = f \quad (7)$$

其中： C =溶解物之濃度， $u=x$ 方向之孔隙水流流速， $v=y$ 方向之孔隙水流流速， f 表示源或匯。對於不同的溶解物（泥砂或溶氧）， f 有不同的計算：

(1) 泥砂方面，當格網之填充狀態屬於：

- i. 通過：表示此格網可容許細砂自由進出，此時 $f = 0$ 。
- ii. 堵塞：表示此格網已經被細砂填滿了，無法再容納其餘細砂進入，此時 $f = 0$ 。

- iii. 填充：表示此格網正被細砂入滲，若經過計算此格網之細砂，在下一刻會到達的格網是屬於“堵塞”狀態（故無法進入），表示此格網之孔隙正被細砂填滿，則定義此格網為“填充”狀態（即細砂會不斷地累積在此格網，直至“堵塞”狀態），此時 $f = -\Delta C$ 。

(2) 溶氧方面，考慮到非生物及生物兩個層面：

$f = S_{od} - E_{oc}$ ，其中 S_{od} 為泥砂需氧量， E_{oc} 為生物耗氧量。McDonnel 與 Hall(1967)提出泥砂需氧量不只是跟溫度有關，也跟溶氧之濃度有關，故泥砂需氧量為溫度及溶氧的函數；生物耗氧量包括魚卵及魚苗的耗氧，與分子擴散係數、魚卵之雷諾數、質量傳輸係數等物理參數，及格網之平均溶氧濃度、飽和溶氧濃度有關，其中飽和溶氧濃度採用 Chvalier and Murphy(1985)的公式：

$$D_{os} = \exp \left\{ 0.8039 - [1.31403 \ln(T + 45.93)] + \left[5.25 \ln \left(1 - \frac{Z}{44.3} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

其中： D_{os} =飽和溶氧濃度(mg/cc)， T =水溫($^{\circ}\text{C}$)， Z =海平面以上之高度(km)。

5. 魚卵存活計算

利用河床底質粒徑與魚苗冒出礫石河床的回歸公式計算其成功率：

$$(1) \text{ Chinook 鮭魚之魚卵存活率} = 93.4 - 0.171 \times S_{9.5} S_{0.85} + 3.871 \times S_{0.85}$$

$$(2) \text{ Steelhead 鱒魚之魚卵存活率} = 94.7 - 0.116 \times S_{9.5} S_{0.85} + 0.007 \times S_{9.5}^2$$

其中： $S_{9.5}$ =底質粒徑小於 9.5mm 之百分比， $S_{0.85}$ =底質粒徑小於 0.85mm 之百分比。

三、案例研究

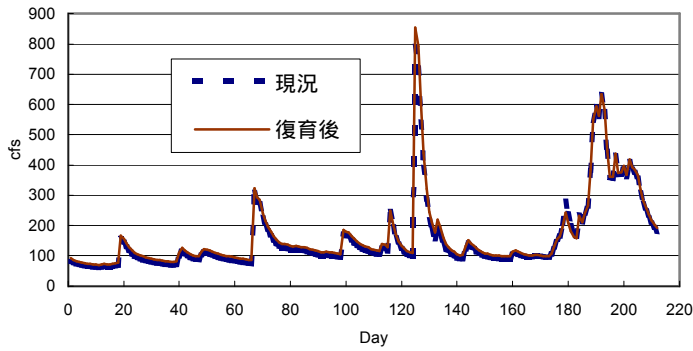
1. 研究區域

模擬的地點是位在美國華盛頓州西南方的 Tucannon River 其中一條河段，名為 Krouse Ranch Site，此河段長約 325 英呎、約 50 英呎寬、高程約 900 英呎，坡度 0.0055。選擇這個地點有三個主要的原因，第一，此處是一個相當不錯的產卵區；第二，此河段之水文及地文條件適合模擬；第三也是最重要的，在此處已有相當充分的資料可以使用。

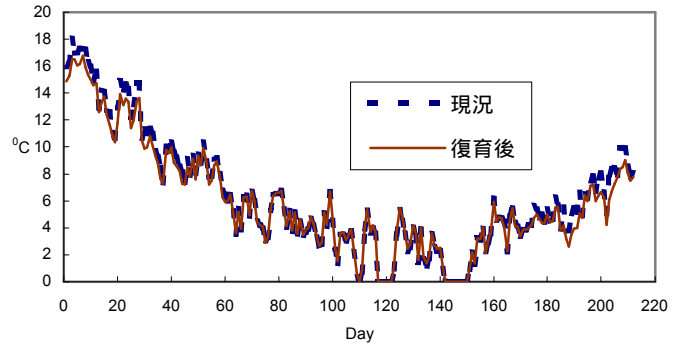
2. 模擬條件

SIDO 模式要輸入的資料分為水文資料及地文資料，水文資料包括了日流量、水溫、及懸浮載細砂的濃度；地文資料則包括斷面資料及河床底質之粒徑資料。

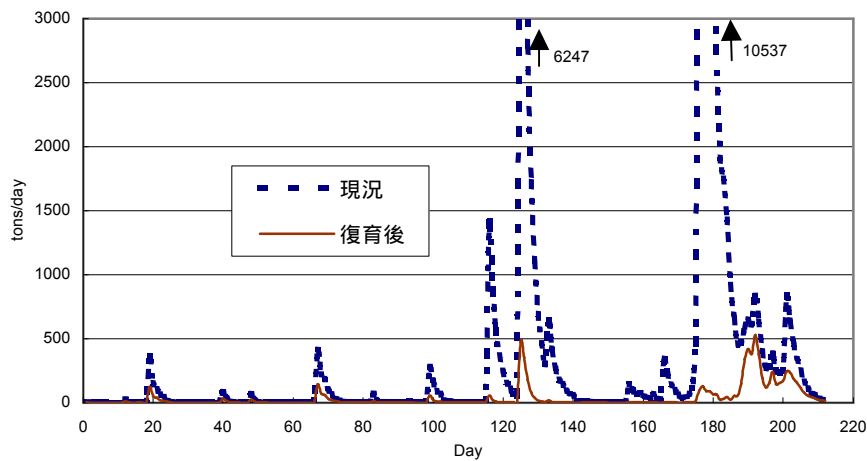
為了評估集水區復育的效果，分別模擬現況(Existing)及復育後(Restored)的產卵區，本研究採用 River-Basin Scale Computer 模式，合成兩套由 1968 年 9 月 1 日至次年 3 月 31 日的水文資料，前者由於中上游頻繁之農業活動造成岸邊植生破壞，導致泥砂濃度偏高且河川水溫較高；後者則限制土地利用，並保護植生及提高邊坡之穩定性，故泥砂濃度較低且河川水溫也較低（輸入資料如圖三之一至三之三所示）。在地文資料方面則是實地採樣之資料。



圖三之一 河川日流量 輸入資料



圖三之二 河川溫度 輸入資料



圖三之三 河川日輸砂量 輸入資料

四、結果與討論

模擬結果如圖號所示，由圖中可以很明顯地看出差異：

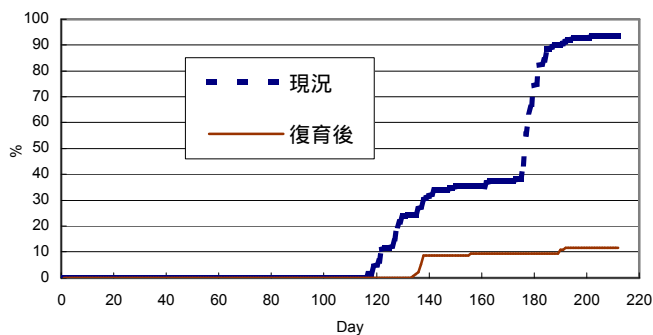
1. 現況之產卵區，由於受到大量的細砂入滲，所以到最後一天(第 212 天)時，已經有 93.5%的孔隙被細砂填滿了(如圖四之一所示)；反之復育後的產卵區，只被填滿 11.5%的孔隙。若與輸砂量(圖三之三)比較，可以發現現況的第 116 天與第 176 天的後幾天分別有較大的輸砂量出現，造成孔隙迅速被堵塞。
2. 孔隙一旦塞住，孔隙水流之流速(圖四之二)直接受到影響，故最後一天時，現況中 93.5%的孔隙填滿率使得孔隙水流流速降至 $5.47\text{E-}6\text{cm/sec}$ ；復育後僅 11.5%之孔隙填滿率還保有 $1.17\text{E-}3\text{cm/sec}$ 之孔隙水流流速，約前者之 1000 倍。
3. 非生物層面的泥砂需氧率(圖四之三)，其趨勢與輸砂量一致，可以對照圖三之三，高峰期出現在第 120 天前後。
4. 生物耗氧率(圖四之四)在現況與復育後比較起來差異並不大，其趨勢大致與水溫(圖三之二)較有關係。
5. 魚卵區之平均溶氧濃度(魚卵區溶氧濃度)與孔隙水流流速(圖四之二)有密切的關係，孔隙水流的流動越良好，與外界的溶氧交換便越頻繁，溶氧濃度也越高，故最後一天現況之低流速造成溶氧濃度等於 0 mg/L ；復育後之還維持溶氧濃度 3.48 mg/L (鮭鱒魚之溶氧濃度下限為 2 mg/L)。
6. 魚卵存活率(圖四之六)由於與底質粒徑之組成有關，所以與產卵區的填滿率(圖四之一)趨勢吻合，孔隙

一旦被填滿，河床底質之平均粒徑變小，會使得魚卵存活率變低。故最後一天現況 93.5%的孔隙填滿率造成魚卵存活率僅約 48%；而復育後之魚卵存活率還高達 80%以上。

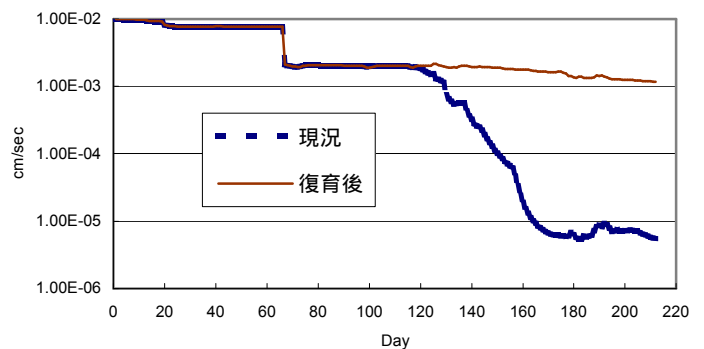
6. 如果以模擬之第 200 天之各項結果做比較(如表一所示)，顯示在同一個產卵區，以不同的水文條件(復育
7. 前、復育後)進行模擬，會得到不同的結果。其中輸入之資料與模擬之結果皆有其因果關係，如輸砂量過大使產卵區孔隙之填滿率迅速上升；產卵區孔隙之填滿率上升會降低魚卵存活率及孔隙水流流速；孔隙水流流速降低會使魚卵區平均溶氧濃度減少甚至為 0，反之亦然。本研究結果顯示 SIDO 模式可適用於鮭鱒魚產卵區之生態評估與復育規劃。

表一 第 200 天各項結果之比較

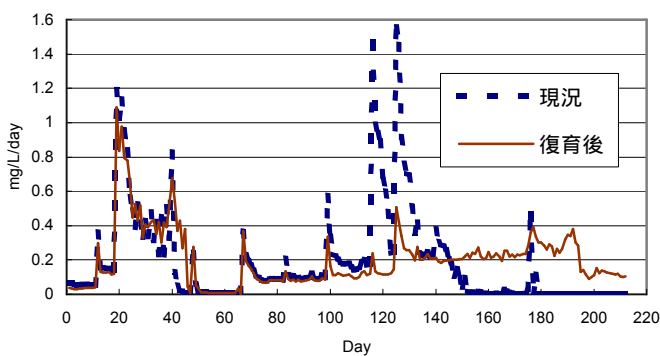
模擬條件	產卵區孔隙填滿率(%)	孔隙水流流速(cm/sec)	泥砂需氧量(mg/L/day)	生物需氧量(mg/L/day)	魚卵區平均溶氧濃度(mg/L/day)	魚卵存活率(%)
現況	92.81	7.30E-06	0	12.5111	0	49.07
復育後	11.51	1.25E-03	0.1095	10.1414	3.71	80.2



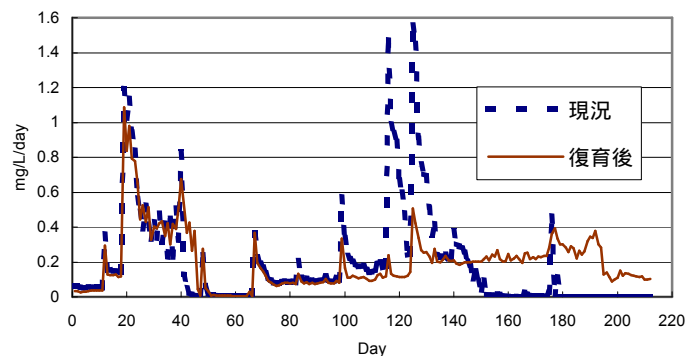
圖四之一 產卵區孔隙填滿率 模擬結果



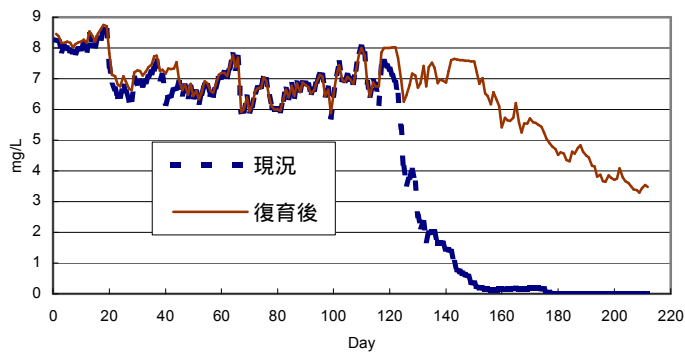
圖四之二 孔隙水流流速 模擬結果



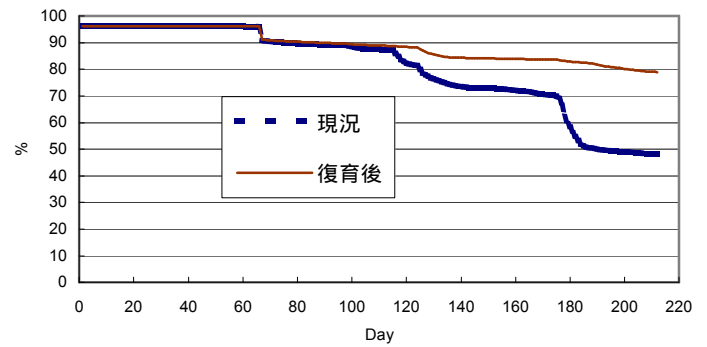
圖四之三 泥砂需氧率 模擬結果



圖四之四 生物耗氧率 模擬結果



圖四之五 魚卵區溶氧濃度 模擬結果



圖四之六 魚卵存活率 模擬結果

五、結論

本文將 SIDO 模式實際應用於礫石底床之河川，模擬鮭魚產卵區中的泥砂與溶氧之傳輸及分佈，並推估該產卵區之魚卵存活率，模擬結果經初步驗證，顯示 SIDO 模式可應用於河川之生態環境評估與棲地復育之規劃。

六、參考文獻

- Bayazit, M.1976. Free surface flow in a channel of large relative roughness. J. Hydraul. Res., IAHR,14(2): 115-126.
- Brown, C.B.1950. Sediment transportation. Chapter 12, Engineering Hydraulics, H. Rouse (editor), John Wiley and Sons, New York, NY, pp.769-857.
- Carling, P.A.1984. Deposition of fine and coarse sand in a open-work gravel bed. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 41:263-270.
- Chevalier, B., and C. Carson. 1985. Modeling the transfer of oxygen between the stream and stream substrate. Colorado State University , Dept. Agr. And Chem. Eng., ARS Project No. 5602-20813-008A,100 pp.
- Chevalier, B., and V.G. Murphy. 1985. Intragravel dissolved oxygen model. Colorado State University , Dept. Agr. And Chem. Eng., ARS Project No. 5402-20810-004-01S,66 pp.
- Coleman, N.L. 1970. Flume studies of the sediment transfer coefficient. Water Resource Research, 6(3):801-809.
- Coleman, N.L., and C.V. Alonso. 1983. Two-dimensional channel flows over rough surfaces. J. Hydraul. Eng., ASCE, 109(2):175-188.
- Engelund, F. 1974. Flow and bed topography in channel bends. J. Hydraul. Div., ASCE, 100(HY11):1631-1648.
- Kerssens, P.J.M., L.C. van Rijn, and N.J. van Wijngaarden. 1977. Model for non-steady suspended sediment transport. Proceedings, Seventeenth Congress of the Int. Assoc. for Hydraul. Res., 1:113-120.
- Mcdonnell, A.J., and S.D. Hall.1967. Effect of environmental factors on benthal oxygen uptake. Jour. WPCF, 41(8). Part 2:R353-R363.
- Zippe, H.J., and W.H. Graf. 1983. Turbulent boundary layer flow over permeable and non-permeable rough surfaces. J. Hydraul. Res., IAHR, 21(1):51-65