

自來水配水系統中基質、餘氯及微生物傳輸模式之研究

Transport Behavior of Substrates, Chlorine Residue and Biomass in the Drinking Water Distribution System

李連堯* 盧重興** 李志成***

摘 要

早期常認為，消毒劑在自來水配水系統中的穩定是非常重要的，特別是對於減少或防止管中微生物的棲息生長及污染物的抑制。然而最近幾年來，自來水用戶抱怨飲用水水質的紛爭，並未因出流水中餘氯的濃度達到標準而有所減少。然大家均將問題焦點投注於淨水廠的處理效果或其上游水源的污染，忽略了配水系統本身所造成的水質二次污染問題。基於這些考量，建立一個可以有效預測自來水配水管網中水質變化的數學模式屬重要。

本研究的目的即在以理論方式探討在自來水配水系統中基質、餘氯及微生物同時傳輸的情形，並建立一個二維傳輸模式，用來預估配水管中各物質(如餘氯、COD、鹼度、DO、氨氮、氧化氮及微生物)的消長情形。由模式的預估結果可知，在配水管網中流體流動情況及管壁對餘氯的消耗速率是決定水質好壞的重要因素。

壹、前 言

早期常認為，消毒劑在自來水配水系統中的穩定是非常重要的(Allen et al., 1980)，自來水在到達用戶前的水質優劣只受水中餘氯濃度的影響，特別是對於減少或防止管中微生物的棲息生長及污染物的抑制，所以只要在自來水送達消費者前維持足量的餘氯濃度，就能確保水質安全、減少管網中微生物所導致配水系統的腐蝕及味覺、視覺、口感上不良的影響。因此在各國的自來水水質法規中，包括我國在內，都明文地規定淨水廠出流水中餘氯的濃度。然而以我國為例，最近幾年來，自來水用戶抱怨飲用水水質的紛爭，並未因出流水中餘氯的濃度達到標準而有所減少。然大家均將問題焦點投注於淨水廠的處理效果或其上游水源的污染，忽略了配水系統本身所造成的水質二次污染問題。

配水管中之生物膜的形成及其影響機制，早已在許多的研究調查中被發現。Geldreich et al.(1972)曾在美國自來水協會所發表的文章中，提出在美國的969個公共給水系統中，雖然餘氯含量在0.1~0.3mg/L法規標準之間，但卻仍有超過60%的系統中，其標準平板計數(Standard plate count)的微生物數目超過10個以上。Nagy et al. (1985)更明白的指出配水管網中1~2mg/L的自由餘氯無法阻止洛杉磯配水系統中生物膜的生長，其生物膜細菌

* 國立中興大學環境工程學系博士班研究生

** 國立中興大學環境工程學系教授

*** 國立中興大學環境工程學系大學生

數目可高達 10^4 cfu/cm²。接著Ridgway et al. (1984) 由實驗的結果發現管中餘氯在高達15~20mg/L的濃度才可有效地抑制生物膜的形成。而Nagy和Olsn (1985) 也指出在水管表面上之異營性細菌平板計數(HPC)範圍可由10至 $4.7 \times 10^6/100\text{cm}^2$ ，其中*Arthrobacter ssp.*是主要的菌種。而 Tuovinen和Hsu (1987)在配水管表面所生成之結節(Tubercles)上發現活菌數目可高達 10^9 cfu/cm²，並可發現硫還原氧化菌，氮還原氧化菌，氮氧化菌各種菌種。由以上這些研究，可發現配水系統中的總餘氯濃度保持在0.2~1.8mg/L之間，並不能充分的防止配水管中致病菌及由微生物所引起的嗅味、色度、濁度等問題。另外，由微生物所形成的生物膜由研究發現也可當作一種保護膜(Notte et al., 1971; Nagy et al., 1982)。管流中的細菌為避免被水之剪力所沖走便從細胞膜中生成一種纖維(glycocalyx)，利用這種纖維延伸到周圍的表面或其它細菌上，而能堅固的粘附於管壁上，這些由多醣類所組成的纖維則還具有保護細菌免受消毒殘留物侵害之功能。

因此，配水管網中的微生物不論是直接或間接地都會對水質產生不利的影響，進而危及公共健康與福祉。基於這些考量，建立一個有效的數學模式以預測配管網中水質的變化並維持高水質的水是很重要的。但因微生物彼此之間的交互作用十分複雜且有關管網中水質變化的資訊缺乏，所以要利用模式來預測在配水系統中微生物行為是很困難的。因此，近年來微生物學家都開始研究影響在配水系統的微生物的因子，以提供模式的建立(LeChevallieer, 1987; 1991; Lu, 1991)。

本研究的目的即在以理論方式探討在配水管中同時考慮水流狀態(層流或紊流)及基質、消毒劑、微生物同時傳送影響情形下，建立一個二維傳送模式，用來預估配水管中各物質(如餘氯、COD、鹼度、DO、氧化氮、氨氮)的真正消長情形，做為日後設計、操作及監視配水系統的參考依據。

貳、理論與模式推導

一、基本環境況狀

考慮於配水系統中，水流流經一管壁上附著生物膜的圓形管，而此生物膜可利用基質而新陳代謝，並且可被水流的剪力作用而沖刷脫落或是被消毒劑抑制而減少，如圖1所示。

在這模式中考慮幾個基本的物理、化學及生物現象：

1. 進入管線中基質、消毒劑及微生物會因管線中的軸向對流和徑向擴散機制而傳送；餘氯會和需氯物質反應(chlorine-demanding compounds)；生物量會因消毒劑而減少，也會因附在管壁的生物膜脫附而增加。
2. 基質、消毒劑及微生物會從自來水中傳送至生物膜中。

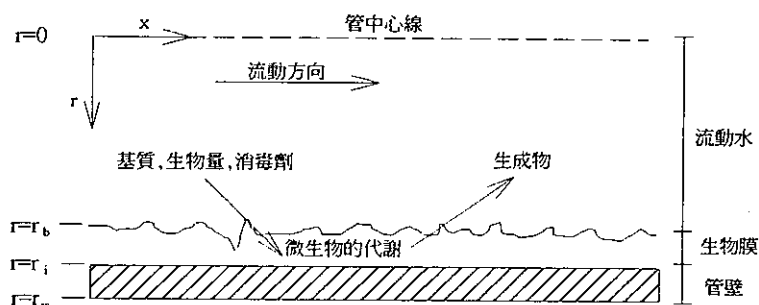


圖1 具有生物膜的圓形管中物質傳輸的情形

3. 基質及消毒劑在生物膜中徑向擴散，且同時基質在生物膜中會被微生物利用而減少，消毒劑也因與微生物反應而減少。
4. 在生物膜中，因微生物的生長和繁殖，使生物量增加；另一方面也因消毒劑作用而造成生物量的減少。
5. 餘氯會和管壁反應。

Terashima et al.(1987)等人曾指出，在生物膜的系統中，有機物質和含氮化合物的共同去除中須同時考慮COD、鹼度、溶氧量、氮氣的濃度變化，而氧化、硝化及脫氮作用的反應動力方程式可以數個Monod方程式所形成的合成式來表達。Chen et al.(1989)等人曾利用此方程式於生物膜模式中，成功地說明了在生物膜反應器中物質共同去除的機制。本研究亦利用此種方程式來描述生物膜中新陳代謝的情形。

二、基本假設

此數學模式是根據基質、消毒劑及微生物同時傳送所建立，用來預估配水管線中水質的改變情形。而這模式包含了層流與紊流水流狀態下，配水管線中生物膜生長情形及氮氣、氧化氮、溶氧、鹼度、生物量及消毒劑的質量守衡方程式。對於方程式的建立有幾個基本假設：

1. 每種微生物（包含行氧化、硝化、脫氮作用）都均勻地分布於穩定狀態下的生物膜中，換句話說在生物膜中生物量可視為只有一種微生物的質量(Masuda et al.,1987)。
2. 生物反應只有在生物膜中進行(Kirkpatrick et al.,1980)
3. 餘氯和需氮化合物在自來水中及生物膜中是一階反應，而反應常數為定值(Biswas et al.,1993)。
4. 因在生物膜中氧化、硝化及脫氮等作用影響非常小，故內呼吸可被忽略(Chen et al.,1989)。
5. 餘氯和微生物的作用可以用Chick-Watson定律表示(Montgomery,1985)。
6. 因生物膜的厚度遠小於管線的半徑，因此在生物膜中忽略對流傳送(Kirkpatrick et al.,1980)。

7. 假設水溫、pH值、擴散係數及生物膜的密度為一定值。
8. 相較於軸向的對流，物質的軸向擴散可被忽略。

三、模式建立

本研究模式建立分成兩大部分：即在自來水中(方程式(1)至(7))及生物膜中(方程式(8)至(13))。在方程式(1)至(7)的質量平衡式中包括了軸向的對流及橫向的擴散，如下：

有機基質(C_S)：

$$U_w f(r) \frac{\partial C_S}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_S r \frac{\partial C_S}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$NH_4 - N(C_{1w})$ ：

$$U_w f(r) \frac{\partial C_{1w}}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{1w} r \frac{\partial C_{1w}}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$NO_3 - N(C_{2w})$ ：

$$U_w f(r) \frac{\partial C_{2w}}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{2w} r \frac{\partial C_{2w}}{\partial r} \right) \quad (3)$$

溶氧量(C_o)：

$$U_w f(r) \frac{\partial C_o}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_o r \frac{\partial C_o}{\partial r} \right) \quad (4)$$

鹼度(C_A)：

$$U_w f(r) \frac{\partial C_A}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_A r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) \quad (5)$$

自由餘氯(C_C)：

$$U_w f(r) \frac{\partial C_C}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_C r \frac{\partial C_C}{\partial r} \right) - k_w C_C \quad (6)$$

生物量(C_B)：

$$U_w f(r) \frac{\partial C_B}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_B r \frac{\partial C_B}{\partial r} \right) - k_1 C_C^n C_B \quad (7)$$

其中方程式(6)中等號右邊的第二項表示餘氯的衰減量，方程式(7)中等號右邊的第二項則表示微生物和餘氯的作用。

在方程式(8)至(13)的生物膜中質量平衡式中包括了徑向的分子擴散及生物新陳代謝

的反應動力，如下：

有機基質(C_{SB})：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} (D_{SB} \frac{r \partial C_{SB}}{\partial r}) = \frac{k_s C_{SB}}{k_{mS} + C_{SB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} X_f + \beta \frac{k_{2N} C_{2NB}}{k_{m2N} + C_{2NB}} \frac{C_{SB}}{k_{mS} + C_{NB}} \frac{k_{mO}}{k_{mO} + C_{OB}} X_f \quad (8)$$

有機物質的質量平衡如式(8)。其藉由徑向的分子擴散傳輸，而利用氧化及脫硝作用去除。方程式的左邊即為擴散項，而右邊的第一、二項分別為有機物因氧化、脫硝而消耗的量。其中有機物的氧化為兩個Monod型式所合成，脫硝則為三個Monod型式所合成。

氮氣(C_{1NB})：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} (D_{1NB} \frac{r \partial C_{1NB}}{\partial r}) = (1 + Y_2 F_n) \frac{k_{1N} C_{1NB}}{k_{m1N} + C_{1NB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} \frac{C_{AB}}{k_{mA} + C_{AB}} X_f + Y_1 F_n \frac{k_s C_{SB}}{k_{mS} + C_{SB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} X_f \quad (9)$$

氮氣的質量平衡如式(9)。氮氣的去除和硝化及生物量有關。方程式右邊第二項為氮氣因硝化的去除因子，其中生物膜中的氮氣因子(F_n)是指氮氣轉換成自營性生物量的百分比，同理第三項中的氮氣因子(F_n)是指氮氣轉換成異營性生物量的百分比。而氮氣的反應動力式可以氮氣本身濃度、溶氧量、鹼度所共同組成的三個Monod合成型式來表示。

氧化氮(C_{2NB})：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} (D_{2NB} \frac{r \partial C_{2NB}}{\partial r}) = \frac{k_{2N} C_{2NB}}{k_{m2N} + C_{2NB}} \frac{C_{SB}}{k_{mS} + C_{SB}} \frac{k_{mO}}{k_{mO} + C_{OB}} X_f - \frac{k_{1N} C_{1NB}}{k_{m1N} + C_{1NB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} \frac{C_{AB}}{k_{mA} + C_{AB}} X_f \quad (10)$$

氧化氮包括了氧化氮及亞氧化氮，它是硝化或脫硝所造成。而在脫硝的反應動力式上可以氧化氮本身的濃度、溶氧、有機基質濃度所組成的三項Monod合成式，而其中溶氧的Monod方程式可利用Chen et al.(1989)的研究中所提到的 $K_{oi}/(K_{oi} + C_{OB})$ 方程式表示。

溶氧量(C_{OB})：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} (D_{OB} \frac{r \partial C_{OB}}{\partial r}) = r_n \frac{k_{1N} C_{1NB}}{k_{m1N} + C_{1NB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} \frac{C_{AB}}{k_{mA} + C_{AB}} X_f + r_2 \frac{k_s C_{SB}}{k_{mS} + C_{SB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} X_f \quad (11)$$

考慮管網中溶氧的消耗是因有機物的氧化及硝化作用所造成。

鹼度(C_{AB})：

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{AB} \frac{r \partial C_{AB}}{\partial r} \right) &= (\eta + \alpha Y_2 F_n) \frac{k_{1N} C_{1NB}}{k_{m1N} + C_{1NB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} \frac{C_{AB}}{k_{mA} + C_{AB}} X_f + \\ &\alpha Y_1 F_n \frac{k_s C_{SB}}{k_{mS} + C_{SB}} \frac{C_{OB}}{k_{mO} + C_{OB}} X_f - \\ &\theta \frac{k_{2N} C_{2NB}}{k_{m2N} + C_{2NB}} \frac{C_{SB}}{k_{mS} + C_{SB}} \frac{k_{O_2}}{k_{O_2} + C_{OB}} X_f \end{aligned} \quad (12)$$

管中的輪度常因脫氮作用而增加，因硝化作用及微生的生長而消耗，故由質量平衡的觀念可得方程式(12)。

自由餘氯(C_{CB}):

生物膜中的餘氯會因微生物及有機物的存在而消耗，而其反應式亦常以一階反應式來表示：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{CB} \frac{r \partial C_{CB}}{\partial r} \right) = k_{dB} C_{CB} \quad (13)$$

四、數值分析：

Equation(1)–(7)是描述在自來水同時考慮基質、消毒劑、微生物傳輸情形下所建立的一組偏微分聯立方程組。其解法是利用外顯式有限差分法(explicit finite-difference)，針對徑向取P個區間，則原先7個偏微分方程式可轉換成7×P個常微分方程組，最後再以IMSL(1987)的副程式 DIVPAG 解之。

Equation(8)–(13)則是描述在生物膜中同時考慮基質、消毒劑及生物膜代謝反應情形下所建立的一組常微分聯立方程組，其與邊界條件形成一邊界值問題，本研究以IMSL(1987)副程式 DBVPFD 解之。

而在解這些方程式之前，有些邊界條件必須設定，如下：

1. 除了餘氯外，在管壁的所有物質的通量皆為零。餘氯和管壁發生的反應可以用下列方程來表示(Biswas et al., 1993)：

$$D_{CB} \frac{\partial C_{CB}}{\partial r} = -V_d C_{CB} \quad (14)$$

2. 除了生物量之外，每一種物質無論是進入或離開生物膜交界面的通量是相同。生物量因脫附而產生之通量可以表示為(Lu, 1991)：

$$D_B \frac{\partial C_B}{\partial r} = k_d X_f L_f \quad (15)$$

3. 每一種物質在生物膜和自來水交界面的濃度是平衡的。
4. 每一種物質的濃度分布是以管線的中心線而呈對稱。

5. 每一種物質的濃度分布在管線的入口呈均勻的混合。

利用以上的邊界條件，然後藉由假設在生物膜和自來水的交界面各種物質的濃度為零，即可利用equations(8)-(13)解出生物膜內各物質的濃度；再利用交界面各物質的質量和邊界條件，解equations(1)-(6)可得到在自來水中各種物質的濃度；而用交界面各物質的濃度和邊界條件，又可得生物膜內各物質的濃度。這樣的程序一直重複做至由自來水中 and 生物膜中求出交界面濃度與通量相同為止。

參、結果與討論

一、參數的推估

在解自來水中 and 生物膜中的質量守衡方程式時需要一些常數值。下表1是反應動力參數的設定，另外，有些參數的算法必須被定義。：

1. 生物膜厚度

在計算生物膜厚度時，有兩個假設必須被確立。即：

a. 基質徑向通量與維持生物膜生長的基質量相等(Rittmann and McCarty, 1980)。

b. 有機物、氮及氧化氮向進入生物膜的通量總合等於提供生物膜生長的營養量(Masuda et al., 1987)。

生物膜的厚度會因外部基質進入生物膜而增加其厚度，也會因水流的沖刷和消毒劑的作用而減少其厚度。其計算公式為：

$$L_f = \frac{(Y_1 + Y_1 F_n) D_s \frac{\partial C_s}{\partial r} + (Y_2 + Y_2 F_n) D_{1N} \frac{\partial C_{1N}}{\partial r} + Y_3 D_{2N} \frac{\partial C_{2N}}{\partial r} + D_B \frac{\partial C_B}{\partial r} \Big|_{r_b}}{(k_d + k_{1B} C_{1N}^n) X_f} \quad (16)$$

2. 速度分佈 (f(r))

在配水管網中自來水的流況是由雷諾數值(Re)來決定的。當Re值小於2100時，則稱流況是層流，此時方程式(1)至(7)中的f(r)為：

$$f(r) = 2 \left(1 - \left(\frac{r}{r_b} \right)^2 \right) \quad (17)$$

當Re>2100時，則流況為紊流狀態，此時管配中的水流可分為三區域——在生物膜附近的Viscous sub-layer，離管壁較遠的Turbulent core及兩者中間的Buffer layer(Hines and Maddox, 1985)。

a. 位於溶液和生物膜交界面附近的Viscous sub-layer：

表1 動力參數值

參數	數值	參考文獻
$D_{1N}(\text{NH}_4^+)$	1.74×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1976b
$D_{1NB}(\text{NH}_4^+)$	1.39×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1977b
$D_{2N}(\text{NO}_3^-)$	1.62×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1978b
$D_{2NB}(\text{NO}_3^-)$	1.50×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1979b
$D_s(\text{acetate})$	1.26×10^{-5}	Perry and Chilton, 1973
$D_{sB}(\text{acetate})$	1.01×10^{-5}	Rittmann and McCarty, 1980
$D_o(\text{O}_2)$	1.85×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1976b
$D_{oB}(\text{O}_2)$	1.67×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1976b
$D_A(\text{CO}_3^{2-})$	1.21×10^{-5}	Chen et al., 1989
$D_{AB}(\text{CO}_3^{2-})$	0.97×10^{-5}	Chen et al., 1990
$D_c(\text{Cl}_2)$	1.25×10^{-5}	Cussler et al., 1984
$D_{cB}(\text{Cl}_2)$	1.02×10^{-5}	Lu, 1991
$D_B(\text{biomass})$	1.20×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1976b
$k_a(\text{acetate})$	4.05×10^{-5}	Chen et al., 1989
$k_{1N}(\text{NH}_4\text{-N})$	5.78×10^{-5}	Williamson and McCarty, 1976a
$k_{2N}(\text{NO}_3\text{-N})$	4.34×10^{-6}	Metcalf and Eddy, 1991
$k_{ns}(\text{acetate})$	20	Chen et al., 1990
$K_{m1N}(\text{NH}_4\text{-N})$	1.4	Metcalf and Eddy, 1991
$K_{m2N}(\text{NO}_3\text{-N})$	0.1	Metcalf and Eddy, 1991
$K_{mO}(\text{O}_2)$	0.3	Williamson and McCarty, 1976b
$K_{mO}(\text{O}_2)$	0.2	Chen et al., 1989
$K_{mA}(\text{CO}_3^{2-})$	4.8	Chen et al., 1989
$Y_1(\text{acetate})$	0.4	McCarty et al., 1981
$Y_2(\text{NH}_4\text{-N})$	0.2	Metcalf and Eddy, 1991
$Y_3(\text{NO}_3\text{-N})$	0.8	Metcalf and Eddy, 1992
F_n	0.12	Chen et al., 1989
$K_1(\text{for Cl}_2)$	0.9594	Le Chevallier, 1991
$K_{1B}(\text{for Cl}_2)$	4.8×10^{-4}	Le Chevallier, 1992
$n(\text{for Cl}_2)$	0.99	Le Chevallier, 1993
$k_d(\text{laminar flow})$	1.39×10^{-5}	Rittmann, 1982
$k_d(\text{turbulent flow})$	1.39×10^{-4}	Rittmann, 1983
$k_w(\text{for Cl}_2)$	7.20×10^{-5}	Biswas et al., 1993
$k_{wB}(\text{for Cl}_2)$	7.20×10^{-5}	Biswas et al., 1994
$V_d(\text{for Cl}_2)$	2.1×10^{-5}	Biswas et al., 1995
$r_2(\text{mg O}_2/\text{mg COD})$	0.56	Chen et al., 1989
$r_n(\text{mg O}_2/\text{mg N})$	4.33	Chen et al., 1989
$\alpha(\text{mg CaCO}_3/\text{mg N})$	3.57	Chen et al., 1989
$\beta(\text{mg COD}/\text{mg N})$	2.68	Chen et al., 1989
$\eta(\text{mg CaCO}_3/\text{mg N})$	7.14	Chen et al., 1989
$\theta(\text{mg CaCO}_3/\text{mg N})$	3.57	Chen et al., 1989
$X_n(\text{mg VSS}^{-1})$	50,000	Chen et al., 1989

$$f(r) = \frac{\text{Re} \phi (r_b - r)}{4r_b} \quad (18)$$

$$0 < \frac{\text{Re}}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{r_b - r}{r_b} < 5$$

b. 離管壁較遠區域的Turbulent core :

$$f(r) = \sqrt{\frac{\phi}{2}} \left[2.5 \ln \left(\frac{\text{Re}}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{(r_b - r)}{r_b} + 5.5 \right) \right], 30 < \frac{\text{Re}}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{r_b - r}{r_b} \quad (19)$$

c. 位於兩層之間的Buffer layer :

$$f(r) = \sqrt{\frac{\phi}{2}} \left[5.0 \ln \left(\frac{Re}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{(r_b - r)}{r_b} - 3.05 \right) \right] \quad (20)$$

$$5 < \frac{Re}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{r_b - r}{r_b} < 30$$

3. 渦流擴散係數

當水流屬於紊流狀態時，物質的傳送是藉分子擴散和渦流擴散，此兩者會因距管壁的遠近或在不同流層區域，其重要性亦有所不同。

- a. Turbulent core：由於水流中的物質是利用紊流傳送，因此分子擴散對於整個傳送貢獻很小，故渦流擴散就變成非常重要。而渦流擴散係數可利用下列公式計算(Edwards et al.1979)：

$$E_d = 1.233 * 10^{-2} U_{av} r_b \quad (21)$$

- b. Viscous sublayer：由於水流的紊流作用幾乎為零，因此 E_d 可忽略。

- c. Buffer layer：分子擴散和渦流擴散在此層都有其重要地位，因而兩者皆不可忽略。而渦流係數可以由下列公式計算(Notter and Sleicher,1971)：

$$E_d = \frac{0.0009 \nu \left(\frac{Re}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{r_b - r}{r_b} \right)^3}{\left[1 + 0.0067 \left(\frac{Re}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{r_b - r}{r_b} \right)^2 \right]^{0.5}} \quad (22)$$

4. 基質分子擴散：

由於醋酸鹽碳在生物膜中很容易被微生物消化，因此有機物的分子擴散可視為醋酸鹽碳的分子擴散(LeChevallier,1991)。氧化氮的分子擴散可藉由硝酸鹽和亞硝酸鹽兩者的分子擴散係數平均值而得(Chen et al.,1989)。鹼度的主要部分是碳酸鹽離子(Hanya,1960)，因此鹼度的分子擴散可視為碳酸鹽離子的分子擴散。在配水管網中的pH值大約為介於6.5至8.5之間(Montgomery,1985)。自由餘氯的分子擴散係數在生物膜中只有在水溶液中的80%，生物量的分散係數在生物膜中則為在水溶液中的125%(Williamson and McCarty,1976b)。

二、模式的驗證

本模式的驗證部分將以Kirpatrick et al.(1980)的數值解所獲葡萄糖基質在水流軸向及徑向之濃度變化進行比較，如下圖2及圖3。由圖中可知其均有非常好的模擬結果。而有機物質、溶氧、鹼度及含氮物質在生物膜中的代謝情形也和Chen et al.(1989)的解析解非常吻合。

三、模式的應用

接著，應用本模式模擬自來水離開處理水廠後，進入配水管網之後在層流及混流的情況下各基質消耗的情形。表4是一些初始條件，這些條件乃模擬某一自來水廠出流水水質。其中管的內徑為5cm，流速在層流時為 1.0cm s^{-1} ($Re=1000$)在紊流為 35cm s^{-1} ($Re=350000$)，渦流擴散係數為 $2.16\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ，生物膜厚度在一開始時為假設為 $25\mu\text{m}$ 。

圖4是水流流況為層流時，管中軸向與徑向物質變化情形。由圖中可知氮氣濃度在進入生物膜之後快速被氧化消耗成氧化氮，而使氧化氮濃度在進入生物膜之後快速上升，但兩者的濃度在自來水中的消耗則均不是很重要。另外硝化作用的發生也會使得溶氧值下降，但因為生物的代謝耗氧有限故其濃度在軸向上或在縱向上均不會有很明顯的改變。在餘氯的消耗方面，其濃度在水流軸向及徑向上均會有明顯地消耗，特別是在生物膜中的管壁消耗會使得餘氯突然下降；而在軸向上，因生物量的增加使得軸向距離的增加其消耗量也愈大。在COD方面，其是管網中生物食物量的指標，在自來水中因生物不多所以其耗消可說為零，但在管壁生物膜中則因微生物的食用而明顯下降。而DO和鹼度量的改變不論是在自來水中或是在生物膜中均消耗不多。

表2 配水管網模擬之初始值

水質參數	數值
pH	7.2
鹼度	15mg/l-as CaCO_3
COD	2.0mg l^{-1}
氮氣	0.1mg l^{-1} as nitrogen
氧化氮	0.2mg l^{-1} as nitrogen
生物量	2mg l^{-1}
溶氧量	9.2mg l^{-1}
自由餘氯	0.8mg l^{-1}
生物膜厚度	$25\mu\text{m}$
溫度	20°C

圖5是水流流況為紊流時，管中軸向與徑向的物質變化情形。因為在紊流的情形下渦流擴散係數為分子擴散係數的數萬倍，因此徑向質傳會比層流來得明顯。也正因此，各基質的濃度在自來水中的值會比層流小，但在生物膜中則受擴散現象使基質快速向生物膜移動而造成各基質濃度比層流高。

在圖6和7中是各物質在層流及紊流中隨軸向距離改變的情形。由圖6可知在層流中鹼度、COD、DO及 $\text{NO}_x\text{-N}$ ，在模擬的1000cm之中並無很明顯的下降。然在紊流中在大約200cm之處餘氯、COD及 $\text{NH}_4\text{-N}$ 開始下降， $\text{NO}_x\text{-N}$ 則開始上升。而在生物膜方面，流體的剪力、餘氯的作用、及生物的衰老都會使得生物膜減少。由圖6和圖7中可知在模擬開始時因餘氯的作用使生物膜極速下降，之後因餘氯濃度下降使生物膜厚度減少變緩。若比較層流及紊流中的生物膜變化情形可知紊流下因剪力較大而使生物膜變薄。但看生物量的情形

則和生物膜相反，一開始變化很少，之後因生物膜的大量脫附至自來水中而急速上升。

肆、結 論

本研究所建立之二維傳輸模式已經成功地模擬出自來水配水管網中基質的傳輸、餘氯的作用及微生物的消長情形。並和國外的文獻值驗證比較，証明了其可信度。本篇報告更進一步地討論層流及混流下各物質的變化情形，而得到下列幾點結論：

- 1、流體的剪力在配水管網中扮演者非常重要的角色。在較大的流體流速(即較大的雷諾數)下，會使流體剪力增大進而增加水中的生物量。
- 2、管材的選擇也是一重要的考慮因素。在高餘氯消耗速率的管材下(如鑄鐵管)，其管壁會快速地消耗餘氯而失了對生物膜的抑制及消毒效果。
- 3、在紊流的情況下，較高的徑向擴散速度，將會使管壁的生物易獲得基質但也易和餘氯作用，其是利還是弊則須視水中的基質與消毒劑相對濃度而定。

最後，值得一提的是在模擬的過程中，因缺乏國內網管的相關水質資料，只能引用國外的文獻值。因此，如何建立有本土性的水質模式，實為將來努力的目標。

誌謝

本研究承蒙國科會經費補助(NSC 86-2211-E-005-013)，特此誌謝。

符號說明

C	: 表示水流中各物質的濃度(mg l^{-1})。
D	: 表示水流中各物質的擴散係數($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)。
F_N	: 生物膜中的含氮百分比。
U_{AV}	: 平均流速(cm s^{-1})。
$f(r)$: 決定層流或紊流的流況指標。
k_w	: 流水中餘氯衰減速率(s^{-1})。
k_1	: 流水中因消毒劑所導致微生物反應的速率(s^{-1})。
k_S	: 有機物氧化的最大速率(s^{-1})。
k_{1N} 、 k_{2N}	: 硝化及脫硝的最大速率(s^{-1})。
k_{WB}	: 生物膜餘氯衰減速率(s^{-1})。
k_d	: 生物膜的附著率。
K	: 表示水流中各物質的飽合常數。
K_{O_i}	: 脫硝的溶氧抑制係數($\text{mg O}_2 \text{l}^{-1}$)。
L_f	: 生物膜的厚度。
r	: 距管中心的橫向距離(cm)。
r_2 、 r_n	: COD氧化、硝化溶氧使用係數($\text{mg O}_2/\text{mg COD}$ 、 $\text{mg O}_2/\text{mg COD}$)。
X_f	: 生物密度(mg VSS l^{-1})。

Y ₁ , Y ₂	: 有機物質、氮氮生長係數(mg VSS/mg COD、mg VSS/mg N)。
α	: 生物膜生長所造成鹼度消耗係數(mg CaCO ₃ /mg N)。
β	: 脫硝的溶氧使用係數(mg O ₂ /mg N)。
η	: 硝化所造成鹼度消耗係數(mg CaCO ₃ /mg N)。
θ	: 脫硝所造成鹼度生成係數(mg CaCO ₃ /mg N)。
V _d	: 氯化物在管壁的消耗率。

參考文獻

- Allen M.T., Taylor R.H. and Geldreich E.E. (1980) "The Occurrence of Microorganisms in Water Main Encrustations, " *J. AWWA*, vol.72, no.11, 614-625.
- Biswas P., Lu C. S. and Clark R. M. (1993) A model for chlorine concentration decay in pipes. *Wat. Res.* 27, 1715-1724.
- Bitton G., and Marshall K.C., *Absorption of Microorganisms to Surfaces*, Wiley-Interscience, New York, 1980
- Chen G. H., Ozaki H. and Terashima Y. (1989) Modelling of the simultaneous removal of organic substances and nitrogen in a biofilm. *Wat. Sci. Technol.* 21, 791-804.
- Costerton J.W., Geesey G.G., and Cheng K.J., (1978), "How Bacteria Stick", *Sci. Amer.*, vol.238, p.86.
- Edwards, D. K., Denny V. E. and Mills, A. F. (1984) *Transfer Processes : An Introduction to Diffusion, Convection and Radiation*. McGraw-Hill, New York.
- Geldreich E.E., Nash H.D., Reasoner D.J., and Taylor R.H., (1972) "The Necessity of Controlling Bacterial Populations in Potable Waters: Community Water Supply", *J. AWWA*, vol.64, no.9, p.596.
- Gujer W. and Boller B. (1986) Design of a nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts. *Wat. Res.* 20, 1353-1362.
- IMSL (International Mathematics and Statistical Libraries) (1987). Contents Document, Vol. 2, Version 1.0, Houston, Texas.
- Kirkpatrick J. P., McIntire V. and Characklis W. G. (1980) Mass and heat transfer in a circular tube with biofouling. *Wat. Res.* 14, 117-127.
- LeChevallier M. W. (1991) Microbial processes within the distribution system. Presented at the conference on water quality modeling in distribution systems, AWWA Research Foundation/EPA, Cincinnati, OH.
- LeChevallier M. W., Babcock T. M. and Lee R. G. (1987) Examination and characterization of distribution system biofilms. *Appl. environ. Microbiol.* 53, 2714-2724.
- LeChevallier M. W., Cawthon C. D. and Lee R. G. (1988) Inactivation of biofilm bacteria. *Appl. environ. Microbiol.* 54, 2492-2499.
- Lu C. S. (1991) Theoretical Study of Particle, Chemical and Microbial Transport In Drinking Water Distribution Systems. Ph.D. Thesis, University of Cincinnati, Cincinnati, OH
- Masuda S., Watanabe Y. and Ishiguro M. (1987) Bacteria within biofilm attached on a rotating disc. *J. Jap. Sewage Works Assoc.* 24, 119-31.

- Montgomery J. M. (1985) *Water Treatment Principles & Design*. Wiley-Interscience, New York.
- Nagy L.A., and Olson B.H.,(1985)"Occurrence and significance of bacteria, fungi and yeasts associated with distribution pipe surfaces ", *Proceedings of the Water Quality Technical Conference,Houston, Tex.* American Water Works Association. Denver.
- Nagy L.A. et al. "Biofilm Composition , Formation and Control in the Los Angeles Aqueduct System." Proc. 1982 AWWA WQTC, Nashville, Tenn.
- Notter R. H. and Sleicher C. A. (1971) Eddy diffusivity in the turbulent boundary layer near a wall. *Chem. Engng Sci.* 26, 161-171.
- Ridgway. H.F. et al. (June 1984)" Biofilm Fouling of RO Membranes-Its Nature and Effect on Treatment of Water for Reuse".*Jour.AWWA*, vol. 77, no.6, p. 94.
- Rittmann B. E. (1982) The effect of shear on biofilm loss rate. *Biotech. Bioengny* 24, 501-506.
- Rittmann B. E. and McCarty P. L. (1980) Evaluation of steady-state-biofilm Kinetics. *Biotech. Bioengny* 22, 2359-2373.
- Skowlund C. T. (1990) Effect of biofilm growth on steady-state biofilm models. *Biotech. Bioengny* 35, 502-510.
- Terashima Y, Ozaki H. and Hashim M. A. (1987) Simultaneous removal of organic carbon and nitrogen compounds by intermittent aeration in oxidation ditch process. *Proc. Int. Symp. on Environmental Management Istanbul*, pp. 1359-1377.
- Tuovinen O.H.,and Hsu J.C., (1982) " Aerobic and anaerobic microorganisms I tubercles of the Columbus , Ohio, waterdistribution system", *Appl. Environ.Microbiol.*, vol. 44, 761-764.
- Williamson K. and McCarty P. L. (1976a) A model of substrate utilization by bacterial films. *J. Wat. Pollut. Contr. Fed.* 48, 9-24.
- 林建財、李志強、"配水管網中管末水質變化之初步探討"，第一屆給水技術研討會論文集，73年。

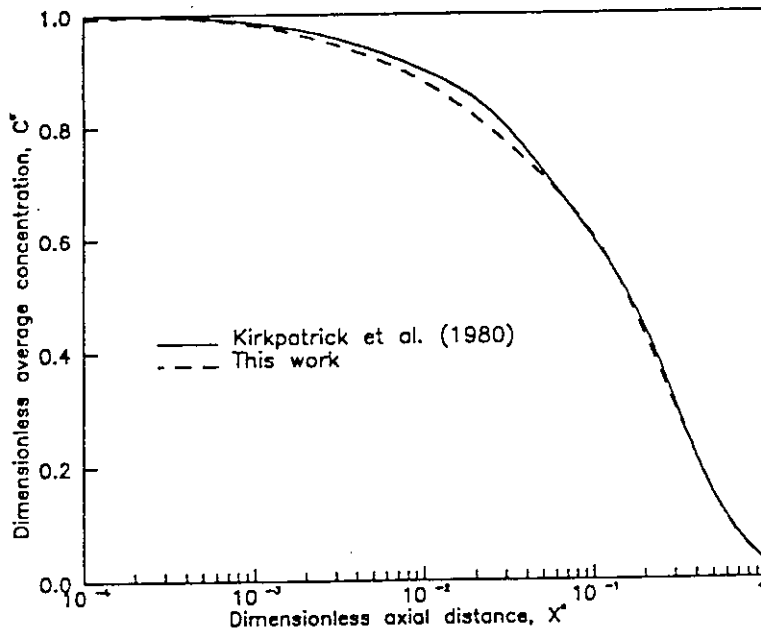


圖2 層流中軸向葡萄糖濃度分佈數值結果比較

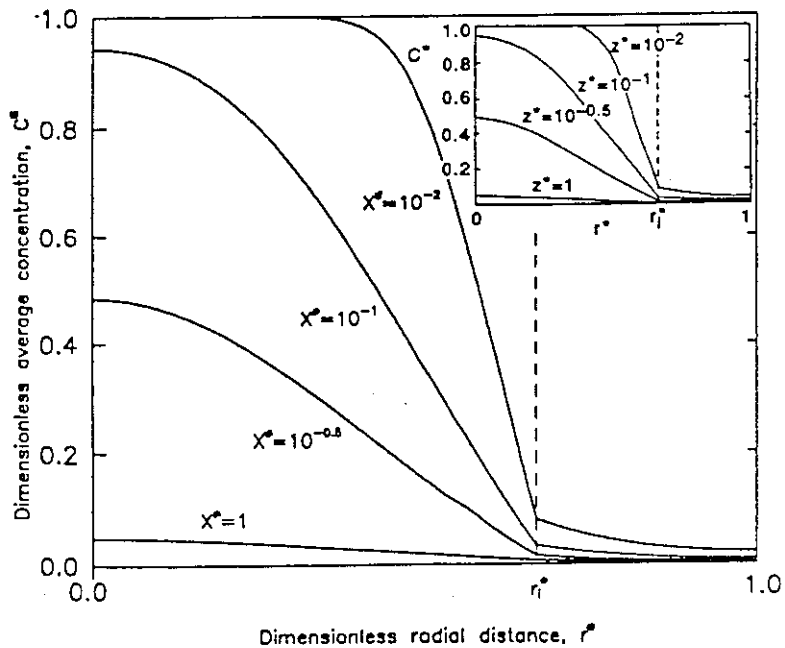
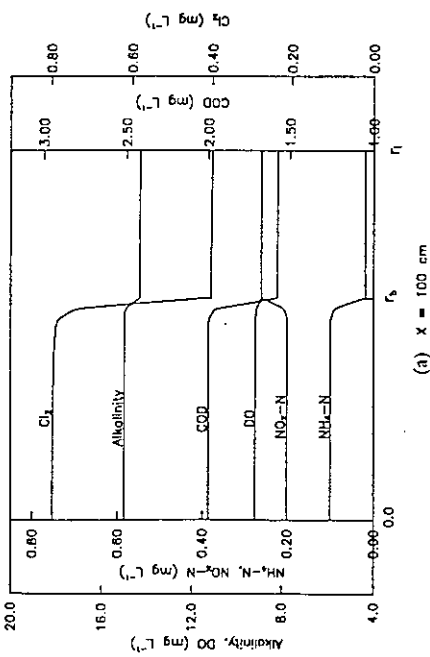
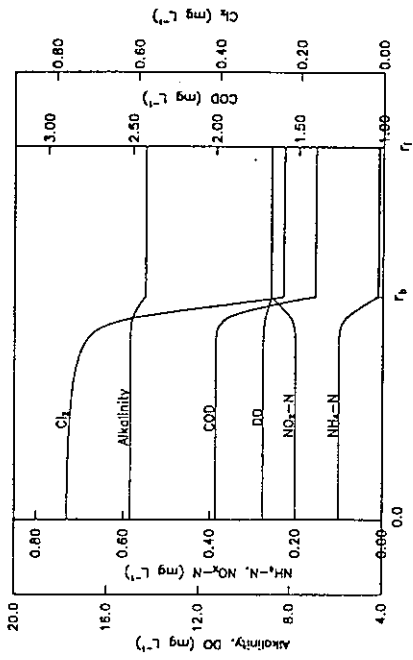


圖3 層流中徑向葡萄糖濃度分佈數值結果比較，右上角是Kirkpatrick et al.(1980)的結果

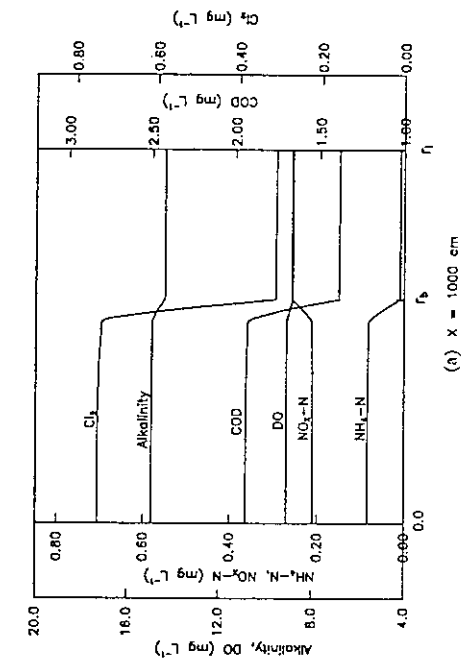


(a) $x = 100 \text{ cm}$

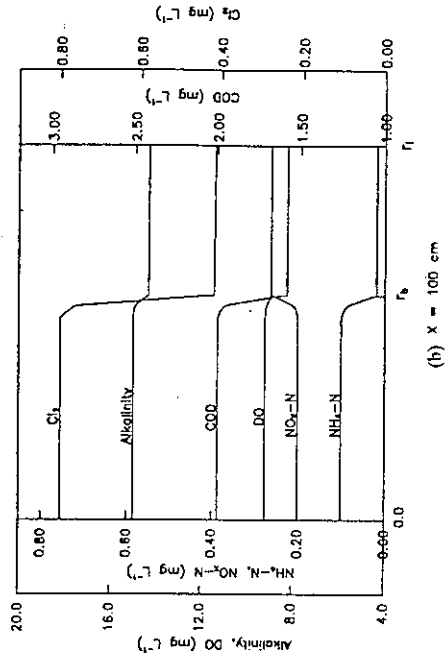
圖4 層流中在距離100cm及1000cm上之各物質徑向濃度分佈(Re=1000)



(b) $x = 1000 \text{ cm}$



(a) $x = 1000 \text{ cm}$



(b) $x = 100 \text{ cm}$

圖5 紊流中在距離100cm及1000cm上之各物質徑向濃度分佈(Re=35000)

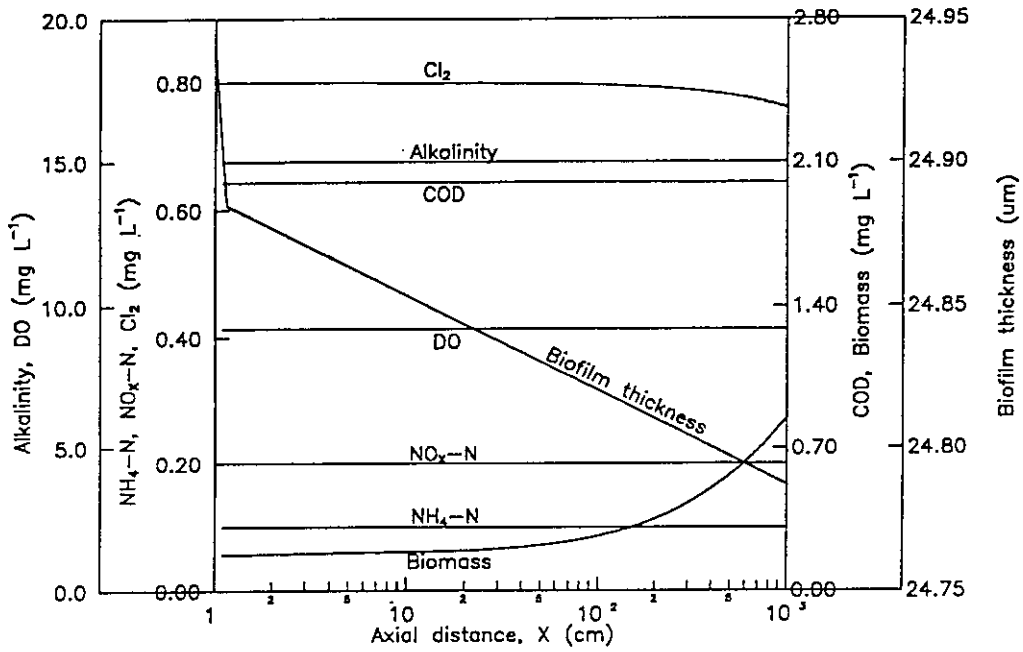


圖6 層流中各物質隨距離改變之軸向平均濃度分佈(Re=1000)

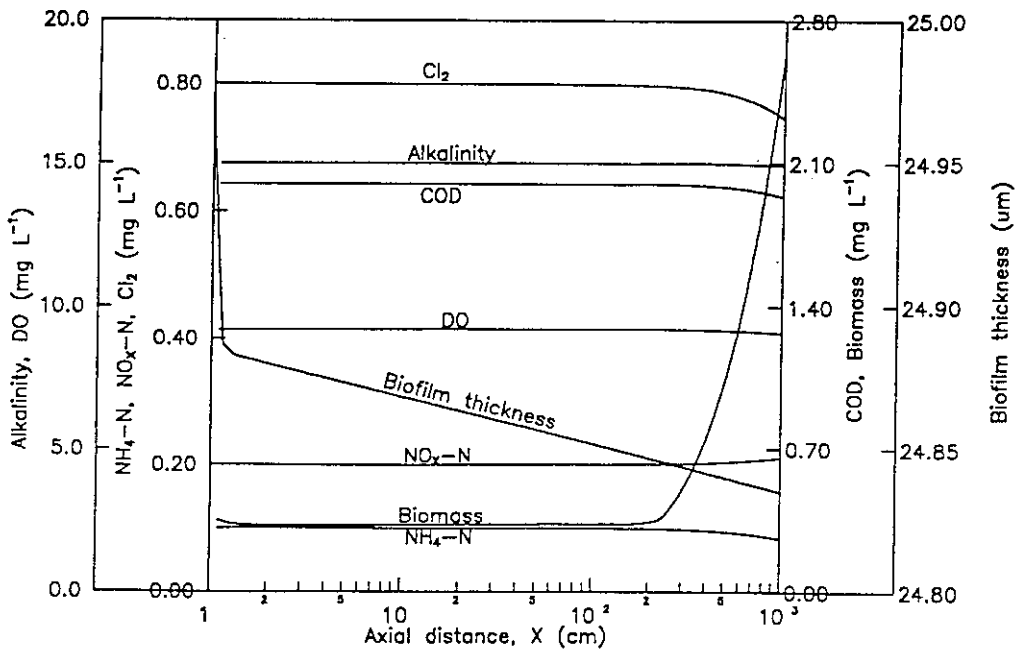


圖7 紊流中各物質隨距離改變之軸向平均濃度分佈(Re=35000)