

### Ⅲ プロジェクト研究報告

## 都市廃水（二次処理水）の林地還元に関する試験研究

山中 啓・内藤 正明

代表者	教授	辰 巳 修 三	（農 林 学 系）
		（昭和55年9月12日死去）	
同	教授	山 中 啓	（応用生物化学系）
		（辰巳の死後、代表者交替）	
分担者	教授	内 藤 正 明	（応用生物化学系）
同	助教授	藤 井 宏 一	（生 物 科 学 系）
同	助教授	森 下 豊 昭	（応用生物化学系）
同	講 師	天 田 高 白	（農 林 工 学 系）
同	研究員	乙 間 末 広	（国立公害研究所）

### はじめに

本研究は昭和54、55年の兩年度にわたり、文部省科学研究費試験研究（課題番号486006）として研究費の配分を受けて行ったものである。その研究成果は、既に報告書<sup>1)</sup>としてまとめたので詳細はそれを参照して頂きたい。本報では、内容を2つに大別し、前半の周辺影響を山中が執筆し、後半の流出水量・水質予測モデルを内藤が執筆した。

### 1. 研究の目的

我が国の水需要は生活用水、工業用水ともに著しく激増した。生活用水は生活様式の変化により水節約型から大量消費型に変わり、上水の必要量が著しく増大した。工業用水も必要量が増大したが、これらの水需要の増加速度は水の供給量の増加速度に比例せず、供給量の確保は益々困難になってきている。また水利用の増加は排水量の増加となり、排水処理施設への負荷量が増大し、処理施設は大型化した。更に河川、海域へ放流還元される処理排水量も増大し、二次処理で除去できないN、P等の水域環境への負荷が水域環境を著しく悪化させる要因として問題視されている。

以上の観点より、都市廃水を処理後、更に三次処理をして自然環境に還元すれば、水資源の涵養になるが、三次処理を経済的に行う方法は現在まだ開発されていない。そこで、処理水を浄化し乍ら還元する方法として、処理水の陸地（土壌）還元法が考案された。

本研究では、処理水を林地でスプリンクラー方式を採用して撒水する方式で設置された施設を利用して、本方式による適正撒水システムを水量・水質予測モデルを用いて開発するとともに、今後

発生の予測される周辺環境への影響を予測して、その対策を前もって考究することを目的とした。

## 2. 試験施設および撒水

本研究に使用した施設は、建設省四国地方建設局が「土器川水質保全対策調査」にもとづいて、香川県木田郡牟礼町大字羽間の民有林地に設置したものである。処理水の撒水方式としてスプリンクラー方式が採用され、貯水槽（75m<sup>3</sup>）より並列式配管により上、中、下3段、各段左右に各2基、計12基のスプリンクラーにより、撒水地域17haに撒水する均等分撒水方式である。

使用した処理水は高松市下水処理場の高速沈澱池（終沈）より採水され、現地に運ばれた。その試験地の概要を図1に示す。

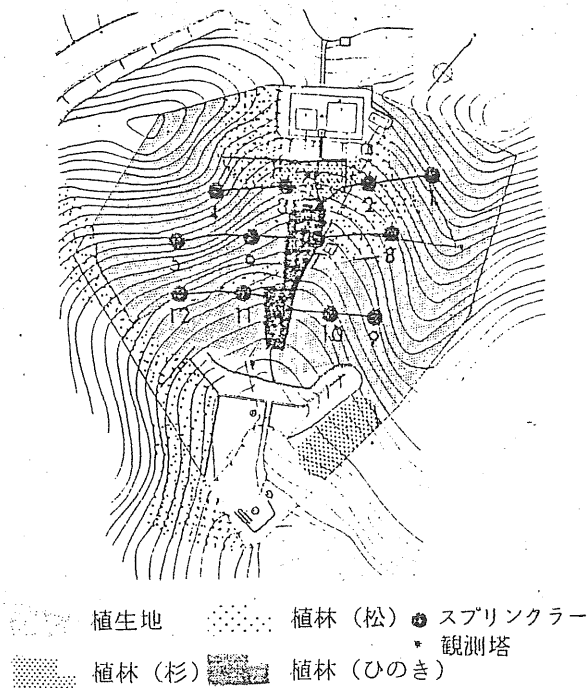


図1 林地試験地平面図

撒水は52年4月から河川水による試験撒水を繰返した（1,270t）後、11月より処理水の撒水が開始された。52年度に1,160t、53年度に2,540tが撒水された後、環境影響の調査を54年度より開始したことになる。54年度は5日あるいは10日の連続撒水の影響調査をくり返して実施し、撒水回数62回、撒水総量1,300tである。

以上の連続撒水試験における地下水の回収その水質分析は受託研究の一部として香川大学教育学部系山東一教授が分担され、その結果をもとに水量・水質予測モデルの設計がされた。

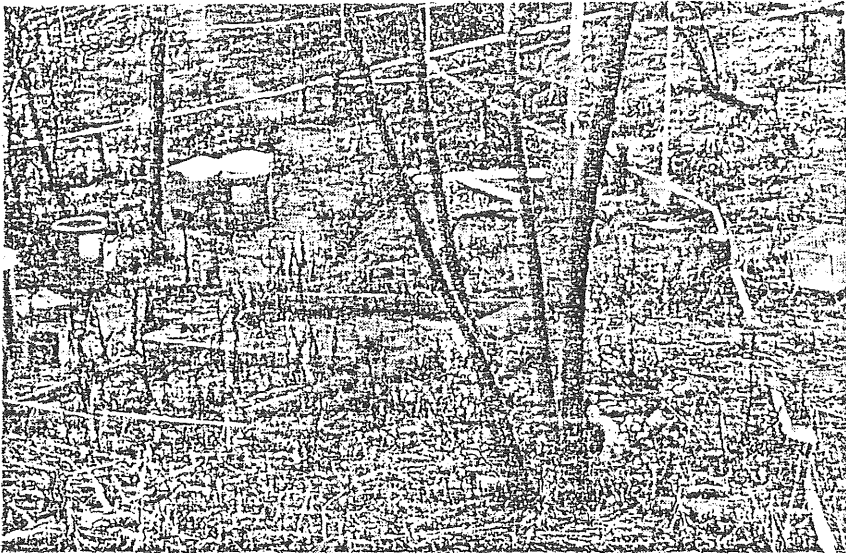


写真1 スプリンクラー撒水用配管

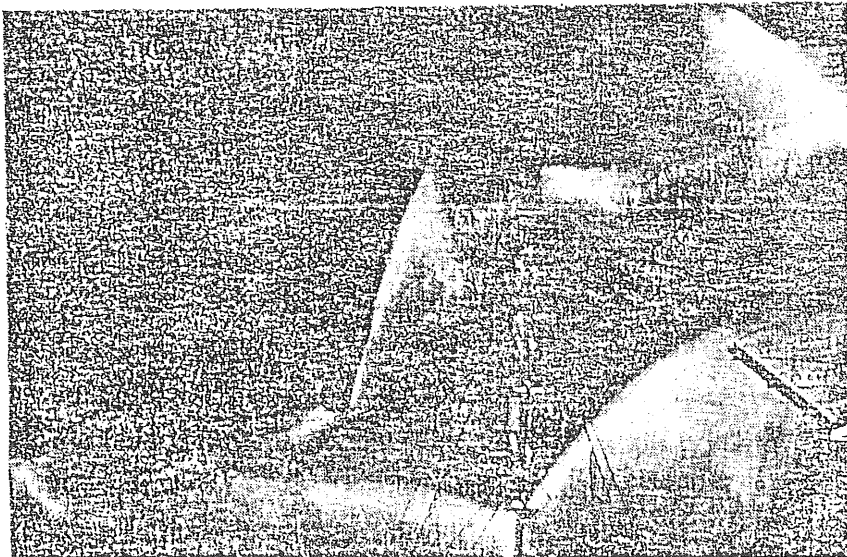


写真2 撒水状況

### 3. 研究結果

#### I. 処理水撒水による環境影響

##### (1) 土壌 (分担研究者 辰巳)

試験地内51地点について、下刈未分解層、分解層、表層、20cm層の4階層に分けて試料を採取した。分析項目は、pH (水、N-KCl)、全窒素、炭素、腐植分析 (0.5 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>可溶部、0.5% NaOH可溶部、フルボ酸、腐植酸、Cl、Na、K、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn、Mn、Cdである。全体に撒水の影響を大きく受けていることが判った。すなわち、スプリンクラーにより処理水の到達している撒水区と到達しない試験地域内外縁の非撒水区に上記成分について明確な差異が生じている。pHは撒水により、中性に近づいた (pH (KCl) 5.2~6.3、非撒水区では3.9~5.1)。使用した処理水は流入生下水に海水が混入しているため、NaおよびClの含量が高く、かつその量は絶えず変動しているが (765~1,115 ppm Cl)、NaおよびClはともに撒水区の土壌に吸着、蓄積された (Cl、200~1,100 ppm; Na<sup>+</sup>、300~1,400 ppm)。これは処理場の特異な事情によるもののため、特記すべき項目ではない。しかし、海岸に面して処理場をもつ地域、都市では、海水の混入は常に留意すべき点であろう。

K<sup>+</sup>は処理水中の変動も少なく (24~36 ppm)、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>とは挙動を異にし、撒水全区域に広範囲検出された。Ca<sup>2+</sup>は撒水区の方が非撒水区よりも多かった。非撒水区では、表層および20cm層とも500 ppm前後と変化が少ないが、撒水区では一般に1,000 ppm以上あり、特に表層土では3,000~5,000 ppmと非常に高くなっている。しかし、Ca<sup>2+</sup>は表層に蓄積され、下層土へは移動せず、Ca<sup>2+</sup>は土壌によく吸着され、下層に溶脱されにくい傾向が顕著である。これらの元素とは逆に、Feは処理水中にほとんど含まれず、土壌中に存在していたものが、反復された撒水により溶脱されるため、撒水区よりも非撒水区が含量が高い。

有機成分に関しては、汚水中の有機物 (特に汚泥が混入しているため、通常の処理水よりは多い) が土壌に散布され、比較的速やかに分解される。土壌への水分、有機物の供給が増すため、植生が十分に繁茂し、これが土壌有機物含量を高め、同時にその分解が進行する。それは階層別C/Nを分析した結果、表層腐植層のC/Nを指標として分解促進の程度の推定が可能である。撒水区の腐植化の進行は非撒水区よりも早いという結果を得た。

##### (2) 土壌微生物 (分担研究者 山中)

撒水区の土壌では一般細菌数が  $1.5 \sim 6.4 \times 10^7$  /g 乾土であり、非撒水区の  $1.4 \sim 9.6 \times 10^6$  より多く、工事後、撒水により土壌は急速に回復し、肥沃化したことを示している。

##### (3) 植物体内成分への影響 (分担研究者 辰巳)

植物生長量への影響は受託研究の分担研究者 (香川大学農学部 吉田重幸助教授) が分担されたもので、吸収された植物体内成分について、主として12元素につき分析した。特に本処理水の特徴であるNa、Clの含有の影響を受け、撒水区の植生におけるNa、Clの含有量が特に高く、これらが移行していることが明らかになった。

##### (4) 土壌動物への影響 (分担研究者 藤井)

試験地内で採取された小動物は、クモ、ダニ、等脚類、端脚類、唇脚類、トビムシ、鞘翅類、アリ等が常に含まれた。個体数としては、ワラジムシ、ダンゴムシ、トビムシ、アリ、ダニ類が多く、全体的には撒水区の方が非撒水区より個体数が多かった。

#### (5) 処理水撒水による周辺環境への影響 (分担研究者 山中)

二次処理水中には、一般細菌が数万～十数万個/ml 含まれ、大腸菌群も含まれているため、スプリンクラー撒水法によりこれらの細菌類が空中に飛散し、大気の微生物汚染を生ずるおそれがあるため、空中落下菌法により試験地内外の空気汚染を調査した。

その結果、時期によっては試験地内が著しく汚染されていることが明白になった。この微生物汚染は処理水撒水が原因であることは明らかであるが、撒水時との時間的關係、気象条件との關係は明白ではない。また試験地内の微生物による汚染の蓄積は認められず、撒水を中止すれば、微生物数は急速に減少した。試験地外の大気は正常であったので、外部への拡散は本施設ではまずないであろうと推測した。

今後、この方式が各地で実用化される場合、留意すべき環境影響の1つであろう。

#### II 水量、水質予測モデルの同定 (分担研究者 内藤、乙間)

##### (1) 予測モデルの同定について

林地撒水された二次処理水が土壤に浸透した後その水量、水質がどのようになるかを定量的に把握することは、今後実際に林地還元を実施するに当って適正な運転計画や操作方式を見出すのに不可欠であろう。しかし、このことが容易でないのは、従来定性的な調査、分析はいくつか見られるものの、これを定式化した例が皆無に近いことでも想像される。これは数式化する理論そのものの難しさというより、定量化に耐える実測データをうることの困難さによっているといえよう。本解析もその意味でまだ極めて不完全と言わざるをえないが、得られたデータの範囲で最大限妥当なモデル式が導かれたと言えよう。

##### (2) 水量予測モデル

流れ系の中での水量変化をシミュレートする数式モデルとしては各種のものが考えられるが、ここではボックスタイプのもを採用する。

コンパートメントモデルではこの対象地域を幾つかの仮想ボックス、すなわちコンパートメントに区切るのであるが、高低差の大きい流下方向には12に区切り、高低差の少ない横方向は均一と考え1つのコンパートメントとする。さらに、鉛直方向には地表から不透水層までの対象地層を3つに区切るが、不透水層の地形を考慮し下層のコンパートメントを上中層に比して小さなものとする。

水位、水質の測定点である上井戸、中井戸の位置はそれぞれ上流より第5、第11列のコンパートメントに相当する。なお撒水の及ぶ領域は上流より4までで、第1から、第9列までとする。

モデル化された領域の流動過程を数式モデルとして表現するため各コンパートメントにおける水量支を<上層 ( $i = 1$ )、中層 ( $i = 2$ )>

$$\frac{d\tilde{V}_{i,j}^w}{dt} = f_{i-1,j} - f_{i,j}, \quad i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 12 \quad (1)$$

ここに

$\tilde{V}_{i,j}^w$ :  $i$  層  $j$  列に蓄えられている水のうち最終的に系外へ流出する水の量。ここでは有効水量と称す [ $L^3$ ]。

$f_{0,j}$ : 撒水量と降雨量の和から蒸発、表面流出を引いたもののうち、 $j$  列へ浸透する量 [ $L^3/T$ ]。

$f_{i,j}$ :  $i$  層  $j$  列から  $i+1$  層  $j$  列への流出量 [ $L^3/T$ ]。

<下層 ( $i=3$ )>

$$\frac{d\tilde{V}_{3,j}^w}{dt} = g_{j-1} - g_j + f_{2,j}, \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (2)$$

ただし、 $g_0 = 0$  (3)

$$g_{12} = g_e + g_l \quad (4)$$

ここに、 $g_j$ : 下層  $j$  列から下層  $j+1$  列への流出量 [ $L^3/T$ ]、 $g_e$ : 下層12列 (最終列) から流出管を通過して系外に出る水量 [ $L^3/T$ ]、 $g_l$ : 下層12列 (最終列) 底部からの漏水量 [ $L^3/T$ ]。

ここで、有効水頭を定義するが、この有効水頭は各コンパートメント間の水の流れ方向や量を示す  $f_{i,j}$  や  $g_j$  を決定するために重要な役割をはたす。

$$h_{i,j} = \frac{\tilde{V}_{i,j}^w}{\tilde{\varepsilon} A_{i,j}} = \frac{\tilde{V}_{i,j}^w}{(\varepsilon - \varepsilon_w) A_{i,j}}, \quad (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 12) \quad (5)$$

ただし、 $A_{i,j} = \begin{cases} a_j b_j, & i = 1, 2 \\ a_j c_j, & i = 3 \end{cases}$  (6)

ここに、 $h_{i,j}$ : 有効水頭 [ $L$ ]、 $\tilde{\varepsilon}$ : 間隙率から自然保水率を差引いたもの、ここでは有効間隙率と称す〔1〕、 $\varepsilon$ : 間隙率〔1〕、 $\varepsilon_w$ : 自然保水率〔1〕、 $A_{i,j}$ :  $i$  層  $j$  列の断面積 [ $L^2$ ]。

すなわち、有効水頭とは、有効水量のみをコンパートメントに入れた時、湿潤する土柱の高さを示す。この有効水頭を用いて (1)、(2) 式は書き改められる。

コンパートメント間の鉛直方向の流れは上部のコンパートメントの有効水質に比例するものと仮定する。すなわち

$$f_{i,j} = k_v A_{i,j} h_{i,j}, \quad i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 12 \quad (7)$$

ここに、 $k_v$ : 鉛直方向の流動係数 [ $L/T$ ]

水平方向の流れは降り合うコンパートメントの有効水頭の高さ関係によって3つのケース (図6参照) が考えられる。それぞれのケースについて  $g_j$  を次のように仮定する。

$$g_j = k_h s_j \Delta h_j, \quad j = 1, 2, \dots, 11 \quad (8)$$

$$\text{ただし, } \Delta h_j = \begin{cases} h_{3,j}, & \text{for ケース 1} \\ (h_{3,j} + z_j) - (h_{3,j+1} + z_{j+1}), & \text{for ケース 2, 3} \end{cases} \quad (9)$$

$$s_j = C_j \cdot |\Delta h_j| \quad (10)$$

ここに,  $k_h$ : 水平方向の流動係数 [1/T]

最終列における流出は, 流出管の標高と有効水位との差に比例するものとする。

$$g_e = \begin{cases} k_e [(h_{3,12} + z_{12}) - z_e], & \text{for } h_{3,12} + z_{12} < z_e \\ 0, & \text{for } h_{3,12} + z_{12} \leq z_e \end{cases} \quad (11)$$

ここに,  $k_e$ : 流出管の流出係数 [L<sup>2</sup>/T]

$z_e$ : " の標高 [L]

$g_l$  についても  $g_e$  と同様に考える。ただし漏出口を最終列下層の底と考えているため, 漏出流は最終列下層の有効水頭に比例する。

$$g_l = k_l \cdot h_{3,12} \quad (12)$$

ここに,  $k_l$ : 漏出口の流出係数 [L<sup>2</sup>/T]

以上で散水の地中浸透及び流出水量をシミュレートするモデル式が揃ったので, 散水・降雨量 ( $f_{0,j}$ ), 諸パラメータ ( $\tilde{\epsilon}$ ,  $k_v$ ,  $k_h$ ,  $k_e$ ,  $k_l$ ), 及び有効水頭の初期値 ( $h_{i,j}$ ) が与えられると (1)~(12) までの一連の式を解くことにより系からの出力である流出流量 ( $g_e$ ), 漏出流量 ( $g_l$ ) が時間の関数として求めることができる。

本モデルは, 基本的には, 降雨流出解析でよくつかわれるタンクモデル (菅原, 1972; 1979) を単純化したものと同一である。タンクモデルの特徴は数学的には比較的簡単な構造であるが, あまり無理とは思えない物理的意味をもち, かつ, 計算結果が実測とよく一致するところにある (菅原 1972)。ここでは散水された水は上・中層のコンパートメントでは鉛直方向のみに流れ, 下層に到達して初めて下流へ流れるとしている。

すなわち, モデル構造を単純化するため水の流れを鉛直浸透過程と水平浸透過程に分離しているのが特徴である。また, 最終列タンクからの漏水のみを考慮していて, それより前にある他の列における系外への流出入はとりあえず零と置いている。ただし流出入に関する情報 (データ) が入手されればこれをモデルに組込むことは容易である。

上述の水量予測数式モデルには次の5つのパラメータが含まれている。

$\tilde{\epsilon}$ : 有効間隙率,  $k_v$ : 鉛直方向の流動係数,  $k_h$ : 水平方向の流動係数,  $k_e$ : 流出管の流出係数,  $k_l$ : 漏出口の流出係数



このうちいくつかは現場の奏水実験データ以外のラボ実験等の情報から推定可能である。そこで以下に利用可能な各種のデータを用いてそれぞれのパラメータの推定を試みる。

牟礼土壌の物理的性質は多く測定されており、その情報は $\tilde{\varepsilon}$ を推定するに十分である。土壌の性質は場所によって異なるが地下3 m地点における土壌の性質を代表的に用いると

$$\text{間隙率 } \varepsilon = V_a + V_w = \frac{\theta'}{\theta + 1} = 0.367$$

$$\text{自然保水率 } \varepsilon_w = V_w = \frac{\tau_s \omega}{\tau_w (\theta + 1)} = 0.252$$

$$\text{有効間隙率 } \tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \varepsilon_w = V_a = 0.115$$

となる。

鉛直方向の流動係数を直接推定出来る鉛直浸透速度に関するデータは測定されていない。したがってここでは、上層・中層のコンパートメントの平均滞留時間とこのパラメータを関連づけ、平均滞留時間からこのパラメータを推定する。

平均滞留時間はインパルス応答の一次モーメントとして求めることができる。

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot f_{2,j} \delta \, dt = \frac{2 \tilde{\varepsilon}}{k_v} \quad (13)$$

$$\text{または } k_v = \frac{2 \tilde{\varepsilon}}{\bar{t}}$$

土壌の水浸透速度は種々報告(木下・富永, 1979; 鈴木 et al., 1980)されているが、土質、降雨(撒水強度)によって著しく異なる。ここでは上・中層のコンパートメント高さ2 mを通過するのに平均6時間要するものとする。すなわち、 $\bar{t} = 6.0$ であり、 $k_v = 0.0383$ となる。

漏水口の流出係数に関しては全く情報がない。しかしここでは流出管の流出係数の $\frac{1}{10}$ 程度と仮定し

$$k_l = 0.1 k_v \quad (14)$$

とする。

既存の知見やラボデータから一応パラメータが推定されたが、残る水平方向の流動係数と流出管の流出係数の2つのパラメータはフィールド撒水実験データより同定する。すなわちモデル式によるシミュレーション結果が実測データになるべく近くなるような値としてパラメータを選定すると、

$$k_{h,opt} = 0.121, \quad k_{e,opt} = 8.38 \quad \text{となる。}$$

昭和53年5月7日の撒水データを使ったシミュレーション結果と、測定データを示したものが図2である。図からもわかるように流出管に誘導される水量に関してはかなりよく再現できている。

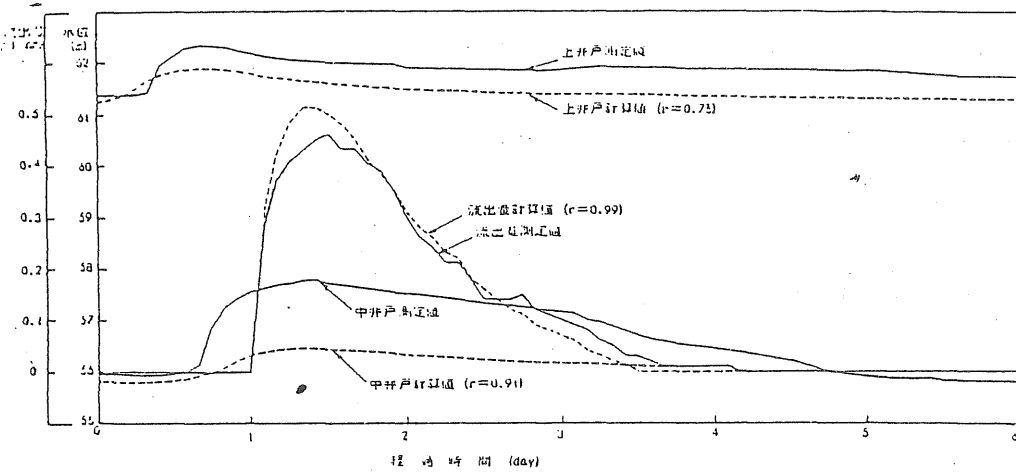


図2 井戸水位及び流出水量のシミュレーション結果と実測値

相関係数からみても、 $r = 0.99$  と良く本シミュレーションモデルが流出水量予測モデルとして妥当であることを示している。

上井戸・中井戸の水位に関しては測定値と計算値の間に差がみられる。しかしその差はランダムでなく、計算値の変化パターンは一致している。このことはそれぞれの相関係数が  $r = 0.76$ 、 $r = 0.91$  と高いことから言え、シミュレーションが水位の変化パターンをとらえていることを示している。

全体の水収支をみると、流出水量は全撒水量の21%、浸透水量の35%と少なく、逆に漏出水量が意外に多いことがわかる。この比率は常に一定でなく撒水パターンや降雨状態により変化するものと思われるが現時点ではデータ数の不足から、その間の一般的な関係を見出すまでには至っていない。

### III 水質予測モデルの同定

水質変化をシミュレートするための水質予測モデルの定式化に対しても、水量変化モデルに対すると同様のコンパートメント構造を採用する。各コンパートメント内は集中定数系、すなわち水質は均一であると仮定する。

土壌に浸透した汚染物質は液相に溶解したまま系外へ流出する部分と固相に吸着されたり、反応によって態を変えたりして液相から消失する部分に分けられる。

いま、 $i$  層  $j$  列コンパートメントの液相における  $k$  汚染物質の濃度を  $C_{i,j,k}$  とし、これらを成分とするベクトルを  $C_{i,j}$  とする。同様に固相に関して、 $C_{i,j}$  を定義するが、固相の濃度とは単位固相体積当りに液相と交換可能な状態で蓄積されている汚染物質の量をいう。水質変化モデル式は各コンパートメントに対する液相汚染物質収支をとることによって、〈上層・中層〉

$$\frac{d(V_{i,j}^w \cdot C_{i,j})}{dt} = f_{i-1,j} C_{i-1,j} - f_{i,j} \cdot C_{i,j} + V_{i,j} (R_{ads} + R_{abs} + R_{lea} + R_{rea}) \quad (15)$$

ここに、 $C_{0,j}$ ：撒水または降雨の水質、 $(M/L^3)$ 、 $R_{ads}$ ：吸着速度項  $(M/L^3T)$ 、 $R_{abs}$ ：植物等による吸収速度項  $(M/L^3T)$ 、 $R_{lea}$ ：溶出速度項  $(M/L^3T)$ 、 $R_{rea}$ ：反応速度項  $(M/L^3T)$ 、  
 <下層>

$$\frac{d(V_{i,j}^w \cdot C_{3,j})}{dt} = g_{i-1} C_{i-1} - g_i C_i + f_{2,j} C_{2,j} + V_{i,j}^w (R_{ads} + R_{abs} + R_{lea} + R_{rea}) \quad (16)$$

$i = 1, 2, \dots, 12$

ここに、 $C_i$ はコンパートメント間を流れる流量  $g_i$  の水質であり流出する方のコンパートメント内の水質に等しい。

土質予測モデルも水質モデルを導いたと同様に、固相における汚染物質の収支をとることによって次式の如く導かれる。

$$\frac{d(V_{i,j}^s \cdot C_{i,j}^*)}{dt} = V_{i,j}^s (R_{ads}^* + R_{abs}^* + R_{lea}^* + R_{rea}^*) \quad (17)$$

$i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 12$

ここに、 $V_{i,j}$ ： $i$ 層  $j$ 列のコンパートメント内の土の体積、 $(L^3)$ 。

以上のモデルに従い窒素循環系を例として上記モデルを適用し、その水質変化を試算した。その結果の一例を図3に示すが、現時点ではこの計算結果を裏付けする水質測定データが得られていないので、その妥当性の詳細な検討は今後に残された課題となっている。

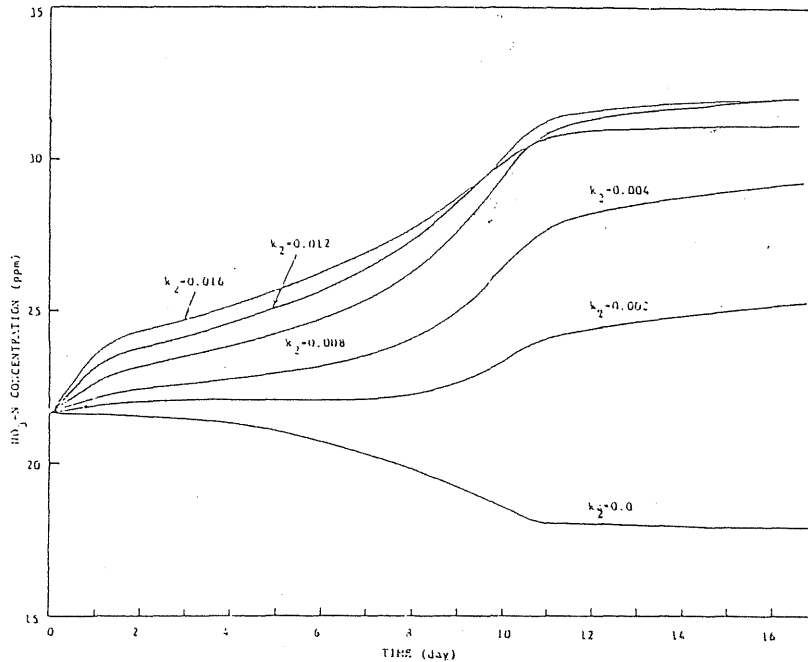


図3 下層最終列コンパートメントの硝酸性窒素濃度

#### 4 まとめ

本試験研究は、将来に実用化が予想される都市廃水（二次処理水）の林地還元における適正散水システムを開発することを主目的とし、併せて処理水散水に伴う各種の環境影響を予測することを目標として実施されたものである。

水量・水質の予測モデルの設定その解析は実用化に当って、最初に解決すべき問題であるが、基礎とすべき実測数値が乏しく、モデルの設定が困難である。今回その手掛りが得られたので、同様の他の施設についての応用発展について大いに期待している。

環境影響については、土壌および植生ならびに浸透水水質へ与える直接的影響は当然であるが、散水による問題点の一部は明らかになった。間接的影響として、昆虫その他小動物、土壌動物等への影響を調査した。

また当初全く予想されていなかった微生物汚染について調査した。これは直ちに健康障害を与えるものではないが、ウイルス混入の可能性をも考える時、biohazardの1因として考慮すべき問題となるであろう。

最後に、本試験研究は前環境科学研究科長故辰巳修三教授が取組まれたテーマの1つであり、長期にわたり継続実施の必要性を提唱されて試験研究として実施されたものである。研究半ばにして不幸にも不帰の客となられた辰巳修三教授の御霊前に謹んで本報告を捧げ、御冥福を心からお祈りする次第である。

#### 引用文献

- 1) 故辰巳修三・山中 啓：都市廃水（二次処理水）の林地還元に関する試験研究。昭和54・55年度文部省科学研究費試験研究報告書，90 pp. (1981).