## II-111 地下注入処理における物質収支基礎式について
### ー地下２層化流動に対する考察ー

京都大学工学部 正員 合田 健

**研究対象と応用面**

用水の地下還元，廃水の地下注入処理などは，すでに水資源保護や用廃水処理の具体的方法として実施されているが，その将来性や応用範囲，工学的意義はとなると，地層中での流動にともなう含有物質の挙動が明確でないため，不明の点が多い。また，海岸貯水池，河口湖の場合，その堤体や底質を通しての塩分の拡散移動がどのていどあり，それによって池内の淡水質がいかなる影響をうけるか，という問題も基礎的には同じ種類のテーマであって，結局，充てん層内の流動に伴なう物質収支を考えることに帰する。この基礎研究が確立すれば，以上のほか井戸や集水管きょによる地下水取水と，それに伴なう水質的問題，各種のろ過による浄化機構，圧入液体を障壁とする塩水侵入阻止の問題など，広い分野にわたって寄与することができる。

**研究のバックグラウンド**

流量，流速，圧力など水理量のみに関する問題は，従来から多くの研究者により数々の業績がある。塩分の移動が加わった場合についてもかなり研究が進んでいるが，マクロな立場からの考察が多く，微視的にはまだよくわかっていない。筆者は，前に砂ろ過の機構を解明するため，浸透水流の運動と質量保存に関して解析し，砂層による物質の物理的阻止機構（土学誌37巻1，3号），吸着脱着機構（土学誌40巻12号）を論じた。また最近，海岸貯水池や河口２層流の問題に関連して，２層流における上層と下層に対する運動量，質量および塩分の各保存法則を検討し，実測データの説明を試みた（昭38.11.土学会関西支部講演会で大塚が講演）。

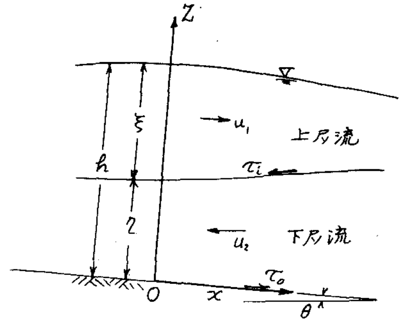
これらの基礎に立って，地下水流が塩水層と淡水層とに区別されて流動している場合を手初めにとりあげてみた。そもそも初めに一般的な基本法則を論ずべきところであるが，水質学が関与する物理，化学的諸現象を具体的に式化することはそう簡単ではないので，それに近づく1過程としてこの考察を行なったものである。

**考えかた**

淡水と塩水が接触する場合，あるいは飽和地下水面以下に密度の異なる液体が注入されるような場合，それが充填層内であるため表流水でみられるような強混合は起らず，層化流動の状態での物質輸送が行なわれやすい。この場合物質は，まずそれぞれの層内で移流，拡散，抑留，吸着吸収，自己減衰などによって収支が行なわれ，一方２層の境界面を通して移流，拡散により相互に移動する，とみることができる。塩分だけを対象に考える場合，問題はより単純化でき，抑留や吸着吸収，自己減衰を無視できる場合が多い。沿岸地下水と侵入海水との接触のような場合はその好例である。こうした場合，現象説明の出発点をなるべくミクロな視点としたいならば，ローカルに成立する運動，連続，および塩分保存の各法則をまず考察しなければならない。その考えかたは，通常の地表２層流の場合の基礎式を，充填層の場合に拡張すればよい。

(1) 通常の２層流における基礎式

右図に示すような2層流模型図と記入記号を用い，
2次元流としてそれぞれの基礎方程式を導びくと，




上層，質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_\eta^h \rho_1\,dz + \frac{\partial}{\partial x}\int_\eta^h \rho_1 \upsilon_1\,dz = \frac{\partial}{\partial x}\int_\eta^h K_{x\rho}\frac{\partial \rho_1}{\partial x}\,dz + \left[K_{z\rho}\frac{\partial \rho_1}{\partial z}\right]_\eta^h$$

〃 ，塩分保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_\eta^h s_1\,dz + \frac{\partial}{\partial x}\int_\eta^h s_1 \upsilon_1\,dz = \frac{\partial}{\partial x}\int_\eta^h K_{xs}\frac{\partial s_1}{\partial x}\,dz + \left[K_{zs}\frac{\partial s_1}{\partial z}\right]_\eta^h$$

〃 ，運動量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_\eta^h \rho_1 \upsilon_1\,dz + \frac{\partial}{\partial x}\int_\eta^h \rho_1 \upsilon_1^2\,dz = -g\cos\theta\frac{\partial}{\partial x}\int_\eta^h \rho_1(h-z)\,dz - \tau_i + g\sin\theta\int_\eta^h \rho_1\,dz$$

下層，質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\eta \rho_2\,dz + \frac{\partial}{\partial x}\int_0^\eta \rho_2 \upsilon_2\,dz = \frac{\partial}{\partial x}\int_0^\eta K_{x\rho}\frac{\partial \rho_2}{\partial x}\,dz + \left[K_{z\rho}\frac{\partial \rho_2}{\partial z}\right]_0^\eta$$

〃 ，塩分保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\eta s_2\,dz + \frac{\partial}{\partial x}\int_0^\eta s_2 \upsilon_2\,dz = \frac{\partial}{\partial x}\int_0^\eta K_{xs}\frac{\partial s_2}{\partial x}\,dz + \left[K_{zs}\frac{\partial s_2}{\partial z}\right]_0^\eta$$

〃 ，運動量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\eta \rho_2 \upsilon_2\,dz + \frac{\partial}{\partial x}\int_0^\eta \rho_2 \upsilon_2^2\,dz = -g\cos\theta\int_0^\eta(\rho_1\xi + \rho_2\eta - \rho_2 z)\,dz + (\tau_0 + \tau_i) + g\sin\theta\int_0^\eta \rho_2\,dz$$

$\rho$は密度，$\upsilon$は流速，$s$は塩分，$\tau$は境界面剪断力をあらわし，添字1，2はそれぞれ上，下層に対応する。$K_{x\rho}$，$K_{z\rho}$は$x$，$z$方向の$\rho$に関する拡散係数，$K_{xs}$，$K_{zs}$は$s$に関する拡散係数であるが，密度が塩分輸送のみによって変化する場合は$K_{x\rho}=K_{xs}=K_x$，$K_{z\rho}=K_{zs}=K_z$としてよく，質量保存式は簡単な表現になり，つぎのように書くことができる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} = 0 \quad (\text{上層}) \quad , \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_2}{\partial x} = 0 \quad (\text{下層}) \quad ; \quad q_1 = \bar{u}_1\xi, \quad q_2 = \bar{u}_2\eta$$

(2) 充填層内の2層流

上と同じ考えかたで地下2層流に対する基礎式を求めるにあたり，$\theta=0$として，定常時にはダルシーの法則が成立すること，拡散はやはり塩分について$x$，$z$方向に行なわれること，に基づき誘導，考察を行なった。この場合は，見かけの流速を$u'$とした場合，運動方程式の表現が

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \upsilon') = \phi M - \phi\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\frac{\partial^2 \upsilon'}{\partial x^2} - \frac{g\phi}{k}\rho\,\upsilon' \quad \left(\begin{array}{l}\phi:\text{空隙率},\ M:\text{質量力による加速度}\\ \mu:\text{粘性係数},\ k:\text{透水係数}\end{array}\right.$$

であらわされることを考慮し，上記の6式にあたる基礎式をみちびいた。しかしこのような形では，積分表現のため利用困難なので，$\xi$，$\eta$ の$x$方向変化が局部的には無視しうるとして，$\rho$，$\upsilon'$，$s$などを$\rho=\bar{\rho}+\rho''$，$\upsilon'=\bar{\upsilon}'+\upsilon''$，$s=\bar{s}+s''$のように平均値と変動値の和としてあらわし，変形を試みた。詳細は講演にゆずる。