

京都大学工学部 正員

岩佐義朗

京都大学工学部 正員

○武内 等

1 まえがき

淡水と塩水のように、混合可能な流体の浸透層内における拡散現象は、主として流体分子の熱的擾乱による分子拡散と浸透層の複雑な流路を流過することによる分散とに分けられる。前者は、後者に比べて省略されるほどに小さく、浸透流の拡散は、浸透層の幾何学的特性および流速に支配される。

浸透流の分散についての従来の研究には、質量保存則から分散物質の拡散方程式を導くものと²⁾、浸透層の空隙構造あるいは流体素分の運動を統計的に検討し、中心極限定理により、分散物質が流れ方向(縦方向)、横方向に正規分布することを導くものとがある。本研究では、等方等質な浸透層において、³⁾、⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾、⁷⁾、⁸⁾、⁹⁾、¹⁰⁾、¹¹⁾、¹²⁾、¹³⁾、¹⁴⁾、¹⁵⁾、¹⁶⁾、¹⁷⁾、¹⁸⁾、¹⁹⁾、²⁰⁾、²¹⁾、²²⁾、²³⁾、²⁴⁾、²⁵⁾、²⁶⁾、²⁷⁾、²⁸⁾、²⁹⁾、³⁰⁾、³¹⁾、³²⁾、³³⁾、³⁴⁾、³⁵⁾、³⁶⁾、³⁷⁾、³⁸⁾、³⁹⁾、⁴⁰⁾、⁴¹⁾、⁴²⁾、⁴³⁾、⁴⁴⁾、⁴⁵⁾、⁴⁶⁾、⁴⁷⁾、⁴⁸⁾、⁴⁹⁾、⁵⁰⁾、⁵¹⁾、⁵²⁾、⁵³⁾、⁵⁴⁾、⁵⁵⁾、⁵⁶⁾、⁵⁷⁾、⁵⁸⁾、⁵⁹⁾、⁶⁰⁾、⁶¹⁾、⁶²⁾、⁶³⁾、⁶⁴⁾、⁶⁵⁾、⁶⁶⁾、⁶⁷⁾、⁶⁸⁾、⁶⁹⁾、⁷⁰⁾、⁷¹⁾、⁷²⁾、⁷³⁾、⁷⁴⁾、⁷⁵⁾、⁷⁶⁾、⁷⁷⁾、⁷⁸⁾、⁷⁹⁾、⁸⁰⁾、⁸¹⁾、⁸²⁾、⁸³⁾、⁸⁴⁾、⁸⁵⁾、⁸⁶⁾、⁸⁷⁾、⁸⁸⁾、⁸⁹⁾、⁹⁰⁾、⁹¹⁾、⁹²⁾、⁹³⁾、⁹⁴⁾、⁹⁵⁾、⁹⁶⁾、⁹⁷⁾、⁹⁸⁾、⁹⁹⁾、¹⁰⁰⁾、¹⁰¹⁾、¹⁰²⁾、¹⁰³⁾、¹⁰⁴⁾、¹⁰⁵⁾、¹⁰⁶⁾、¹⁰⁷⁾、¹⁰⁸⁾、¹⁰⁹⁾、¹¹⁰⁾、¹¹¹⁾、¹¹²⁾、¹¹³⁾、¹¹⁴⁾、¹¹⁵⁾、¹¹⁶⁾、¹¹⁷⁾、¹¹⁸⁾、¹¹⁹⁾、¹²⁰⁾、¹²¹⁾、¹²²⁾、¹²³⁾、¹²⁴⁾、¹²⁵⁾、¹²⁶⁾、¹²⁷⁾、¹²⁸⁾、¹²⁹⁾、¹³⁰⁾、¹³¹⁾、¹³²⁾、¹³³⁾、¹³⁴⁾、¹³⁵⁾、¹³⁶⁾、¹³⁷⁾、¹³⁸⁾、¹³⁹⁾、¹⁴⁰⁾、¹⁴¹⁾、¹⁴²⁾、¹⁴³⁾、¹⁴⁴⁾、¹⁴⁵⁾、¹⁴⁶⁾、¹⁴⁷⁾、¹⁴⁸⁾、¹⁴⁹⁾、¹⁵⁰⁾、¹⁵¹⁾、¹⁵²⁾、¹⁵³⁾、¹⁵⁴⁾、¹⁵⁵⁾、¹⁵⁶⁾、¹⁵⁷⁾、¹⁵⁸⁾、¹⁵⁹⁾、¹⁶⁰⁾、¹⁶¹⁾、¹⁶²⁾、¹⁶³⁾、¹⁶⁴⁾、¹⁶⁵⁾、¹⁶⁶⁾、¹⁶⁷⁾、¹⁶⁸⁾、¹⁶⁹⁾、¹⁷⁰⁾、¹⁷¹⁾、¹⁷²⁾、¹⁷³⁾、¹⁷⁴⁾、¹⁷⁵⁾、¹⁷⁶⁾、¹⁷⁷⁾、¹⁷⁸⁾、¹⁷⁹⁾、¹⁸⁰⁾、¹⁸¹⁾、¹⁸²⁾、¹⁸³⁾、¹⁸⁴⁾、¹⁸⁵⁾、¹⁸⁶⁾、¹⁸⁷⁾、¹⁸⁸⁾、¹⁸⁹⁾、¹⁹⁰⁾、¹⁹¹⁾、¹⁹²⁾、¹⁹³⁾、¹⁹⁴⁾、¹⁹⁵⁾、¹⁹⁶⁾、¹⁹⁷⁾、¹⁹⁸⁾、¹⁹⁹⁾、²⁰⁰⁾、²⁰¹⁾、²⁰²⁾、²⁰³⁾、²⁰⁴⁾、²⁰⁵⁾、²⁰⁶⁾、²⁰⁷⁾、²⁰⁸⁾、²⁰⁹⁾、²¹⁰⁾、²¹¹⁾、²¹²⁾、²¹³⁾、²¹⁴⁾、²¹⁵⁾、²¹⁶⁾、²¹⁷⁾、²¹⁸⁾、²¹⁹⁾、²²⁰⁾、²²¹⁾、²²²⁾、²²³⁾、²²⁴⁾、²²⁵⁾、²²⁶⁾、²²⁷⁾、²²⁸⁾、²²⁹⁾、²³⁰⁾、²³¹⁾、²³²⁾、²³³⁾、²³⁴⁾、²³⁵⁾、²³⁶⁾、²³⁷⁾、²³⁸⁾、²³⁹⁾、²⁴⁰⁾、²⁴¹⁾、²⁴²⁾、²⁴³⁾、²⁴⁴⁾、²⁴⁵⁾、²⁴⁶⁾、²⁴⁷⁾、²⁴⁸⁾、²⁴⁹⁾、²⁵⁰⁾、²⁵¹⁾、²⁵²⁾、²⁵³⁾、²⁵⁴⁾、²⁵⁵⁾、²⁵⁶⁾、²⁵⁷⁾、²⁵⁸⁾、²⁵⁹⁾、²⁶⁰⁾、²⁶¹⁾、²⁶²⁾、²⁶³⁾、²⁶⁴⁾、²⁶⁵⁾、²⁶⁶⁾、²⁶⁷⁾、²⁶⁸⁾、²⁶⁹⁾、²⁷⁰⁾、²⁷¹⁾、²⁷²⁾、²⁷³⁾、²⁷⁴⁾、²⁷⁵⁾、²⁷⁶⁾、²⁷⁷⁾、²⁷⁸⁾、²⁷⁹⁾、²⁸⁰⁾、²⁸¹⁾、²⁸²⁾、²⁸³⁾、²⁸⁴⁾、²⁸⁵⁾、²⁸⁶⁾、²⁸⁷⁾、²⁸⁸⁾、²⁸⁹⁾、²⁹⁰⁾、²⁹¹⁾、²⁹²⁾、²⁹³⁾、²⁹⁴⁾、²⁹⁵⁾、²⁹⁶⁾、²⁹⁷⁾、²⁹⁸⁾、²⁹⁹⁾、³⁰⁰⁾、³⁰¹⁾、³⁰²⁾、³⁰³⁾、³⁰⁴⁾、³⁰⁵⁾、³⁰⁶⁾、³⁰⁷⁾、³⁰⁸⁾、³⁰⁹⁾、³¹⁰⁾、³¹¹⁾、³¹²⁾、³¹³⁾、³¹⁴⁾、³¹⁵⁾、³¹⁶⁾、³¹⁷⁾、³¹⁸⁾、³¹⁹⁾、³²⁰⁾、³²¹⁾、³²²⁾、³²³⁾、³²⁴⁾、³²⁵⁾、³²⁶⁾、³²⁷⁾、³²⁸⁾、³²⁹⁾、³³⁰⁾、³³¹⁾、³³²⁾、³³³⁾、³³⁴⁾、³³⁵⁾、³³⁶⁾、³³⁷⁾、³³⁸⁾、³³⁹⁾、³⁴⁰⁾、³⁴¹⁾、³⁴²⁾、³⁴³⁾、³⁴⁴⁾、³⁴⁵⁾、³⁴⁶⁾、³⁴⁷⁾、³⁴⁸⁾、³⁴⁹⁾、³⁵⁰⁾、³⁵¹⁾、³⁵²⁾、³⁵³⁾、³⁵⁴⁾、³⁵⁵⁾、³⁵⁶⁾、³⁵⁷⁾、³⁵⁸⁾、³⁵⁹⁾、³⁶⁰⁾、³⁶¹⁾、³⁶²⁾、³⁶³⁾、³⁶⁴⁾、³⁶⁵⁾、³⁶⁶⁾、³⁶⁷⁾、³⁶⁸⁾、³⁶⁹⁾、³⁷⁰⁾、³⁷¹⁾、³⁷²⁾、³⁷³⁾、³⁷⁴⁾、³⁷⁵⁾、³⁷⁶⁾、³⁷⁷⁾、³⁷⁸⁾、³⁷⁹⁾、³⁸⁰⁾、³⁸¹⁾、³⁸²⁾、³⁸³⁾、³⁸⁴⁾、³⁸⁵⁾、³⁸⁶⁾、³⁸⁷⁾、³⁸⁸⁾、³⁸⁹⁾、³⁹⁰⁾、³⁹¹⁾、³⁹²⁾、³⁹³⁾、³⁹⁴⁾、³⁹⁵⁾、³⁹⁶⁾、³⁹⁷⁾、³⁹⁸⁾、³⁹⁹⁾、⁴⁰⁰⁾、⁴⁰¹⁾、⁴⁰²⁾、⁴⁰³⁾、⁴⁰⁴⁾、⁴⁰⁵⁾、⁴⁰⁶⁾、⁴⁰⁷⁾、⁴⁰⁸⁾、⁴⁰⁹⁾、⁴¹⁰⁾、⁴¹¹⁾、⁴¹²⁾、⁴¹³⁾、⁴¹⁴⁾、⁴¹⁵⁾、⁴¹⁶⁾、⁴¹⁷⁾、⁴¹⁸⁾、⁴¹⁹⁾、⁴²⁰⁾、⁴²¹⁾、⁴²²⁾、⁴²³⁾、⁴²⁴⁾、⁴²⁵⁾、⁴²⁶⁾、⁴²⁷⁾、⁴²⁸⁾、⁴²⁹⁾、⁴³⁰⁾、⁴³¹⁾、⁴³²⁾、⁴³³⁾、⁴³⁴⁾、⁴³⁵⁾、⁴³⁶⁾、⁴³⁷⁾、⁴³⁸⁾、⁴³⁹⁾、⁴⁴⁰⁾、⁴⁴¹⁾、⁴⁴²⁾、⁴⁴³⁾、⁴⁴⁴⁾、⁴⁴⁵⁾、⁴⁴⁶⁾、⁴⁴⁷⁾、⁴⁴⁸⁾、⁴⁴⁹⁾、⁴⁵⁰⁾、⁴⁵¹⁾、⁴⁵²⁾、⁴⁵³⁾、⁴⁵⁴⁾、⁴⁵⁵⁾、⁴⁵⁶⁾、⁴⁵⁷⁾、⁴⁵⁸⁾、⁴⁵⁹⁾、⁴⁶⁰⁾、⁴⁶¹⁾、⁴⁶²⁾、⁴⁶³⁾、⁴⁶⁴⁾、⁴⁶⁵⁾、⁴⁶⁶⁾、⁴⁶⁷⁾、⁴⁶⁸⁾、⁴⁶⁹⁾、⁴⁷⁰⁾、⁴⁷¹⁾、⁴⁷²⁾、⁴⁷³⁾、⁴⁷⁴⁾、⁴⁷⁵⁾、⁴⁷⁶⁾、⁴⁷⁷⁾、⁴⁷⁸⁾、⁴⁷⁹⁾、⁴⁸⁰⁾、⁴⁸¹⁾、⁴⁸²⁾、⁴⁸³⁾、⁴⁸⁴⁾、⁴⁸⁵⁾、⁴⁸⁶⁾、⁴⁸⁷⁾、⁴⁸⁸⁾、⁴⁸⁹⁾、⁴⁹⁰⁾、⁴⁹¹⁾、⁴⁹²⁾、⁴⁹³⁾、⁴⁹⁴⁾、⁴⁹⁵⁾、⁴⁹⁶⁾、⁴⁹⁷⁾、⁴⁹⁸⁾、⁴⁹⁹⁾、⁵⁰⁰⁾、⁵⁰¹⁾、⁵⁰²⁾、⁵⁰³⁾、⁵⁰⁴⁾、⁵⁰⁵⁾、⁵⁰⁶⁾、⁵⁰⁷⁾、⁵⁰⁸⁾、⁵⁰⁹⁾、⁵¹⁰⁾、⁵¹¹⁾、⁵¹²⁾、⁵¹³⁾、⁵¹⁴⁾、⁵¹⁵⁾、⁵¹⁶⁾、⁵¹⁷⁾、⁵¹⁸⁾、⁵¹⁹⁾、⁵²⁰⁾、⁵²¹⁾、⁵²²⁾、⁵²³⁾、⁵²⁴⁾、⁵²⁵⁾、⁵²⁶⁾、⁵²⁷⁾、⁵²⁸⁾、⁵²⁹⁾、⁵³⁰⁾、⁵³¹⁾、⁵³²⁾、⁵³³⁾、⁵³⁴⁾、⁵³⁵⁾、⁵³⁶⁾、⁵³⁷⁾、⁵³⁸⁾、⁵³⁹⁾、⁵⁴⁰⁾、⁵⁴¹⁾、⁵⁴²⁾、⁵⁴³⁾、⁵⁴⁴⁾、⁵⁴⁵⁾、⁵⁴⁶⁾、⁵⁴⁷⁾、⁵⁴⁸⁾、⁵⁴⁹⁾、⁵⁵⁰⁾、⁵⁵¹⁾、⁵⁵²⁾、⁵⁵³⁾、⁵⁵⁴⁾、⁵⁵⁵⁾、⁵⁵⁶⁾、⁵⁵⁷⁾、⁵⁵⁸⁾、⁵⁵⁹⁾、⁵⁶⁰⁾、⁵⁶¹⁾、⁵⁶²⁾、⁵⁶³⁾、⁵⁶⁴⁾、⁵⁶⁵⁾、⁵⁶⁶⁾、⁵⁶⁷⁾、⁵⁶⁸⁾、⁵⁶⁹⁾、⁵⁷⁰⁾、⁵⁷¹⁾、⁵⁷²⁾、⁵⁷³⁾、⁵⁷⁴⁾、⁵⁷⁵⁾、⁵⁷⁶⁾、⁵⁷⁷⁾、⁵⁷⁸⁾、⁵⁷⁹⁾、⁵⁸⁰⁾、⁵⁸¹⁾、⁵⁸²⁾、⁵⁸³⁾、⁵⁸⁴⁾、⁵⁸⁵⁾、⁵⁸⁶⁾、⁵⁸⁷⁾、⁵⁸⁸⁾、⁵⁸⁹⁾、⁵⁹⁰⁾、⁵⁹¹⁾、⁵⁹²⁾、⁵⁹³⁾、⁵⁹⁴⁾、⁵⁹⁵⁾、⁵⁹⁶⁾、⁵⁹⁷⁾、⁵⁹⁸⁾、⁵⁹⁹⁾、⁶⁰⁰⁾、⁶⁰¹⁾、⁶⁰²⁾、⁶⁰³⁾、⁶⁰⁴⁾、⁶⁰⁵⁾、⁶⁰⁶⁾、⁶⁰⁷⁾、⁶⁰⁸⁾、⁶⁰⁹⁾、⁶¹⁰⁾、⁶¹¹⁾、⁶¹²⁾、⁶¹³⁾、⁶¹⁴⁾、⁶¹⁵⁾、⁶¹⁶⁾、⁶¹⁷⁾、⁶¹⁸⁾、⁶¹⁹⁾、⁶²⁰⁾、⁶²¹⁾、⁶²²⁾、⁶²³⁾、⁶²⁴⁾、⁶²⁵⁾、⁶²⁶⁾、⁶²⁷⁾、⁶²⁸⁾、⁶²⁹⁾、⁶³⁰⁾、⁶³¹⁾、⁶³²⁾、⁶³³⁾、⁶³⁴⁾、⁶³⁵⁾、⁶³⁶⁾、⁶³⁷⁾、⁶³⁸⁾、⁶³⁹⁾、⁶⁴⁰⁾、⁶⁴¹⁾、⁶⁴²⁾、⁶⁴³⁾、⁶⁴⁴⁾、⁶⁴⁵⁾、⁶⁴⁶⁾、⁶⁴⁷⁾、⁶⁴⁸⁾、⁶⁴⁹⁾、⁶⁵⁰⁾、⁶⁵¹⁾、⁶⁵²⁾、⁶⁵³⁾、⁶⁵⁴⁾、⁶⁵⁵⁾、⁶⁵⁶⁾、⁶⁵⁷⁾、⁶⁵⁸⁾、⁶⁵⁹⁾、⁶⁶⁰⁾、⁶⁶¹⁾、⁶⁶²⁾、⁶⁶³⁾、⁶⁶⁴⁾、⁶⁶⁵⁾、⁶⁶⁶⁾、⁶⁶⁷⁾、⁶⁶⁸⁾、⁶⁶⁹⁾、⁶⁷⁰⁾、⁶⁷¹⁾、⁶⁷²⁾、⁶⁷³⁾、⁶⁷⁴⁾、⁶⁷⁵⁾、⁶⁷⁶⁾、⁶⁷⁷⁾、⁶⁷⁸⁾、⁶⁷⁹⁾、⁶⁸⁰⁾、⁶⁸¹⁾、⁶⁸²⁾、⁶⁸³⁾、⁶⁸⁴⁾、⁶⁸⁵⁾、⁶⁸⁶⁾、⁶⁸⁷⁾、⁶⁸⁸⁾、⁶⁸⁹⁾、⁶⁹⁰⁾、⁶⁹¹⁾、⁶⁹²⁾、⁶⁹³⁾、⁶⁹⁴⁾、⁶⁹⁵⁾、⁶⁹⁶⁾、⁶⁹⁷⁾、⁶⁹⁸⁾、⁶⁹⁹⁾、⁷⁰⁰⁾、⁷⁰¹⁾、⁷⁰²⁾、⁷⁰³⁾、⁷⁰⁴⁾、⁷⁰⁵⁾、⁷⁰⁶⁾、⁷⁰⁷⁾、⁷⁰⁸⁾、⁷⁰⁹⁾、⁷¹⁰⁾、⁷¹¹⁾、⁷¹²⁾、⁷¹³⁾、⁷¹⁴⁾、⁷¹⁵⁾、⁷¹⁶⁾、⁷¹⁷⁾、⁷¹⁸⁾、⁷¹⁹⁾、⁷²⁰⁾、⁷²¹⁾、⁷²²⁾、⁷²³⁾、⁷²⁴⁾、⁷²⁵⁾、⁷²⁶⁾、⁷²⁷⁾、⁷²⁸⁾、⁷²⁹⁾、⁷³⁰⁾、⁷³¹⁾、⁷³²⁾、⁷³³⁾、⁷³⁴⁾、⁷³⁵⁾、⁷³⁶⁾、⁷³⁷⁾、⁷³⁸⁾、⁷³⁹⁾、⁷⁴⁰⁾、⁷⁴¹⁾、⁷⁴²⁾、⁷⁴³⁾、⁷⁴⁴⁾、⁷⁴⁵⁾、⁷⁴⁶⁾、⁷⁴⁷⁾、⁷⁴⁸⁾、⁷⁴⁹⁾、⁷⁵⁰⁾、⁷⁵¹⁾、⁷⁵²⁾、⁷⁵³⁾、⁷⁵⁴⁾、⁷⁵⁵⁾、⁷⁵⁶⁾、⁷⁵⁷⁾、⁷⁵⁸⁾、⁷⁵⁹⁾、⁷⁶⁰⁾、⁷⁶¹⁾、⁷⁶²⁾、⁷⁶³⁾、⁷⁶⁴⁾、⁷⁶⁵⁾、⁷⁶⁶⁾、⁷⁶⁷⁾、⁷⁶⁸⁾、⁷⁶⁹⁾、⁷⁷⁰⁾、⁷⁷¹⁾、⁷⁷²⁾、⁷⁷³⁾、⁷⁷⁴⁾、⁷⁷⁵⁾、⁷⁷⁶⁾、⁷⁷⁷⁾、⁷⁷⁸⁾、⁷⁷⁹⁾、⁷⁸⁰⁾、⁷⁸¹⁾、⁷⁸²⁾、⁷⁸³⁾、⁷⁸⁴⁾、⁷⁸⁵⁾、⁷⁸⁶⁾、⁷⁸⁷⁾、⁷⁸⁸⁾、⁷⁸⁹⁾、⁷⁹⁰⁾、⁷⁹¹⁾、⁷⁹²⁾、⁷⁹³⁾、⁷⁹⁴⁾、⁷⁹⁵⁾、⁷⁹⁶⁾、⁷⁹⁷⁾、⁷⁹⁸⁾、⁷⁹⁹⁾、⁸⁰⁰⁾、⁸⁰¹⁾、⁸⁰²⁾、⁸⁰³⁾、⁸⁰⁴⁾、⁸⁰⁵⁾、⁸⁰⁶⁾、⁸⁰⁷⁾、⁸⁰⁸⁾、⁸⁰⁹⁾、⁸¹⁰⁾、⁸¹¹⁾、⁸¹²⁾、⁸¹³⁾、⁸¹⁴⁾、⁸¹⁵⁾、⁸¹⁶⁾、⁸¹⁷⁾、⁸¹⁸⁾、⁸¹⁹⁾、⁸²⁰⁾、⁸²¹⁾、⁸²²⁾、⁸²³⁾、⁸²⁴⁾、⁸²⁵⁾、⁸²⁶⁾、⁸²⁷⁾、⁸²⁸⁾、⁸²⁹⁾、⁸³⁰⁾、⁸³¹⁾、⁸³²⁾、⁸³³⁾、⁸³⁴⁾、⁸³⁵⁾、⁸³⁶⁾、⁸³⁷⁾、⁸³⁸⁾、⁸³⁹⁾、⁸⁴⁰⁾、⁸⁴¹⁾、⁸⁴²⁾、⁸⁴³⁾、⁸⁴⁴⁾、⁸⁴⁵⁾、⁸⁴⁶⁾、⁸⁴⁷⁾、⁸⁴⁸⁾、⁸⁴⁹⁾、⁸⁵⁰⁾、⁸⁵¹⁾、⁸⁵²⁾、⁸⁵³⁾、⁸⁵⁴⁾、⁸⁵⁵⁾、⁸⁵⁶⁾、⁸⁵⁷⁾、⁸⁵⁸⁾、⁸⁵⁹⁾、⁸⁶⁰⁾、⁸⁶¹⁾、⁸⁶²⁾、⁸⁶³⁾、⁸⁶⁴⁾、⁸⁶⁵⁾、⁸⁶⁶⁾、⁸⁶⁷⁾、⁸⁶⁸⁾、⁸⁶⁹⁾、⁸⁷⁰⁾、⁸⁷¹⁾、⁸⁷²⁾、⁸⁷³⁾、⁸⁷⁴⁾、⁸⁷⁵⁾、⁸⁷⁶⁾、⁸⁷⁷⁾、⁸⁷⁸⁾、⁸⁷⁹⁾、⁸⁸⁰⁾、⁸⁸¹⁾、⁸⁸²⁾、⁸⁸³⁾、⁸⁸⁴⁾、⁸⁸⁵⁾、⁸⁸⁶⁾、⁸⁸⁷⁾、⁸⁸⁸⁾、⁸⁸⁹⁾、⁸⁹⁰⁾、⁸⁹¹⁾、⁸⁹²⁾、⁸⁹³⁾、⁸⁹⁴⁾、⁸⁹⁵⁾、⁸⁹⁶⁾、⁸⁹⁷⁾、⁸⁹⁸⁾、⁸⁹⁹⁾、⁹⁰⁰⁾、⁹⁰¹⁾、⁹⁰²⁾、⁹⁰³⁾、⁹⁰⁴⁾、⁹⁰⁵⁾、⁹⁰⁶⁾、⁹⁰⁷⁾、⁹⁰⁸⁾、⁹⁰⁹⁾、⁹¹⁰⁾、⁹¹¹⁾、⁹¹²⁾、⁹¹³⁾、⁹¹⁴⁾、⁹¹⁵⁾、⁹¹⁶⁾、⁹¹⁷⁾、⁹¹⁸⁾、⁹¹⁹⁾、⁹²⁰⁾、⁹²¹⁾、⁹²²⁾、⁹²³⁾、⁹²⁴⁾、⁹²⁵⁾、⁹²⁶⁾、⁹²⁷⁾、⁹²⁸⁾、⁹²⁹⁾、⁹³⁰⁾、⁹³¹⁾、⁹³²⁾、⁹³³⁾、⁹³⁴⁾、⁹³⁵⁾、⁹³⁶⁾、⁹³⁷⁾、⁹³⁸⁾、⁹³⁹⁾、⁹⁴⁰⁾、⁹⁴¹⁾、⁹⁴²⁾、⁹⁴³⁾、⁹⁴⁴⁾、⁹⁴⁵⁾、⁹⁴⁶⁾、⁹⁴⁷⁾、⁹⁴⁸⁾、⁹⁴⁹⁾、⁹⁵⁰⁾、⁹⁵¹⁾、⁹⁵²⁾、⁹⁵³⁾、⁹⁵⁴⁾、⁹⁵⁵⁾、⁹⁵⁶⁾、⁹⁵⁷⁾、⁹⁵⁸⁾、⁹⁵⁹⁾、⁹⁶⁰⁾、⁹⁶¹⁾、⁹⁶²⁾、⁹⁶³⁾、⁹⁶⁴⁾、⁹⁶⁵⁾、⁹⁶⁶⁾、⁹⁶⁷⁾、⁹⁶⁸⁾、⁹⁶⁹⁾、⁹⁷⁰⁾、⁹⁷¹⁾、⁹⁷²⁾、⁹⁷³⁾、⁹⁷⁴⁾、⁹⁷⁵⁾、⁹⁷⁶⁾、⁹⁷⁷⁾、⁹⁷⁸⁾、⁹⁷⁹⁾、⁹⁸⁰⁾、⁹⁸¹⁾、⁹⁸²⁾、⁹⁸³⁾、⁹⁸⁴⁾、⁹⁸⁵⁾、⁹⁸⁶⁾、⁹⁸⁷⁾、⁹⁸⁸⁾、⁹⁸⁹⁾、⁹⁹⁰⁾、⁹⁹¹⁾、⁹⁹²⁾、⁹⁹³⁾、⁹⁹⁴⁾、⁹⁹⁵⁾、⁹⁹⁶⁾、⁹⁹⁷⁾、⁹⁹⁸⁾、⁹⁹⁹⁾、¹⁰⁰⁰⁾、¹⁰⁰¹⁾、¹⁰⁰²⁾、¹⁰⁰³⁾、¹⁰⁰⁴⁾、¹⁰⁰⁵⁾、¹⁰⁰⁶⁾、¹⁰⁰⁷⁾、¹⁰⁰⁸⁾、¹⁰⁰⁹⁾、¹⁰¹⁰⁾、¹⁰¹¹⁾、¹⁰¹²⁾、¹⁰¹³⁾、¹⁰¹⁴⁾、¹⁰¹⁵⁾、¹⁰¹⁶⁾、¹⁰¹⁷⁾、¹⁰¹⁸⁾、¹⁰¹⁹⁾、¹⁰²⁰⁾、¹⁰²¹⁾、¹⁰²²⁾、¹⁰²³⁾、¹⁰²⁴⁾、¹⁰²⁵⁾、¹⁰²⁶⁾、¹⁰²⁷⁾、¹⁰²⁸⁾、¹⁰²⁹⁾、¹⁰³⁰⁾、¹⁰³¹⁾、¹⁰³²⁾、¹⁰³³⁾、¹⁰³⁴⁾、¹⁰³⁵⁾、¹⁰³⁶⁾、¹⁰³⁷⁾、¹⁰³⁸⁾、¹⁰³⁹⁾、¹⁰⁴⁰⁾、¹⁰⁴¹⁾、¹⁰⁴²⁾、¹⁰⁴³⁾、¹⁰⁴⁴⁾、¹⁰⁴⁵⁾、¹⁰⁴⁶⁾、¹⁰⁴⁷⁾、¹⁰⁴⁸⁾、¹⁰⁴⁹⁾、¹⁰⁵⁰⁾、¹⁰⁵¹⁾、¹⁰⁵²⁾、¹⁰⁵³⁾、¹⁰⁵⁴⁾、¹⁰⁵⁵⁾、¹⁰⁵⁶⁾、¹⁰⁵⁷⁾、¹⁰⁵⁸⁾、¹⁰⁵⁹⁾、¹⁰⁶⁰⁾、¹⁰⁶¹⁾、¹⁰⁶²⁾、¹⁰⁶³⁾、¹⁰⁶⁴⁾、¹⁰⁶⁵⁾、¹⁰⁶⁶⁾、¹⁰⁶⁷⁾、¹⁰⁶⁸⁾、¹⁰⁶⁹⁾、¹⁰⁷⁰⁾、¹⁰⁷¹⁾、¹⁰⁷²⁾、¹⁰⁷³⁾、¹⁰⁷⁴⁾、¹⁰⁷⁵⁾、¹⁰⁷⁶⁾、¹⁰⁷⁷⁾、¹⁰⁷⁸⁾、¹⁰⁷⁹⁾、¹⁰⁸⁰⁾、¹⁰⁸¹⁾、¹⁰⁸²⁾、¹⁰⁸³⁾、¹⁰⁸⁴⁾、¹⁰⁸⁵⁾、¹⁰⁸⁶⁾、¹⁰⁸⁷⁾、¹⁰⁸⁸⁾、¹⁰⁸⁹⁾、¹⁰⁹⁰⁾、¹⁰⁹¹⁾、¹⁰⁹²⁾、¹⁰⁹³⁾、¹⁰⁹⁴⁾、¹⁰⁹⁵⁾、¹⁰⁹⁶⁾、¹⁰⁹⁷⁾、¹⁰⁹⁸⁾、¹⁰⁹⁹⁾、¹¹⁰⁰⁾、¹¹⁰¹⁾、¹¹⁰²⁾、¹¹⁰³⁾、¹¹⁰⁴⁾、¹¹⁰⁵⁾、¹¹⁰⁶⁾、¹¹⁰⁷⁾、¹¹⁰⁸⁾、¹¹⁰⁹⁾、¹¹¹⁰⁾、¹¹¹¹⁾、¹¹¹²⁾、¹¹¹³⁾、¹¹¹⁴⁾、¹¹¹⁵⁾、¹¹¹⁶⁾、¹¹¹⁷⁾、¹¹¹⁸⁾、¹¹¹⁹⁾、¹¹²⁰⁾、¹¹²¹⁾、¹¹²²⁾、¹¹²³⁾、¹¹²⁴⁾、¹¹²⁵⁾、¹¹²⁶⁾、¹¹²⁷⁾、¹¹²⁸⁾、¹¹²⁹⁾、¹¹³⁰⁾、¹¹³¹⁾、¹¹³²⁾、¹¹³³⁾、¹¹³⁴⁾、¹¹³⁵⁾、¹¹³⁶⁾、¹¹³⁷⁾、¹¹³⁸⁾、¹¹³⁹⁾、¹¹⁴⁰⁾、¹¹⁴¹⁾、¹¹⁴²⁾、¹¹⁴³⁾、¹¹⁴⁴⁾、¹¹⁴⁵⁾、¹¹⁴⁶⁾、¹¹⁴⁷⁾、¹¹⁴⁸⁾、¹¹⁴⁹⁾、¹¹⁵⁰⁾、¹¹⁵¹⁾、¹¹⁵²⁾、¹¹⁵³⁾、¹¹⁵⁴⁾、¹¹⁵⁵⁾、¹¹⁵⁶⁾、¹¹⁵⁷⁾、¹¹⁵⁸⁾、¹¹⁵⁹⁾、¹¹⁶⁰⁾、¹¹⁶¹⁾、¹¹⁶²⁾、¹¹⁶³⁾、¹¹⁶⁴⁾、¹¹⁶⁵⁾、¹¹⁶⁶⁾、¹¹⁶⁷⁾、¹¹⁶⁸⁾、¹¹⁶⁹⁾、¹¹⁷⁰⁾、¹¹⁷¹⁾、¹¹⁷²⁾、¹¹⁷³⁾、¹¹⁷⁴⁾、¹¹⁷⁵⁾、¹¹⁷⁶⁾、¹¹⁷⁷⁾、¹¹⁷⁸⁾、¹¹⁷⁹⁾、¹¹⁸⁰⁾、¹¹⁸¹⁾、¹¹⁸²

水頭勾配を $(\partial\phi/\partial x)$ とすれば、層流では、単位流路流量 q_i は、Hagen-Poiseuille の法則から次式で与えられる。

$$q_i = -C \cdot (\pi \lambda f_8 / 32 \mu) d_{pi}^4 \cos^4 \theta_i (\partial\phi/\partial x) \quad (1)$$

つぎに、単位流路を3次元的に組み立て、流れをシミュレートする。流れの場を座標 (x, y, z) で表わし、考察を単純にするため、 $x=y=0$ のスリットからの分散要素の流入を考えると(z 方向には一様)、流れは2次元問題($x-y$ 平面)となる。図-6は x 方向に i ($i=1, 2, \dots, I$)、 y 方向に j ($j=1, 2, \dots, J$)とし、流れの場を単位空間 $Cell(i, j)$ に分けたものである。スリットから、分散要素は単位時間に K 個流入すると考える。それぞれの分散要素に対し、流路要素 $(d_{pi}, l_i, \theta_i, q_i)$ は、以下のように与えられる。ただし、 R は $0.0 \sim 1.0$ の一様乱数である。

d_{pi} : (1)式から、 $q_i \propto d_{pi}^4$ であるから、 M 個の d_{pi} を大ききの順に並べ、 $D4(m) = \frac{q_i}{q_j} d_{pi}^4$ ($m=1, 2, \dots, M$)を求めておき、 R から、次式を満足する d_{pm} を d_{pi} とすればよい。

$$D4(m) \leq R \cdot D4(M) < D4(m+1) \quad (2) \quad \text{図-6 単位空間モデル}$$

l_i : 任意に並べられた N 個の l' から、次式による i 番目のものをとる。 $([]$ はガウス記号で、 $N \cdot R$ を越えない最大の整数を意味する。)

$$i = [N \cdot R] \quad (3)$$

θ_i, q_i : さきの考察から、 $\int_0^\pi \cos^4 \theta \sin \theta d\theta / \int_0^\pi \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = 1.0 - R$ とすれば、(4)式を、同様に、(5)式をうる。

$$\theta_i = \cos^{-1} R^{0.2} \quad (4)$$

$$q_i = 2\pi \cdot R \quad (5)$$

したがって、単位流路 i について、分散要素の通過時間 dt_i 、移動距離 $dx_i, dy_i, (dz_i)$ が与えられる。(i 番目の分散要素について考える。)

$$dt_{ki} = l_i / u_i, \quad dx_{ki} = l_i \cos \theta_i, \quad dy_{ki} = l_i \sin \theta_i \cos \phi_i, \quad (dz_{ki} = l_i \sin \theta_i \sin \phi_i) \quad (6)$$

つぎに、1つの流路の出口で、つぎの流路要素を与える操作をくりかえせばよい。

流れは z 方向に一様であるから、 dx_{ki}, dy_{ki} により、各分散要素の時刻 t 毎の位置 $(x_k(t), y_k(t))$ ($t = \Delta t, 2\Delta t, \dots, T$; $k = 1, 2, \dots, K$)を、 $Cell(i, j)$ に記入していけば、分散パターンがえられる。 (dx_{ki}, dy_{ki}) だけによることは、 $z=0$ の位置からの流入を考えたと同じ結果になる。

3 分散モデルと拡散方程式 図-6で、 x 軸を平均流向(ヒエゾノ水頭勾配 h は x だけの関数)とする2次元定常流れにおいて、分散要素が時刻 t に位置 (x, y) にある条件付確率は、その前の時刻 $t' (= t - \Delta t)$ にあった位置 $\{x' (= x - \Delta x), y' (= y - \Delta y)\}$ および時間間隔 Δt に従うとすると、マルコフ過程と考えられよう。

短い時間 Δt に移動する距離 $\Delta x, \Delta y$ を運動の単位ステップと考え、定常で空間的に一様なマルコフ過程のせん移確率を $P(x-x', y-y', t-t')$ で表わすと、次式が成り立つ。

$$P(x, y, t + \Delta t) = \iint P(x - \Delta x, y - \Delta y, t) p(\Delta x, \Delta y, \Delta t) d\Delta x d\Delta y \quad (7)$$

ここで、積分は $\Delta x, \Delta y$ のすべてについて行なわれ、 p について $\langle (\Delta x)^2 \rangle_{\Delta t}$, $\langle (\Delta y)^2 \rangle_{\Delta t}$ の存在、時間について1階、空間について2階までの偏微分の存在の仮定、および平均流向が x 軸方向である

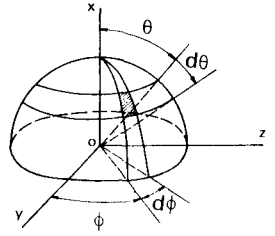


図-5 θ, ϕ モデル

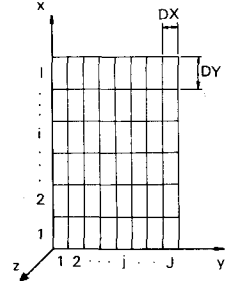


図-6 単位空間モデル

ことから、 $\langle \Delta y \rangle_{\Delta t} \equiv 0$, $\langle \Delta x \Delta y \rangle_{\Delta t} \ll \langle (\Delta x)^2 \rangle_{\Delta t}$, $\langle (\Delta y)^2 \rangle_{\Delta t}$ となることに注意し、 Δx , Δy に
関する平均量について(8)式を用いると、(9)式をうる。ただし、 $\langle \rangle_{\Delta t}$ は、 Δt に関する平均を示す。

$$\langle \Delta x \rangle_{\Delta t} = m \cdot \Delta t, \quad \langle (\Delta x)^2 \rangle_{\Delta t} - \langle \Delta x \rangle_{\Delta t}^2 = D_x^2 \Delta t, \quad \langle (\Delta y)^2 \rangle_{\Delta t} - \langle \Delta y \rangle_{\Delta t}^2 = D_y^2 \Delta t \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + m \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{2} D_x^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{1}{2} D_y^2 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (9)$$

上の考察では、 P を1つの分散要素のせん移確率としてきたが、ここで、局所的な意味での平均物理
量について考えると、 P を濃度 S , m を実平均流速と置き、 $\frac{1}{2} D_x^2$ を D_1 , $\frac{1}{2} D_y^2$ を D_2 と表わせば、
つぎの拡散方程式が求められる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad (10)$$

これまでの考察は、浸透層における分散要素の運動の厳密な取り扱いとはいえないが、分散物質の
濃度 S が拡散方程式(10)式で表わされることが示され、さきの分散パターンから、 D_1 および D_2 を求
める水理学的根拠を得たことになる。

4 分散係数のシミュレーション 同一のモデルにおける分散パターンおよび拡散方程式の解
から、分散係数 D_1 および D_2 が推定される。

縦方向分散：図-6の y 軸上で、格子間隔 DY 毎に分散要素流入源を並べると、一次元の分散パター
ンが得られる。実際の計算では、 $Cell(i, j)$ の値を j について加えればよい。

図-7は、数値計算例で、計算条件は、浸透
層構成粒子径 $d = 0.096 \text{ cm}$, 空隙率 $\lambda = 0.36$,
 $x_i = DX \cdot i$, $DX = 0.0584 \text{ cm}$, $U = 0.0940$
 cm/s , $T = 200 \text{ sec}$, $K = 400$ 個, $C_0 = 0.5$ である。

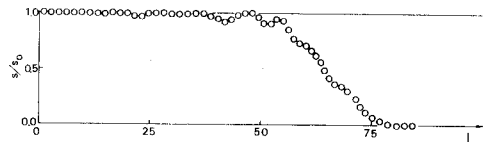


図-7 縦方向分散シミュレーション

本モデルにおいて、(10)式は

$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}$ となり、 $S(0, t) = S_0$ ($t \geq 0$), $S(x, 0) = 0$ ($x > 0$), $S(\infty, t) = 0$ ($t \geq 0$)
の条件の下での解の微分項を省略すると次式が得られる。

$$1 - 2 \cdot \left(\frac{S}{S_0} \right) = \text{erf} \left\{ \frac{x - Ut}{2(D_1 t)^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (11)$$

ここで、 $\xi = (x - Ut)/2(D_1 t)^{\frac{1}{2}}$ とすると、分散パターンにおける x_i の $(S/S_0)_i$ から、(11)
式により、 ξ_i が与えられ、最少自乗法を用いれば、 D_1 は(12)式で与えられる。

$$D_1 = \frac{1}{4t} \left\{ \frac{\sum \xi_i (x_i - Ut)}{\sum \xi_i^2} \right\} \quad (12)$$

横方向分散：図-6で y の $-\infty \sim +\infty$ の領域について考え、 y 軸の正の部分に格子間隔 DY 毎に分散要
素流入源を並べると、横方向分散係数 D_2 を求めるモデルが得られる。数値シミュレーションによる
分散パターン例が図-8で、計算条件は $DY = 0.2 \cdot DX$ および 図-7における同一条件である。
このとき(10)式で $\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}$ とおかれ、拡散方程式は、 $U \frac{\partial S}{\partial x} = D_2 \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}$ となり、 $S(0, y) = S_0$
($-\infty < y \leq 0$), $S(0, y) = 0$ ($0 < y < \infty$), $\frac{\partial S}{\partial y} = 0$ ($y = \pm \infty$)の条件の下での解は次式で与えられる。

$$1 - 2(S/S_0) = \text{erf} \left\{ y/2(D_2 \cdot x/U)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (13)$$

ここで、 $\eta = \gamma/2(D_2 \cdot X/U)^{1/2}$ とおき、
図-8の各行において D_2 を求め、しにつ
いて平均すると、次式が得られる。

$$D_2 = \left\langle \frac{U}{4X_i} \left(\frac{\sum \eta_{ij} \cdot y_{ij}}{\sum y_{ij}^2} \right)^2 \right\rangle_i \quad (14)$$

4 数値計算結果 表-1および図-9

は、分散係数の実験値 D_2 および数値計算値 D_2
を示す。(図-9におけるOEPおよび表-1に
おけるRUN70~RUN11-Lはすべて、Harleman
およびR.R.Rumerによる実験値である。)

縦方向分散係数 D_{1s} は、 $C_e (=0.25, 0.5, 1.0)$
の増加により、大きくなったが、その関係を明
らかにするには至らなかった。図-9は、横方
向分散係数 D_{2s} を C_e について示したもので、
 $C_e=0.5$ とすれば、シミュレーション値は、
実験値にほぼ一致することがわかる。したが
って、表-1では、すべて $C_e=0.5$ として計算さ
れた。

5、あとがき、一般に、分散係数の値は
、高い精度が期待されないことを考えれば、以
上の考察により、分散係数の推定が可能として
よいであろう。本研究の意義もここにあるので
、浸透層内の分散現象は乱数モデル
によってシミュレーションされるこ
とになる。 参考文献

- 1) J.Jong: "Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits" Trans. A.G.U. Vol.39 No.1 1958
- 2) R.R.Rumer: "Longitudinal dispersion in steady and unsteady flow" Proc. A.S.C.E. Hy.4 July 1962
- 3) J.Bear: "On the tensor form of dispersion in porous media" Jour. Geophysical Research Vol.66 No.4 April 1961

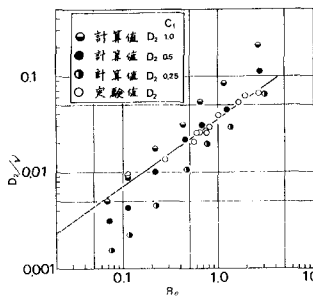


図-9 横方向分散係数

Run	U cm/s	Re	C1	D1/v	D2/v	備考
1-8	0.0189	0.0730	0.5	0.0556	0.00312	* 計
2-8	0.0557	0.216	0.5	0.239	0.01004	* 算
3-8	0.116	0.683	0.5	1.176	0.0306	** 値
4-8	0.0493	0.191	0.5	0.349	0.0218	
5-8	0.134	1.23	0.5	1.747	0.0456	
6-8	0.0118	0.113	0.5	0.0738	0.00435	
7-8	0.0832	0.794	0.5	0.901	0.0280	
8-8	0.291	2.77	0.5	6.67	0.1172	
70	0.0148	0.0607		0.0208		* 実
71	0.0304	0.125		0.06		* 験
67	0.0406	0.167		0.0752		** 値
69	0.122	0.505				
38	0.0532	0.81		0.555		
36	0.144	2.17		1.58		
5-L	0.0116	0.111			0.00925	
2-L	0.0802	0.769			0.0256	
11-L	0.284	2.72			0.0656	

表-1 分散係数

* $d=0.039$ $\lambda=0.36$ ** $0.092, 0.37$ $\lambda=0.096, 0.37$

- 4) 岩佐 武内 児王 「多孔体の空隙構造と透水係数について」昭和44年 土木学会関西支部講演会
- 5) 岩佐 武内 「多孔性媒体の透水係数について」オ24回土木学会年次学術講演会 昭44年
- 6) 寺本英 「マルコフ過程とカウ過程」新物理学進歩シリーズ2 槇書店 1961

- 7) D.R.F.Harleman and R.R.Rumer: "Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous media" Jour. Fluid Mechanics Part 3 Vol.16 July 1963
- 8) D.R.F.Harleman, P.F.Mehlhorn and R.R.Rumer: "Dispersion-Permeability correlation in porous media" Proc. A.S.C.E. Hy.2 March 1963