

水温成層場における濁水貫入実験

京都大学大学院 学生員 森川 浩

京都大学大学院 学生員 濱口 一郎

京都大学工学部 正員 村本 嘉雄

1. はじめに 成層期の湖沼や貯水池で発生する水理現象の内、密度流に分類される水平貫入現象は混合流体の輸送や成層破壊過程に寄与し、工学的見地から重要な現象である。この発生要因は様々であるが、例えば、斜面上における境界混合現象や底泥の再浮上現象による濁水形成後に発生する濁水貫入、河川流入による濁水の間中貫入、湖中の成層域における内部波の碎波後に生じる混合水塊の貫入などが挙げられる。著者らは成層期の琵琶湖を対象に水温・濁度の相互作用という観点から現地観測を行ってきたが^{1,2)}、ここでは水温成層場における濁水貫入実験について明らかになったところを述べる。

2. 実験概要 実験に用いた水槽は図-1 に示すように有効長 4m, 幅 10cm, 高さ 40cm の透明アクリル製であり、上下層 10cm の 2 層の水温成層をつくり、上流端の流入器から濁水を一定量流入させた。計測器としては、濁水貫入の進行に伴う成層状態の変化をみるために、貫入装置から 1m の地点に 5mm 間隔、32 層の、2m の地点に 10mm 間隔、16 層のサーミスタチェーンを設置した。また、水路側面からデジタルビデオカメラあるいは写真撮影により貫入過程を捉えた。表-1 に今回行った実験条件を示すが、T1, T2, Td はそれぞれ上層、下層、流入濁水の水温であり、Q は流量である。また、貫入部分の初期浮力振動数は水温分布から算定した。

3. 実験結果とその考察 塩分線形成層場における水平貫入の 2 次元の実験として Manins の研究³⁾があり、貫入速度や貫入層厚に対する流入量と浮力振動数の効果が検討されているが、水温成層場における貫入実験は成層作成が困難なため従来なされていないようである。図-2 は今回行った実験のうち、RunH7 における水温の鉛直分布の時間的变化を表したものである。初期には強い水温勾配であった躍層部分が 70 秒以降に貫入フロントがサーミスタに到着した後は緩くなっていることがわかる。明瞭な濁水貫入現象が発生している場合には水温の鉛直分布は階段状になるが、水温（熱）は塩分に比べはるかに高拡散であるため、貫入層内部にも成層を形成して貫入することがわかる。このことが現地における水温の鉛直分布のみから貫入層を把握することが困難な理由であり、例えば、濁度を観測することによりより明確に濁水貫入層を把握することができる²⁾。

貫入時における流速の鉛直分布を把握するために水素気泡法を用いた。写真-1 は RunH11 における結果であり、水素気泡の発生間隔は 1 秒である。写真を見ると、流速の鉛直分布とその時間的变化が明確に捉えられており、流速零点が貫入層と上層あるいは下層の境界に現れている。貫入層内では、その中央部に最大流

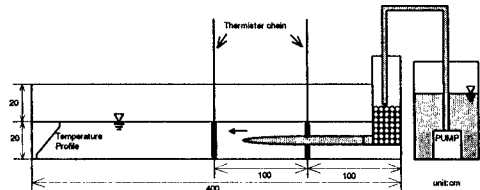


図-1 実験装置

表-1 実験条件

	T1 (°C)	T2 (°C)	Td (°C)	Q (ml/s)
H1	30	10	21	25.6
H2	42	10	30	25.6
H3	55	10	38	25.6
H4	40	11	30	42.1
H5	40	10	36	25.6
H6	40	10	25	25.6
H7	39	10	20	25.6
H8	40	10	16	25.6
H9	40	11	25	42.1
H10	40	11	25	35.7
H11	40	10	25	12.5
H12	40	10	25	3.57
H14	23	7	17.8	25.6
H15	55	7	37	42.1

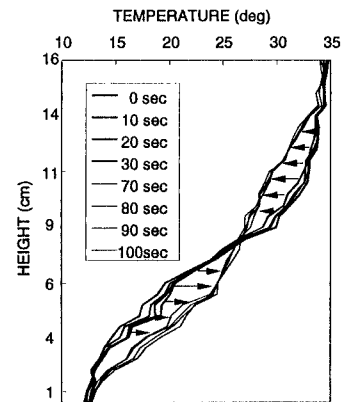


図-2 水平貫入により生じる水温の鉛直分布の時間的变化

Keywords : 水温成層, 濁水貫入, 成層強度, 貫入速度, 貫入層厚

〒606-01 京都市左京区吉田本町, TEL 075-753-5074, FAX 075-761-0646

速点があり、これが貫入先端の水深に一致している。流速分布形状は密度噴流のように正規分布として扱ってよいようである。上層、下層においては貫入方向とは逆の流れが発生しているが、上層に比べて下層の流速が小さい。これは水路底面に接している下層が上層に比べ底面摩擦を受けるためと考えられる。本実験のような外部流入型の貫入実験の場合、貫入量と逆流量との差が流出口からの流量にほぼ等しく、内部混合型の貫入実験の場合、貫入量と逆流量はほぼ等しいことになる。

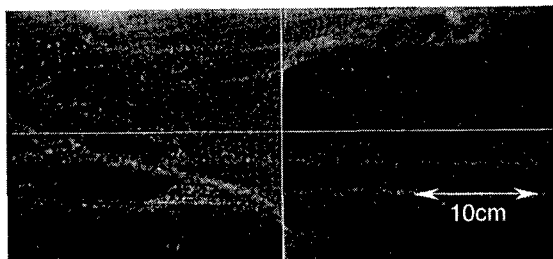


写真-1 水素気泡法による流速分布

河川流入や成層湖斜面上の境界混合により水平貫入が密度成層場において発生する場合、貫入初期においては貫入流体の浮力に比べて運動量が卓越する。貫入が進行し運動量が減少すると、浮力によって流体は貫入していく。このときの流動機構は“浮力”、“慣性力”、“粘性力”の3力によって決定される。慣性力と粘性力の優越により“浮力-慣性領域”と“浮力-粘性領域”に分類される。本実験では流入器によって濁水が発生させたため、実験初期においては運動量が卓越するが、運動量が減少し、浮力が貫入形態を支配する領域に着目し、この領域における貫入速度と最大貫入層厚を撮影したビデオ画像あるいは写真による解析から決定した。

貫入速度と貫入層厚は様々な水量により決定される。特に、実験室レベルでは時間経過に伴う水深、成層状態の変化に若干影響を受けるが、ここでは初期の浮力振動数 N と単位幅流量 q に着目する。この場合、次元考察により貫入先端の水平速度 V と貫入層厚 h はそれぞれ $q^{1/2} \cdot N^{1/2}$ と $q^{1/2} \cdot N^{1/2}$ に比例することになる³⁾。これらの関係を示したものが図-3 および図-4 である。この図から、貫入速度は $q^{1/2} \cdot N^{1/2}$ に大きく依存しており、貫入層厚に関しても同様に $q^{1/2} \cdot N^{1/2}$ とほぼ比例関係にある。また、流量が大きいものほど層厚が大きくなる傾向があるが、これは初期のレイノルズ数が大きいためである。

水温成層場における濁水貫入実験は塩分成層場よりはるかに高拡散域での実験であり、拡散係数と動粘性係数の比であるプラントル数 Pr ($Pr = \kappa / \nu$, κ : 拡散係数, ν : 動粘性係数) が塩分成層場に比べて2オーダー程度小さい。そのため、水温分布をみても明らかなように貫入層内部においても弱いながら成層がある。しかし、その貫入速度は塩分成層場と同様にほぼ一定であった。また、流量が一定の場合でも成層強度によって貫入速度や貫入層厚が変化することは、現地における濁水貫入現象の季節的変化に対応しており重要である。

おわりに 成層期の湖中で発生する濁水貫入現象を検討するため、水温成層場における水平貫入実験を行い、貫入速度と貫入層厚が流量および成層強度に依存することなどを示した。今回の実験は2次元であるため現地にそのまま適用することは出来ないが、現在、3次元性を考慮した実験を進めており、今後、現地観測結果との比較検討を行いたいと考えている。

- 参考文献: 1) 森川・大久保・村本: 成層湖斜面上の底泥の再浮上に伴う濁水の貫入現象, 水工学論文集, 第40巻, pp.607-612, 1996.
 2) 森川・大久保・村本・江副: 成層湖における濁水貫入層の形成機構, 水工学論文集, 第41巻, pp.489-494, 1997.
 3) Manins, P. C.: Intrusion into a stratified fluid, J Fluid Mech., Vol.74, pp. 547-560, 1976.

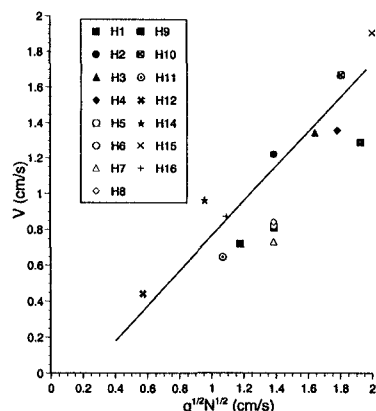


図-3 貫入速度と流量・成層強度との関係

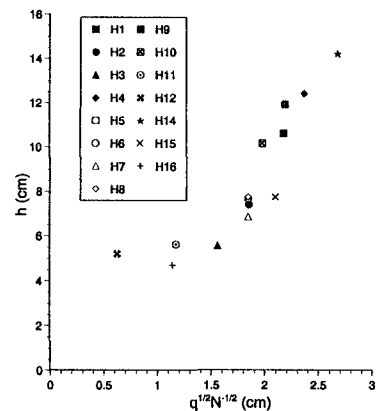


図-4 貫入層厚と流量・成層強度との関係