

冷却水選択取水に及ぼす海底地形の影響

大西 外明*, 宮崎 洋三**, 柴田 正和***

1. はじめに

火力原子力発電所の冷却水取水に際しては海域下層の低温水を有効に取水し復水器冷却の効果を高めようとする所謂深層取水工が各地で広く採用されている。そのうち多量の冷却水を取水する場合に最も適当とされるカーテンウォール型取水工においては取水開口高の選択が重要な問題となる。より低温の水をより多量に取水することが望ましいのであるが、海域上層の温水の混入を防ぐ目的で取水開口高を小さくすると、所要取水量を確保するために取水開口部付近で下層冷水の流速を増大させる必要が生じ、その結果上下層流体間の相対流速が増大し境界面の安定性が崩れ、取水開口部からの上層温水の混入の増加を来すことになる。そこでこの「より低温でより多量の」冷却水を確保する両方の目的を満たす方法として取水開口部前面の海底を掘削することが提案されている。しかしながら斯様な海底地形の変化に伴う新たな水理学的現象、即ち段落ち部に生ずる自由噴流境界、傾斜境界面に沿う流れの加速、内部跳水の発生が成層密度流の安定性ひいては選択取水の効率に及ぼす影響については十分検討されていないのが現状である。本論文はこの冷却水選択取水に及ぼす海底地形の影響に関して行った水理模型実験の結果とそれに対する検討を報告するものである。

2. 実験装置と実験条件

実験は東京理科大学理工学部土木工学科水理実験室で行われた。実験水槽は長さ 6 m, 幅 30 cm のアクリル板製でありその両端には底面 1 m × 1 m, 高さ 2 m の水槽が接続され両水槽を結ぶ管と循環ポンプにより水路内の流量を制御することができる(写真-1)。水路中央にスルースゲートを置きその上流側に淡水塩水による密度成層をつくり、鋼板製の工作物を設置することにより水路底地形を変化させた。具体的には図-1に示した諸定数のうち ρ_1 , ρ_2 は一定に保ち h_1 , h_2 , L , A , B , Q (取

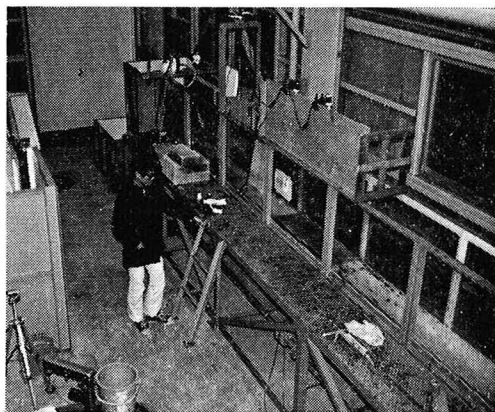


写真-1

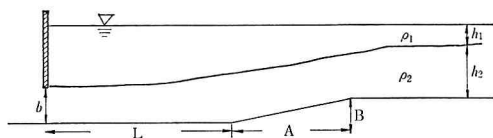


図-1 水路および密度流の諸定数

水量)の組合せを変化させて種々の実験条件を与えた。実際に海域で形成されている密度流は水温成層であるが実験に際しては各層の密度の時間的定常性と検定の容易さを考慮し、塩分濃度成層を用いることにした。上層の淡水をフルオレセインナトリウム ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$, 緑色)で着色し、また随時顆粒状染料ウォーターブルー ($C_{37}H_{27}O_9N_3S_3Na_2$, 青色)を投入することにより、中間層形状、内部境界面に生ずる波動の特性を、またカーテンウォール下流側に設置した電気伝導度計で上層淡水の混入率を測定した。実験条件のうち取水量 Q 以外の諸量を同一に保ったものを 1 シリーズとして Q を順次増加させる方法をとった。その際一般に Q の増加に伴って上層淡水の混入率も増加しその結果カーテンウォール上流部の淡水の減少がみられるが、いかなる方法による淡水の補給によってもその補給に基づく境界面の擾乱は避けられないので 1 シリーズ内での淡水の補給は行わなかった。また各実験条件下での定常状態に達したのち測定を開始することが本来望ましいのであるが、上述の如く淡水を上流

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

** 正会員 工修 (株)アイ・エス・エー新土木研究所 技術開発部部長

*** 正会員 理修 (株)アイ・エス・エー新土木研究所 技術開発部

表—1 実験条件とそのときの混入率

シリーズ	b cm	L cm	A cm	B cm	h_1 cm	h_2 cm	ケース	Q cm ³ /sec	混入率
A 0	2	0	0	0			1	320	0
							2	610	0
							3	910	.01
							4	1210	.02
							5	1550	.05
A I		50	0				1	330	.03
							2	630	.03
							3	940	.04
							4	1220	.06
							5	1550	.12
A II		30	0				1	320	.03
							2	650	.06
							3	890	.09
							4	1180	.18
							5	1510	.22
A III	5	10		5	3	7	1	320	.01
							2	610	.16
							3	910	.27
							4	1210	.34
							5	1500	.39
B I		50	30				1	300	.01
							2	580	.01
							4	900	.02
							4	1190	.03
							5	1510	.07
B II		20	30				1	290	0
							2	640	.06
							3	930	.09
							4	1200	.10
							5	1560	.15
C	3	0	0	0			1	340	0
							2	630	.01
							3	930	.02
							4	1240	.12
							5	1520	.28
D	5	50	30	3	5	5	2	600	.04
							3	890	.10
							4	1200	.13

側に補給しないので1シリーズの実験時間には自ら制約が生じ、個々の実験条件下での実験時間は5分以内に抑え、1シリーズで20分程度になるようにした。更に上層淡水の混入率を得るためには取水開口部から流入する水全体の平均の電気伝導度を知る必要があるが、上述の方

針により測定している現象そのものが半過渡的現象であるので時々刻々十分な精度をもってこの平均電気伝導度を得る適当な方法が無い。そこでカーテンウォール開口端中央より鉛直に1 cm 低く下流側に1 cm の位置に電気伝導度計を設置しその伝導度の相対的減少（その点における混入率）をもって各実験条件を比較することにした。

実施された実験条件は表—1 の通りである。各実験条件の選択の方針は、自然海底が模型上で水深10 cm の水平面であるとし、水温成層形状（塩分濃度成層で simulate する）は既設の汽力発電所の例を参考に¹⁾ 上層厚を3 cm、下層厚を7 cm とした。この設定条件の下で最も良い選択取水効果を与えた A0 ($b=2$ cm) を基準にしてこの自然海底を種々の形状に掘削したものを相互に比較することにした。また上下層の密度は $\rho_1=1.001$ g/cm³, $\rho_2=1.015$ g/cm³ に統一した。この値は実際の水温による成層よりも密度差が大きいが実験上初期状態として安定な成層を作るためにこの程度の密度差が必要であった。以上の方針により選択された各実験条件の他に上のシリーズ B I の諸条件の中で上下層水深比のみを変化させた実験条件（シリーズ D）も参考のために採用した。

3. 実験結果とその考察

3.1 取水に伴う上層淡水の混入機構

上述の実験条件の下でカーテンウォール開口部から下層塩水を取水するのに伴い上層淡水が混入する機構について従来から広く考えられているのは以下の如きものである^{2),3),4)}。即ち成層流の内部境界面は安定性を失わずに取水量の増加とともに次第にカーテンウォール付近で低下しついには開口端よりも下り上層淡水の混入が開始するというものである。この機構による上層淡水の混入はカーテンウォール開口端の鉛直座標が取水を始める前の自然の内部境界面の鉛直座標よりほんの少しだけ小さい場合或いは二層を成す流体が互いに混合しえない（例えば水と油）場合には現象の説明として当を得ているものと考えられるが、上記のわれわれの実験条件に基づく上層淡水の混入機構はこれとは全く趣きを異にするものであることが観測された。各実験条件により細部は当然互いに異なっているが一般的な描像は図—2 の如くである。

取水を開始する前 a) のように成層している水路に循環ポンプにより流れを生ぜしめそれを徐々に大きくしてゆくとまず b) のように下層内に流速の無い死水域が生ずるが内部境界面形状及び密度分布は a) と変化していない。更に取水量を増すと c) のように内部境界面が2つ現れる。そのうち上方に存在する境界面は元々の上層 ($\rho=\rho_1$) と中間層 (ρ_1 から ρ_2 まで鉛直座標にほぼ線形に変化していることが観測される) の境界面であり、これは a), b) で存在していた境界面と殆ど同じ位置にあ

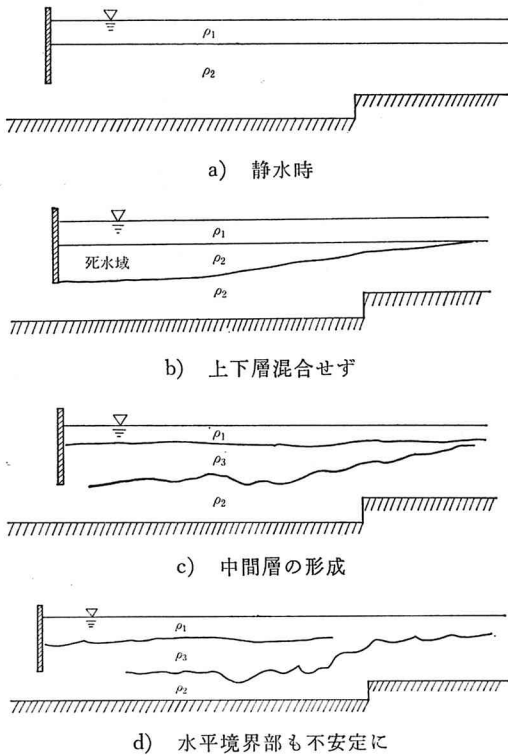


図-2 取水量の増加に伴う内部境界面の変化

りそこに波動が生ずるとしても極く長波長で小振幅のもののみである。一方、下方に新しく現れた境界面は取水量の増加に伴い次々と様相を変化してゆく。この境界面は前述の中間層と元々の下層 ($\rho = \rho_2$) との境界面であり、上方の境界面とは違ってカーテンウォールに近づくに従い有意の勾配を有している。その傾斜した境界面には取水量の増大とともに次第に振幅の増大する内部波が生ずる。これは境界面の傾斜に伴う下層流の加速による境界面の不安定化⁹⁾、段落ち部で発生する自由噴流境界による乱流エネルギーの境界面への補給、及びやや下流で生ずる内部跳水により解放されたエネルギーの境界面への供給が相互に関連し合った結果生じた現象と考えられる。更に取水量を増すと(実験条件によってはこれらの順序が互いに入れ替ることもあるが)、d) のように段落ち部より上流側の水平な内部境界面にも Kelvin-Helmholtz 型の不安定が発生しその結果として水平境界部にも中間層が形成される。いずれの実験条件においても中間層内では密度勾配はほぼ一定値をとり流速はほぼ零である。カーテンウォール下流で検出される淡水の混入機構はこの下方の境界面に立つ内部波の不安定化に伴う中間層の流体の連行に基づくものであることが分る。写真-2~6 は、シリーズ A II における取水量の増大とともに変化する流況を示す。写真番号はケース 1~5 に対応している(表-1)。

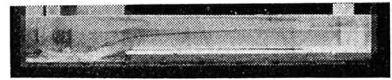


写真-2

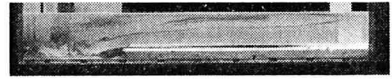


写真-3

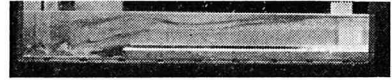


写真-4

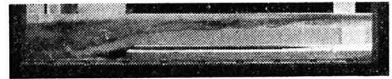


写真-5

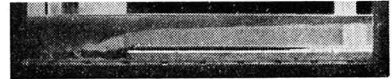


写真-6

3.2 海底地形の影響

各実験条件下での上層淡水の混入率は表-1 に掲げてあり、図-3 に比較がされている。

まず海底に段差 3 cm の直角段落ちをつけたシリーズ A I ~ A III (各々 $L=50, 30, 10$ cm) を比べると L が小さい程混入率が增大していることが分る。これはカーテンウォールに近づく程中間層の厚さが大きくなり下層との境界面が低下するために、段落ち部に起因する前述の境界面擾乱要因の影響を強く受けるためである。また有限な (1/10) 勾配を有するシリーズ B I, B II (各々 $L=50, 20$ cm) は各々対応する直角段落ちのシリーズ A I, A II (または A III) よりも混入率が減少している。これは有限勾配の緩衝部分を設けることにより内部境界

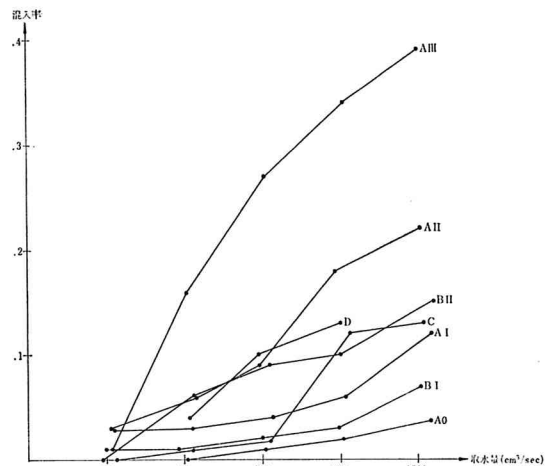
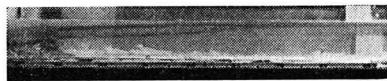
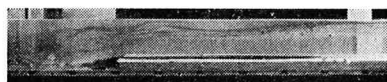


図-3 各実験条件下での上層淡水混入率

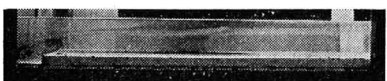
面の勾配が減少し自由噴流境界の発生も抑制され、境界面に沿っての加速も弱まり、内部跳水によりエネルギーの供給も小さくなっているためである。更に掘削を全く行わない自然海底に対応するシリーズ A 0 は掘削を行った中で最も混入率の小さかったシリーズ B I よりも小さい混入率を与える。写真—7—11 は順に 表—1 のシリーズ A 0, A II, A III, B I, B II のいずれもケース 3 の流況を比較するものである。



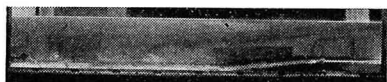
写真—7



写真—8



写真—9



写真—10



写真—11

設計の意図とは裏腹に自然海底のままでカーテンウォール開口高 2 cm の基準のシリーズ A 0 が最も望ましいものであることが分る。これは電研で水温成層を用いて行った実験結果⁶⁾とも符合している。自然海底を掘削するという案の指導理念は上下層間の相対流速の減少による Kelvin-Helmholtz 不安定の抑制であったが、この一連の実験結果の示すところによれば水平な自然海底の場合には生じなかった自由噴流境界、内部跳水による乱れのエネルギーの供給、また段落ち部での傾斜境界面の規模の増大による流れの加速による不安定効果の増大という掘削に起因するマイナス要因の方が、上下層相対流速を減少させ Kelvin-Helmholtz 不安定を抑制するというプラス要因よりも大きな効果を有していることが判明したことになる。尤もこれらの結論はわれわれが行った上記の実験条件の範囲内で正しい命題であり、以上の

結果から類推されるように段落ち部を更に遠ざけて更に緩やかな勾配をつける場合には自然海底を掘削する効果が現出する可能性を残している。と同時に、上の実験条件で与えたような段落ちが、たとえいくら遠方であれ、存在するならば境界面は乱され中間層が形成される。その場合にはこの実験条件で使われた仮定「十分上流では安定な成層が保たれている」が崩れ、カーテンウォール部での上層淡水の混入率もより増大する。即ち、実際に海域から冷却水を選択取水しようとするに際しては、カーテンウォール直上流域の海底地形の検討だけでは片手落ちであり、海域上層の温水の履歴、即ち温排水が放水口付近でどの程度環境海水と混合しどのくらいの厚さと密度分布を持つ中間層を形成するか、そこで形成された成層流がカーテンウォール開口部へ至るまでにいかなる海底地形の急変部を経験するか等を検討することが今回の実験結果を検討するのと同様の重要性を持つのである。

表—1、図—3 には以上のシリーズの他に自然海底で開口高を 3 cm としたもの (C), と B I と同じ海底地形で上下層水深を両方とも 5 cm としたもの (D) を参考のために示した。

参考文献

- 1) 千秋信一・和田 明: 堺港火力発電所冷却水深層取水に関する水理学的検討, 電力中央研究所技術研究所報告, 土木 64008, 1964.
- 2) Harleman, D. R. F.: Submerged sluice control of stratified flow, Proc. ASCE, Vol. 84, No. HY2 Proc. Paper 1584, 1958.
- 3) Harleman, D. R. F.: Withdrawal from two-layer stratified flows, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY4 pp. 43~58, 1965.
- 4) 千秋信一: 火力発電所冷却水深層取水工の水理設計, 発電水力, No. 92, pp. 9~30, 1968.
- 5) 柴田正和・大西外明: 密度流の境界面の安定性—傾斜境界面に沿う加速流について—, 第 22 回水理講演会論文集, pp. 87~94, 1978.
- 6) 片野尚明・角湯正剛・河村博美・和田 明: 柏崎刈羽原子力発電所の冷却水取水に関する水理学的検討, 電力中央研究所技術第二研究所報告, 依頼報告 72598, 1973.

謝辞: 本研究を遂行するに当たり、東京理科大学工学教室 西村 司氏に貴重な助言と協力を戴いた。また同教室水理研究室の学生諸君には実験の遂行に多くの協力を戴いた。ここに記して謝意を表する次第である。