

大規模冷排水の拡散予測手法の実用化

有田昌義*・藤井 貴**・高月邦夫***

1. はじめに

LNG の気化に用いられた気化器加熱用海水いわゆる冷排水は、取水海水より約 4～5℃低く、周囲海水に比べて重い密度で放水されるため、海底面近くを安定した拡散層を形成しながら拡がっていく。しかし、海域での冷排水の拡散希釈に大きく寄与する海底面近くでの流れや乱れは小さく、低水温の水塊が海底面近くを滞留する可能性がある。最近の LNG 基地の冷排水は、放水量が 10～20 m³/s と大規模化し、冷排水の海域環境に与える影響が懸念されるようになってきている。

冷排水の海域に及ぼす影響を軽減するため、図-1 に示すように放水された冷排水が海底面に到達するまでに、温かい周囲海水を多く取り込み、希釈（連行）を促進する水中放水方式の放水設備が用いられる。これには、放水流速を速くし、水中部での初期拡散を促進させる方式や冷排水を分散して放水する方式（図-2 参照：大阪ガス（株）泉北製造所放水口）がとられている。

冷排水拡散の既往研究については、小規模冷排水の拡散特性や予測手法の研究（水鳥ら、1995）などがあるが、本検討で対象とする流量とは規模が異なる。また、筆者らは、LNG 基地の取放水設備計画において、水中放水方式による冷排水の残存流速や水温を把握するため、三次元水槽を用いた水理模型実験、片野ら（1977）のモデルによる三次元プリューム解析、二次元多層レベルモデルなど、放水規模や放水条件等に応じて様々な予測手法にて調査研究を行ってきた。

このため、水中放水された大規模冷排水を対象とした場合の環境アセスメントに適用できる実用的な予測手法の確立が必要となってきた。本研究は、水温の放水口近傍域や遠方域での降温域の把握、放水残存流速が航行・係留船舶に及ぼす影響等を評価できる、実用的な冷排水の拡散予測手法の検討を行った。

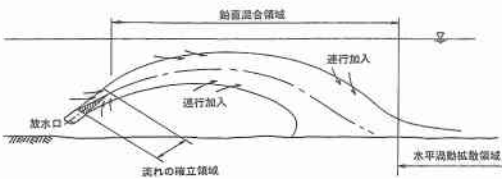


図-1 水中放水された冷排水の拡散挙動

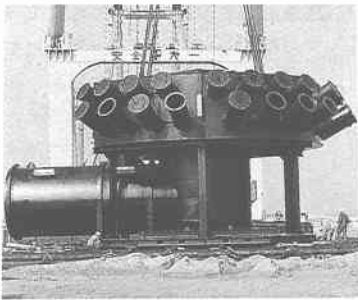


図-2 冷排水の分散型放水口形状

2. 冷排水の放水に対する環境保全目標

今回の検討は、福井県敦賀市に建設を予定している LNG 基地を対象とした。その冷排水規模は、流量で最大 16.7 m³/s、取放水温度差は-5℃である。なお、計画は「福井県環境影響評価要綱」に基づき実施した。

放水設備の検討に際しては、放水地先海域が閉鎖性であること、放水設備の前面に船舶の係留施設等があることなどから、放水口近傍域での拡散特性に対して、次のような環境保全目標値を設けた。①海底面到達時の降温（周辺海水との水温差）は、既往の研究成果等をもとに海生生物への影響を勘案して 2℃以下とする。②航行船舶への影響を回避するために海表面での放水残存流速を半ノット以下とする。③大型船舶への安全確保のために喫水面の残存流速を規定値以下とする。

* 正会員 工修 大阪ガス（株） 生産技術センター
** 工修 大阪ガス（株） 敦賀基地計画推進部課長
*** (株)東京久栄 水工システム研究所課長

3. 放水口近傍域予測

(1) 概 要

冷排水が海域に放水されてから海底面に到達するまでの三次元的挙動が支配的である近傍領域について、1/100の無歪水理模型実験を用いて検討した。ここでは、前述した環境保全目標値を満足するよう、最適な放水諸元を選定するとともに、海底面到達付近での水温や残存流速の鉛直分布及び水平分布を把握し、遠方域予測のための接合データを入手する。

(2) 実験設備と方法

水理実験は、拡散平面水槽（長さ10m×幅4m×高さ0.5m：片面アクリル製）を使用し、水槽内に縮尺1/100の無歪み模型を作成し、付属設備として、放水装置（放水ポンプ、流量制御バルブ、フロート式流量計）、取水装置（取水ポンプ、流量制御バルブ、フロート式流量計）、冷排水作成装置を設置した。実験設備の概要を図-3に示す。

冷排水の拡散は重力と慣性力により現象が支配されるため、フルードの相似則を用いて行った。なお、放出レイノルズ数は $(2.5 \sim 3.6) \times 10^3$ であり発達した乱流状態となっている。実験水は水道水を使用し、冷排水は、所定の密度差となるように冷却装置を通して温度を調節して放水した。実験中は所定流量（流量縮尺： $(1/100)^{2.5}$ ）の冷排水を放水口より放水し、同時に下流側の下層より放水流量と同量の水を分散管より排水した。水温測定は、サーミスタ水温計により、流速は超音波流速計を用い、拡散状況の可視化は冷排水に染料（ウォーターブルー等）を混ぜて、ビデオカメラ等により撮影した。

(3) 実験ケース

放水口設置前面海域での制約条件等から、放水方向は護岸に平行とし、冷排水噴流の希釈に係る「放出内部フルード数、放水仰角、ノズル間距離」をパラメータとして放水口選定実験を行った。

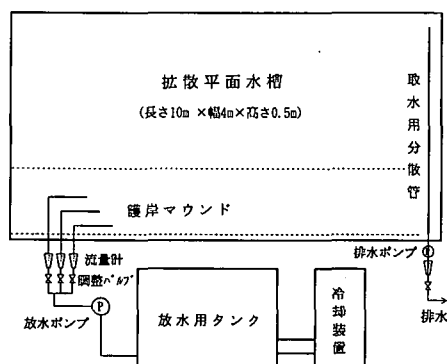


図-3 実験設備概要

実験ケースは、表-1に示すとおりである。

表-1 放水口選定実験ケース

ケース	放水ノズル数	放水流速	仰角	ノズル間隔	放出内部フルード数
case 1	3本	1.2 m/s	15度	12 m	9.6
case 2		1.5 m/s	10度	12 m	12.7
case 3		1.5 m/s	13度	12 m	12.7
case 4		1.5 m/s	10度	4 m	12.7

(4) 放水口選定実験結果

冷排水噴流の希釈を予測する場合、噴流が海底面に到達するまでの経路が重要である。放出内部フルード数を大きくすると水平方向に噴流は引き延ばされ、より遠方まで到達することにより良い希釈が得られるが、放水口仰角と放水初期流速との関係から噴流が海表面に接近した場合には、希釈特性が悪くなるとともに、海表面での残存流速が大きくなる。

噴流経路を把握するため、横軸に放水方向距離とノズル径との比 (x/D) 、縦軸に海底面からの距離とノズル径 (z/D) との比をとって図-4に示した。また、噴流の希釈状況を把握するため、横軸に (x/D) 、縦軸に水温希釈率 (S^{-1}) をとったものを図-5に示した。一方、海表面残存流速については、海表面での残存最大流速が出現した距離とノズル径との比 (X_u/D) と残存最大流速と放水初期流速との比 (U_{max}/U_0) との関係を表-2に示した。

噴流の海表面方向への上昇位置については、初期流速を速く（1.2 m/s）して仰角を大きく（15度）した場合（case 1）と初期流速を速く（1.5 m/s）して仰角を抑えた（13度）場合（case 3）を比較すると、case 1は初期仰角が大きいため速やかに上昇するが、放水エネルギーが小さいため放水方向には延びずに海底面に到達する。一方、case 3はcase 1ほど上昇しないものの、より遠くで最大上昇位置となり、海底面到達位置は放水方向に延びている。また、希釈状況を見ると、case 3が初期状態及び海底面到達時とも優れており、case 1は海底面到達時の希釈が悪く、希釈状況は噴流の経路と密接な関係が認められた。

また、ノズル間隔の違いを検討したcase 2（ノズル間距離12 m：5.5D）とcase 4（4 m：1.8D）との比較では、噴流間の相互干渉が盛んであったcase 4の方が噴流は高く上昇したが、その後の分散化が見られず、海底面到達時の希釈に大きな差異は見られなかった。

海底面到達時の水温希釈に関する環境保全目標については、全てのケースで希釈率が $0.4 (=2^{\circ}\text{C}/5^{\circ}\text{C})$ 以下となっており、目標を満足している。しかし、海表面での残存流速については、最も水温希釈が良かったcase 3、

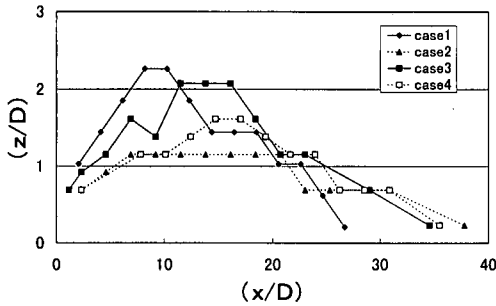


図-4 噴流中心軸の経路

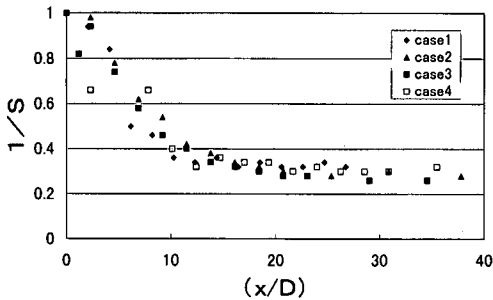


図-5 噴流中心軸における希釈特性

表-2 海表面での残存最大流速の出現状況

ケース	放水流速	仰角	ノズル間隔	X_0/D	U_{max}/U_0
case 1	1.2 m/s	15 度	12 m	16.5	0.16
case 2	1.5 m/s	10 度	12 m	18.4	0.10
case 3	1.5 m/s	13 度	12 m	27.6	0.23
case 4	1.5 m/s	10 度	4 m	38.7	0.15

相互干渉が大きい case 4 の流速低減が悪く、残存流速の保全目標を満足できなかった。以上のことから、最適放水口形状は case 2 と判断した。

4. 遠方域拡散予測

(1) 概 要

冷排水流量が少なく、 1°C 降温域の拡散面積が小さい場合には、 1°C 降温域の予測は放水口近傍域での水理模型実験データで予測可能であるが、大規模流量になると拡散範囲も大きくなり、模型規模等の制約により、水理模型実験では予測が困難となる。このため、予測対象範囲を広域とする数値予測手法の適用を考える。一方、冷排水の拡散特性から海底面到達以降の水温の鉛直分布形状(約 1°C 降温域の範囲)は、海底面で最小水温値を示し、鉛直上向き方向に減衰していく傾向があり、その鉛直分布はある関数で近似されるため、予測モデルは平面二次元化できることが確認された。

従って、冷排水の拡散予測の手順は次の 3 ステップで行うこととした。①密度噴流で放水され海底面に到達するまでに多くの周囲水を連行加入し、三次元的拡散挙動を示す近傍領域については、水理模型実験により予測する(3.放水口近傍域予測の項を参照)。②海底面到達以降の平面拡散領域に移行する地点に遠方域予測との接合部(仮想放水口)を設け、その周辺域での冷排水の拡散特性(水温・流速の鉛直分布や水平分布状況等)を水理実験で測得し、仮想放水口諸元を入手する。③海底面到達以降の水温分布を把握するための遠方域予測は、仮想放水口からの冷排水拡散諸元をもとに、平面二次元モデルで数値予測する。

(2) 仮想放水口諸元の設定

冷排水が海底面に到達した周辺域において、水温と流速の水平・鉛直分布を詳細に測得し、以下に示す仮想放水口諸元を求めた。

a) 鉛直分布形状

水温・流速の鉛直分布形状は、図-6、図-7 に示す結果から次のように設定した。

・流速分布

$$f(\eta) = 4\eta^{0.6} \exp(-2.1\eta) : 0 < \eta \leq 0.2$$

$$= \exp\{-1.5(\eta - 0.2)\} : \eta > 0.2$$

・水温分布

$$g(\eta) = \exp(-\eta^2)$$

ここに、 $\eta = z/h_w$ 、 h_w : 躍層厚さである。

b) 拡散特性値

仮想放水口の水温・流量(流速)は、海底面到達時の水理実験結果をもとに、計算格子幅や下記に示す仮想放水口と実放水口での熱量保存則から求めた。

・熱量保存則

$$\text{実放水口熱量}(H_0) = \text{仮想放水口熱量}(H)$$

$$H_0 = \text{実流量} \times \text{降温値} \times \text{比熱}(C) \times \text{密度}(\rho)$$

$$H = \sum (U_i T_i) \times \int_0^1 f(\eta) g(\eta) d\eta \times \Delta s \times h_w \times C \times \rho$$

(3) 遠方域拡散予測

a) 予測モデル

海底面に到達後の冷排水の水温・流速の鉛直分布は関数近似でき、冷排水の拡散分布は平面二次元モデルを用いて予測することができる。冷排水の拡散予測モデルについては、水鳥ら(1995)が提案したモデルを基本とした。なお、水鳥らのモデルは放水口近傍域の初期連行を連行係数として連続的に組み込んで予測しているが、ここでは、海底面到達までの初期連行量は、放水口近傍域予測の水理模型実験から設定した仮想放水口諸元に取り込まれていることから、遠方域予測での連行量を考慮する必要がないため連続式の連行係数を削除するなどモデルを一部修正し用いた。基本方程式は、運動方程式、連

続方程式及び熱拡散方程式であり、静水圧近似等の仮定のもと、海底面から躍層位置まで積分することにより、次の基礎式が得られる。

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\delta}{\alpha^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h_w} \right) + \frac{\delta}{\alpha^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h_w} \right) \\ = -gh_w \frac{\partial s}{\partial x} + \mu \nabla^2 M - \tau_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\delta}{\alpha^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{h_w} \right) + \frac{\delta}{\alpha^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{h_w} \right) \\ = -gh_w \frac{\partial s}{\partial y} + \mu \nabla^2 N - \tau_y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta \frac{\partial T_m}{\partial t} + (\gamma U_m + \beta U_i) \frac{\partial T_m}{\partial x} + (\gamma V_m + \beta V_i) \frac{\partial T_m}{\partial y} \\ = \beta K_x \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \beta K_y \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} \end{aligned}$$

ここに、 M 、 N ：放水による線流量、 s ：水位、 h_w ：躍層厚さ、 μ ：水平渦動粘性係数、 τ ：海底面で摩擦応力、 T_m ：躍層内の最低水温、 U_m 、 V_m ：放水流の躍層内最大流速、 U_i 、 V_i ：場の流れ、 K ：水平拡散係数、 g ：重力加速度、 α 、 β 、 γ 、 δ ：積分定数である。

$$\alpha = \int_0^1 f(\eta) d\eta = 0.752$$

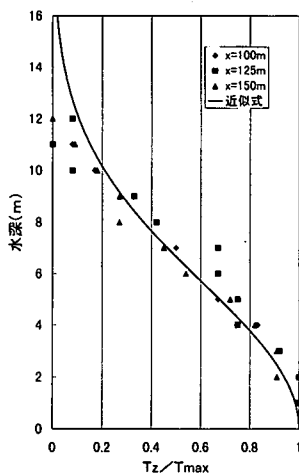
$$\delta = \int_0^1 f^2(\eta) d\eta = 0.607$$

$$\beta = \int_0^1 g(\eta) d\eta = 0.747$$

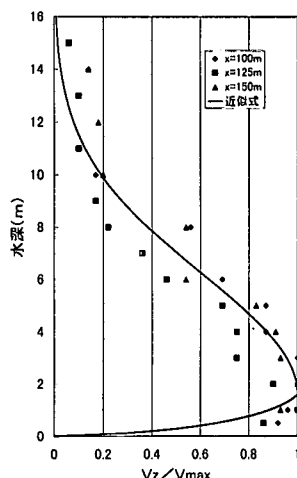
$$\gamma = \int_0^1 f(\eta) g(\eta) d\eta = 0.588$$

b) その他の予測条件

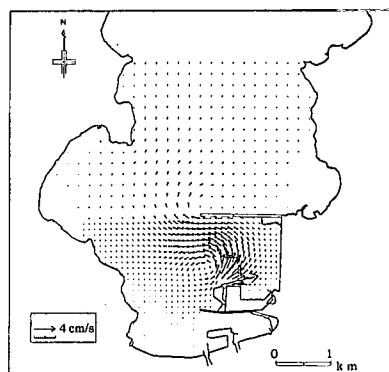
・海底摩擦係数 0.0026



図—6 水温鉛直分布の近似



図—7 流速鉛直分布の近似



図—8 放水流ベクトル (躍層内最大流速)

・水平渦動粘性係数 $1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$

・水平拡散係数

拡散係数については、海底面上1m層の流況連続観測結果からG. I. Taylorの定理に基づき算定したが、不規則流れによる季節的な変動があるため、 K_x 、 K_y を下限値とした場合と、 x 、 y 方向をそれぞれ上限値とした場合の3通りの予測を行った。

c) 予測結果

仮想放水口からの放水流ベクトルと水温拡散分布を図—8、図—9に示す。冷排水の拡散分布は、放水方向や周辺海域の地形の影響を受け湾曲している。

5. 温排水躍層と冷排水との混合

最後に、表層付近に存在する温排水躍層による影響を把握するため、表層放水された軽密度の温排水が存在する条件で、冷排水の挙動を三次元水理模型実験で確認した。

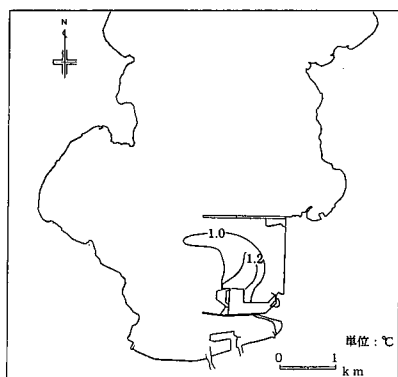


図-9 水温拡散分布 (躍層内最小水温)

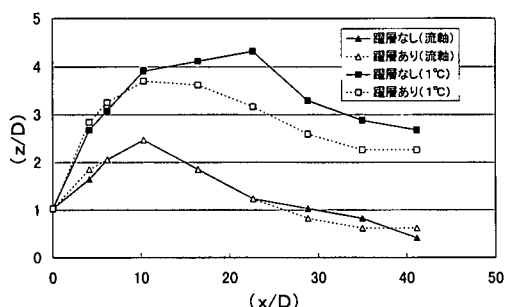


図-10 流軸位置と1°C降温位置

放水条件は、放水流速を1.2 m/s, 1.2 m/s, 1.5 m/s, それぞれの仰角を15度, 20度, 15度とした。放水流速1.2 m/s, 仰角15度の放水条件で温排水躍層の有無の違いによる噴流流軸位置と上側(躍層方向)の1°C降温位置を図-10に示す。流軸の経路位置は温排水躍層の有無に係らず大きな差異はないが、1°C降温域の上昇位置については、放水初期段階($x/D < 10$)では温水との混合により大きくなり、放水エネルギーが小さくなる噴流の下降領域では躍層が混合の障壁となり上昇距離は小さくなった。また、海底面到達時の降温値は、躍層の有無に関わらず大きな差異はなかった。これらの結果から、冷排水

と温排水躍層との混合は、初期流速や仰角を大きくすることにより良くなり、温排水による冷排水の希釈は認められることが確認された。しかし、放水条件によっては温排水躍層が障壁となり海表面方向への拡散は妨げられる場合もあった。

6. 結 論

本検討の主たる結果を以下に示す。

(1) 冷排水の放水口近傍域での拡散希釈特性：①水理模型実験より得られた近傍域における冷排水の水温及び流速の拡散特性は、放出内部フルード数、配置、仰角等に支配される。また、水温と残存流速の低減については、噴流の相互干渉による縮流等により残存流速と水温の低減効果が相反するものの、水理実験の様々な試行により適切な放水口の選定を行った。②海底面到達付近での水温鉛直分布は、海底面より海表面方向に指数的に減衰し、流速は海底面摩擦の影響を受け底面付近で弱く、海底上2 m付近で最大流速を持ち、海表面方向に指数的に減衰する。

(2) 冷排水の拡散予測：水中放水された大規模冷排水の海底面到達以降の水温・流速の鉛直分布が関数近似化され、平面二次元モデルにより海域の流れや乱れ特性を予測条件として遠方域の水温分布を予測することができることを確認した。従って、水理模型実験と平面二次元数値モデルの併用により、大規模冷排水の環境アセスメントに適用できる拡散予測手法が実用化された。また、この手法は環境保全対策の検討として、放水口形状等の評価も行うことができる。

参 考 文 献

- 片野尚明・河村博美・和田 明 (1977): 水中放水による温排水の水温低減化に関する研究, 第24回海講論文集, pp. 476-480.
- 水島雅文・首藤 啓 (1995): 冷排水の拡散特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1051-1055.