

囲い壁を利用した空温式 LNG 気化器からの白煙防止技術 ～ 自然エネルギーを利用した消霧装置 ～

Defogging by walled air fin LNG vaporizer
Defogging system using natural energy

幸 良之* 海洋・エネルギー事業部 エネルギープロジェクト部 マネジャー
Yoshiyuki Saiwai

抄録

液化天然ガス（LNG）の二次受入基地は、近年の内航船輸送の開始などに見られるように大規模化が進行している。基地のガス製造能力の増大に伴い、空温式LNG気化器にてガス製造する際に発生する冷気白煙の処理が必須となったため、消霧装置におけるランニングコスト低減が求められている。そこで、当社では空温式 LNG 気化器の周囲に壁を設置することにより、消霧に要するコストを低減するシステムを開発したので紹介する。

Abstract

Spread of Liquefied Natural Gas(LNG) transport by coastal shipping has led to growing size of LNG satellite terminals. Increased processing capacity in those stations resulted in large amount of cooled fog emission and demand for efficient defogging system is growing. This paper discusses walled defogging apparatus designed to achieve high efficiency in the defogging process.

1. 緒言

液化天然ガス（LNG）の二次受入基地は、海外からの LNG を受入れた一次受入基地から国内輸送された LNG を需要家近辺のサイトで再度受入れ、ガス製造を行う基地である。当初は取扱量が小さかったためローリ車輸送によるサテライト基地の形態だけであったが、2003 年には北九州から高松および岡山への内航船による LNG 輸送が開始されるなど大規模化の傾向にある¹⁾。

サテライト基地における LNG の気化は、大気を熱源とするエアフィン式 LNG 気化器（以下空温式気化器）による場合と、温水を熱源とする温水式 LNG 気化器（以下温水式気化器）による場合があるが、ランニングコスト面で有利な空温式気化器の採用が一般的である。空温式気化器は LNG の気化自体にはコストを要しないが、LNG との熱交換により冷却された大気は冷気白

煙（霧）となって設備周辺での可視障害を発生させる。これに対して消霧設備の追加設置により霧の発生を防止することは可能であるが、設備費及びランニングコストが増加する。このためガス製造量が大きく従って大量の冷気が発生する大規模サテライト基地や内航船受入基地の空温式気化器設備では低コスト型の消霧装置が求められている。

当社では空温式気化器から発生する冷気白煙の処理について、囲い壁を利用した低コスト型の消霧システムを開発したので紹介する。

2. 冷気白煙の発生と消霧のメカニズム

2-1. 空温式気化器における冷気白煙の発生

空温式気化器はフィン付き伝熱管を垂直方向に配列

させた構造をとっており、伝熱管内部の LNG を大気
の熱によって気化させている。一方、熱を奪われ冷却さ
れた飽和空気は、気化器下部から周囲に拡散する。こ
の時の冷気は、周囲大気と混合しながら拡散していく
過程で大気を露点以下に冷却するため、結露し白煙
(霧) が発生する。一般的な規模のサテライト基地で
ある Site X における空温式気化器からの冷気白煙の
発生状況を図 1 に示す。



図1 Site X における空温式気化器からの冷気白煙
Fig.1 Cooled fog from air fin LNG vaporizer at Site X

により、次式に示す冷気と露点の温度差 ΔT の正負に
てその有無を判定できる。

$$\Delta T = T_i \text{ (計測地点の温度)} - T_R \text{ (露点温度)}$$

$$\Delta T \leq 0 \rightarrow \text{白煙 (霧) 状態}$$

$$\Delta T > 0 \rightarrow \text{消霧状態}$$

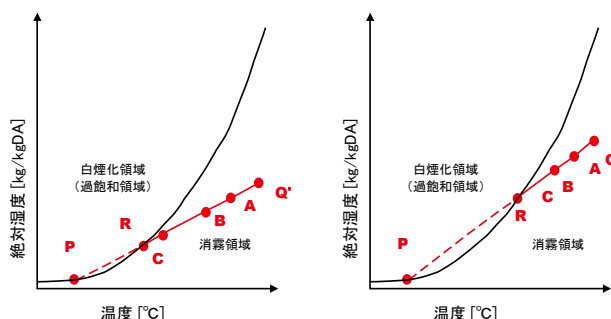
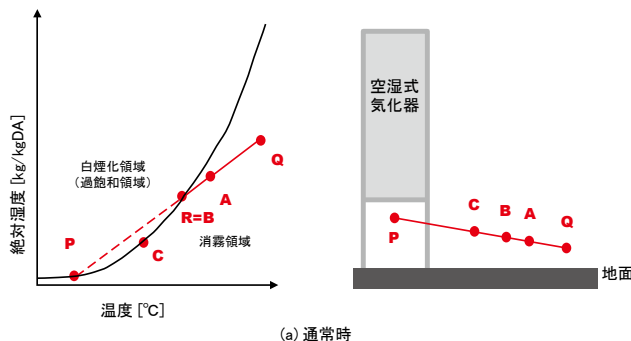


図2 空温式気化器から発生する冷気の白煙化
Fig.2 Phase change of cooled air from air fin LNG vaporizer

2-2. 白煙・消霧状態の判定

空温式気化器から発生する冷気の白煙化を湿度図表
に図示する。図 2(a) で気化器下部に冷気発生源 (点
P) と遠方にある大気 (点 Q) との混合を考えれば、冷
気との混合によって露点 (T_R) 以下となった領域 (点
B 及び C) の空気は、飽和した水分が霧 (可視水蒸気)
として存在することになる。

また、例えば運転中に湿度が低くなれば (点
 $Q \rightarrow Q'$)、他の条件が一定であっても露点が下がるた
め、霧の発生領域は縮小する (図 2(b) 参照)。同様に、
湿度が変化しない場合でも、風が強くなれば発生した
冷気が風により大量の外気と混合加温されて露点以上
となるので、霧の発生領域は縮小する (図 2(c) 参照)。

したがって、気化器からの冷気により発生する白煙
(霧) の状況は、冷気発生源の気化器下部における点
P の温度 (T_P) と、大気温度 (T_Q) 及び湿度 (H_Q)、なら
びに白煙状況の評価地点の温度 (T_i) を計測すること

2-3. 消霧装置の方式

現在、LNG と熱交換して空温式気化器下部に到達し
た外気 (冷気) の処理方法としては、(a) 温風加湿式 (b)
冷気排出式の二つの方式が主に採用されている (図 3
参照)。

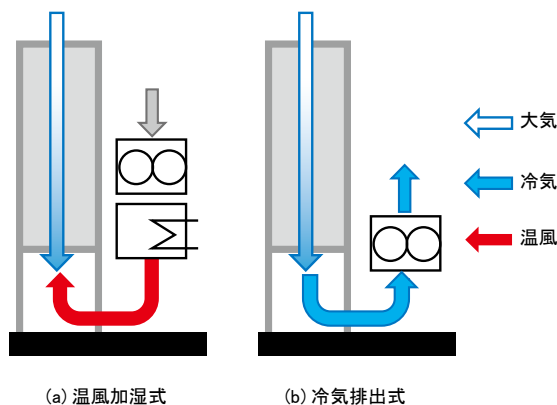


図3 従来の消霧装置のフロー
Fig.3 Flow of conventional defogging process

温風加熱式は、ファンと熱交換器を用いて気化器下部に大気を加熱して送入し（湿度図表上 Q の位置を右方向に移動させて PQ の傾きを小さくする操作に対応）発生した冷気との混合により露点を低下させ消霧する。そのため大気の加熱に要する熱量が大きく、温水式気化器の約 1/3 に相当する熱量が必要になる。これに対し、冷気排出式は発生した冷気を気化器直近に設置したファンにより上空に排出し、上空で大量の外気と混合（湿度図表上、冷気 P と大気 Q の混合点が Q に近づき露点以上となることに対応）させて消霧させる方式である。したがって、熱源が不要でありその分ランニングコストは低減されるが、発生した冷気を確実に上空に排気しなければならないために、大型の排気ファンが必要となる。いずれの方式も消霧能力の面では問題ないが、気化器からの冷気白煙を、エネルギーをかけて強制的に消霧させる方式であることがランニングコストを上昇させている。

3. 壁による消霧システム

3-1. 壁による消霧効果の確認試験概要

空温式気化器から一定距離の位置に、熱交換性能に影響がないよう遮蔽体（壁）を周囲に設置して消霧を行うシステムを考案し、サテライト基地 Site X にて確認試験を実施した。

ガス製造量 1[t/h] × 3 基の空温式気化器の周囲に気化器下端と同じ高さ 1.8 m の壁を設け、目視による消霧状況の確認と同時に、周囲に温度計を設置して冷気温度を計測した。壁には遮蔽性のあるビニールシートを用い、遮蔽効果の比較対象として霧を透過するネットも一部に設置した。

3-2. 試験結果

壁を設置した場合の状況を図 4 に示す。壁を設置しない通常の場合（図 1）と比較すると、霧は囲い壁から外側に向かって横溢する際に消霧され、壁の外側では消霧されている。

空温式気化器周辺での地上高さ 500mm と 1500mm における冷気温度と気化器下部中心からの水平距離との関係を図 5 に示す。



図4 SiteX における囲い壁を設置した空温式気化器の消霧状況
Fig.4 Defogging by walled air fin LNG vaporizer at Site X

500mm 高さにおける冷気と露点の温度差 ΔT に着目すれば、冷気を透過させるネットの側では ΔT は -10°C 程度のまま気化器からの距離によって変化しない。これは冷気白煙が消霧されずに地面付近を拡散していくことを示している。これに対して、ビニールシートで遮蔽した場合は、内側で ΔT は -6°C とネット側に比べれば高いものの負の状態にあるが、ビニールシート外側直近では ΔT が 5°C 近くまで上昇して正となり、1500 mm 高さと同様の値になる。この結果は冷気が遮蔽体上縁部で消霧されていることを示しており、遮蔽性の高い壁が消霧に対して有効であることを示している。

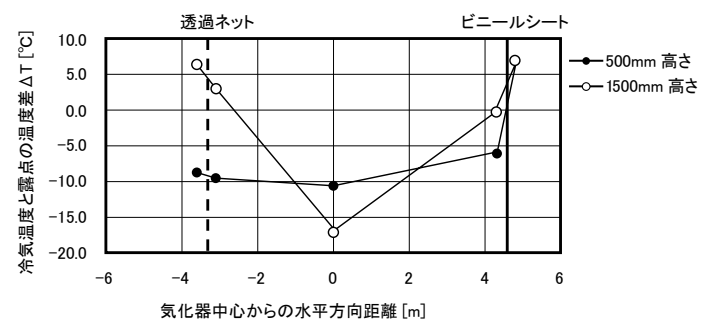


図5 囲い壁及びネットを設置した空温式気化器からの距離と ΔT の関係

Fig.5 ΔT and distance from vaporizer

試験結果から壁によって消霧が行われるメカニズムは以下の二つを考えることができる。(1) 囲い壁によって冷気は壁の内側に冷気はプールされ、冷気の上面に存在する相対的に温かい大気との熱交換により消霧される。(2) さらに、囲い壁から横溢しようとする冷気についても、壁の上縁部において冷気が温かい大気の上方に存在することになり、横溢する際には比重差によって自然に混合が起こり、消霧が促進される(図6参照)。

囲い壁内上面での冷気の消霧効果(1)は囲い壁に囲まれたエリアの面積に依存し、壁から横溢する際の消霧効果(2)は囲い壁の周長に依存すると考えられる。囲い壁による消霧では温度分布測定結果及び目視観察の結果から、(2)の壁から横溢する際の消霧能力を十分に確保することが重要であると考えられる。

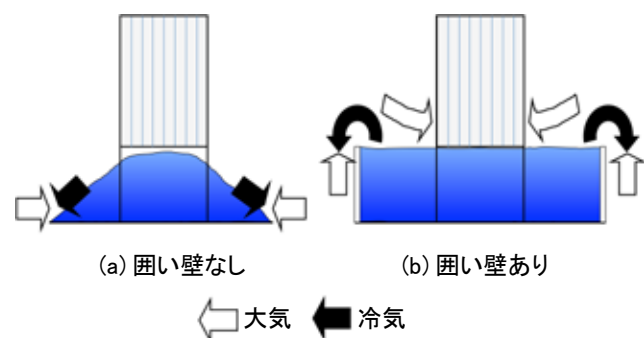


図6 囲い壁による消霧効果の概念図
Fig.6 Conceptual image of walled defogging system

4. 実機への適用

4-1. 実機化の課題

空温式気化器のガス製造能力は従来1[t/h]が単基最大とされてきたが、ガス製造能力向上の要求から単基容量1.5[t/h]のタイプが開発され、内航船受入基地あるいは大規模サテライト基地の建設にあつては気化器基数と気化器単基容量を増加させることによって対応を図っている。気化器コストの観点からは単基容量が大きい1.5[t/h]気化器が望ましいが、囲い壁によって冷気白煙を消霧しようとする場合、消霧にとって重要な周長部が相対的に短くなり消霧効果が低下することが予想される(表1参照)。

表1 囲い壁による消霧システムにおける気化器規模と壁条件
Table1 Requirements for walled defogging system

	Site X	Site Z
配置		
製造量 [t/h]	3	12
周長 [m]	46	86
製造量/周長 [(t/h)/m]	0.065	0.140

4-2. 消霧能力の向上

空温式気化器における冷気発生量の増加に対応して消霧効果を維持するためには、(1) 囲い壁の周長を長くとり得るような囲い壁のレイアウトの検討、及び(2) 囲い壁への外気供給量の増加による壁上縁部での消霧能力の向上に加え、(3) 冷気排気ファン併用による囲い壁で処理すべき冷気量自体の低減が有効であると考えられる。

(1) 囲い壁の設置レイアウトの検討

囲い壁の設置形状は空温式気化器の仕様に加え、全体レイアウトに制約される。したがって、ガス製造能力が大きい基地において、ガス製造量に対して囲い壁の周長を十分確保することは敷地面積に余裕がある場合以外は難しい。

(2) 二重壁間送風システム

囲い壁の上縁部での消霧効果を促進するために、囲い壁の外側にさらに壁を設置し、外壁の両端からポータブルファンにて送風することで、囲い壁上縁部に積極的に外気を供給する方法を考案した。二つの壁にガイドされて送風された大気は、中央部で上昇気流となり消霧壁上縁部での消霧効果の向上が期待できる(図7参照)。

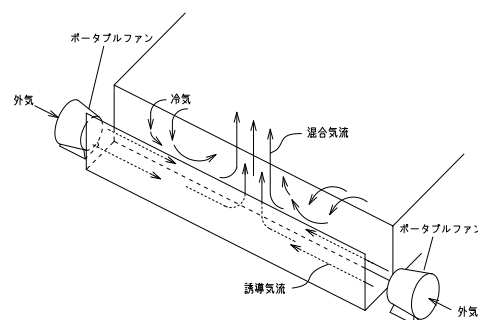


図7 二重壁間への送風システムによる消霧の概念図
Fig.7 Conceptual image of doubly walled defogging system

(3) 冷気排気ファンの併用

従来の冷気排出式のデメリットは、環境条件によらず常時気化器からの発生冷気を完全に排出させるために動力が必要な点にあった。囲い壁と併用すれば、壁によって消霧された分、冷気排気ファンの動力を低減できると考えられる。

4-3. 空温式気化器容量の大型化に対応した消霧試験

4-3-1. 試験概要

新しい内航船受入基地 (Site Z) の計画にあたり、気化器単基容量が同じ 1.5[t/h] である既設の内航船受入基地 (Site Y) に囲い壁を設置し、(1) 二重壁間への送風、及び (2) 冷気排気ファン併用の効果を確認した。試験条件を表 2 に、試験設備概要を図 9 に示す。試験結果は目視による確認に加え、実測した温度分布をもとにした熱流体解析ソフトによって評価した。

表 2 消霧装置試験条件

Table2 Test conditions for defogging system

	二重壁間送風	冷気排気ファン
Case 1	×	×
Case 2	×	○
Case 3	○	×
Case 4	○	○

○：運転 ×：停止 但し、二重壁間送風は一面にのみ実施
 囲い壁高さは 2000mm

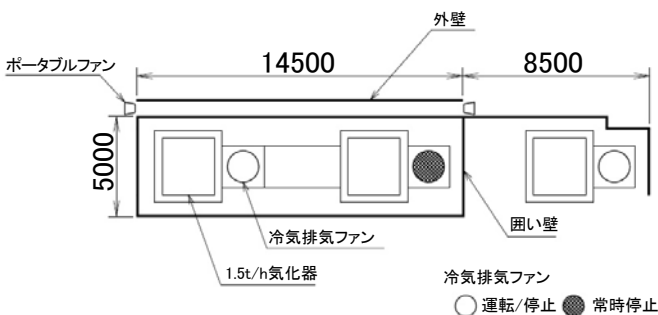


図 9 SiteY における消霧試験設備概要

Fig.9 Outline of test apparatus at site Y

4-3-2. 冷気排気ファン運転の効果

(1) 冷気排気ファン停止時 - Case1

二重壁間への送風を行わない条件下で冷気排気ファンも使用しない場合の確認を実施した。環境条件が良い場合 (湿度 49% 風速 4.2m/s 図 10(a)) であれば、囲い壁のみで消霧可能だが、厳しい場合 (湿度 85% 風速 0.9m/s 図 10(b)、図 13) では、完全に消霧できなかった冷気が滞留する。



(a) 低湿度, 弱風時
 conditions of low humidity
 and mild air flow

(b) 高湿度, 無風時
 conditions of high humidity
 and no air flow

図 10 冷気排気ファン停止時の消霧状況 (Case1)

Fig.10 Defogging by walled air fin vaporizer, when exhaust fan is turned off (Case1)

(2) 冷気排気ファン併用運転 - Case2

囲い壁内に設置した冷気排気ファンを、従来の 50% の処理量にて運転し試験を実施した。運転の状況とシミュレーションによる垂直方向の温度分布計算結果を図 11 及び図 12 に示す。



図 11 Site Y における冷気排気ファン併用時の消霧状況 (Case2)

Fig.11 Defogging by doubly walled air fin vaporizer at Site Y, when exhaust fan is in motion (Case2)

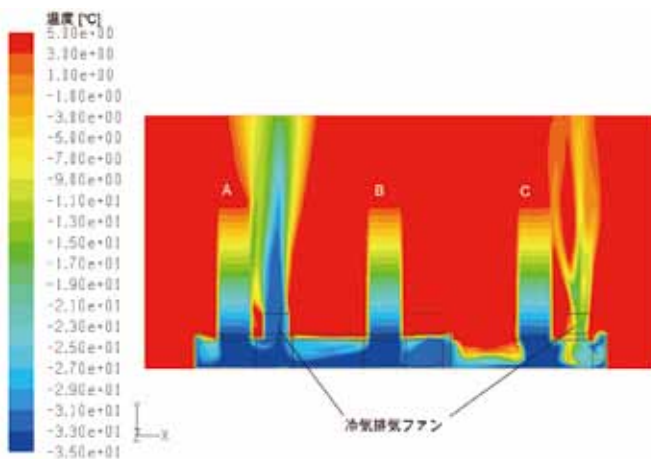


図12 Site Yにおける冷気排気ファン併用時の温度分布計算結果
Fig.12 Simulated temperature distribution, when exhaust fan is in motion at Site Y

完全に壁で囲われていない気化器Cに付設設置されている冷気排気ファンの排出状況と、囲い壁内の気化器Aに付設されている冷気排気ファンのそれとを比較すると、後者は囲い壁内に蓄積された冷気を効率よく排気することができている。これによって残りの冷気が囲い壁の効果で消霧されることがわかり、シミュレーションの結果ともよく一致している。

4-3-3. 二重壁間への送風の効果 - Case3 及び Case4

冷気排気ファンを停止した状態で二重壁間にポータブルファンにより送風した場合 (Case3: 湿度 85% 風速 0.9m/s) の消霧状況を図 13 に示す。厳しい環境条件ではあるが、二重壁間に送風することにより内側の囲い壁から横溢した冷気白煙は、滞留することなく壁上方で拡散、混合により消霧されることがわかる。



図13 二重壁間への送風による消霧状況
Fig.13 Defogging by doubly walled air fin vaporizer

二重壁間への送風によって消霧効果の向上は見込めるが、最後に冷気排気ファン (50% ロード運転) と、二重壁送風の併用の効果を確認するテストを行った (Case4)。これを冷気排気ファンのみ運転する場合 (Case2) 及び二重壁間送風のみ実施する場合 (Case3) と比較した (図 14)。

Case2 及び Case3 いずれの場合でも二重壁外側では冷気と露点の温度差 ΔT は正ではあるがその値は 1 ~ 3°C と大きくない。これに対して、二重壁間への送風と冷気排気ファンを同時に行う Case4 では、 ΔT は全体的に 5 ~ 10°C 押し上げられ二重壁間外側の地点では 8°C となり、確実な消霧効果が期待できる。

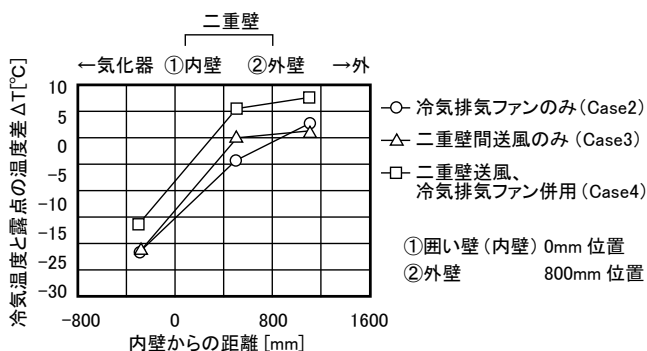


図14 二重壁間への送風による消霧効果
Fig.14 Effects of doubly walled system

4-4. 空温式気化器の大容量化に対応した消霧装置の設計

4-4-1. 検討条件

新設する内航船受入基地 (Site Z) に設置する消霧装置の設計を、同様の基地 (Site Y) における試験結果をもとに確立した解析手法を用いて行った。冷気排気ファンは定格能力を従来の 1/2 とし、併用運転を前提に検討した。また、あわせてポータブルファンの配置の相違による二重壁間への送風の効果についても確認を行った (図 15 参照)。

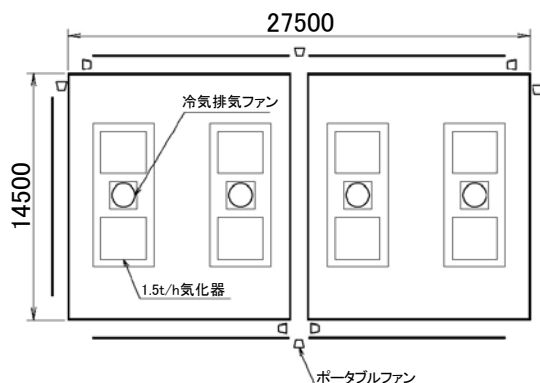


図15 Site Zにおける消霧装置概要
Fig.15 Outline of defogging apparatus at site Z

4-4-2. 検討結果

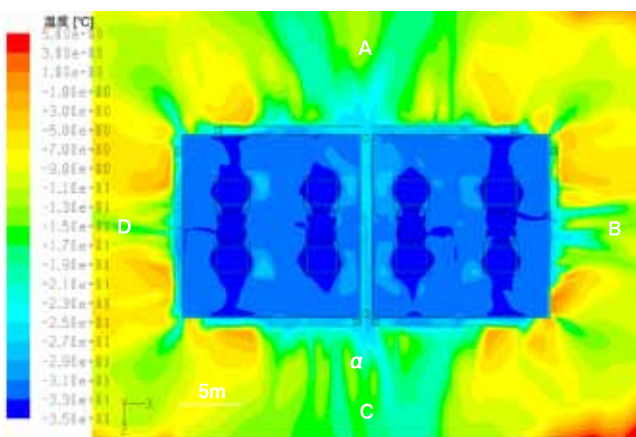
シミュレーションは冬季を想定して大気温度を 5℃ とし、気化器周囲の冷気温度分布を解析した。尚、外気温度が 5℃ の時に湿度 70% であれば露点 -0.7℃、湿度 80% であれば露点 1.9℃ と計算されるので、囲い壁外側の温度が平均的な湿度条件では 0℃ 付近、高湿度条件では 2℃ となる部分を消霧エリアと考えることができる。

(1) 冷気排気ファンのみ運転した場合の消霧効果

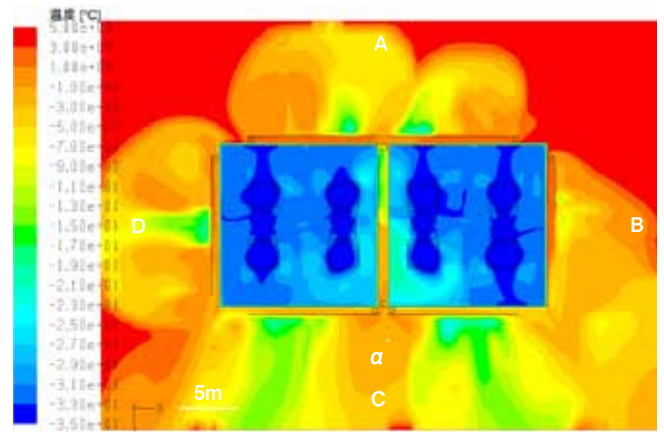
無風条件下において、冷気排気ファン運転で二重壁間送風を実施しない場合の温度分布シミュレーション結果を図 16(a) に示す。Site Y での運転状況と比較すると、冷気発生量が増加した分、囲い壁での処理能力が不足し、冷気排気ファンの運転によっても冷気が囲い壁エリアから外に横溢して冷気白煙が滞留すると予想される。

(2) 冷気排気ファン運転と二重壁間に送風した場合の消霧効果

無風条件下での冷気排気ファンの運転に加え二重壁間送風を実施した場合の温度分布シミュレーション結果を図 16(b) に示す。二重壁間へ送風することにより壁の外側における温度は 20℃ 程度上昇する箇所 (図 16(a) (b) 中に図示する α 地点) もあり、Site Y における二重壁間への送風による結果 (図 14 参照) と比較しても、十分な効果が得られている。また、ポータブルファンを対向配置にて送風したサイド (側面 A) と対向配置しないサイド (側面 B, C 及び D) を比べると、対向送風の方がより効果的であることがわかる。



(a) 二重壁間送風を実施しない場合
when air flow is NOT passed through the walls



(b) 二重壁間送風を実施する場合
when air flow is passed through the walls

図 16 Site Zにおける温度分布計算結果(水平断面 地上300mm)
Fig.16 Simulated temperature distribution at site Z(300mm from the earth)

(3) 微風時の消霧効果

微風 (風速 2m/s) 下で冷気排気ファンの運転及び二重壁送風を実施した場合のシミュレーション結果を図 17 に示す。風が吹いてくる面 (側面 A) 及び側面 (側面 B 及び D) のエリアでは壁から 5 m 程度離れば 2℃ 程度となるため、湿度 80% の条件でも消霧が期待できる。

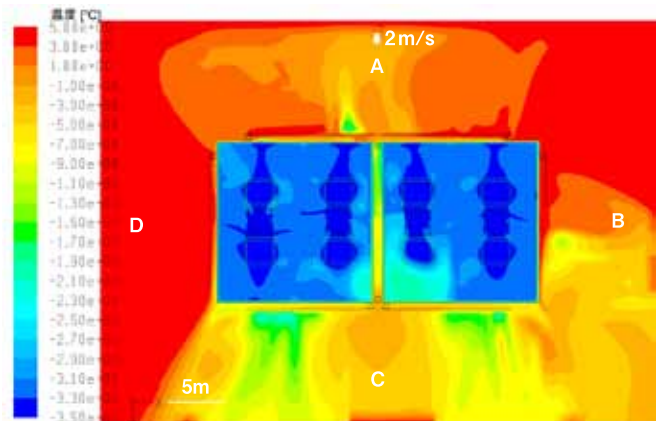


図 17 Site Zにおける微風時の温度分布計算結果
Fig.17 Simulated temperature distribution at site Z

実際のプラントでは、無風という条件はほとんどなく微風条件での解析結果から考えれば、冷気排気ファンの併用運転時にポータブルファンによる二重壁間への送風を行えば、平均的な湿度条件 70% においても消霧効果が期待できることがわかった。

4-5. 実機運転状況

(1) 消霧状況

本年 2 月から Site Z において上記の検討結果に

基づいて設計された消霧装置が本格運転を開始した。Site Z が港湾に立地して比較的風が強いこともあり、消霧効果面だけでなくランニングコスト面でも優れた効果を発揮している。気化器最大負荷 12[t/h] 製造時の消霧状況を図 18 に示す。



図 18 Site Z における消霧状況
Fig.18 Defogging by doubly walled air fin LNG vaporizer at site Z

(2) 本消霧システムの評価

今回開発した壁を利用した消霧システム及び従来法におけるランニングコストを表 3 で比較した。囲い壁を利用した消霧システムは、気化器の処理量に対して壁の周長を大きくとれる通常規模のサテライト基地の場合、ランニングコストを従来方式に比べ 1/56 ~ 1/8 と大きく低減できる。

内航船受入基地または大型サテライト基地の場合には、二重壁間への送風に加え、冷気排気ファンとの併用運転で対応可能である。冷気排気ファンは常時運転を前提としても従来の半分の動力で済み、二重壁間への送風は運転時の環境条件、風向、風速等にあわせた補助的な運転が可能である。港湾地区に設備を建設する場合には風速が大きいためポータブルファンを用いた二重壁間送風の動力を抑えることができる。

表 3 消霧装置のランニングコスト比較

Table3 Comparison of defogging system running costs

方式	コスト比	備考
温風加温式	56	
冷気排気式	8	能力 100%
囲い壁式	6	冷気排気ファン併用 (能力 50%)
	1	

* 囲い壁式は二重壁間への送風を前提とする。

5. 結言

空温式気化器から発生する冷気による白煙について、白煙発生モデル構築を行い、発生条件を明らかにするとともに、実地試験によりその有効性を確認した。また、同時に囲い壁を用いた消霧システムを考案、実証試験を通じランニングコストに優れた消霧装置として実機へと展開させることができた。開発した囲い壁による消霧システムは以下の特長を有している。

- (1) 空温式気化器の周囲に囲い壁を設置することにより、冷気と大気との密度差及び風力を利用して消霧が行われるため、消霧に要するコストを大きく低減できる。空温式気化器が大容量化し、ガス製造量 / 周長の比が大きくなる場合には、冷気排気ファンの併用が有効であり囲い壁と併用することにより、冷気排気ファンの動力を抑えることができる。
- (2) 囲い壁の外側にさらに壁を設置しそれら二つの壁の間にポータブルファンにて送風すれば、囲い壁上縁部への外気送風量の増加により消霧を促進できる。風向・風速など環境条件に応じた運転ができるのでランニングコストを低減させることが可能である。
- (3) 空温式気化器周囲への冷気滞留状況の温度データを基にして熱流体解析を実施することにより、レイアウトや環境条件に応じた設備設計が可能である。

従来、消霧設備は空温式気化器の付帯設備的な位置づけにあって必ずしもランニングコスト面には焦点が当たってこなかった。今回紹介したように冷気の物理的性質や風力を利用することにより、消霧処理におけるランニングコストの低減が可能となったことで、空温式気化器の内航船基地や大型サテライト基地への適用を広げることができる。

6. 謝辞

本開発にあたり試験にご協力頂いた石巻ガス株式会社殿、並びに四国ガス株式会社殿に深く感謝します。

参考文献

- 1) 濱田光男, 幸良之, 山本哲也. “小型内航船による LNG 輸送と二次基地システムの開発”. 都市ガスシンポジウム 2005 発表要旨集. 名古屋, 2005-06-02. 日本ガス協会, (CD-ROM)