

# アンモニア燃料船への安全かつ円滑な バンカリングの実施に向けた検討委員会

## 第6回 検討委員会資料

放水を考慮したアンモニアの  
漏洩シミュレーション結果

令和7年3月14日

MOL マリン&エンジニアリング株式会社

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 対象としたシナリオ.....	1
3. シミュレーション条件.....	1
3.1 液体アンモニアの蒸発速度モデル.....	1
3.2 水滴が吸収するアンモニア量推定モデル.....	5
4. 放水を考慮したアンモニアの漏洩シミュレーション.....	9
5. 評価で用いた基準.....	10
6. 評価結果 .....	10
6.1 アンモニアガス濃度25ppm 以上が継続する時間 .....	10
6.2 各アンモニアガス濃度の拡散範囲.....	11
6.3 各アンモニアガス濃度の最大到達距離.....	12
7. 放水を考慮したアンモニアの漏洩シミュレーション結果のまとめ.....	12
参考文献 .....	12
付録：野外実験を対象とした比較計算.....	14
シミュレーション結果.....	16
実験結果との比較 .....	18

## 1. はじめに

第5回「アンモニア燃料船への安全かつ円滑なバンカリングの実施に向けた検討委員会」（以下、「検討委員会」と示す）において、第4回検討会にて選定した漏洩シナリオ（ケース7）を対象に、アンモニアの漏洩シミュレーションを実施し、アンモニアガス濃度25 ppm以上が10分以上継続する範囲や漏洩したアンモニアの最大到達距離を用いてシミュレーション結果の評価を行った。

アンモニアガスの拡散範囲を抑制する手段の1つとして、放水が有効と考えられる。今回は、ケース7を対象に、第5回検討委員会で提示したモデルに放水の効果を模擬したモデルを加味することでシミュレーションを実施し、漏洩したアンモニアの最大到達距離を用いてシミュレーション結果の評価を行った。

## 2. 対象としたシナリオ

対象としたシナリオは、第5回検討委員会でも示したケース7である。表2-1にケース7の内容を示す。

表2-1 ケース7：漏洩シミュレーションを実施するシナリオ

【ケース7】 No. 207 燃料船ーバンカー船間 海水面上 少量漏洩 $1.0 \times 10^{-3}$ 回/年
アンモニア移送中、ERC 緊急遮断し、カップリング内のアンモニアが海上へ漏洩する。LNG バンカリングに用いられる ERC の仕様を参照し、液体アンモニアが8 L、気体アンモニアが4 L漏洩するものとする。

## 3. シミュレーション条件

シミュレーション条件は第5回検討委員会で示したものに加え、放水条件が挙げられる。放水条件として、水滴群による液体アンモニアの蒸発速度モデル、水滴群が吸収するアンモニア量推定モデルを示す。

### 3.1 液体アンモニアの蒸発速度モデル

静止流体中の球体と周囲流体との熱伝達量に関する解析解を参考として、球座標系の定常熱伝導を仮定し、熱伝達に関する無次元数であるヌッセルト数を求め、液体アンモニアの蒸発潜熱を考慮して質量蒸発速度を求める。

#### 3.1.1 仮定

- ・ 海面上に落下した液体アンモニアは1計算格子内(1 m×1 m)に均一な液だまりを形成している
- ・ 短時間の現象であるため、アンモニア液だまりの海水への溶込みを無視する
- ・ 水滴は球形を仮定し、変形を考慮しない
- ・ 水滴群による液体アンモニアの希釈を考慮しない

- ・ 水滴はアンモニア液だまりとの衝突により、瞬時に速度はゼロになる
- ・ 水滴から液体アンモニアへの熱移動は瞬時に起こり、定常状態に達する
- ・ 水滴群によるアンモニア吸収効果は、吸収量を蒸発したアンモニアから差し引くことで考慮する

### 3.1.2 単一静止球から無限静止流体中への熱伝達

一般に、静止物体中の熱移動は次の熱伝導方程式によって表される。

球座標系  $(r, \theta, \phi)$  で記述した熱伝導方程式：

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}$$

ここで、 $\tau$  は時間、 $\alpha$  は熱拡散係数を表している。

仮定：

1. アンモニアの自然蒸発はない
2. 定常状態  $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0\right)$
3. 熱流束は、半径方向のみに存在する  $\left(\frac{\partial}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial}{\partial \phi} = 0\right)$

その結果、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

のように簡単になり、これを  $T$  について解くと、

$$T = -\frac{C_1}{r} + C_2$$

が得られる。

静止流体（ここではアンモニア）中の半径  $R$  の球（ここでは水滴）に関する境界条件は、次の通りになる。

$$\begin{cases} r = R, T = T_w \\ r = \infty, T = T_a \end{cases}$$

ここで、 $T_w$  は球表面の温度、 $T_a$  は静止流体の温度を表している。

よって、

$$C_1 = -(T_w - T_a)R, C_2 = T_a$$

$$\frac{T - T_a}{T_w - T_a} = \frac{R}{r}$$

のように求められる。

球体表面での熱流束 $q_r$ は、フーリエの法則とニュートンの冷却の法則から以下が成り立つ。

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_w - T_a)$$

$$-kR(T_w - T_a) \frac{-1}{R^2} = h(T_w - T_a)$$

$$\frac{hR}{k} = 1$$

ここで、 $k$ は熱伝導率、 $h$ は熱伝達係数である。

その結果、球体の直径 $D$ を代表長さとしたヌッセルト数 $Nu$ は、次のようになる。

$$Nu = \frac{hD}{k} = 2$$

これは、次のランツ・マーシャル式<sup>[1]</sup>において、粒子の運動が非常に遅い場合（レイノルズ数 $Re \ll 1$ ）に対応している。

$$Nu = 2(1 + 0.30Re^{1/2}Pr^{1/3}) \quad RePr^{2/3} < 200.$$

ここで、 $Pr$ はプラントル係数である。

### 3.1.3 水滴の放熱モデル

球体と無限静止流体の間の熱伝達は、ニュートンの冷却の法則に従うことから、以下の条件のもと、液体アンモニアの蒸発速度 $\dot{m}$ が求められる。なお、式内に用いた変数の内容については表3.1.3-1に示す。

- 球体周囲の液体（ここでは液体アンモニア）は沸騰温度にあると仮定
- ヌッセルト数： $Nu = 2$
- 熱伝達率： $Q = hA(T_w - T_{boiling})$
- 液滴周囲の液体を気化させるのに必要なエネルギー： $Q_{vap} = \dot{m}h_{fg}$

したがって、 $Q = Q_{vap}$ から蒸発速度は次式により求められる。

$$\dot{m} = \frac{hA(T_w - T_{boiling})}{h_{fg}}$$

表3.1.3-1 変数名

	内容	単位
$Q$	熱伝達率	W
$A$	液滴の表面積	$A = \pi D^2$
$T_w$	液滴温度	°C
$T_{boiling}$	液体沸騰温度 ( $T_{boiling} = -33.3$ °C)	°C
$h_{fg}$	蒸発潜熱	J/kg
$\dot{m}$	蒸発速度	kg/s

### 3.1.4 蒸発量の試算

米国商務省標準技術研究所の物性データベース<sup>[2]</sup>に基づき、大気圧下の液体アンモニアの物性値を次のように与える。

- 沸点： $T_{boiling} = -33.3$  °C
- 蒸発潜熱： $h_{fg} = 1372$  kJ/kg
- 熱伝導率： $k = 0.57854$  W/(m·k)
- 熱伝達係数： $h = \frac{2k}{D} = 1157$  W/(m<sup>2</sup>·K)

放出された水滴について、

- 温度： $T = 20$  °C
- 水滴直径： $D = 1$  mm
- 水滴表面積： $A = \pi D^2 = 3.1416 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>

とすると、液体アンモニアの蒸発速度は次のように求められる。

$$\dot{m} = \frac{hA(T_w - T_{boiling})}{h_{fg}} = 1.5445 \times 10^{-7} \text{ [kg/s]}$$

また、放出される水量 $Q$ は、バンカー船と燃料船の放水量の和として与え、次のように単位時間あたりの水滴数が求められる。

- $Q = Q_1 + Q_2 = \frac{40\text{m}^3}{\text{hr}} = 0.0111111 \text{ m}^3/\text{s}$   
(バンカー船： $Q_1 = 15 \text{ m}^3/\text{hr}$ 、燃料船： $Q_2 = 25 \text{ m}^3/\text{hr}$ )
- 水滴の体積： $5.236 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  ( $V_{\text{droplet}} = \pi D^3/6$ )
- 1秒に放出される水滴の数： $\frac{Q}{V_{\text{droplet}}} = 21220610$  個

液体アンモニアは瞬時に蒸発することを仮定すると、微小時間 $\Delta t$ の間に蒸発す

る液体アンモニアの質量は、上記の水滴数と1滴あたりの蒸発速度から次のように求められる。

$$\dot{m} = (1.5445 \times 10^{-7})\Delta t \times 21220610\Delta t \approx 3.3\Delta t^2 \text{ [kg]}$$

### 3.2 水滴が吸収するアンモニア量推定モデル

#### 3.2.1 仮定

DNV Phast による昨年度の計算結果を用いて、海水面上に形成される液だまりから海水に溶け込むアンモニアの質量流束 $F_p$  [kg/(m<sup>2</sup>・s)]を求める。

#### 3.2.2 吸収モデル

アンモニア溶解速度 $\dot{m}_d$  [kg/s] (図3.2.2-1) と液だまり半径 $r$  [m]の時間変化 (図3.2.2-2) を用いて、海水に溶け込むアンモニアの質量流束 $F_p$  [kg/(m<sup>2</sup>・s)]は次式から求められる。

$$F_p = \frac{\dot{m}_d}{\pi r^2} \approx 3.0 \times 10^{-2} \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]}$$

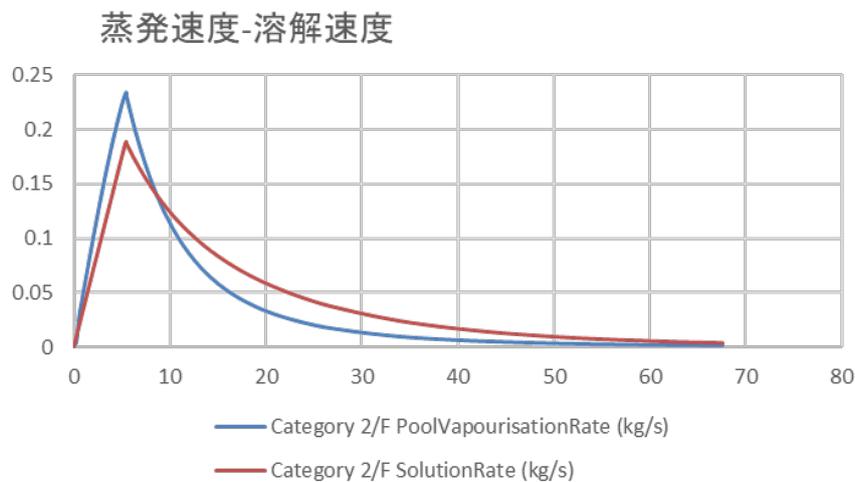


図3.2.2-1 蒸発速度及び溶解速度の時間変化 (DNV Past による昨年度の結果)

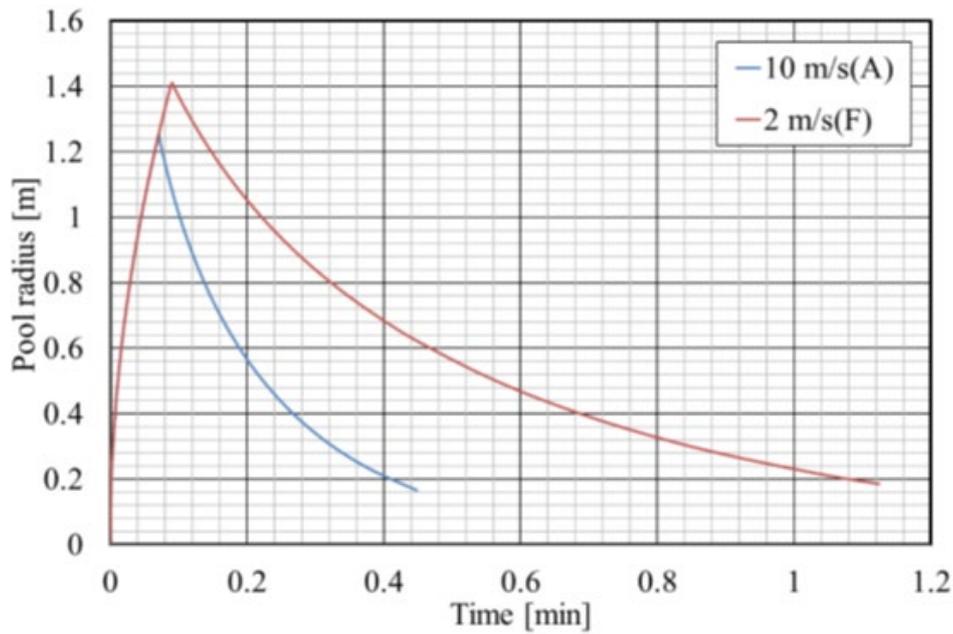


図3.2.2-2 液面半径の時間変化 (DNV Past による昨年度の結果)

一方、物質移動現象と熱移動現象の間にはアナロジーが成り立つので、蒸発したアンモニアが水滴に吸収される過程は、静止状態を仮定すると3.1.2と同様に解析でき、ヌッセルト数 $N_u = 2$ に代わり、シャーウッド数 $Sh = 2$ が導かれる。また同様に、これは物質移動に関するランツ・マーシャル式<sup>[1]</sup>において、粒子の運動が非常に遅い場合 (レイノルズ数 $Re \ll 1$ ) に対応している。

$$Sh = 2(1 + 0.30Re^{1/2}Sc^{1/3}) \quad ReSc^{2/3} < 200.$$

ここは、 $Sc$ はシュミット数である。

次に、シャーウッド数 $Sh = 2$ を仮定して物質移動係数 $h_m$ を求める。水滴直径 $D = 1 \text{ mm}$ 、アンモニアの拡散係数 $D_m = 2.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (25°C)から、

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_m}{D} = \frac{2 \times 2.29 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-3}} \approx 4.62 \times 10^{-2} \text{ [m/s]}$$

蒸発直後のアンモニアは純濃度であり、水滴にアンモニアが溶け込んでいないとすると $-33.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、1気圧におけるアンモニアガスの濃度 $C_{NH_3} (= 0.90325 \text{ kg/m}^3)$ と水滴中のアンモニア濃度 $C_w (= 0 \text{ kg/m}^3)$ から、水滴群によって吸収されるアンモニアの質量流束 $F_d [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ は次のように求められる。

$$F_d = h_m (C_{NH_3} - C_w) \approx 4.62 \times 10^{-2} \times (0.90325 - 0) \approx 4.2 \times 10^{-2} \text{ [kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$$

昨年度のDNV Phastの結果から得られる質量流束 $F_p = 3.0 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ と同程度であり、どちらの数値を採用してもアンモニアの拡散範囲に大きな差は生じないと

考えられ、幾分小さく見積もられている DNV Phast の質量流束を用いた拡散範囲は安全側の結果を示すと考えられる。

### 3.2.3 吸収量の試算

3.1.4で求めた通り、放出される水滴数は21220610 個/秒であるから、微小時間 $\Delta t$ の間に水滴が吸収するアンモニアの質量 $m_d$ は、次のように求められる。

$$m_d = (3.0 \times 10^{-2})\Delta t \times (3.1416 \times 10^{-6}) \times 21220610\Delta t \approx 2.0\Delta t^2 \text{ [kg]}$$

### 3.2.4 放水方法

アンモニア漏洩源を覆うように水滴群が落下するよう、放水方法を設定した。

- ・放水ノズルの内径：19 mm（ノズルからの放水範囲（角度）は図3.2.4-1を参照）
- ・放水はバンカー船側、燃料船側の両方から実施する
- ・バンカー船側、燃料船側のそれぞれにおいて放水位置を設定する
- ・アンモニア漏洩源と放水位置との関係を図3.2.4-2に示す
- ・バンカー船側と燃料船側から放水する流量・流速・放水範囲（角度）を表3.2.4-1に示す

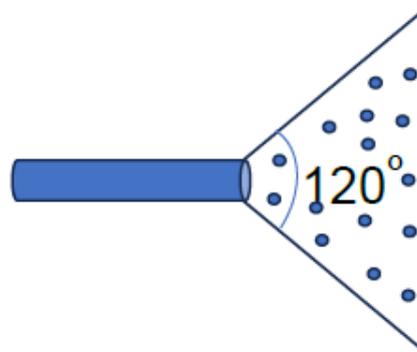


図3.2.4-1 ノズルからの放水範囲（角度）

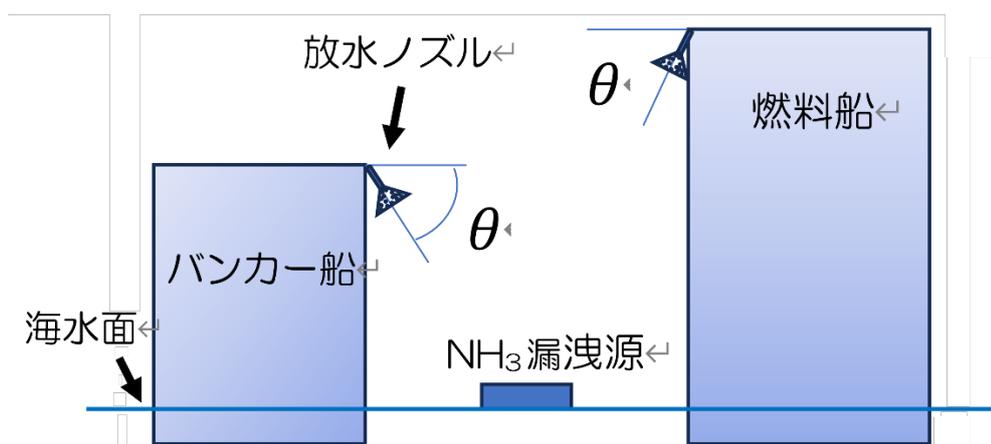


図3.2.4-2 アンモニア漏洩源と放水位置との関係

表3.2.4-1 バンカー船側と燃料船側から放水する流量・流速・放水範囲（角度）

	バンカー船	燃料船
流量(m <sup>3</sup> /h)	15	25
流速(m/s)	14.7	24.5
放水範囲(角度) (図3.2.4-2の $\theta$ )	60.0	65.0

#### 4. 放水を考慮したアンモニアの漏洩シミュレーション

バンカー船から燃料船へのバンカリング中にアンモニアが漏洩した際、バンカー船及び燃料船の両方から放水を行った上で、アンモニアガスがどのように拡散することが想定されるのか検証するため、放水を伴うアンモニア漏洩シミュレーションを行う。大気温度や水温は20℃、相対湿度は70%、気流は海上から陸上に向かって2 m/sで流れていると仮定する。また、海面粗度および陸上粗度をそれぞれ0.0001、0.001とする。米国化学工学会 (AIChE) のガイドラインならびに荷役時の風速制限を参照し、各風速に対する大気安定度として以下の条件を採用する。

- ・穏やかな条件

風速：2 m/s

大気安定度：F（安定）

対象となる燃料船とバンカー船の諸元を表4-1、2船間の距離及び岸壁高を表4-2に示す。喫水は表4-1に示した通り夏季最大満載喫水とし、バンカー船が燃料船に対して右舷着けで着岸する場合を想定する。なお、これらは第5回検討委員会で示した、放水を考慮しないアンモニアの漏洩シミュレーションで用いたものと同様である。

表4-1 対象船舶の諸元

諸元	燃料船	バンカー船
船型モデル	総トン数6万トン級 PCC(Pure Car Carrier)	総トン数749トン型
全長(m)	199.95	81.50
垂線間長(m)	190.00	74.40
型幅(m)	32.20	13.80
型深(m)	34.20	7.84
夏季最大満載喫水(m)	9.80	4.68

表4-2 2船間の距離及び岸壁高

バンカー船と燃料船の間隔(m)	3.90
燃料船と埠頭の間隔(m)	0.60
岸壁高(海面から天端まで)(m)	2.63

## 5. 評価で用いた基準

以下2点を評価に用いた。放水を行わない場合におけるアンモニアガスの拡散範囲と比較するため、第5回検討委員会で示したシミュレーションの評価に用いた基準と同じものとしている。

- (1) アンモニアガス濃度25 ppm以上が継続する範囲
- (2) 各アンモニアガス濃度（25 ppm・220 ppm・2,700 ppm）の拡散範囲及び最大到達距離

## 6. 評価結果

5. で示した基準を用いて、シミュレーション結果の評価を行った。

### 6.1 アンモニアガス濃度25ppm以上が継続する時間

表6.1-1に、アンモニアガス濃度25 ppm以上が継続する時間を示す。放水を行った場合、放水を行わない場合に比較し、25 ppm以上および2,700 ppm以上の濃度では、アンモニアガスが存在する時間が半分程度に大きく減少している。また、220 ppm以上の範囲でも約3割減少している。よって、放水によりアンモニアガスの拡散が促進されていることが分かる。

表6.1-1 各濃度帯が継続する時間

各濃度帯の継続時間	25 ppm	220 ppm	2,700 ppm
放水を行った場合 (今回の結果)	3分29秒	1分40秒	48秒
放水を行わなかった場合 (第5回検討委員会で示した結果)	6分37秒	2分17秒	1分30秒

## 6.2 各アンモニアガス濃度の拡散範囲

地上0.5 mの水平断面上における各濃度の最大拡散範囲について、放水を行った場合の結果を図6.2-1に、放水を行わない場合の結果を図6.2-2に示す。アンモニアガス濃度が25 ppm、220 ppmの場合は放水することにより、アンモニアガスの拡散範囲が顕著に減少していることが分かる。一方、アンモニアガス濃度が2,700 ppmの場合は放水を行った場合と行わない場合で拡散範囲に大きな変化はみられないと考える。

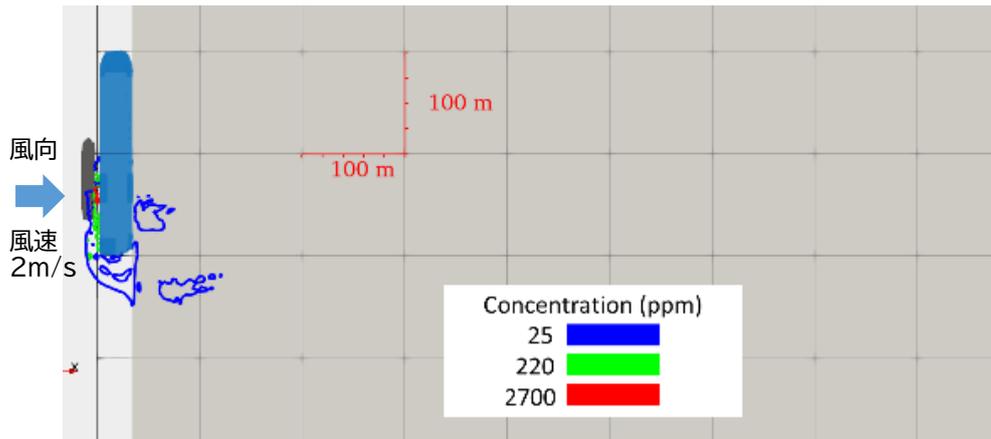


図6.2-1 アンモニアガス濃度の拡散範囲（放水を行った場合）

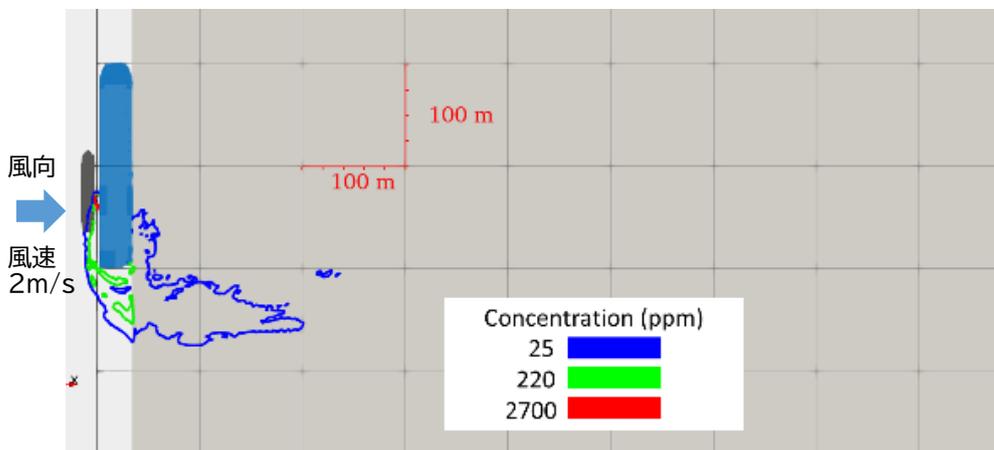


図6.2-2 アンモニアガス濃度の拡散範囲（放水を行わない場合）

### 6.3 各アンモニアガス濃度の最大到達距離

地上0.5 mの水平断面上における最大到達距離を表6.3-1に示す。アンモニアガス濃度が25 ppm、220 ppmの場合、放水を行うことにより最大到達距離が減少したことを確認した。

表6.3-1 各アンモニアガス濃度における最大到達距離

各濃度帯の最大到達範囲	25 ppm	220 ppm	2,700 ppm
放水を行った場合 (今回の結果)	155 m	77 m	22 m
放水を行わない場合 (第5回検討委員会で示した結果)	249 m	132 m	16 m

### 7. 放水を考慮したアンモニアの漏洩シミュレーション結果のまとめ

ケース7を対象に第5回検討委員会で提示したモデルに放水の効果を模擬したモデルを加味することでシミュレーションを実施し、漏洩したアンモニアの最大到達距離を用いてシミュレーション結果の評価を行った。その結果、放水を行った場合、25 ppm以上および2,700 ppm以上の濃度では、アンモニアガスが存在する時間が半分程度に大きく減少することが分かった。また、220 ppm以上の範囲でも約3割減少していることが分かった。また、各アンモニアガス濃度（25 ppm・220 ppm・2,700 ppm）の最大到達距離より、アンモニアガス濃度が25 ppm、220 ppmの場合、放水を行うことにより最大到達距離が減少したことを確認した。水滴群による液体アンモニアの蒸発モデル、水滴群が吸収するアンモニア量推定モデルについては更なる検討が不可欠であるものの、放水がアンモニアガス拡散範囲の抑制に一定の効果があることが認められる。

### 参考文献

- [1] 渡辺治夫, 粒子流体間の物質, 熱および運動量移動のアナロジー, 粉体工学会誌, Vol. 21 No. 1 (1984), 25-29.
- [2] NIST Chemistry WebBook, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>.

付録：野外実験を対象とした比較計算

放水モデルを検証するため、アンモニア漏洩時のウォーターカーテンの効果を調査した野外実験<sup>[1]</sup>を対象に、再現計算を実施した。野外実験の概略図を図1に、実験条件を表1に示す。実験で使用されたウォーターカーテンは地上面に設置されたノズルから扇状に放水され、その流量は平均730リットル/分である。

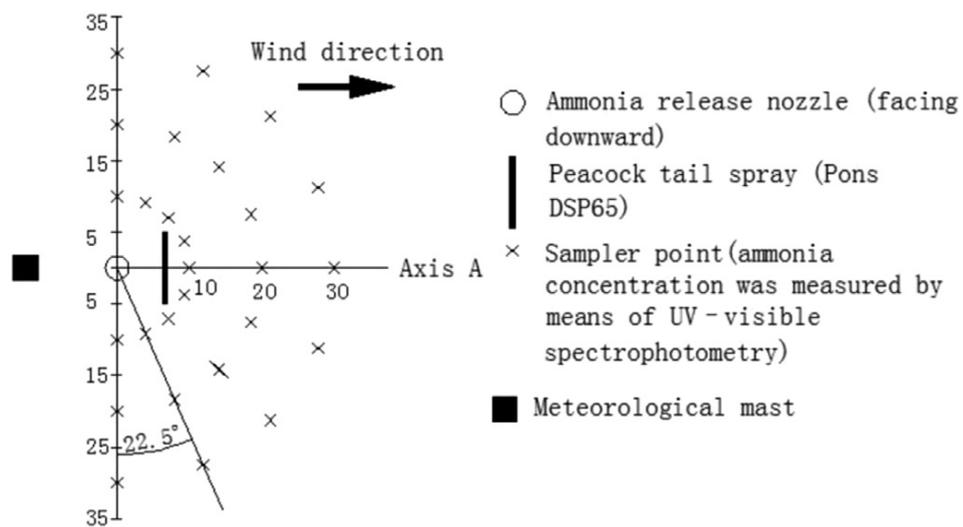


図1 野外実験の概略図<sup>[2]</sup>

表1 実験条件<sup>[1]</sup>

Release rate (kg/min)	13.5
Wind speed (m/s)	2.8
Relative humidity (%)	50
Temperature (°C)	17
Source-curtain distance (m)	6

実験体系に対する計算格子を図2に示す。

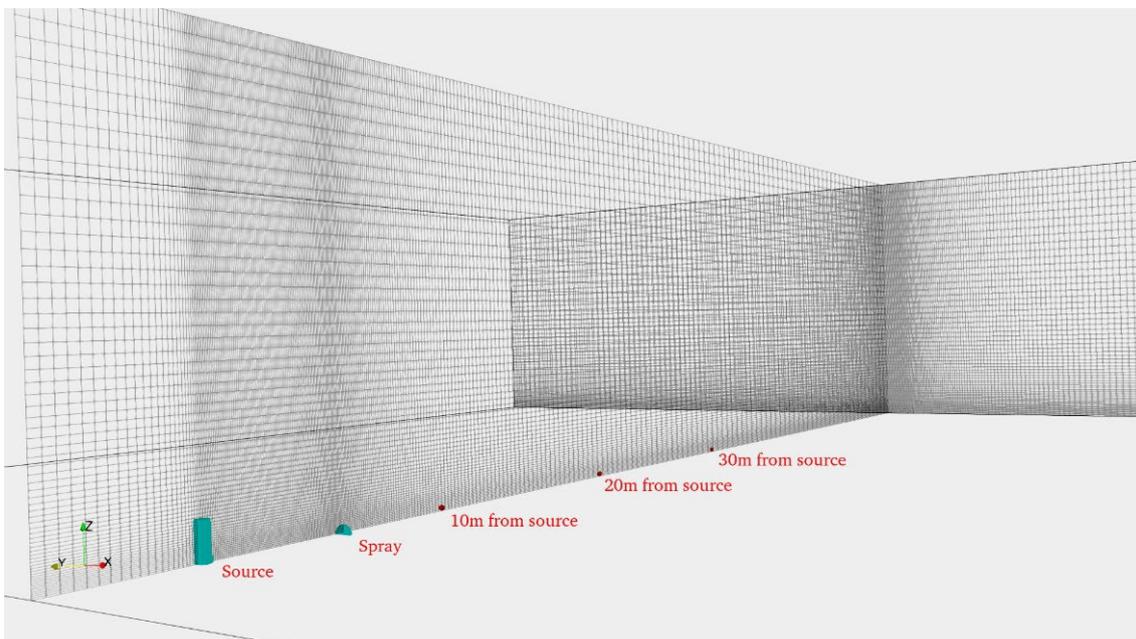


図2 野外実験を対象とした計算格子

計算条件は以下の通りである。

- 計算領域
  - ・ サイズ (m) :  $60 \times 60 \times 15$
  - ・ 格子数 :  $256 \times 256 \times 64$
  - ・ 格子タイプ : 不等間隔格子
  - ・ 最小格子サイズ : 5 cm
- アンモニア発生源 (Source)
  - ・ 放出率 : 13.5 kg/min
  - ・ アンモニア濃度 : 100 % (モル分率)
  - ・ 放出形態 : 連続放出
  - ・ 放出位置 : 気流の流入境界から5 m下流位置
- 散水スプレー
  - ・ 放水開始 : アンモニア放出から30秒
  - ・ 放水継続時間 : 120秒
  - ・ 水滴直径 : 1 mm
  - ・ 放水速度 : 30 m/s
  - ・ 位置 : アンモニア発生源より6 m下流位置

### シミュレーション結果

実験条件に対するシミュレーション結果を図3に示す。地面にそって下流側に流れているアンモニアガスに散水し、形成されたウォーターカーテンによって後方のアンモニア濃度が減少していることが分かる。

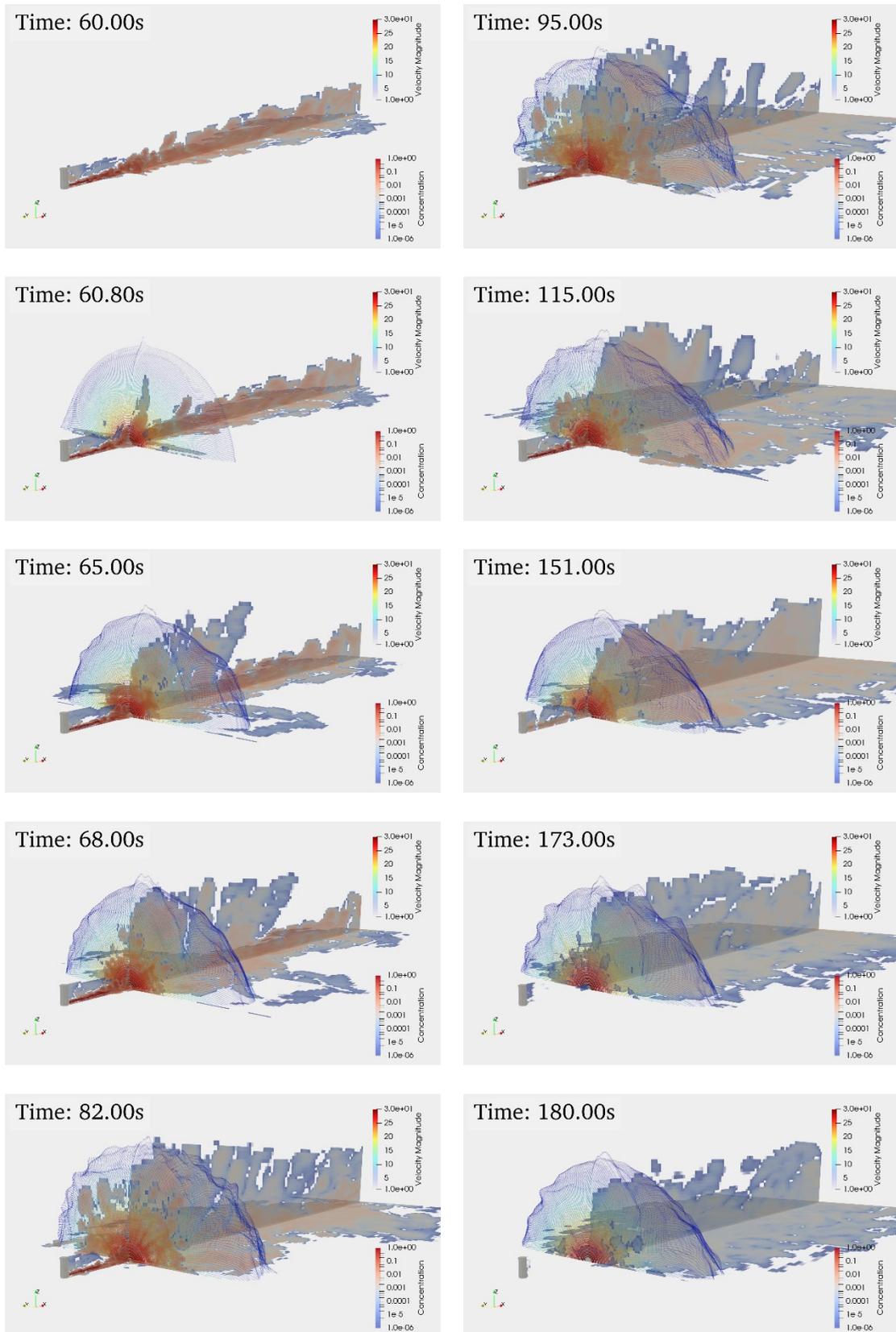


図3 実験条件に対するシミュレーション結果

## 実験結果との比較

本計算結果の妥当性を確認するため、実験値<sup>[1]</sup>ならびに既報の計算値<sup>[2]</sup>と比較する、アンモニア放出源から下流側10 m、20 mおよび30 mの位置でのアンモニア濃度を表2に示す。文献<sup>[2]</sup>では本計算手法とは異なり、乱流モデルとして2種類のレイノルズ平均モデル ( $k-\varepsilon$ , RNG) が採用されている。

実験値および既報の計算値を比較すると、本計算で得られた結果は妥当と判断でき、既報の計算値と遜色のない結果を与えていることが分かる。サンプリング位置30 mでは、実験値と計算値に大きな差異が見られるが、実験では気流方向が中心軸 (Axis A、図1参照) から外れていることが主たる原因と考えられる。

表2 アンモニア濃度の比較

サンプリング位置 (Axis A 上)	アンモニア濃度 (モル分率)		
	10 m	20 m	30 m
実験値 <sup>[1]</sup>	2.615	1.091	0.034
計算値 <sup>[2]</sup> ( $k-\varepsilon$ モデル)	2.230	0.990	0.554
計算値 <sup>[2]</sup> (RNG モデル)	2.720	1.180	0.768
本計算 (陰的 LES)	2.688	0.862	0.472

## 参考文献

- [1] A. Dandrieux, G. Dusserre, J. Ollivier, H. Fournet, Effectiveness of water curtains to protect firemen in case of an accidental release of ammonia: comparison of the effectiveness for two different release rates of ammonia, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol.14, 2001, pp.349-355.
- [2] Chao Cheng, Wei Tan, Liyan Liu, Numerical simulation of water curtain application for ammonia release dispersion, Journal Loss Prevention in the Process Industries, vol. 30, 2014, pp.105-112.

