化学プラントの災害シミュレーション† —貯蔵物の流出・蒸発・拡散を考慮した場合—

倉 敷 哲 生* 座 古 勝* 安 武 淑 子**

Disaster Simulation for Chemical Plant

— In Case of Considering for Outflow of Storage, Evaporation and Diffusion of Gas —

by

Tetsusei KURASHIKI*, Masaru ZAKO* and Yoshiko YASUTAKE**

It is important for the evaluations of safety and reliability of chemical plants to estimate the diffusion of storage subjects because of the prevention of the occurrence of fire or explosion. Therefore, we have developed the computer simulation program in order to make clear the effects of storage's outflow, evaporation and gas diffusion on the dangerous area in a plant. A probabilistic estimation approach of the risk considering the effect of wind condition on gas diffusion is proposed in this paper. As the result of numerical examples, the risk in process with time can be compared quantitatively, even if the volume and the location for tanks differ each other. These results indicate that the proposed method is useful for the evaluation of reliability for chemical plants.

Key words: Chemical plants, Disaster, Diffusion of gas, Outflow of storage, Evaporation, Risk, Reliability

1 緒 言

各種の石油化学誘導品を生産する化学プラントは、資源が乏しく国土の狭い日本の産業を支え社会生活向上に貢献し、必要不可欠な存在であることは言及するまでもない。しかし、国内外の化学プラントにおいて貯蔵物の漏洩、火災、爆発等の災害が発生しており、先の阪神・淡路大震災も踏まえて、近年多くの自治体等で防災計画の見直しも実施されている。また、化学プラントで災害が発生した場合に、防災指揮者が安全かつ効率的な対策を決定できるよう支援するコンピュータシミュレーション開発の必要性も高まっている。

化学プラントの災害は大きく分けて、(1) 流出・拡散、(2) 火災、(3) 爆発の三つに大別できる。このうち、(2)、(3) について、以前に我々はプラント内で発生した火災が放出するふく射熱や爆発時の爆風圧を基にタンク延焼を解析し、その被害状況の時間的経過結果を表示し得る災害シミュレーション手法を構築した。^{1)~4)}

ここで、化学プラントにおける火災・爆発は貯蔵物の漏洩が主原因となる。特に、爆発引火性物質を大量貯蔵するタンクが密集しているため、漏洩後はさらに大きな災害へと拡大する潜在的危険性が高く、漏洩問題に対する安全性の確認が重要視されている。こうした現状において、我が国では化学プラント内の災害による影響評価として高圧ガス保安協会の防災指針⁵⁾があり、化学プラントの防災対策として一つの目安となっている。しかし、

指針による評価手法では、流出・蒸発・拡散現象を解析する場合に各々の現象を単独に扱っており、その時刻歴変化も扱っていない。避難・誘導等を考慮すれば、被害領域はもとより、流出開始から定常拡散状態に至るまでの経時的拡散濃度変化の把握が重要となる。また、指針による評価手法では、プラント内の建屋等による立地障害を考慮することなく、一定風向・風速のみによる拡散式に基づき、拡散による被害を評価している。

以上の点に鑑み本研究の目的は、高圧ガス保安協会の防災指針における拡散式を基に、流出物の防液堤内での蒸発と滞留に関する物質収支を考慮し、流出・蒸発・拡散の各現象を連続した事象として扱う時間項を導入し、さらに、プラント内のタンクや建屋等の存在による風向・風速の変化を考慮し、経時的拡散濃度分布を把握するシミュレーション手法の構築にある。

また、風向・風速等の気象条件により拡散濃度は変動するため、確率変数として扱う必要がある。そこで、構築したシミュレーションを用いて、風向・風速の確率分布を考慮し、化学プラント内の着火源存在域における着火危険性を定量的に評価する。以下、その手法および解析例について記述する。

2 シミュレーション手法

2・1 高圧ガス保安協会の防災指針による拡散式

高圧ガス保安協会による防災指針では、気体の拡散現象について、気体の発生状況に着目し次の三通りに大別

† 本報を「化学プラントの災害シミュレーション (第5報)」(Disaster Simulation for Chemical Plant, V) とする。また、前報は材料 44 巻 500 号 512 頁 (1995 年) に掲載済である。

原稿受理 平成 12 年 4 月 10 日 Received Apr. 10, 2000

* 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Manufacturing Science, Osaka Univ., Yamada-oka, Suita, 565-0871

** 大阪大学大学院 (現在 大日本印刷株) 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Manufacturing Science, Osaka Univ., Yamada-oka, Suita, 565-0871

している。すなわち、点源から一定量が連続的に供給される場合（連続点源）、流出面から一定の蒸発速度で気体が連続的に供給される場合（連続面源）、流出面の初期の大蒸発により気体が拡散する場合（瞬間面源）である。これらには、式 (1) に示す Fick の 3 次元拡散方程式を理論的に解き、実測データを適用し式中の拡散係数を設定した代入計算式⁶⁾ が用いられている。Fig. 1 に示すタンクより貯蔵物が流出し、防液堤内からの気体拡散を瞬間面源とみなした場合の拡散式を式 (2) に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial C}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial C}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$C(X, Y, Z, t) = \frac{q_i}{4 \cdot U} \cdot \frac{\exp(-Z/B)}{B} \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{Y + M/2}{A} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{Y - M/2}{A} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{X - U \cdot t + M/2}{A} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{X - U \cdot t - M/2}{A} \right) \right] \quad (2)$$

ここで、 K_x, K_y, K_z は拡散係数、 C は計算対象地点における気体の濃度 (m^3/m^3)、 q_i は面源からの気体発生量 (m^3/m^2)、 U は風速 (m/s)、 X, Y, Z は計算対象地点の位置、 M は防液堤の一辺の長さ、 A, B は気象条件による拡散パラメータであり、防液堤高さ H に依存する。なお、この式では条件を単純化し立地障害や熱的攪乱は考慮せずに風のみによる拡散として扱っている。

上述の拡散式を用いて、タンクから貯蔵物が流出した場合の拡散による危険範囲の評価として、高压ガス保安協会による手法では次の二つがある。一つは、貯蔵物全量が防液堤内に流出した後に、地表面の入熱により蒸発する場合を想定し、瞬間面源の拡散式を用いて拡散濃度の経時変化を評価する手法である。もう一つは、破壊口からの流出がある一定時間継続した定常状態を想定し、連続点源あるいは連続面源の拡散式を用いて定常時の拡散濃度分布を評価する手法である。

前者は、時間経過に伴う拡散濃度分布の把握としては一つの目安となるが、貯蔵物全量を気体発生量として扱うため、流出物が時々刻々に供給される場合には適さない。また後者は、蒸発速度が時々刻々変化する場合は適さず、さらに、濃度分布としては一定時間経過した定常

状態を示すため、流出開始から定常時までの濃度分布は把握できない問題点を有する。

2・2 流出・蒸発・拡散現象の取り扱い

前述の問題点を鑑み、本研究では流出・蒸発・拡散の各現象を時間毎に連続させて扱うことにより、経時的な漏洩に伴う拡散濃度分布の把握を試みる。以下、(1) 流出、(2) 液面拡大、(3) 蒸発、(4) 拡散の各現象の評価法、ならびに各現象を一つの連続した事象としての扱いについて記述する。

2・2・1 流出 タンクに接続した配管が地震等により破損し、貯蔵物が防液堤内に流出した場合、流出速度は次式で示される。

$$\frac{dQ}{dt} = c_1 \cdot c_2 \cdot a \cdot \sqrt{2gp} \quad (3)$$

Q は流出量 (m^3)、 c_1 は流出係数、 c_2 はノズル係数、 a は流出口面積、 g は重力加速度、 p は流出圧力である。

2・2・2 液面の拡大 流出した貯蔵物が液体の場合には、地表や防液堤底面でその液面が拡大する。本研究では、水平で凹凸の無い地面上に流出した流出初期の拡大液面積を次式により求める。

$$S = 2\sqrt{gL\pi} \cdot t + S_0 \quad (4)$$

ここで、 S は液面面積 (m^2)、 L は防液堤内の停留量 (m^3)、 t は経過時間 (sec.)、 S_0 は初期液面面積 (m^2) である。

2・2・3 蒸発 貯蔵物が液化ガスの場合、脱圧による急激な気化（フラッシュ現象）が生じ、また、漏洩物が防液堤内に滞留する場合には防液堤床面からの入熱による蒸発が生じる。以下、各々の評価式について示す。

(a) フラッシュ蒸発

加圧状態にある貯蔵物が大気圧中で沸点以上となる場合、液化ガスは流出後にその一部が脱圧により急激に蒸発する。気化に要する潜熱について沸点までの温度降下を考慮し、次式により蒸発した気体量が求まる。

$$W_f = \frac{W_L(H_s - H_b)}{\alpha} \quad (5)$$

ここで、 W_f は蒸発した気体量 (kg)、 W_L は加圧容器から流出した液体量 (kg)、 H_s は貯蔵温度におけるエンタルピー (J/kg)、 H_b は液体の沸点におけるエンタルピー (J/kg)、 α は液体の蒸発潜熱 (J/kg) である。なお、蒸発した気体量と流出液量の比 $f = W_f/W_L$ はフラッシュ率と称し、液温が定まれば各液化ガスについて実験的に求められている。

(b) 入熱による蒸発

貯蔵物の沸点以下の液体が流出した場合は、地表や側壁、大気等と接触して熱交換を行い、急速かつ大量に蒸発に至る。表面温度、組成、表面の粗密等により蒸発量は異なるが、本研究では条件を単純化し接触物体を地面のみとして扱い、次式により蒸発量を評価する。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K_g}{\sqrt{n\pi}} \cdot \frac{T_g - T_b}{\alpha\sqrt{t}} \cdot S \quad (6)$$

ここで、 V は防液堤床面からの入熱による蒸発量 (m^3)、 K_g は地面の熱伝導率 (W/mK)、 n は地面の熱拡散率 (m^2/s)、 T_g は地表温度 (K)、 T_b は液体の沸点 (K) である。

Fig. 1. Scheme of flowing gas.

2・2・4 物質収支の考慮 破壊口からの流出量, 防液堤内における流出貯蔵物の停留量および防液堤床面からの入熱による蒸発量について, 成木により報告されている次式の物質収支⁷⁾が保たれているものとする。

$$\frac{dL}{dt} = (1-f) \frac{dQ}{dt} - \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

式 (7) より気体の発生量は次式で示される。

$$q_i = \left(f \frac{dQ}{dt} + \frac{dV}{dt} \right) / S \quad (8)$$

拡散濃度の算出には, 従来の高圧ガス保安協会の手法と同様に式 (2) の瞬間面源の拡散式を用いる。ただし, 高圧ガス保安協会の手法と異なる点は, 式 (2) 中の気体発生量 q_i について貯蔵物全量を q_i とするのではなく, 時刻歴に式 (3) ~ (8) を解き, 破壊口から流出し時々刻々に変化する気体発生量を式 (8) で考慮する点にある。これにより, 従来適用されている高圧ガス保安協会の拡散式に基づき, その一部を変更すれば良い点に本手法の利点がある。

2・3 シミュレーションのフローチャート

構築したシミュレーションのフローチャートを Fig. 2 に示す。タンクおよび貯蔵物のデータ, さらに風速等のシミュレーション実行条件を入力する。次いで, 破壊口から流出量を算出し, フラッシュ蒸発および入熱による蒸発の影響を考慮した気体発生量 q_i を計算する。式 (4) を用いて蒸発量を加味した液面面積を算出し, これを気体発生源とする。さらに, 時間 Δt 毎の流出液がもたらす拡散濃度を式 (2) の瞬間面源の拡散式を用いて算出し, 累積する。その濃度分布図を CRT 上に表示する。なお, タンク内の貯蔵物液面高さが破壊口高さより低下する場合には, 流出は終了したものとし, その時刻以降では拡散のみの計算を実行する。

3 シミュレーション結果

3・1 流出の継続を考慮した場合

従来の拡散式を用いた解析結果と, 流出の継続を考慮

し新たに構築した手法による解析結果を Fig. 3, 4 に示す。図は球形タンクおよび防液堤を 2 次元表示したものであり, タンクおよび防液堤のデータは Table I に示す通りである。貯蔵物としてはプロピレンが常温加圧の状態では保存されているものとし, タンク下部に結合されている配管接続部において内容物が流出した場合を想定する。なお, 風速は 1.0 (m/s) とし, 防液堤高さ 1.0 (m) での拡散濃度分布を図に示す。図中には拡散濃度値も付記している。なお, 内容物であるプロピレンの爆発上限濃度は 11.1 (vol. %), 爆発下限濃度は 2.0 (%) であ

Fig. 3. Gas concentration calculated by conventional method.

Fig. 4. Gas concentration calculated by proposed method considering the effect of outflow and evaporation.

Fig. 2. Flowchart of developed simulation.

Table I. Data of tank and dike.

Contents	C ₃ H ₆
Shape of tank	Sphere
Radius of tank	9.0 (m)
Height of tank	20.0 (m)
Maximum volume	3800 (kl)
Rate of storage	50 (%)
Height of dike	1.0 (m)
Diameter of a connecting pipe	165.2 (mm)
Height of a pipe	0.5 (m)

る。図より、危険範囲の拡大状況を経時的に把握することが可能となる。従来手法では、瞬時に気体が供給されると想定するため危険範囲は時間の経過に伴い減少していくが、提案手法では流出の継続に伴う気体の供給を考慮しているため、時間経過に伴う危険範囲は拡大する傾向にある。

また、Fig. 5にタンク中心より風下方向における濃度分布の時間変化を示す。構築した手法では、60sec.までは流出に伴う気体の供給により濃度の最大値が増加しながら、風の影響により風下方向へ拡がる結果となる。また、300～2470sec.では、流出に伴う気体の供給と風による拡散の効果が打ち消し合い、定常状態に至る。2470sec.以降は、流出終了に伴う気体の供給停止により、風による拡散現象のみとなる。

濃度の最大値に着目すれば、構築したシミュレーション手法の方が高い。これは従来手法が入熱による蒸発しか考慮していないのに対し、提案手法ではフラッシュ蒸発および入熱による蒸発を加味し気体の発生量を算出している点に起因する。

3・2 建屋の影響を考慮した場合

実際の化学プラント内には、気体が拡散する際に障害

(a) In case of conventional method

(b) In case of the proposed method considering the effect of outflow and evaporation

Fig. 5. Change of distribution of gas concentration with time.

物となるタンク、建屋等が存在し、それにより拡散状態も影響を被る。そこで、建屋周囲での風向・風速の影響を考慮した拡散濃度の把握可能なシミュレーション手法を提案する。

3・2・1 風向変化の考慮手法 Fig. 6に、地表真上から見た拡散状況の概念図を示す。ただし、測定点の高さをそれぞれ Z および Z' とする。従来の拡散式では、一定風向に沿ってFig. 6(a)のように計算対象地点の風下距離 X を設定している。建屋等の障害物の幾何学的配置を考慮した場合、流路に沿って風下距離を設定し、風向が変化する場合の拡散濃度分布を評価する。すなわち、風向・風速計による実測や数値流体力学計算等により、建屋周囲の流れ場が把握できれば、Fig. 6(b)のように代表流線を設定し、流線に沿って (X', Y') を決定する。なお、本来は風向・風速は一定ではなく、風向・風速に対する流線の設定を時間に対し求める必要がある。しかし、ここでは簡略化のため時間経過に伴う風向・風速の変動を考慮せず、流出発生時の風向・風速を考慮して流線を設定する。

3・2・2 風速変化の考慮手法 拡散式(2)における移流距離 $U \cdot t$ について、提案手法では、各領域における風速と時間の積と考え、風速の変化を考慮する。すなわち、各領域における風速データを用いて移流距離を次式で算出する。

$$U \cdot t = \sum (u_i \cdot t_i) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (9)$$

ここで、 u_i は領域 i での風速、 t_i は領域 i を移流する際に要する時間である。

3・2・3 シミュレーション例 貯蔵物流出源であるタンクの風下に、障害となる建屋が存在する場合を想定し、前述の手法を基にシミュレーションを行った。タン

(a) Conventional method

(b) Proposed method

Fig. 6. Two-dimensional coordinate system of flowing gas.

クおよび防液堤のデータは Table I と同様である。なお、本例では、 $180\text{m} \times 180\text{m}$ の解析領域を 30 等分割し、2 次元層流に関する数値流体解析⁸⁾を適用し、建屋周囲の風向・風速場を予め得た。それを Fig. 7 に示す。図は、流出発生源であるタンク中心の風速が西風 1.0m/s として解析した結果である。

また、後述する従来の拡散式との比較を行うため、拡散濃度の算出には入熱による蒸発のみを考慮する。勿論、前節で述べた手法を基に、流出の継続を考慮した解析を行うことも可能である。

シミュレーション結果を Fig. 8 に示す。流出後、初期においては従来手法とほぼ同様に流出気体が拡散するが、図中の拡散気体の最遠端が建屋に到達した以降では、建屋を包み込む形で拡散が進展し、やがて建屋を離れ気体塊として移動する。そして、240sec. において、爆発下限濃度以下に至る。

また、比較として、障害物の影響を考慮せず一定風向、風速 1.0m/s の条件で従来の拡散式を用いて拡散濃度を評価した。Fig. 6 に示す爆発下限濃度以上となる x および y 方向距離 L_x , L_y の経時変化を Fig. 9 に示す。図中には、時間の経過に伴い爆発下限濃度以上となる領域が消滅する時刻をそれぞれ t_c , t_b で示している。提案手法では、建屋の存在により L_x の増加は抑制される。また、拡散気体が建屋に到達する際の風向変化および風速低下が起因し、危険範囲の消滅時刻 t_b は従来手法と比べ長くなる。

以上、提案手法により、建屋周囲の風向・風速の影響を考慮した貯蔵物の拡散状況および着火の危険範囲の拡大状況を経時的に把握可能となることが判明した。

4 リスク解析への応用

貯蔵物の拡散挙動は、化学プラントが存在する地域の風向・風速に左右される。風向・風速等の気象条件は本来一定ではなく、そのため時刻における拡散濃度も変動する。そこで、風向・風速を確率変数として取り扱い、構築した手法を用いて、拡散による着火危険性を評価する。なお、前述の通り、風向・風速は一定ではない。しかし、時間経過に伴う解析は莫大な時間を要するため、

Fig. 7. Flow field around the building by numerical analysis.

Fig. 8. Gas concentration calculated by proposed method considering the effect of flow field by wind.

本研究では流出発生時における気象条件により風向・風速を決定し、時間経過に伴うそれらの変動はしないこととする。ただし、風向・風速の発生は確率分布を有するものとして考える。以下にその手法について示す。

Fig. 10 に示すタンクおよび建屋の配置を有する模擬化学プラントモデルを用いて着火危険性の評価例を示す。プラント内には、容量の異なる 2 種類のタンク、建屋、

および着火源存在域を想定する。なお、No. 1 タンクは Table I のデータと同様であり、No. 2 タンクはプロピレンが 415kl 保存された球形タンクである。

ここで、タンクの着火危険性 R を次式により評価する。

$$R = \sum_i^{n_i} \sum_j^{n_j} [P_i \cdot P_j \cdot S_{ij}(t)] \quad (10)$$

P_i は風向の発生確率であり、 P_j は風速の発生確率である。 P_i に関しては、模擬プラントの西側が海に隣接しており、海風・陸風の発生確率が高いものとして年間平均風向を Fig. 11 の 16 方位の風配図 ($n_i = 16$) として想定する。 P_j に関しては平均値 2.0 (m/s) 、標準偏差 1.0 (m/s) の正規分布を仮定し、離散化のため 1m/s から 3m/s まで 0.5m/s ごとに 5 種類の条件 ($n_j = 5$) を設定する。 $n_i \times n_j$ 通りの組み合わせについて、各々の風速および風向を設定し No. 1 および No. 2 タンクより貯蔵物が流出・拡散

(a) Change of L_x with time (b) Change of L_y with time

Fig. 9. Comparison of maximum dangerous distance.

Fig. 10. Chemical plant model.

した場合のシミュレーションを実施する。その結果として、各風向・風速下における着火源存在域全面積に対し、爆発下限界濃度以上となる領域の面積との相対割合である $S_{ij}(t)$ を求める。

建屋の影響を考慮せず従来の高圧ガス保安協会の防災指針に基づく瞬間面源の拡散式を用いた場合と、建屋の影響を考慮した場合について着火危険性 R の経時変化を評価した結果を Fig. 12 に示す。Fig. 12(a) より、No. 2 タンクに比べ No. 1 タンクは大容量だが、着火源存在域に遠距離である点から、着火危険性 R は小さな値となり、着火危険性が励起する時刻および消滅時刻ともに No. 2 タンクより遅延する結果となる。したがって、本例では、タンク容量よりも着火源存在域までの距離の効果が大き

Fig. 11. Probability of direction of wind.

(a) Case of conventional method

(b) Case of proposed method considering the effect of building

Fig. 12. Comparison of risk R at each tank.

く影響することが判る。

Fig. 12 (a) (b) より No. 2 タンクの場合には建屋による影響は少なく、ほぼ同様の結果となる。しかし、No. 1 タンクでは、建屋の影響を考慮した場合には着火危険性の最大値は低下し、持続時間が長くなることが定量的に把握できる。なお、着火危険性 R のピーク値が二箇所現れる。初期部は風向 WNW の影響に起因し、拡散気体が建屋を回避し移流することから、着火源存在域に到達する気体量は減少する。また、後部は風向 W の影響に起因し、拡散気体が建屋に到達する際に速度が低下するため危険領域の発生時間は遅延する。このように、本手法

により着火危険性に及ぼす風向・風速の各因子の影響も併せて定量的に捉えることが可能である。

また、流出の継続を考慮した場合について、同様に着火危険性の評価を行った。その結果を Fig. 13 に示す。各タンクに接続されている配管は Table I のデータと同様としている。配管から少量の流出が継続して発生するため、流出の継続を考慮しない場合と比較して着火危険性は長時間持続する。また、Fig. 12 の傾向と同様に、No. 1 タンクでは、建屋の影響を考慮した場合には着火危険性の最大値は低下することが定量的に把握できる。

(a) Without considering the effect of building

(b) With considering the effect of building

Fig. 13. Comparison of risk R at each tank considering the effect of outflow and evaporation.

以上より本評価手法を用いて、容量および配置の異なるタンクから流出・拡散した場合の着火の危険性を経時的かつ定量的な評価・比較が可能であることが判る。

5 結 言

経時的流出がもたらす拡散被害について、防液堤内における流出物の物質収支に基づき流出・蒸発・拡散を連続した事象として扱い、拡散濃度分布を把握する災害シミュレーションを構築した。さらに、建屋周囲の風向・風速の影響を考慮したシミュレーションも構築し、従来手法との比較、検討を行った。従来適用されている高圧ガス保安協会による拡散式に基づき、その一部を変更すれば良い点に本手法の簡便さおよび利点がある。また、提案するシミュレーション手法は、漏洩発生から着火源存在域に至る拡散気体の到達時間が算出可能な点から、災害時の避難・誘導に貢献するものと考ええる。さらに、プラントの年平均の風向・風速の確率分布を考慮し、着火源存在域を想定した場合の着火危険性評価手法を提案した。容量と配置の異なるタンクから貯蔵物が流出・拡散した際の着火危険性について、経時的かつ定量的に評価可能であることから、本手法は化学プラントの安全性対策に寄与するものと考ええる。さらに、評価結果をプラント機器の損害額（コスト）に結びつけることにより、タンク配置や建設費等を考慮した信頼性評価（リスク評価）手法に展開できるものと考ええる。

なお、本研究は文部省科学研究補助金（課題番号 11780330）の助成の下で行われたことを記し、併せて謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 座古 勝, 材料, **39**, 8 (1990).
- 2) 座古 勝, 材料, **42**, 1376 (1993).
- 3) 座古 勝, 松本金矢, 倉敷哲生, 材料, **42**, 1381 (1993).
- 4) 座古 勝, 倉敷哲生, 材料, **44**, 512 (1995).
- 5) コンビナート保安・技術指針, KHK E 007 (1974) 高圧ガス保安協会.
- 6) 坂上治郎, 高圧ガス, **19**, 166 (1982).
- 7) 成木陸郎, 高圧ガス, **20**, 71 (1983).
- 8) 荒川忠一, “数値流体工学” (1994) 東京大学出版会.