

貯槽内の換気実験と簡易計算図†

板垣 晴彦*1

貯槽内での清掃作業や補修工事を行う際には、残留している可燃性あるいは毒性ガスを除去しなくてはならないが、最も効果的な除去策は換気であることが明白である。その際、何時間換気すれば良いかは、諸条件に左右される。そこで、模擬貯槽を用いた換気実験を行い、濃度変化を実測したところ、完全混合置換を仮定した換気の式におおよそ一致することがわかった。そして、この換気の式による推算を現場で手軽に実行できる簡易計算図を考案し、その使用方法と注意点を述べた。

キーワード: 労働災害、貯槽、タンク、換気、計算図

1 はじめに

化学物質を取り扱う主要な設備である貯槽での清掃作業や補修工事などにおいて、爆発・火災や中毒、酸欠事故が発生している。この災害の主原因は、貯槽内に残留していた可燃性ガスや有毒ガスであることが明白である。したがって、貯槽内に入って作業を実施する必要があるならば、作業前にその残留ガスを排出すれば良く、それには換気が最も有力な防止策である。

一方、作業現場では、作業前に濃度測定が行われ、その測定値が一定の基準値以下であることを確認することとされている。もし測定値が基準値を超えていた場合、あとどのぐらいの時間をかけて換気すれば良いのかは、現場作業員の経験によることが少なくない。

この貯槽内の換気に必要な時間は、初期濃度と貯槽の容量・形状や換気量だけでなく、換気の形式と流入の位置にも影響されると考えられる。

そこでまず、換気用の流入口と流出口が別々である場合について、流入口の位置を変えて濃度変化を実測した。また、何らかの制約により、流入口が1箇所しか用意できない場合を想定して濃度変化を実測し、換気効率と換気の形式について実験的に検証した。

さらに、換気の式に従う場合の簡易計算図を作成し、その使用法について述べた。

2 換気の計算式

1) 換気の形式

換気の形式は、空間の形状やガスの物性値の差などにより、次の3つに大別される。その模式図を図1~3¹⁾に示す。

a.単純置換

流入ガスの流速が低く、かつ、拡散混合が起きにくい形式、あるいは、密度などの物性値が大きく異なり、図1のようにガス間に明瞭な境界ができて、その境界が移動する形式。

b.完全混合置換

流入ガスの流速が速く貯槽内に攪拌の流れが生じる場合、あるいは、流入ガスの流量が少なく、拡散と流動による混合が十分に働いて、貯槽内の濃度分布が均等であるとみなせる形式。(図2)

c.不完全混合置換

貯槽の形状や障害物の影響によって流れが不均一な形式、あるいは、流入口と流出口の位置関係により、流路が限定される形式。図3のように流路以外の場所がよどむことになるので、明確な濃度分布が生じる。流路の換気は迅速に進むのに対して、よどんだ部分の濃度がなかなか変わらない。

2) 換気の計算式

3つの換気形式のうち、a単純置換とb完全混合置換については、理想状態であるので計算により求めることができる。一方、c不完全混合置換については、場所により濃度が異なり、aとbが入り交じった状態であって濃度分布が一意に定まらないため、計算式によって簡単に求めることはできない。

a.単純置換

流入したガスは、もともと貯槽内にあったガスとは混合せずに境界面を形成し、貯槽内にあったガスを押し出していく形式である。したがって、ガス中の各成分の濃度は、その境界面の前方では貯槽内の初期濃度、その後方では流入したガスの濃度である。つまり、流入したガスの量が貯槽容積と等しくなれば、すべてのガスが置換されるので、ガスの置換に必要な時間は、貯槽の容積を換気量(単位時間あたりの流入ガス量)で除すことにより求まる。なお、図1は、境界付近での混合がいくらかある場合を表している。

b.完全混合置換

この完全混合置換では、図2に示すように、流入したガスの拡散と混合による濃度の均一化が換気に伴う貯槽内の濃度変化に比べて十分に速いとみなし、貯槽内の濃度が均一であると仮定している。この仮定により、ガスの各成分の濃度について(1)式が成り立つ。

$$k = (1 - e^{-nt}) M / Q + k_1 e^{-nt} \quad (1)$$

ただし、 k :ある成分の濃度、 n :換気回数(= Q/V)、 t :時間、 Q :換気量、 k_1 :初期濃度、 M :ある成分の単位時間当たりの発生量、 V :貯槽の容積

この(1)式は、住宅などの居室内での換気の式と同じ式である。

もし発生量 M が 0 なら、初期濃度が k_1 のガスの濃度

† 第 46 回安全工学研究発表会、第 47 回安全工学研究発表会、第 73 回全国産業安全衛生大会において、一部を発表

*1 化学安全研究グループ。

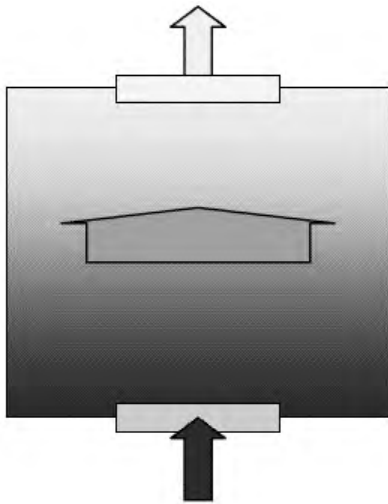


図1 単純置換

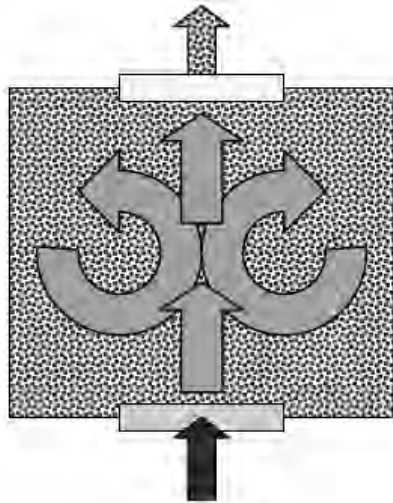


図2 完全混合置換

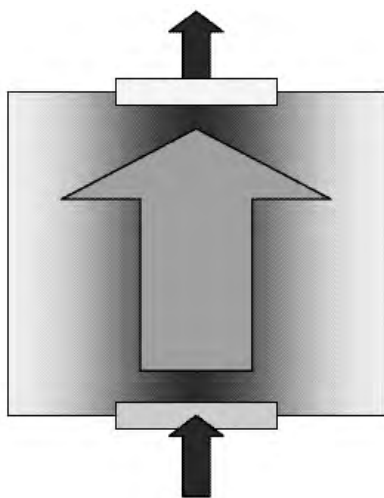


図3 不完全混合置換

は指数関数的に減少する。つまり、置換回数1回ごとに元の濃度の約0.37倍に低下していき、縦軸を濃度の対数、横軸を置換回数とした片対数のグラフは図4のよう

に直線になる。この直線の傾きがちょうど換気回数 n に相当し、傾きが大きいほど換気が迅速に進むことを示す。なお、横軸の置換回数とは、換気回数に換気時間を乗じた値であり、流入したガス量を貯槽の容積で除した値と等価である。

発生量 M が0ではない場合は、貯槽内の濃度は k_1 にかかわらず、時間が経過するにつれて(1)式の前半部分にある M/Q に漸近していく。

c.不完全混合置換

不完全混合置換では、図3のように、貯槽内に入ってきたガスがほぼそのまま出口に達してしまい、その流れ以外がよどんでいる状態である。濃度分布やよどみの程度が様々であるため、計算式として表すことはできない。

しかしながら、部分的に見ると、流れの部分は、「単純置換」に近いと見ることができる。一方、よどんだ部分は濃度変化が極端に遅いことになるから、換気回数をよどみの程度に応じて極端に小さくした「完全混合置換」に近いと見することもできる。

d.ガス濃度の時間変化の例

以上の3つの換気の形式それぞれについて、平均濃度倍率と置換回数の関係を図4に示す。

単純混合置換では、換気回数1回ですべてが入れ替わること、完全混合置換では換気回数1回ごとに0.37倍ずつ低下していることがわかる。不完全混合置換では、よどみ部分の濃度変化が極端に遅いため、平均濃度の低下は遅い。

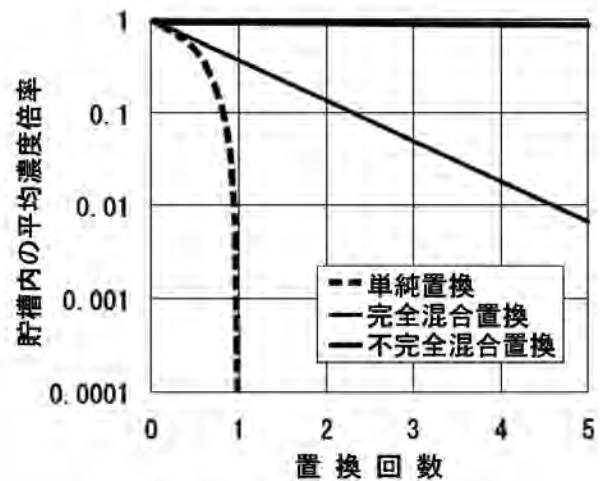


図4 貯槽内の平均濃度倍率の変化

3 模擬貯槽を使用した換気実験

1) 模擬貯槽と実験方法

模擬貯槽は、立方体の形状で縦・横・高さがいずれも1.8 mとした。流出入口は別々、または同じとした。

流出入口が別々の場合は、側面の1つの中心に直径10 cmの穴を開けて流出口とし、図5に示した8箇所の矢印(→)を流入口とした。

流出入口が同じ場合は、図6のように直径10 cmの流出口に管を差し入れて流入口とした。管の差し込み長さ

は 0mm と 600mm、管の出口の前方にじゃま板(直径 90mm)を置く場合は、その距離を 30, 60, 90mm とした。

実験では、まず模擬貯槽内に窒素、または、酸素を流し入れて酸素濃度を調整し貯槽内の濃度が均等になってから、エアポンプによって流入口(内径 13mm)から空気を流速約 9m/s で送り込み、模擬貯槽内の酸素濃度の変化を酸素濃度計を用いて計 8 点(中心と壁付近の垂直方向に 3~6 点、水平方向に 2~4 点、流出口から約 2cm に 0~1 点)で計測した。

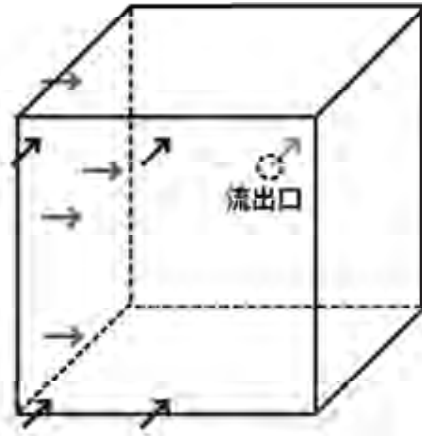


図 5 模擬貯槽の換気方法(流出入口が別々)

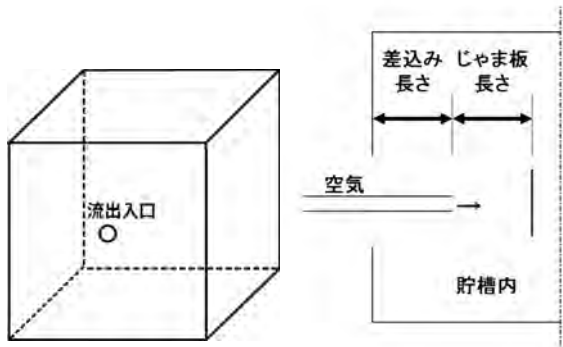


図 6 模擬貯槽の換気方法(流出入口が同じ)

2) 測定結果

a. 流出入口が別々の時の実効換気回数

図 7 は、流出入口が別々で、窒素を吹き込んでおいてから手前面の上辺中央から空気を吹き込んだ時の計測例である。貯槽の中心部や壁面近傍、天井付近、床付近など 3 パターンの計 8 箇所計測したが、流出口から約 2cm の 1 箇所のみが他の計測点よりもわずかに低く、その他の点の計測値は、いずれも計測誤差の範囲内に収まる同一値であった。つまり、貯槽内の濃度はほぼ均一であったといえる。(流入口の直近は、流入ガス濃度となるはずなので、計測していない)

これらの濃度変化について、横軸を時間、縦軸を流入する空気の酸素濃度(20.9%)との差の対数としてグラフをプロットしたところ、いずれも直線となった。すなわち、この模擬貯槽の換気の形式は、容積に比べて換気量が少なく(2)の完全混合置換の形式に合致すると考え

られる。そして、その直線の傾きが(1)式の換気回数に相当し、これを実効換気回数と呼ぶことにする。なお、単位時間あたりの換気量と貯槽の容積から換気回数を求めることができるが、完全混合置換の仮定からずれるほど、この 2 つの値は一致しなくなる。

流出口を奥面の中央としたまま、流入口の位置を変えて濃度変化を計測し、実効換気回数を算出した結果を表 1 にまとめた。換気量を一定としているので実効換気回数が大きいほど換気が迅速に進むことを意味する。

上辺と下辺の比較では、上辺側の方が若干速く換気が進むように見える。貯槽内は低酸素濃度であるので、流入する空気の方がわずかに重いことが影響しているのかもしれない。ただし、同様の計測を酸素濃度が高濃度から低下していく時にも実施したが、上下の差は明確ではなかった。

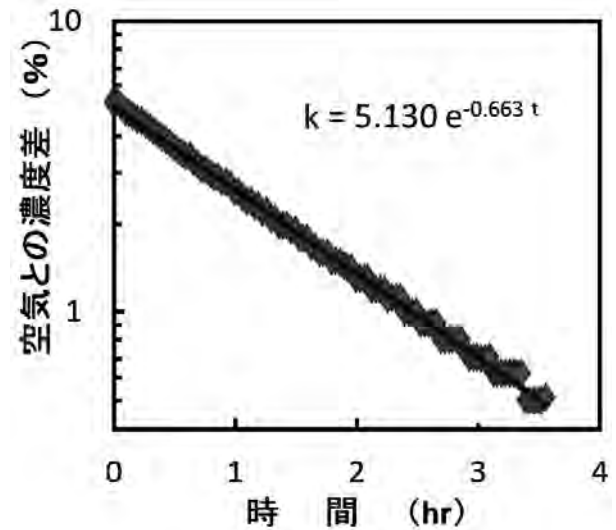


図 7 模擬貯槽(流出入口が別々)内の濃度変化の例

表 1 流入口の位置別の実効換気回数

	手前面		側面	
	左隅	中央	中央	奥辺
上辺	0.74	0.66*	0.70	—
中央	—	—	0.69	0.60
下辺	0.54	0.55	0.67	—

*: 図 7 のデータ

b. 流出入口が同じ時のじゃま板の影響

図 8 は、流出入口が同じである時、差し込み長さが 0mm、じゃま板長さを 60mm にセットした場合の測定例である。流出口から約 2cm のみが他の計測点よりも低いことは流出口が別々の時と同じであるが、その差は大きくなった。濃度変化のプロットは、図 8 でも直線となり、流出入口から約 2cm の計測値も直線関係である。さらにその直線の傾きは、他の計測地点での直線の傾きと等しかった。つまり、濃度の絶対値に多少の差はあつて

も、実効換気回数は同じである。

このほかのすべての測定においても、貯槽内の濃度はほぼ均一であり、濃度変化は直線関係にあった。

流出入口が1つのみの場合には、流れにショートカットが生じて換気が進みにくい場合があるとされているが、今回の測定結果では明確な影響は確認できず逆に促進されているように見えるケースもある。流入する空気の流速が約 9m/s あり、その方向が正反対で貯槽内の空間に流れが生じること、じゃま板はその流れの方向を変えるのみで流速があまり低下しないこと、が現段階では原因ではないかと推定しているが、その確認はできていない。

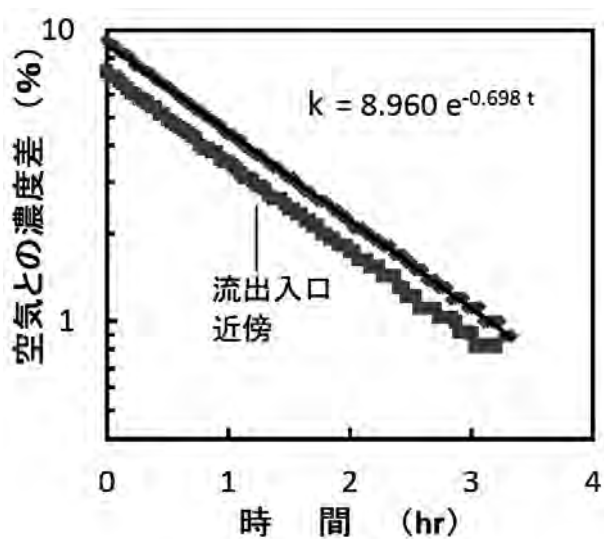


図8 模擬貯槽（流出入口が同じ）内の濃度変化の例

表2 差込長とじゃま板長別の実効換気回数

		じゃま板長さ (mm)			
		なし	30	60	90
差込長 (mm)	0	0.76	0.79	0.70*	0.67
		0.77	0.89	0.72	
		0.65			
	600	0.72			
		0.69	0.65		
		0.62	0.61		
		0.61			

*: 図8によるデータ

3) 模擬貯槽と実規模貯槽

実際の貯槽と比べると模擬貯槽の容積は非常に小さい。容積が小さいので換気回数の値は実際の貯槽に比べると大きいと見込まれる。一方、換気回数が小さくなって換気に時間を要するほど貯槽内の拡散と流動による混合が相対的に働きやすくなり、完全混合置換に近づいていくと考えられる。したがって、小さな模擬貯槽において完全混合置換にどの程度近似できるかを知っておけば、大きな実規模貯槽の時の近似は模擬貯槽での近似よりも良好になることが見込まれる。

とはいえ、複雑な形状の貯槽であったり、内部に障害物があったりすれば、完全混合置換に近似しにくいことがあり得る。その場合には、換気量と貯槽の容積のみから求めた推算値は実測値と当然合わなくなる。現場で濃度測定を行い、そのずれを相殺するように換気回数を補正した実効換気回数を用いることにより、推算値の精度を向上できると考える。

いずれにしても、事前に計算によって学術的にかつ正確に予測することを主眼とはせず、現場での測定値を元にして、実時間予測を行うことが、換気の実施のサポートになると期待している。

4 簡易計算図

1) 簡易計算図の作成

完全混合置換についての換気の式(1)は、難解な式ではないものの、その計算を作業現場で手軽に実行することは難しいと思われる。そこで、必要な換気時間の推算に便利な簡易計算図(図9)を考案した。

この計算図では、貯槽の容積、換気装置の換気量、実効換気回数、換気時間、濃度倍率を図上で示しており、計算機を使わずに、必要な換気時間や換気量などの推算ができるようになっている。

2) 貯槽の容積と換気量からの推算

貯槽の容積と換気装置の換気量が事前にわかっている場合には、①左図の換気量と容積の値の交点の位置から(理論上の)換気回数に分かる。②その交点から右図に水平に線を延ばす。③必要な濃度倍率値との交点から下方に線を降ろせば、必要な換気時間が推算できる。逆をたどれば、ある換気時間で換気を終わらせたい時の換気装置の換気量を推算することができる。

作業計画を策定する際に、作業スケジュールを検討したり、換気装置の選定をしたりする場合が想定される。

図10の例では、換気量が 20m³/h、容積が 100m³の時、濃度倍率が 0.2 倍になるには約 8hr、0.01 倍になるには約 22hr を要するとわかる。ただし、換気装置の換気量は、使用状況によっては仕様値よりも換気量が低下する。また、計算式どおりに換気が進むとは限らないので、現場での濃度測定が必要である。

3) 換気中の濃度計測値からの推算

貯槽の容積と換気装置の換気量が両方わからない時は、とりあえず換気を行い、換気前と換気後の濃度の計測値から濃度倍率を求める。すると、①換気時間と濃度倍率の交点から実効換気回数が定まる。②その交点から右へ水平に線を延ばす。③必要な濃度倍率との交点から下方に線を降ろせば、必要な換気時間が推算できる。

換気を実施中の濃度変化に基づく実時間推定であるので2)よりも精度は良いと考えられる。

図11の例では、2hrの換気をしたところ濃度倍率が

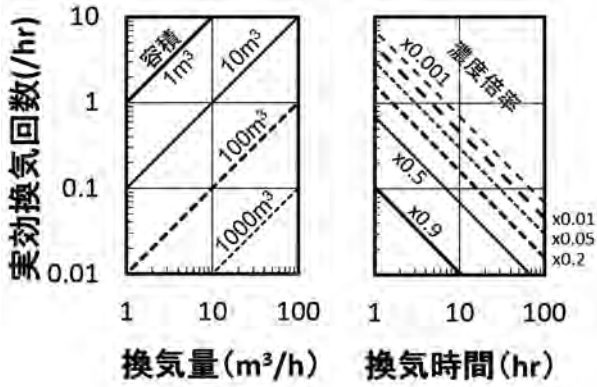


図9 簡易計算図

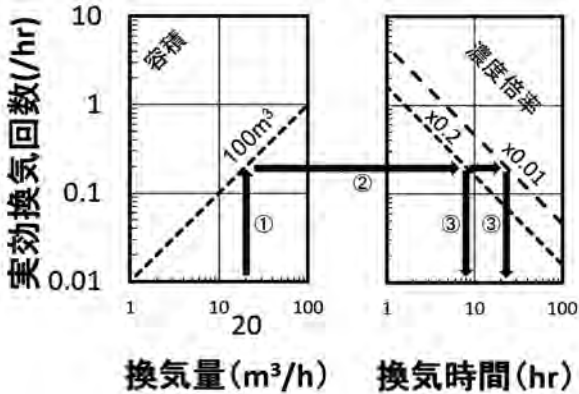


図10 貯槽の容積と換気量からの推算

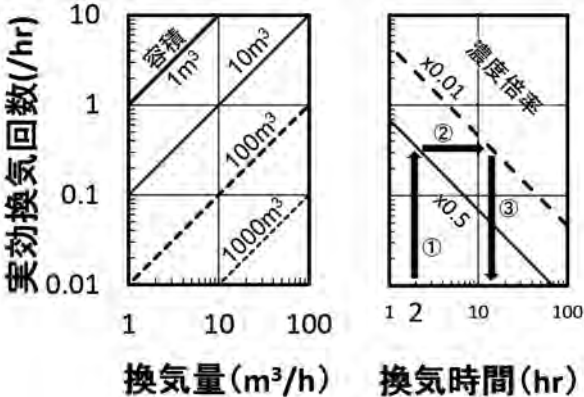


図11 換気中の濃度計測値からの推算

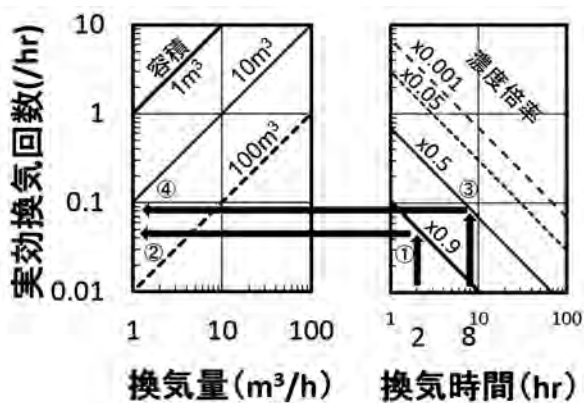


図12 換気量の増加による換気時間の短縮

0.5倍になった。すると濃度倍率が0.01倍となるのは換気開始から約13hr後となる。つまり、濃度倍率を0.01倍とするには、さらに続けて約11hrの換気をすれば良いことになる。

4) 換気量の増加による換気時間の短縮

3)で推算された換気時間よりも短時間で換気を行いたい時には、換気量を増加させると良い。その場合には、①換気時間と濃度倍率の交点から実効換気回数が定まる。②その交点から左へ水平に線を延ばし、実効換気回数の値を対数目盛から読み取る。③所望の実効換気時間と濃度倍率の交点から左に水平に伸ばす。④同じく実効換気回数を読み取る。2つの実効換気回数の比が換気量の比であるので、その倍率分だけ換気量を増加する。ただし、換気量の増加により完全混合置換から外れる場合があることに注意する必要がある。

図11の例では、2hrの換気をしたところ濃度倍率が0.9倍であった。するとここまでの実効換気回数は約0.042/hrとわかる。今から8hrで現在の濃度の半分(濃度倍率0.5)としたい場合には、実効換気回数を約0.08/hrにまで上げる必要がある。つまり、換気量を現在の2倍程度にすれば良い。

5) 使用上の注意

この簡易計算図は完全混合置換を前提としている。したがって、貯槽の形状や流出入口の位置関係により完全混合置換からずれる場合もあるので、作業前に適正な測定方法で濃度を確認してから、作業を開始することを怠ってはいけない。その濃度の確認では、単に作業が許可される基準値より上か下かではなく、計測値の濃度変化が推算値の濃度変化と合致しているかにも注視することを推奨する。濃度変化の一致が確認できれば、推算値の信頼度が高いと期待できるからである。

このほか、換気中に残渣やスラッジなどからのガス発生があると、換気の式(1)の前半部の項のとおり、いくら長時間の換気をして、ある濃度以下には下らない。すなわち、有毒ガスの時のような極低濃度まで換気しなくてはならない場合に、その影響は大きい。そのような場合には換気だけでは対処できないから、エアラインマスクや防毒マスクといった保護具の使用など、別の手段を併用する必要がある。

5 換気を実施する際のポイント

1) 換気口の位置

換気口の位置は、流入口から流出口へのショートカットができないようにして、貯槽内をできるだけ均等に流れるようにすることが要点である。具体的には、流入口と流出口をできるだけ離して、長い距離を流れるようにすることや、内部でよどみができそうなところの近くに流出入口を設置したりすると良い。

また、有毒ガスなどで極低濃度のガスが対象であれば、濃度差による拡散・混合よりも、温度差による拡散・混合の方が効率よく換気できるので、流出入口の高さの差を利用すると良い。

2) 換気口が1つしかない場合

換気用の口が1箇所しか用意できない貯槽においては、その流入口からパイプをできる限り奥まで差し入れることによって、擬似的に流出入口を2箇所にすることができる。

3) 貯槽内濃度の測定方法

推算をどのように行うのであっても、最終的には貯槽内の濃度を測定し、作業を実施できる濃度であることを確認してから、作業を開始する。したがって、その測定に不備があれば、不測の事態が起こらないとも限らない。

最も避けるべき状況は、貯槽内の濃度を測定しているつもりで、知らぬ間に流れ込んでいた外気の濃度を測定してしまうことである。換気口付近では特にその可能性が高いから、例えば、①計測用の採取パイプを差し入れたまま換気口をいったん閉めて計測する。②採取パイプをできるだけ奥まで差し入れ、その採取パイプの長さに見合うだけ待ってから計測する。③換気口から離れた箇所の別の小穴を使用して計測する。といった方法がある。

このほか、基本的事項として、ガス濃度計は対象とするガス種が決められていること、日常のメンテナンスや校正が適切に行われ、計測誤差が本来の仕様を満たしていることが必須である。

4) 換気用ファンの特性

換気装置の換気能力は、主に風量と静圧で表される。ファンにダクトを取り付ける場合には、曲がりや長さ・直径に応じて圧力損失が生じ、カタログ値どおりの風量にはならないことに注意する必要がある。特に静圧が低いファンは、圧力損失の増大により風量が著しく低下する。以下に、いくつかの換気用ファンの特性を示す

a.プロペラファン

風方向は軸に沿い、旋回しながら直線的に流れる。逆回転にすると逆方向に流れる。静圧は低くて良いが風量を多く必要とする場合に向く。

b.シロッコファン

風方向は軸に対して直角の遠心方向に流れる。逆回転しても風向は同じ。小型かつ高い静圧が必要な場合に向く。風量は少ない。

c.ターボファン

風方向は軸に対して直角の遠心方向に流れる。逆回転しても風向は同じ。静圧は高く、比較的風量は多い。風量を多く、静圧も高くしたい場合に向く。

d.斜流ファン

羽根部分での風の流れは斜めとなるが、ケーシングの形により軸方向にもなる。逆回転にすると逆方向に流れる。静圧はある程度が良いが、風量を多くしたい場合に向く。

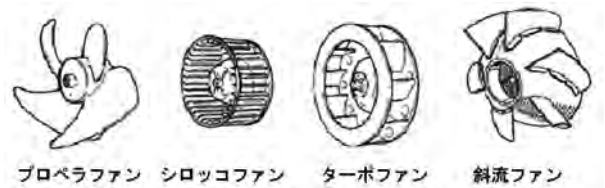


図13 換気用ファンの例⁴⁾

6 おわりに

貯槽内での清掃作業や補修工事を行う前に、残留した可燃性あるいは有毒ガスを除去するための換気について、模擬貯槽による換気実験を行った。その結果、流出入口の近傍を除けば、貯槽内の濃度はほぼ均一であり、模擬貯槽全体の換気は、完全混合置換とみなせた。

完全混合置換であるならば、貯槽内の濃度変化は、換気の式により求めることが可能である。換気の式は難解な式ではないものの、その計算を作業現場で手軽に実行することは難しいと思われる。そこで、必要な換気時間の推算に便利な簡易計算図を考案した。

この計算図では、貯槽の容積、換気装置の換気量、換気回数、換気時間、濃度倍率を図上で示しており、必要な換気時間や換気量などの推算ができるようになっている。

また、本稿では触れていないが、作業中に可燃性ガスや有毒ガスの濃度が全体的あるいは局所的に上昇する場合に備えて、作業員各自が携帯型の適切なガス警報器を着用できれば、より確実に災害の発生を防止できる。

最後となったが、作業計画の際に必要な換気時間をあらかじめ設定すること、あるいは、作業現場では換気中の濃度変化の測定値から必要な換気の量や時間を推算して、効率よく、かつ、確実に実施することにより、貯槽における爆発・火災や中毒、酸欠事故の発生防止が図られることを期待する。

参考文献

- 1) 田中, 加賀田, VLCC バラストタンク内のガス置換シミュレーション, ユニバーサル造船テクニカルビュー, No.4, 2009
- 2) 板垣晴彦, 貯槽内での換気による濃度変化の実験的研究, 安全工学研究発表会予稿集 pp.144-145, 2013
- 3) 板垣晴彦, 貯槽内の濃度変化への換気方法による影響について, 安全工学研究発表会予稿集 pp.175-176, (2014)
- 4) 三菱電機, 羽根の種類と送風機, http://www.mitsubishi-electric.co.jp/lbg/ja/products/air/lineup/industrialfan/knowledge/sofuki_01_print.html, (2015.6 アクセス))

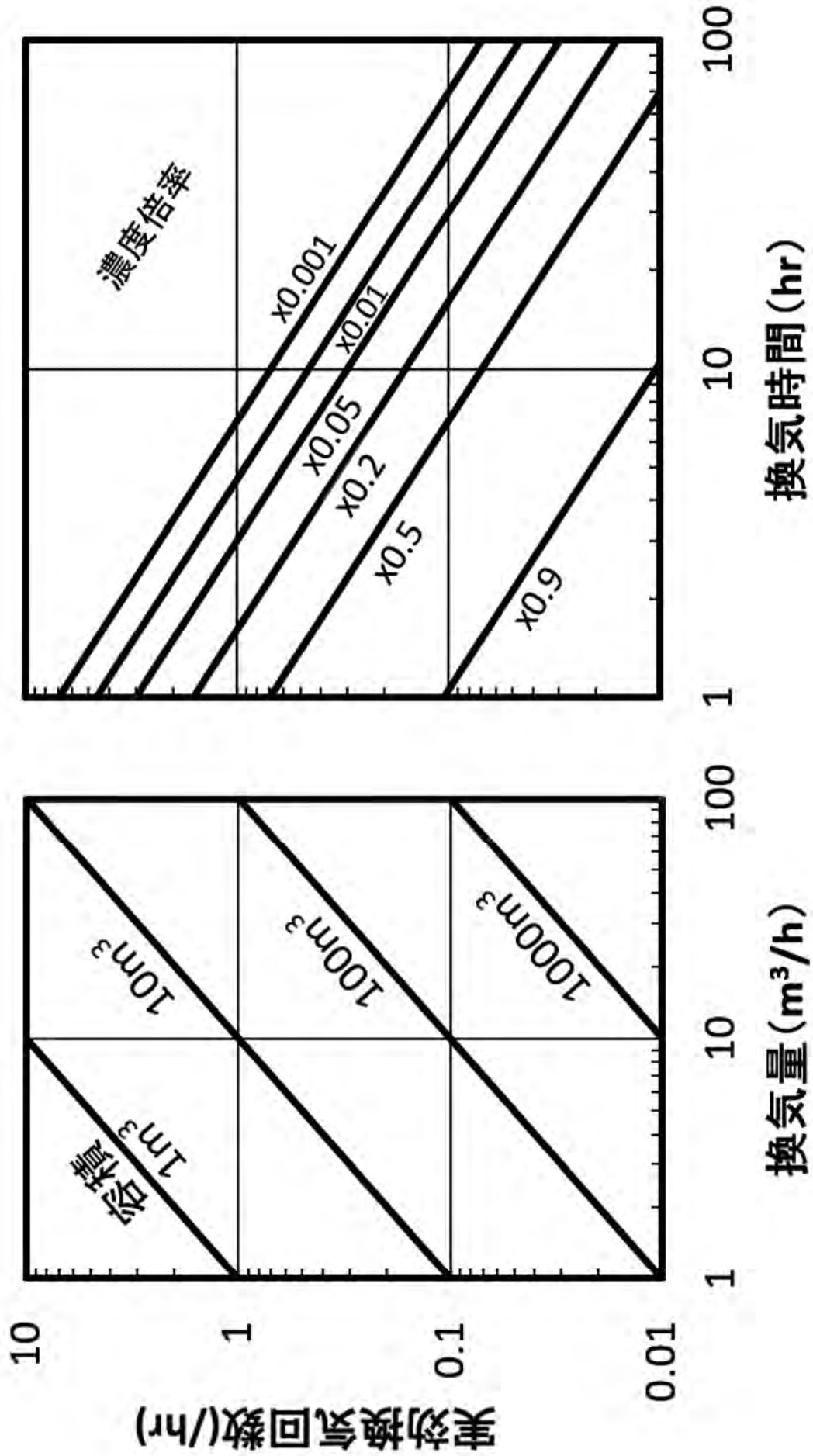


図9 簡易計算図 (再掲)

