小型内燃機関による一酸化炭素中毒の防止と全体換気†

小 嶋 純*1

換気不十分な作業空間内での一酸化炭素中毒による労働災害は漸増傾向にあり、特に内燃機関の使用による中毒事故が目立つ。労働安全衛生規則では内燃機関の使用場所における換気の必要を明記しているが、現場では換気量と一酸化炭素濃度との定量的な関係が十分に理解されず、その結果、全体換気効果が過信されるなど、依然として多くの現場で不適切な換気が行われていると懸念される。本報では換気による物質収支式に基づき、種々の気積を想定した作業空間内における一酸化炭素濃度の推移と換気量（換気回数）との関係を簡略化したモデル計算によって求め、作業空間内の濃度を天井値（200ppm）以下に保つために必要な換気量を試算した。

キーワード: 一酸化炭素, 中毒防止, 全体換気

1 はじめに

換気不十分な作業空間内での一酸化炭素中毒による労働災害は、平成 18 年では死傷者 177 名を数える¹⁾など依然後を絶たず、近年は増加の傾向も見られる。一酸化炭素の発生源には暖房器具、調理具、ガスバーナー、養生用練炭、都市ガスの漏洩など多々あるが、昨今は動力源用の小型内燃機関の使用時における中毒事故が目立っている。労働安全衛生規則第 578 条では、自然換気が不十分なところにおいては「健康障害を防止するための換気」をしない限り内燃機関の使用を禁止しているが、換気に対する理解が不十分なためか、現場では換気量と一酸化炭素濃度との定量的な関係が正しく認識されず、その結果、全体換気効果が過信されるなど、依然として多くの現場で不適切な換気が行われていると懸念される。一酸化炭素の発生状況は事例毎に大きく異なるため、一律に最適な換気量を定めることは不可能だが、本報では単純化したモデルに換気物質収支式および排ガス基準値を適用し、これらを基に理論的に導かれる一酸化炭素中毒防止に必要な換気量および換気回数の算出を試みた。

2 一酸化炭素濃度の諸基準

空気中の一酸化炭素濃度が 200 ppm であった場合、2～3 時間の曝露で軽い頭痛を起し、800 ppm なら 2 時間の曝露で失神、1600 ppm なら 20 分で眩暈を起して 30 分後に致死と言われる。そこで社団法人日本産業衛生学会は一酸化炭素に対して許容濃度（OEL）を 1 日 8 時間、週 40 時間程度の曝露として 50ppm と定めている。また、米国労働衛生協会（ACGIH）の定める閾値（TLV）では 8 時間時間加重平均で 25ppm、米国立労働安全衛生研究所（NIOSH）の天井値（たとえ瞬間的でも超えてはならないピーク濃度）および IDLH 値（Immediately Dangerous to Life and Health の略；安全評価の閾値として使用され、その濃度に曝されたまま 30 分以内に救

出しないと元の健康状態に回復しない濃度と定義される。）はそれぞれ 200 ppm および 1200 ppm となっている。なお、大気汚染に係る環境基準では「1 時間値の 1 日平均値が 10 ppm 以下であり、かつ、8 時間平均値が 20 ppm 以下であること」とされ、また、労働安全衛生法に基づく事務所衛生基準規則では、事務所の室内における濃度について 50 ppm 以下（空調設備または機械換気設備のある事務所では 10 ppm 以下）とするよう定めている。

3 換気物質収支式

全体換気（general ventilation）とは、屋外から清浄空気を取り入れ、有害物質で汚染された作業場内の空気と希釈混合して屋内の気中有害物質濃度を下げるといふ換気方法で、希釈換気（dilution ventilation）とも呼ばれる。屋内で内燃機関を使用した際、この全体換気が不十分であった為に中毒事故が発生する事例が多い。

さて、屋内に給気される清浄な空気中に一酸化炭素が含まれなければ、屋内に存在する一酸化炭素の総量の変化は、屋内で発生する一酸化炭素の量から、屋外へ排出される一酸化炭素の量を差し引いた分に等しい。この収支を式で表せば

$$VdC = Gdt - Q'Cdt \quad (1)$$

ただし V : 作業空間の気積

G : 単位時間当たりの一酸化炭素発生量

Q' : 有効換気量

C : 作業空間内の一酸化炭素濃度

t : 時間

なお、作業空間内の一酸化炭素が不均一に拡散していることを考慮して、通常、拡散混合の程度を示す係数 K が使われる。この K を有効換気量（Q'）に乗じたものが実際に必要な換気量（Q）となる。

$$K Q' = Q \quad (1 \leq K \leq 10) \quad (2)$$

K=1 は理想的な希釈混合状態（発生した一酸化炭素が作業空間内に完全に均一に拡散している状態）を、K=10 は著しく不均一な状態を示す。一般に K に代入すべき値は、換気装置の能力や運転状態、給排気口の配置等の他に、ガスの有害性、発生源の規模や数、天候、作業者の位置などを総合的に勘案して経験的に決めるが、本報で

† 原稿受付 2008 年 06 月 09 日

† 原稿受理 2008 年 12 月 19 日

*1 労働安全衛生総合研究所環境計測管理研究グループ。

連絡先: 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾 6-21-1

労働安全衛生総合研究所環境計測管理研究グループ 小嶋 純*1

E-mail: ojima@h.jniosh.go.jp

は簡略のため $K=1$ (つまり $Q'=Q$) と仮定し、先の式 (1) を積分すると

$$\ln((G - Q'C_2)/(G - Q'C_1)) = -Q'(t_2 - t_1)/V \quad (3)$$

初期の状態 ($t_1=0$) では作業空間内に一酸化炭素が存在しない ($C_1=0$) と仮定し、その状態から一酸化炭素の発生と換気を同時に開始した場合、任意の経過時間 (Δt) 後の一酸化炭素濃度は、式 (3) を C_2 について解いて

$$C_2 = \frac{G}{Q'} \left[1 - e^{\left(\frac{-Q'\Delta t}{V} \right)} \right] \quad (4)$$

この式より、任意の気積の作業空間において、換気と一酸化炭素の発生が同時に開始してから Δt を経過した時点での一酸化炭素濃度を算出することができる。

4 必要換気回数のモデル計算

内燃機関から発する一酸化炭素の発生率 (単位時間当たりの一酸化炭素発生量) には種々の文献値が存在する。例えば米国環境保護庁 (EPA) ではガソリン機関から発する一酸化炭素量を出力 1 馬力当たり $670.7 [g/hr]$ ²⁾ ($1kW$ 当たり $899.4 [g/hr]$ に相当) とし、現在 NIOSH の web サイトでもこの値を採用しているが、本報では社団法人日本陸用内燃機関協会が定める自主基準値 $603 [g/kW \cdot hr]$ (ただし携帯機器用エンジン、エンジンクラス V、排気量 $50cc$ 以上)³⁾ を用いる。標準状態 ($25^\circ C$, $1bar$) を仮定し、その際の一酸化炭素の体積を理想気体と同じく $24.8 [l]$ として

$$G = 603 [g/kW \cdot hr] = 8.90 \times 10^{-3} [m^3 CO / kW \cdot min] \quad (5)$$

いま仮に、

- ① 低出力のガソリン機関 ($1kW$) を、マンホール内部のような狭隘で閉鎖的な作業空間 (気積 $10m^3$) 内で稼働させた場合。
- ② 中出力のガソリン機関 ($3kW$) を広さ 15 畳弱ほどの室内 (気積 $50m^3$) で稼働させた場合。
- ③ 高出力ガソリン機関 ($5kW$) を小学校の教室程度の作業空間 (気積 $200m^3$) 内で稼働させた場合。

の各条件を想定し、式 (4) に $V=10, 50, 200$ および $G=8.9 \times 10^{-3}, 26.7 \times 10^{-3}, 44.5 \times 10^{-3}$ を代入すれば、①～③の作業空間内における一酸化炭素濃度の推移と換気量との関係が計算によって求められる。その結果を図 1～図 3 に示す。

計算によれば、出力 $1kW$ の内燃機関を $10m^3$ の空間内で使用した場合 (条件①)、発生する一酸化炭素の濃度は直ちに上昇し、換気回数 100 回 (換気量 $16.67m^3/min$ に相当) の換気を行っていても、発生開始後 0.3 分以内で NIOSH の天井値である $200 ppm$ を超え、3 分後には約 $530 ppm$ に達して平衡状態となる。換気回数が 20 回 (換気量 $3.33m^3/min$) 以下であれば発生開始後 2 分足

らずで NIOSH の IDLH 値 ($1,200 ppm$) を超えるが、換気回数 500 回以上の換気を行えば約 $110 ppm$ 以下に維持できる。計算上、一酸化炭素濃度を $200 ppm$ 以下に保つのに必要な換気回数は 267 回である。

図 1 出力 $1kW$ の内燃機関を気積 $10m^3$ の作業空間内で稼働させた際の一酸化炭素濃度の推移

図 2 出力 $3kW$ の内燃機関を気積 $50m^3$ の作業空間内で稼働させた際の一酸化炭素濃度の推移

出力 $3kW$ の内燃機関を $50m^3$ の空間内で使用した場合 (条件②)、換気回数 100 回 (換気量 $83.33m^3/min$) ならば発生開始後約 0.6 分で $200 ppm$ に達し、4 分後には約 $320 ppm$ となって平衡状態に至る。換気回数が 20 回以下なら約 4 分で IDLH 値に達するが、換気回数 300 回 (換気量 $250m^3/min$) 以上の換気を行えば $107 ppm$

以下の濃度に保てる。一酸化炭素濃度を 200 ppm 以下に保つのに必要な換気回数は 161 回と計算される。

出力 5kW の内燃機関を 200m³ の空間内で使用した場合（条件③），換気回数 100 回（換気量 333.33m³/min）の換気で一酸化炭素を 200 ppm 以下に保つことが出来る。しかし換気回数が 10 回以下であると，発生開始後 14 分足らずで IDLH 値を超えることが予測される。

図3 出力 5kW の内燃機関を気積 200m³ の作業空間内で稼働させた際の一酸化炭素濃度の推移

条件①～③何れの場合においても，計算上，想定した換気回数の範囲内では，発生開始後 0.3 分以降の一酸化炭素濃度を我が国の許容濃度（50 ppm）以下に保つことは出来ないことが判明した。

式（4）から明らかなように，作業空間内の一酸化炭素濃度を最終的に NIOSH の天井値である 200ppm 以下に保つのに必要な換気量は，その空間の気積によらず，一酸化炭素の発生量（この場合はガソリン機関の出力）によって一義的に決定される。計算上，1kW の場合の必要換気量は約 45m³/min，3kW なら約 134m³/min，5kW ならば約 223m³/min である。図 4 に，作業空間内で換気と内燃機関（1，3，5kW）の稼働を同時に行った際の，一酸化炭素濃度と空間内をその濃度以下に保つために必要な換気量との関係を示す。また参考として，表 1 に気積 10～200m³ の作業空間内において出力 1kW，3kW および 5kW のガソリン機関を稼働させた場合に発生する一酸化炭素を 200 ppm 以下に保つのに必要な換気回数（計算値）を記した。

図4 任意の気積の作業空間内における一酸化炭素濃度と，空間内をその濃度以下に保つために必要な換気量との関係

表 1 作業空間内の一酸化炭素濃度を 200 ppm 以下に保つのに必要な換気回数* [回/時間]

気積 [m ³]	出力		
	1 kW	3 kW	5 kW
10	270	804	1338
25	108	322	536
50	54	161	268
75	36	108	179
100	27	81	134
125	22	65	108
150	18	54	90
175	16	46	77
200	14	41	67

* 一酸化炭素発生率を 0.0089 [m³ CO/ kW・min] と仮定して算出。K=1 と仮定。

5 おわりに

物質収支の計算によると，内燃機関から発生する一酸化炭素の濃度は極めて短時間に上昇し，容易に NIOSH が定める天井値 200 ppm を超える。全体換気によって作業空間内を常に我が国の許容濃度（50ppm）以下に保つことは極めて困難で，200 ppm 以下に保つ場合にも高出力の送風機が必要となる。一台の送風機で必要な換気量を確保できない場合は，複数台の送風機を併用するか，作業者に呼吸保護具を着用させるなどの措置が必要と考える。日本陸用内燃機関協会の排ガス基準値を用いて計

算を行うと、作業空間内の一酸化炭素濃度を 200ppm 以下に維持するのに必要な換気量は、空間の気積に係らず、内燃機関の出力 1 kW につき約 45m³/min である。

報道によると、2008 年 1 月に北九州市で起きた一酸化炭素中毒の死亡事故では、事故現場となった横穴内部に地上から 1.6 m³/min の給気を行っていたという。この当時使用された内燃機関のスペックは不明だが、仮に出力が 1kW のものであったとしても、計算上必要とされる換気量 45m³/min には程遠く、極端に風量不足であったことが推測される。

なお、以上の計算では種々の単純化を前提としており、実際の発生現場に必要な換気量と当計算結果とが異なる場合もあるので注意が必要である。例えば、この計算では作業空間内の一酸化炭素が発生後瞬時に均一拡散する ($K=1$) と仮定しているが、現実の作業空間でそのような現象は起き得ず、 $K=1.5\sim 5$ 程度と見なすのが適当と考えられている⁴⁾。また、計算では一酸化炭素発生率を一律に 0.0089 [m³ CO / kW·min] と仮定したが、実際のガソリン機関は負荷、回転数、空燃比、点火時期および圧縮比等によってエミッションが大きく変わるため、図 4 や表 1 に示した換気量ないし換気回数が、確実に 200 ppm を超える曝露の防止を保障する訳ではない。発生直後の一酸化炭素が均一に拡散し、その発生量も一定と見なす、空間内の圧力と温度は終始一定でエンジンの排気ガスも環境温度 (25℃) に等しいなどの簡略化を経ているため、現実に必要な換気量は図 4 や表 1 の値を上回る可能性がある。

内燃機関による一酸化炭素中毒の防止には換気不十分な場所で使用しないことが第一だが、他にも

- ・ 内燃機関を作業空間外に置く場合は、排ガスが作業空間内に流入しないよう気をつける。
- ・ 作業者に一酸化炭素の発生原因や中毒症状を周知させる。
- ・ 安全上の問題が無ければ、電気や圧縮空気を動力源と

する工具に転用する。その際、電源やコンプレッサーは屋外の離れた場所に置くこと。

- ・ 定期的に作業場の巡視を行い、潜在的な一酸化炭素発生源の洗い出しを行う。
 - ・ 内燃機関の目立つ部位に、一酸化炭素中毒の警告文を表示する。
 - ・ 作業者に警報機能付きの一酸化炭素モニターを携行させる。
 - ・ ドアや窓の開放程度では、必要な換気量の確保は不可能に近いと認識する。
 - ・ 作業者は、内燃機関の排気口付近に近付かない。
 - ・ 換気を行う際は、換気量だけでなく、気流方向やガスの拡散、濃度分布など気体の動態にも配慮する。
- などに心掛けることが有効な曝露防止につながると期待される。

文 献

- 1) 主な職業性疾病発生事例 一酸化炭素による中毒等. 中央労働災害防止協会編. 労働衛生のしおり 平成 19 年度. 中央労働災害防止協会; 2007 : 316-326.
- 2) Nonroad Engine and Vehicle Emission Research - Report (EPA pub.21A-2001). U.S.Environment Protection Agency (EPA). Washington DC: EPA; 1991.
- 3) 日本陸用内燃機関協会自主規制規定書作成分科会. 協会だより 小形はん用ガソリンエンジンの排出ガス自主規制. LEMA. 2002; 468 : 83-89.
- 4) General industrial ventilation. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Industrial ventilation A manual of recommended practice 22nd edition. Cincinnati : American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 1995 : 2-1 - 2-16.