

危険物事故対応時の巡視船艇乗組員の安全確保に関する実験的研究－空気交換率

梅津 隆弘*¹ 熊澤 健*²

An Experimental Study on Ensuring Safety for Patrol Vessels' Crew against Risk in Response to Hazmat Incidents - Air Exchange Rate

Takahiro Umetsu, Takeshi Kumazawa

Abstract

In incidents involving hazardous and noxious substances (HNS) at sea, patrol vessels' crew will work within control zone which may contain toxic gas. To examine factors leading to improvement of their safety, the air exchange rate was measured and concentration of the gas in the vessel was calculated.

Key Words: HNS incident, Patrol vessel, Air exchange rate

1 はじめに

海上におけるHNS事故時において、海上保安庁の巡視船艇は管理区域、航行制限区域及び立入禁止区域を設定し、管理区域内の一般船艇を管理区域外へ避難させるため、事故現場付近の気体の検知作業及び管理区域内の航走を実施することとなる。気体の検知作業を実施する職員は、空気呼吸器等を着装することとなっているが、これらの者を現場海域に輸送し、管理区域内を航走する巡視船艇は、可能な限り開口部を閉鎖して航行することになっており、空気呼吸器等の装備の使用については想定されてない。これらの巡視船艇内の乗組員の安全を確保するため、前報¹⁾では巡視艇内を陽圧にするという方法を検討した。今回は、陽圧としない場合の巡視艇内外の空気の置換速度である、空気交換率を求め、巡視艇内の毒性気体濃度がどのようになるかを推定することを試みた。

2 実験

ASTM E 741, Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilutionによれば、空気交換率は、単位時間当たり目的とする空間(以下「目的空間」という)αの容積に対する目的空間αとそれを取り巻く空間(以下「周囲空間」という)βとの間を通過する空気の流量の比であり、1/s又は1/hなどの単位で表される。この測定方法には、1)目的空間αと周囲空間βとの間に試料ガス等(エチレン、一酸化炭素等の測定可能な気体又は

煙粒子などの測定可能な微細粒子等)による濃度差を作り出し、目的空間α内のこれらの試料ガス等の濃度の時間変化を利用して求める方法(concentration decay technique)、2)目的空間αに一定濃度の試料ガス等を注入し続けながら目的空間α内における試料ガス等の濃度を測定して求める方法(constant injection technique)及び3)目的空間α内の試料ガス等の濃度を一定に保つよう目的空間α内に注入する必要がある試料ガスを測定する方法(constant concentration technique)で測定される²⁾。今回の実験では、1)の方法に準拠して巡視艇内を目的空間αとして、ここに均一濃度の試料ガスを充満させ、その濃度の減少速度(ppm/min)を測定して空気交換率を求める方法を採用した。

2.1 濃度の時間変化を利用した空気交換率測定法²⁾

濃度の時間変化を利用した空気交換率測定法は図1に示すような目的空間αと周囲空間βとの間の空気の交換を考えている。

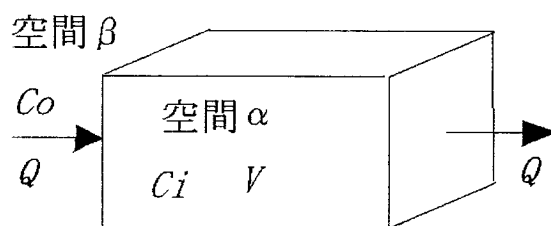


図1 空気交換の概念図

Received November 13, 2009

*1 海上保安大学校 海上安全学講座

*2 海上保安大学校 海上環境研究室

この図において、 C_i は目的空間 α の試料ガス等の濃度(ppm又は%)、 V は目的空間 α の容積(m^3)、 C_o は周囲空間 β の試料ガス等の濃度(ppm又は%)、 Q は目的空間 α と周囲空間 β の間で交換される単位時間当たりの空気量(m^3/s 又は m^3/h)であり、このとき空気交換率 A は Q/V ($1/s$ 又は $1/h$)となる。

周囲空間 β から目的空間 α に流入する空気の流量と目的空間 α から周囲空間 β に流出する空気の流量が等しく、目的空間 α に試料ガス等の発生源が存在せず、目的空間 α 内の試料ガス等の濃度は均一であり、周囲空間 β から目的空間 α に流入した空気と目的空間 α 内の空気が即時に混合することを仮定すると、微小時間 dt における目的空間 α における試料ガス等の量の収支は次式で表される。

$$d(C_i(t)V) = C_o(t)Qdt - C_i(t)Qdt \quad (1)$$

空気交換率 $A=Q/V$ の関係を使い、空気交換率が一定であると仮定すると(1)式から(2)式の解が得られる。

$$C_i(t)e^{At} = A \int C_o(t)e^{At} dt + C \quad (2)$$

周囲空間 β の試料ガス等の濃度 C_o は常に0であり、時刻 $t=0$ における目的空間 α の試料ガス等の濃度を $C_i(0)$ とすれば、時刻 t における目的空間 α 内の試料ガス等の濃度に関する次の(3)式が得られる。

$$C_i(t) = C_i(0)e^{-At} \quad (3)$$

この(3)式から、次に掲げる方法により空気交換率 A を求めることができる。

(1) 二時刻における濃度を使用する方法(Averaged Method)

一様濃度の試料ガス等で満たされた目的空間 α 内において、任意の時間経過後の試料ガス等の濃度変化を測定することにより(3)式を基にした次の式で平均空気交換率がもとめられる。

$$A = -[\ln C_i(t_2) - \ln C_i(t_1)] / (t_2 - t_1) \quad (4)$$

ここで、 A は平均空気交換率($1/s$ 又は $1/h$)、 t_1 及び t_2 は時刻(s 又は h)、 $C_i(t_1)$ 及び $C_i(t_2)$ はそれぞれ時刻 t_1 及び t_2 における目的空間 α 内の濃度(ppm又は%)である。

(2) 最小自乗法による方法(Optional Regression Method)

一様濃度の試料ガス等で満たされた目的空間 α 内における時間 t に対する濃度 $C_i(t)$ の対数との関係は、空気交換率 A が一定であることを仮定すると、時刻0における試料ガス等の濃度を $C_i(0)$ とすると、時刻 t における試料ガス等の濃度 $C_i(t)$ は、(3)式を変形して次のように表される。

$$\ln C_i(t) = -At + \ln C_i(0) \quad (5)$$

この式から、縦軸に濃度の対数、横軸に経過時間をとったグラフにプロットしたときの回帰直線の傾きか

ら空気交換率 A が求まることになる。

2.2 実験方法

(1) 予備実験

巡視艇を使用しての実験を実施する前に、どの程度の量の一酸化炭素が必要になるかを推定するために既知容積の空間において一定量の一酸化炭素を放出することを試みた。

本校の第二環境実験室内の幅105cm、奥行き65cm及び高さ117cmの寸法のドラフト内空間(容積 $0.80m^3$)をドラフト内の換気口、排水口を目張りした後目的空間 α として、ドラフト外空間を周囲空間 β として使用した。

実験に使用した主要な資器材は、カメラマ製花けしき備長炭(少煙少臭の線香)、理研計器(株)製可燃性ガス検知器GX-111、ヘアードライヤー、目張り用養生テープであった。

線香は一酸化炭素の発生源として使用した。一酸化炭素を試料ガスとした理由は、血液毒である有毒気体という欠点は有するものの、(1)線香など安価な発生源により作り出せること、(2)分子量が28であり空気の見かけの分子量29に近く、空気中で沈降・上昇する傾向が抑えられること及び(3)可燃性ガス検知器GX-111にはCOセンサーも装備されていること及びその濃度表示はppm単位のデジタル方式であるため、読取り者の癖の影響が排除されるため及び波風の影響で動揺する船艇内でもアナログ方式のように指示針が細かく振れることがないためである。また、花けしき備長炭を選択した理由は、(1)この線香は主原料が活性炭、備長炭及び消臭剤であるため、香木又は香料を加えてある通常の線香より煙と臭いが少なく、通常の線香を使用した場合に想定される船橋内及び居住区内への臭いの付着が少なくなること、(2)一酸化炭素の発生源として他に考えられる炭とは違い、形状が一定であり燃え尽きるまでの時間が一定となること及び(3)発生量の調整は一度に点火する線香の本数により容易に行うことができることである。紙巻タバコも一酸化炭素発生源として考えられ、実際にこれを用いた実験も実施されており³⁾、線香と同様本数により発生量を容易に調整できるが、臭いが船内に残る問題があるため採用しなかった。

ドラフト内で空気攪拌用のヘアードライヤーをヒーター加熱なしの状態で作動させ、1本の線香に点火した後、ドラフト前面のガラス製シールドを下ろし、GX-111のプローブを差込んだ状態でシールドの下部を目張りした。この状態での空気交換率を求めるために線香が燃え尽きたときに得られたドラフト内の最高の一酸化炭素濃度を測定し、その後の濃度変化も測

定した。

(2)本実験

実船での空気交換率を求めるため、呉海上保安部所属の20m型巡視艇くれかぜを使用して実験を実施した。20m型巡視艇の船橋及び居住区画は階段で連結されているのでこの二つをもって目的空間 α (容積約90 m³)とした。

本実験に使用した主要な資器材は、カメラヤマ製花けしき備長炭、理研計器(株)製可燃性ガス検知器GX-111、タイマー、ジェットスイファン、目張り用養生テープであった。

船橋の天井にある換気口及び前部甲板上にある居住区の換気塔への目張りを行い、船橋構造物に取り付けられた換気口の蓋を閉鎖した。船橋内及び居住区内の空気を攪拌し、一酸化炭素濃度を均一にする目的で、居住区内に持ち込んだジェットスイファン及び船橋に取り付けられている扇風機を作動させた状態で、船橋内及び居住区内でそれぞれ線香30本の束3束(船橋及び居住区で、それぞれ、計90本)に点火した後、一酸化炭素濃度がTLV-TWA濃度50ppmを超える可能性があるこの空間から退出し、船橋後部の水密扉を閉鎖した。この状態における空気交換率を求めるためにこの水密扉の鍵穴にGX-111のプロープを差込み船内の一酸化炭素濃度を60秒ごとに測定した。

3 実験結果

3.1 予備実験

予備実験の結果を図2に示す。

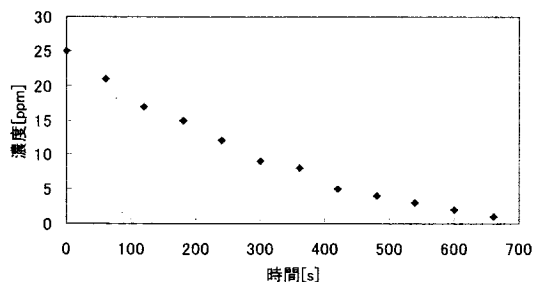


図2 予備実験の結果

3.2 本実験

本実験の結果を図3に示す。

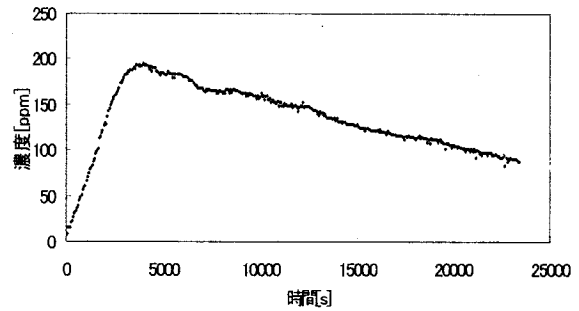


図3 本実験の結果

ドラフトの空気交換率は0.0045/s又は16.2/hとなる。容積0.80m³の容積を有するドラフト内で1本の線香で25ppmの一酸化炭素濃度の雰囲気を作り出したことから、推定90m³の容積を有する20m型巡視艇の船橋及び居住区空間で25ppm程度の一酸化炭素雰囲気を作り出すには、空気交換率が同程度であると仮定した場合、その112.5倍の本数を必要とすることになると推察された。

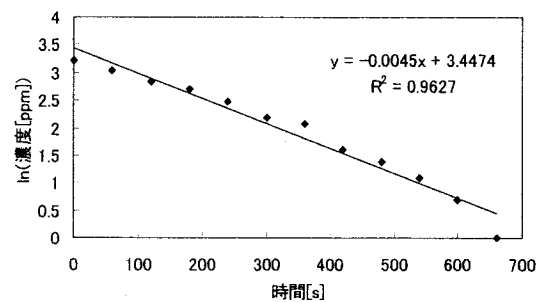


図4 時間とln濃度との関係

4.2 本実験の結果から求めた空気交換率

本実験において実験開始後 3960 秒後に 195ppmの最大濃度を記録し、以降濃度が漸減していった。最大濃度以降の濃度減少結果を図5に示す。

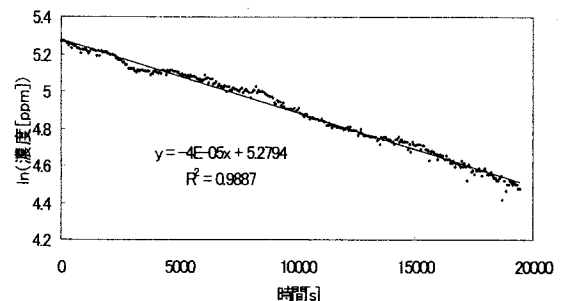


図5 時間とln濃度との関係

図中の直線は、最小自乗法で求めた近似直線であり、この直線の傾きから空気交換率は 3.94×10^{-5} /s又は0.142/hとなった。

また、ピーク濃度と実験打ち切り時の濃度及び両者の時刻を使用しての(4)式による平均空気交

4 考察等

4.1 予備実験から推定された線香量

1本の線香で25ppmの一酸化炭素濃度雰囲気を得られたときの濃度の減少結果を示す図2を縦軸を濃度の自然対数、横軸を時間としたグラフで表したものを図4に示す。図中のプロット点を最小自乗法で直線近似したところその傾きは-0.0045、即ち

換率は $4.09 \times 10^{-5}/s$ 又は $0.147/h$ となった。

4.3 空気交換率の利用方法

本実験で得られた巡視艇の空気交換率の利用方法であるが、米国EPAが無償配布しているALOHAと併用することにより、有害雰囲気内に入ったときの船内の有害気体濃度がどのようになるかの推測に利用できる。

ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres)とは、化学物質事故時の緊急計画立案及び訓練の他、化学物質事故に対応する人々に化学物質に関係する事故時にそれらの挙動を予測するためのフリー・ソフトであり、破壊したガス・パイプ、漏出しているタンク及び蒸発している液溜まりから大気中に放出される化学物質蒸気速度を予測し、事故による化学物質放出後に、危険気体雲がどの程度大気中に拡散するか及び空気交換率が判明している場合に周囲雰囲気濃度に対する目的空間内濃度を予測するものである。ALOHAは小型コンピューター(Windows又はMacintosh)上で作動し、約1000種の危険化学物質の物理的性状に関する情報を有する化学物質ライブラリーを有している⁴⁾。

例えば、海上にベンゼンが漏洩した状況を想定してみる。

発生場所：北緯34度00分、東経134度00分の海域

発生日時：2009年10月10日1000

天候：晴れ、雲量1、測定高10mでの風速5m/s、気温24℃、海水温度22℃、相対湿度70%、気温の逆転層なし

漏洩状態：ベンゼン200klの海上漏洩、直径70m

巡視艇の空気交換率：0.142/h

巡視艇の位置：漏洩海上から風下1km

この条件でALOHAを使用して巡視艇内外のベンゼン濃度を計算させた結果を図6に示す。

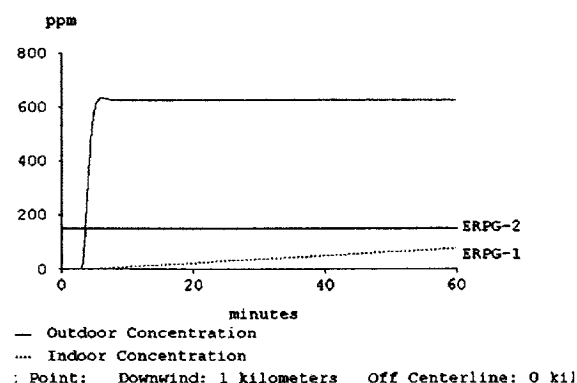


図6 ALOHAによる巡視艇内外のベンゼン濃度の経時変化の計算例

この条件では、巡視艇は約600ppmのベンゼン蒸気の雰囲気中に晒されることになり(急激に上昇した後、安定している実線)、船内のベンゼン蒸気濃度(約5分後から始まる破線)は徐々に上昇し、60分後には100ppm程度になることが推察できる。また、この状態では巡視艇の乗組員はベンゼン蒸気から身を守るために、0.1vol%までの保護能力を有する直結式防毒マスクを着装すればよく、1vol%までの保護能力を有する隔離式防毒マスクまでは必要ないと判断する材料としても使用できる。そのほか、巡視艇に防毒装置(活性炭による吸着を利用したものなど)を装備することを考えた場合、その装置に必要な能力水準を判断するためにも、空気交換率は必要になる。

4.4 勧告

本実験は安価な線香を使用し、一酸化炭素濃度を測定できるGX-111又は相当品があれば実施できることから、HNS事故事例が発生する前に可能な限り多くの巡視船艇で空気交換率を測定しておくことが勧告される。

今回の実験では、思いがけなく巡視艇くれかぜの空気交換率が小さく一酸化炭素の最大濃度195ppmとなったが、使用する線香の量を調整することにより発生する一酸化炭素の濃度をそのTLV-TWA濃度50ppm以下とでき、この状態ならば航行中など実際の運用時における空気交換率も求めることができる。

さらに、多忙な部署で、一定時間間隔に測定してゆく実験方法が実際的でない場合には、(4)式を用いた平均空気交換率を用いることが勧告される。例えば、乗組員が休養で行動予定のない巡視船艇に対して、始業時から船内で線香を焚き、1時間後をめどに、一酸化炭素の濃度減少が始まっていることを確認して、そのときの濃度を記録し、そのまま放置し、終業時間間際に再度濃度を測定するという方法をとれば、ほとんど実験に拘束されず、通常業務を行いつつ平均空気交換率が得られることになる。

5 おわりに

HNS事故対応時における巡視船艇の乗組員の安全確保のため、20m型巡視艇の空気交換率の計測法を検討し、線香及び一酸化炭素濃度計を用いる方法を採用した。呉海上保安部の巡視艇くれかぜを使用して空気交換率を求めたところ、0.142/hの値が得られ、かなり密閉性が高いことが示された。

実験に協力していただいた呉海上保安部及び巡

視艇くれかぜに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 梅津隆弘、大塚久, 危険物事故対応時の巡視船艇乗組員の安全確保に関する実験的研究 ―船内陽圧の可能性について―, 海上保安大学校研究報告理工学系, 第52巻, 第1・2号 合併号(2009), 11-20.
- 2) ASTM E741, Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution.
- 3) Wayne Ott, Neil Klepeis and Paul Switzer, Air change rates of motor vehicles and in-vehicle pollutant concentrations from secondhand smoke, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*(2007), 1-14
- 4) 米国EPAのALOHAダウンロード・ページ<http://www.epa.gov/OEM/content/cameo/aloha.htm>からダウンロードできるALOHAのマニュアルからの抄訳