

## [報告]

献血運搬車室内の二酸化炭素濃度  
—蓄冷剤としてドライアイスを使用した場合の影響—

宮城県赤十字血液センター

佐々木大, 澤村佳宏, 鈴木元悦, 伊藤 孝

The concentration of carbon dioxide in the blood-delivery  
vehicle's cabin; Influence of dry-ice used as cooling-materials

Miyagi Red Cross Blood Center

Dai Sasaki, Yoshihiro Sawamura, Gen-etsu Suzuki and Takashi Itoh

## 抄 録

新鮮凍結血漿製剤 (FFP 製剤) は  $-20^{\circ}\text{C}$  以下の温度帯を保つ必要があることから, 医療機関への搬送中もドライアイスにより温度を維持している。ドライアイスは昇華により二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 濃度を上昇させる危険性が考えられたことから, ドライアイスが献血運搬車内  $\text{CO}_2$  濃度に及ぼす影響について検討した。内気循環モードで運転者不在時の停車車両内では, ドライアイスによる直線的な  $\text{CO}_2$  濃度上昇が認められ, 58 分 4 秒で平均 3,365ppm まで上昇した。さらに実際の配送時は, 運転者の呼気による上昇も加わるため, 22 分 40 秒という短時間で平均 3,429ppm までの上昇が認められた。しかし, いずれの場合においても外気導入モードとすることで, 1,000ppm を超えない状態を維持することが可能であった。ドライアイス入りの搬送容器を積載し配送する場合は, 車内の換気を適切に行うことにより, 安全な運転環境を確保することが可能であることが明らかとなった。

Key words: carbon dioxide, dry ice, blood-delivery vehicle

## はじめに

室内環境の衛生状態の汚染度を測る指標として, 二酸化炭素 (以下  $\text{CO}_2$  と略す) が用いられることがある。 $\text{CO}_2$  は, 人体が呼吸により排出するものであり, 外気では 300 ~ 400ppm であるが, 閉鎖された室内では呼吸による増加によって, 外気の 2 倍以上の 1,000ppm を超える場合<sup>1)</sup>もある。建築基準法施行令およびビル衛生管理法に室内環境基準として  $\text{CO}_2$  濃度 1,000ppm が規定され, 産業衛生基準では長期環境基準として 5,000ppm が

勧告<sup>2)</sup>されている。また, 高濃度の  $\text{CO}_2$  は人体への影響が大きく, 意識消失や死亡の原因となることもある。実際に, 医療機関でポンベの付け替え過誤による死亡事例<sup>3)</sup>や, ドライアイス販売工場での死傷事故<sup>4)</sup>, 消火設備による事故<sup>5)</sup>が報告されている。

ほとんどの場合, 輸血用血液製剤は血液センターの献血運搬車や供給・配送業務を委託した配送業者の車両により, 24 時間体制で医療機関へ供給されている。血液センターが配送業務に使用す

る車両は、一般的な普通乗用車がほとんどである。血液製剤は定められた搬送容器に入れた状態で、車両内の後部座席や、後部の積荷スペースに置かれ配送されている。当施設の新鮮凍結血漿製剤(以下FFP製剤と略す)の医療機関への配送は、 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下の温度を保つため、蓄冷材としてドライアイスを使用している。そのため運転者は、 $\text{CO}_2$ を発生させるドライアイスの入った搬送容器と、同一の閉鎖環境で配送業務を行っている。しかし、配送中の車両の換気操作は運転者に委ねられているため、車両内の $\text{CO}_2$ 濃度を指標とした衛生環境状態は不明である。

今回われわれは、献血運搬車内の閉鎖環境における衛生環境を調査する目的で、献血運搬車内の $\text{CO}_2$ 濃度を測定した。さらに、 $\text{CO}_2$ 濃度を上昇させる可能性のあるドライアイス蓄冷材として使用していることから、車内 $\text{CO}_2$ 濃度へのドライアイスの影響についても検討した。

## 対象および方法

### 1. 測定機

$\text{CO}_2$ 濃度の測定は、二酸化炭素検知器GCH-2018(株式会社佐藤商事製)を使用した。測定精度は $1,000\text{ppm}$ 以下で $\pm 40\text{ppm}$ 、 $1,000 \sim 3,000\text{ppm}$ で $\pm 5\%$ 読取值、 $3,000\text{ppm}$ 以上で $\pm 250\text{ppm}$ で、上記精度が保証される測定範囲は、 $0 \sim 4,000\text{ppm}$ であった。 $4,001\text{ppm}$ 以上は、サービスレンジのため参考値とした。測定間隔は2秒とした。実験1および実験2の測定は、2012年10月から2013年12月の期間に実施した。

### 2. 車 両

車両は、ウイングロード(日産自動車株式会社製：室内長=1,955mm、室内高=1,210mm、室内幅=1,395mm、車内容積=およそ412L)2台を使用した。

### 3. 測定方法

実験1) 運転者不在時の停車車内 $\text{CO}_2$ 濃度測定

二酸化炭素検知器プローブを助手席ヘッドレストの高さに設置し、エアコンの設定は内気循環モード(recirculation mode: 以下RCMと略す)と外

気導入モード(fresh air mode: 以下FAMと略す)のいずれかとし、風量レベル1、エアコンON、温度設定(アナログ式)は中央値とした。FFP搬送容器(作業マニュアルに規定した梱包方法: ドライアイスおよそ1kg)1個を後部座席に通常搬送時と同様に置き、測定は約2時間エンジンを稼働させて、停車状態で行った。内気循環モードと外気導入モードで各4回測定した。合計8回の測定のうち、いずれかの測定値が $4,000\text{ppm}$ に達したときの経過時間を固定し、各々のグループの平均値(Ave.)について比較した。また、スタート時の平均値(以下Start Ave.と略す)、2時間測定中の最高値平均(以下Max Ave.と略す)、測定時間中の総平均値(以下Total Ave.と略す)について比較した。

### 実験2) 実運転中の車内 $\text{CO}_2$ 濃度測定

測定位置、エアコン設定は、温度設定を運転者により変更可能とした以外、実験1と同様とした。乗車人数は運転者の1名とした。1時間程度で到着する医療機関を対象として、出張所を出発してから供給後帰所までを測定した。FFP搬送の有無の条件ごとに、それぞれ6回計測した。FFP製剤の供給がない場合、FFP製剤を入れないドライアイス入り模擬搬送バッグを作成し、積載した。実験1と同様に、合計24回の測定のうち、いずれかの測定値が $4,000\text{ppm}$ に達したときの経過時間を固定し、各々のグループの平均値(Ave.)について比較した。また、スタート時の平均値(以下Start Ave.と略す)、測定中の最高値平均(以下Max Ave.と略す)と、測定時間中の総平均値(以下Total Ave.と略す)について比較した。出張所を出発してから最初の医療機関への到着までの時間(以下、配送時間と略す)と、出張所を出発してから帰所までの時間(以下、総配送時間と略す)についても比較した。

### 4. 統計処理

統計解析ソフトは、JSTATを使用した。実験1の統計解析は、Mann-WhitneyのU検定により行い、 $P < 0.05$ を有意差ありとした。実験2の統計解析はKruskal-Wallis検定により行い、 $P <$

0.05を有意差ありとした。各群間の多重比較検定はSheffe法により行い、 $P < 0.05$ を有意差ありとした。

## 結 果

### 1) 運転者不在時の停車車内CO<sub>2</sub>濃度(図1, 表1)

RCMの1例が58分4秒で4,000ppmに到達したことから、その時点の値を採用し、Ave.を算出したところ、RCMが $3,365 \pm 520$ ppmであるのに対して、FAMでは $653 \pm 71$ ppmと有意に低かった。 $(P < 0.05)$

RCMでは経時的にCO<sub>2</sub>濃度が徐々に上昇し、Max Ave.は4,844ppm(参考値)、Total Ave.は3,084ppm(参考値)となった。一方、FAMとした場合は、Start Ave.の458ppm(RCMに対し有意差なし)からMax Ave. 731ppmまでの微増であり、Total Ave.も大きな変化は見られず、RCMのMax Ave. ( $P < 0.05$ ), Total Ave. ( $P < 0.05$ )に対し、いずれも有意に低い値であった。また、ドライアイス入りの搬送容器が車内にない場合は、RCM, FAMいずれにおいても2時間測定中1,000ppmに達することはなかった(データ非表示)。

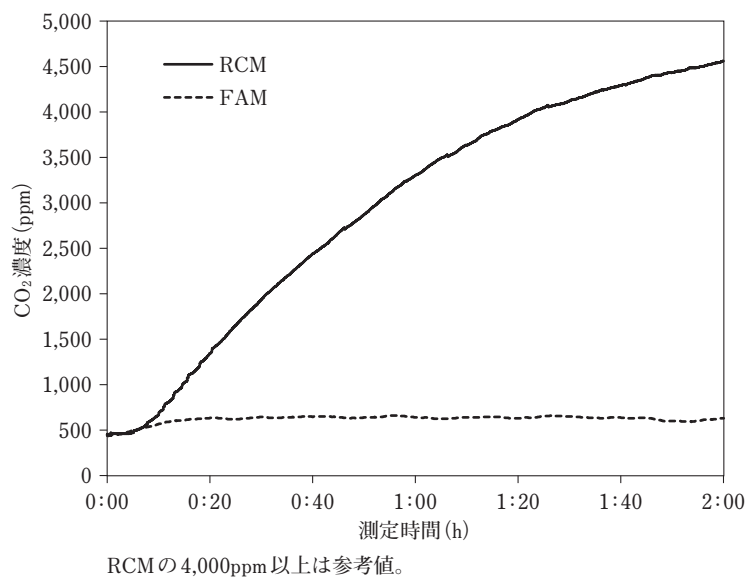


図1 停車車両内CO<sub>2</sub>濃度の経時的変動

表1 停車車両内CO<sub>2</sub>濃度\*1の変動

	RCM	FAM
Ave. (ppm) *2	$3,365 \pm 520$ *3	$653 \pm 71$
Total Ave. (ppm)	$3,084 \pm 448$ *3	$623 \pm 55$
Max Ave. (ppm)	$4,844 \pm 913$ *3	$731 \pm 47$
Start Ave. (ppm)	$440 \pm 72$	$458 \pm 29$

\*1 : Mean  $\pm$  SD (n = 4)

\*2 : Ave. (ppm) の全測定8例のうち、最も早く4,000ppmに到達した時間は、RCMの58分4秒だったので、その時点における各測定値をもとに算出した。

\*3 :  $P < 0.05$  vs FAM

## 2) 実搬送時における車内CO<sub>2</sub>濃度

RCMでドライアイス入り搬送容器を積載した場合(以下、RCM+FFPと略す)の1例が、4,000ppmを超過する直前の22分40秒で3,985ppmに達したことから、その時点の値を採用しAve.を算出したところ、RCM+FFPが3,429ppmで最も高値を示したのに対し、RCMでは半分以下の1,611ppmと有意差はなかったものの低い値を示した。また、FAMでドライアイス入り搬送容器を積載した場合(以下、FAM+FFPと略す)やFAMでは1,000ppmを越えず、RCM+FFPに対し有意に低い値であった(vs FAM+FFP:P<0.05, vs FAM:P<0.01, 表2)。FAMは、RCMに比べ有意に低い値を示した(P<0.05)。

RCMで運転者が実際に配送作業を行った際の車内のCO<sub>2</sub>濃度は、時間とともにStart Ave.の458ppmから徐々に上昇し、Max Ave.が2,444ppm、Total Ave.が1,931ppmとなった。しかしながら、FAMではStart Ave. 508ppmからMax Ave. 673ppmであり、CO<sub>2</sub>濃度上昇はRCMに比べ有意に抑制されていた(P<0.05, 図2,

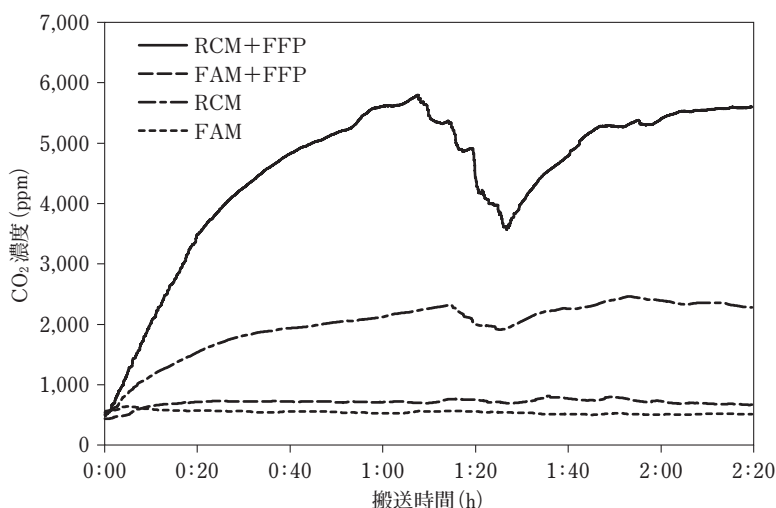
表2)。医療機関への納品作業等のための停車およびドアの開閉に伴い、CO<sub>2</sub>濃度は一時的に低下した。しかしながら、医療機関出発後、再度上昇に転じ、継続的な上昇傾向が見られた(図2)。

さらに、RCM+FFPは、Max Ave.が6,141ppm(参考値)、Total Ave.が4,411ppm(参考値)となり、FAM+FFP(P<0.05)やFAM(P<0.01)に比べ有意に高い値を示した。しかしながらRCMは、Max Ave., Total Ave.ともにRCM+FFPのおおよそ40%と低い値であったが、有意差は認められなかった。FAM+FFPではStat Ave. 417ppmからMax Ave. 990ppmであり、CO<sub>2</sub>濃度上昇は有意に抑制されていた。

いずれの群間においても、Start Ave., 配送時間、総配送時間に有意な差は認められなかった。

## 考 察

閉鎖環境のCO<sub>2</sub>濃度の上昇は、生体へアシドーシスや相対的な酸素量の低下に伴う酸素欠乏状態を引き起こし、頭痛や眠気を誘発する可能性が推察される。適正な車内衛生環境を維持し、安全に血液製剤を医療機関に届けるため、献血運搬車



出張所を出発してから2時間20分(帰所途中)までを平均し、グラフ化した。  
RCM+FFPの4,000ppm以上は参考値。

図2 実搬送車両内の継続的CO<sub>2</sub>濃度変動

表2 実搬送時における車内CO<sub>2</sub>濃度<sup>\*1</sup>の変動と配送時間<sup>\*1</sup>

	RCM	FAM	RCM+FFP <sup>*3</sup>	FAM+FFP
Ave. (ppm) <sup>*2</sup>	1,611 ± 56 <sup>*4</sup>	559 ± 50	3,429 ± 566 <sup>*5</sup>	744 ± 86
Total Ave. (ppm)	1,931 ± 198 <sup>*4</sup>	539 ± 37	4,411 ± 487 <sup>*5</sup>	738 ± 83
Max Ave. (ppm)	2,444 ± 343 <sup>*4</sup>	673 ± 49	6,141 ± 934 <sup>*5</sup>	990 ± 197
Start Ave. (ppm)	458 ± 76	508 ± 41	454 ± 56	417 ± 52
総配送時間 (min)	159 ± 7	151 ± 7	166 ± 10	167 ± 10
配送時間 (min)	73 ± 2	70 ± 1	74 ± 6	71 ± 3

\*1 : Mean ± SD (n = 6)

\*2 : Ave. (ppm) は、全測定 24 例のうち RCM + FFP の一例が測定開始後 22 分 42 秒で 4,002ppm を示したため、直前の時点 (22 分 40 秒, 3,985ppm) における各測定値を用いて算出した。

\*3 : RCM + FFP の Total Ave. と Max Ave. は、4,000ppm 以上の参考値を含んだ値。

\*4 : P < 0.05 vs FAM

\*5 : P < 0.01 vs FAM, P < 0.05 vs FAM + FFP

両内の CO<sub>2</sub> 濃度が労働衛生環境上の基準等に対し、適正かどうかを検証する目的で CO<sub>2</sub> 濃度の測定を行った。

配送業務に使用される車両は一般に密閉性が高いため、換気には意図的なエアコンの設定や窓の開閉が必要である。RCM を使用した場合、運転者や同乗者の呼吸により排出される CO<sub>2</sub> で、車内 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇することが報告されている<sup>6)~8)</sup>。今回、梱包されたドライアイス入り搬送容器を停車車両内に積載したところ、経時的かつ直線的に車内 CO<sub>2</sub> 濃度は上昇し、2 時間でおおよそ 4,500ppm に達した。一方で、FAM を用いた場合は、外気とほぼ同じ濃度を維持することができた。これらのことから、車内にドライアイス入りの搬送容器がある場合、RCM では CO<sub>2</sub> が搬送容器から漏れ出し、産業衛生基準の 0.5% (5,000ppm) 付近まで到達することが、明らかとなった。

当施設管轄で定期的な供給先のうち、最も遠隔な地域 (片道 1 時間 10 分程度) への配送時における CO<sub>2</sub> 濃度を实地に測定した結果、RCM では運転者 1 名のみの場合でも、最高 3,000ppm 程度までの上昇が認められた。このことから先の報告と同様に、運転者の呼吸により車内 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇することが明らかとなった。さらに、RCM + FFP の場合は、一時的に 7,000ppm を超える場合があることが明らかとなった。これは、停車時の結果で明らかとなったドライアイスに由来する CO<sub>2</sub> と、運転者の呼吸に由来する CO<sub>2</sub> が合算され

たことにより、RCM + FFP は最も高い値を示したと考えられる。RCM, RCM + FFP いずれの場合においても、FAM とすることにより、帰所するまでの間 1,000ppm を超えることはなかった。これらの結果は、FAM を用いることで、呼吸およびドライアイスによる CO<sub>2</sub> 濃度上昇に伴う車内衛生環境の悪化を抑制でき、適切な環境で配送業務を行うことが可能であることを示している。また、一時的に長時間作業時の産業衛生基準<sup>2)</sup>を超過する濃度となることがあったが、4 時間以上の長時間の連続運転の可能性は低いことから、この基準の逸脱には相当しないと考えられる。

最近、CO<sub>2</sub> 濃度が 1,000 ~ 2,500ppm の低濃度環境でも、意思決定能力に影響することが報告された<sup>9)</sup>。今回の搬送中 RCM の結果が、この濃度を超過したことから、FFP 搬送のない状態でも運転中の判断に影響する可能性が考えられる。さらに RCM + FFP の条件では、搬送容器から漏れ出る CO<sub>2</sub> により車内 CO<sub>2</sub> 濃度はさらに上昇し、5,000ppm を超えることがあったことから、運転者の意思決定能力の低下による判断ミスが生じる可能性は、より高くなると考えられる。FAM により上記の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は抑制されることが明らかとなったものの、都市部の渋滞中や、大型トラックや大型バスの後続走行の場合では、FAM が不快で、RCM としなければならない場合も考えられる。

今回のような実際に運用している現状を把握す



るための検討では、通常の配送状態を設定しなければならなかったが、データの広がり抑制するために、ドライアイスの量、車種、エアコン設定の統一など実験条件の絞り込みを行った。しかしながら、車内容積の異なる車両の使用、エアコン設定の不統一に起因する車内温度差、ドライアイスの形状や量の違いによる昇華量の増減、運転者の個人差による呼気中CO<sub>2</sub>量の違いなど、今回のデータに影響を及ぼすと考えられる因子は多数あることから、RCMによる搬送時の値は、さらに変化する可能性が考えられる。これらの中で温度による影響は、搬送容器内温度の定期バリデーションの結果から、季節による変動は少ない(平成25年度実施結果、夏季: 26.3℃、冬季: 23.3℃)ことが確認されているので、車内温度の影響は非常に少ないものと予想された。また、当施設ではFFP製剤の配送が、一車両あたり通常1～2バ

ッグと少ないものの、地域によっては大量のドライアイス入りの搬送容器を長時間積載することが考えられるので、今回の結果を超えるCO<sub>2</sub>濃度の上昇も予想される。これらのことから、将来的にはドライアイスの代替となる健康への悪影響が少ない蓄冷材の開発や、荷室と運転室が分離された車両の使用が望まれる。

献血運搬車室内のCO<sub>2</sub>濃度は、配送担当者の呼気や蓄冷剤として使用しているドライアイスにより、経時的に上昇することが明らかとなった。CO<sub>2</sub>濃度の上昇による運転者の意思決定能力低下が誘発する交通事故を防止し、安全に医療機関へ供給するため、特にFFP製剤搬送時は、可能な限りエアコンの設定を内気循環モードから外気導入モードに変更し、車内空気を換気することが必要である。

## 文 献

- 1) 森口哲史ほか：教室内二酸化炭素濃度の上昇と生体内酸塩基調節指標としての尿pH:教室窓(開口部)開閉時の比較：鹿児島大学教育学部教育実践研究紀要：21, 27-33, 2011.
- 2) 日本産業衛生学会：許容濃度等の勧告(2011年度)：産衛誌：53, 177-203, 2011.
- 3) 佐藤暢：二酸化炭素ボンベ誤用事故—何故まだ繰り返されるのか—その経緯：麻酔・集中治療とテクノロジー 2011：26-33, 2011.
- 4) 平川昭彦ほか：ドライアイスによる急性二酸化炭素中毒の1例：日職災医誌：55, 229-231, 2007.
- 5) 消防庁予防課長ほか：二酸化炭素消火設備の安全対策について(通知)：消防予第193号，平成8年9月20日.
- 6) 佐藤重幸：車室内空気質：豊田中央研究所R&Dレビュー：33(4)，15-23, 1998.
- 7) Katarzyna Gladyszewska-Fiedoruk：Concentrations of carbon dioxide in a car: Transportation Research Part D: 16, 166-171, 2011.
- 8) Katarzyna Gladyszewska-Fiedoruk：Concentrations of carbon dioxide in the cabin of a small passenger car: Transportation Research Part D: 16, 327-331, 2011.
- 9) Usha Satish, *et al.*: Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance: Environ Health Perspect: 120, 1671-1677, 2012.