

1,4-ジオキサンの測定手法検討結果

目次

1. はじめに

2. 試験方法

2-1. 捕集方法の決定

2-2. 検出方法の選択 (GC-MS 法)

2-3-1. 試料の前処理

2-3-2. GC-MS 分析条件

2-4. 捕集及び分析条件

2-5. 添加回収率

2-6. 捕集後のサンプラーの保存安定性

2-7. 検量線 (直線性)

2-8. 検出下限及び定量下限

3. まとめ及び考察

4. 引用文献

1. はじめに

1,4-ジオキサン (DIOX) は、主に、医薬品用、農薬用、洗浄剤、合成皮革用、反応用の溶剤、塩素系化合物の溶剤として多用されている。表 1-1 に DIOX の物理化学的性質と有害性 GHS 情報を要約した。DIOX は、GHS 分類では眼に対する重篤な損傷性/眼刺激性で区分 2 A、皮膚腐食性/刺激性で区分 2、標的臓器/全身毒性（単回及び反復ばく露）の中樞神経系をエンドポイントとして区分 1 に分類されている。GHS 分類は DIOX の発がん性を区分 2 にと分類している。表 1-2 に、国際的な機関によって勧告されている DIOX の職業性ばく露限界値(OEL)を示した。表 1-3 に IARC を含む国際機関が公表している DIOX の発がん分類を示した。NIOSH は DIOX を職業発がん物質として指定しており、厚生労働省も安衛法第 28 条第 3 項に基づく健康障害予防指針(発がん物質)の対象物質に指定している。DIOX の OEL は、種々の値が国際機関によって勧告されている（表-2）。DIOX の許容濃度として、ACGIH は 20 ppm¹⁾を、日本産業衛生学会は 10 ppm²⁾を勧告している。本報告書では、日本産業衛生学会の許容濃度 10 ppm を二次評価値として暫定的に採用し、労働者の個人ばく露濃度を評価するために 4 時間にわたる気中 DIOX 蒸気の採取（吸引速度 0.1 L/min）によって二次評価値 10 ppm の 1/1,000 を目標濃度（0.01 ppm、定量下限）として設定し、二次評価値の 2 倍の濃度と目標濃度の間に直線性の検量線が成立する定量分析法を開発することを目的とした。作業環境気中の DIOX 分析法では、DIOX の管理濃度が 10 ppm に設定され、10 分間の短い捕集時間（吸引速度 0.1 L/min）に気中サンプリングし、10 ppm の 1/10 の濃度の気中 DIOX を定量し得る捕集及び分析法が開発されている^{3,4)}。本研究で開発された GC-MS (Gas chromatograph-Mass spectrometer)分析法は、作業環境中の DIOX 分析に適用し得ることを確認することも本報告書の目的とした。

表 1-1. 1,4-ジオキサン（DIOX）の分子構造と物理化学的性質及び有害性 GHS 情報

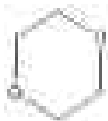
構造式		変換係数	1 ppm = 3.60 mg/m ³
			1 mg/m ³ = 0.28 ppm
CAS No.	123-91-1	麻酔主要な用途	溶剤、安定剤、脱臭剤、保存剤
分子式	C ₄ H ₈ O ₂	急性毒性(吸入：蒸気)	区分 4
分子量	88.11	皮膚腐食性/刺激性	区分 2
融点	11.8°C	眼に対する重篤な損傷性/眼刺激性	区分 2 A
沸点	101.1°C at 760 torr	呼吸器感作性又は皮膚感作性	ともに分類できない
蒸気圧	29 torr at 20°C	標的臓器・全身毒性(単回ばく露)	区分 1 (中枢神経系)、 区分 3 (麻酔作用、気道刺激性)
溶解性	1.00×106mg/L (水)	標的臓器・全身毒性(反復ばく露)	区分 1 (腎臓、肝臓、中枢神経系)、 区分 2 (呼吸器)
比重	1.0329 at 20°C		
蒸気密度	3.0 (air = 1.0)	発がん性	区分 2
安定性 (分解温度)	-	生殖毒性	分類できない

表 1-2. 主要な機関による 1,4-ジオキサン（DIOX）の職業性ばく露限界値の勧告

機関	職業性ばく露限界値
米国労働衛生専門家会議(ACGIH)	20 ppm (TWA)
日本産業衛生学会	10 ppm (36 mg/m ³)
厚生労働省(管理濃度)	10 ppm
ドイツ学術協会(DFG)	20 ppm (73 mg/m ³)
US.NIOSH REL	C 1 ppm (73 mg/m ³)
US.OSHA PEL	C 25 ppm (C 200 mg/m ³)

C: Ceiling value

表 1-3. 主要な機関による 1,4-ジオキサン (DIOX) の発がん性分類

機関	発がん性分類
国際がん研究機関 (IARC)	2B
米国労働衛生専門家会議(ACGIH)	A3
日本産業衛生学会	第 2 群 B
厚生労働省	健康障害防止指針（安衛法第 28 条第 3 項）の対象物質
ドイツ学術協会(DFG)	Group 4
US.NIOSH	職業性発がん物質 (Potential Occupational Carcinogen)に指定
US.OSHA	—

2. 試験方法

2-1. 捕集方法

文献調査から、活性炭管にて固体捕集する方法が確立されている作業環境測定ガイドブック 5 No.5026⁴⁾、OSHA Method no 07⁵⁾、NIOSH Manual 1602⁶⁾ことが確認された。したがって、本報告書では、作業環境測定ガイドブック 5 No. 5026⁴⁾、OSHA Method no 07⁵⁾、NIOSH Manual 1602⁶⁾に準拠した方法、即ち、球状活性炭を捕集材として用いて、ミニポンプで作業環境空気を吸引し、ガスクロマトグラフ法に代わる GC-MS 分析法を採用した。

具体的な捕集方法は下記とした。

サンプラー：ガラス管に球状活性炭 400 mg と 200 mg を 2 層充填した（ガステック製 258A）構造。長さ 100 mm、外径 6mm、内径 4mm、第 1 層の前部にガラスウール及び第 2 層の前後にウレタンが充填されている。

測定範囲：0.01～ 20 ppm （目標濃度(二次評価値の 1/1,000)～二次評価値×2)、二次評価値 10 ppm, 日本産業衛生学会の DIOX 許容濃度を二次評価値として採用)

サンプラーに捕集される DIOX 0.864μ g～1728.4μ g と設定される。

サンプリング流量：0.10 L/min

サンプリング時間：最大4時間（採気量：最大 24 L）

2-2. 検出方法の選択

作業環境測定ガイドブック 5 No.5026⁴⁾、OSHA Method no.07⁵⁾、NIOSH Manual 1602⁶⁾では、GC の検出器として FID (flame ionization detector)が採用されているが、本方法では GC-MS を用いて GC で分離したピーク成分を MS で同定した。

2-3-1. 試料の前処理

脱着用溶媒の二硫化炭素 2.0ml を加えた共栓小試験管を 2 本用意し、1,4-ジオキサンを吸着させた活性炭管の前層と後層の活性炭を別々に取り出し、上述の試験管に入れ、すばやく密栓した。これをときどき振とうし、約 1 時間放置して、上澄液を GC-MS 分析に供した。

2-3-2. GC-MS 分析条件

キャピラリーカラムを GC 恒温槽内に取り付け、十分にエージングした。ガスクロマトグラフを分析条件に合わせて運転した。

最終試料液 1.0μ l をオートサンプラーでガスクロマトグラフに導入し、得られるクロマトグラム上の測定対象物質のピーク面積を測定し、検量線を用いて最終試料液中の測定対象物質濃度を求めた。尚、定量イオンは m/z 88、確認イオンは m/z 28 及び m/z 58 とした。環境空气中濃度の計算は下記とした。

$$C = c \times 2.0 \times \frac{24.47}{88.11} \times \frac{1}{Q} \times \frac{1}{\varepsilon}$$

C:環境空气中の 1,4-ジオキサン濃度 (ppm)

c:最終試料液中の 1,4-ジオキサン濃度 (μg/ml)

Q:吸引試料空気量 (L)

ε :脱着率

決定した分析条件を下記（表 2）に示した。

表 2 GC-MS の分析条件

装置	6890N Net Work System (Agilent Technologies 製)
カラム	DB-WAX (0.32 mm×60 m 膜厚 0.5 μm) (J&W 製)
注入法	パルスド・スプリット (10:1)
注入量	1 μL
キャリアガス	He (1.0 mL/min)
注入口温度	200°C
オープン温度	35°C (2分)-3°C/min-200°C (2分)
インターフェイス温度	250°C
イオン源温度	220°C
四重極温度	160°C
定量イオン (確認イオン)	m/z 88 (m/z 28、m/z 58)



図 1-1 GC-MS による DIOX の TIC (Total Ion Chromatogram)

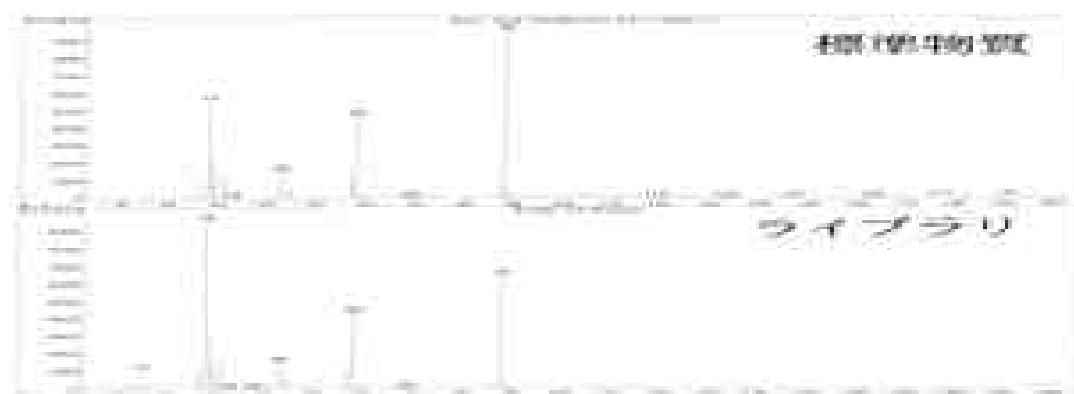


図 1-2 DIOX の SIM 質量スペクトル

DIOX は TIC (total ion chromatogram) とマススペクトルデータより、約 17.0 分に大き

なピークとして確認された。この GC ピークは、標準物質 DIOX 質量スペクトルのイオン強度比との一致から、DIOX と同定した。

2-4. 捕集及び分析条件

予備検討の結果に基づいて決定した捕集方法、前処理操作および GC-MS 分析条件により行った。

2-5. 添加回収率

活性炭管に DIOX 二硫化炭素溶液 (86 μ g/ml、0.86 mg/ml、86.4 mg/ml、172.8 mg/ml) を 10 μ l 添加後 (各々 n=5)、室内空気 (25.0°C、40.0 %) を流速 0.1 L/min で 240 分間吸引し、4°C の冷蔵庫にて 12 時間保存し、分析を行った。添加回収率は 92.6 %~102.1 % であった (表 3)。なお、今回の検討に用いたサンプラーの Blank からは DIOX は検出されなかった。

表 3 添加回収率

1,4-ジオキサン としての添加量 (μ g)	4時間捕集とし ての濃度(ppm)	相当の濃度	回収率 (%) (n=5)		RSD(%)
			Mean	SD	
0.86	0.01	目標濃度	92.6	3.1	3.3
8.64	0.1	目標濃度×10	97.5	3.4	3.5
864.2	10	2次評価値	102.1	1.8	1.8
1728.4	20	2次評価値×2	98.3	2.6	2.6

2-6. 捕集後のサンプラーの保存安定性

活性炭チューブ (球状活性炭) に、DIOX 標準液 (86 μ g/ml、86.4 mg/ml、172.8 mg/ml) を添加 (10 μ l) し、室内空気 (25°C、40 %) を流速 0.1 L/min で 30 分間吸引した後、速やかに両端にキャップをし、冷蔵保存した。そして、捕集直後を基準として、0, 1, 3, 5 日目の保存安定性を確認した (表 4)。5 日間の保存でも、添加回収率は 90%以上であり、良好な保存安定性を示した。

表 4 保存安定性

1,4-ジオキサンとしての添加量 (μg)	4時間捕集としての濃度(ppm)	相当の濃度	保存日数	回収率 (%) (n = 5)		RSD(%)
				Mean	SD	
0.864	0.01	目標濃度	0	96.3	1.5	1.6
			1	97.8	2.9	3.0
			3	92.1	6.8	7.4
			5	93.6	4.2	4.5
864.2	10	2次評価値	0	96.3	2.5	2.6
			1	92.4	1.8	1.9
			3	90.3	5.8	6.4
			5	92.1	4.9	5.3
1728.4	20	2次評価値 $\times 2$	0	105.2	2.1	2.0
			1	91.2	1.9	2.1
			3	93.5	1.8	1.9
			5	90.9	3.7	4.1

2-7. 検量線 (直線性)

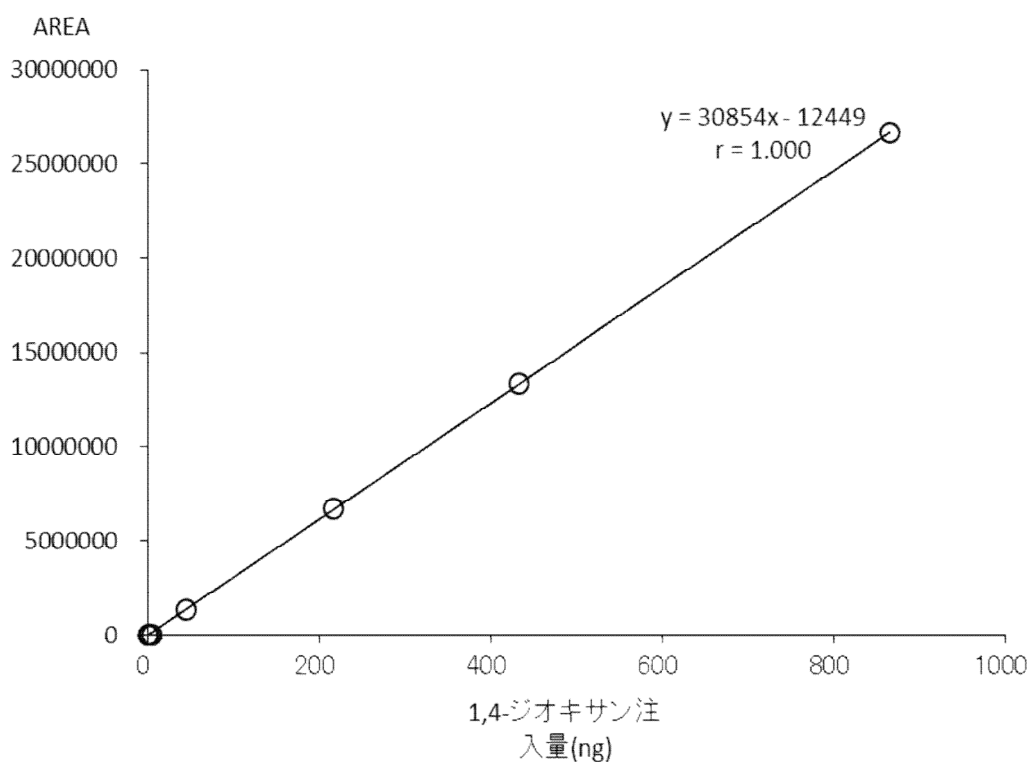


図2 DIOX 検量線 (注入量 0~864.2 ng)

DIOX 標準液を二硫化炭素により希釈し、0~864.2 $\mu\text{g/ml}$ の範囲で標準系列を調製し、

検量線の直線性について確認を行った。その結果、当該範囲で良好な直線性を示した(図 2、表 5)。

表 5 DIOX の標準系列 (0～864.2 μ g/ml)

1,4-ジオキサン 注入量 (ng)	4時間捕集としての 濃度(ppm)	相当の濃度	AREA		
			m/z 88	m/z 28	m/z 58
864.2	20	2次評価値 $\times$ 2	26629453	15987447	14074132
432.1	10	2次評価値	13346191	7974120	6908854
216.0	5.0	2次評価値/2	6677450	4105832	3310743
43.2	1.0	目標濃度 $\times$ 100	1373464	820042	701145
4.32	0.1	目標濃度 $\times$ 10	13810	86331	73461
0.43	0.01	目標濃度	13321	8874	7915
0.00	0.00	ブランク	0	0	0

2－8．検出下限及び定量下限

表 6 に検出下限 (LOD) 及び定量下限 (LOQ) を示した。検出下限 (LOD) は目標濃度 (2 次評価値の 1/1,000) の標準液を 5 サンプル分析して標準偏差 (SD) を算出し、SD の 3 倍を検出下限値とした。LOQ (μ g/sample) は目標濃度値の標準液を 5 サンプル分析し、その標準偏差 (SD) を算出し、SD の 10 倍を定量下限値とした。

表 6 検出下限 (LOD) 及び定量下限 (LOQ)

直線範囲 (ng)	0.43～864.2
相関係数	1.000
LOD (μ g/sample)	0.362
LOQ (μ g/sample)	1.207

また、添加回収試験の結果から、本法の定量下限は 1.207 μ g/sample であったため、個人ばく露測定 (24 L 採気) の定量下限値は、13.97 ppb (0.0140 ppm)となった (表 7)。

表 7 測定法の定量下限

評価項目	定量下限
1,4-ジオキサン量	0.603 (μg/ml)
24 L 採気時の気中濃度	13.97 (ppb) (0.0140 (ppm))

3. まとめ及び考察

3-1. 個人ばく露濃度測定法

本分析法では、作業環境測定ガイドブック 5 No.5026⁴⁾、OSHA Method no 07⁵⁾、NIOSH Manual 1602⁶⁾を参照して、作業環境気中の DIOX 濃度を定量する方法を検討した。本分析法の特徴は、気中 DIOX を活性炭管(球状活性炭)にて捕集することにより、GC-MS にて精度・感度良く分析できることである。定量下限値は 24 L 採気（吸引速度 0.1 L/min）で 13.97 ppb (0.014 ppm)であり、4 時間の個人曝露濃度測定は目標濃度(0.01 ppm)までほぼ測定可能である。高濃度の領域では、2 次評価値の 2 倍の DIOX 濃度(20 ppm)までの定量分析が可能であることを確認した。また、保存は冷蔵(4℃)にて 5 日間安定である。結論として、個人ばく露濃度は、十分な精度と感度でもって分析することが可能となった。また、本分析法では、GC-MS を用いているため、他のお有機溶剤物質等の共存物質との分離をキャピラリーカラムによる保持時間、および標準物質質量スペクトルのイオン強度比の一致性から同定し、1,4-ジオキサンは正確に分離定量可能と結論付けられた。

3-2. 本分析方法の作業環境中 DIOX 濃度分析への適用

24L 採気時の気中 DIOX 濃度の定量下限は 13.97 ppb (0.01397 ppm)となった。一方、作業環境測定 A 測定、B 測定の採気時間を 10 分間とすると採気量は 1.0 L(0.1 L/min×10 分)となり、この場合の定量下限は 335.19 ppb (0.3352 ppm)になる。この値は 2 次評価値 10ppm の 1/10 以下であり、本分析法は、作業環境中の DIOX 測定に十分な精度をもって適用できると考えられる。

4. 引用文献

- 1) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2013 TLVs and BEIs based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. ACGIH. Cincinnati, OH, USA.
- 2) 許容濃度等の勧告(2013 年度) 産業衛生学雑誌 2013:55 巻 182 – 208 頁、日本産業衛生学会、東京
- 3) 作業環境測定ガイドブック 0 総集編 第 4 版第 4 刷 日本作業環境測定協会 平成 22 年 12 月 24 日
- 4) 作業環境測定ガイドブック 5 No.5026 改訂第 1 版 有機溶剤関係 255- 256 頁、日本作業環境測定協会 編集発行 平成 17 年 9 月 13 日
- 5) OSHA Analytical Method no 07, Organic vapors. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) Technical Center. United States Department of Labor, Salt Lake City, UT, USA. May 2000.
- 6) NIOSH Manual of Analytical Method (NMAM) 1602. Dioxane, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, OH, USA. 1994.

開発した 1,4-ジオキサン分析法の要約

構造式: C ₄ H ₈ O ₂		分子量: 88.11	CAS №: 123-91-1
許容濃度等: 産衛 (OEL)		10 ppm	物性等: 比重: 1.0329 at 20°C BP: 101.1°C at 760 torr MP: 11.8°C VP: 29 torr at 20°C
OSHA (Ceiling)		25 ppm	
NIOSH (Ceiling)		1 ppm	
ACGIH (TLV-TWA)		20 ppm	
管理濃度:		10 ppm	
別名: p-Dioxane、Ethylene glycol ethylene ether、Diethylene oxide			
サンプリング		分析	
サンプラー : 球状活性炭捕集管 258A (ガステック製)		分析方法: 質量分析計型検出器付ガスクロマトグラフ(GC-MS)分析法	
サンプリング流量: 0.1 L/min		脱着: 二硫化炭素 (作業環境測定用)	
サンプリング時間: 240 min (24.0 L)		(和光純薬工業(株)), 2.0 mL (60 min 浸漬)	
保存性: 1728.4 µg から 0.864 µg の添加の範囲で、冷蔵で 5 日間保存可能。		機器: GC-MS, 6890N Net Work System (Agilent Technologies 製)	
ブランク: 脱着溶媒およびサンプラーブランクともに検出されない。		カラム: DB-WAX (60 m×0.32 mm, 0.5 µm) (J&W 製)	
精度		キャリアーガス: He (1.0 mL/min)	
添加回収率		オープン条件:	
0.86 µg 添加で 92.6%、8.64 µg で 97.5%、864.2 µg で 102.1%、1728.4 µg で 98.3%		35°C (2 min) — 3°C/min — 200°C (2 min)	
検出下限 (3SD)		注入口温度: 200°C	
0.181 µg/ mL (4.19 ppb, 0.1 L/min×4 h)		インターフェイス温度: 250°C	
定量下限 (10SD)		イオン源温度: 220°C	
0.603 µg/mL (13.97 ppb, 0.1 L/min×4 h)		注入口モード: パルスドスプリット (10:1)	
		注入量: 1 µL	
		定量モード: SIM	
		定量イオン(確認イオン): m/z 88 (m/z 28, m/z 58)	
		検量線: 0.43—864.2 µg/ mL の範囲で直線	
		定量法: 絶対検量線法	
適用: 個人ばく露濃度測定			
妨害: —			
参考文献: 作業環境測定ガイドブック 5 No.5026 改訂第 1 版 有機溶剤関係 255- 256 頁、日本作業環境測定協会 編集発行 平成 17 年 9 月 13 日			
NIOSH Manual of Analytical Method (NMAM) 1602. Dioxane, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, OH, USA. 1994.			
OSHA Analytical Method no 07, Organic vapors. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) Technical Center. United States Department of Labor, Salt Lake City, UT, USA. May 2000.			

作成日 平成 26 年 2 月 27 日

