
関連総説 シンポジウム**労働衛生：室内環境と防具**

田 中 茂

十文字学園女子大学、
防衛医科大学校 医学教育部医学科 衛生学公衆衛生学講座**Occupational health: Indoor environment and
protective equipment**

Shigeru Tanaka

Jumonji University
Department of Preventive Medicine and Public Health, National Defense Medical College

抄録

労働環境における作業員の化学物質曝露について45年間調査研究をしてきた。調査の考え方の基本は恩師：久保田重孝先生、館正知先生（中央労働災害防止協会労働衛生サービスセンター時代）、今宮俊一郎先生、大前和幸先生（北里大学、十文字学園女子大学時代）等により指導された『作業現場を良く見て、作業員の曝露実態を反映した調査を行う』であった。具体的には（1）化学物質による作業員の曝露状況の調査（個人曝露濃度測定と作業行動記録（タイムスタディ））、（2）健康影響（生物学的モニタリング等）の調査を組み合わせて実施した。（臨床環境 28：9-15, 2019）

《キーワード》個人曝露測定とタイムスタディ、生物学的モニタリング、臭化メチル、二硫化炭素、
インジウム

Abstract

I have been researching chemical exposure of workers in the work environment for 45 years. The present survey is based on instructions from Dr. Juko Kubota, Dr. Masatomo Tachi (Japan Industrial Safety and Health Association), Professor Shunichiro Imamiya, and Professor Kazuyuki Omae (Kitasato University and Jumonji University) and was designed to “look at the work site closely and conduct a survey that reflects the actual exposure situation of workers.” Specifically, it is implemented by

combining (1) an investigation of the exposure situation of workers to chemical substances, including individual exposure concentration measurement and work behavior record (time study), and (2) an investigation of health effects using biological monitoring, etc. (Jpn J Clin Ecol 28 : 9 – 15, 2019)

《Key words》 individual exposure concentration measurement and work behavior record, biological monitoring, methylbromide, carbon disulfide, indium

事例 1：臭化メチルを用いた植物検疫燻蒸と土壌燻蒸

1975（昭和50）年から、農林水産省からの委託で臭化メチル（沸点3.6℃）を用いた植物検疫燻蒸、土壌燻蒸における作業者の曝露調査、健康影響について調査研究を行った。ハロゲン系炭化水素による有害性、とりわけ発がん性について危惧され始めた頃の調査であった。植物検疫燻蒸は、本船（木材を対象に船のハッチで蓋をして燻蒸）、木材天幕（指定された港の木材置場で大きなビニールシートで密閉にして燻蒸）、倉庫、サイロ（穀類、果実等を対象に密閉の良い施設で燻蒸）があり、臭化メチルによる燻蒸を行って1～3日間放置後、ガス抜きを行った。作業者は燻蒸時とガス抜き時に臭化メチルに曝露された。植物検疫燻蒸作業者は図1のような隔離式有機ガス用吸収缶を腰に、全面面体の防毒マスクを装着して作業を行っていた。作業者の個人曝露濃度測定は、襟元に装着した3M社製有機ガス用モニターを、投薬とガス抜き作業ごとに装着してサンプリングし、二硫化炭素で脱着し、ガスクロマトグラフで

分析を行った。表1に臭化メチルによる個人曝露濃度の測定結果をまとめた。日本産業衛生学会が勧告している臭化メチルの許容濃度である1 ppmと比較すると、投薬時は最大値では許容濃度の約10倍を超える濃度であった。ガス抜き時は、サイロを除く燻蒸では平均値で許容濃度の20～75倍で作業をしていた。

関西の燻蒸作業者が使用している隔離式有機ガス用吸収缶の出口側（作業者の面体を取り付ける側）に臭化メチルの検知管を取り付けてガス濃度を測ったところ、検知管の色が変わった。すなわち、吸収缶から臭化メチルが脱着してくることを示唆する結果を示した。急遽、全国から燻蒸作業で使用している隔離式有機ガス用吸収缶（17缶）を回収し、吸収缶入口から1ℓの新鮮空気を送り、出口側（蛇管接続側）にテドラーバックを接続し通気された空気を捕集し、ガスクロマトグラフで分析したところ、全ての吸収缶から臭化メチル濃度が検出された。当時、吸収缶内に充填された活性炭に吸着して捕集された臭化メチルが脱着を起こし、作業者が臭化メチルに曝露していることを示唆する結果を示した。そこで、マスクメーカーに活性炭に薬剤をコーティングし、反応で捕集する吸収缶の開発の検討を依頼した。臭化メチルの沸点が3.6℃と低いと、活性炭に一度吸着してもすぐに脱着されやすいことを示唆する結果であった。

開発された吸収缶の臭化メチルの捕集性能試験を行い、臭化メチルの破過時の吸収缶の重量を測定し、作業現場における吸収缶の交換時期として吸収缶重量の7%増加を目安とすることを提案し、現場で活用された¹⁾。

臭化メチルの生物学的モニタリングとして作業後の尿中臭素濃度を測定した²⁾。作業（251名）

表1 植物検疫燻蒸作業者の臭化メチルによる個人曝露濃度測定結果

燻蒸方法	個人曝露濃度 (ppm)			
	投薬		ガス抜き	
	N	平均値(最大-最小)	N	平均値(最大-最小)
本船	30	3.5 (36.4-0.1)	29	31.8 (146-0.1)
木材天幕	34	3.8 (21.6-0.1)	38	74.6 (390-0.1)
倉庫	18	2.9 (13.5-0.1)	18	19.8 (58.5-0.5)
サイロ	17	1.1 (10.0-0.1)	22	0.5 (3.1-0.1)



図1 隔離式吸収缶・全面面体を装着した植物検疫燻蒸作業者



図2 ハウス全面燻蒸におけるボンベからの噴射



図3 ハウスのサイドを開けてガス抜きを実施



図4 ハウス内マルチ燻蒸における作業



図5 ハウス内マルチ燻蒸におけるガス抜き作業



図6 農業用臭化メチル専用マスク



図7 ビスコスレーヨン工場におけるノズルの交換作業

は燻蒸作業後の尿を採取し、臭化メチルを取り扱わない非曝露群（379名）を含め、立教大学原子炉において放射化分析法を用いて分析した。非曝露群の尿中臭素濃度の平均値は6.3 mg/ℓに対し、燻蒸作業者の平均値は10.8 mg/ℓで、対象者に比べ2倍弱の値が検出された。摂取する食物中に臭素が含まれており、対象者にも尿中臭素が検出されるのに対し、更に燻蒸作業者は臭化メチル燻蒸による曝露を示唆する結果を得た²⁾。これらの曝露はマスク面体の装着不備によるものと考え、燻蒸作業者を対象に毎年開催された労働衛生教育において、マスクフィッティングテスターによるマスク面体からの漏れ率測定を実施してきた。

臭化メチルは農薬として土壤中への拡散性に優れ、殺菌、殺虫、ウイルスおよび除草効果と幅広い効果を有しており、一般の農家においても土壤の燻蒸剤として使用されていた。燻蒸方法として、ハウス全面燻蒸、ハウス内マルチ燻蒸および露地マルチ燻蒸の3種類がある。苗を定植する前に、耕起してガスが拡散、浸透しやすくした後、燻蒸が行われ、農作業者は燻蒸とガス抜き作業を行う際に臭化メチルに曝露されていた。

ハウス全面燻蒸はハウスの周囲を新しいビニールシートで密閉にしたのち、10 kg 入りの臭化メチルのボンベを等間隔におき、奥のボンベからバルブを開けて噴射を行った。臭化メチルはハウス内空間を拡散し土壤中に浸透して、農薬として作用していた。本来、農薬メーカーは噴射する前に噴射口に時限膜（ポリカーボネート製）を取り付けて、バルブを開けても時限膜が5分程度で溶けてから噴射するまでに、農作業者はハウス外へ退

出することができるのであるが、待っていただけないと釘で時限膜に穴をあけて直接噴射していた（図2）。農作業者は臭化メチルの農薬としての効果については説明されていたが、有害性については全く指導されていなかったために、このような作業を行っていた（白い煙は液体臭化メチルであった）。

噴射後、5日放置した後に、ビニールハウスの周囲（サイド）のフィルムを外し、ハウス内の臭化メチル濃度を除去するためにガス抜きを実施した（図3）が、農作業者はハウスの中の臭化メチル濃度はゼロと思って、ハウス内に顔を入れたり、天窓を開けるために中に入ったりしていた。ハウス内の臭化メチル濃度を測定した結果、500～1000 ppm 残存していた。

ハウス内マルチ燻蒸については、臭化メチルの充填された小缶に開缶具を取り付けて土壌の上に等間隔に置き、シートで被覆、密閉にした。そして、農作業者が順次、シートの上から開缶具を押して開缶し、臭化メチルがシート内に拡散し、土壌中に浸透していった（図4）。

ハウス内マルチ燻蒸実施から5～7日後、ハウス内がほぼ密閉された状態で、作業者はシートの裾をめくって臭化メチルガスの除去を行った（図5）が、シート内に残留している臭化メチル濃度は1000 ppm 前後であり、農作業者は高濃度に臭化メチル曝露していることが確認された。

露地マルチ燻蒸は、ハウス内マルチ燻蒸を露地で行う作業である。それら3種類の臭化メチルを用いた土壌燻蒸の個人曝露濃度測定結果を表2に示す。臭化メチルの許容濃度1 ppm と比較する

表2 土壌燻蒸における個人曝露濃度

燻蒸方法	個人曝露濃度 (ppm)					
	投薬作業			ガス抜き作業		
	N	平均値	(最大－最小)	N	平均値	(最大－最小)
ハウス全面	33	1.5	(8.6－0.1)	26	28.7	(603－0.1)
ハウスマルチ	10	1.6	(14.5－0.1)	12	66.7	(24－10.0)
露地マルチ	6	2.3	(4.1－0.1)	11	0.5	(0.9－0.1)

と投薬時の平均値は1.5～2.3 ppm と少し超えた程度であったのに対し、ハウス全面燻蒸とハウスマルチ燻蒸のガス抜き作業では、著しく高い濃度下で作業を行っていた。

これらの結果より、農業用臭化メチル専用マスクの開発を行い、500 ppm の臭化メチル濃度に対し、30分間の使用可能なマスクの開発をマスクメーカーに依頼した。実際に制作されたマスクを図6に示す。更に、臭化メチルの有害性や、作業手順書（パンフレット）のテキストを作成するとともに、専門的な知識を有する巡回指導員を指名し、農作業に対する臭化メチルの有害性や適正な作業方法を指導するようお願いした。

事例2：ビスコースレーヨン工場の二硫化炭素（CS₂）曝露

ビスコースレーヨン工場における作業者の二硫化炭素曝露による健康影響は、昭和の初期から労働衛生の分野では問題になっていた。1990年代は、通常の作業ではドラフト内で密閉した状態で繊維が製造されるため、作業者の二硫化炭素曝露が少ない状況であったが、糸が絡んでしまった際や、1日に1回ノズルの交換の際には、ドラフトのドアを開けて作業を行うことになる。図7に、このビスコースレーヨン工場におけるノズルの交換作業を示した。このようなときに作業者は二硫化炭素に曝露されることになる。

当初、作業者の曝露濃度の測定は作業者襟元に活性炭管を、作業者の腰に吸引ポンプを装着してサンプリングを行い、溶媒脱着によりガスクロマ

トグラフで分析する方法で行われていた。吸引ポンプを使用すると、作業者に負担になること、バッテリー（電池）を使用するため、有機溶剤による引火や爆発を発生する危険があるため、不適であることが問題となった。そのため、吸引ポンプを使用しないでサンプリングができるような方法として、分子拡散の原理を利用してガス状物質を捕集し、作業者の曝露濃度を測定するパッシブサンプラー（拡散型サンプラー）が開発された。3M 社製の有機ガスモニターや、デュボン社製 Pro-Tec 等が市販されたが1回のサンプリングしか使用できず、価格が高かった。1992年、拡散層が付いた捕集管に加熱脱着用捕集剤（Tenax-TA）を詰め、作業者の襟元に装着して二硫化炭素を捕集し、自動の加熱脱着装置（Perkin-Elmer 社製 Automatic thermal Desorption System-ATD 50 型）をGC-MS（Hewlett Packard 製5890+MSD 検出器）に接続する方法を確立した。更に、加熱脱着して検知管で定量することが出来る DELTA 測定器（イギリス SABRE 社）が開発され、試験を行い良好な結果を得た。低濃度において検知管の読み取り誤差の影響が認められたが、作業現場で迅速に測定結果を求めることができた³⁾。

ビスコースレーヨン工場において上記の個人曝露濃度測定とともに、二硫化炭素の代謝産物である尿中 TTCA（2-ジチオチアゾリジン-4-カルボキシル酸）濃度の測定を行った。作業者は直結小型の有機ガス用吸引缶を装着して作業を行っているにもかかわらず、指導前の状態で尿中 TTCA の値が基準値（BEI）である 5 mg/g - ク

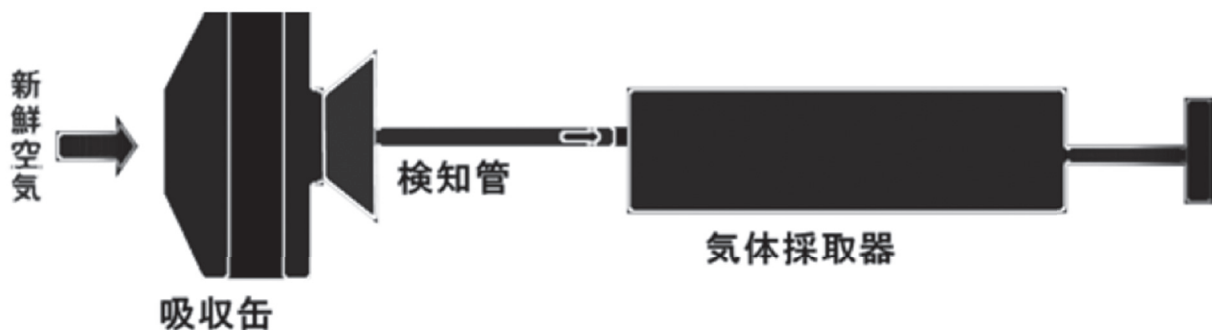


図8 作業現場で検知管を用いて吸収缶の破過を検知する方法

レアチニンを超える作業者が認められた。

二硫化炭素の沸点が46℃と有機溶剤の中では低く、有機ガス用吸収缶における破過時間が短い⁴⁾。更に、当該作業場の相対湿度が80%近かったため、相対湿度50%の時の破過時間に比べ、半分近く短くなることをふまえると、有機ガス用吸収缶の二硫化炭素に対する破過時間が大変短くなることが危惧された。そこで、図8に示した現場でチェックできる簡便な有機ガス用吸収缶の破過検知方法を提案した。作業終了時、使用した吸収缶に検知管が挿入できる穴をあけたゴム栓を吸収缶の出口側に装着させて、脱着してくる二硫化炭素濃度を測定する方法であった。

ビスコースレーヨン工場で使用した4つの吸収缶（AからD）についての、現地で実施した検知管による破過検知結果と大学に持ち帰った残存能力試験結果によると、現地で高い脱着が認められた吸収缶は残存試験でも最初から高い濃度を示し、残存使用時間（5 ppm になるまでの時間）が短い結果であった。この方法で、作業現場で使用した検知管を用いて簡易破過試験を行い、半日～1日の使用で交換することとした。

事例3：インジウムによる曝露軽減のための電動ファン付き呼吸用保護具（Powered Air Purifying Respirators, PAPR）の活用

酸化インジウム錫酸化物（Indium tin oxide、ITO）取扱い作業者が、間質性肺炎を発症し両側気胸により死亡したことが報告された。その後、行政、研究機関、取扱い事業場が協力して、再発防止に努めた。日本バイオアッセイ研究センターがITO粉じんによる動物実験を行った結果、発がん性が確認され、厚生労働省は許容される濃度として $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と大変低い濃度を指導した。当時、多くの作業現場では使い捨て式防じんマスクを装着していたが、それでは不十分な曝露防護であることより、電動ファン付き呼吸用保護具（Powered Air Purifying Respirators、PAPR）の使用を指導した。そこで、作業者がPAPRを装着して、実際吸入する空気中のインジウム濃度を測定した結果、許容される濃度を下回っている

ことを確認した。

事例4：オルトトルイジン（ortho-toluidine, OTD）を用いた顔料製造工場で膀胱がんの発症

オルトトルイジン（ortho-toluidine、OTD）を用いて顔料を製造している工場で、20～25年と長く勤めていた5名の作業者が膀胱がんを発症した。作業中に浮遊しているOTD濃度は許容濃度の1/50から1/100であり、吸入曝露量が非常に低く、現場で使用していた化学防護手袋（天然ゴム製）のOTDに対する透過時間を測定したところ、105分と短い結果であった。当時、同一手袋を平均2か月程度使用し続けていたことにより、手袋から透過したOTDが皮膚から吸収（経皮吸収）されたことによる曝露が発症原因として推定された。

現在、経皮吸収による健康影響を発生する化学物質を中心に化学防護手袋の選定を指導したり、多くの化学物質に対して透過しにくい素材を用いた薄手手袋の開発を行っている。

まとめ

労働環境において化学物質を取り扱っている作業者の健康への影響が今もって報告されている。著者の45年間の調査研究より、（1）使用している化学物質の有害性を認識せず使用している、（2）作業者の曝露防護のために労働衛生保護具が使用されているが、適正使用されていない、ことがあげられる。とりわけ、吸入曝露を防護するための防じんマスクと防毒マスク、経皮吸収曝露を防護するための化学防護手袋の使用が重要であるが、これらの保護具の選定、使用、交換（廃棄）に関して不適切な使用をよく見かける。これらの保護具を使用している作業場では、作業主任者の中から1名を選任し、保護具について必要な知識を習得させ『保護具着用管理責任者』として、周囲の作業者に保護具を適正に指導するシステムを構築することを期待したい。

引用文献

- 1) Tanaka S, Ishizuka H, et al. Efficiency of respirator canisters with methyl bromide. *Ind Health* 27: 111-120, 1989
- 2) Tanaka S, Imamiya S, et al. Evaluation of methyl bromide exposure on the plant quarantine fumigators by environmental and biological monitoring. *Ind Health* 29: 11-21, 1991
- 3) Tanaka S, Omae K, et al. A simple method for carbon disulfide monitoring using a diffusive sampler, thermal desorption and a stain tube. *Ind Health* 35: 474-479, 1997
- 4) Tanaka S, Nakano Y et al. A study on the relative breakthrough time (RBT) of a respirator cartridge for forty-six kinds of organic solvent vapors. *Applied Occup Environ Hygiene* 14: 691-695, 1999