

# 化学物質のばく露評価への個人ばく露測定の実用に関する研究

Implementation of personal exposure measurement to the workers' risk assessment.

鷹屋光俊\*1\*3, 萩原正義\*1\*3, 山田丸\*1\*3, 井上直子\*1\*4, 岩切一幸\*2\*5, 加藤伸之\*1\*6, 菅野誠一郎\*1, 韓書平\*1\*3

作業環境研究グループ\*1 産業疫学研究グループ\*2

■ TAKAYA Mitsutoshi, HAGIWARA Masayoshi, YAMADA Maromu, INOUE Naoko, IWAKIRI Kazuyuki, KATO Nobuyuki, KAN-NO Seiichiro, and HAN Shuping

化学物質のリスクアセスメント義務化に伴い、日本でも本格的に個人ばく露測定が実施されると予想される。個人ばく露測定の実施が長い諸外国に対し、日本では個人ばく露測定の実用性の蓄積が乏しく、単純に外国の文献・マニュアルを輸入したのでは個人ばく露測定を適切に行えない可能性がある。本プロジェクト研究では、個人ばく露測定を活用し、化学物質のリスク評価をより確実に実施するための助けとなる知見の提供を目指し研究を行った。解決を図る方針として下記の3点を設定した。(a)個人ばく露測定を実施する事業者あるいは分析機関の負担を軽減するため、標準試料の簡便な作製方法の開発、(b)個人ばく露測定の対象労働者の負担軽減のため、高感度分析方法を利用したサンプリング捕集量の削減によるポンプおよびサンプラーの軽量化の実現と、サンプラー装着が作業員に与える負担の評価を行い負担の少ない装着法の提案、(c)1作業日を通したばく露リスクではなく、作業やばく露形態に応じた作業毎のリスク判定を可能にする方法等の提案。これらの課題を解決するために、具体的な研究実施内容として、粒子状物質の標準試料調製方法と、これを用いた蛍光 X 線分析の個人ばく露測定への応用、反応型パッシブサンプラーの妨害物質共存下での適用可能性の評価、サンプラー着用時の負担に関する人間工学的評価、短時間サンプリングに資するためのフィルターおよび分析装置の性能評価、金属の化学種に応じたばく露評価を行うための模擬生体溶液への粒子状金属類の溶解特性評価システムの構築などを行った。

## 1 研究の背景

平成26年6月25日に公布された労働安全衛生法の改正<sup>1)</sup>により、化学物質のリスクアセスメントが義務化された。化学物質のリスクを評価するためにはその有害性（ハザード）を知ること、化学物質を使用する労働者がどの程度ばく露しているのかを知ることが必須である。このため、従来日本ではあまり行われていなかった化学物質の個人ばく露測定の重要性が非常に高まっている。個人ばく露測定は、すでに諸外国の労働衛生の分野では広く用いられている。従って、諸外国のマニュアル・論

文等参考となる情報は確かに多い。しかし、(1) 関連する規制・法令体系の違いにより、工場等の設備要件や同じ目的で使用する化学物質の種類が異なる可能性がある。(2) 我が国では、多能工が多くいるが、多能工に対して1作業日の時間加重平均ばく露濃度を求める従前の標準的な個人ばく露測定が評価として妥当かどうか議論の余地がある。(3) 粉じん用のサンプラーなどは重量があり、サンプラー装着が負担になる可能性がある。体格面の違いから、個人ばく露測定が先行して普及している欧米で問題とならない場合でも、日本での実施においてサンプラー装着の負担が問題となる可能性がある。等といった問題がある。そのため、個人ばく露測定を有効に実施するために、諸外国のマニュアルをそのまま翻訳・輸入するのではなく、日本流の個人ばく露測定の実用性・ノウハウの蓄積が欠かせない。

このような背景を元に、日本で個人ばく露測定をより普及させるために支援となりうる各種の知見を提供することを目的とし、個別の物質・個別の作業の測定・分析方法を提供するのではなく、なるべく汎用的に使える情報を提供とすることをめざしプロジェクト研究を実施し

\*1 労働安全衛生総合研究所 作業環境研究グループ  
\*2 労働安全衛生総合研究所 産業疫学研究グループ  
\*3 現所属 労働安全衛生総合研究所 化学物質情報管理研究センター ばく露評価研究部  
\*4 現所属 労働安全衛生総合研究所環境計測研究グループ  
\*5 現所属 労働安全衛生総合研究所人間工学研究グループ  
\*6 現所属 京都大学大学院工学研究科

た。

## 2 実施内容と本プロジェクト報告書の構成

本プロジェクト研究で実現を目指したのは大きく分類すれば下記の3点に集約できる。

- (a) 個人ばく露測定を実施する事業者あるいは分析機関の負担を軽減するための、標準試料の簡便な作成方法。
  - (b) 個人ばく露測定の対象労働者の負担軽減のため、高感度分析方法を利用した、サンプリング捕集量の削減によるポンプおよびサンプラーの軽量化。並びに、サンプラー装着が作業者に与える負担の評価とより負担の少ない装着法。
  - (c) 1作業日通したばく露リスクではなく、作業やばく露形態に応じた作業毎のリスク判定を可能にする方法。
- これらについて、粒子状化学物質および蒸気・ガス状化学物質について様々な事項を検討した。

### (a-1): 多分散エアロゾル発生システムの活用と蛍光 X 線分析の個人ばく露測定への応用

粉じん試料について、別プロジェクトで開発した多分散エアロゾル発生システムの利用を検討した。蛍光 X 線分析は、多くの利点があるものの、気中粒子の分析を行うためには、実際の職場の空気中の粒子と物性性状がよく似たエアロゾル粒子をフィルターに捕集させた標準試料を用意する必要がある。本研究では、多分散エアロゾル発生システムにより作成した試料の重量濃度と蛍光 X 線分析の測定結果が非常に良好な直線関係にあることを確認した。これにより、試料の粒径やフィルター上の捕集厚みなどの影響が大きく、従来は労働環境中の金属類分析に用いることが難しいとされていた蛍光 X 線分析を利用可能とし、特に難溶解性の金属類分析への適用可能性を示した。これについては、独立した報告書「蛍光 X 線測定 (XRF) による気中金属類分析と、多分散エアロゾル発生システムを利用した気中粒子捕集フィルター標準試料作成の試み」にまとめ、本 SRR に掲載した。

### (a-1)および(b-1): 混合蒸気発生システムの構築

蒸気について、(a)の標準試料の簡便な作成方法の開発および(b)の労働者の負担軽減を目指して、ポンプが不要であるパッシブサンプラーのうち吸着型のパッシブサンプラーの使用可能性を評価できるシステムとして、複数成分の有機溶剤蒸気濃度をそれぞれの成分濃度の時間変化をプログラム可能な蒸気発生システムの構築を目指した。プロジェクト終了時点でシステムはほぼ完成に近づいており、今後フォローアップとして別研究課題で、実際に吸着力が異なる複数の有機溶剤を様々な濃度パターンで変化させたときのパッシブサンプラーの効率評価を実施する予定である。

### (b-2): ポンプ/サンプラー装着の人間工学的評価

労働者の負担軽減については、もっとも力を入れて検

討した。サンプラー・ポンプの装着時の負担については、様々な形状の模擬ポンプを装着した被験者に、我々が現場で得た作業時の典型的な体の動きを行ってもらい、ポンプの形状・装着方法などによる負担の違いを人間工学的な研究手法で評価した。この結果はすでに、「個人ばく露測定用ポンプの装着位置および形状と作業のしやすさ」<sup>2)</sup>として原著論文を発表した。この論文をもとにさらに論文発表後の知見などを加筆し、本 SRR に独立した報告書として掲載した。

### (b-3): 反応型パッシブサンプラーの評価

労働者の負担軽減については、小型・軽量なパッシブサンプラーの活用が重要である。ガス・蒸気用のサンプラーには吸着型と反応型があるがこのうち反応型サンプラーとして代表例として、アルデヒド、ケトンに反応する試薬 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) を用いるホルムアルデヒドサンプラーについて、ホルムアルデヒドより高濃度のアセトンが妨害物質となりうるかどうかを、化学反応速度を精密に測定する事により評価した。また、DNPH サンプラーをアセトンサンプラーとして使用可能かどうかも評価した。これらの結果は、英文原著論文<sup>3)</sup>として発表した。この内容に基づき、「誘導体化反応により有害物質を捕集するパッシブサンプラーの共存物質による問題点と複数物質同時測定の可能性評価方法の検討」として独立した報告書にまとめた。

### (c-1)および(b-4): フィルターの捕集効率と圧力損失の評価

粉じんの質量分析に標準的に用いられているポリ 4 フッ化エチレン (PTFE) バインダーガラス繊維ろ紙について、個人サンプラーに装着して使用した際の粒子の捕集効率と圧力損失を評価した。その結果、すべてのフィルターが作業環境測定基準<sup>4)</sup>で定められている 0.3 $\mu$ m 粒子について 95%以上の捕集率であった。一方、より小さなサイズの粒子に対する捕集率を測定した結果、いずれのフィルターも粒径 0.1 $\mu$ m において捕集率が最低となり、捕集率が 95%以下になるフィルターもあることが判明した。その結果は「個人サンプラー-NWPS-254 に用いるフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルターの粒子捕集効率」<sup>5)</sup>として原著論文を発表した。この論文をもとにさらに論文発表後の知見などを加筆し、本 SRR に独立した報告書として掲載した。粒径別の捕集効率のデータと、圧力損失のデータを得た事により、測定対象物質の粒径分布に応じた最適な捕集効率のフィルターを選択し、ポンプの軽量化(b)や短時間サンプリング(c)を行う事が可能となる。

### (c-2): 酸分解・粒子溶液化プロセスを経た試料の定量下限の評価

金属類の多くは、労働環境中で難溶解性粒子状物質として存在する。水溶液試料を対象として原子吸光・誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP-AES)、誘導結合プラ

ズマ質量分析(ICP-MS)でこれらの試料を分析するために、強酸や強酸+酸化剤などを使用して分解・溶体化する<sup>6-8)</sup>個人ばく露測定用の各種マニュアルに従ってこれらの前処理を行って得られる最終試料溶液の酸濃度は必ずしもICP-AESやICP-MSにとって装置の最高性能を得られる分析条件とはならない。そこで、実際に標準的な前処理法を想定した酸濃度の溶液を用いてICP-AESやICP-MSの定量下限を求め、個人サンプラーで捕集した金属類の気中粒子に対する分析方法の性能を評価した。このデータは、現実にサンプリングする際の捕集時間などを見積もる際の参考となる。この結果については、「個人サンプラーを利用した、労働環境空気中の低濃度の金属測定・分析に関する検討」として独立した報告書として本SRRに掲載した。

### (c-3)：模擬生体溶液への粒子状金属類の溶解評価システムの構築

化学物質ばく露によるリスク評価を精密に実施するためには、単に労働者の周りの化学物質濃度を知るだけでなく、その化学物質が労働者の体内にどれくらい入りやすい化学状態にあるかという情報も重要となる。そこで、金属類を対象とし、汗、肺胞液等の各種生体溶液に対する溶解特性(不溶、コロイド粒子として存在、イオンとして完全溶解)を評価するシステムの構築を目指した。その最初の組み合わせとして、化学種が多種類存在するマンガン化合物と模擬の汗溶液を選択し、溶解特性評価システムを構築した。この結果はすでに、「模擬汗へのマンガン化合物溶解評価－誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)および誘導結合プラズマ発光分析法(ICP-AES)による模擬汗中のマンガンの定量」<sup>9)</sup>として原著論文としてまとめ、投稿し受理されて2020年の秋に刊行予定である。この内容を元に独立した報告書をまとめ本SRRに掲載した。

## 3 今後の課題・研究の活用

本研究の成果については、今後個人ばく露測定に関する技術情報集のような形で公開し、測定の実務者に活用していただきたいと考えている。本プロジェクト研究実施中に法定の作業環境測定に「個人サンプラー測定」が導入された<sup>10-11)</sup>。個人サンプラー測定と個人ばく露測定は異なる方法ではあるが、本研究で得た各種の知見は活用可能であると考えられる。実際に本プロジェクト研究メンバーの一人は、作業環境測定における個人サンプラー測定の方法の細部を決める各種の委員会に参画しており、本プロジェクト研究で得た知見を各種のマニュアルなどに反映させてゆければと考えている。このほか、すでに

我々自身が実施した各種の現場調査、一例を挙げればトンネル切羽付近での粉じん濃度測定等におけるサンプラーの装着、フィルターの選択などに本プロジェクト研究で得た知見を活用している。

多分散エアロゾル発生システムの活用、吸着型パッシブサンプラーに関する評価、生体溶液への粒子状金属類溶解システムなど本プロジェクト研究の期間内では研究が完了しなかった課題も多く、今後も他のプロジェクト、研究課題においてフォローアップを行い、研究成果を充実させる必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 厚生労働省 HP  
[anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anken/kag/ankgc07.htm](https://www.mhlw.go.jp/user/anken/kag/ankgc07.htm)
- 2) 岩切一幸, 鷹屋光俊, 山田 丸, 加藤伸之, 外山みどり, 小山冬樹 (2019) 個人ばく露測定用ポンプの装着位置および形状と作業のしやすさ。作業環境, Vol.40, No.1, pp.37-47.
- 3) Naoko Inoue, Mitsutoshi Takaya (2019) Reactivity and relative reaction rates of formaldehyde, acetaldehyde, and acetone coexisting with large quantities of acetone on 2,4-dinitrophenylhydrazine-impregnated filters. Analytical Methods, Vol.11, No.21, pp.2785-2789.
- 4) 厚生労働省:「作業環境測定基準」昭和51年労働省告示第46号, 最終改正令和2年厚生労働省告示第18号
- 5) 山田 丸, 鷹屋光俊 (2019) 個人サンプラーNWPS-254に用いるフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルターの粒子捕集効率, 労働安全衛生研究, Vol.12.No.2, pp.107-112.
- 6) 日本作業環境測定協会: 作業環境ガイドブック 4 金属類
- 7) National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH):NIOSH manual of Analytical method 7302, Elements by ICP(Microwave Digestion)  
<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2014-151/pdfs/methods/7302.pdf>
- 8) National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH):NIOSH manual of Analytical method 7600,Chromium,Hexavalent  
<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2014-151/pdfs/methods/7600.pdf>
- 9) 韓書平, 鷹屋光俊 (2020) 模擬汗へのマンガン化合物溶解評価－誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)および誘導結合プラズマ発光分析法(ICP-AES)による模擬汗中のマンガンの定量－,労働安全衛生研究 (投稿受理済)
- 10) 厚生労働省 作業環境測定法施行規則の一部を改正する省令 (令和2年1月27日厚生労働省令第8号)
- 11) 厚生労働省 作業環境測定基準等の一部を改正する告示 (令和2年1月27日厚生労働省告示第18号)

研究業績リスト

課題名：化学物質のばく露評価への個人ばく露測定の実用に関する研究

平成 28 年度 (2016 年)		
1	国内学術集会	萩原正義, 菅野誠一郎 (2016) 加熱脱着用捕集管を用いた混合有機溶剤蒸気の拡散捕集速度に関する検討, 第 56 回日本労働衛生工学会抄録集, pp.22-23.
平成 29 年度 (2017 年)		
1	国内学術集会	井上直子, 鷹屋光俊 (2017) DNPH パッシブサンプラー捕集を想定したアセトン共存下でのホルムアルデヒドの分析評価. 日本分析化学会第 66 年会, 日本分析化学会第 66 年会講演要旨集, p. 390.
平成 30 年度 (2018 年)		
1	原著論文	岩切一幸, 鷹屋光俊, 山田 丸, 加藤伸之, 外山みどり, 小山冬樹 (2019) 個人ばく露測定用ポンプの装着位置および形状と作業のしやすさ. 作業環境, Vol.40, No.1, pp.37-47.
2	特別講演, パネルディスカッション	鷹屋光俊, 高島強, 広瀬隆穂, 保利一, 山室堅治, 西田和史(2018)個人サンプラーを用いた作業環境をめぐって—今後の展開— 第 58 回日本労働衛生工学会, 第 39 回作業環境測定研究発表会共同シンポジウム第 2 部 (パネルディスカッション)
3	国内学術集会	井上直子, 鷹屋光俊 (2018) アセトン共存下における DNPH 含有フィルター上でのホルムアルデヒドの反応性. 日本農芸化学会 2018 年度大会, Annual Meeting of the Japan Society for Biosciences, Biotechnology, and Agrochemistry, 2018 大会講演要旨集 (web), p.438
4	国内学術集会	井上直子, 鷹屋光俊 (2018) アセトン共存下を想定した DNPH パッシブサンプラーによるホルムアルデヒド測定への影響. 第 91 回日本産業衛生学会, 第 91 回日本産業衛生学会講演集, Vol.60, No.臨時増刊号, p.415.
5	国内学術集会	井上直子, 鷹屋光俊 (2018) DNPH パッシブサンプラー捕集を想定したアセトン共存下でのホルムアルデヒドの分析評価 2. 日本分析化学会第 67 年会, 日本分析化学会第 67 年会講演要旨集, p.384.
6	国内学術集会	井上直子, 鷹屋光俊 (2018) 高濃度のアセトン共存下を想定した DNPH パッシブサンプラーによるホルムアルデヒド分析への影響. 第 58 回日本労働衛生工学会抄録集, pp.104-105
7	国内学術集会	岩切一幸, 鷹屋光俊, 山田 丸, 加藤伸之, 外山みどり, 小山冬樹 (2018) 個人ばく露測定用ポンプの形状および装着位置と作業のしやすさ. 日本人間工学会第 59 回大会プログラム 2H3-1
8	国内学術集会	山田 丸, 鷹屋光俊 (2018) 個人サンプラーに用いる粉じん捕集フィルターの粒子捕集効率評価. 第 58 回日本労働衛生工学会抄録集, pp.124-125
9	国内学術集会	加藤伸之, 小嶋純, 鷹屋光俊(2018)含有する金属元素に着目した作業環境における溶接ヒュームのばく露測定に関する研究. 第 58 回労働衛生工学会抄録, pp.102-103
令和元年度 (2019 年)		
1	原著論文	Naoko Inoue, Mitsutoshi Takaya (2019) Reactivity and relative reaction rates of formaldehyde, acetaldehyde, and acetone coexisting with large quantities of acetone on 2,4-dinitrophenylhydrazine-impregnated filters. Analytical Methods, Vol.11, No.21, pp.2785-2789
2	原著論文	山田 丸, 鷹屋光俊 (2019) 個人サンプラーNWPS-254 に用いるフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルターの粒子捕集効率, 労働安全衛生研究, Vol.12.No.2, pp.107-112
3	総説論文	鷹屋光俊 (2019) 労働環境中の粒子状物質評価に使用する個人サンプラーについて.エアロゾル研究, Vol. 34, No. 3, 153-158
4	特別講演, パネルディスカッション	Mitsutoshi Takaya (2019) Risk Assessment of Exposure to Nanomaterial Dusts in Workplace, Environment Measurement and Personal Exposure Measurement. Keynote 6 “Assessment of Nano Particles & PM 2.5 Exposure”,

		Asian Network of Occupational Hygiene Conference (ANOHC) 2019, Bangkok.
5	特別講演, パネルディスカッション	鷹屋光俊, 安井省侍郎, 保利一, 齋藤誠, 奥田篤史, 宮田昌浩(2019)個人サンプラーを用いる測定をめぐって 第59回日本労働衛生工学会, 第40回作業環境測定研究発表会共同シンポジウム第2部(パネルディスカッション)
6	国際学術集会	Naoko Inoue, Mitsutoshi Takaya (2019) A simple test to check relative reactivity of formaldehyde, acetaldehyde, and acetone on 2,4-dinitrophenylhydrazine impregnated filters. The 49th International Symposium on High Performance Liquid Phase Separations and Related Techniques, HPLC 2019 Kyoto.
7	国内学術集会	加藤伸之, 山田丸, 小嶋純, 鷹屋光俊(2019)SEM-EDSを利用した有害金属を含有する溶接ヒュームの個別測定に関する研究, 日本顕微鏡学会第75回学術講演会, 発表要旨集, Vol. 54 (Suppl), p.193.
8	国内学術集会	山田丸, 鷹屋光俊 (2019) 粉じん個人ばく露測定に用いるフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタ5種類の性能試験. 第92回日本産業衛生学会, 産業衛生学雑誌, Vol. 61(Suppl), p.446.
9	国内学術集会	井上直子, 鷹屋光俊 (2019) DNPHパッシブサンプラー用フィルター上での, 高濃度アセトン共存下におけるホルムアルデヒド及びアセトンの相対反応速度. 日本分析化学会第68年会, 日本分析化学会第68年会講演要旨集, p.637.
10	国内学術集会	韓書平, 鷹屋光俊 (2019)誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)および誘導結合プラズマ発光分析法(ICP-AES)による模擬汗中のマンガンおよびその化合物の測定, 第68回日本分析化学学会, 講演要旨集, pp.623
11	国内学術集会	韓書平, 鷹屋光俊 (2019) マンガンの経皮ばく露評価のための模擬汗への溶解実験. 第59回日本労働衛生工学会抄録集, pp60-61
12	報告書	中央労働災害防止協会編(2020)平成31年度個人サンプラー測定基盤整備事業実施結果報告書(鷹屋光俊が委員として参画)
<b>令和2年度(2020年) (研究期間終了後の成果の普及・公表)</b>		
1	原著論文	韓書平, 鷹屋光俊 (2020) 模擬汗へのマンガン化合物溶解評価—誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)および誘導結合プラズマ発光分析法(ICP-AES)による模擬汗中のマンガンの定量—, 労働安全衛生研究, vol. 13, 2 pp. 117-124
2	著書	日本作業環境測定協会編 デザイン・サンプリングの実務(個人サンプリングによる測定)(分担執筆)第VI章 サンプリング機器の取り扱いについて
3	国内学術集会	井上直子, 鷹屋光俊 (2020) DNPH サンプラーによるホルムアルデヒド以外の化合物測定の可否の簡易確認方法. 第93回日本産業衛生学会, 第93回日本産業衛生学会講演集, p.611
4	国内学術集会	韓書平, 鷹屋光俊 (2020) 溶接作業に伴う経皮ばく露評価についての検討, 第93回日本産業衛生学会, 講演要旨集, p.422