

令和 5 年度厚生労働行政推進調査事業費補助金
(循環器疾患・糖尿病等生活習慣病対策総合研究事業)
分担研究報告書

紙巻きたばこの加熱式喫煙における主流煙中の水銀に関する研究

分担研究者 杉田 和俊 麻布大学獣医学部

分担研究者 稲葉 洋平 国立保健医療科学院

研究要旨

近年、加熱式たばこは若い世代を中心に使用され、JT 等の専用加熱式たばこの他に、紙巻たばこを加熱して喫煙するデバイスも販売されており、喫煙形態が大きく変化している。また、加熱式たばこは販売されてから 10 年程度の歴史しかないことに加え、フレーバー等の蒸気を加えたものなど多様な形態があり、人への健康影響が不明な点も多い。そこで、本研究では、たばこに含まれる水銀等の金属の挙動に関する研究の一環として、加熱式として喫煙できる喫煙デバイスで標準たばこ(3R4F Research cigarettes, University of Kentucky)を電気炉で加熱し発生する水銀の測定、及び静電捕集によるその他の重金属と水銀の同時捕集を検討した。

その結果、水銀は 100℃以上で温度の上昇に従って発生量が増加することが分かった。また、デバイス(加熱装置)の温度制御の劣化による発生量のばらつきが示唆された。静電捕集を用いた金属と水銀の同時測定では水銀の捕集は静電捕集装置に影響されないことが分かった。また、静電捕集された金属類は通常の紙巻きたばことして発生する量よりも加熱式喫煙の方が低いことが分かった。しかし、静電捕集を用いた同時捕集については、測定精度を向上させ、測定できる元素数を増やす必要がある。

A. 研究目的

健康増進法が 2020 年 4 月に改定され、受動喫煙対策が強化された結果として、たばこ葉を燃焼させない加熱式たばこが 20～30 歳代の若年層を中心に広がっている。加熱式たばこは、2013 年以降に日本国内での販売が開始され、約 10 年以上が経過し、すでに喫煙者において 20% を超えるシェアを占めている。直接たばこ葉を加熱するタイプや加熱した液体をたばこ葉に通過させるなど、いくつかの喫煙方式がある。近年では、紙巻たばこを加熱式として喫煙できるデバイスも販売されており、喫煙方法がさらに多様化している。他方、水銀は、日本では水俣病に代表される有機水銀汚染、世界では金鉱山や金属製錬などに伴う無機水銀汚染などが

報告されており、世界各国では未だに代表的な環境汚染物質となっている。たばこ葉には様々な重金属が含まれていることが報告されており、主流煙中でも同様の金属類が検出され、人への暴露影響が懸念されている。本研究班でも静電捕集を行い、酸分解処理、ICP-MS による 12 元素の測定が検討されている。しかし、比較的毒性も高く検出率も高い水銀については捕集方法が異なることから同時測定が行われていなかった。

そこで、今年度は主流煙中の水銀について主流煙への移行に関する要因の検討として、温度依存性について検討した。また主流煙中の有害金属の曝露評価を目的として、重金属と水銀の同時測定について検討した。

B. 研究方法

1. 使用たばこと試験機（デバイス）

試験には標準たばこ（3R4F）及びデバイスとしてサーマロックを用いた。

2. 水銀の主流煙への移行に関する温度依存

ガラス管（外径 16mm, 内径 14mm）を中心にパイプ用マントルヒーター（東京硝子器株式会社製）を筒状に丸めた加熱装置を作成した。たばこ葉 0.5g はガラス管（外径 10mm, 内径 8mm）に充填した。加熱装置のガラス管内にたばこ葉を充填したガラス管を入れ、硫酸酸性過マンガン酸カリウム溶液の入ったインピンジャーを直列で 2 本繋げ、ミニポンプ（Σ 30, 柴田科学社製）を用いて毎分 0.2L で 5L 吸引した。ガラス管は 50℃, 100℃, 150℃, 200℃及び 250℃に加熱した。捕集後は既報にしたがって、ホットプレート上で硫酸酸性過マンガン酸カリウム溶液を加え、有機物を分解し、還元気化吸光光度法で水銀を測定した。水銀の吸光度測定は Mercury Analyzer HG400 (平沼産業株式会社) を用いた。水銀の定量には水銀の吸光度測定は Mercury Analyzer HG400 (平沼産業株式会社) を用いた。水銀の定量には水銀標準試薬(Hg 100, 富士フィルム和光純薬株式会社)を適宜希釈して用いた。

3. 主流煙中重金属及び水銀の同時捕集

たばこ主流煙中重金属及び水銀の捕集は自動喫煙装置（LX20, BORGWALD KC 製）に静電捕集装置（High Voltage Generator HV1, BORGWALD KC 製）を設置し、その後に硫酸酸性過マンガン酸カリウム吸収液の入ったインピンジャー2 本を取り付けて行った。喫煙法は、ヒトの喫煙行動に類似したカナダ保健省が推奨する HCI 法（吸引量 55mL/回）とした。HCI 法では、フィルター部分の通気孔をテープで完全に塞いで捕集を行った。金属類

の捕集には自動喫煙装置に接続した静電捕集装置を用い約 17.5 kV を維持しガラス管の表面にタールや粒子を捕集した。さらに、静電捕集装置の後に硫酸酸性過マンガン酸カリウム（試薬特級 富士フィルム 和光純薬株式会社）水溶液を吸収液としたインピンジャー2 本で水銀を捕集した。試料はガラス管 1 本あたりたばこ主流煙 5 本分を捕集し 1 試料とし、3 回の測定を実施した。

4. たばこ主流煙中重金属及び水銀の分析

たばこ主流煙の金属類の分析は、捕集後のガラス管をメタノール（LC/MS 用, 和光純薬工業）約 20mL を樹脂製のバイアルに洗い込み、窒素気流下でメタノールを除去した。これを少量の硝酸（関東化学）でテフロン製の分解容器に洗い込みマイクロウェーブで分解した。洗い込み及び追加の硝酸は合計で *mL とした。分解後、分解容器からミリ Q 水でバイアルに洗い込み 15mL に定容し、ICP-MS 測定用試料とした。ICP-MS 測定出は混合標準液を 0.1, 1, 10, 100, 1000ng/mL の濃度に酸濃度を試料溶液と合わせた硝酸水溶液で希釈し、検量線を作成し定量した。

水銀を捕集したインピンジャーは上部をはずし、ミリ Q 水で吸収液を吸収液の入った容器に洗い込み、ホットプレート上で加熱処理した。硫酸酸性過マンガン酸カリウム溶液を加えながら加熱分解した。水銀測定の直前に 10%塩化ヒドロキシルアンモニウム水溶液（試薬特級 富士フィルム和光純薬工業）を添加し、残った過マンガン酸カリウム溶液を還元し（紫色を脱色）、速やかに水銀を測定した。

C. 研究成果

1. 加熱温度による水銀の発生量

昨年度の紙巻きたばこの加熱式喫煙による主流煙中の水銀含有量の測定では試料ごとの

計測値に大きなばらつきが認められ、加熱部の温度も一定していなかった。そこで、本年度は加熱用のデバイスを使わずに、パイプ用マントルヒータを用いて、加熱温度を一定しにして水銀の発生量を測定した。その結果を Fig.1 に示す。50～100℃では $2.2 \pm 0.26 \text{ ng/g}$ であり、加熱せずに気化すると考えられる。100℃以上で発生量が上昇し、250℃では 23 ng/g でほぼ頭打ち状態に達した。過去のデータから標準たばこ中の水銀含有量はおよそ 15 ng/g であることから、当該試験条件ではほぼ全ての水銀が放出されたと考えられる。

2. 水銀と金属類の同時捕集に関する検討

水銀とその他の重金属の同時捕集を検討した。水銀のインピンジャー捕集の前に重金属の捕集として静電捕集法を行った。既報にしたがって、捕集後、ガラス管の表面に付着したタール及び粒子をメタノールで回収した。作業の簡略化のため、回収したメタノールを窒素気流下で揮発乾固させ、硝酸を用いて分解容器に洗い込んだ。洗い込みも含め硝酸 8 mL を分解容器にいれ、マイクロウェーブ分解した。分解後、ミリ Q 水で樹脂製の 50 mL チューブに洗い込み、 25 mL に定容し、ICP-MS で測定した。

まず、同時測定における主流煙中の水銀濃度の結果は、 2.7 ng/cig 及び 4.6 ng/cig であった。昨年度の水銀のみの捕集では 2.2 ng/cig 及び 3.0 ng/cig でありほぼ同等の結果が得られた。本検討では測定対象化合物は変動が大きかったことを考慮し、Be, Cr, Mn, As, 及び Cd の 5 元素を対象元素とした。その結果を Table 1 に示す。先行研究で報告されていた 3R4F の紙巻きたばことしての主流煙中濃度を比べると Cr で 1/5, Mn 及び As では同等以下、Cd では 1/3 程度低い含有量であった。

D. 考察

本研究結果から、主流煙中の水銀濃度は 100°C 以上で温度比例し増加することが分かった。昨年度の実際の加熱デバイスを用いた測定では、大きなばらつきや低温度設定の方で高濃度の水銀が観察されたが、本試験結果からデバイスの温度調節の精度の起因することが推定された。特に水銀に関しては加熱温度により大きく発生量が変化することが予想される。

水銀と他の金属の同時捕集の結果を Table 1 に示す。水銀の捕集については静電捕集装置の影響はほとんどなしと考えられた。昨年度の稲葉らにより報告された紙巻たばことしての主流煙中濃度と比較すると Cr で 1/5, Mn 及び As ではほぼ同等、Cd では 1/3 と全体的に加熱式喫煙が主流煙では同等以下の低い濃度となった。

E. 結論

電気炉を用いた水銀の発生量試験では 100°C 以上で温度に比例し増加することが分かった。また、紙巻たばこの加熱式装置では加熱温度の高低差は認められなかった。

静電捕集による水銀と他の金属の同時捕集を検討した結果、水銀では水銀捕集の前に配置した静電捕集の影響はないことが分かった。測定できた 5 元素で紙巻きたばことしての主流煙中濃度を比較したところ、元素により差があるものの加熱式喫煙では通常の喫煙よりも主流煙中の含有量は低くなることが分かった。

F. 健康危険情報

G. 研究発表

1. 論文発表

Kei Kazama, Kazutoshi Sugita, and Ken Onda, Trace element concentrations in blood samples from dairy cows with uterine torsion and their neonatal calves. *Veterinary World*, 16(12): 2533–2537 (2023).

2. 学会発表

1. 杉田和俊, 稲葉洋平, P-112 土紙巻きたばこの加熱式喫煙における水銀の主流煙への移行率. 第31回 環境化学討論会 (2023).

2. 竹本好, 杉田和俊, 遠藤治, P150 土壌の塩素処理における変異原性物質の推定. 第31回 環境化学討論会 (2023).

3. 林原茜, 杉田和俊, P-137 イヌにおける歯石沈着の程度と口腔ガス中 VSC 濃度の関係. 第31回 環境化学討論会 (2023).

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
特になし

Fig. 1 The relationship between mercury emission and heated temperature

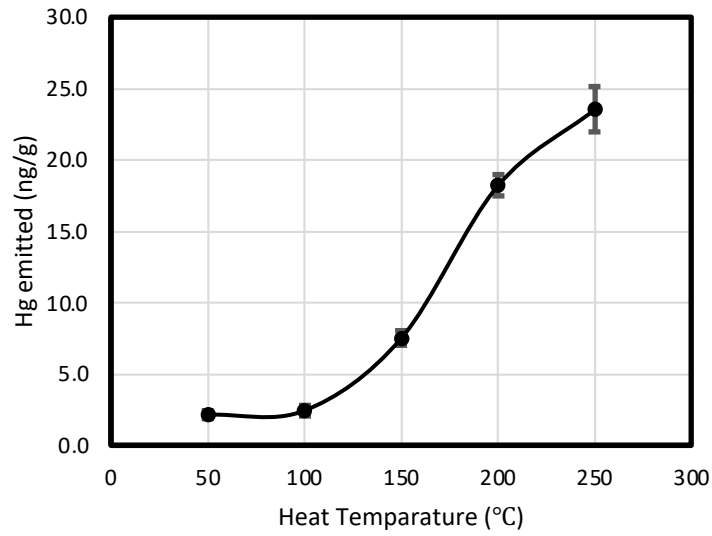


Table 1 Heavy metals concentration in the mainstream smoke from heated tobacco smoking with standard cigarette (3R4F)

	Mainstream (ng/cig) 3R4F	Tobacco leaf (ng/cig) 3R4F*	Ratio (Mainstream/Tobacco Leaf)	Mainstream (ng/cig) 3R4F**
Be	< 0.5	10 ± 2	-	<0.01
Cr	2.0 ± 1.2	1,110 ± 10	0.0018	11.4 ± 2.52
Mn	3.1 ± 1.3	127,000 ± 9,280	0.000024	4.51 ± 2.11
As	4.0 ± 0.6	220 ± 30	0.018	6.94 ± 0.46
Cd	31.7 ± 5.7	820 ± 40	0.039	103 ± 3.50
Hg	2.2~4.6	11.4 ± 0.62	11.4 ± 0.62	2.2~4.6

* : Inaba et al. 2023

** : 紙巻たばことして主流煙中含有量, Inaba et al. 2023