

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)  
総合研究報告書 (2021-2023)

紙巻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

研究代表者 稲葉 洋平 国立保健医療科学院  
分担研究者 杉田 和俊 麻布大学獣医学部

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°C 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。

そこで、本研究ではたばこ葉及び主流煙に含まれる水銀を測定し、たばこやデバイス(加熱装置)の比較を行うと共に移行率を求めた。最終年度では、水銀の捕集とその他の金属の同時捕集について検討した。

B. 研究方法

1. 使用たばこと試験機 (デバイス)

市販のたばこについて国内で販売されてい

る日本たばこ株式会社とフィリップモリスジャパンの加熱式たばこのうちそれぞれ 14 銘柄と 16 銘柄、及び標準たばこ（3R4F）を用いた。試用した加熱デバイスは 7 種類とした。7 種類のうち 6 種類で温度調節が可能であり、4 種類がたばこを挿入する挿入方式、3 種類がたばこ葉を充填する充填方式であった。

## 2. 主流煙中水銀の捕集及び測定

主流煙中の水銀は、水銀マニュアル（環境省）に若干変更を加え、0.6%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）水溶液と硫酸水溶液（有害金属測定用 富士フィルム和光純薬工業株式会社）

（1+15）を等量今後したもの吸収液とした。この吸収液 15ml をインピンジャー1 本に入れ、HCl モード Health Canada Intense TC-115) による機械式喫煙モードにより発生したたばこ 5 本分の主流煙を捕集した。捕集後、ホットプレート上で過マンガン酸カリウム溶（吸収液と同じもの）を加えながら、過マンガン酸カリウムの紫色が消えなくなるまで加熱分解した。水銀測定の直前に 10%ヒドロキシルアミン塩酸塩（試薬特級 和光純薬工業）溶液を添加し、過マンガン酸カリウム溶液の紫色を脱色し、20mL に定容し、全量を水銀測定試料とした。

たばこ葉中の水銀は水銀マニュアル(環境省)に若干変更を加え、肉厚のメスフラスコ（50mL）に試料約 0.5g を計り取り、水 1mL、硝酸（電子工業用 含有率 61% 関東化学株式会社）- 過塩素酸（有害金属測定用特級試薬 60% ナカライテスク株式会社）を等量混合したもの 4mL 及び硫酸（有害金属測定用 富士フィルム和光純薬工業株式会社）5mL を加え、ホットプレート上で1時間の加熱分解を行った。冷却後、水を加え 50mL に定容し、水銀測定用試料とした。

水銀測定は、水銀測定用試料 20mL をガラス製測定容器に入れ、硫酸（富士フィルム和光純薬株式会社、有害金属測定用）（1+1） 1mL 及び 10%塩化すず（塩化すず(II)二水和物、富士フィルム和光純薬株式会社、有害金属測定用）水溶液 1mL を添加し、発生した水銀蒸気を空気中でセルに導き吸光度を測定した。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及び測定

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 HCl 法（吸引量 55mL/回）とした。HCl 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 の電圧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。

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）で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、ICP-MS 測定

用試料とした。ICP-MS 測定では混合標準液を 0.1, 1, 10, 100, 1000 ng/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。

## C. 研究成果

### 1. 加熱式たばこのたばこ葉及び主流煙に含まれる水銀含有量

加熱式たばこは、加熱温度がデバイスにより異なっているのが大きな特徴である。JT では 40°C および 295°C, PM では 350°C と加熱温度が公開されていないデバイスがあった。測定結果は、たばこ葉中の水銀含有量は 1 本当たり平均 3.4ng, 主流煙では 1 本当たり平均 0.71ng であり、移行率は平均で 22% となった。JT では低温加熱のデバイスがあり、この主流煙中水銀含有量は 1 本当たり平均 0.13ng と他の約 1/5 程度で有意な差が認められた。PM のたばこ葉中の水銀含有量は平均で 3.8ng, 主流煙中水銀含有量では、1 本当たり平均 1.8ng と JT の主流煙中水銀含有量の約 2 倍であった。

両者の比較を Fig.1 に示す。たばこ葉中水銀含有量, 主流煙中水銀含有量および移行率で有意差を確認したところ、たばこ葉中水銀含有量では有意差は認められないものの、主流煙中水銀含有量および移行率において有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められた。

水銀のたばこ葉から主流煙への移行について JT では加熱温度が 40°C, 200°C 及び 240°C 以上であり、加熱温度間で移行値率に差が認められ、加熱温度が高いほど移行率が高い傾向が認められた。PM では葉から主流煙への移行率は銘柄に関係なく 40% 程度であった。以上の結果から、葉から主流煙への移行については温度が要因となっていることが示唆された。

### 2. 紙巻たばこの加熱式喫煙による主流煙中の水銀含有量

標準たばこ (3R4F) の水銀含有量は平均で  $15.4 \pm 0.84$  ng/g, 1 本あたりの水銀含有量は  $11.4 \pm 0.62$  ng であった。この標準たばこを用いて各喫煙デバイスで加熱し、HCl による喫煙方法で得られた主流煙中の水銀含有量を測定した。その結果を Fig. 2 に示す。喫煙デバイスのうち温度調節ができるもの 6 種類については、加熱温度の設定は最低温度と最高温度に設定し、試料採取時に加熱部の温度を測定した。加熱デバイスによっては温度計が挿入できないものもあり、その場合は試料採取とは別に加熱温度を測定した。Table 1 に温度設定と実測温度を記載した。また、試料 A, B, C, D は紙巻たばこを加熱デバイスにそのまま挿入する方式 (挿入方式) であり、試料 E, F, G はたばこ葉 0.2 g を加熱デバイス内に充填する方式 (充填方式) であった。

まず、たばこ 1 本あたりの主流煙中水銀量の全平均は  $2.6 \pm 1.4$  ng, 最低が 0.7ng, 最高 5.3ng で、低温と高温の比率 (L/H) を条件間で比較したところ、予想に反し低温条件下で主流煙中水銀が多く含まれていた。しかし、試験時の加熱温度は低温時も高温時も 40°C 以上の大きな差は認められなかった。40°C を超える差は充填方式 2 種類認められ、その 2 種類では高温加熱で主流煙中水銀濃度は高いことが認められた。

そこで、温度条件による主流煙への移行を検証するため、一定流量で吸引し、発生した水銀量を測定した結果を Fig. 3 に示す。その結果、50~100°C では  $2.2 \pm 0.26$  ng/g とほぼ一定の水銀が発生し、100°C 以上で温度が上昇するに従って、水銀の発生量の上昇が認められ、250°C では 23ng/g でほぼ頭打ち状態に達した。

### 3. 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。メタノールで回収したタール状の試料を揮発乾固させ、硝酸

を用いて分解容器に洗い込み、マイクロウェーブ分解した。分解後、定容し、ICP-MSで測定した。測定対象化合物は変動等が少なかった、Be, Cr, Mn, As 及び Cd の 5 元素とした。その結果を Table 3 に示す。まず、同時測定における主流煙中の水銀濃度は、2.7ng/cig 及び 4.6ng/cig で、昨年度の水銀のみ捕集した場合 (2.2 ng/cig 及び 3.0 ng/cig) と同程度であり、同時捕集による静電捕集による影響は認められなかった。

ICP-MS による主流煙中金属分析では、先行研究で報告されていた 3R4F の紙巻たばことしての主流煙中濃度を比べた。その結果を Table 2 に示す。その結果、Cr で 1/5, Mn 及び As では同等以下、Cd では 1/3 程度と加熱式喫煙で得られた主流煙で低い含有量であった。

#### D. 考察

本研究結果から、加熱式たばこのたばこ葉には 1 本当たり平均 3.3ng(0.6~6.8ng)の水銀が含まれており、紙巻たばこ(平均 13.6ng/cig)の約 1/4 であった。加熱式たばこのたばこ葉重量は約 0.25g であり、紙巻たばこ (たばこ葉重量約 0.6g) の約 40%になっていることが要因の 1 つであると考えられる。また、低温加熱式 (40°C) では移行率が 3%, 高温加熱式 (200~350°C) に比べると 1/10 以下でありデバイスの加熱温度が主流煙中の水銀濃度に大きく影響することが示唆された。

また、紙巻たばこの加熱式喫煙による主流煙中に含まれる水銀含有量は低温度条件で低いことが予想されたものの、低温度で高くなる事例も多く認められた。温度設定による温度差は小さく、40°C以上の差が認められた 2 つの条件下では低温よりも高温で高く、主流煙中の濃度差が認められた。そこで、温度と主流煙中の水銀量を検証した結果、100°C以上で温度の上昇に伴い比例的に水銀の発生量が増加した。このことから、水銀の発生については温度に比例し

て大きくなることが分かった。

次に、紙巻たばこを用いた加熱式喫煙の静電捕集による金属の捕集の検討では、水銀を捕集するインピンジャーの前段に静電捕集を配置することで、水銀とその他の金属の同時捕集することを目的とした。水銀捕集に対して静電捕集の影響はほとんど認められなかった。また、測定できた 5 元素の結果では、加熱式喫煙による場合では紙巻たばことして捕集された量と比較すると元素による違いが認められ、Cr では 1/5, Mn 及び As では同等以下、Cd では 1/3 程度と加熱式喫煙で得られた主流煙で低い含有量であった。

#### E. 結論

市販の加熱式たばこの葉に含まれる水銀は 1 本あたり 3~4 ng で、たばこ葉量の違いに起因するものであった。主流煙中の水銀含有量は 1 本あたり 1~2ng であり、デバイスによる加熱温度に比例して主流煙中の水銀含有量が高くなる傾向が示唆された。紙巻たばこの加熱式喫煙では、喫煙温度の制御が悪く、設定した燃焼温度では差は認められなかった。しかし、たばこ葉の加熱試験により 100°Cまでは一定の発生量で 100°Cを超えると温度に比例し発生量することから、温度が高いほど主流煙中の水銀含有量は高くなることが分かった。また、静電捕集は水銀捕集にはほとんど影響しないことが分かった。静電捕集による同時捕集では測定できた 5 元素では元素により燃焼式と同等か低い含有量であった。

#### F. 健康危険情報

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

Kazutoshi SUGITA, Hiroshi SATO, Sample Introduction Method in Gas Chromatography (Review), Anal. Sci. Vol.37. pp159-165, 2021.

Kazutoshi SUGITA, Junpei YAMAMOTO, Kimika KANESHIMA, Chika KITAOKA-SAITO, Masashi SEKIMOTO, Osamu ENDO, Yukihiro TAKAGI, Yuko KATO-YOSHINAGA, Acrylamide in dog food, Fundam. Toxicol. Sci. pp49-52, 2021.

Keisuke Sugimoto, Kazutoshi Sugita, Kensuke Orito and Yoko Fujii, S Repeated-Dose Pharmacodynamics of Pimobendan in Healthy Cats, Animals, 12, 981. <https://doi.org/10.3390/ani12080981>, 2022.

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

杉田和俊, 久保美千代, 中野佳彦, 福田健 犬被毛中水銀の汚染源の推定, 日本毒性学会 生体金属部会主催 メタルバイオサイエンス研究会 2021, 2021.

杉田和俊, 小林寛, 稲葉洋平, P-82 加熱式たばこの水銀含有量. 第 30 回 環境化学討論会, 2022.

杉田和俊, 稲葉洋平, P-112 土紙巻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.

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.

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

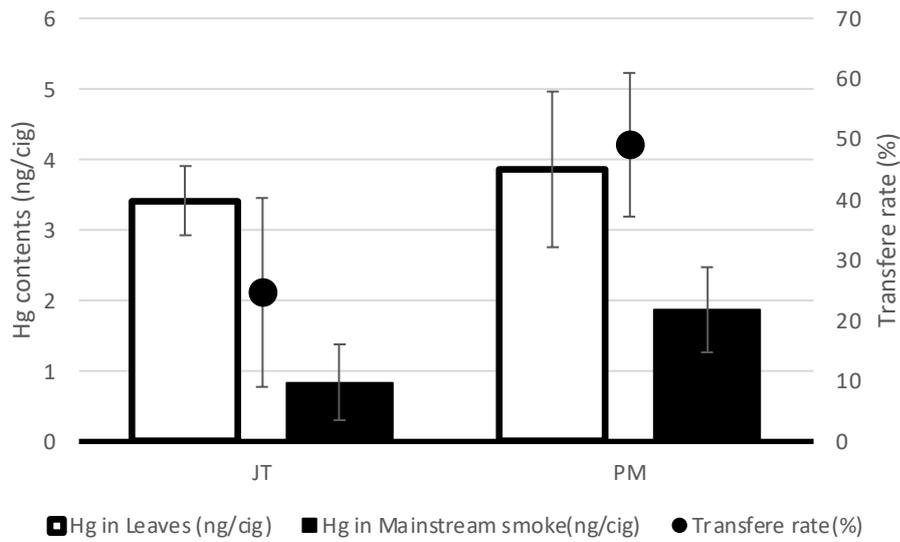


Fig.1 Comparison of mercury content and transfer rates of tobacco leaves and mainstream smoke in two companies

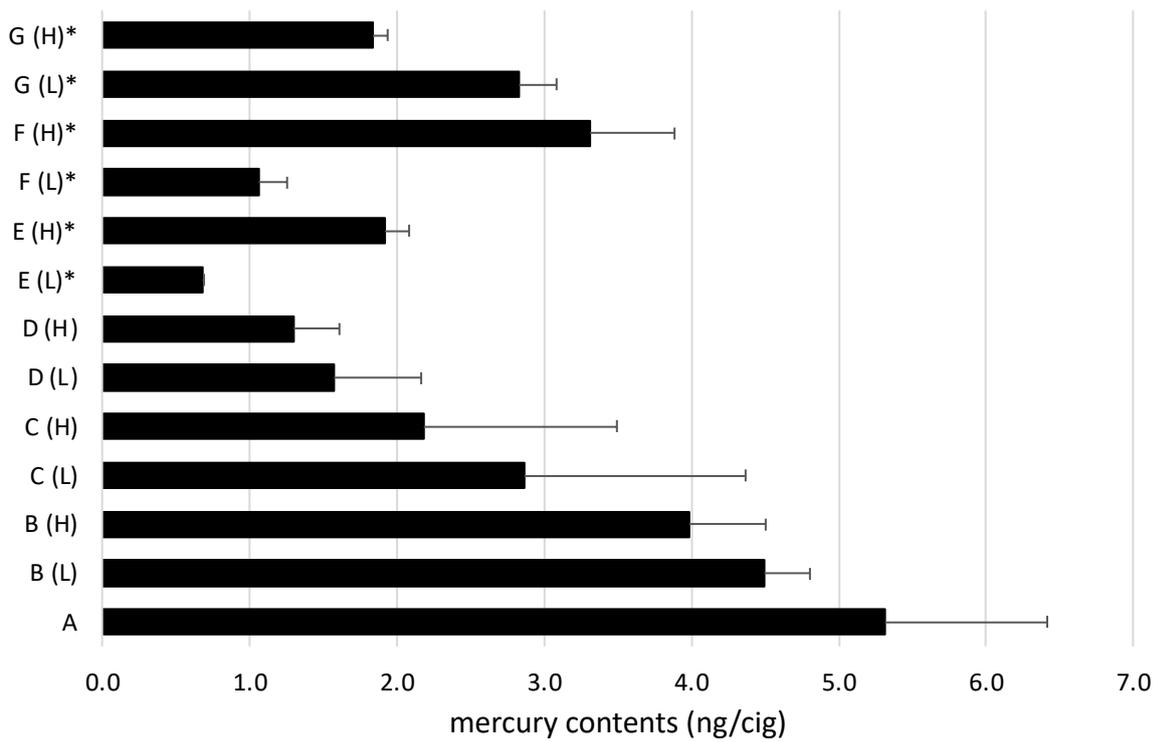


Fig. 2 mercury contents in mainstream smoke

Table 1 Mercury concentration in cigarette mainstream smoke

specimen	Filling type	Temp. setting	Measured temp.(°C)	Hg concentration (ng/cig)	SD (ng/cig)	RSD (%)	transfer rate (%)	Conc. Ratio L/H
A	1 peace	–	142	5.3	1.1	20.6	46.5	–
B	1 peace	L H	233 264	4.5 4.0	0.3 0.5	6.8 13.1	39.4 34.9	1.13
C	1 peace	L H	310 317	2.9 2.2	1.5 1.3	52.7 59.9	25.0 19.1	1.31
D	1 peace	L H	199 220	1.6 1.3	0.6 0.3	38.2 23.9	13.7 11.4	1.21
E	0.2g	L H	169 218	0.7 1.9	0.0 0.2	0.9 8.7	21.9 62.0	0.34
F	0.2g	L (160°C) H (240°C)	146 223	1.1 3.3	0.2 0.6	17.9 17.1	34.3 107.3	0.22
G	0.2g	L (199°C) H (216°C)	190 203	2.8 1.8	0.3 0.1	9.0 5.5	91.6 59.4	1.47

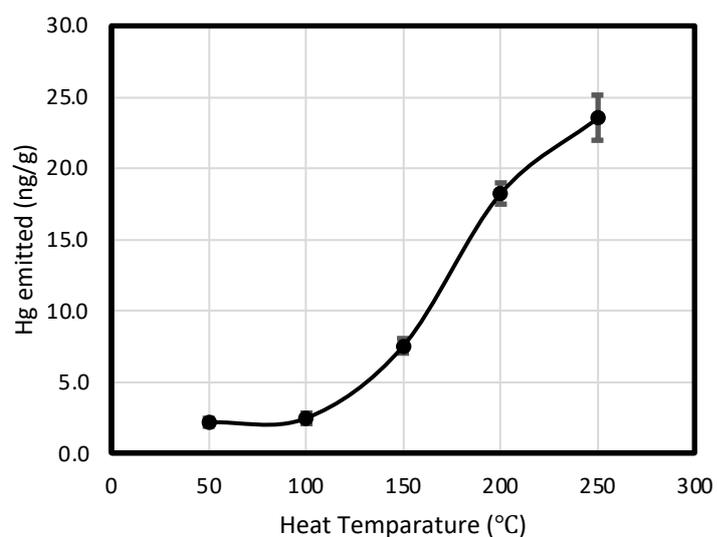


Fig. 3 The relationship between mercury emission and heated temperature

Table 2 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