

令和6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

加熱式たばこ主流煙中の金属類と水銀の同時測定

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

静電捕集と吸収捕集による一斉捕集による主流煙中の金属については、静電捕集による先行研究とほぼ同レベルで各金属の捕集が確認された。水銀については静電捕集では吸収捕集の10～40%の捕集率であり、静電捕集部ではほとんど捕集されていないと考えられた。吸収捕集部で捕集された水銀量は単独の吸収捕集よりも大きな値となり、喫煙装置によるばらつきと大きいと考えられた。以上の結果から、静電捕集と吸収捕集の連結は有効であり、金属は静電捕集部、水銀は吸収捕集部を測定することで評価できる測定結果が得られる可能性が示された。

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2014年にiQOS (Philip Morris International)が販売を開始、2016年にはPloom TECH (日本たばこ産業株式会社)及びglo (British American Tobacco p.l.c.)が販売され、まだ、10年程度の歴史しかないものの、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、喫煙方法は多様化している。

たばこ煙には多種類の有害成分が含まれており、その中でも金属類はたばこ葉に由来している。重金属の中にはIARC(IARC)による発がん性や発がん性が疑われる金属類も検出されており、ヒ素及び無機ヒ素化合物、ベリリウム、

カドミウム、六価クロム化合物はGroup1(人に対して発がん性がある)に、無機鉛化合物はGroup2A(おそらく発がん性がある)に分類されている。発がん性以外にも金属類は様々な健康障害の原因とされている。金属類の健康障害としては労働環境などでマンガンによる神経障害、水銀による神経障害や腎臓障害、カドミウムによる呼吸器系及び腎臓障害、クロムによる鼻中隔穿孔や呼吸器系の発がん、鉛による貧血や神経障害、砒素による皮膚がんや肺がん、ベリリウムによる皮膚や気管支の炎症などが報告されており、発がんなどの慢性障害も報告されている。以上のことからたばこ葉及びたばこ主流煙中の金属分析は喫煙者の健康影響を評価する上で重要であると考えられる。

加えて、水銀は常温で液体(流体)であり非常に揮発性に富んでいることから、他の金属とは大きく異なる性質もつ。水銀化合物は利尿剤、殺菌剤、消毒剤など医療や治療にも利用され、農薬としても利用された。さらに金属水銀は体温計や血圧計、気圧計、水銀等や蛍光灯など広

く利用されてきた。一方で、生体影響については、水俣病については有機水銀(主にメチル水銀)が原因とされ、無機水銀では蒸気を吸入することで肺腎炎の原因となり、中枢神経や腎臓に影響を与えることがある。以上のことから微量ではあるものの、長期曝露が考えられる喫煙者の健康影響を考える上では水銀分析も重要であると考えられる。

そこで、本研究では金属類と水銀の包括的な測定を行うことを目的として、金属類の静電捕集と水銀の硫酸酸性過マンガン酸カリウム吸収による捕集を組み合わせた同時測定を検討した。

B. 研究方法

1. 試薬類

水銀の捕集及び分解処理には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)、硫酸(有害金属測定用, 富士フィルム和光純薬株式会社)を用いた。水銀の測定には硫酸(有害金属測定用, 富士フィルム和光純薬株式会社)、塩化すず(II)二水和物(試薬特級, 富士フィルム和光純薬株式会社)及び塩化ヒドロキシルアンモニウム(試薬特級, 富士フィルム和光純薬株式会社)を用いた。その他の金属の捕集・前処理にはメタノール(LC/MS用, 和光純薬工業)及び硝酸1.38(電子工業用, 関東化学株式会社)を用いた。金属分析の標準溶液としてXSTC-13(31元素, 10 μ g/mL, SPEX社製)を、水銀の標準液として水銀標準液(100mg/L, 富士フィルム和光純薬株式会社製)を用い、適宜超純水で希釈し用いた。

2. たばこ葉と喫煙デバイス

試験にはTEREA(IQOS ILUMA及び互換機用)と標準たばこ3R4Fを用いた。加熱デバイスとしてIQOS ILUMA、HiTASTE及びTHRMALOUCを用いた。

3. 測定装置及び試料採取

金属及び水銀試料の採取には加熱式たばこ用自動喫煙装置(LM4E, BORGWALD KC製)に静電捕集装置(High Voltage Generator HV1, BORGWALD KC製)を用いた。水銀の測定には水銀分析計(Mercury Analyzer HG-400, HIRANUMA製)を用いた。その他の金属類の前処理にはマイクロ波分解装置(START D, Milestone製)を用い、測定には誘導結合プラズマ-質量分析計(ICP-MS7700x, Agilent Technologies製)を用いた。

金属及び水銀試料の採取は加熱式たばこ用自動喫煙装置に静電捕集装置及び硫酸酸性過マンガン酸カリウム溶液を入れたインピンジャー(30mL, 柴田科学製)2本を装着し、ヒトの喫煙様式に近いHCl法(吸引量55mL/回、フィルター部分の通気孔をテープで完全に塞いだ状態)で1本あたり12 puffとして10本分を捕集した。静電捕集装置で捕集した金属類はメタノールで洗い洗液を回収した。

4. 試料の前処理及び測定

水銀の前処理は、捕集後のインピンジャーのノズル部分を超純水で洗い、洗液はガラス管の吸収液に合わせる。1試料につき2本のインピンジャーを同様に洗いこみ、ホットプレート上で加熱する。この時の温度は約160 $^{\circ}$ C程度とした。過マンガン酸カリウムの紫色がしばらく消えなくなるまで加熱した。途中で過マンガン酸カリウムの紫色が消失した時には、吸収液(硫酸酸性過マンガン酸カリウム溶液)を追加した。水銀測定では測定直前に塩化ヒドロキシルアンモニウムで余分な過マンガン酸カリウムを還元し、液量を20mLに定量したのち、測定に供した。測定は還元気化原子吸光を用い、定量下限値は約1.0ngであった。

その他の金属の前処理についてはテフロン製の分解容器に静電捕集装置から洗いだしたメタノール溶液を移し、まず、窒素気流化でメタノールを揮発させた。それに硝酸 7mL を加え、マイクロ波分解装置にて加熱分解処理した。分解後、樹脂製のバイアル内で 10mL に定量し、ICP-MS 測定用試料とした。

C. 研究成果

1. 同時捕集による静電捕集部の主流煙中金属類濃度

先行研究（令和 2 年度報告書）において加熱式たばこの主流煙中金属が分析されており、本結果とそれらを比較した。その結果を表 1 に示す。Be, Cr, Co, As, Cd, Pb などでは比較的同じレベルであったが、Mg, Mn, Ni, Zn では本研究で高濃度であり、Al, Cu では先行研究で高い値であった。

同じたばこ葉を用いて IQOS 純正品とその互換機(HiTASTE)から発生した主流煙中に含まれる金属濃度を比較した。その結果を表 2 に示す。測定対象とした 14 元素で比較したところ、Be, V, Co の 3 元素は両者とも定量下限(0.1ng/cig)であり、その他の元素については全て IQOS の方が低い結果となった。加熱温度は IQOS ILUMA は 300°C未満であり、互換機でも同様の事が謳われているものの、実測では 300°Cを超えていたことから、実際の加熱温度が高くなったことが要因の 1 つとして考えられる。

2. 同時捕集による水銀濃度

吸収捕集単独と静電捕集後に吸収捕集を加えた同時捕集による 1 本当たりの水銀量を比較した。加熱デバイスは THRMALOUIC、温度設定は高温、喫煙方法は HCl として、たばこは標準たばこ 3R4F を用いた。その結果を表 3 に示す。単独では 2.2 ± 1.3 ng/cig、静電捕集+吸収捕集では 3.8 ± 0.44 と、単独捕集では濃度が低く、ばら

つきが大きかった。

次に、同時測定において静電捕集された水銀量と吸収捕集された水銀量を比較した。その結果を表 4 に示す。吸収捕集では IQOS と HiTASTE はほぼ同じ水銀捕集量であったものの静電捕集された量は HiTASTE で多く捕集された。THRMALOUIC ではたばこ葉に 3R4F を用いていることから、IQOS より捕集された水銀量は多くなったものの、静電捕集された水銀の割合は約 10%と IQOS と同程度の割合であった。

D. 考察

金属類については、同じ喫煙方法で水銀との同時測定結果は先行研究の結果と同程度となったが、たばこ葉の銘柄、前処理装置、測定装置(ICP-MS)などが異なっており、単純な比較は難しいと考えられる。特に測定装置が異なることから、定量下限値などが異なっており、更なる検討が必要であると考えられた。

水銀測定については、吸収捕集の前に静電捕集があり、静電捕集における水銀の捕集の程度が問題となった。互換機において捕集量が大きくなった原因としては加熱温度が考えられる。加熱温度高くなったことで、温度差が大きくなり、静電捕集の量が増えたことが考えられる。

また、主流煙の捕集では吸引流量が一定していないことも、捕集におけるばらつきの原因の 1 つと考えられる。それらも含め、吸収液の過マンガン酸カリウム濃度などについても検討する必要がある。

E. 結論

静電捕集と吸収捕集の同時捕集はそれぞれ単独の捕集とほぼ同レベルの捕集を行えることが確認できた。主流煙中の水銀濃度は低いものの、喫煙量の増加や副流煙として非喫煙者への影響を考慮すると非常に重要であると考えられることから、この同時測定方法は有効であると考えら

れる。一方、デバイスの温度制御の不安定さや機械式喫煙における流量のばらつきなど不安定要素も多いことから、吸収捕集における吸収液の条件については更なる検討が望まれる。

F. 健康危険情報

G. 研究発表

1. 論文発表

Nozomi Mosu, Kazuki Kanno, Tatsuo Saito, Mitsuki Yasukochi, Shogo Nakajima, Kou Nakamura, Masaya Ogata, Keita Iguchi, Tomohiro Ishikawa, Kazutoshi Sugita, Hironobu Murakami, Kouji Kuramochi, Shiro Takeda, Koichi Watashi, Kan Fujino, Shinji Kamisuki, Isolation, structural determination, and antiviral activities of a novel alanine-conjugated polyketide from *Talaromyces* sp. *The Journal of Antibiotics* (2024) 77:499–505.

2. 学会発表

1. 杉田和俊, 日高悠平, 石本彩華, 遠藤 治, 総浮遊粒子(TSP)及び微小粒子(PM2.5)中の多環芳香族炭化水素類濃度と変異原活性の比較. 第3回環境化学物質合同大会 (2024).

2. Nobuki Murata, Kazutoshi Sugita, Wataru Yoshioka, Does an AhR antagonist cause changes in maternal behavior? 日本内分泌攪乱物質学会第26回研究発表会 (2024).

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

表1 加熱式たばこの主流煙に含まれる金属濃度: 先行研究との比較

	IQOS Terea Reguar (ng/cig)	令和2年度報告書 IQOS Marlboro REGULAR (ng/cig)
9 Be	<0.1	0.005
24 Mg	23.6	<6.85
27 Al	12.4	187
52 Cr	0.5	0.30
55 Mn	2.7	<0.15
59 Co	<0.1	0.02
60 Ni	11.1	0,93
63 Cu	2.6	11.6
66 Zn	28.4	<1.00
75 As	0.3	0.79
111 Cd	<0.1	0.01
202 Hg	0.2	-
208 Pb	0.2	0.75

表2 加熱式たばこの純正品と互換機の比較

サンプル		HITASTE	IQOS
定容量(mL)		10	10
たばこ		Terea Reguar conc(ng/cig)	Terea Reguar conc(ng/cig)
9 Be	1	<0.1	<0.1
	2	<0.1	<0.1
	average	<0.1	<0.1
24 Mg	1	47.8	31.7
	2	45.4	15.5
	average	46.6	23.6
27 Al	1	32.6	16.6
	2	30.5	8.3
	average	31.5	12.4
51 V	1	<0.1	<0.1
	2	<0.1	<0.1
	average	<0.1	<0.1
52 Cr	1	1.8	0.7
	2	1.5	0.4
	average	1.7	0.5
55 Mn	1	2.8	4.2
	2	5.1	1.2
	average	3.9	2.7
59 Co	1	<0.1	<0.1
	2	<0.1	<0.1
	average	<0.1	<0.1
60 Ni	1	21.4	15.4
	2	18.3	6.8
	average	19.8	11.1
63 Cu	1	13.1	3.8
	2	13.4	1.5
	average	13.3	2.6
66 Zn	1	169.5	35.0
	2	145.3	21.8
	average	157.4	28.4
75 As	1	0.8	0.4
	2	0.8	0.2
	average	0.8	0.3
111 Cd	1	6.4	<0.1
	2	6.3	<0.1
	average	6.4	<0.1
202 Hg	1	0.6	0.2
	2	0.5	0.2
	average	0.6	0.2
208 Pb	1	4.3	0.3
	2	4.3	0.1
	average	4.3	0.2

表3 単独捕集と同時捕集による主流煙中水銀含有量の比較

捕集方法	水銀濃度 (ng/cig)
単独捕集	2.2 ± 1.3
同時捕集*	3.8 ± 0.44

*: 吸収捕集による水銀含有量

表4 水銀の静電捕集と吸収捕集の比較

銘柄	静電捕集	吸収捕集
IQOS (TEREA REGULAR)	0.2 (11.5%)	1.5 ± 0.22
HiTASTE (TEREA REGULAR)	0.6 (37.7%)	1.5 ± 0.10
THRMALOUC (3R4F)	0.4 (10.4%)	3.8 ± 0.44

括弧内の数値は吸収捕集に対する割合

