

令和元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
**固体捕集・二層溶出法による電子タバコ, 加熱式タバコ等
 非燃焼式タバコから発生する化学物質の分析**

研究協力者 内山茂久, 野口真由美, 佐藤綾菜, 石塚美帆 (国立保健医療科学院、千葉大学)

研究要旨 固体捕集 / 二相溶出法により紙巻きタバコ, 加熱式タバコから発生する化学物質の分析を行った。通常のタバコのタバコ葉燃焼温度は 460 であり, ニコチンの他, セルロースの燃焼による熱分解物が多く発生する。一方, 加熱式タバコのタバコ葉加熱温度は, セルロースの発火温度 (250 ~ 260) より低い 100 ~ 250 である。加熱式タバコから発生する化学物質は燃焼式タバコと比較して, プロピレングリコール, グリセロール, アセトールを除いて, 全体的に少ない。しかし, プロピレングリコールの発生量は燃焼式タバコより非常に多く, 10 ~ 20 倍程度である。プロピレングリコールは加熱により熱分解し, アセトールを生成するため, アセトールの発生量も多くなっている。また, グリセロールの発生量も非常に多く, 燃焼式タバコの 10 ~ 50 倍程度発生した。電子タバコから発生する化学物質は, 加熱式タバコや紙巻タバコと異なり, 炭素数が 3 以下のオキソド類, アルデヒド類が多く発生する。またグリセロールやプロピレングリコールから構成されるエアロゾル (総物質質量) が, 他のタバコより一桁程度高い値を示した。この電子タバコエアロゾルは 2 μm 以下の人体に有害な微小粒子である。最近, 高電力 (最大 220 W) タイプの電子タバコが販売されているが, 発生するエアロゾルは極めて多い。推奨電力を 60 ~ 80 W としているが, ユーザーは簡単に 200 W 以上に設定できる。200 W に設定すると, 発がん性物質としてホルムアルデヒドが紙巻きタバコの 380 倍, 1,3-ブタジエンが 11 倍, アセトアルデヒドが 19 倍, プロピレンオキサイドが 250 倍, グリシドールが 390 倍と異常な高濃度を示した。電子タバコのユーザーは電力の設定に留意すべきである。

A. 研究目的

“タバコ”はナス科の植物を原料とする嗜好品であり, 15 世紀末にアメリカ大陸で発見され, 16 世紀以降世界中に広まっている。タバコの種類は非常に多いが, 燃焼式タバコ, 噛みタバコ, 嗅ぎタバコに大別される。また, 燃焼式タバコは, 葉巻, パイプ, 水タバコ, 紙巻タバコ, キセル (煙管) に分類されるが, 現在, 紙巻タバコが世界中で広く使用されている。しかし, 紙巻タバコは燃焼により様々な有害物質を発生するため, 健康被害が大きな社会問題となっている。

そこで, タバコ葉を燃焼ではなく, 加熱によりニコチンを含む煙を発生させる“加熱式タバコ”や, タバコ葉ではなくグリセロールやプロピレングリコールを加熱してエアロゾルを発生させる“電子タバコ”などの非燃焼式タバコが普及し始めている。Fig. 1 に様々なタバコの概要を示す。

最近話題になっている加熱式タバコ (Heated Tobacco Products, HTPs) は, タバコ葉を電氣的に加熱して, 発生するニコチンを含む煙を吸煙する喫煙具である。現在, フィリップモリス・インターナシヨナ

ルが IQOS, プリティッシュ・アメリカン・タバコが

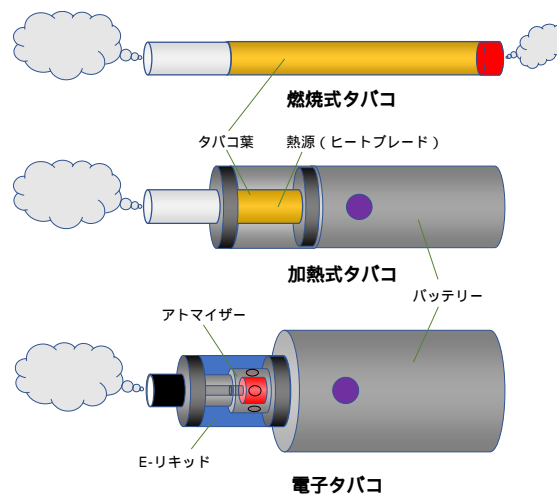


Fig. 1. Various type of cigarettes

l glo, 日本たばこ産業が PloomTECH を販売している。図 1 に電子タバコと加熱式タバコの構造を示す。

IQOS と glo は, タバコ葉を直接ヒートブレードやヒートブロックを用いて加熱する。一方, Ploom TECH は, 言ってみれば電子タバコと加熱式タバコ



Fig. 2. Various HTPs and e-cigarettes sold in Japan.

のハイブリッドである E-リキッドを加熱して発生したミストをタバコ葉に通過させ、ニコチンを含む煙を喫煙する^{1,2}。Fig. 2 に示すようにこれらの非燃焼式タバコの形状は多様である。

しかし、これら非燃焼式タバコの安全性に関する検討は十分とは言えない。そこで本研究では、我々が開発した固体捕集・二相溶出法^{2,3}を用いて、非燃焼式タバコから発生する化学物質の分析を行い、人への影響を検討した。特に、加熱式タバコに関しては、最近流通している非正規品 (IQOS 互換機)、電子タバコに関しては、高電力製品 (200 W) から発生する化学物質の分析を行った。

B. 実験

B.1. 粒子ガス捕集用カートリッジの作製

カーボンモレキュラーシーブス Carboxen 572 粒子 300 mg を充填したカートリッジ CX572^{2,4} に、9 mmφ にカットしたグラスファイバーフィルター GF を挿入し GF-CX572 カートリッジ² を作製する。

B.2. タバコ主流煙の捕集と分析

GF-CX572 カートリッジを自動喫煙装置に取り付け、タバコ主流煙を捕集した。捕集を終えたカートリッジは、2 相/One-pod 溶出法^{3,5} により溶出し、GC/MS でニコチンと VOC を、GC/TCD で水分を分析した。また、溶出液に DNPH 溶液を添加してカルボニル化合物を誘導体化し、HPLC で分析した。

加熱式タバコの自動喫煙装置の喫煙プロトコールは、Canadian Intense Regime (HCI 法) に準拠し、吸煙量は 55 mL、吸煙時間は 2 秒、吸煙間隔は 30 秒に設定した。また、高電力型電子タバコに関しては、吸煙量は 55 mL、吸煙時間は 3 秒、吸煙間隔は 60 秒、吸煙回数を 3 回に設定した。

B.3. 検討した非燃焼式タバコの種類

検討を行った非燃焼式タバコは以下の通りである。電子タバコ: 銘柄 A (中国製, 最大出力電力 220 W)、銘柄 B (中国製, 最大出力電力 220 W) の 2 銘柄を検討した。なお、E-リキッドは、BI-SO グリーンアップルメンソール (ニコチン含有) を使用した。主成分は、グリセロール 60%、プロピレングリコール 40% (メーカー公称値) である

加熱式タバコ: フィリップ・モリス・インターナショナル IQOS、プリティッシュ・アメリカン・タバコ glo の 2 製品の他、非正規品 8 銘柄 (NOS, Ocean, Wand, Quick 24, Quick 2, Buddy, EFOS, Jouz) の加熱式タバコから発生する化学物質の測定を行った。

使用したタバコ葉は、IQOS が regular, menthol, mint; glo が bright tobacco, fresh mix, intensely fresh である。この他、比較のために、燃焼式タバコ (CM6) の主流煙も分析した。

C. 結果と考察

C.1. 加熱式タバコ主流煙から発生する化学物質

加熱式タバコと燃焼式タバコの化学物質発生量を Table 1 に示す。加熱式タバコは、プロピレングリコール、グリセロール、アセトールを除いて、全体的に化学物質発生量は少ない。しかし、加熱式タバコから発生するプロピレングリコールは、燃焼式タバコより非常に多く、10~20 倍程度である。アセトールの発生量が多い原因としては、このプロピレングリコールが加熱により酸化され、アセトールを生成したことが考えられる。また、グリセロールの発生量も非常に多く、燃焼式タバコの 10~50 倍程度の量が発生した。これらの物質の毒性は比較的低い、熱分解により有害な物質が発生することがわかった。また、吸入による肺への影響が懸念される。一方、加熱式タバコから発生するニコチンの量は、燃焼式タバコより少なく、標準タバコの半分以下であった。加熱温度を変化できる加熱式タバコに着目すると、温度の上昇に伴って化学

Table 1. Table 1. VOCs, nicotine, carbonyls, water, and TGPM in mainstream cigarette smoke from HTP and traditional cigarettes collected with the GF-CX572 cartridge, followed by one-pot elution and HCl regimen, in units of $\mu\text{g}/\text{stick}$ or $\mu\text{g}/\text{cigarette}$.

compound	IQOS glo		NOS		Ocean		Wand			Quick24			Quick2 BUDDY EFOS jouz				CM6
	12	8	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	11	12	12	12	
puff number	12	8	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	11	12	12	12	12
1,3-butadiene	0.3	n.d.	0.6	51	0.0	0.1	1.2	9.5	8.8	0.0	0.1	0.5	0.2	0.1	0.2	0.1	110
isoprene	2.1	0.1	7.0	500	0.2	0.4	15	120	120	0.2	1.4	7.2	2.3	0.6	0.8	0.8	1000
propylene oxide	0.2	n.d.	0.2	2.6	n.d.	n.d.	0.6	1.4	1.3	n.d.	0.1	0.3	0.2	0.1	0.3	0.1	1.4
acrylonitrile	0.3	0.1	0.4	11	0.1	0.4	1.1	3.5	4.0	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.3	0.2	25
diacetyl	26	31	23	76	13	63	180	140	130	3.6	15	34	21	15	21	13	240
benzene	0.7	0.1	1.2	49	0.2	0.5	2.1	16	15	0.2	0.4	1.0	0.6	3.1	0.3	0.4	120
acetol	130	73	140	360	88	260	530	600	600	35	84	150	170	110	120	100	210
2,5-DMF	1.9	0.2	2.5	35	0.4	1.5	9.0	37	44	0.4	1.4	4.9	2.0	0.8	0.6	1.0	100
glycidol	2.7	0.5	2.6	27	0.5	4.5	22	22	23	0.5	1.9	4.7	3.5	1.5	1.7	1.4	2.1
propylene glycol	310	150	220	270	290	360	330	270	250	150	210	240	280	350	340	300	16
toluene	2.0	0.3	3.7	89	0.7	1.5	6.7	59	64	0.5	1.4	5.3	2.1	1.0	0.9	1.1	200
furfural	33	51	28	58	38	59	65	78	73	14	21	27	35	30	37	25	55
glycerol	3700	1300	2200	3500	2300	4800	7100	5500	5500	1700	2600	3500	4200	2700	2200	2700	140
menthol	2.1	7.8	2.2	2.8	2.5	3.1	3.3	4.3	4.3	1.0	1.4	2.0	2.3	3.1	2.6	2.3	5.0
nicotine	910	240	630	700	830	940	1100	840	780	400	590	770	990	930	1100	790	2600
formaldehyde	3.4	1.1	1.9	25	0.8	3.8	16	19	20	0.4	1.8	5.7	3.8	1.5	12	1.3	42
acetaldehyde	110	62	95	480	77	140	300	340	330	38	79	140	78	75	81	81	1100
acetone	32	8.3	28	240	16	34	91	190	200	10	21	40	29	24	20	24	540
acrolein	5.5	1.8	4.0	40	1.9	7.3	27	29	28	1.5	3.6	7.2	5.3	3.8	14	3.3	140
propanal	11	6.6	9.3	66	6.4	13	43	53	55	3.2	6.9	13	8.4	7.4	8.7	7.0	110
crotonaldehyde	7.8	6.5	5.8	23	6.7	12	19	25	27	2.8	4.4	6.6	7.8	6.2	6.9	4.9	54
2-butanone	7.0	2.4	6.8	75	3.3	8.3	23	61	68	2.0	4.5	10	6.7	5.1	5.9	5.0	170
butanal	19	9.1	17	45	15	17	30	38	41	9.6	14	20	15	17	11	16	68
benzaldehyde	1.8	1.0	1.0	3.4	1.1	1.8	4.3	4.7	5.0	0.6	1.3	1.1	1.5	1.6	1.3	1.4	17
i-valeraldehyde	12	4.3	10	31	7.5	11	21	30	34	5.7	8.8	11	9.9	9.7	6.9	9.5	48
glyoxal	1.8	n.d.	0.7	5.9	0.3	2.0	1.0	8.1	12	0.4	0.8	1.2	2.6	1.1	2.8	1.0	9.6
valeraldehyde	0.2	0.7	0.4	8.2	0.0	1.3	0.8	6.0	7.5	n.d.	n.d.	0.1	0.4	0.4	0.5	0.1	12
p-tolualdehyde	0.9	1.6	0.5	7.1	0.3	1.3	5.9	7.5	8.7	n.d.	0.3	1.1	0.6	0.4	0.6	0.4	15
methylglyoxal	25	9.7	20	11	28	23	18	29	34	7.5	16	18	30	30	40	26	39
hexanal	1.0	0.2	0.5	1.5	0.5	0.9	1.2	2.5	2.9	0.0	0.3	0.6	0.9	1.0	0.8	n.d.	7.4
2,5-DMBA	n.d.	0.2	0.2	2.5	n.d.	0.5	0.6	1.8	1.5	0.1	0.2	0.5	0.2	0.3	8.8	3.6	18
heptanal	2.3	n.d.	8.2	n.d.	7.4	9.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.9	n.d.	2.6	3.6	2.9	5.1	4.8
octanal	n.d.	0.2	n.d.	1.4	n.d.	0.5	0.9	0.7	2.5	0.2	0.3	0.3	0.4	n.d.	0.2	n.d.	2.6
2-nonenal	n.d.	n.d.	0.5	0.2	0.2	0.2	n.d.	0.3	0.2	0.1	0.0	0.3	0.0	0.3	0.1	0.2	0.0
nonanal	0.7	n.d.	0.2	1.3	0.9	1.4	1.4	1.2	0.7	0.4	0.0	0.3	0.2	0.5	0.9	n.d.	1.9
decanal	2.7	0.3	2.6	5.1	0.2	4.5	4.1	4.3	3.8	0.2	1.8	1.9	3.3	3.2	0.3	1.2	1.7
water (mg)	25	11	19	23	18	33	23	30	22	21	23	16	27	25	22	24	7.6
TGPM (mg)	37	15	26	43	25	37	43	43	40	22	24	27	37	30	29	29	43

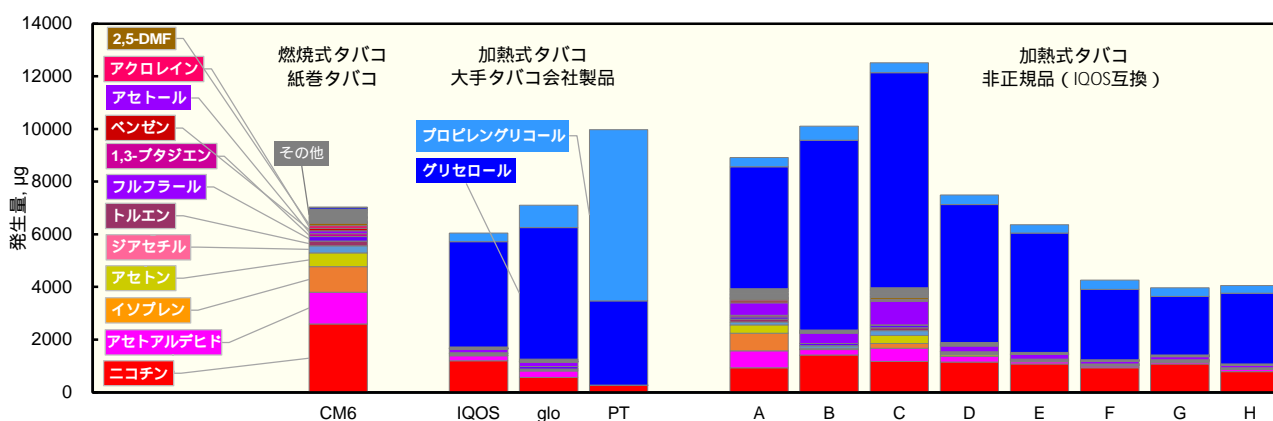


Fig. 3. Comparison of chemical compounds generated from traditional cigarette, iQOS, glo, Ploom TECH and third party products.

物質発生量も増加する傾向がみられた。赤字で示されている化学物質は、発ガン性を示す物質であるが、これらの有害物質の発生量は電圧の上昇に伴い著しく増加することが明らかになった。

燃烧式タバコと加熱式タバコから発生する化学物質は組成が大きく異なり、燃烧式タバコからはアルデヒド類等の熱分解物が多く発生したのに対し、加熱式タバコからはプロピレングリコールやグリセロールなどの一次発生物が多く検出された。発ガン性を示す物質の発生量はいずれも比較的燃烧式タバコより発生量が少ない。しかし、ホルムアルデヒド(0.4 ~ 25 µg)、ベンゼン(0.1 ~ 49 µg)、グリシドール(0.5 ~ 27 µg)、アセトアルデヒド(38 ~ 480 µg)というように、“それなりの量”を発生することが明らかになった。

C.1.2. 加熱式タバコから発生する化学物質の製品間のバラツキ

化学物質発生量が全体的に多かった銘柄(NOS)に関して、同一銘柄7製品による化学物質発生量の変化を検討した。なお、加熱温度は全て400に設定し、7個の製品(S, A, B, C, D, E, F)を用意し、上記と同じ喫煙方法で、それぞれ5回ずつ測定した。7つの製品と5回の測定から発生した代表的な化学物質量をFig. 4に示す。1,3-ブタジエン、イソプレン、ベンゼン、グリシドール、プロピレンオキシドの発生量は、製品CとEでの発生量が極端に低く、製品間の大き

なバラツキが認められた。一方、グリセロール、プロピレングリコール、ニコチンは製品間の差は小さかった。また、個々の製品をみても、5回それぞれで化学物質の発生量が変化することが明らかとなった。同じ製品であっても、化学物質発生量には個体差があり、毎回の喫煙によっても発生量が変化することがわかった。Table 2に、7つの製品の化学物質発生量の平均値、最小値、最大値、相対標準偏差(RSD)を示す。1,3-ブタジエン、イソプレン、ベンゼン、グリシドール、プロピレンオキシドは熱分解によって発生した物質であると考えられるが、RSDが48~69%とバラツキが非常に大きい。したがって、熱分解物の発生は大きく変動するため、正確な評価を行うためには、複数の製品を用いて複数回測定する必要がある。また、ユーザーも製品間のバラツキを認識すべきである。

Table 2. Mean, minimum, maximum values and RSD of various chemical compounds generated from the same E-cigarette product. n = 5

compound	mean	min	max	RSD (%)
1,3-butadiene	41	0.7	70	69
isoprene	400	11	630	67
propylene oxide	2.1	0.3	3.3	57
benzene	40	1.7	59	65
glycidol	22	5.6	31	48
propylene glycol	350	330	390	6.3
glycerol	3900	3100	4400	10
nicotine	820	730	890	6.2
TGPM	120	86	130	16

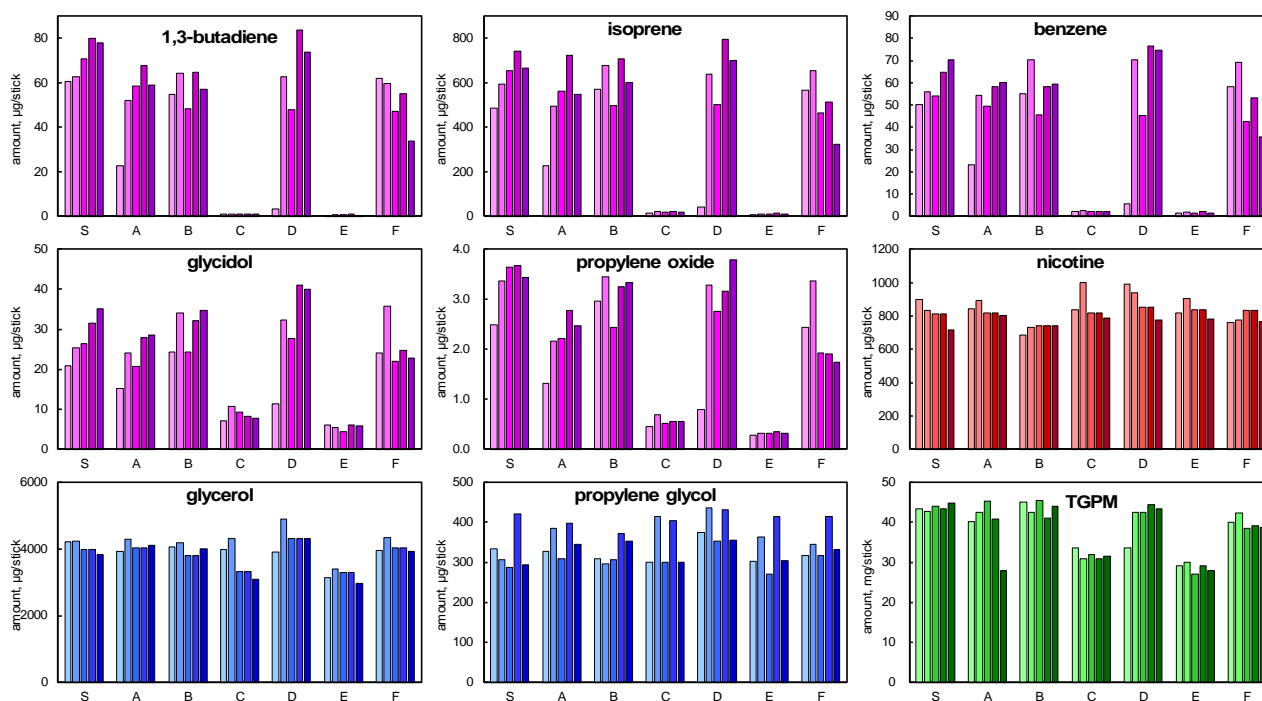


Fig. 4. Amounts of various chemical compounds and TGPM generated from seven products of same E-cigarette.

C.2. 高電力電子タバコから発生する化学物質

最大消費電力を 220 W まで設定することができる 2 銘柄の高電力型電子タバコ (CAPT'N, SUPER BAT, ともに VAPTIO 社製) の消費電力と化学物質発生量の関係を分析した。実験に使用した 2 銘柄の電子タバコの特徴を Table 3 に示す。

Table 3. Properties of two brands of e-cigarettes according to the manufacturers.

Brand	e-cigarette body		atomizer	
	battery voltage	configurable electric power	resistance	recommended electric power
A	5.0 V	10 - 220W	0.15 Ω	60W - 80W
B	5.0 V	1 - 220 W	0.15 Ω	60W - 80W

C.2.1 ガス状, 粒子状物質

様々な消費電力における総ガス状及び粒子状物質 (TGPM) の発生量の変化を Fig. 5 に示す。電子タバコはスイッチをオンにしてから 10 秒間稼働する。本実験では, スwitchをオンにしてから 3 秒後に, 主流煙を吸煙時間 3 秒間, 吸煙量 55 mL で 3 パフ捕集した。Fig. 5 の下の図はスイッチをオンにしてから 10 秒間連続して発生した総量を, 電子タバコ本体の重量変化により算出した値である。200W の時は 3 パフで約 1 mL の TGPM を発生したことになる。

総ガス状, 粒子状物質 TGPM は電力の上昇に伴い増加したが, 75W までは粒子状物質が大半を占めた。75W を超えると粒子状物質はほとんど変化せず, ガス状物質が増加した。最終的に 200W の時, ガス状物質は TGPM の約 30% を占めた。

電子タバコから発生するエアロゾルの粒径分布を求めるために, 8 段アンダーセンサンプラーを用いて, 分級捕集を行った⁶。なお, 電子タバコは KangerTech を用いて, 75 W で 10 秒間×3 回発生させた。エアロゾル粒子は, Fig. 6 に示すように, 粒子径 0.65 ~ 1.1 μm が最大になる分布を示した。また, 全粒子の 97% 以上は 2.1 μm 以下の微小粒子であった。なお, 燃焼式の紙巻タバコから発生する煙も同様の粒径分布を示した。一般に, 燃焼により一旦発生したガス状物質が凝集して, 2.1 μm 以下の二次粒子を形成する。電子タバコの場合は, 燃焼ではなく加熱により E-リキッドが気化し, 直ちに凝集して, 2.1 μm 以下の二次粒子を形成することが推測される。

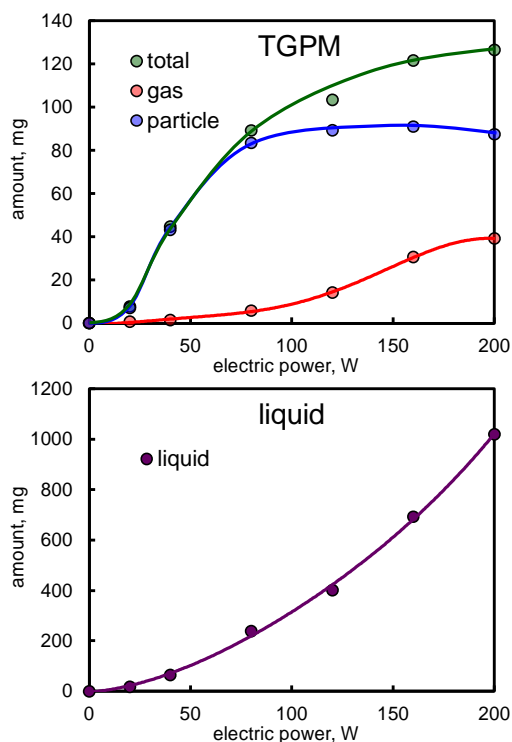


Fig. 5. Changes in the amount of total gaseous and particulate matter generated from an e-cigarette (brand A) with electric power. Puff volume, number, and duration are 55 mL, 3 times, and 3 s, respectively

紙巻タバコや非燃焼式タバコから発生する 2.1 μm 以下の微小粒子は, いわゆる PM2.5 であり, 喫煙者の肺胞まで達しやすく, 容易に体内に吸収されることから, 健康影響が懸念される。

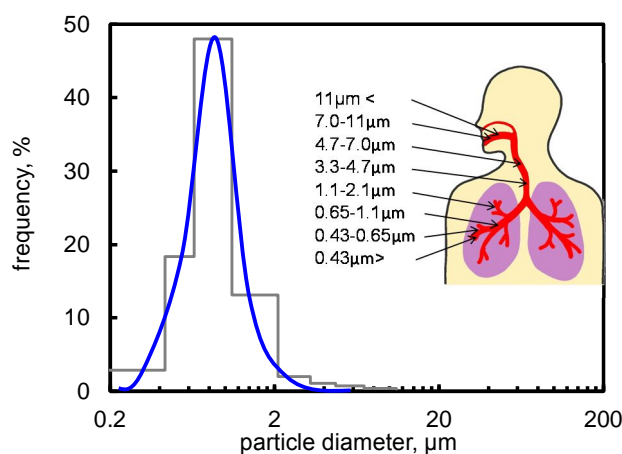


Fig. 6. Size distribution of e-cigarette aerosol.

C.2.2 電子タバコから発生する熱分解物質

前述したように電子タバコとは, プロピレングリコールやグリセロールから構成される E-リキッドを電氣的に加熱し, 発生するエアロゾルを吸煙する喫煙具である。プロピレングリコール (C₃H₈O₂) やグリセロ

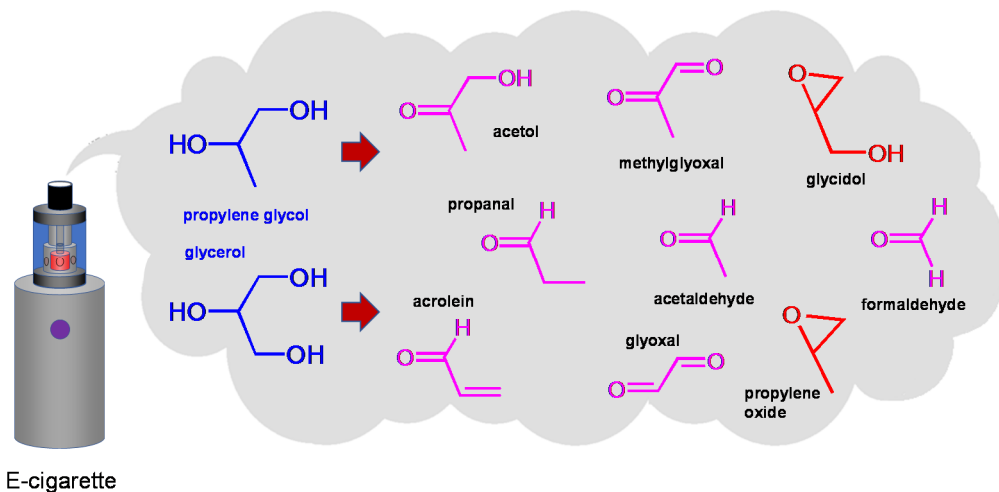


Fig. 7. Generation of oxides and carbonyls from propylene glycol and glycerol.

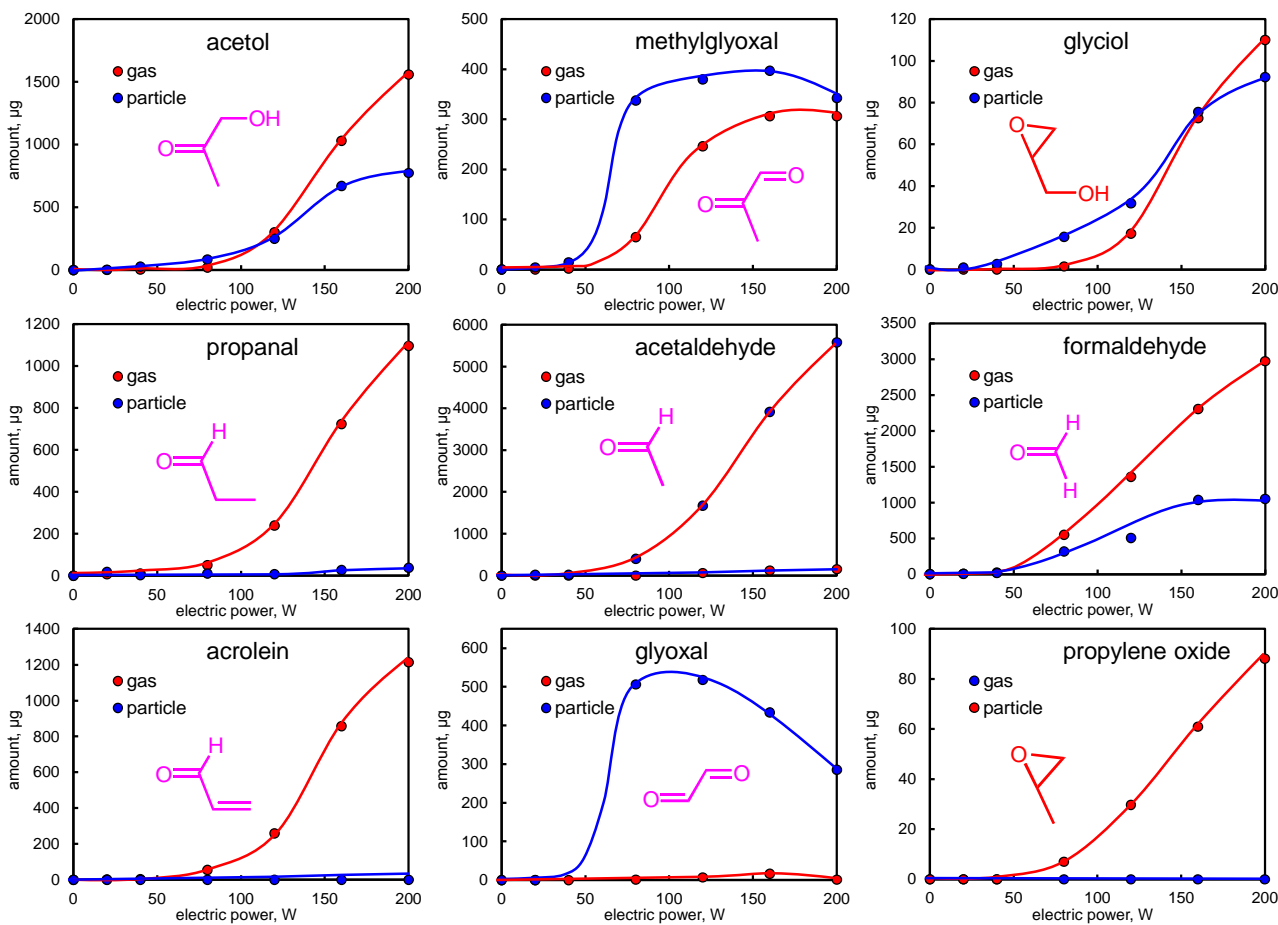


Fig. 8. Changes in the amount of chemicals generated from an e-cigarette with electric power. Puff volume, number, and duration are 55 mL, 3 times, and 60 s, respectively.

ール (C₃H₈O₃) から構成される E-リキッドを電氣的に加熱し、エアロゾルを発生させる。従って、炭素数が 3 以下の熱分解物が発生する可能性がある (Fig. 7)。

Fig. 8 に電子タバコから発生した炭素数 3 以下の熱分解物質に関して、電力と発生量の関係を示す。測定した全電力において、アセトアルデヒド、アクロレ

イン、プロパナール、プロピレンオキサイドはガス状態で存在し、グリオキサールは粒子状態で存在した。一方、アセトール、メチルグリオキサール、グリシドールなど比較的沸点の高い物質は粒子、ガス、両方で存在した。ホルムアルデヒドは沸点が非常に低く、蒸気圧が非常に高いのでガス状態で存在し易いはずであるが、粒

子中にも多く存在する。ホルムアルデヒドは、大きな付着係数を有する非常に可溶性の極性分子である⁷。したがって、気体形態および粒子形態の両方で存在する可能性が高いことが考えられる。

C.2.3 その他の熱分解物質及びニコチンの発生

プロピレングリコール、グリセロールの熱分解物として炭素数が3以下の物質が報告されている⁸が、高電力型の電子タバコからは炭素数が4以上の、1,3-ブタジエン (C_4H_6)、イソプレン (C_5H_8)、ジアセチル ($C_4H_6O_2$) が多く発生した。これらの物質における電力と発生量の関係を Fig. 9 に示す。

1,3-ブタジエンとイソプレンは紙巻タバコから高濃度で発生する物質で、従来の電子タバコからはほとんど検出されていない。1,3-ブタジエン (IARC group 2A) とイソプレン (IARC group 2B) は、発ガン性物質であるが 200W の時、それぞれ 310 $\mu\text{g}/3\text{puff}$ 、180 $\mu\text{g}/3\text{puff}$ 発生した。電子タバコの加熱部 (アトマイザー) にゴム製品が使用されていることから、1,3-ブタジエンとイソプレンは共にゴムの熱分解により発生することが示唆される。一方、ジアセチルは香料として用いられている物質であるので、E-リキッドに添加されていたものが加熱により発生したと思われる。

本研究では、海外で販売されているニコチン入りの E-リキッドを使用した。Fig. 10 に電力とニコチン発生量の関係を示す。他の化学物質と同様に、ニコチン発生量は電力の上昇に伴い増加するが、120 W を超えるとガス状のニコチン量の比率が高くなった。200 W の時は 15% がガス状であった。

C.3. 各種非燃焼式タバコから発生する化学物質の比較

今回テストした各種非燃焼式タバコから発生する化学物質濃度の比較を Table 4 に示す。

ブルームテック (PT) はタバコ葉を加熱しないので、発生する化学物質濃度は非常に低い。加熱式タバコでは、IQOS のヒートスティックを使用する非正規品 (NOS) が紙巻きタバコに匹敵するくらい、高濃度の化学物質を発生した。

高電力型の電子タバコでは、メーカーは推奨電力を 60~80 W としているが、ユーザーは簡単に 200 W 以上に設定できる。200 W に設定すると、発ガン性物質としてホルムアルデヒドが紙巻きタバコの 380 倍、1,3-ブタジエンが 11 倍、アセトアルデヒドが 19 倍、プロピレノキサイドが 250 倍、グリシドールが 390

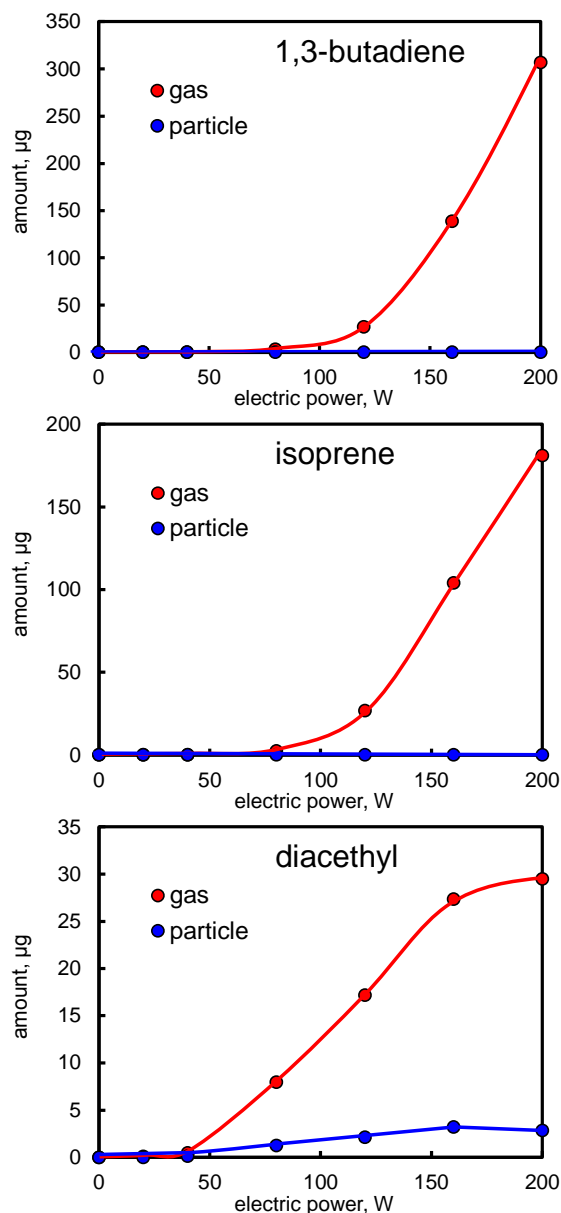


Fig.9. Changes in the amount of 1,3-butadiene, isoprene and diacetyl generated from an e-cigarette with electric power.

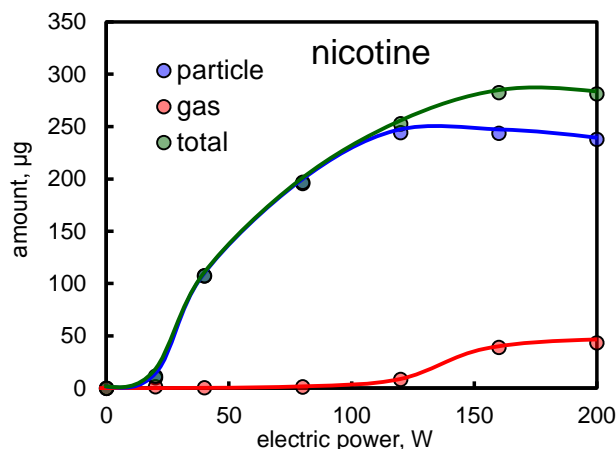


Fig.10. Changes in the amount of nicotine generated from an e-cigarette with electric power.

Table 4. VOCs, oxides, nicotine, and carbonyls in mainstream cigarette smoke from regular and non-regular HTPs, e-cigarettes and traditional cigarette (CM6) collected with the GF-CX572 cartridge, followed by one-pot elution and HCl regimen, in units of µg/stick or µg/cigarette. TGPM, total gaseous and particulate matter. All data is converted to the equivalent of 12 puff. (µg/12puff)

compound	HTPs				e-cigarette				cigarette CM6
	PT	IQOS	glo	NOS	A (50W)	B(50W)	C (50W)	X (200W)	
propylene oxide	-	0.2	-	3.5	1.8	50	1.3	350.	1.4
glycidol	-	2.7	0.5	36	22	100	15	810	2.1
acetol	-	150	170	480	140	510	100	9300	110
formaldehyde	-	4.8	10	33	34	2600	19	16000	42
acetaldehyde	0.51	190	240	640	48	1400	3.7	23000	1200
acetone	1.5	36	26	320	18	230	5.2	5500	510
acrolein	-	7.3	5.5	53	34	670	3.7	4900	100
propanal	1.2	14	15	88	10	280	9.0	4500	120
glyoxal	-	4.5	6.5	7.9	45	750	5.1	1100	26
methylglyoxal	-	7.5	37	15	160	540	120	2600	38
1,3-butadiene	-	0.2	-	68	-	6.8	-	1200	110
isoprene	-	1.7	-	670	-	4.2	-	720	980
benzene	-	0.7	0.1	65	0.4	1.6	0.3	110	100
toluene	0.3	1.7	0.3	120	0.6	1.4	0.6	24	180
2,5-dimethylfuran	-	1.2	0.2	47	0.7	0.7	0.1	2.5	87
furfural	-	26	100	77	9.0	7.0	2.5	450	180
diacetyl	-	43	48	100	3.3	43	2.6	130	270
crotonaldehyde	-	7.5	18	31	2.5	5.1	4.4	16	51
2-butanone	-	9.9	15	100	160	540	24	6000	170
butanal	-	19	28	60	0.3	4.6	0.6	117	80
<i>i</i> -varelaldehyde	-	9.5	12	41	14	39	0.3	300	61
propylene glycol	6500	320	850	360	130000	100000	85000	83000	11
glycerol	3200	4000	5000	4700	300000	240000	200000	250000	59
menthol	0.4	0.41	6.8	3.7	2400	2100	1400	3700	-
necotine	270	1200	570	933	1800	1500	810	1100	2600
aerazol (mg)	18	39	29	57	430	340	280	500	30

compounds	IARC group	Heated Tobacco Products				e-cigarettes				cigarette CM6
		PT	IQOS	glo	NOS	A	B	C	X	
formaldehyde	1	-	4.8	10	33	34	2600	19	16000	42
benzene	1	-	0.7	0.1	65	0.4	1.6	0.3	110	100
1,3-butadiene	2A	-	0.2	-	68	-	6.8	-	1200	110
glycidol	2A	-	2.7	0.5	36	22	100	15	810	2.1
propylene oxide	2B	-	0.2	-	3.5	1.8	50	1.3	350	1.4
isoprene	2B	-	1.7	-	670	-	4.2	-	720	980
acetaldehyde	2B	0.51	190	240	640	48	1400	3.7	23000	1200
total		0.51	200	250	1500	110	4200	39	42000	2400

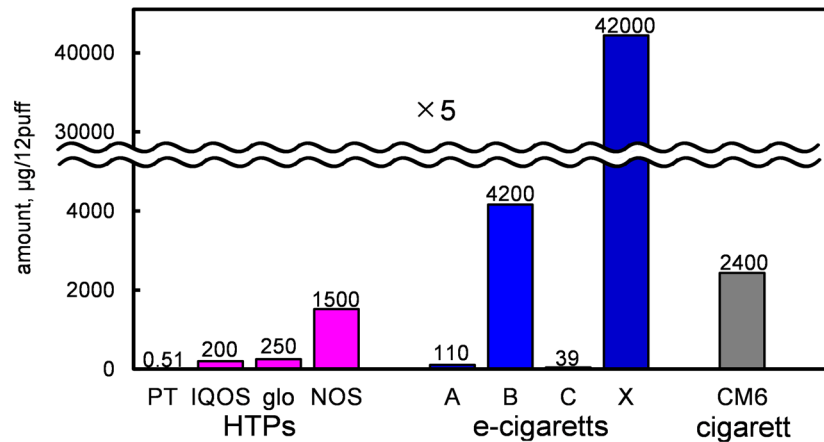


Fig. 11. Comparison of carcinogens generated from HTPs, e-cigarettes and traditional cigarette.

倍と異常な高濃度を示した。

Table 4 の化学物質の中で、発がん性のある物質を選択して Fig. 11 に表示，図示した。

全体として加熱式タバコから発生する発がん性物質の量は少ない。一方，電子タバコから発生する発がん性物質量は，製品間の差が大きだけでなく，消費電力によっても大きく変動する。特に，高電力（200 W）時には，極度に高濃度になるので注意が必要である。高電力型の電子タバコは，消費電力を自由に変更できる。今回テストした製品で，メーカーは 60～80W を推奨しているが，何故 200W まで設定可能にしているのか，非常に奇異である。

D. まとめ

加熱式タバコから発生する化学物質は，ベンゼンや 1,3-ブタジエンといった発がん性物質が紙巻タバコに比べて少ないが，ニコチンは発生する。また，高電力型の電子タバコは熱分解により，有害なオキシド類や，アルデヒド類を生成する。さらに，大量に発生する 2 μm 以下のエアロゾルは，直接喫煙者の肺胞に吸収されることに留意する必要がある。

今，新型コロナウイルス COVID-19 感染症によるパンデミックが発生し，世界中で大きな問題となっている。もともと，喫煙は心血管系および呼吸器系に害をもたらすが，COVID-19 はさらに増幅させる可能性がある。中国からの情報では，心血管および呼吸器に疾患のある人は，喫煙により COVID-19 の重篤な症状を発症するリスクが高まることが報告されている⁹。また，生涯非喫煙者とくらべて，現在・過去喫煙者の重症化リスク比が 1.66 倍，人工呼吸器装着または死亡のリスク比が 2.96 倍となることが報告されている⁹。さらに，喫煙や電子タバコの使用は，気道の異物を排除する絨毛に影響を与え，免疫機能を低下させ，炎症を誘発させるなどの理由から，これまでもインフルエンザをはじめとする感染症に罹患しやすく重症化することが報告されている¹⁰。

紙巻タバコの代替として様々な喫煙具が販売されているが，多くは有害である。また，新型コロナウイルス対策には，加熱式タバコや電子タバコを含めた禁煙と受動喫煙対策が必須である。喫煙者は害の少ないタバコを求めるより，喫煙という習慣の是非を考えるべきである。

E. 文献

1. 内山茂久. 加熱式タバコから発生する化学物質. 現代化学. 2018;10:21-24.
2. Uchiyama S, Noguchi M, Takagi N, et al. Simple Determination of Gaseous and Particulate Compounds Generated from Heated Tobacco Products. *Chem Res Toxicol*. 2018;31(7):585-593.
3. Uchiyama S, Hayashida H, Izu R, Inaba Y, Nakagome H, Kunugita N. Determination of nicotine, tar, volatile organic compounds and carbonyls in mainstream cigarette smoke using a glass filter and a sorbent cartridge followed by the two-phase/one-pot elution method with carbon disulfide and methanol. *J Chromatogr A*. 2015;1426:48-55.
4. Uchiyama S, Tomizawa T, Inaba Y, Kunugita N. Simultaneous determination of volatile organic compounds and carbonyls in mainstream cigarette smoke using a sorbent cartridge followed by two-step elution. *J Chromatogr A*. 2013;1314(0):31-37.
5. Uchiyama S, Senoo Y, Hayashida H, Inaba Y, Nakagome H, Kunugita N. Determination of Chemical Compounds Generated from Second-generation E-cigarettes Using a Sorbent Cartridge Followed by a Two-step Elution Method. *Analytical Sciences*. 2016;32(5):549-555.
6. 内山茂久, 櫻田尚樹. 電子タバコから発生する化学物質と健康影響. 現代化学. 2020(3):54-57.
7. Odabasi M, Seyfioglu R. Phase partitioning of atmospheric formaldehyde in a suburban atmosphere. *Atmos Environ*. 2005;39(28):5149-5156.
8. Uchiyama S, Noguchi M, Sato A, Ishitsuka M, Inaba Y, Kunugita N. Determination of Thermal Decomposition Products Generated from E-Cigarettes. *Chem Res Toxicol*. 2020;33(2):576-583.
9. Guan W-j, Ni Z-y, Hu Y, et al. Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China. *N Engl J Med*. 2020;382(18):1708-1720.
10. Gotts JE, Jordt S-E, McConnell R, Tarran R. What are the respiratory effects of e-cigarettes? *BMJ*. 2019;366:l5275.

F. 本研究に関する研究発表

論文発表

Uchiyama, S.; Noguchi, M.; Sato, A.; Ishitsuka, M.; Inaba, Y.; Kunugita, N. Determination of Thermal Decomposition Products Generated from E-cigarettes. *Chemical Research in Toxicology* 2020, 33, 576-583.

内山茂久, 櫻田尚樹 電子タバコから発生する化学物質と健康影響 *現代化学* 2020, 3, 54-57.

内山茂久 加熱式タバコ, 電子タバコ等非燃焼式タバコから発生する化学物質の分析 *ファルマシア* 2020, 印刷中.

学会発表

Kunugita N.; Uchiyama S.; Bekki K.; Inaba Y. Measurement of Hazardous Chemicals in the Mainstream Aerosol of Heated Tobacco Products. The 18th International Conference of the Pacific Basin Consortium for Environment and Health-Assessing and Mitigating Environmental Exposures in Early Life. 16-19 September 2019, Kyoto, Japan.

野口真由美; 内山茂久; 菱木麻祐; 石塚美帆; 佐藤綾菜; 櫻田尚樹; 稲葉洋平; 牛山明 屋内, 屋外, 個人曝露における有害化学物質濃度の季節変動調査 2019年室内環境学会学術大会, 2019年12月, 沖縄

佐藤綾菜; 内山茂久; 野口真由美; 石塚美帆; 櫻田尚樹; 稲葉洋平; 牛山明 正規品, 非正規品の加熱式タバコから発生する化学物質の分析 2019年室内環境学会学術大会, 2019年12月, 沖縄

石塚美帆; 内山茂久; 佐藤綾菜; 野口真由美; 稲葉洋平; 櫻田尚樹; 牛山明 電子タバコから発生する熱分解物質の分析, 2019年12月, 沖縄

野口真由美; 内山茂久; 菱木麻祐; 石塚美帆; 佐藤綾菜; 稲葉洋平; 櫻田尚樹; 牛山明 居住環境に存在する二酸化窒素とアンモニアの挙動と季節的変動 第78回日本公衆衛生学会, 2019年10月, 高知市

佐藤綾菜; 内山茂久; 石塚美帆; 野口真由美; 稲葉洋平; 櫻田尚樹; 牛山明 非燃焼式タバコから発生する有害物質の分析結果 第78回日本公衆衛生学会, 2019年10月, 高知市

石塚美帆; 内山茂久; 佐藤綾菜; 野口真由美; 稲葉洋平; 櫻田尚樹; 牛山明 非燃焼式タバコから発生する有害物質の分析法の開発 第78回日本公衆衛生学会, 2019年10月, 高知市

佐藤綾菜; 内山茂久; 石塚美帆; 野口真由美; 稲葉洋

平; 櫻田尚樹; 牛山明 非燃焼式タバコから発生する有害物質の分析結果 第68回日本分析化学会, 2019年9月, 千葉市

野口真由美; 内山茂久; 石塚美帆; 佐藤綾菜; 稲葉洋平; 櫻田尚樹; 牛山明 居住環境に存在する二酸化窒素とアンモニアの挙動と季節的変動 第68回日本分析化学会, 2019年9月, 千葉市

石塚美帆; 内山茂久; 佐藤綾菜; 野口真由美; 稲葉洋平; 櫻田尚樹; 牛山明 非燃焼式タバコから発生する有害物質の分析法の開発 第68回日本分析化学会, 2019年9月, 千葉市