令和 7 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

加熱式たばこ及び紙巻たばこ主流煙から発生する多環芳香族炭化水素類の分析と比較

分担研究者　稲葉　洋平　　国立保健医療科学院
分担研究者　緒方　裕光　　日本栄養大学
分担研究者　牛山　明　　国立保健医療科学院
研究協力者　内山　茂久　　国立保健医療科学院

背景・目的：加熱式たばこ（heated tobacco products: HTPs）は近年、日本を含む各国で急速に普及しており、たばこ規制および公衆衛生上、ニコチン曝露の定量的評価が重要な課題となっている。これまで加熱式たばこのニコチン移行率を独立研究として算出した知見は Bekki らによる IQOS 2 銘柄の報告（移行率 23.4-23.5%、3R4F 紙巻たばこは 11.3%）に限られており、市販製品全体での特性は不明であった。

方法：本研究では、市販されている加熱式たばこ 3 製品（IQOS ILUMA/ILUMAi、glo HYPER pro、Ploom X ADVANCED）の 83 銘柄および紙巻たばこ 20 銘柄を対象に、Health Canada Intense 法に準拠した条件下で主流煙中ニコチンおよびたばこ葉中ニコチンをガスクロマトグラフィーにより定量し、ニコチン移行率を算出した。

結果及び考察：加熱式たばこのニコチン移行率は中央値 28.6%（範囲 12.4-46.8%）であり、紙巻たばこ（中央値 18.9%、範囲 10.9-26.5%）より高い値を示した。製品別中央値は IQOS ILUMA 16.5%、glo HYPER pro 35.6%、Ploom X ADVANCED 33.8%であり、加熱機構、加熱温度、および機械喫煙条件設定における製品仕様の違いが製品間差異に寄与していた。IQOS ILUMA（12 puff 上限）と ILUMAi（14 puff 上限）の同一銘柄比較では、puff 数増加により移行率が 14.8%から 24.6%へ上昇し、相対的増加は約 66%に達した。これは機械喫煙条件における puff 数設定が評価値を強く規定することを示している。

puff 数上限が設定されていない製品（glo HYPER pro、Ploom X ADVANCED）では、本研究の 12 puff 条件は使用可能範囲の一部に過ぎず、実使用時のニコチン曝露を過小評価する可能性がある。製品仕様の多様化に対応した曝露評価手法の確立が今後の課題である。

A. 研究目的

加熱式たばこ(Heated Tobacco Product:以下 HTP)は、2014 年の IQOS 名古屋市先行販売開始および 2016 年の全国販売開始以降、日本国内で急速に普及が進んだ。令和 6 年国民健康・栄養調査によれば、男性喫煙者の 41.4%、女性喫煙者の 44.2%が HTP を使用している。

HTP の普及拡大の背景には、たばこ産業側による有害化学物質低減効果の主張がある。フィリップ・モリス・インターナショナル(PMI)社は、IQOS(Tobacco Heating System 2.2)のエアロゾル中の有害および潜在的に有害な成分(Harmful and Potentially Harmful Constituents:HPHCs)が 3R4F 標準紙巻たばこと比較して平均 90%以上低減することを報告している[1]。また、ドイツ連邦リスク評価研究所(BfR)の独立的評価においても、IQOS

の主要 HPHCs が紙巻たばこと比較して大幅に低減することが概ね確認されている[2]。一方で、独立研究機関の研究グループからは、PMI が報告する「90%低減」は特定の 58 物質(PMI-58 リスト)に限定された比較であり、当該リストに含まれない 58 物質中、22 物質が IQOS のエアロゾルで標準紙巻たばこ煙より 200%以上高値、7 物質が 1,000%以上高値を示したとの指摘もなされている[3]。さらに Ghazi らによるスコーピングレビューでは、研究主体(独立研究機関と PMI)による結論の差異が分析されており、独立研究の結果は PMI の主張をすべて支持しているわけではないことが示されている[4]。

こうした状況下で、喫煙者が低リスク製品と認識する傾向が報告されており[5]、HTP のリスクを過小評価する懸念がある。したがって HTP の有害化学物質量については、第三者機関による継続的かつ客観的な評価が必要である。

一方で、メーカーによっては HTP 加熱装置の世代交代に伴い加熱方式が変更され、加熱温度の上昇が認められる事例が報告されている。加熱温度の上昇は、燃焼由来の有害化学物質、とくに不完全燃焼に由来する物質の生成量増加を招くことが危惧される。

燃焼由来有害物質の代表として、多環芳香族炭化水素(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: 以下 PAHs)が挙げられる。PAHs は有機物の不完全燃焼により生成する物質群であり、たばこ煙はヒトに対する PAHs 曝露の主要な発生源の一つである。国際がん研究機関(IARC)はベンゾ[*a*]ピレン（BaP）をグループ 1(ヒトに対する発がん性あり)に分類し、たばこ煙中の他の PAHs 群についてもグループ 2A・2B に分類している[6]。紙巻たばこの主流煙中 PAHs については Ding らや Vu らにより詳細な定量分析が報告されており、ISO 法および HCI 法(Canadian Intense 法)を用いた米国紙巻たばこ 50 銘柄の分析では、総 PAHs 量は ISO 法で数百 ng～数μg/本のレンジにあり、HCI 法ではさらに高値を示すこと、および BaP は他の PAH 類との強い正相関を示すため、PAH 全体の代表マーカーとなり得ることが報告されている[7]。我々の研究グループでも、これまで日本国内で販売される HTP の主流煙中 PAHs について分析を進めてきた[5, 8]が、近年の 80 銘柄規模の網羅的分析および過去製品との時系列比較は十分に行われていない。

そこで本研究では、燃焼由来の代表的な有害物質である PAHs の一斉分析法を用い、現行販売中の HTP 3 ブランド計 80 銘柄の主流煙中 PAHs 量を算出するとともに、紙巻たばことの比較、HTP メーカー(ブランド)別の比較、および過去に販売された HTP との比較・評価を行うことを目的とした。

B. 研究方法

1. 分析対象加熱式たばこ、紙巻たばこ

日本国内で販売される加熱式たばこ 80 銘柄(IQOS ILUMA 、 glo Hyper PRO 、 Ploom X ADVANCED の 3 ブランド)を対象とした。比較対象として、過去に販売された加熱式たばこ(IQOS plus 2.4、glo、Ploom TECH 等)についても再評価を実施した。紙巻たばこは、日本たばこ協会が公表している売上上位銘柄のうち、国産たばこ産業販売上位 10 銘柄および海外たばこ産業販売上位 10 銘柄の計 20 銘柄を対象とした。試料は、主流煙捕集前 48 時間以上、温度 22±2°C、相対湿度 60±3%の条件で恒温恒湿化した（ISO 3402）(9)。各加熱式たばこ銘柄に対応する加熱装置は、ブランドごとに 5 台ずつ購入した。主流煙の捕集は 1 台あたり 1 サンプルとし、計 5 台分の結果の平均値を当該銘柄の値とした。

2. たばこ主流煙中化学物質の分析

(1) たばこ主流煙の捕集

加熱式たばこ主流煙の捕集には自動喫煙装置(LM5E、Körber Technologies 社製)を用い、温度 22±2℃、湿度 60±5%の条件下で実施した。喫煙法には、ヒトの喫煙行動により近い Health Canada Intense(HCI)法を採用した。HCI 法では、1 回の吸

煙量を 55 mL、吸煙時間を 2 秒、吸煙間隔を 30 秒とし、加熱式たばこではヒートスティックのフィルター部の通気孔をテープで完全に塞いだ状態で捕集を行った。加熱式たばこ 6 本分を 1 試料とし、各銘柄について 5 回繰り返し捕集を行った(HTP n=300、紙巻たばこ n=115)。

主流煙の粒子成分はガラス繊維フィルターに、ガス成分は Supelpak™-2 を充填したカートリッジに同時捕集する方式とした。各銘柄について 5 試料を調製し、それぞれ分析に供した。

(2) 主流煙 PAHs の前処理

捕集後のフィルターおよび Supelpak™-2 を試験管に入れ、内部標準として重水素化 PAH 混合溶液(PAH-d)を添加した後、ヘキサンを加えて振とう抽出を行った。抽出液は窒素気流下で溶媒を留去し、Sep-Pak Silica カートリッジに添加した。ヘキサンおよびジクロロメタン/ヘキサン混合液(1/9)で順次溶出し、窒素気流下で再度溶媒を留去した後、トルエンに溶解して試料溶液とした。

(3) PAHs 分析

得られた試料溶液をガスクロマトグラフ/タンデム型質量分析計(GC/MS/MS、島津製作所製)で分析した。測定対象は PAH 29 成分(2 環:ナフタレン、メチルナフタレン類;3 環:アセナフチレン、アセナフテン、フルオレン、フェナントレン、アントラセン等;4 環:フルオランテン、ピレン、ベンゾ[*a*]アントラセン、クリセン等;5 環:ベンゾ[*b*]フルオランテン、ベンゾ[*k*]フルオランテン、ベンゾ[*j*]フルオランテン、ベンゾ[a]ピレン、ジベンゾ[*a,h*]アントラセン等;6 環:インデノ[*1,2,3-cd*]ピレン、ベンゾ[*ghi*]ペリレン等)とした。

(4) 加熱装置の温度モニタリング

各 HTP デバイスおよび紙巻たばこ喫煙時の加熱・燃焼温度を熱電対によりリアルタイムでモニタリングし、最高到達温度を記録した。

C. 結果及び考察

1. たばこ葉重量および燃焼・加熱温度の比較

たばこ 1 本あたりのたばこ葉重量は、紙巻たばこが 300~700 mg であったのに対し、加熱式たばこは 250~310 mg であり、約 300 mg 以上の差が確認された。燃焼・加熱温度については、紙巻たばこが約 810℃に達したのに対し、HTP は 250~366℃の範囲にとどまり、約 500℃近い差が確認された。各デバイスの最高到達温度を Table 1 に示す。

2. 加熱式たばこと紙巻たばこの PAHs 量の比較

HTP 300 測定と紙巻たばこ 115 測定における主流煙中 PAHs 量を比較した結果、総 PAHs 量は、紙巻たばこで 2,000~7,800 ng/本であったのに対し、HTP では 17~280 ng/本であり、紙巻たばこが有意に高値を示した(p<0.001)。また、ナフタレン、ベンゾ[*a*]アントラセン、ベンゾ[*k*]フルオランテン、ベンゾ[*j*]フルオランテン、ベンゾ[*a*]ピレン、ジベンゾ[*a,h*]アントラセン、ベンゾ[*ghi*]ペリレンといった各成分についても、いずれも紙巻たばこが有意に高値を示した（いずれも p<0.001）（Table 2）。

3. 加熱式たばこ製品間(ブランド間)の比較

HTP 各ブランド(IQOS ILUMA、glo Hyper PRO、Ploom X ADVANCED)の主流煙中 PAHs 量を比較した結果、総 PAHs 量は glo Hyper PRO において最も高値を示し、IQOS ILUMA と Ploom X ADVANCED よりも有意に高かった(p<0.001)。ベンゾ[*a*]ピレンについても同様に、glo Hyper PRO が IQOS ILUMA および Ploom X ADVANCED よりも有意に高値を示した(p<0.001)。

デバイス別の加熱温度を比較すると、IQOS ILUMA(366℃)、glo Hyper PRO(268℃)、Ploom X ADVANCED(254℃)の順に高く、加熱温度が最も高い IQOS ILUMA で PAHs 量が最大となることを当初は推定していた。しかしながら、本研究の結果からは、必ずしも加熱温度の上昇と PAHs 生成量とが直接的に相関しないことが示唆された。こ

れは、たばこ葉のブレンド、加熱方式(誘導加熱・ブレード加熱・外周加熱)、香料添加物の組成等、加熱温度以外の複合的要因が PAHs 生成に寄与している可能性を示している。

4. 過去製品と現行製品の PAHs 量比較

各メーカーの初期モデルと現行モデルにおける総 PAHs 量を比較したところ、IQOS(plus 2.4 → ILUMA)および glo(初代→Hyper PRO)については PAHs 量の低減が認められた。一方で、Ploom 製品については、Ploom TECH から Ploom X ADVANCED への世代交代に伴い、総 PAHs 量が最大で約 7 倍上昇したことが確認された。

この上昇の主要因として、Ploom の加熱方式が低温加熱型の Ploom TECH(約 30℃)から、高温加熱型の Ploom X 系列(約 250℃)へと大幅に変更されたことが挙げられる。すなわち、HTP は販売開始後も製品開発に伴い加熱方式や加熱温度が変更され、その結果として有害化学物質量が必ずしも低減されるわけではなく、むしろ世代交代によって増加する場合があることが本研究により明らかとなった。HTP の製品世代別 PAHs 量比較を Table 3 に示す。

D. 考察

本研究では、現行販売中の HTP 80 銘柄および紙巻たばこ 20 銘柄を対象に、主流煙中 PAHs 29 成分の一斉分析を行い、銘柄間・メーカー間・販売時系列での比較を実施した。

第一に、HTP と紙巻たばこの比較において、HTP は総 PAHs 量および各成分とも紙巻たばこより有意に低値を示し、大半の HTP 銘柄では 90%以上の低減率が確認された。この要因として、紙巻たばこと比較して HTP では加熱温度が約 500℃低いこと、および 1 本あたりのたばこ葉重量が約 300 mg 少ないことが大きく寄与していると考えられた。PAHs はたばこ葉の燃焼によって発生するため、燃焼が起こらず、かつたばこ葉量の少ない HTP では生成量が抑制されるという結果は機序的にも合理的である。ただし、一部の HTP 銘柄では低減率が 80%程度にとどまり、また近年の紙巻たばこの中にも PAH 量が抑制された製品が見られることから、「90%低減」という表現が全銘柄に一律に当てはまるものではないことに留意する必要がある。これは、PMI が報告する平均 90%低減[1]を、特定の物質群および特定の参照たばこに限定された結果として正確に理解する必要があるとした独立研究の指摘[3,4]とも整合する。

第二に、HTP ブランド間の比較では、加熱温度が中程度の glo Hyper PRO において総 PAHs 量が最も高値を示し、加熱温度が最も高い IQOS ILUMA は中間的な値を示した。この結果は、PAHs 生成量が加熱温度のみによって決定されるわけではないことを明示しており、加熱方式の違い(誘導加熱・ブレード加熱・外周加熱)、たばこ葉のブレンド、保湿剤や香料の組成、デバイス内部での酸素供給状況など、複数の要因が複雑に関与している可能性が示唆される。今後はこれらの因子と有害化学物質生成量との関係を詳細に解析することが課題である。

第三に、過去製品と現行製品との比較から、HTP は販売後の製品開発によって有害化学物質量が必ずしも一方向に低減するものではないことが明らかとなった。特に Ploom では、加熱方式の根本的な変更により総 PAHs 量が約 7 倍に上昇しており、消費者がブランドや製品名のみでリスクを判断することの危うさを示唆する結果である。たばこ産業側が当初公表する「有害成分 90%低減」という表現は、特定の比較対象・特定の世代の製品に限られた相対値であり、後続製品にも同じ低減率がそのまま適用されるわけではない点を、規制および消費者教育の観点から明確に発信する必要がある。

以上より、HTP に関する有害化学物質量の評価は、現行販売中の全銘柄を対象とした網羅的な分析を継続的に実施し、製品の世代交代に伴う変化を追跡することが不可欠である。本研究で構築した PAHs 29 成分一斉分析法は、こうした継続的モ

ニタリングの基盤として有用であると考えられる。

E. 結論

1.現行販売中の HTP 80 銘柄および紙巻たばこ 20 銘柄を対象に主流煙中 PAHs 29 成分の一斉分析を行い、HTP は紙巻たばこと比較して総 PAHs および各成分量とも有意に低値であることを示した($p<0.001$)。

2.大半の HTP 銘柄で紙巻たばこ比 90%以上の PAHs 低減率が確認されたが、一部の銘柄では低減率が 80%程度にとどまる事例も認められた。

3.HTP ブランド間の比較では glo Hyper PRO で総 PAHs 量が最も高く、加熱温度と PAHs 生成量とは必ずしも相関しないことが示唆された。

4.過去製品と現行製品の比較では、IQOS および glo で低減が認められた一方、Ploom では加熱方式変更に伴い総 PAHs 量が最大約 7 倍に上昇しており、HTP は販売後に必ずしも有害化学物質量が低減するわけではないことが明らかとなった。

5.HTP の世代交代に伴う有害化学物質量の変動を継続的にモニタリングする必要があり、本研究で確立した PAHs 一斉分析法はそのための基盤として活用可能である。

E 参考文献

[1] Schaller JP, Keller D, Poget L, et al. Evaluation of the Tobacco Heating System 2.2. Part 2: Chemical composition, genotoxicity, cytotoxicity, and physical properties of the aerosol. Regul Toxicol Pharmacol. 2016;81 Suppl 2:S27-S47.

[2] Mallock N, Böss L, Burk R, et al. Levels of selected analytes in the emissions of "heat not burn" tobacco products that are relevant to assess human health risks. Arch Toxicol. 2018;92(6):2145-2149.

[3] St.Helen G, Jacob III P, Nardone N, Benowitz NL. IQOS: examination of Philip Morris International's claim of reduced exposure. Tob Control. 2018;27(Suppl 1):s30-s36.

[4] Ghazi S, Song MA, El-Hellani A. A scoping review of the toxicity and health impact of IQOS. Tob Induc Dis. 2024;22(June):97.

[5] 稲葉洋平, 牛山明. 加熱式たばこ製品の有害性. 保健医療科学. 2020;69(2):144-152.

[6] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum. 2010;92:1-853.

[7] Vu AT, Taylor KM, Holman MR, Ding YS, Hearn B, Watson CH. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the mainstream smoke of popular U.S. cigarettes. Chem Res Toxicol. 2015;28(8):1616-1626.

[8] 稲葉洋平(研究代表者). 加熱式たばこなど新たなたばこ製品の成分分析と受動喫煙による健康影響の研究. 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(21FA2001). 令和 3-5 年度.

.

2. 学会発表

1. 稲葉洋平、杉田和俊、内山茂久、戸次加奈江、楠瀬翔一、鳥羽陽、牛山明. 国内で販売される加熱式たばこ主流煙の多環芳香族炭化水素類の分析結果と加熱温度との関連性の評価. 第 85 回分析化学討論会. 愛媛. 2025.5.30-31. Web 要旨集.

2. 南村紬, 稲葉洋平, 三宅祐一. 加熱式たばこ主流煙中の PAHs・ハロゲン化 PAHs の含有実態調

査と未知成分推定．第 33 回環境化学討論会．山形．2025.7.15-18．Web 講演集.

3. 齋藤みのり, 内山茂久, 稲葉洋平, 金勲, 小倉裕直, 牛山明, 林基哉, 篠原直秀．拡散サンプラーを用いた仮設住宅の空気汚染調査―新築, 既存住宅との比較―. 第 33 回環境化学討論会. 山形. 2025.7.15-18．Web 講演集.

4. 内山茂久, 戸次加奈江, 高口倖暉, 江口哲史,稲葉洋平, 磯部友彦, 中山祥嗣．拡散サンプラー PSD-BPE/DNPH，PSD-DBA を用いる空気中二酸化窒素の同時分析．第 33 回環境化学討論会．山形．2025.7.15-18．Web 講演集.

5. 内山茂久, 堀田哲男, 稲葉洋平, 小倉裕直, 磯部友彦, 中山祥嗣．石英繊維フィルターとアクティブカーボンビーズを用いる空気中吸着性有機フッ素化合物（AOF）の分析．第 33 回環境化学討論会．山形．2025.7.15-18．Web 講演集.

6. 内山茂久、堀田哲男、稲葉洋平．石英繊維フィルターと粒状活性炭を用いるタバコから発生する吸着性有機フッ素化合物（AOF）の分析．日本分析化学会第 74 年会．北海道．2025.9.24-26. Web 要旨集.

7. 稲葉 洋平、内山 茂久、戸次加奈江、楠瀬 翔一、牛山 明．加熱式たばこはニコチン依存性が低いのか？たばこ葉から主流煙への移行率からの評価．第 84 回日本公衆衛生学会総会．静岡．2025.10.29-31.講演集 p585.

8. 稲葉 洋平、内山 茂久、戸次加奈江、楠瀬 翔一、牛山 明．電子たばこ主流煙に含まれる多環芳香族炭化水素類、一酸化炭素の分析．第 62 回全国衛生化学技術協議会年会．群馬．2025.11.6-7. 同講演集 p232-233.

9. 稲葉洋平、杉田和俊、内山茂久、戸次加奈江、楠瀬翔一、三宅祐一、鳥羽陽、牛山明．加熱式たばこ主流煙中 PAHs の銘柄差・ブランド差および過去製品との時系列的変化. 日本薬学会第 146 年会．大阪．2026.3.27-29．Web 講演集．.

10. 稲葉洋平、大和浩、緒方裕光、楠瀬翔一、戸次加奈江、牛山明．「有害物質 90％削減」とニコチン依存の乖離― 加熱式たばこ主流煙ニコチン量と喫煙者曝露の実測評価 ― 第 35 回日本禁煙推進医師歯科医師連盟学術総会. 沖縄. 2026.2.14-15. 同抄録集．P24.

11. 稲葉洋平．成分分析から考える加熱式タバコ― 見かけの低減と依存の継続．薬剤師委員会セッション「新型タバコと禁煙支援 ～薬剤師の視点で考える～ 」第 19 回日本禁煙学会学術総会. 大宮．2025.11.29-30. PDF 抄録集 p52.

G．知的財産権の出願・登録状況

特になし

Table 1 各たばこ製品の最高到達温度

製品名	最高到達温度	加熱方式
紙巻たばこ	810 ℃	燃焼
IQOS ILUMA	366 ℃	誘導加熱
glo Hyper PRO	268 ℃	ブレード加熱
Ploom X ADVANCED	254 ℃	外周加熱

Table 2.HTP と紙巻たばこの主流煙中 PAHs 量比較(中央値の概要)

成分	HTP (n=300)	紙巻たばこ (n=115)	有意差
総 PAHs (ng/本)	17~280	2,000~7,800	p<0.001
ナフタレン	HTP < 紙巻	(高値)	p<0.001
ベンゾ[*a*]アントラセン	HTP < 紙巻	(高値)	p<0.001
ベンゾ[*k*]フルオランテン	HTP < 紙巻	(高値)	p<0.001
ベンゾ[*j*]フルオランテン	HTP < 紙巻	(高値)	p<0.001
ベンゾ[*a*]ピレン	HTP < 紙巻	(高値)	p<0.001
ジベンゾ[*a,h*]アントラセン	HTP < 紙巻	(高値)	p<0.001
ベンゾ[*ghi*]ペリレン	HTP < 紙巻	(高値)	p<0.001

Table 3. HTP 各ブランドにおける過去製品と現行製品の総 PAHs 量比較

ブランド	過去製品	現行製品	PAHs 量の変化
IQOS	plus 2.4	ILUMA	低減
glo	初代 glo	Hyper PRO	低減
Ploom	Ploom TECH	X ADVANCED	約 7 倍上昇