

特集：受動喫煙

受動喫煙の物理化学

大久保千代次（生理衛生学部）

I. はじめに

受動喫煙は、たばこの燃焼部から自然燃焼して立ち登る、紫煙とも呼ばれる副流煙 (sidestream smoke) と喫煙者の口元へ吸い込まれた煙 (主流煙; mainstream smoke) が、口腔や肺など気道を介して再び吐き出された煙 (呼出煙; exhaled smoke) とが入り混じった剰余煙 (secondhand tobacco-smoke) あるいは環境たばこ煙 (environmental tobacco smoke; ETS) に、非喫煙者が自らの意志に反して、あるいはそれと無関係に曝されて吸煙を余儀なくされている状態を意味している。したがって、喫煙者の喫煙を自らの嗜好でたばこ煙を吸うので active smoking と呼ぶのに対比して、非喫煙者の受動喫煙は passive smoking あるいは involuntary smoking, involuntary exposure to smoke, inhalation of ETS と英語では表現され、日本語では、間接喫煙、二次喫煙、面前喫煙、迷惑喫煙等々と呼ばれている。

たばこ煙の発生に関与する物理・化学的要因は多種多様であり、一つ一つの要因が相互に関連し合って大変複雑であるが、大きく2つに分けられる^{2,3)}。まず第1にたばこ側の要因がある。材料となる葉たばこの種類やたばこの製造方法で葉たばこ中に含まれる成分が変化するため発生するたばこ煙の性状も異なる。シガレットであれば巻紙の性質や使用するフィルターの種類によっても発生するたばこ煙の性状は違う。第2の要因に喫煙者の喫煙様式がある。吸煙頻度、吸煙速度、吸煙服数等でたばこ燃焼部の温度、酸素供給量、燃焼速度が異なり、発生するたばこ煙の物理・化学的性状も変化する。

本号の特集テーマである受動喫煙時に問題となる ETS の大部分が主流煙ではなく副流煙に起因すること、さらには主流煙と副流煙の間には種々の物理・化学的相違があることなどが分かっている。よって、本章ではこれらの関係を中心に解説を試みたい。

II. たばこ煙成分に関与する因子

1. 葉たばこ

たばこ植物はナス科の植物で、親戚筋にはトマトやじゃがいもがある。たばこ喫煙用に栽培されているのは *Nicotiana* 属に属する *Nicotiana tabacum* L. である。たばこの代表的な成分である nicotine は、この植物の根で合成される alkaloid であり、根以外では合成されない。それ故、施肥との関係が深く、窒素肥料を多めにすると根が大きく丈夫に育つため nicotine を多く含む葉たばこが出来るとし、控え目に与えると逆に nicotine の少ない葉ができる。近年の喫煙と健康障害への認識の高まりから、低 nicotine のたばこ開発が盛んである。その結果、発展途上国産の葉たばこに世界中のたばこ会社が注目している。発展途上国では粗放農業が一般的なため、畑はやせているし、無肥料栽培に近い。つまり葉たばこ中の nicotine が大変少ない。これが低 nicotine 用の葉たばこ原料として注目を集める事となった。思わぬ効用と言えよう。余談だが、研究用に nicotine を含まないたばこが必要な時にはトマトに接ぎ木して得られた葉たばこを使用している。トマトの根から nicotine は合成されないの、外観は普通のたばこの葉であるが、nicotine を含むことはない。この逆に、たばこの茎にナスを接ぎ木すると nicotine を含んだ変なナスが取れることになる。本論に戻るが、たばこ植物の alkaloids にはその他に nor-nicotine, anabasine 等の第2級 amine (alkyl基を2つ持つ amine) も少量だが根で合成され、葉たばこの成分として存在している。

一般的に栽培されるたばこの品種は、大別して黄色 (Bright, 別名 Virginia) 種, Orient (別名 Turkish) 種, Burley 種, 日本の在来種の4種がある。現在では、複数種の葉たばこを、その産地や、葉の性質など用途に分け、約40分類されたものをブレンド (葉組) して製品化する。製造過程で数年間、乾燥したり発酵させ

表1 研究用標準葉組 (ケンタッキー大学)⁴⁾

黄色種	葉身	40.1%
黄色種	中肋	14.2%
パーレー種	葉身	24.9%
オリエント種 (トルコ種)	全葉	11.6%
メリーランド種	葉身	1.1%
グリセリン		2.8%
砂糖		5.3%
水分		12.0%

て「熟成」させるが、この間に広範囲な化学反応が起きる。同一品種でも栽培される地域の気候（日照、気温、雨量等）や風土によって、さらには年毎の作柄によっても葉たばこの化学成分は変化する²⁾。例えば、同一銘柄でも成分は毎年違ふし、同じ黄色種でも国内で栽培されたものとアメリカの Virginia 州で栽培されたものでは品質が異なり、日本の気候風土に合うように改良しても本場アメリカ産には及ばないと言う。

たばこを研究する場合、対象となる製品が年毎に多少ながら成分が異なることは比較を行う時に大変都合が生じる。そこで、アメリカでは国際比較を目的とした基準シガレット；Kentucky Reference Cigarette が、ケンタッキー大学で製造され提供されている。そのシガレットの組成を表1に示す⁴⁾。

近年流行の低 tar・低 nicotine シガレットとして、シートたばこ（homogenized あるいは microflake たばことも呼ばれている）が良く用いられるようになった。元来は製品生産工程から出るクズの原料葉たばこを、シート（紙；sheet）状に再製したもので、製品コスト低減化を目的に利用されたが、この再製工程で nicotine を低減したり、不必要な成分をある程度除去できることから低 nicotine・低 tar の有力な原料をして見直されている。

2. 添加物

たばこには葉たばこ以外に種々の添加物が含まれており、多くはたばこに風味を与えたり、保湿を目的としている。巻上済のたばこに10%前後の水分を保持させるように重量の3%前後の glycerin の他 propylene glycol や diethylene glycol, butylene glycol 等の多価アルコールが保湿剤として加えられている。この他たばこに風味を加える目的で甘草、ぶ

どう糖、果糖、ラム酒、ウイキョウ、蜂蜜や糖蜜等が添加されている^{5,6)}。近年流行の低 nicotine・低 tar の有力な原料をして見直されているシートたばこ等を使用したいいわゆる超低 tar シガレットには、nicotine が少ない分を香料や糖を新たに添加したり、添加量を多くした製品を販売していることが推察される分析結果が報告されているが⁷⁾、その詳細は後述する。喫煙の過程でこれ等添加物の熱分解産物がたばこ煙中に移行することが予想されるが、企業秘密として公開されていないため、どのような物質を添加しているのかその詳細は明らかではない。現在では約100種類の天然あるいは非合成化合物を使用していると言う。

3. 巻紙

巻紙は亜麻からとった高級パルプで造られるが、増剤として炭酸カルシウム (CaCO_3) を含んでいる。さらに巻紙が不完全燃焼して灰が黒化するのを防ぐように、あるいはたばこの灰に巻紙の灰がよく付着し、灰が喫煙者の服に落ちないように種々の工夫がされている。このような目的で磷酸アンモニウム ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)、炭酸マグネシウム (MgCO_3)、炭酸グアニジン ($(\text{NH}_2\text{C}(\text{:NH})\text{NH})_2\text{CO}_3$) および酒石酸カリウム ($\text{K}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) が用いられて来た⁸⁾。その他肉眼では見えないが巻紙には小さな孔があけてある。この孔の大きさや密度により喫煙時の通気抵抗は変化すると共に、この孔から空気が流入するため主流煙へ移行するたばこ煙成分量も変化する。次に説明する有孔フィルターと同じ役目を果たしている。

4. フィルター

現在販売されているほとんどのシガレット銘柄がフィルター付である。これは、主流煙中へ移行する tar, nicotine, 一酸化炭素量を減ずる目的や、メントール等の香り付けを目的として使用されている。

初めてのフィルター付シガレットは米国から昭和6年に発売された「パリアメント」であるが、その当時は形態や品質も良くなり発売中止となった。戦後昭和27年に「ケント」が再登場して、これから世界的に広まった。日本では昭和32年に「ホープ」の試験的発売に始まり、昭和35年の「ハイライト」の発売から本格的なフィルター付シガレットの時代に入っている。

フィルターはその材質と形態によって分類されるが、

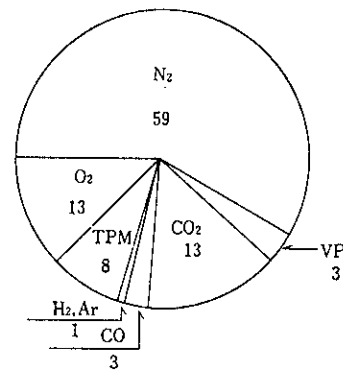
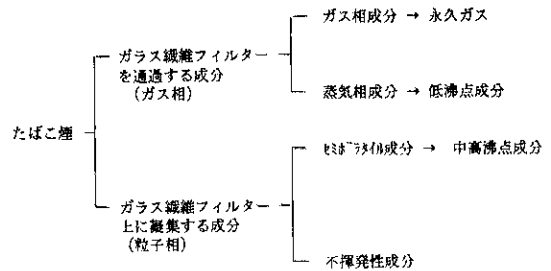
材質からみると

- ①アセテート・フィルター：アセテート繊維の束を棒状に巻上げたもので、世界各国で使用されているフィルターの大部分はこのアセテート・フィルターである。
- ②バルブ・フィルター：日本独自のフィルターで、原料としてバルブを使用しこれを短繊維状にしたもので、アセテート・フィルターに比べてニコチンやタールの濾過率が高く、「わかば」に用いられている。
- ③メンソール・フィルター：アセテート・フィルターに香料としてメンソールを添加したもので、「サムタイム」、「ミスタースリムメンソール」等に用いられている。
- ④チャコール・フィルター：アセテート・フィルターに椰子殻活性炭を添加したもので、ガス吸着性にすぐれ、nicotine や tar の濾過率が高い。平成2年度の日本たばこ産業（株）の販売実績上位5品目は「マイルドセブン」、「マイルドセブン・ライト」、「セブンスター」、「キャスター・マイルド」、「キャビン・マイルド」であるが、全てチャコール・フィルター付シガレットである。チャコール・フィルターは日本人好みのフィルターと言えよう。しかし、諸外国にこのような好みの傾向は見当たらない。

次に、形態からみると

- ①プレーン・フィルター：通常用いられているアセテート・フィルター等がその代表的なもので、単一の素材でできており、世界的には最もよく用いられている。
- ②加香フィルター：上述した「ミスタースリムメンソール」のようにフィルター部に香料などを添加している。
- ③多重フィルター：フィルターが「マイルドセブン」のようにアセテート・フィルターとチャコール・フィルターが二重構造になっているものや、「キャビン」のように三重構造になっているものがある。
- ④有孔フィルター（ventilatedあるいはperforated filter）：フィルターの円周に沿って1列あるいは複数列の小孔がけられており、吸煙時にこの孔から空気が流入してたばこの燃焼量が低下すると共に、燃焼温度の低下によって発生する一酸化炭素を低下させる効果がある。「パートナー」、「ジャスト」、「カレント」、「ジョーカー」は1列、米国の「Now」は4列、「Carlton

表2 たばこ煙成分の分類⁸⁾



N₂；窒素，O₂；酸素，TPM；粒子相
H₂；水素，Ar；アルゴン，CO；一酸化炭素
CO₂；二酸化炭素，VP；蒸気相

図1 たばこ煙の重量から見た成分組成⁹⁾

70」は7列の孔があけてある。

5. 喫煙条件

シガレットの主流煙の組成を表2⁹⁾および図1に示す⁹⁾。たばこが燃焼して発生する粒子相物質およびガス相物質の物理・化学的性質は

- 1) シガレットの巻紙，たばこ葉の成分とその燃焼性（たばこの種類，水分含量）
- 2) 燃焼部の温度（喫煙様式，主流煙と副流煙）
- 3) 燃焼部の酸素供給度（喫煙様式，主流煙と副流煙）
- 4) 燃焼速度（喫煙様式，主流煙と副流煙）

などの要因により変化するため，大変複雑で計測が困難である。これらの要因は，たばこ煙発生時の葉たばこの熱分解，熱合成，発生ガスの再液化，凝縮等といった変化を支配する。これらの変化が極めて短時間に同時におこり，ある化学物質は熱分解し，ある種の化合物は変化しないまま蒸化するが，大部分の物質は燃焼

帯を通過する空气中酸素によって燃焼してしまう。

たばこ煙中の代表的成分である nicotine は、実験的に単品のまま加熱すると 400℃ 以上で熱分解が始まる。600℃ では全体の約 3 分の 2 が myosmine および 3-vinylpyridine に分解され、700℃ ではほとんどが 3-vinylpyridine, 3-methylpyridine, pyridine に分解され、800~900℃ では quinoline, naphthalene, benzonitril などに完全に分解される³⁾。しかし、喫煙時、葉たばこ中に存在する nicotine は、燃焼部の最高温度が 900℃ 以上を示すにも拘らず¹⁰⁾、熱分解を受けずに主流煙として 17%、副流煙として 24% 合計 41% が nicotine のままでたばこ煙中に移行し、残りの 12.5% は炭酸ガスに酸化され、約 11% が揮発性 pyridine 塩基に分解、そして僅かが中性、酸性粒子成分に変化する¹¹⁾。喫煙による燃焼生成物は、被燃焼物の化学成分のみならず、燃焼部の温度、空気供給率、燃焼速度等の因子でも変化する。換言すれば、喫煙者の喫煙様式（吸煙頻度、吸煙時間、吸煙容量）によってたばこ煙の化学成分は変化してくる。大変複雑である。

各個人によって喫煙様式は大きく異なるので、たばこ煙の分析や比較のために、ISO 等で国際的な喫煙条件が定められており、わが国でも平成元年の官報で喫煙条件を規定しており¹²⁾、これに従って機械による人工的喫煙操作を行ってシガレット煙を捕集・分析し、シガレット煙中の nicotine や tar 量を公表している。シガレットおよび重量 1.5g 以下の小型葉巻の標準喫煙条件は

吸煙容量：1 服について 35ml

吸煙時間：1 服について 2 秒間

吸煙頻度：1 分間に 1 服

吸煙の長さ：フィルターの有無に拘らず 30mm（米国では 23mm あるいはフィルター + 3 mm）

であり¹³⁾、これより大型葉巻では

吸煙容量：1 服について 20ml

吸煙時間：1 服について 1.5 秒間

吸煙頻度：40 秒間に 1 服

吸煙の長さ：フィルターの有無に拘らず 33mm

である¹⁴⁾。パイプの標準喫煙条件として最も利用されているのは、

1 g のたばこをパイプのボウルに詰め

吸煙容量：1 服について 50ml

吸煙時間：1 服について 1 秒間

吸煙頻度：12 秒間に 1 服である¹⁵⁾。

なお、本章では、ほとんどの喫煙者がシガレット喫煙をするので特に断わらない限り種々の数値はシガレットを対象としている。

近年シガレット 1 本当りの nicotine や tar 等の含有量低減化に伴い喫煙者の吸煙行動は変化している。nicotine が低下した分を量で補うように、吸煙頻度は多く、吸煙容量も多く且つ深く吸煙したり¹⁶⁾、有孔フィルターであればその孔を指や唇で塞いで吸煙していると指摘されている¹⁷⁾。この結果、喫煙者は人工的に標準喫煙条件で分析され公表される nicotine 含有量よりも多量の nicotine、一酸化炭素、tar 等を取り込んでいることが推察される^{7,18)}。喫煙者が多く吸う分だけシガレット 1 本当りの副流煙発生量は減少することになり、受動喫煙者にとっては有難いことになるが、実際は他の要因も考慮する必要がある。有孔フィルターシガレットの孔は主流煙の低 nicotine・低 tar・低一酸化炭素化には寄与するが、副流煙中成分の発生量には関与せず、通常のフィルター付シガレットとほとんど変わらない。ある成分では逆により多くの副流煙を発生していることが分かっている^{19~23)}。その一例を示そう。米国で市販されている両切シガレット（主流煙 nicotine 含有量 20.1mg/本）、2 種類のフィルター付シガレット（同 1.5mg/本および 0.81mg/本）、有孔フィルター付シガレット（0.15mg/本）に関して各種有害物質発生量の主流煙および副流煙の比較を表 3 に示した²⁰⁾。主流煙中の tar, nicotine, 一酸化炭素、二酸化炭素、catechol, benzo [a] pyrene, 各種 nitosamine 類の成分量は両切シガレット（表中 NF）あるいは、フィルター・シガレット（表中 F1, F2）に比べて有孔フィルター付シガレット（表中 VF）で著減しており、上述したように喫煙様式を変えない限り喫煙者にとって明らかに減害シガレットと言えよう。しかし副流煙中の上記各物質の発生量は通常のフィルター付シガレットに比較して幾分減少傾向にあるものの物質によっては逆に増加しているものもあることが分かる。実際には低 nicotine 化が喫煙本数をもたらし、副流煙の発生がその分多くなるし、有孔フィルターの出現は受動喫煙者に恩恵を与えることは無いようである。

表3 各種シガレットにおけるたばこ煙有害成分の主流煙と副流煙の発生量比較²⁰⁾

たばこ煙成分	たばこ煙の種類	シ NF	ガ F1	レ F2	ット VF
タール (ng)	主流煙	20.1	15.6	6.8	0.9
	副流煙	22.6	24.4	20.0	14.1
ニコチン (ng)	主流煙	2.04	1.50	0.81	0.15
	副流煙	4.62	4.14	3.54	3.16
一酸化炭素 (ng)	主流煙	3.2	13.7	9.5	1.8
	副流煙	8.3	36.6	33.2	26.8
二酸化炭素 (ng)	主流煙	50.0	50.1	36.6	10.4
	副流煙	567	492	429	367
カデコール (μg)	主流煙	41.9	71.2	28.9	9.1
	副流煙	58.2	89.9	69.5	117
ベンツピレン (ng)	主流煙	26.2	17.8	12.2	2.2
	副流煙	67.0	45.7	51.7	44.8
アンモニア (μg)	主流煙	76.0	19.4	34.0	40.0
	副流煙	524	893	213	236
NDHA (ng)	主流煙	31.1	4.3	12.1	4.1
	副流煙	735	597	611	685
NPIP (ng)	主流煙	5.8	n.d.	14.2	n.d.
	副流煙	8.8	19.0	19.8	4.8
NPYR (ng)	主流煙	84.5	10.2	32.7	13.2
	副流煙	117	139	233	234
NNN (ng)	主流煙	1007	488	273	86.3
	副流煙	857	307	185	338
NNK (ng)	主流煙	425	180	56.2	17.3
	副流煙	1444	752	430	386
NAT, NAB (ng)	主流煙	128	744	524	102
	副流煙	783	327	125	683

NF;両切シガレット、F1、F2;通常のフィルター付シガレット、VF;有孔フィルター付シガレット

古い報告であるが、我が国で行ったシガレットの喫煙調査によると吸煙時間は平均2秒、吸煙頻度は平均35秒に1服、吸殻の長さは両切シガレットで38.5mm、フィルター付シガレットで44.6mm、総平均で44.5mmであった²⁴⁾。標準喫煙条件にくらべ吸煙頻度が多く、吸殻の長さが長いことが分るが、上記の我が国の平均値に吸煙容量を1服が35mlであるとして加え、この条件と標準喫煙条件の場合について、ハイライトの主流煙中 nicotine および tar を比較した結果、標準喫煙条件に比べて12%低い値を示した²⁴⁾。現在の日本人はどのような喫煙行動を行っているのかは少数例の調査は散見されるものの実態は明かではない。余談であるが、一般的に日本人は吸殻を最も長く残すが、ヨーロッパ人は一般に根元まで吸うので吸殻の長さは平均20~25mm、米国はこれに比べて長く平均30~32mmであ

る²⁵⁾。何故このような差があるかは定かではないが、日本のシガレットの価格は国際的には安価であり、これが大きな要因であることは間違いない。禁煙運動家の中には、価格引き上げによる禁煙運動を展開しようとする方がおられる。価格上昇で禁煙する人はそれでよいが、多くの禁煙者は実行できないと思われる。そして、価格が上昇すればその分根元まで深く吸ってしまう危険性が大である。主流煙中へのたばこ煙成分の移行は、根元まで吸うと指数関数的に増加することが分かっている。健康影響を全体からみると逆効果ではないかと危惧している。

本論に戻るが、喫煙様式によって主流煙成分の発生量は変化する。その概略を以下に記すと²⁵⁾、

- ①吸煙間隔をあけて、ゆっくり吸うと nicotine が約30~40%、tar は約35~45%減少する。
- ②1服あたりの吸煙容量が増加すれば、当然 nicotine も tar 量も増加する。
- ③たばこ中に含まれる水分が少なくなると nicotine 量が増加する。
- ④吸殻を長く残すと当然 nicotine や tar が減少する。

一方、副流煙の補集装置も考案されている。副流煙は燃焼部から立ち登ってくるため、補集にもさまざま

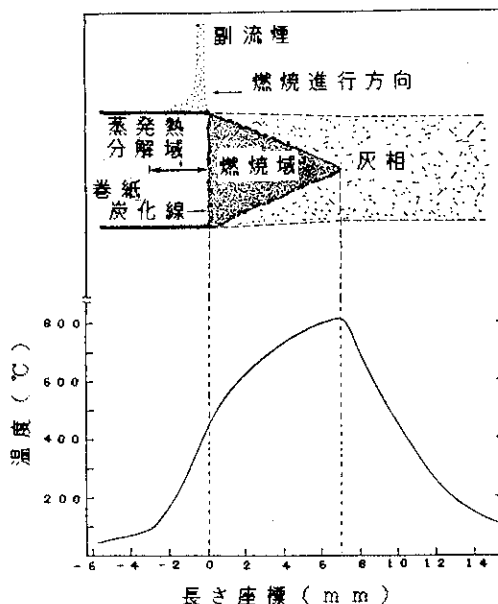


図2 自然燃焼時の中心軸上の温度分布と各反応域との対応²⁶⁾。

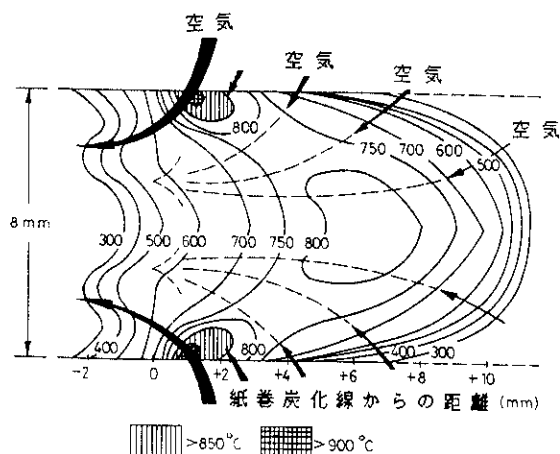


図3 主流煙発生時のシガレット断面における温度分布¹¹⁾。

2秒吸煙中1秒後の状態を示している。吸煙に伴う空気の流れを矢印で、その流量を矢印の大ききで示す。炭化線より1～2 mm 先端部に高温部が存在している。

な工夫が必要である。副流煙の捕集率を上げようと強く吸引すると主流煙の捕集率に影響を与えることになる。現在、人工喫煙装置の上部にガラス製のカバーを流水で冷却しながら、毎分1.5L (25ml/秒) で吸引捕集する方法²⁶⁾、日本では捕集フィルターから50cm離れた直径8cmの円筒内にシガレットを固定し、毎分10Lで吸引捕集する方法²⁷⁾などが報告されているが、国際的に統一された方法はない。

III. たばこ煙の化学的組成

シガレットの燃焼形態は主流煙が発生する間欠的吸煙燃焼と、副流煙が発生する自然燃焼に分けられる。燃焼形態が異なるため、主流煙と副流煙とは発生時の燃焼温度が異なる^{11, 28-29)}。また、主流煙は吸引され喫煙者の口元へ移行する過程でたばこ葉やフィルターにより濾過されるのに対し、副流煙は雰囲気(周囲環境空気)中で瞬時に冷却され希釈される¹¹⁾。その結果、発生するたばこ煙成分の種類は基本的に変わらないものの量的にはかなりの相違がある。図2²⁸⁾に副流煙発生時のシガレットの中心軸上の温度分布と燃焼過程における各反応域との対応を示し、図3¹¹⁾に主流煙発生時の温度分布、図4¹¹⁾に主流煙および副流煙発生時の空気の流れを示した。

副流煙の発生する自然燃焼(燐焼)する過程は大き

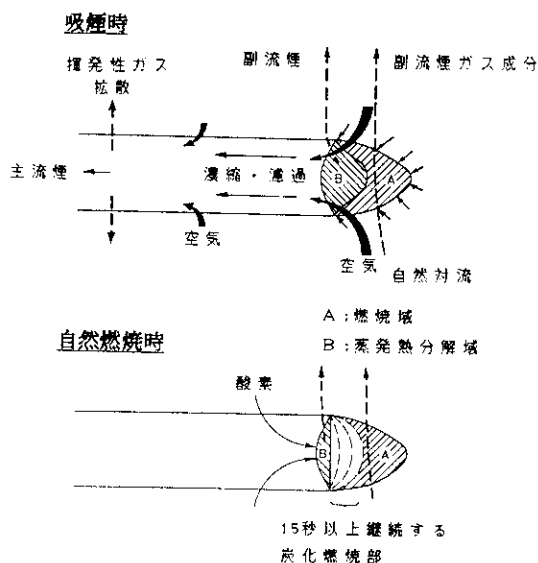


図4 シガレット主流煙および副流煙発生時の熱分解過程¹¹⁾。

く3種の過程に分けられる。まず、たばこが加熱により最初に葉たばこの水分と揮発性成分を蒸発揮散し、引き続いて熱分解を起こし、粒子相とガス相の種々のたばこ煙成分を放出し、炭化残留物を残す「蒸発・熱分解過程」。次に、炭化残留物は拡散で流入して来る空気中の酸素によって酸化され、ガス状の燃焼生成物と灰になる「酸化燃焼過程」。この時発生した熱エネルギーの一部が再び未燃焼たばこに伝達される「熱伝達過程」。この3過程が燃焼サイクルを形成し、燃焼を持続する。

「蒸発・熱分解過程」では、蒸発、熱分解の速度と反応熱、煙の生成と炭化残留物の生成、「酸化燃焼過程」では炭化残留物の酸化速度、この反応に伴う発熱量ならびに酸素の消費と酸化炭素、炭酸ガスの生成、さらにこれらと雰囲気中の酸素濃度との関係、また「熱伝達過程」では熱移動に関する比熱、熱伝導度、熱拡散率等それぞれの要因が、自然燃焼へ複雑に関与している。詳しくは村松²⁸⁾の総説を参照されたい。

副流煙は主としてシガレット燃焼部より3～4 mm 手前、約350°Cの部分から雰囲気へ放出され¹¹⁾、シガレット1本分の約55～75%が副流煙として消費される³⁰⁾。図2に示すように、炭化線から手前6 mmで室温から緩やかに温度は上昇し、100°C付近に達すると急

激に温度が上昇し、450℃付近の変曲点を境に上昇カーブは次第に緩くなって、約800℃で最高温度を迎えた後は指数関数的に温度低下を示す。100℃前後での急峻な立ち上がりは、葉たばこ中に約10%含まれる水分とそれ以外の低沸点成分の吸熱による蒸発・揮散が関与していると推察される。約450℃の変曲点は、シガレットの巻紙の炭化線と対応しており、眼に見える副流煙の粒子のほとんどはこの炭化線より手前の低温側から巻紙を通過して上昇してくる。煙粒子の熱分解による生成温度は、約180～350℃であり、炭化線より低温側の100～450℃の領域は、蒸発—熱分解域と見なすことが出来る。一方、450℃以上では、熱分解後の炭化残留物が緩徐に消耗され、円錐形に近い燃焼コーンを形成し、燃焼温度が最高になるのはコーン頂点の近傍の、炭化残留物が灰化するわずかな手前である²⁸⁾。

一方、主流煙発生時には一定吸煙速度で燃焼するが、吸煙速度の増加に伴い燃焼コーン基部の巻紙炭化線に近い所からの空気流入量が増え(図3)、この部分における燃焼が促進されるので次第にコーンが長大化する。余談だが、禁煙が必要なバスや列車に乗り込む間際に寸暇を惜しんでスパスパと吸煙されている人を見かけることがあると思う。その時のシガレットの燃焼コーンは長大化している。図3に主流煙を発生させた時のシガレット内の二次元温度分布を等温線で示したが、炭化線より左側の蒸発—熱分解域と未反応域での半径方向の温度勾配は、緩やかで、自然燃焼と余り変わらないが、右側の燃焼域における半径方向の温度分布は急勾配となっている¹¹⁾。

この様に、自然燃焼時には燃焼コーンは400～800℃の範囲であり、副流煙発生部位の温度は600℃以下であることが分かる。一方、主流煙発生時には、燃焼コーンの酸素供給が多い巻紙炭化線前方では大部分が850℃以上を示し、燃焼コーンの最高温度は自然燃焼時の最高温度よりも100℃高い900℃以上を示す。しかし、吸煙中の燃焼コーンの中心部は、毎秒100～500度の温度上昇を伴う急激な燃焼が生じるため、酸素供給が間に合わず、無酸素状態を呈する^{11,28-29)}。

1. 主流煙

たばこ煙の化学的組成を分析するためには、標準喫煙条件に従って、特殊なガラス繊維濾紙(Cambridge filter)により主流煙を粒子相(particulate phase)と

ガス相(gas phase)に分けて捕集する。濾紙によって捕集された粒子相はいわゆる tar 分であり、この中に水分と nicotine が含まれた状態では全粒子相物質(total particulate matter: TPM, wet tar)あるいは粗(crude) tar、そしてそれ等を除いた場合を dry tar と呼んでいる。ガス相成分は、濾紙を通過してしまう成分である。Cambridge filter は、0.1μm 以上の粒子を99%以上捕集できるが、低沸点化合物の一部はこのフィルターを通過するため、両相に混在することになる。厳密な意味での物理化学的な分類とは言えない(表2)。たばこ主流煙中の化学物質は現在3,800種以上²⁶⁾あるいは4,700種にも上る指摘されている³¹⁾。

シガレット主流煙の pH は 6 前後で弱酸性を示すが、葉巻およびパイプたばこ等シガレット以外のたばこ主流煙の pH は服数が進むにしたがって、中性から塩基性を示すようになる³²⁾。この pH が、煙中 nicotine の化学的性状を左右する。nicotine は酸性では煙中の酸と塩を形成し安定化するが、塩基性では遊離塩基のまま存在し、極性が低く生体膜を容易に通過する。同量の nicotine を体内に取り入れても、pH の差によりその毒性(効力)は明らかに異なっており、その強度は nicotine が遊離塩基として存在している割合に依存する³³⁾。例えばシガレット主流煙の pH は 6.0 で、葉巻主流煙の pH が 8.0 とすると、主流煙中に存在する遊離塩基の状態にある nicotine の割合は、Henderson の式に従って計算すると pH 6.0 で 1.5%、pH 8.0 では 64% となる。葉巻主流煙中の nicotine は酸と塩を形成している状態よりも遊離塩基として存在している方がずっと多いため、喫煙者の口腔粘膜から直接 nicotine が容易に吸収される。葉巻喫煙者が口腔喫煙だけで満足できるのは、このような背景が隠されている。さらには、粘膜での吸収が容易なために nicotine による刺激が強く、肺に吸入する前に鼻咽頭反射が生じ肺内への吸煙が妨げられることも手伝っている。なお、その分、葉巻やパイプの喫煙者では呼出煙の量が多く、副流煙の発生量も多いことを忘れてはならない³⁴⁾。

2. 副流煙

4,000 種以上にもものばるたばこ煙中成分の内 300～400 の物質については定量的に分析が行われているが、標準喫煙条件に従って捕集した両切りシガレット主流煙と副流煙についての主要成分の分析結果を表

表4 両切シガレット主流煙と副流煙の物理化学的特性に関する比較^{1, 1,35-37)}

	主流煙	副流煙	引用文献
燃焼時間 (秒)	20	550	35
燃焼量 (mg)	347	441	35
粒子数	1.05x10 ¹²	3.5x10 ¹²	1
粒径 (μm)	分布: 0.1-1.0 平均: 0.2-0.25	0.01-0.8 0.15	37
燃焼時の最高温度 (°C)	900>	800<	11
シガレット煙のpH	ガス相: 4.3-4.7 粒子相: 5.2-7.2	8.8-9.3	36

4^{2, 1,35-37)}および表5^{1,38-46)}に示した。

燃焼条件が同一であれば種々のたばこ煙物質の発生量は主流煙より副流煙の方が比率にして1.2~2.3倍多いためであるが、ガス相成分のシアン化水素(HCN)および粒子相成分の有機酸を除くほとんどの成分がこ

の比率を大きく上回っている。

①ガス相成分

ガス相成分には、動物での発ガン性が確認されている種々の nitrosamine 類が存在している。

nitrosamine 類のうち葉たばこあるいはたばこ煙にのみ存在しているものを TSNA (tobacco-specific nitrosamines) と呼んでいる (図5)⁴⁷⁾。葉たばこ中には第3級 amine である nicotine の他に nornicotine, anabasine, anatabine など第2級 amine の alkaloids が存在するが、これらも nitroso 化を受けて TSNA となる。nitroso 化に際し第3級 amine の nicotine は pyridine 核の N-CH₃ が酸化分割し、他の第2級 amine 類は N-H が N=N=O に置換され、それぞれ nicotine は NNK (nicotine-derived nitrosamino ketone) および NNA (nicotine-derived nitrosamino aldehyde), nornicotine は NNN (N'-nitroso nor-

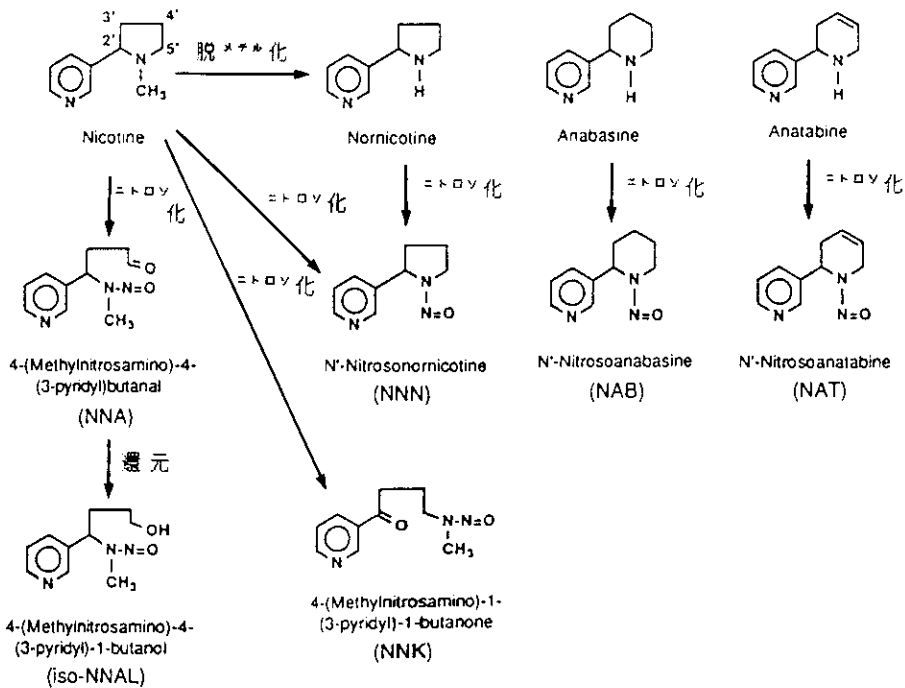
表5 両切シガレット煙中成分の主流煙(MS)の含有量と副流煙(SS)との対比^{1,38-46)}(新鮮たばこ煙)

ガス相成分	主流煙(MS)	SS/MS比	粒子相成分	主流煙(MS)	SS/MS比
Carbon monoxide	10-23 mg	2.5-4.7	Particulate matter●	15-40 mg	1.3-1.9
Carbon dioxide	20-40 mg	8-11	Nicotine	1-2.5 mg	2.6-3.3
Carbonyl sulfide	18-42 μg	0.03-0.13	Anatabine	2-20 μg	<0.1-0.5
Benzene●	12-48 μg	10	Phenol	60-140 μg	1.6-3.0
Toluene	160 μg	6	Catechol	100-360 μg	0.6-0.9
Formaldehyde	70-100 μg	0.1-0.50	Hydroquinone	110-300 μg	0.7-0.9
Acrolein	60-100 μg	8-15	Aniline	360 ng	30
Acetone	100-250 μg	2-5	2-Toluidine	180 ng	19
Pyridine	15-40 μg	6.5-20	2-Naphthylamine●	1.7 ng	30
3-Methylpyridine	12-36 μg	3-13	4-Aminobiphenyl●	4.6 ng	31
3-Vinylpyridine	11-30 μg	20-40	Benz[a]anthracene▼	20-70 ng	2-4
Hydrogen cyanide	400-500 μg	0.1-0.25	Fluoranthracene▼	270 ng	4.8
Hydrazine■	32 ng	3	Benz[a]pyrene▼	20-40 ng	2.5-3.5
Ammonia	50-130 μg	40-170	Cholesterol	22 μg	0.9
Methylamine	11.5-28.7 μg	4.2-6.4	γ-Butyrolactone▼	10-22 μg	3.6-5.0
Dimethylamine	7.8-10 μg	3.7-5.1	Quinoline	0.5-2 μg	8-11
Nitrogen oxide	100-600 μg	4-10	Harman	1.7-3.1 μg	0.7-1.7
N-Nitrosodimethylamine▼	10-40 ng	20-100	N'-Nitrosomononitocotene▼	200-3,000 ng	0.5-3
N-Nitrosopyrrolidine▼	6-30 ng	6-30	NNK▼	100-1,000 ng	1-4
Formic acid	210-490 μg	1.4-1.6	N-Nitrosodienthanolamine▼	20-70 ng	1.2
Acetic acid	330-810 μg	1.9-3.6	Cadmium	100 ng	7.2
Ethene	240 μg	5	Nickel■	20-80 ng	13-30
Propene	190 μg	7.2	Zinc	60 ng	6.7
1,3-Butadiene▼	18-75 μg	3.8-13.3	Polonium-210●	0.04-0.1 pCi	1.0-4.0
Isoprene	70 μg	4.4	Benzoic acid	14-28 μg	0.67-0.95
			Lactic acid	63-174 μg	0.5-0.7
			Glycolic acid	37-126 μg	0.6-0.85
			Succinic acid	110-140 μg	0.43-0.62

●ヒトへの発ガン性がある物質

■ヒトへの発ガン性が疑われている物質

▼動物への発ガン性がある物質

図5 タバコ・アルカロイドのニトロソ化に伴うタバコ由来ニトロソアミンの化学構造⁴⁷⁾。表6 シガレット煙中揮発性 N-nitrosamine の主流煙と副流煙の含有量 (1 本当たり) 対比⁴⁸⁾

シガレット	主流煙				副流煙			
	DMN	MEN	DEN	NPY	DMN	MEN	DEN	NPY
A*	13	1.8	1.5	11	880	8.4	53	300
B*	43	5.9	3.8	22	823	30	8.2	204
D**	5.7	0.4	1.3	5.1	736	10	73	387
E**	8.8	0.5	0.8	8.5	1040	10	83	213
E-1	27	2.2	1.2	33				
F**	14	0.8	7.6	7.6				
F-1	19	1.2	8.3	14				
J (高NO _x)	97	8.0	4.8	42				
J (低NO _x)	20	1.2	2.3	4.1				
黄色種	13.2	<0.1	1.8	8.2				
Burley種	75.9	9.1	2.5	52				

DMN:dimethylnitrosamine, MEN:methylnitrosamine, DEN:diethylnitrosamine

NPY:nitrosopyrrolidine

*:フィルターなし **:フィルターあり

E-1:セルローズ・アセテート・フィルターを付けた場合

F-1:チャーコール・フィルターを付けた場合

nicotine), anabasine は NAB (N'-nitroso-anabasine), anatabine は NAT (N'-nitrosoanatabine) に変化する。そしてその発生量を比較すると副流煙の方が多くの TSNA を発生している⁴⁷⁾。

TSNA 以外の代表的な揮発性 N-nitrosamine 類のシガレット 1 本当たりの発生量を表 6⁴⁸⁾ に示す。シガ

レット A, B, D, E の主流煙中に dimethylnitrosamine (DMN) が 5.7~43ng, methylnitrosamine (MEN) が 0.4~5.9ng, diethylnitrosamine (DEN) が 0.8~3.8 ng, nitrosopyrrolidine (NPY) が 5.1~22ng 検出され、副流煙中には DMN が 680~1040ng, MEN が 9~30 ng, DEN が 8~63ng, NPY が 204~300ng も検出されている。なお、揮発性 nitrosamine の発生量はたばこ葉中の硝酸塩量に依存しており、表中の高濃度の硝酸塩含有シガレットからは低濃度シガレットに比べて主流煙中の nitrosamine が 2~10 倍も発生が観察されている。葉たばこの種類で言えば黄色種より硝酸塩を多く含む Burley 種は多くの nitrosamine を発生することが分かる。さらに、セルローズ・アセテートフィルターの使用によって揮発性 nitrosamine の主流煙への移行は大幅に減少する反面、チャーコール・フィルターにはそれ程の除去効果はない。また、副流煙への移行はフィルターの有無には関係しないこともこの表から明らかである。特に有孔フィルター付シガレットの喫煙者は、「喫煙条件」でも触れたが、このフィルターを使用することにより喫煙者自らは、主流煙からの

nitrosamine の取り込みを大幅に軽減できるが、受動喫煙者はこの恩恵を受けられない^{20,22)}。

このようなことが他の発ガン関連物質、例えばヒトでの発ガン性が確認されている benzene、発ガンの可能性が指摘されている toluene、1,3-butadiene についても同様な事が Brunnemann らによって指摘されている⁴⁹⁾。彼らによると主流煙中の benzene、toluene、1,3-butadiene はそれぞれ 673, 588, 1675 $\mu\text{g}/\text{cig}$ の範囲にあり、副流煙中のそれは 490-840, 1090-1690, 300-470 $\mu\text{g}/\text{cig}$ である。その内容を検討すると、低 tar シガレット主流煙中の benzene、toluene、1,3-butadiene はそれぞれ 5.9, 5.3, 16 $\mu\text{g}/\text{cig}$ と通常フィルター付シガレットの含有量である 48, 58, 60 $\mu\text{g}/\text{cig}$ に比較して明らかな低値を示す反面、副流煙中の benzene、toluene、1,3-butadiene は 345, 758, 205 $\mu\text{g}/\text{cig}$ と通常フィルター付シガレットの発生量である 461, 943, 207 に比較してやや低値を示すにすぎない。その結果副流煙と主流煙の各物質の発生比はそれぞれ、フィルター付シガレットで 11.0, 18.9, 3.8 倍であるのに対して低 tar シガレットでは 58.5, 143.0, 12.8 倍であると言う。比率だけで見ると大変な差がある。

窒素酸化物 (NO_x) の発生量は、4~10 倍副流煙の方が多く、新鮮なたばこ煙中の NO_x はほとんどが一酸化窒素 (NO) であるが、経時的には nitroso 化作用の強い二酸化窒素 (NO_2) に変化していく。窒素酸化物の生成は空気中の窒素と酸素が高熱で生成されるが、この反応は高温ほど生成され、酸素が多い程多く生成されるため、この高温という要因では主流煙が、酸素供給という要因では副流煙がまさっている^{11,29)}。

ammonia は硝酸煙が還元されて生成するが、燃焼温度が低いと ammonia 生成反応は速く進む、しかし高温下では生成された ammonia は直ちに分解されるため、燃焼温度の高い主流煙中の ammonia は分解を受けやすい。さらに主流煙中の ammonia はシガレット中を通過する間に cellulose 中の結合水と置換し減少する。1 本当りに発生する ammonia は主流煙で 50 μg に対して副流煙からは 5300~8500 μg と 106~170 倍にも達している⁵⁰⁾。

シガレットの燃焼は、煙焼を呈する不完全燃焼であるためシガレットに含まれる炭素の約 60% は一酸化炭素と二酸化炭素に変換され、残りの約 40% の多くは炭

化水素などの有機化合物に変換され、一部は炭酸塩となって灰を構成することになる。シガレットからの一酸化炭素、二酸化炭素の生成は図 2 で模式的に示すように、比較的低温域 (200~500 $^{\circ}\text{C}$) における酸素の欠乏した環境空気での熱分解と、比較的高温域 (500~800 $^{\circ}\text{C}$) の燃焼域における炭化残留物の燃焼によるものと大別され、一酸化炭素の一部は炭化残留物の熱分解によっても生成することが分かっている²⁸⁾。主流煙と副流煙の発生量を比較すると、一酸化炭素は 2.5~4.7 倍、二酸化炭素は 8.1~11.3 倍の比率で副流煙の方が多く発生している。その背景として主流煙発生時の燃焼コーンの中心部では無酸素状態が生じるので発生した二酸化炭素は高熱で、 $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ の還元反応がおこって主流煙中の二酸化炭素量が減少すること、副流煙では発生した一酸化炭素の大部分は燃焼部で高温に曝され瞬時的に大気中の酸素と結合して二酸化炭素に変化することが考えられている^{11,29)}。

acrolein や formaldehyde などの刺激性 aldehyde 類も前者が最高 15 倍、後者が最高 50 倍も多く副流煙に含まれており、両者ともその 3 分の 1~2 は粒子相成分中の水分に溶存していると考えられている²³⁾。これらの物質は受動喫煙時の急性影響に関与する⁵¹⁾。面前喫煙時には拡散せず希釈されないままの副流煙に非喫煙者が一過性であるものの、繰り返し暴露され、その時の両者の濃度は作業環境の制限濃度の数十~数百倍に相当する数百 ppm に達すると言う²³⁾。formaldehyde には眼や鼻に対する刺激性を有するのみならず、ラットへの発ガン性も報告されている⁵²⁾。

HCN は葉たばこに含まれるたんばく質が 700 $^{\circ}\text{C}$ 以上で熱分解される時に生成するが、副流煙の燃焼温度である 600 $^{\circ}\text{C}$ 以下では余り生成しない⁵³⁾。この結果燃焼温度が高い主流煙に多く存在することになる。

②粒子相成分

粒子相成分で最も多く含まれる物質は nicotine であり、主流煙中に超低 tar シガレットを除くと 0.8~2.5 mg 含有されている。副流煙中にはこれと比較して 2.6~4.9 倍多く含まれるが、その理由として、大部分の副流煙は約 350 $^{\circ}\text{C}$ 以下で発生するが、nicotine は 600 $^{\circ}\text{C}$ 以下ではほとんど分解を受けないことが挙げられる。さらに、主流煙では葉たばこに含まれる nicotine は水分により水蒸気蒸留されたりや蒸化して分解され

ないまま移行もするが、900℃前後の燃焼コーンを通過する nicotine は熱分解されてしまうことが原因する。

ヒトでの発ガン性が確認されている 2-naphthylamine は 30 倍、4-aminobiphenyl が 31 倍、benzo[a]pyrene が 2.5~3.5 倍、benz[a]anthracene が 2~4 倍、放射性同位体の $^{210}\text{polonium}$ が 1~4 倍も副流煙の方が多く含んでいる。また nitrosamine 類として NNN, NNK, N-nitrosodiethylamine が含まれ、さらに nicotine などの alkaloids や aniline, 2-toluidine などの amines もガス相に含まれる NO_2 により nitroso 化を受け、発ガン性の高い成分に変化する可能性がある¹⁾。 $^{210}\text{polonium}$ は、uranium から radium 最後には $^{206}\text{鉛}$ へ崩壊していく過程で生成する。天然に存在する polonium の中では半減期が 138.4 日と最も長い放射性同位体である。この核種は α 線を出しながら崩壊するため、受動喫煙時に肺に取り込まれた場合の発ガン性も否定できない⁵⁴⁾。

ガス相成分で低 tar シガレット（以下 LTC と略す）における主流煙と副流煙の発生量の関係について説明を行ったが、粒子相成分についても同様な関係が見いだされている。表 7 にはアメリカで市販されている 19 種の主流煙の tar 含有量が 10mg/cig 以下の LTC と 23mg/cig の高 tar シガレット（以下 HTC と略す）の主流煙および副流煙中の各種粒子相成分の発生量を示した²¹⁾。主流煙中の各成分はいずれも HTC の比べて LTC の発生量は明らかに少なく、tar 分が 2~3mg 以下のいわゆる超低 tar シガレットでその傾向は著明である。しかしながら、副流煙について着目すると、粒子相成分で最も量的に多く含まれる nicotine は、LTC の 4 銘柄では HTC よりも多く発生している。動物実験で発ガン促進作用が認められている phenol 類⁵⁵⁾も同様に、LTC の 6 銘柄（その内 2 銘柄が超低 tar シガレット）は HTC よりも数倍も多くの phenol を発生している。さらに発ガン性物質である catechol⁵⁶⁾も LTC の 4 銘柄（そのうち 1 銘柄が超低 tar シガレット）は HTC よりも多く発生していることが分かる。この表で他に興味深い物質がある。それは limonene および pyran-4-one で、limonene はレモンなどの柑橘類の果皮に含まれる terpenes の一つであり、葉たばこ成分の一つでもあるが、これが LTC の 5 銘柄（そのうち 3 銘柄が超低 tar シガレット）が HTC より約 2 倍も多く

発生しており、LTC 製造過程で nicotine 低含有による風味不足を香料添加することで喫煙者の満足感を補っている可能性が示唆される。pyran-4-one は還元糖の熱分解産物であるが、これも LTC の 19 銘柄中 17 銘柄（超低 tar シガレットは全て）が HTC より高値を示しており、上述と同じ理由により製造過程で添加された可能性が高い。なお、どの様な添加物が使用されているかそれぞれ企業秘密とされているためその燃焼過程で発生する種々の物質を推定することは現状では困難である。さらに、現実の喫煙行動を考慮すると喫煙者は低 nicotine 化された分だけ本数でそれを補おうとする傾向があるため¹⁶⁾、その本数が増えた分さらに多くの副流煙が多く発生する。いずれにしても非喫煙者はたばこ煙に曝される機会がより増えるという皮肉なことになる。

最後に pH について触れるが、副流煙中には ammonia が多量に含まれること、有機酸量が主流煙中に比べて少ないことがたばこ煙の pH に大きな相違をもたらしている。即ち、主流煙のガス相の pH は 4.3~4.7、粒子相の pH は 5.2~7.2 で酸性から中性を示すのに対して副流煙の pH は 8.8~9.2 を示し塩基性である³⁶⁾。前述したように nicotine は塩基性では生体粘膜への移行が酸性に比較して極めて容易に行われる。例えば主流煙および副流煙中に存在する nicotine 量が同量であっても、副流煙の方がより強い刺激を非喫煙者に与えることが分かっている⁵⁷⁾。なお、主流煙のガス相が低い pH を示すのは揮発性有機酸が多く含まれることに原因する。

IV. 環境たばこ煙 (environmental tobacco smoke : ETS) の物理化学

環境たばこ煙はたばこ燃焼部から発生した副流煙と喫煙者が主流煙として吸煙の後に吐き出される煙（呼出煙）によって構成されるが、これらの煙が時間経過（加齢：Ageing）して雰囲気と混合・希釈されていく過程で凝集、蒸発するとともに室内であれば壁材による吸着さらにはその壁材物質との化学反応と再度の蒸発等様々な物理・化学的変化が生じる結果⁵⁸⁾、一口に環境たばこ煙と言ってもその物理・化学的様相は時々刻々と大きく変化する^{1,59~62)}。

たばこ煙はエアロゾルであり、エアロゾルはその粒径によって $10\mu\text{m}$ 以上のものを dust、 $10\sim 0.1\mu\text{m}$ のも

表7 各種シガレットのたばこ煙成分量の比較 (上段: 主流煙, 下段: 副流煙)²¹⁾

主流煙成分	主流煙成分中のTar量 ($\mu\text{g}/\text{本}$: 標準喫煙条件)																	
	23	10	10	9	9	9	8	8	7	6	6	5	5	4	3	3	3	2
Limonene	56	22	34	30	15	22	25	28	40	20	16	12	23	19	24	2	4	16
Phenol	73	13	13	17	20	15	15	21	70	31	14	8	20	24	44	1	3	7
o-Cresol	18	8	<1	4	2	7	8	1	3	2	1	<1	2	3	3	2	<1	3
m-Cresol	13	6	12	6	3	5	7	6	5	3	4	1	2	3	3	1	2	4
p-Cresol	22	13	6	17	5	16	19	7	4	3	8	7	10	8	4	6	1	2
Naphthalene	14	1	4	4	8	6	7	7	9	6	9	6	5	4	7	<1	1	4
2,5-Xylenol	20	2	4	4	6	5	6	2	1	4	2	2	1	3	3	<1	<1	2
Guaiacol	28	2	3	4	2	8	2	4	1	<1	4	2	1	3	1	<1	<1	1
Ethylphenol	13	4	3	2	2	5	3	3	1	<1	3	1	1	1	1	<1	1	1
Glycerol	1334	505	634	375	197	365	328	372	451	160	312	184	189	67	84	6	25	21
5-(Hydroxymethyl)furfural	49	14	19	11	6	8	8	11	9	4	9	5	6	2	3	4	<1	1
Catechol	121	36	44	40	19	34	25	33	27	9	25	16	15	19	21	1	4	8
Tricetin	—	55	64	104	30	51	73	88	61	19	76	61	32	18	16	7	9	14
Nicotine	1680	902	1052	695	387	641	655	596	584	216	554	368	343	355	363	86	79	180
Resorcinol	19	7	8	6	5	3	6	8	5	3	4	3	3	3	4	<1	4	3
4-Methylcatechol	14	6	7	5	4	7	3	8	4	4	4	3	2	2	3	<1	<1	2
Hydroquinone	101	36	37	29	21	29	29	38	35	11	27	19	19	21	20	1	5	13
3-Methylcatechol	24	3	3	1	5	6	<1	7	4	<1	2	2	1	1	3	<1	1	3
Pyran-4-one	62	13	12	10	4	10	7	5	8	3	9	7	2	6	5	<1	2	4
Ethylcatechol	45	4	9	2	19	2	4	10	14	7	3	3	5	3	4	<1	1	2
Quinic acid- γ -lactone	142	42	43	29	37	38	31	54	44	21	39	21	26	35	27	3	8	20
Levogluconan	82	22	20	9	26	12	12	35	19	12	18	6	10	18	11	<1	4	9
Neophytadiene	83	19	18	17	18	19	14	20	22	10	19	9	18	11	12	3	4	12
Palmitic acid	156	57	61	52	48	53	46	58	44	24	51	42	33	41	30	16	10	25
副流煙成分																		
副流煙成分	副流煙成分中のTar量 ($\mu\text{g}/\text{本}$: 標準喫煙条件)																	
	23	10	10	9	9	9	8	8	7	6	6	5	5	4	3	3	3	2
Limonene	226	72	65	85	107	89	86	82	467	411	45	45	74	275	405	45	54	404
Phenol	121	94	85	71	111	59	83	56	124	121	78	92	359	261	307	49	44	371
o-Cresol	62	98	56	71	55	84	75	28	63	56	48	81	50	53	52	50	56	64
m-Cresol	62	80	62	50	50	39	52	45	46	30	39	40	57	47	37	46	27	43
p-Cresol	125	57	237	82	58	40	56	63	90	92	143	141	127	57	94	52	80	57
Naphthalene	53	79	73	69	177	117	87	120	170	80	121	69	133	118	90	70	61	113
2,5-Xylenol	60	55	182	182	50	55	44	49	5	30	61	46	54	51	45	46	28	46
Guaiacol	174	242	55	89	139	194	121	70	95	23	117	124	113	98	86	165	45	42
Ethylphenol	112	115	56	41	37	97	96	62	114	77	55	44	94	80	67	146	51	43
Glycerol	1,923	1,963	2,178	1,490	1,435	1,367	1,527	1,090	1,442	1,213	1,268	1,191	1,057	357	571	1,986	487	325
5-(Hydroxymethyl)furfural	83	58	57	61	59	37	45	49	33	41	40	39	34	26	23	42	23	32
Catechol	125	162	158	160	101	73	118	82	86	61	93	106	61	75	66	189	57	46
Tricetin	—	46	28	27	39	39	45	35	35	44	47	22	50	35	39	27	18	53
Nicotine	9,075	9,099	10,461	8,218	9,141	8,154	11,201	6,242	8,946	7,041	8,057	8,137	7,763	7,488	7,644	8,474	6,701	6,928
Resorcinol	55	23	50	40	53	<1	46	40	40	39	36	38	27	40	18	37	32	31
4-Methylcatechol	44	59	134	38	148	<1	<1	7	8	<1	17	8	6	5	7	45	2	11
Hydroquinone	151	146	258	138	26	113	126	116	103	81	127	119	77	107	97	138	90	79
3-Methylcatechol	25	33	<1	1	30	30	<1	20	6	<1	29	<1	<1	10	11	40	22	13
Pyran-4-one	196	284	121	224	302	275	317	136	284	223	292	258	274	295	292	329	333	203
Ethylcatechol	63	45	94	31	42	48	30	40	79	67	35	18	7	54	28	23	70	19
Quinic acid- γ -lactone	53	92	43	50	83	48	38	56	38	27	79	41	23	54	37	82	37	31
Levogluconan	167	182	182	145	187	130	125	147	139	126	172	142	136	134	108	142	125	127
Neophytadiene	156	150	143	114	153	117	125	127	150	122	144	114	147	121	115	98	126	144
Palmitic acid	143	166	188	153	135	136	148	170	92	92	151	128	90	109	95	139	60	84

表8 両切たばこの副流煙の粒子数の経時的変化⁶³⁾

煙発生後の時間的経過 (秒)	粒子数 (個/ m^3)
4	6.98 x 10^7
6	5.12 x 10^7
8	3.66 x 10^7
10	2.66 x 10^7
12	1.85 x 10^7

のを cloud, $0.1 \sim 0.001 \mu\text{m}$ のものを smoke として分けているが、たばこ煙の粒径はこの cloud と smoke の範囲にある。たばこ煙粒子の個数と粒径分布には測定方法によってかなりのばらつきが存在するが、それは、煙発生直後に秒単位で変化するためである。例えば粒

子数は煙発生後、秒単位で粒子相互の衝突・融合による凝集過程で急激にその数を減少させる⁶³⁾。表8にシガレット副流煙の粒子数の経時変化を示したが、発生4秒後と12秒後の8秒間にその粒子数は4分の1に減少することが分かる。計測上の問題点として、たばこ煙中の粒子が高濃度なため、希釈は計測操作から省略できないが、直ちに希釈操作を実施しないと時間経過とともにたちまち粒子数は減少することがあげられる。新鮮な主流煙および副流煙の粒子数はそれぞれ 1.05×10^{12} および 3.5×10^{12} で副流煙は約3倍のたばこ粒子を有している¹⁾。

一方、一般的な ETS の平均粒径は $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ の範囲にあると報告されている¹⁾。新鮮な粒径分布は主流

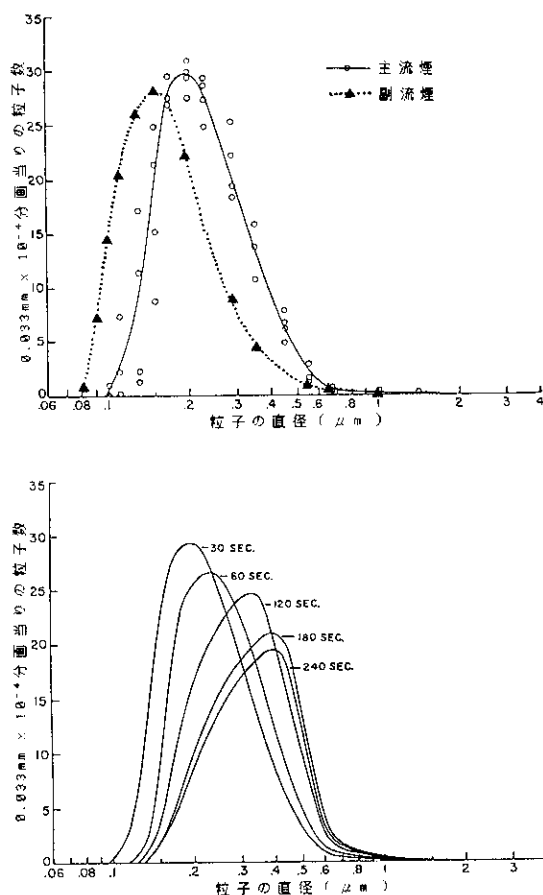


図6 シガレット主流煙および副流煙の粒径分布 (上段) と主流煙の経時変化 (下段)⁶⁴⁾。

煙では $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ であり、副流煙は $0.01 \sim 0.8 \mu\text{m}$ にあるが、幾何学的中央粒径は主流煙が $0.17 \sim 0.2 \mu\text{m}$ で、副流煙が $0.10 \sim 0.15 \mu\text{m}$ である^{64,65)}。しかし経時的には凝集や主流煙では吸湿によって発生から数十秒以内に粒径は大きくなり、主流煙では平均粒径 $0.40 \mu\text{m}$ 副流煙では $0.32 \mu\text{m}$ となるとともにその個数は減少する(図6)⁶⁴⁾。しかしその後は図7に示す如く ETS はさらに攪拌され凝集粒子中の揮発性成分のほとんどが蒸発してガス相に移行し、結果として粒径は再び減少する⁶⁶⁾。複雑である。

ETS が思わぬ影響をもたらす例を紹介する。たばこ煙中に存在する $^{210}\text{polonium}$ は、 α 線を出しながら崩壊するため、受動喫煙時に肺に取り込まれた場合の発ガン性が危惧されているが、この他に ETS とコンク

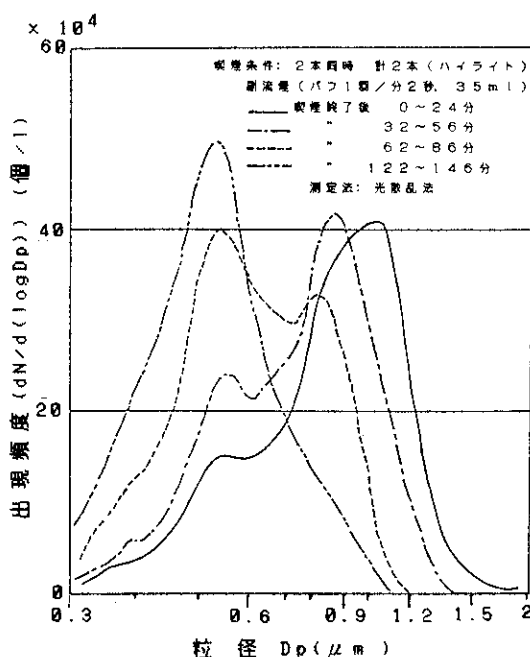


図7 室内における副流煙の粒径分布⁶⁶⁾

リート等の建築材から放出される radon とその娘核種 (214 および $^{218}\text{polonium}$, 214 鉛, $^{214}\text{bismuth}$) も問題となっている(図8)。即ち、ETS が存在しない場合 radon とその娘核種は原子量が大いため室内の床面上に存在するのみで拡散は容易ではないが、ETS がある場合(図中矢印で ETS が発生)は室内に浮遊するたばこ煙粒子へ吸着され、これらと共に舞い上がりこれらの核種も $^{210}\text{polonium}$ と同様に受動喫煙することが指摘されている⁶⁷⁾。

ETS の化学的特性は、物理的特性と同様にたばこ煙発生後 Ageing により、秒単位でも分単位でも極めて複雑に変化する。秒単位の変化例として、metyl nitrite (亜硝酸メチル: CH_3ONO) を例に示す。metyl nitrite は新鮮なたばこ煙には存在しないが、Ageing によって初めて生成する。図9にはたばこ煙に含まれる各物質の量的変化を各物質の吸光度の変化としてとらえて、その発生直後から約3分弱までの時間経過を実験的に示してある⁶⁸⁾。たばこ煙発生直後には二酸化窒素(図中 B)はほとんど存在しないが、一酸化窒素(図中 A)が秒を追って減少すると共に増加を示す。つまり $2\text{NO} + \text{O} \rightarrow 2\text{NO}_2$ (あるいは N_2O_4)

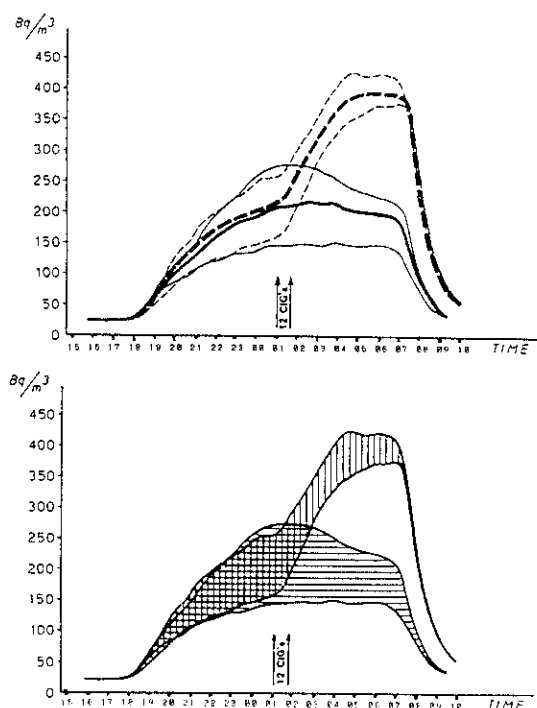
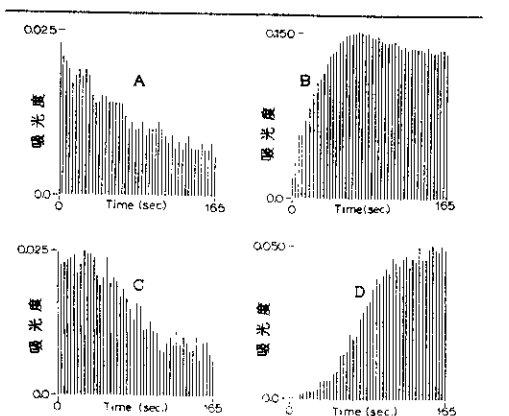


図8 ラドン娘核種室内濃度変化へのシガレット煙有無の影響⁶⁷⁾

太線は平均濃度を、細線は最高/最低濃度を、破線は午前1時に12本のシガレット煙を室内で発煙した時の4回の実験値を、実線はシガレット煙による室内汚染がない時の3回の実験値を示す。

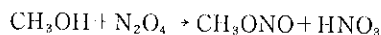


A: 一酸化窒素 1910cm⁻¹ B: 二酸化窒素 1629cm⁻¹
C: methanol 1055cm⁻¹ D: methyl nitrite 822cm⁻¹

図9 硝酸塩添加 Burely 種シガレット煙の加齢 (Ageing) 現象⁶⁸⁾

縦軸は各物質の各波長で求めた吸光度で濃度変化を示している。

の反応が進む。さらに二酸化窒素は70~90秒をピークに減少する。一方 methanol (図中 C) は、二酸化窒素より少し早めに減少を開始し、これと同期しながら下記のような反応が起こって methyl nitrite (図中 D) が発生し次第に増加する。



このように、僅か数分以内に定量的な変化と共に定性的変化が惹起されることになる。

たばこ煙の代表的化合物である nicotine についても例外ではない。ETS のほとんどは副流煙に起因しているが、その副流煙の pH が塩基性であることから、副流煙中の粒子相成分である nicotine は環境中の空気中へ蒸化しやすく、ETS 中の nicotine の95%はガス化してしまう⁶⁹⁾。ガス化した nicotine などの揮発性成分はさらには周りの壁材表面等に吸着されたり、そこで二次反応を起こし、場合によっては再蒸発する⁶⁸⁾。

次に分単位での変化例として実験的空間における ETS 中の4物質の消長を図10に示した⁷⁰⁾。室内濃度がピークに達する時間が最も速いのは nicotine であり、半減期も短い。その他の物質はほぼ同じ時間でピークを迎えるが、その後の半減期は各物質によって長短がある。浮遊粉塵が最も速く、次いで炭化水素類、一酸

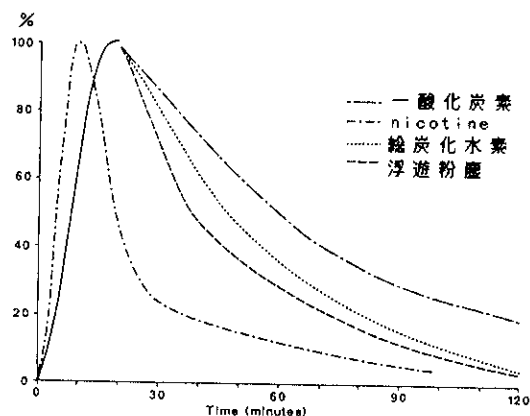


図10 各種環境たばこ成分の相対的濃度変化⁷⁰⁾

容積30m³の室内で、換気率9回/時間、室温20℃、相対湿度55%、2本分のシガレット煙を発生させた時の実験。縦軸は各物質濃度の測定中の最高値を100%としてある。

化炭素の順に減衰していく。

この様に、一本のシガレットから発生したたばこ煙の挙動を実験的に追跡しても、発生直後から数分間あるいは数十分間で各物質の濃度は大幅な変化を示す。実生活空間では複数の人間が各自バラバラに喫煙行動をそれぞれの個人が好みのたばこを独自の喫煙様式で行っており、先に示した如くたばこ煙の時間経過による粒径変化やこれに伴う粒子数変化などの物理変化と化学変化が、時々刻々と ETS の物理・化学的性状に大変複雑な影響を与えている。さらには、生活時間には暖房燃料、建築材、家具、クリーニング処理された衣類や絨毯、車の排ガスを含む外気等たばこ由来ではない多くの化学物質が混在している。図11に換気率や容積等がほとんど同じである2つの雑居ビル内で、一方(図中上段)は4名の従業員中1名が喫煙者であり、他方(図中下段)は全員非喫煙者である時の室内空気のカロマトグラムである⁷¹⁾。図中の矢印にある nicotine のピーク以外はほとんど同じ吸収を示しており、如何にたばこ煙以外の化学物質が多く存在しているか理解

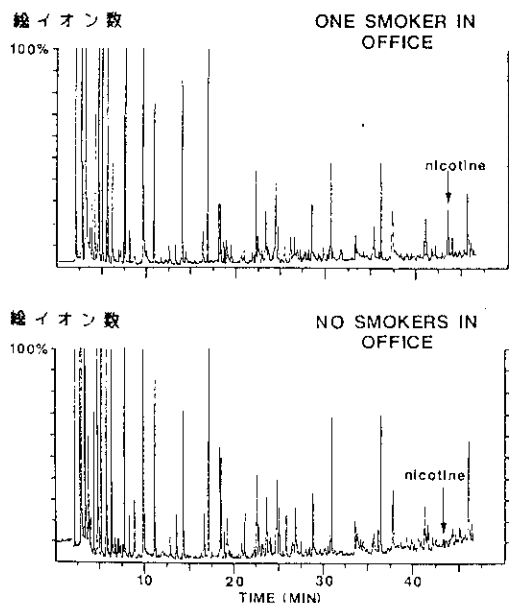


図11 喫煙者の有無による雑居ビル室内空気のカロマトグラムの対比⁷⁰⁾。

気積、換気率、在室者数が類似している2室を対象に、上段は4名中1名が喫煙者の場合、下段は4名全員が非喫煙者の場合。

出来よう。ETSによる室内空気汚染状況の実態は、本特集の「物理的保護対策」で述べるのでここでは省略する。

従って実際の生活空間ではそれぞれの家庭で各部屋の構造や換気率、使用する暖房や厨房器具の種類、換気扇の有無、喫煙者数、季節による換気率や温度、湿度の変動等数え上げると無限に等しい条件が存在することになり、ETSの定量化は大変困難である。

受動喫煙喫煙と肺ガン発生の因果関係についても未だに研究者の間で論争が絶えないのは⁷⁰⁻⁷¹⁾、このようなETSによる被曝量の推定が個人レベルで十分に証明されていなかったことにも起因しており、環境側の汚染指標と共に次章で述べるETSによる個人暴露の証となる生体マーカーがその問題を提起していると言えよう⁷²⁻⁷³⁾。

これまでに環境側の暴露指標としてガス相成分では nicotine⁷³⁻⁷⁹⁾、一酸化炭素^{19,74-76)}、二酸化窒素^{51,75-76)}、pyridine 類⁷⁵⁻⁷⁶⁾、aldehyde^{51,76)}、acrolein^{51,76)}、benzene^{49,76,80)}、toluene^{49,75,80)}、1,3-butadiene^{49,80)}、多環式芳香族炭化水素⁸¹⁾、nitrosamine^{75,76)}が、粒子相成分では、浮遊粉塵(respirable particle matter)^{19,74-80)}、nicotine^{19,74-77,79)}、cotinine⁸²⁻⁸³⁾、nitrosamine⁷⁶⁾、多環式芳香族炭化水素^{75-76,81)}、solanesol^{75,84,85)}、Cd⁷⁶⁾などの濃度が研究対象となっている。しかし、ETS濃度を定量する指標物質には以下のような条件が必要とされている⁸⁶⁾。

- ・ETSとの間に特異性があること。
- ・検出感度が良く、且つ簡便であること。
- ・種々のたばこの特性をも反映していること。
- ・健康障害と関連ある物質濃度をも反映していること。

現在まで全てを満足させる物質は見つかっていないが、今のところガス相成分としては nicotine、粒子相成分としてはナス科植物である葉たばこ中に存在するテルペン化合物である solanesol が有望視されている。

繰り返すが、上述した如く ETS の物理・化学的特性の変化の他に、発生源となるたばこの種類、喫煙様式、気温気湿、室内の容積や換気率、燃焼器具の有・無等々フィールドでの条件は無限にあるため、その定量化は困難を極めていますが、受動喫煙の生体影響評価に欠くことができない問題であり、今後とも定量手法の高感

度化と疫学調査でも使用できるための手法の簡便化が必要となろう。

参考文献

- 1) The Health Consequences of Involuntary Smoking (A Report of the Surgeon General): U. S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, 1986.
- 2) Wynder, E. L., Hoffmann, D.: Tobacco and Tobacco Smoke. Academic Press, New York, 1967.
- 3) Stedman, R. L.: The chemical composition of tobacco and tobacco smoke. *Chemical. Rev.*, **68**, 153-207, 1968.
- 4) 藤森 嶺: タバコのテルペン化合物—香味成分とファイトアレキシン—, 化学と生物, **22**, 358-369, 1984.
- 5) Wynder, E. L.: The Biological Effects of Tobacco. Little Brown, Boston, 1985.
- 6) 沢井正夫: たばこの煙に関する研究総説. 日本専売公社, 1966.
- 7) The Health Consequences of Smoking "The Changing Cigarette" (A Report of the Surgeon General): U. S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, 1981.
- 8) 石黒繁夫: 黄色種たばこの香喫味に関する研究—中骨臭とその関与因子—. 専売中研報, **121**, 13-72, 1979.
- 9) Keith C. H., Tesh, P. G.: Measurement of the total smoke issuing from a burning cigarette. *Tobacco Sci.*, **9**, 61-64, 1965.
- 10) Baker, R. R.: Product formation mechanisms inside a burning cigarette. *Progress in Energy and Combustion Science*, **7**, 135-153, 1981.
- 11) Schmeltz, I., Wenger, A., Hoffmann, D., Tso, T. C.: Chemical studies on tobacco smoke. 63. On the fate of nicotine during pyrolysis and in a burning cigarette. *J. Agric. Food Chem.*, **27**, 602-608, 1979.
- 12) 大蔵省告示第174号: 官報, 平成元年10月12日, 第211号, 5-6, 1989.
- 13) Brunnemann, K. D., Hoffmann, D., Wynder, E. L., Gori, G. B.: Chemical studies on tobacco smoke. 37. Determination of tar, nicotine, and carbon monoxide in cigarette smoke—A comparison of international smoking conditions. pp. 441-449, *In* Modifying the Risk for the Smoker, Wynder, E. L., Hoffmann, D., Gori, G. B. ed., Proc. of the Third World Conference on Smoking and Health, New York, 1976.
- 14) International Committee for Cigar Smoke Study. Machine smoking of cigars. *Coresta Inform. Bull.*, **1**: 33-34, 1974.
- 15) Miller, J. E.: Determination of the components of pipe tobacco and cigar smoke by means of a new smoking machine. Proc. of the Third World Tobacco Scientific Congress. Salisbury Printers, **99**, 584-595, 1964.
- 16) Herning, R. I., Jones, R. T., Bachman, J., Mines, A. H.: Puff volume increases when low-nicotine cigarettes are smoked. *Brit. Med. J.*, **283**, 187-189, 1981.
- 17) Kozłowski, L. T., Frecker, R. C., Khouw, V., Pope, M. A.: The misuse of "Les-Hazardous" cigarettes and its detection: Hole-blocking of ventilated filters. *Am. J. Publ. Health*, **70**, 1202-1203, 1980.
- 18) Russel M. A. H., Jarvis, M., Iyer, R., Feyerabend, C.: Relation of nicotine yield of cigarettes to blood nicotine concentrations in smokers. *Brit. Med. J.*, **280**, 972-976, 1980.
- 19) Rickert, W. S., Robinson, J. C., Collishaw, N.: Yields of tar, nicotine, and carbon monoxide in the sidestream smoke from 15 canadian cigarettes. *Am. J. Publ. Health*, **74**, 228-231, 1984.
- 20) Adams, J. D., O'Mara-Adams, K. J., Hoffmann, D.: Toxic and carcinogenic agents in undiluted mainstream smoke and sidestream smoke of different types of cigarettes. *Carcinogenesis*, **8**, 729-731, 1987.
- 21) Chortyk, O. T., Schlotzhauer, W. S.: The Contribution of low tar cigarettes to environmental tobacco smoke. *J. Anal. Toxicol.*, **13**, 129-134, 1989.
- 22) Chortyk, O. T., Chamberlain, W. L.: A study on the mutagenicity of tobacco smoke from low-tar cigarettes. *Arch. Environ. Health*, **45**, 237-244, 1990.
- 23) Ayer, H. E., Yeager, D. W.: Irritants in cigarette smoke plumes. *Am. J. Publ. Health*, **72**, 1283-1285, 1982.
- 24) 十倉千枝, 古杉 絢, 大野朋子, 鏑木陽一: 吸いながら長さの調査および吸入ニコチン, タール量の推定. 専売中研報, No.114, 235-238, 1972.
- 25) 杉 二郎, 玉置英之助: たばこと喫煙の諸問題, 「喫煙と大気汚染の医学」, 和田直編, 金原出版, 東京, 1970, p.109-121.
- 26) Dube, M. F., Green, C. R.: Methods of collection of smoke for analytical purposes. *Recent Adv. Tobacco Sci.*, **8**, 42-102, 1982.
- 27) Kaneki, K., Masuo, Y., Okada, T.: Determination of particulate matter and carbon oxides in sidestream smoke. *Beitr. Tabakforsch. Int.*, **14**, 155-162, 1989.

- 28) 村松茂登彦：紙巻たばこの自然燃焼における移動現象に関する研究。専売中研報，No.123，9-78，1981.
- 29) Baker, R. R.: Variation of the gas formation regions within a cigarette combustion coal during the smoking cycle. *Beitr. Tabakforsch. Int.*, **11**, 1-17, 1981.
- 30) Jhonson, W. R., Hale, R. W., Nedlock, J. W., Grubbs, H. J., Powell, D. H.: The Distribution of products between mainstream smoke and sidestream smoke. *Tobacco Sci.*, **17**, 141-144, 1973.
- 31) Janoff, A., Pryor, W. A., Bengali, Z. H.: Effects of tobacco smoke components on cellular and biochemical process in the lung., *Am. Rev. Respir. Dis.*, **136**, 1058-1064, 1987.
- 32) Hoffmann, D., Wynder, E. L.: Smoke of cigarettes and little cigars: An analytical comparison. *Science*, **178**, 1197-1199, 1972.
- 33) Travell, J.: Absorption of nicotine from various sites. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **90**, 13-30, 1960.
- 34) Schmeltz, I., Brunnemann, K. D., Hoffmann, D., Cornell, A.: On the chemistry of cigar smoke: Comparisons between experimental little and large cigars. *Beitr. Tabakforsch.*, **8**, 367-377, 1976.
- 35) Neurath, G., Horstmann, H.: Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes von Zigaretten auf die Zusammensetzung des Rauches und die Glutzonentemperatur. *Beitr. Tabakforsch.*, **2**, 93-100, 1963.
- 36) 三上洋一，幸田順子，飯村弘子，籀木陽一：たばこ煙成分の分析法に関する研究（第9報），たばこ煙のpHの測定法。専売中研報，No.111，173-177，1969.
- 37) Keith, C. H., Derrick, J. C.: Measurement of the particle size distribution and concentration of cigarette smoke by the "Conifuge". *Tobacco Science*, **85**, 210-217, 1961.
- 38) Grimmer, G. H., Böhne, H., Harke, H. P.: Zum Problem des Passivrauchens: Konzentrationsmessungen von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe in Innerräumen nach dem maschinellen Abrauchen von Zigaretten. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, **40**, 83-92, 1977.
- 39) Löfroth, G., Burton, R., Goldstein, G., Forehand, L., Hammond, K., Mumford, J., Seila, R., Lewtas, J.: Genotoxic emission factors for sidestream cigarette smoke components. *Environ. Mutagen.*, **9**(Suppl. 8), 61, 1987.
- 40) Elemenhorst, II., Schultz, C.: Flüchtige Inhaltstoffe des Tabakrauches. *Beitr. Tabakforsch.*, **44**, 90-125, 1968.
- 41) Elliott, L. P., Rowe, D. R., Air quality during public gatherings. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **25**, 635-636, 1975.
- 42) Klus, S., Kuhn, H.: Verteilung verschiedener Tabakrauchbestandteile auf Haupt- und Nebstromrauch (eine Übersicht). *Beitr. Tabakforsch. Int.*, **11**, 229-265, 1982.
- 43) Sakuma, H., Kusama, M., Munakata, S., Ohsumi, T., Sugawara, S.: The Distribution of cigarette smoke components between mainstream and sidestream smoke 1. Acidic components. *Beitr. Tabakforsch.*, **12**, 63-71, 1983.
- 44) Sakuma, H., Kusama, M., Yamaguchi, K., Matsuki, T., Sugawara, S.: The distribution of cigarette smoke components between mainstream and sidestream smoke: 2. Bases. *Beitr. Tabakforsch.*, **12**, 199-209, 1984.
- 45) Sakuma, H., Kusama, M., Yamaguchi, K., Sugawara, S.: The Distribution of cigarette smoke components between mainstream and sidestream smoke: 3. Middle and higher boiling components. *Beitr. Tabakforsch.*, **12**, 251-258, 1984.
- 46) Schmeltz, I., dePaolis, A., Hoffmann, D.: Phytosterols in tobacco: Quantitative analysis and fate in tobacco combustion. *Beitr. Tabakforsch.*, **8**, 211-218, 1975.
- 47) Hecht, S. S., Hoffmann, D.: Tobacco-specific nitrosamines, an important group of carcinogens in tobacco and tobacco smoke. *Carcinogenesis*, **9**, 875-884, 1988.
- 48) Brunnemann, K. D., Yu, L., Hoffmann, D.: Assessment of carcinogenic volatile N-nitrosamines in tobacco and in mainstream and sidestream smoke from cigarettes. *Can. Res.*, **37**: 3218-3222, 1977.
- 49) Brunnemann, K. D., Kagan, M. R., Cox, J. E., Hoffman, D.: Determination of benzene, toluene and 1,3-butadiene in cigarette smoke by GC-MSD. *Exp. Pathol.*, **37**, 108-113, 1989.
- 50) Jhonson, W. R., Hale, R. W., Clough, S. C., Chen, P. H.: Chemistry of the conversion of nitrate nitrogen to smoke products. *Nature*, **243**, 223-225, 1973.
- 51) Weber, A., Fischer, T., Grandjean, E.: Objective und subjektive physiologische Wirkungen des Passivrauchens. *Int. Arch. Occup. Environ. Hlth.*, **37**, 277-288, 1976.
- 52) Swenborg, J. A., Kerns, W. D., Mitchell, R. I., Gralla, E. J., Pavkov, K. L.: Induction of squamous cell carcinomas of the rat nasal cavity by inhalation exposure to formaldehyde vapor. *Can. Res.*, **40**,

- 3398-3401, 1980.
- 53) Jhonson, W. R., Kang, J. C.: Mechanism of hydrogen cyanide formation from the pyrolysis of amino acids and related compopunds. *J. Organic Chem.*, **36**, 189-192, 1971.
 - 54) Berger, R. S.: The carcinogenicity of Radon. *Environ. Sci. Technol.*, **24**: 30-31, 1990.
 - 55) Bock, F. G., Swain, A. P., Stedman, R. L.: Composition studies on tobacco. XLIV. Tumor-promoting activity of subfractions of the weak acid fraction of cigarette smoke condensate. *J. Natl. Cancer Inst.*, **47**, 429-436, 1971.
 - 56) Hecht, S. S., Carmella, S., Mori, H., Hoffman, D.: A study of tobacco carcinogenesis. XX. Role of catechol as a major carcinogen in the weakly acidic fraction of smoke condensate. *J. Natl. Cancer Inst.*, **66**, 163-169, 1981.
 - 57) Ohkubo, C.: Some acute cardiopulmonary effects of mainstream and sidestream cigarette smoke in man., *Prev. Med.*, **11**, 173-186, 1982.
 - 58) Repace, J. L., Lowrey, A. H.: Indoor air pollution, tobacco smoke, and public health. *Science*, **208**, 464-472, 1980.
 - 59) Eatough, D. J., Hansen, L. D., Lewis, E. A.: The chemical characterization of environmental tobacco smoke. In *Environmental Tobacco Smoke, Proceedings of the International Symposium at McGill University 1989*, Ecobichon, D. L., Wu, J. M. ed., Lexington Book, Lexington, pp.3-39, 1989.
 - 60) Eatough, D. J., Benner, C. L., Bayona, J. M., Richards, G., Lamb, J. D., Lee, M. L., Lewis, E. A., Hansen, L. D.: Chemical composition of environmental tobacco smoke. 1. Gas-phase acids and bases, *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 679-687, 1989.
 - 61) Benner, C. L., Bayona, J. M., Caka, F. M., Tang, H., Lewis, L., Crawford, J., Lamb, J. D., Lee, M. L., Lewis, E. A., Hansen, L. D., Eatough, D. J.: Chemical composition of environmental tobacco smoke. 2. Particulate-phase compounds, *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 688-699, 1989.
 - 62) Löfroth, G.: Environmental Tobacco Smoke: Overview of chemical composition and genotoxic components. *Mutation Res.*, **222**, 73-80, 1989.
 - 63) Kozawa, S., Suda, K.: Measurement of tobacco aerosol by Shimadzu light scattering photometer. *Shimadzu Review*, **14**, 253-262, 1957.
 - 64) Keith, C. H., Derrick, J. C.: Measurement of the particle size distribution and concentration of cigarette smoke by the "Conifuge". *J. Colloid Sci.*, **15**, 340-356, 1960.
 - 65) Okada, T., Matsunuma, K.: Determination of particle-size distribution and concentration of cigarette smoke by a light-scattering method. *J. Colloid Interface Sci.*, **48**, 461-469, 1974.
 - 66) 呂 俊民: 喫煙による室内空気汚染とその浄化について。日本建築学会関東支部研究報告集, 49, 133-136, 1978.
 - 67) Bergman, H., Axelsson, O.: Passive smoking and indoor radon daughter concentration. *Lancet*, (Dec. 3), 1308-1309, 1983.
 - 68) Vilcins, G., Lephardt, J. O.: Ageing processes of cigarette smoke: formation of methyl nitrite. *Chem. Indust.*, **15**, 974-975, 1975.
 - 69) Caka, F. M., Eatough, D. J., Lewis, E. A., Tang, H., Hammond, S. K., Leaderer, B. P., Koutrakis, P., Spengler, J. D., Fasano, A., McCarthy, J., Ogden, M. W., Lewtas, J.: An intercomparison of sampling techniques for nicotine in indoor environments. *Environ. Sci. Technol.*, **24**, 1196-1203, 1990.
 - 70) Proctor, C. J., Smith, G.: Considerations of the chemical complexity of ETS with regard to inhalation studies. *Exp. Pathol.*, **37**, 164-169, 1989.
 - 71) Gori, G. B., Mantel, N.: Mainstream and environmental tobacco smoke., *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, **14**, 88-105, 1991.
 - 72) Jarvis, M., Tunstall-Pedoe, H., Feyerabend, C., Vesey, C., Salloojee, Y.: Biochemical markers of smoke absorption and self reported exposure to passive smoking. *J. Epidemiol. Community Health*, **38**, 335-339, 1984.
 - 73) Scherer, G., Conze, C., Meyerinick, L. V., Sorsa, M., Adlkofer, F.: Importance of exposure to gaseous and particulate phase components of tobacco smoke in active and passive smokers. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, **62**, 459-466, 1990.
 - 74) Hugod, C., Hawkins, L. H., Astrup, P.: Exposure of passive smokers to tobacco smoke constituents. *Int. Arch. Occup. Health*, **42**, 21-29, 1978.
 - 75) Tang, H., Richards, G., Gunther, K., Crawford, J., Lee, M. L., Lewis, E. A., Eatough, D. J.: Determination of gas phase nicotine and 3-ethylpyridine, and particulate phase nicotine in environmental tobacco smoke with a collection bed - Capillary gas chromatography system. *J. High Resol. Chromatogr. Chromatogr. Commun.*, **11**, 775-782, 1988.
 - 76) Adlkofer, F., Scherer, G., Conze, C., Angerer, J.,

- Lehnert, G.: Significance of exposure to benzene and other toxic compounds through environmental tobacco smoke. *J. Cancer Res. Clin. Oncol.*, **116**: 591-598, 1990.
- 77) Muramatsu, M., Unemura, S., Okada, T., Tomita, H.: Estimation of personal exposure to tobacco smoke with a newly developed nicotine personal monitor. *Environ. Res.*, **35**, 218-227, 1984.
- 78) Leaderer, B. P.: Evaluation of vapor-phase nicotine and respirable suspended particle mass as markers for environmental tobacco smoke. *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 770-777, 1991.
- 79) Miesner, E. A., Rudnick, S. E., Hu, F. C., Spengler, J. D., Özkaynak, H., Preller, L., Nelson, W.: Particulate and nicotine sampling in public facilities and offices. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **39**, 1577-1582, 1989.
- 80) Brunnenmann, K. D., Kagan, M. R., Cox, J. E., Hoffmann, D.: Analysis of 1,3-butadiene and other selected gas-phase components in cigarette mainstream and sidestream smoke by gas chromatography-mass selective detection. *Carcinogenesis*, **11**, 1863-1868, 1990.
- 81) Salomaa, S., Tuominen, J., Skyttä, E.: Genotoxicity and PAC analysis of particulate and vapor phases of environmental tobacco smoke. *Mutat. Res.*, **203**, 173-183, 1988.
- 82) Kopczynski, S. L.: Multidimensional gas chromatographic determination of cotinine as a marker compound for particulate-phase environmental tobacco smoke. *J. Chromatogr.*, **463**, 253-260, 1989.
- 83) Knight, J., Palomaki, G. E., Lea, D. H., Haddow, J. E.: Exposure to environmental tobacco smoke measured by cotinine ¹²⁵I-radioimmunoassay. *Clin. Chem.*, **35**, 1036-1039, 1989.
- 84) Ogden, M. W., Maiolo, K. C.: Collection and determination of solanesol as a tracer of environmental tobacco smoke in indoor air. *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 1148-1154, 1989.
- 85) Tang, H., Richards, G., Benner, C. L., Tuominen, J. P., Lee, M. L., Lewis, E. A., Hansen, L. D., Eatough, D. J.: Solanesol: A tracer for environmental tobacco smoke particles. *Environ. Sci. Technol.*, **24**, 848-852, 1990.
- 86) National Research Council Environmental Tobacco Smoke, Measuring Exposure and Assessing Health Effects; National Academy Press: Washington, DC, 1986.