シガレット喫煙におけるカドミウム、鉛揮散とその影響

須 那 滋, 浅 川 富美雪, 實 成 文 彦,
真 鍋 芳 樹, 後 藤 敦, 福 永 一 郎,
中 嶋 泰 知

香川医科大学人間環境医学講座 衛生公衆衛生学教室

Assessment of Cadmium and Lead Released from Cigarette Smoke

Shigeru Suna, Fumiyuki Asakawa, Fumihiko Jitsunari,
Yoshiki Manabe, Atsushi Gotou, Ichiro Fukunaga
and Taichi Nakajima

Department of Hygiene and Public Health, Kagawa Medical School, Kagawa

Cigarette smoke, which contains many harmful compounds, affects not only the smoker's health but also indoor air quality. To evaluate indoor air contamination by cadmium (Cd) and lead (Pb), we measured Cd and Pb contained in the mainstream and sidestream smoke exhaled by experimental smoking of Japanese cigarettes and also determined urinary and blood Cd and Pb levels in smokers and non-smokers and air Cd and Pb levels in smoky environments.

1. One cigarette of each of 7 Japanese brands contained about 1 μg each of Cd and Pb, of which about 50 ng each was released to the mainstream and 250 ng of Cd and 50 ng of Pb to the sidestream by smoking.

2. The blood Cd level in the smokers was significantly higher than that in the non-smokers. The urinary Cd level in the smokers was slightly higher than that in the non-smokers. The blood Cd level was related to the number of cigarettes smoked daily. Blood and urinary Pb levels did not differ between the smokers and non-smokers, but the blood Pb level was also related to the number of cigarettes smoked daily.

3. The air Cd levels in smoky places such as the smoking car of the special express train, an office, and a pachinko parlor were markedly higher than that in outdoor air. The air Cd concentration was well correlated with the environmental tobacco smoke concentration. On the other hand, the air Pb level was slightly higher in the above smoky places than outdoors. The mean air Pb concentration was not correlated with the environmental tobacco smoke concentration but was higher at higher environmental tobacco smoke concentration in each place.

Key words: Cigarette smoke, Cadmium, Lead, Indoor air contamination
シガレット煙, カドミウム, 鉛, 室内空気汚染

緒 言

タバコ煙中には健康に影響を及ぼす物質が多数含まれており、喫煙の有害性についてはこれまでにさまざまな観点から多くの検討がなされている。さらに最近では、人々が一日の大半を過ごす室内において、喫煙が空気汚染に大きく関与することから喫煙者のみならず周囲の

非喫煙者における受動喫煙の影響についても注目されるようになってきた¹⁻³⁾。

タバコ煙は喫煙者が吸い口から吸入する主流煙とそれの呼出煙および点火部から周囲に発散する副流煙とに分けられるが、主として喫煙者自身には主流煙が関与し、一方室内空気汚染には副流煙が関与すると考えられる。したがって、タバコ煙による影響を考える場合、主流煙

と副流煙の両面から検討する必要がある。しかし、これまで我が国においては、国産タバコを用いて主流煙と副流煙に含まれる有害物質を比較検討した報告は少ない⁴⁾。とくに有害金属について主流煙と副流煙に分別して同時測定した例はほとんどなく、また、タバコ煙による室内環境の重金属汚染という観点から、その実態について検討した例はみられない。

そこで、本研究ではタバコ煙中に含まれる重金属のうちとくに有害と考えられるカドミウム(以下Cd)と鉛(Pb)について以下の実験・調査を行った。まず喫煙者における主流煙からのCd、Pb暴露量や室内空気中のCd、Pb汚染における主流煙と副流煙の寄与の程度を知るために人工喫煙実験を行い、主流煙と副流煙に含まれるCdとPbの量を測定した。次に、喫煙によるCdおよびPbの体内汚染の実態を明らかにするために、健康男子成人の血液および尿中Cd、Pb濃度を測定し、喫煙習慣との関係を検討した。さらに、タバコ煙による室内空気中のCd、Pb汚染の実態を知る目的で事務室、パチンコ店、列車内などにおいて調査を行った。この結果、喫煙者ではCd、Pbの体内汚染が認められ、また副流煙による室内空気中のCd、Pb汚染の実態が明らかになるなど興味ある知見が得られたので、ここに報告する。

方 法

1. 人工喫煙実験

(1) 試 料

市販国産ロングサイズフィルターシガレット(全長80mm)6種と両切タイプシガレット(全長70mm)1種を実験に供した。日本たばこ産業による各銘柄のタール表示値は7~24mg/シガレットで、いわゆる低タールタバコから高タールタバコにわたっていた。

(2) 主流煙粒子および副流煙粒子の捕集

主流煙と副流煙を分別同時捕集するためにFig.1に示すような人工喫煙装置を作成し実験を行った。すなわち、点火シガレットをガラス製燃焼容器(容積約3 l)中に置き、容器に接続した手動ポンプ(ナルゲン製、36ml/ストローク)にて最初に1回2秒かけてパフ(Puff)させて後、1分毎に1回2秒間のパフを行い、燃焼長が48mmに達するまで燃焼させた。発生した主流煙粒子はシガレット直後のグラスファイバーフィルター(Advantec GB100R, 25mmφ)に、また副流煙粒子は容器上部の同種のグラスファイバーフィルターに電動ポンプ(流速: 5 l/分)で吸引して捕集した。一銘柄につき5回の喫煙実験を行った。

Fig. 1 Apparatus for sampling cigarette smoke particles

- 1: Sampler for the mainstream smoke.
- 2: Sampler for the sidestream smoke.
- 3: Air filter, 4: Hand-operated vacuum pump.
- 5: Electric air-suction pump, 6: Cigarette.

(3) 煙粒子中のCdおよびPbの測定

煙粒子捕集後のグラスファイバーフィルターはデシケータ(シリカゲル)中で3~4日乾燥させ秤量した後ねじ口試験管(パイレックス製、21mmφ)に入れ硝酸・60%過塩素酸(1:1)を加えヒーティングブロック(ヤマト科学製)中で湿式灰化を行った。定容とした灰化液の一部を用い、著者らの開発したトルエン抽出・フレイムレス原子吸光法⁵⁾の分析法に準じてCd、Pbを測定した。また、シガレットのタバコ葉と巻紙ならびに燃焼後の灰、吸い殻、フィルターなどに含まれるCd、Pb量の測定にも同様の灰化法と分析法を応用した。なおフィルターの測定においては、2.5N硝酸に一昼夜浸漬後の抽出液を灰化・分析の試料とした。一銘柄につき5回の測定を行った。

2. 主流煙および副流煙の粒径分布と粒径別Cd、Pb量の測定

市販国産ロングサイズフィルターシガレット一銘柄を選び実験を行った。

主流煙は容量約500mlの枝付三角フラスコに3~4回パフして貯留させた後、アンダーセンサンプラー(高立機器製)に導入し粒径別捕集を行った。この操作を繰り返し、シガレット10本分の主流煙粒子を採集した。一方副流煙は人工喫煙装置内で発生させ貯留させた後、アンダーセンサンプラーに導入した(流速、28.3l/分)。5本分の煙粒子を採集した。各ステージの捕集板にはグラスファイバーフィルター(Advantec GB100R, 100mmφ)を用いた。各分画の捕集試料はデシケータ(シリカゲル)中で3~4日乾燥した後秤量し、煙粒子の粒径別分布を求めた。さらに捕集試料は(3)で述べたと同様の方法により各分画に含まれるCd、Pb量を測定した。

3. 健康男子成人の血液中および尿中のCd、Pb測定

(1) 試 料

男子成人の血液(全血)および尿試料は、某社人間ドッ

ク受診時に採取した(109名, 年齢35~59歳)。同時に, 喫煙や飲酒の習慣について調査した。なお, 比較のために, 入社健康診断時に得た男子高校生(46名, 年齢17~18歳)の血液(全血), 尿試料についてCd, Pb濃度を測定した。

(2) 分析方法

血液および尿試料の前処理と分析方法は, 前述の著者らが開発したトルエン抽出・フレイムレス原子吸光法⁵⁾によった。尿中濃度は尿比重補正(1.024に補正)およびクレアチニン補正を行った。尿比重の測定には尿比重屈折計(アタゴ製)を用い, 尿中クレアチニン濃度の測定にはJaffe反応に基づく市販キット(和光純薬製)を用いた。

4. 室内空気中のCd, Pb汚染調査

(1) 調査場所

市内のパチンコ店(6店, 広さ500m²前後), 事業所の事務室(4室, 広さ50m²前後)および走行中の特急列車(普通車両: 7車両, 禁煙車両: 2車両, 広さ約60m²)において調査を実施した。また同時に市内の大気中Cd, Pb濃度についても測定した。パチンコ店および特急列車内はほぼ満席の状況であったが, 空席がみられる場合もあった。なお, 各室内の換気の状態の詳細は不明であったが, 調査時期が冬季(12~2月)であったため外気の流入は少なく, 全般的に換気状態は悪いように思われた。

(2) 調査方法

サンプリング地点は各室内中央付近とし, サンプリング時間は50~120分であった。

浮遊粉塵濃度(SPM)とタバコ煙含有率は労研式分光ろ紙塵埃計AP-1型(柴田科学製)により, 10分毎に計測した。空気中Cd, Pb濃度の測定には, 浮遊粉塵をグラ

スファイバーフィルター(Advantec GB100R, 13mmφ)上にミニポンプMP2型(柴田科学製, 流速: 1.5 l/分)を用いて捕集後, 1の人工喫煙実験と同様の灰化法と分析法を適用し, CdとPbの測定を行った。

結 果

1. 主流煙および副流煙に含まれるCdとPb量

人工喫煙実験により発生した主流煙と副流煙の粒子量(TPM, 乾燥重量)をTable 1に示した。5回の繰り返し実験によるTPMの再現性は, 変動係数で主流煙が7~16%, 副流煙が7~21%と, いずれの銘柄においてもほぼ良好であった。そして各銘柄の主流煙TPMは8~30mg/シガレットの範囲にあり, 日本たばこ産業によるタール表示量によく対応していた。一方, 副流煙TPMは11~16mg/シガレットの範囲にあり, 発生粒子量の銘柄間の差は小さかった。また, シガレット48mmを燃焼する間のパフ回数は7~10回であり, 銘柄によって燃焼速度に差がみられたが, 同一銘柄における繰り返しのパフ回数にはほぼ一定であり, 燃焼速度に大きな差はみられなかった。

シガレット燃焼前後における各部分のCd分布をTable 2に示した。Cdは燃焼前のシガレットではタバコ葉に820~1218ng, 巻紙に2.1~5.7ng含まれ, シガレット中のCdのほとんどはタバコ葉に存在した。燃焼後に主流煙に19~98ng, 副流煙に204~336ng, 灰に144~207ngそしてフィルターに28~99ngが含まれていた。これを燃焼部分(48mm)に相当するシガレット中のCd量に対する百分率に換算すると, 主流煙中に2.6~13.6%, 副流煙中に26.1~49.9%, 灰中に19.7~23.0%そしてフィルター

Table 1 Total particulate matter yields by experimental smoking¹⁾

Brand	Type ²⁾ (Tar mg) ³⁾	Puffs	TPM ⁴⁾ mg/cig.	
			Mainstream	Sidestream
1	LF (16)	8.2±0.8	15.0±1.0	16.3±2.4
2	LF (15)	8.6±0.5	16.2±1.2	14.9±1.9
3	LF (20)	10.0±0.0	17.9±1.1	11.8±0.9
4	LF (7)	7.0±0.0	8.3±0.6	11.6±2.4
5	LF (10)	7.4±0.5	11.2±0.8	12.7±0.9
6	LF (14)	7.0±0.0	12.6±2.0	13.7±2.4
7	NF (24)	9.6±0.5	29.2±2.2	15.7±1.8

1) Smoked length: 48mm, puff volume: 36ml, puff duration: 2sec, puff interval: 58sec. Values listed are the means ±SD of 5 determinations.

2) LF: long filter cigarettes (total butt length 80mm, filter length 20mm). NF: nonfilter cigarette (70mm).

3) Values according to Japan Tobacco Corporation.

4) Total particulate matter yields (dry weight).

Table 2 Cadmium content in unsmoked cigarettes and smoked fractions

Brands	Cd in unsmoked cigarettes (ng/cig.)		Cd in Smoked fractions (ng/cig.)				
	Tobacco leaves	Rolled in paper	Mainstream	Sidestream	Ash	Filter	Cigarette-end
1	820± 93	3.6±0.1	45±2(7.2)	313±26(49.9)	144±14(23.0)	35± 7(5.6)	328±18
2	1003± 16	2.2±0.3	30±3(3.9)	282±32(36.8)	151±13(19.7)	99±14(12.9)	322±32
3	1014±121	2.8±0.1	80±7(10.3)	204±30(26.3)	175±14(22.6)	28± 3(3.6)	341±30
4	917± 48	2.1±0.2	19±3(2.6)	294±22(40.0)	161±13(21.9)	44± 7(6.0)	244±19
5	1130±110	3.1±0.4	33±3(3.6)	336±19(37.1)	207±10(22.8)	109±18(12.0)	324±44
6	1218±120	5.7±2.0	26±8(2.8)	243±11(26.1)	187±18(20.1)	99±20(10.6)	328±31
7	1046± 67	4.8±0.4	98±9(13.6)	240± 7(33.3)	150±12(20.8)	—	471±43

Values listed are the means±SD of 5 determinations.

Parenthesized values are the percentages calculated on the basis of the Cd content of the smoked portion (80 or 69% of the total).

中に3.6～12.9%のCdが分布した。

一方，燃焼前後のPbの分布をTable 3に示したが燃焼前のシガレットではPbはタバコ葉に616～1143ngとCdと同程度含まれていた。しかし，巻紙中には70～155ngとCdに比しかなり多量に含まれていた。燃焼後は，主流煙に27～87ng，副流煙に18～59ng，灰に453～615ngそしてフィルターに4～54ngのPbが分布していた。同様に燃焼部分に相当するシガレット中のPb量に対する百分率に換算すると，主流煙は4.3～12.0%，副流煙は1.8～7.8%，灰は58.4～83.8%，フィルターは0.7～5.5%であった。

以上の結果，燃焼によってシガレット中のCdは灰中に残存は20%程度であり，80%もの量が他へ揮散することが知られた。そしてこの揮散したCdは副流煙に最も多量に分布し，試験した銘柄においては平均で主流煙中のCd量の約5倍の量(250ng)が副流煙中に存在するこ

とが明らかとなった。一方，Pbは約70%が灰中に残存し，Cdに比べ揮散しにくいことが認められた。なお，揮散したPbは副流煙よりも主流煙の方にやや多く分布する傾向もみられるが，両者の差はわずかであった。また，主流煙へのCdおよびPbの分布量はいずれも約50ng前後と，ほぼ同程度の量であった。そして今回試験した銘柄のなかでは，フィルターを有さない両切タイプのシガレットは最も高いCd，Pbの主流煙分布率を示し，一方，フィルター付のシガレットにおいては，主流煙に含まれる量とはほぼ同程度の量かそれ以上のCdと主流煙よれやや少ない量のPbがフィルター中に捕そくされることなどがわかった。

2. 主流煙および副流煙粒子の粒径分布とCd量

銘柄1を用いて人工喫煙を行って得られた主流煙と副流煙およびフィルターを除去して行った時の主流煙の粒径別重量分布とCdの分布をFig.2に示した。重量分布を

Table 3 Lead content in unsmoked cigarettes and smoked fractions

Brands	Pb in unsmoked cigarettes (ng/cig.)		Pb in Smoked fractions (ng/cig.)				
	Tobacco leaves	Rolled in paper	Mainstream	Sidestream	Ash	Filter	Cigarette-end
1	849± 76	109± 9	57±10(7.8)	36± 3(4.9)	477±77(65.3)	35±14(4.8)	278±26
2	1143± 78	148± 4	62±11(6.3)	18± 6(1.8)	574±47(58.4)	54±11(5.5)	332±41
3	919±161	147±15	66± 9(8.1)	24±17(3.0)	615±39(75.7)	19± 3(2.8)	327±42
4	616± 23	155± 6	27±14(4.4)	26± 3(4.2)	453±29(73.4)	4± 3(0.7)	223±25
5	924±409	70± 6	34± 8(4.3)	20±12(2.5)	578±73(72.7)	39± 6(4.9)	323±34
6	866± 75	130±11	65±11(8.6)	59±24(7.8)	567±62(74.7)	32±10(4.2)	357±45
7	911± 78	142± 3	87± 9(12.0)	28± 5(3.9)	605±14(83.8)	—	562±44

Values listed are the means±SD of 5 determinations.

Parenthesized values are the percentages calculated on the basis of the Pb content of the smoked portion (80 or 69% of the total).

Fig. 2 Aerodynamic size distribution of cigarette smoke and cadmium

みると副流煙は $0.43\mu\text{m}$ 以下の粒子量が最大であり、一方主流煙では $0.65\sim 1.1\mu\text{m}$ の分画に分布のピークが認められた。また、フィルターを除去した場合の主流煙では $1.1\sim 2.1\mu\text{m}$ の分画に分布のピークがみられた。次に、各分画におけるCdの分布においては、いずれも重量分布にはほぼ対応したパターンが得られたが、 $0.43\mu\text{m}$ 以下の比率がやや高くなっていた。なお、各分画のPb量は、各煙粒子の捕集量が十分でなかったため測定できなかった。

3. 健康男子成人の血液、尿中のCd、Pb濃度

高校生を1群に、成人は年齢35～49歳の喫煙群と非喫煙群および年齢50～59歳の喫煙群と非喫煙群の計4群に分類した。なお、喫煙者はすべてシガレット服用者であった。

各群の血液中Cd濃度および尿中Cd濃度の幾何平均値(GM)と幾何標準偏差(GSD)をTable 4に示した。血液中Cd濃度は非喫煙者群では高校生群と同程度に低く、喫煙者群は成人の35～49歳においても50～59歳においても非喫煙者群に比し有意($P<0.01$)に高値を示した。一方、尿中Cd濃度は、高校生群のGMが最も低値を示し、高年齢群ほど尿中Cd濃度のGMは高くなる傾向がみられたが、喫煙者群と非喫煙者群の間では喫煙者群が高い傾向を示し、比重補正值では50～59歳の群で、またクレアチニン補正值では35～49歳の群で有意差($P<0.05$)が認められた。

次に、各群の血液中Pb濃度と尿中Pb濃度のGMをTable 5に示した。この結果、喫煙者と非喫煙者の血液中および尿中のPb濃度の差は著明ではなかったが、成人35～49

Table 4 Blood and urinary levels of cadmium in healthy adult men aged 35～59 years and male senior high school students aged 17～18 years in the Shikoku region

groups Age	Male students 17～18 years	Adult men			
		35～49 years		50～59 years	
		Nonsmokers	Smokers	Nonsmokers	Smokers
N ¹	46	16	31	30	32
Cd-B ¹ $\mu\text{g/l}$					
GM ¹ (GSD) ¹	0.6 (1.80)	0.6 (2.04)	1.9** (1.82)	0.9 (1.88)	1.7** (1.97)
Cd-U-SG ¹ $\mu\text{g/l}$					
GM (GSD)	0.5 (1.53)	1.5 (1.65)	2.1 (1.70)	2.0 (1.62)	2.6* (1.55)
Cd-U-Cr ¹ $\mu\text{g/g}$					
GM (GSD)	0.3 (1.53)	0.8 (1.55)	1.1* (1.60)	1.2 (1.65)	1.4 (1.46)

¹ N: number of persons, Cd-B: blood cadmium concentration, Cd-U-SG: urinary cadmium concentration adjusted to a urinary specific gravity of 1.024, Cd-U-Cr: adjusted to a urinary creatinine, GM: geometric mean, GSD: geometric standard deviation.

* $p<0.05$, ** $p<0.01$, significant difference between the smoking group and the non-smoking group.

Table 5 Blood and urinary levels of lead in healthy adult men aged 35~59 years and male senior high school students aged 17~18 years in the Shikoku region

groups Age	Male students 17~18 years	Adult men			
		35~49 years		50~59 years	
		Nonsmokers	Smokers	Nonsmokers	Smokers
N ¹	46	16	31	30	32
Pb-B ¹ $\mu\text{g/l}$					
GM ¹ (GSD) ¹	49 (1.30)	37 (1.25)	48** (1.42)	47 (1.41)	45 (1.73)
Pb-U-SG ¹ $\mu\text{g/l}$					
GM (GSD)	4.9 (1.42)	3.6 (1.45)	4.2 (1.45)	3.6 (1.77)	3.7 (1.73)
Pb-U-Cr ¹ $\mu\text{g/g}$					
GM (GSD)	2.7 (1.42)	2.0 (1.56)	2.2 (1.60)	2.1 (1.79)	2.0 (1.83)

¹ N: number of persons, Pb-B: blood lead concentrarion, Pb-U-SG: urinary lead concentration adjusted to a urinary specific gravity of 1.024, Pb-U-Cr: adjusted to a urinary creatinine, GM: geometric mean, GSD: geometric standard deviation.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, significant difference between the smoking group and the non-smoking group.

歳の喫煙者群と非喫煙者群の血液中Pb濃度に有意差($P < 0.01$)が認められた。

成人群(35~59歳)を喫煙と飲酒の習慣別に分類し血液中のCd濃度とPb濃度をみた結果をTable 6に示した。血液中Cd濃度は非喫煙・非飲酒群に比較して喫煙・非飲酒群と喫煙・飲酒群が有意($P < 0.05$)に高い値を示した。これに対し，血液中Pb濃度は非喫煙・非飲酒群と比較して他の3群はわずかに高いGMを示したが有意差は認められなかった。

次に一日の喫煙本数と血液中のCd濃度あるいはPb濃度との相関関係を検討した結果では，血液中Cd濃度では $r = 0.444$ ($P < 0.01$)の有意な相関が認められたが，血液中Pb濃度では $r = 0.08$ と有意な相関は認められなかった。さらに，喫煙本数を0本，1~15本/日，16~30本/日および31本以上/日の4群に分類した場合の血液中Cd

Table 7 Relation between daily cigarette consumption and blood cadmium level or blood lead level in healthy adult men aged 35~59 years.

Cigarettes/day	N ¹	Cd-B $\mu\text{g/l}$ GM ¹ (GSD) ¹	Pb-B $\mu\text{g/l}$ GM (GSD)
0 (Non-smokers)	46	0.8 (1.97)	43 (1.38)
1~15	11	1.3 (1.94)	44 (1.47)
16~30	35	1.9 (1.81)	47 (1.36)
30<	17	1.9 (1.99)	46 (1.51)

¹ N: number of persons, GM: geometric mean, GSD: geometric standard deviation.

濃度と血液中Pb濃度のGMをTable 7に示したが，血液中Cd濃度は16~30本/日群まで，喫煙本数に対応した増加が認められ，31本以上/日群でプラトーに達していた。また，血液中Pb濃度においても，0から16~30本/日までではわずかながら増加していた。

Table 6 Geometric means of blood cadmium and lead levels in healthy adult men aged 35~59 years in relation to smoking and drinking

	Non-smoking		Smoking	
	GM ¹ (GSD) ¹	N ¹	GM (GSD)	N
Cd-B $\mu\text{g/l}$				
Non-drinking	1.1 (1.72)	11	1.7* (1.63)	16
Drinking	0.7 (2.00)	35	1.8* (1.98)	47
Pb-B $\mu\text{g/l}$				
Non-drinking	41 (1.46)	11	52 (1.29)	16
Drinking	44 (1.36)	35	45 (1.44)	47

¹ GM: geometric mean, GSD: geometric standard deviation, N: number of persons.

* $p < 0.05$, significant difference as compared with the non-smoking and non-drinking group.

以上の結果、喫煙者の血液中Cd濃度は非喫煙者のそれに比べ明らかに高く、また一日の喫煙本数に対応した血液中Cd濃度の増加がみられることがわかった。また、尿中Cd濃度においては、血液中Cd濃度はど著明ではないが、喫煙者は非喫煙者に比べ高値を示す傾向がみられた。一方、血液中および尿中のPb濃度においては、喫煙者と非喫煙者の差は明らかではなく、また、血液中Pb濃度と一日の喫煙本数との間には有意な相関は認められなかったものの、喫煙本数別に分類した群でみれば、0から16~30本/日群までは喫煙本数に対応して血液中Pb濃度の増加がわずかながらみられ、喫煙による血液中Pb濃度の上昇の可能性が示唆された。

4. 室内空気のCd, Pb汚染調査

調査した室内の浮遊粉塵濃度(SPM), タバコ煙含有率およびSPMとタバコ煙含有率より算出した空気中タバコ煙濃度, そして空気中Cd, Pb濃度の測定結果をTable 8に示した。なお, SPMとタバコ煙含有率は10分毎の測定値の平均値で示した。

特急列車の測定結果では, SPMは普通車両(7両)が $0.43 \sim 0.94 \text{ mg/m}^3$ であり, これは調査場所の中では最も高い値であった。そして普通車両のタバコ煙含有率は約70%とSPMに占めるタバコ煙の割合は大きかった。これに対し, 禁煙車両(2両)のSPMは 0.10 および 0.19 mg/m^3 と普通車両に比べ明らかに低値であった。また, タバコ

Table 8 Indoor air contamination by suspended particulate matter, tobacco smoke, cadmium and lead

		SPM ¹ mg/m ³	tobacco smoke content %	tobacco smoke in air ² mg/m ³	Cd in air ng/m ³	Pb in air ng/m ³
Special express train						
(Smoking car)	1	0.75	69.5	0.52	25.1	111.7
	2	0.94	71.9	0.68	37.2	220.4
	3	0.62	70.1	0.43	23.4	196.3
	4	0.65	72.6	0.47	12.5	64.7
	5	0.64	66.4	0.42	20.8	36.5
	6	0.43	75.3	0.30	14.1	247.8
	7	0.92	28.9	0.24	13.5	72.8
	mean±SD	0.71±0.18	65.0±16.1	0.44±0.14	20.5±8.2	126.5±82.5
(Non-smoking car)	1	0.19	41.8	0.08	5.6	103.7
	2	0.10	0.0	0.00	2.5	42.2
Pachinko parlor						
	1	0.22	93.1	0.20	4.1	53.7
	2	0.24	94.7	0.23	6.0	63.8
	3	0.26	93.9	0.24	2.9	77.3
	4	0.42	85.8	0.36	11.5	82.4
	5	0.34	91.3	0.31	9.0	129.7
	6	0.25	94.5	0.24	6.9	31.4
	mean±SD	0.29±0.08	92.2± 3.4	0.27±0.05	6.7±3.2	73.1±33.2
Office room						
	1	0.37	95.0	0.35	6.9	21.0
	2	0.26	40.1	0.10	2.6	163.5
	3	0.05	54.5	0.02	2.1	26.8
	4	0.05	42.4	0.02	1.7	58.9
	mean±SD	0.18±0.16	58.0±25.5	0.12±0.16	3.3±2.4	67.6±66.1
Outdoor air						
	1	0.02	0.0	0.00	0.6	37.7
	2	0.03	0.0	0.00	0.7	42.6

1 Suspended particulate matter

2 Tobacco smoke concentrations were calculated from SPM and percentages of tobacco smoke in SPM measured by Spectra Analytical Filter Dust Meter (Roken-type)

煙は一車両で検出され、タバコ煙含有率41.8%を計測したが、他の一車両では全く検出されなかった。さらに空气中Cd濃度は、普通車両が $12.5 \sim 37.5 \text{ ng/m}^3$ と禁煙車両の 5.6 および 2.5 ng/m^3 に比べ明らかに高い値であった。そして普通車両のCd濃度は大気中Cd濃度 0.6 および 0.7 ng/m^3 に比べ約20～50倍高い値であった。空气中Pb濃度は普通車両で $36.5 \sim 247.8 \text{ ng/m}^3$ と車両間の濃度差は大きかったが、平均濃度で 126.5 ng/m^3 と禁煙車両の 103.7 および 42.2 ng/m^3 に比べ高い値であった。また、ほとんどの普通車両の空气中Pb濃度は大気中Pb濃度 37.7 および 42.6 ng/m^3 に比べ明らかに高い値であった。

パチンコ店では、SPMは $0.22 \sim 0.42 \text{ mg/m}^3$ と特急列車普通車両に比べ低値であったが、タバコ煙含有率は $85.8 \sim 94.7\%$ と特急列車普通車両のそれよりも高い値であった。また、空气中Cd濃度は $2.9 \sim 11.5 \text{ ng/m}^3$ 、空气中Pb濃度は $31.4 \sim 129.7 \text{ ng/m}^3$ であり、いずれも特急列車普通車両よりも低値であったが、大気中濃度と比べると、パチンコ店の空气中Cd濃度は明らかに高い値であった。空气中Pb濃度は大気中濃度と比べ、平均濃度において高かったが、Cdはど著明な差はみられなかった。

事務室の調査では、いずれの測定項目も各室内の間では測定値の差は大きかったが、平均値でみるとパチンコ店よりやや低いレベルにあった。また、空气中Cd濃度とPb濃度は大気中濃度に比し高い傾向がみられた。

次に全調査場所の室内空气中Cd、Pb濃度とSPMあるいは空气中タバコ煙濃度との関係を見ると、空气中Cd濃度はSPMとの間に $r = 0.881$ ($P < 0.01$)、空气中タバコ煙濃度との間に $r = 0.891$ ($P < 0.01$)といずれも有意な相関関係が認められた。これに対し、空气中Pb濃度とSPMの間には $r = 0.453$ 、空气中タバコ煙濃度との間には $r = 0.416$ と有意な相関は認められなかった。

以上の結果、調査した各室内のSPM汚染には喫煙により発生したタバコ煙が大きく寄与し、とくに特急列車普通車両のSPM濃度は禁煙車両や大気中濃度に比べ著しく高値となることが知られた。そして室内空气中Cd濃度は大気中のそれと比べ明らかに高値を示し、また、SPMや空气中タバコ煙濃度との間に高い相関関係が認められ、室内空気中のCd汚染にタバコ煙が大きく関与していることが明らかとなった。一方、室内の空气中Pb濃度はSPMや空气中タバコ煙濃度との間の相関は低かったものの、大気中濃度よりも高い傾向が認められ、また、室内空気中のPb濃度を調査場所別の平均値でみると、SPMや空气中タバコ煙濃度に対応した空气中Pb濃度の増加がみられ、室内空気中のPb汚染にタバコ煙が関与して

いることがうかがわれた。

考 察

タバコ煙中には数千種類の化合物が存在するといわれ⁷⁾、その中には人体に有害とされる物質が多数見いだされている。そして、ニトロサミン類、ベンツ(a)ピレンなど発癌性物質を始めとして多くの有害物質は主流煙よりも副流煙に多く⁹⁻¹¹⁾、喫煙による有害物質の暴露が喫煙者自身にとどまらず周囲へも波及することが問題となっている。著者らは有害金属として知られるCdとPbに着目し、主として喫煙者の暴露に関与する主流煙と室内汚染に関与する副流煙の両面から検討を行った。

まず、人工喫煙実験の結果では、実験に用いた国産シガレット7銘柄において、シガレット一本あたりにCdは $0.8 \sim 1.2 \mu\text{g}$ 、Pbは $0.8 \sim 1.3 \mu\text{g}$ が含まれていたが、これらは他の報告値¹²⁻¹⁴⁾とほぼ一致していた。この結果、国産シガレットに通常 $1 \mu\text{g}$ 前後のCdやPbが含まれていることが知られた。人工喫煙の結果、Pbは灰中に燃焼前に含まれていた量の約70%が残存し、揮散した量は30%にすぎなかったのに対し、Cdは約20%が灰中に残存するにすぎず、約80%が燃焼時に揮散することが判明した。この燃焼シガレットからのCdやPbの揮散には、これら金属の沸点やシガレット燃焼温度が大きな要因であると考えられる。すなわち、香川ら⁷⁾はシガレット燃焼部温度は、吸煙時が $900 \sim 1000^\circ\text{C}$ 、空気が流れていない時の燃焼部温度は約 800°C としている。したがって、Cdの沸点は 767°C 、Pbは 1740°C である¹⁵⁾のでシガレット燃焼温度からすれば、Cdは揮散しやすく、Pbは揮散しにくいと思われる。また、揮散したCdの多くは副流煙に存在し、平均で主流煙に含まれる量(50 ng/シガレット)の約5倍もの量が副流煙に分布すること、一方Pbは、主流煙、副流煙中に同程度の分布($約50 \text{ ng/シガレット}$)にすぎないことが明らかとなった。この結果、シガレット喫煙では喫煙者自身がCd、Pbの暴露を受けるのみならず副流煙によるCdやPbの室内汚染が懸念される。とくにCdは副流煙中に約 250 ng/シガレット と多量に含まれ、これは 10 m^3 の部屋でシガレット1本を喫煙することにより空气中Cd濃度は約 25 ng/m^3 増加することを示しており、無視できない汚染量であると思われる。

そこで、まずシガレット喫煙者自身のCdやPbの暴露について考察すると、喫煙者が非喫煙者に比べ高い血液中Cd、Pb濃度を示すことはすでに報告^{16, 17)}されているが、今回の著者らの調査結果においてもこれらの報告と同様な傾向がみられた。すなわち、血液中Cd濃度の測

定結果では、非喫煙者はGM $0.6 \sim 0.9 \mu\text{g/l}$ 、喫煙者はGM $1.7 \sim 1.9 \mu\text{g/l}$ であり、喫煙者の血液中Cd濃度は非喫煙者のそれよりも明らかに高いことが判明した。そして一日の喫煙本数と血液中Cd濃度の関係では、16~30本/日までは喫煙本数に対応して血液中濃度の増加がみられ、シガレット喫煙本数と血液中Cd濃度の間には密接な関係があることが示唆された。また、尿中Cd濃度は高校生群が最も低値で高齢群ほど高値を示す傾向にあり、喫煙者と非喫煙者の差は血液中Cd濃度ほど顕著ではなかったが、喫煙者の尿中Cd濃度は非喫煙者のそれよりも高値であった。一般に血液中Cd濃度は最近のCd暴露を反映し、尿中Cd濃度はCdの身体負荷量を反映するといわれている¹⁸⁾。喫煙者の血液や尿中のCd濃度が非喫煙者のそれに比べ高いことは、正常人において、喫煙からのCd暴露量やそれに伴うCd身体負荷量の増加が無視できない量であることを示していると思われる。そこで喫煙によるCdの体内吸収量を試算してみると、タバコ煙粒子の粒径別重量分布にはば対応してCd量の分布がみられたことから、主流煙中のCdのほとんどはタバコ煙粒子中に混在することが知られ、この結果、主流煙中Cdの肺における沈着率は主流煙粒子のそれにほぼ等しいことが推察される。また、主流煙粒子の肺における沈着率は50~80%とされており^{19, 20)}、肺沈着量の約50%が体内に吸収されるとされている²¹⁾ので、これらを考え合わせると、国産シガレットでは一日20本の喫煙により、喫煙者は約 $1 \mu\text{g}$ のCdを吸入し、そのうちの $0.5 \sim 0.8 \mu\text{g}$ が肺に沈着し、 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{g}$ が体内に吸収されることが計算される。Lewisら²²⁾は一日20本の喫煙により約 $1.5 \mu\text{g}$ のCdが肺に沈着することを報告している。また、Ikedaら²⁴⁾は正常人の一日あたりのCd吸収量を食物から $2 \sim 4 \mu\text{g}$ 、喫煙 $1 \mu\text{g}$ 、空気 $0.02 \sim 0.07 \mu\text{g}$ としている。Cdは主流煙よりも副流煙に著しく多く分布することから、喫煙者のCd暴露には主流煙の他に副流煙からの暴露も考慮されねばならないと思われるが、いずれにしても、正常人のCd取り込みにおける喫煙の寄与は食物に次いで大きく、喫煙が血液や尿中Cd濃度の上昇の原因となることが今回の人工喫煙実験の結果からも容易に想像される。一方、PbについてもCdの場合と同様に喫煙による体内吸収量を試算してみると、一日20本の喫煙により喫煙者は約 $1 \mu\text{g}$ のPbを吸入し、そのうちの $0.5 \sim 0.7 \mu\text{g}$ が体内に吸収されることが計算される^{19, 20, 24)}。今回血液、尿中Pb濃度を測定した例では、喫煙者と非喫煙者の差はCdにみられたほど明確ではなかった。これは、食物や喫煙以外からの吸収量が無視できない²³⁾ことや、

正常人レベルがCdに比べ著しく高いことなどにより、喫煙から受けるPb暴露の影響が判別されにくいと考えられる。しかし、一日の喫煙本数との関係をみると、両者の間には有意な相関は認められなかったものの、喫煙本数別に分類した群でみれば、0から16~30本/日までは喫煙本数に対応した血液中Pb濃度の増加がわずかながらみられ、喫煙による血液中Pb濃度上昇の可能性が示唆される。

次に室内環境調査の結果、SPMが高値を示す室内においてタバコ煙含有率は高く、特急列車普通車両が平均65.0%、パチンコ店が92.2%であり、室内SPMの上昇にタバコ煙が大きく関与していることが明らかとなった。そして空気中Cd濃度は特急列車普通車両で平均 20.5 ng/m^3 が検出され、これは禁煙車両の2.5および 5.6 ng/m^3 や大気中の 0.6 および 0.7 ng/m^3 に比べ著しく高い数値であった。また、他の調査場所においても空気中Cd濃度は大気中Cd濃度よりも明らかに高値を示した。一方、空気中Pb濃度は特急列車普通車両で平均 126.5 ng/m^3 が検出され、禁煙車両の42.2および 103.7 ng/m^3 や大気の 37.7 および 42.6 ng/m^3 より高い値であった。そして他の調査場所においても大気中よりも高いPb濃度を示す傾向がみられた。この結果、室内空気のSPM濃度の上昇にはタバコ煙の寄与が大きく、またSPM濃度の高い室内空気からはCdやPbが大気中濃度よりも高濃度に検出されたことから、喫煙により室内空気がCdやPbに汚染されることは明らかであるといえる。とくにCdについては空気中Cd濃度と空気中タバコ煙濃度の間に高い相関関係 ($r = 0.891$) があり、室内空気中Cd濃度の上昇にタバコ煙は密接に関与していることが認められる。このため、今回の調査で示されたごとく、タバコ煙により室内空気中Cd濃度が 20 ng/m^3 に上昇した環境では、呼吸量を $15 \text{ m}^3/\text{日}$ として、一日あたり $0.3 \mu\text{g}$ のCdを室内空気を介して吸入することになり、これは、前述のシガレット20本喫煙による主流煙からの推定吸入量 $1 \mu\text{g}$ と比較しても少なくはない量と考えられる。いずれにしても、喫煙は室内空気のCd、Pb濃度の上昇をもたらしていることから、喫煙者自身の問題にとどまらず受動喫煙による重金属暴露の問題としても重要であることが明らかとなった。

以上、今回著者らはタバコ煙によるCdとPbの汚染について主流煙と副流煙の両面から検討したわけであるが、その結果、喫煙は従来より指摘されている発癌性物質や有害ガスによる影響に加えてCdやPbなどの有害金属の問題にも関係することが判明した。これら重金属の喫煙

から受ける暴露の程度は人体に影響を及ぼすレベルと比べると低いレベルにあると思われる。しかし、それとは別に人々が一日の大半を過ごす室内において喫煙により空気中のCd、Pb濃度の上昇がみられることは受動喫煙による有害金属暴露といった点からも公衆衛生上好ましくない状況であるといえ、とくにCdについては副流煙中に著しく多く含まれることから、留意する必要があると思われる。

結 論

シガレット喫煙によるCdとPbの汚染について、主として喫煙者の体内汚染に関与する主流煙と室内空気汚染に関与する副流煙の両面から検討し以下の結果を得た。

- 1) 国産シガレット7銘柄においてシガレット一本あたりのCd、Pb含有量はいずれも約1 μg であった。そして人工喫煙実験の結果、主流煙にはCd、Pbともに約50ng/シガレットが分布し、一方副流煙には、Pbは主流煙とはほぼ同程度の量が分布したのに対し、Cdは主流煙の約5倍もの量(250ng/シガレット)が分布した。この結果、喫煙により発生した主流煙や副流煙が喫煙者自身のCd、Pb汚染や室内空気中のCd、Pb汚染に寄与することが示唆された。
- 2) 喫煙者の血液中Cd濃度は非喫煙者のそれに比べ明らかに高く、また、喫煙者の尿中Cd濃度は非喫煙者のそれに比べ高値を示す傾向にあった。そして、一日の喫煙本数に対応して血液中Cd濃度の増加がみられ、喫煙の影響が明らかであった。これに対し、血液、尿中Pb濃度においては喫煙者と非喫煙者の差は明確ではなかった。しかし、血液中Pb濃度と一日の喫煙本数との関係をみると、両者の間には有意な相関は認められなかったものの、喫煙本数別に分類した群でみれば、0から16~30本/日までは喫煙本数に対応した血液中Pb濃度の増加がわずかながらみられ、喫煙による血液中Pb濃度上昇の可能性が示唆された。
- 3) 室内環境の調査結果からは、特急列車普通車両、事務室、パチンコ店など喫煙が行われている場所における浮遊粉塵(SPM)濃度の上昇にはタバコ煙の寄与が大きく、またSPM濃度の高い室内空気からはCdやPbが大気中濃度よりも高濃度に検出されることが知られた。とくにCdについては空気中Cd濃度と空気中タバコ煙濃度の間に高い相関関係($r = 0.891$)が認められ、室内空気中Cd濃度の上昇にタバコ煙は密接に関与していることが知られた。一方、空気中Pb濃度と空気中タバコ煙濃度の相関は低くタバコ煙の影響は明らか

ではなかった。しかし、室内空気中Pb濃度を各調査場所別の平均値でみるとSPMやタバコ煙濃度に対応した空気中Pb濃度の上昇がみられ、室内空気中のPb汚染にもわずかながらタバコ煙が関与していることがうかがわれた。

文 献

- 1) 浅野牧茂：Passive Smoking—その環境と生体影響—，医学のあゆみ，**103**，479-499 (1977)。
- 2) 平山 雄：受動喫煙の健康影響，労働の科学，**43** (5)，4-11 (1988)。
- 3) 香川 順：室内汚染問題の歴史的経緯，医学のあゆみ，**144**，877-879 (1988)。
- 4) 呂 俊民，前川甲陽，藤村 満：浮遊粒子状物質による室内空気汚染，空気清浄，**14** (4)，1-11 (1976)。
- 5) 須那 滋，中嶋泰知：トルエン抽出・フレイムレス原子吸光法による生体試料中鉛およびカドミウム定量法の簡便化，産業医学，**29**，292-293 (1973)。
- 6) 木村菊二：分光濾紙塵埃計について(第一報)，労働科学，**49**，137-150 (1973)。
- 7) 香川 順，中館俊夫，石原陽子：タバコの成分と作用，呼と循，**38**，11-16 (1990)。
- 8) Whynder, E.L. and Hoffmann, D.: Tobacco and health, N. Engl. J. Med., **300**, 894-903 (1979)。
- 9) Brunnemann, K.D., Yu, L. and Hoffmann, D.: Assessment of carcinogenic volatile N-nitrosamines in tobacco and in mainstream and sidestream smoke from cigarettes, Cancer Res., **37**, 3218-3222 (1977)。
- 10) 厚生省編：喫煙と健康，喫煙と健康に関する報告書，p.35-75，保健同人社，東京(1987)。
- 11) Rickert, W.S., Robinson, J.C. and Collishaw, N.: Yields of tar, nicotine, and carbon monoxide in the sidestream smoke from 15 brands of Canadian cigarettes, Am. J. Public Health, **74**, 228-231 (1984)。
- 12) 渡辺清博，島 正吾，栗田秀樹，深谷 実，伊藤哲也，加藤幸久，加藤保夫：紙巻タバコ中の金属量(Ni, Cr, Pb, Cd, Be)について，第45回日本公衆衛生学会講演集，p.809 (1987)。
- 13) Menden, E.E., Elia, V.J., Michael, L.W. and Petring, H.G.: Distribution of cadmium and nickel of tobacco during cigarette smoking, Environ. Sci. Technol., **6**, 830-832 (1972)。
- 14) Elinder, C.G., Kjellström, T. and Lind, B.: Cadmium exposure from smoking cigarettes:

- Variations with time and country where purchased, Environ. Res., **32**, 220-227 (1983).
- 15) Stecher, P.G.: "The Merck Index" eighth edition, Merck & Co., Inc., Rahway, N.J., U.S.A. (1968).
- 16) Freiberg, L. and Vahter, M.: Assessment of exposure to lead and cadmium through biological monitoring: Results of a UNEP/WHO global study, Environ. Res., **30**, 95-128 (1983).
- 17) Brockhaus, A., Freier, I., Ewers, U., Jermann, E. and Dolgner, R.: Levels of cadmium and lead in blood in relation to smoking, sex, occupation, and other factors in an adult population of the FRG, Int. Arch. Occup. Environ. Health, **52**, 167-175 (1983).
- 18) Freiberg, L., Nordberg, G.F. and Vauk, V.: "Handbook on the Toxicology of Metals", 2nd edition, p.132-187, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, New York, London (1986).
- 19) Brain, J.D. and Valberg, P.A.: Deposition of aerosol in the respiratory tract, Am. Rev. Respir. Dis., **120**, 1325-1373 (1979).
- 20) Hillar, F.C., Mccusker, K.T., Mazumder, M.K., Wilson, J.D. and Bone, R.C.: Deposition of sidestream cigarette smoke in the human respiratory tract, Am. Rev. Respir. Dis., **125**, 406-408 (1982).
- 21) WHO: Recommended Health-based Limits in Occupational Exposure to Heavy Metals, WHO Technical Report Series, **647**, pp.21-22, WHO, Geneva (1980).
- 22) Lewis, G.P., Jusko, W.J., Coughlin, L.L. and Hartz, S.: Contribution of cigarette smoking to cadmium accumulation in man, Lancet, **1**, 291-292 (1972).
- 23) Ikeda, M., Watanabe, T., Koizumi, A., Fujita, H., Nakatsuka, H. and Kasahara, M.: Dietary intake of lead among Japanese farmers, Arch. Environ. Health, **44**, 23-29 (1989).
- 24) Rosen, J.F.: In "Dietary and environmental lead: human health effects" (Editor: Mahaffy, K.R.), p.157-185, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, New York, London (1985).
- (受付 1991年4月17日 受理 1991年8月14日)