

自動車排気ガスによる大気汚染の研究

— 高速自動車トンネル内外の炭化水素 —

STUDIES ON THE AIR POLLUTION DUE TO AUTOMOBILE EXHAUST

— The Gas Chromatographic Analysis of the Hydrocarbons in the Air in the Highway Tunnel and Its Vicinities —

庄 司 光*・山 本 剛 夫**・西 田 耕 之 助***

By Hikaru Shoji, Takeo Yamamoto and Kōnosuke Nishida

1. 緒 言

名神高速道路の愛知県尾張一宮と兵庫県西宮市の間約 191 km の路線が 1964 年 9 月に開通して阪神と中間の産業交流に大きく貢献するようになった。この路線の栗東一尾崎間は複雑な地形のため梶原(約 900 m)、天王山(約 1400 m)、蟬丸(約 380 m)、大津(約 400 m)にトンネルが建設された。

自動車の排気ガスによるトンネル内の空気汚染としては排気ガス中のばい煙による視程の低下や一酸化炭素による障害が問題とされており、トンネル内の照明や換気に関する研究がなされている^{1),2),3)}。天王山と梶原トンネルでは強力な送風機でトンネル内へ新鮮な空気を送り汚染物質をトンネル出口より希釈排出させる半縦流式(または半横流式)の換気法が採用されている⁴⁾。

自動車の排気ガス中にはばい塵、一酸化炭素のほかに、動植物に有害とされている成分や Smog の生成に関与する炭化水素、窒素化合物などが多く含まれており^{5),6),7)}、トンネル出口付近の農作物(柑橘、茶樹など)の被害が訴えられているが、これについての研究はきわめて少ない。そこで、これらの問題に関する基礎資料を得るためにガスクロマトグラフ法を用いて高速道路トンネル内外の大気中の炭化水素について測定を行なった。測定場所は名神高速道路天王山トンネルである。

2. 測定日時および地形概略

(1) 地形概略

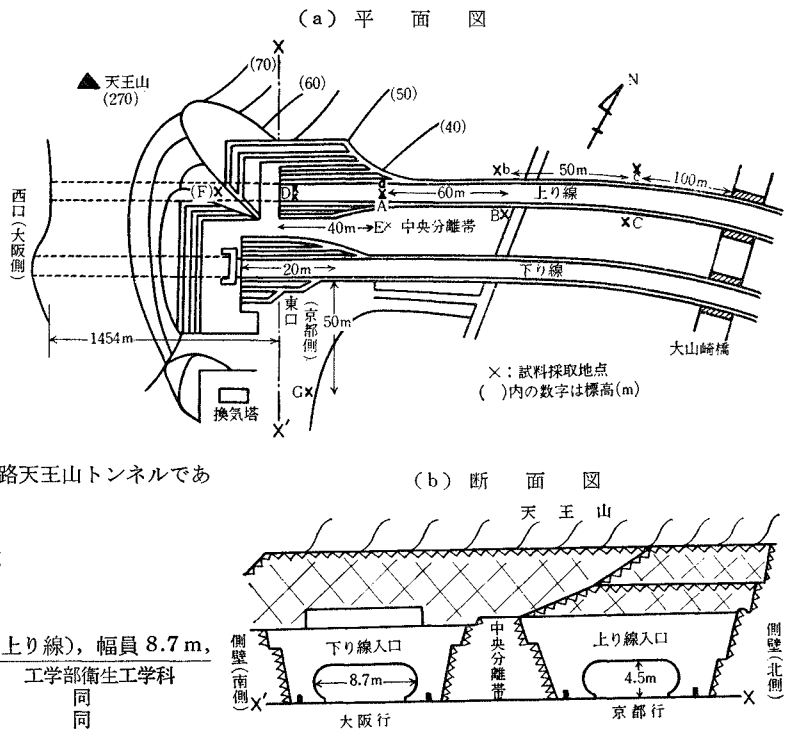
天王山トンネルは全長 1454 m(上り線)、幅員 8.7 m、

* 正会員 医博 京都大学教授 工学部衛生工学科
 ** 正会員 医博 京都大学助教授 同
 *** 正会員 京都大学助手 同

天井の高さ 4.5 m で、大阪府三島郡島本町と京都府乙訓郡大山崎村にまたがり、上下各 1 本のトンネルからなる。上下線とも西口(大阪側)から約 200 m 入った地点に頂上をもち、上り線は 0.85% の下り勾配で、下り線は 1.50% の上り勾配をもってトンネル東口(京都側)に達し、さらに道路はゆるやかに弯曲して約 250 m 東の大山崎橋に至る。トンネル東口付近の地形概略とトンネル坑口の断面(東側)を図-1に示す。坑口の背後には天王山(標高 270 m)が急迫しており、路線の北側は路面よりも高い斜面の山裾で南側は路面から急斜面をなして低下している。

上下線の間に設けられた中央分離帯の盛土部は上り線出口から東約 70 m 付近より急斜面をなして坑口の上端の高さ(約 7 m)に達する。上り線北側の側壁は高さ約 15 m(4 段)で出口から約 60 m 東の地点に達しており

図-1 天王山トンネル東口付近の地形概略



この間の路面は中央分離帯と側壁によって囲まれた凹状地形の底部に位置する。下り線南側の側壁は高さ約8m(2段)でトンネル入口より約20mの地点で路面の高さに一致する。また、トンネル東口の南に換気設備(送風機形式;横置1段軸流型,歯車減速電動機駆動式,最大風量;75m³/分)が備えられている。

(2) 測定地点および日時

被検空気の採取地点は図-1に記した通りで,上り線(京都市行)の路側(A,a, B,b,C,c),中央分離帯上(E),トンネル出口(D),トンネル出口から内方へ100m入った地点(F)ならびに換気塔付近(G)でいずれも地上1.5mの高さである。

測定日時と当日の天候はつぎのとおりである。

第1回	昭和39年1月20日(火)	晴	13°00'~17°00'
第2回	1月21日(水)	曇	13°00'~17°00'
第3回	2月1日(土)	曇	13°00'~17°00'
第4回	2月14日(金)	曇	11°00'~17°00'
第5回	2月15日(土)	曇	11°00'~17°00'
第6回	5月8日(金)	晴	11°00'~17°00'
第7回	5月9日(土)	晴	11°00'~17°00'

被検空気の採取を行なった際にはいずれもトンネル換気装置の運転は停止されており,トンネル内の換気は自動車交通による自然換気の状態,トンネル内の風向は常に出口側へと向っていた。

3. 測定項目および方法

(1) 気象条件

トンネル内ならびに東口付近で,被検空気採取時の気温,湿度,風向,風速の測定を行なった。また,中央分離帯上で水素ガスを充填した気球(ビニール布製,直径約2m)とサーミスター温度計(日本科学KK,大阪)によって地上0~40mの間の気温の垂直分布を測定した。

(2) 交通状況

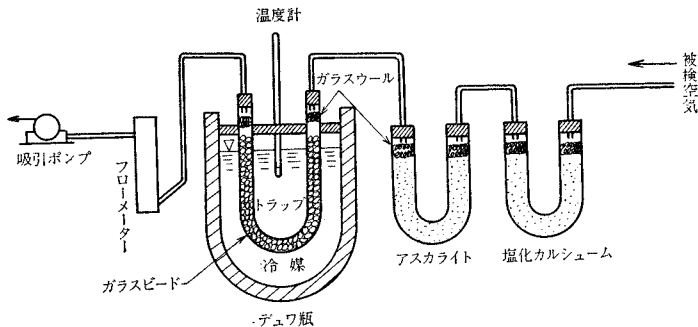
被検空気の採取時に上下車線を通じた自動車の時間当たり台数,平均走行速度,車種別通行頻度を測定した。

(3) 炭化水素

a) 試料の採取 トンネルから排出した自動車排気ガス成分は速やかに希釈されるために試料成分を濃縮捕集する必要があり,図-2に示す捕集トラップ法⁹⁾に準じて試料を採取した。

冷却槽中に浸けたU字型トラップ(内径4mm,長さ20cm,硬質ガラス製,直径1mmのglass beadを充填)を通して被検空気を吸引した。C₁~C₄炭化水素成分の捕集には液体窒素(-196°C),C₅~C₁₀炭化水素成分の捕集にはドライアイス-アセトン(-70°C)を冷却剤とした。大気中の炭酸ガス,水分はトラップの破損

図-2 試料捕集フローシート



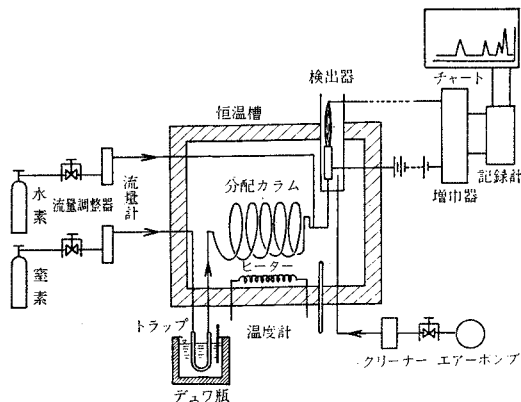
や試料成分の捕集,さらにはガスクロマトグラフ分析を妨害するためアスカライトならびに塩化カルシウム管で除去した⁹⁾。これらの吸引管による試料成分の捕集効率の変動は無視できる¹⁰⁾。トラップを通じた被検空気の吸引速度は1~6l/min.,でトンネル内では5~10分間(吸引空気量30~60l),トンネル外部では30~60分間(吸引空気量300~500l)の吸引捕集を行なった。

b) 分析方法

トンネル内外の各地点で捕集トラップに採取した試料を高感度ガスクロマトグラフ(柳本製,GCG500型)によって分析した。本器の検出方式は水素焰イオン化型で,記録計は1mV/200mm full scale(電子管式自動平衡方式)である。チャート速度は10~40mm/min.,とし,キャリアーガスには窒素を30ml/min.,の流速で使用した。燃焼用の水素の流速は32ml/min.,とした。窒素および水素はいずれもsilica-gel pipeを通して浄化して用いた。ガスクロマトグラフ分析のフローシートは図-3に示す。分配カラムの充填剤としてはC₁~C₄炭化水素成分の分析にDimethylsulfolane 4m+Activated alumina 0.2mを20°C¹¹⁾で,C₅~C₁₀炭化水素成分の分析にはTricresylphosphate 2mを90°Cで使用した¹²⁾。

記録紙上に検出された成分ピークについては標準物質を用いた絶対検量線法,内部標準法,添加法にもとづいて定性,定量を行なった¹³⁾。

図-3 ガスクロマトグラフのフローシート



さらに、全測定期間中に上り線トンネル出口から 100 m 内方へ入った地点 (F) において北川式ガス検知管 (光明理化学, 東京) を用いてトンネル内の一酸化炭素および炭酸ガス濃度も測定した。

4. 測定成績ならびに考察

(1) 気象条件

a) トンネル内外の温湿度 各測定当日の 15°00' にトンネル出口 (上り線) から内方へ 100 m 入った地点 (F) および中央分離帯 (E) で測定した気温, 湿度の成績を表-1 に示す。1~2 月のトンネル内の気温は外気温にくらべて -0.2~5.0°C 高く, 湿度は 2~3% 低い。5 月ではトンネル内外の差が小さい。

表-1 トンネル内外の温湿度

測定日	トンネル外 中央分離帯 (E 地点)		トンネル内 上り線出口より 100 m (F 地点)	
	15°00'		15°00'	
	気温 (°C)	湿度 (%)	気温 (°C)	湿度 (%)
1 月 20 日	4.6	—	9.5	—
1 月 21 日	5.8	68	10.8	65
2 月 1 日	6.2	40	8.2	38
2 月 14 日	9.6	—	9.4	—
2 月 15 日	9.8	—	10.0	—
5 月 8 日	26.5	36	25.0	33
5 月 9 日	24.5	38	23.5	44

1 月 21 日の 14°00'~15°00' に上り線のトンネル内で出口 (京都側) から 100 m ごとに地上 1.5 m の高さで測定した気温と湿度の分布を図-4 に示す。測定時の外気温は 5.8°C, 湿度は 68% である。トンネル入口側 (大阪側) から気温はわずかに上昇し, 出口から 100~500 m 地点の気温が比較的高い。湿度の分布もほぼ同様の傾向がみられるが出口より 100 m および 200 m 地点の値は他に比べてとくに高い。気温の上昇は通過する自動車排気の高い温度 (150~500°C)¹⁴⁾ とトンネル内の気流が出口側へ常に向っていることにより, 湿度の増加は排気ガス中の多量の水分¹⁵⁾ による。

b) 気温の垂直分布 1 月 20 日 15°00' に中央分

図-4 トンネル内の温度分布 (上り線)

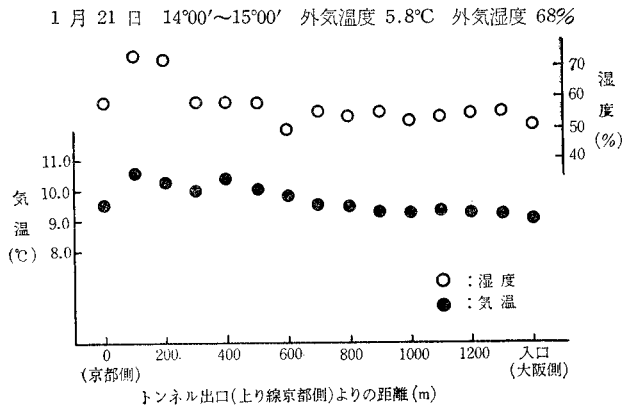


図-5 気温の鉛直分布 (地点別) 1 月 20 日 15°00'

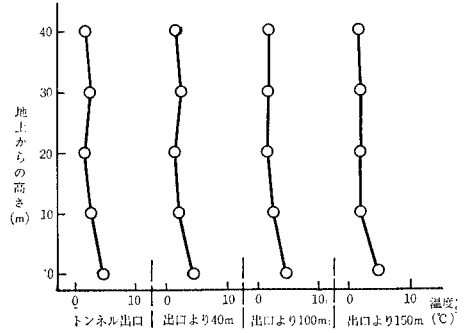


表-2 気温減率の時間的差異 (°C)

(5 月 9 日 中央分離帯上 E 地点)

時刻	高さ (m) 0	高さ (m) 10	高さ (m) 20	高さ (m) 30	高さ (m) 40	r
12°00'	27.5	26.9	26.8	26.4	25.9	4.00
13°00'	28.6	28.2	28.0	27.4	27.0	4.00
14°00'	28.0	27.8	27.2	26.8	26.5	3.75
15°00'	29.0	28.6	28.4	28.0	27.6	3.50
16°00'	27.5	27.5	26.6	26.3	26.4	2.85
17°00'	27.0	26.8	26.6	26.4	26.2	2.00

ただし r; C°/100 m

表-3 風向と風速 (中央分離帯上 E 地点)

月日	時刻	時刻		
		13°00'	14°30'	16°30'
1 月 20 日	風向	NW	N	NE
	風速 m/sec	1.6	1.8	0.5
1 月 21 日	風向	SW	NW	NW
	風速 m/sec	0.3	0.6	0.6
2 月 1 日	風向	SE	SE	SE
	風速 m/sec	2.8	5.2	1.5
2 月 14 日	風向	SE	NE	E
	風速 m/sec	0.5	1.2	0.7
2 月 15 日	風向	SE	NE	E
	風速 m/sec	0.5	1.2	0.7
5 月 8 日	風向	SSW	ESE	SSE
	風速 m/sec	1.2	1.4	2.0
5 月 9 日	風向	ESE	SSE	S
	風速 m/sec	3.0	2.1	1.1

離帯上で地上 40 m の高さまでの気温の垂直分布を測定した結果を地点別に図-5 に示す。トンネル出口より 40 m 地点までにおいては地上 30 m の高さに気温の小さな逆転がみられ, 出口より 100 m 地点に至って消失する。すなわち, トンネル出口付近では地表近くに大気安定状態が発生してトンネル内から排出される汚染物質の蓄積, 停滞が考えられる。

また, 5 月 9 日に中央分離帯 (E) で時刻別に測定した気温の垂直分布と気温減率は表-2 のとおりで, 気温の逆転はみられなかった。

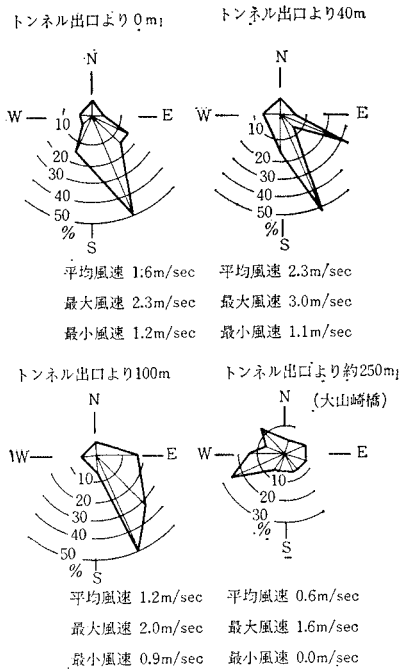
c) 風向と風速 調査当日に中央分離帯上 (E) で 13°00', 14°00', 16°30' に測定した外気の風向と風速の成績を表-3 に示す。1~2 月

の風速は 0.3~5.2 m/sec で、5月 は 1.1~3.0 m/sec である。1~2 月に外 風向 (NE) がトンネル出口に向うこ とがあるがトンネル出口より約 60 m 付近までの路線は北側の側壁と中央分 離帯の盛土部に囲まれており、出口よ り約 80 m 付近からゆるやかにカーブ しているため外風向がトンネル排気の 流出に直接影響することは少ないとみ

表-5 時刻別交通量 (台)

月 日	上り線 (名古屋行)							下り線(大阪行)	
	1月20日	1月21日	2月1日	2月14日	2月15日	5月8日	5月9日	1月21日	5月9日
11°00'~12°00'	—	—	—	—	—	—	—	324	258
12°00'~13°00'	—	192	192	222	324	276	444	87	198
13°00'~14°00'	248	322	192	258	330	438	474	126	354
14°00'~15°00'	258	226	288	234	470	289	516	171	378
15°00'~16°00'	210	264	316	240	414	312	480	198	426
16°00'~17°00'	262	240	220	276	348	360	462	135	444
平均	244	249	241	246	377	335	450	143	332

図-6 天王山トンネル東口付近の風配図 5月9日 13°00'~17°00' 中央分離帯上



るものとみられる。トンネル内の気流の方向は出口側へ と一定である。

(2) 交通量

調査当日の 11°00'~17°00' の間に上り線 (京都行) で 測定した時間別交通量は 表-5 に示す。表中には1月 21 日と5月9日に下り線 (大阪行) について測定した 成績をも記す。上り線の時間当り平均交通量は 241~ 450 台/h で、下り線 (134~332 台/h) よりやや大である。

名神高速道路の計画最大交通量は片側路線当り 2000 台/日で、日本道路公団天王山トンネル管理事務所の資 料によれば 10°00'~17°00' の間に終日交通量の約 70% が通過しており、測定時の上り線の交通状態は計画最大 交通量のほぼ 1/4 に達しているとみられる。

1月21日の13°00'~17°00'の間に上下線を通行した 自動車の車種構成と平均走行速度は表-6に示す。通行 車種構成は、上下線とも大型と中型乗用車 (貨客車を含 む) が合計で約 70% を占め、ついでトラックが多く、 バスはもっとも少ない。本測定時には名神高速道路の全 線が未開通で長距離トラック、バスの利用が少なかった ためと考えられる。

表-6 車種構成と平均速度 1月21日 12°00'~17°00'

	車種構成 (%)		平均走行速度 (km/h)	
	上り線	下り線	上り線	下り線
大型乗用車*	38.7	31.5	89	93
中型乗用車*	31.1	37.1	86	78
小型乗用車*	3.6	6.9	79	75
トラック	22.0	20.6	65	56
バス	1.2	0.2	69	64
三輪(二輪)	3.4	3.8	68	72
計	100.0	100.0	—	—
総台数	1244	717	—	—

* 印は貨客車を含む

られる。

5月9日の13°00'~17°00'にトンネル出口より約 250 m 離れた大山崎橋までの間の 4 地点で風向と風速を測 定した結果を図-6の風配図に示す。トンネル出口と出 口から 100 m 地点までの風向および風速には大差がな く、大山崎橋ではやや異なる。

トンネル出口 (上り線) と出口から内方へ 100 m 入 った地点 (F) で測定した風速を表-4に示す。トンネル 内の風速は 1~2 月が 1.9~2.9 m/sec で、5月にく らべてやや低い。トンネル出口の風速は 100 m 内方へ 入った地点にくらべてやや低く、わずかに外風が影響す

表-4 トンネル内の風速 (上り線) (m/sec)

月日 時刻	1月21日	2月1日	2月14日	2月15日	5月8日	5月9日
	15°00'	15°00'	15°00'	15°00'	15°00'	15°00'
出口	2.7	2.5	0.4	1.4	1.8	3.2
トンネル内 (出口より100m)	2.6	2.9	1.9	2.4	3.0	3.4
外風向	ESE	S	NE	NE	S	SSE
外風速	0.7	1.8	1.2	0.6	1.1	2.9

上下線ともトンネル内の路面は、やや勾配 (上り線 -0.85%, 下り線 +1.50%) をもっているが通行自動 車の速度にはほとんど影響はみられず、乗用車 (貨客車 を含む) がもっとも早く、他は大差がない。

(3) 炭化水素

上り線トンネル出口から内方へ 100 m 入った地点 (F) で地上 1.5 m の高さで採取した試料をガスクロマトグ

図-7 C₁~C₄ 炭化水素成分のガスクロマトグラム

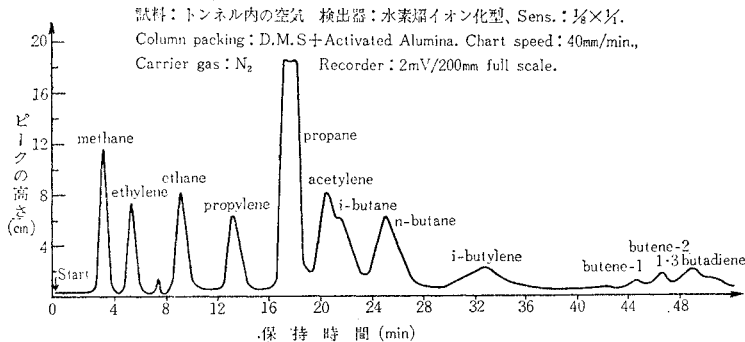
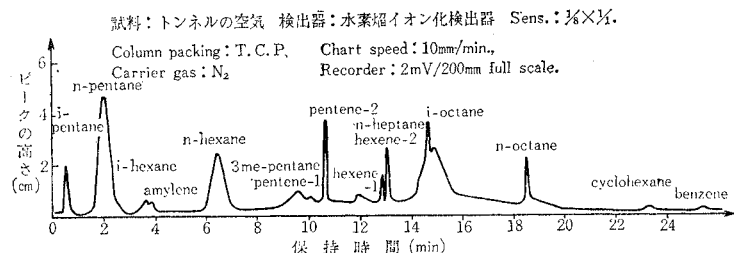


図-8 C₅~C₁₀ 炭化水素成分のガスクロマトグラム



ラフ法で分析した。C₁~C₄ 炭化水素成分について⁴⁾のガスクロマトグラム (Dimethylsulfolane+Activated alumina カラム) を図-7 に、C₅~C₁₀ 炭化水素成分についてのガスクロマトグラム (Tricresylphosphate カラム) を図-8 に示す。その結果、トンネル内の空気から C₁~C₄ 炭化水素成分とみられるピーク 12~15 個が検出され、そのうち 12 成分について同定した。C₅~C₁₀

炭化水素成分のピークは 16~18 個が検出され、18 成分について同定し得た。従来から自動車排気ガス中の炭化水素成分として述べられている成分のうちの 30 種が同定された。すなわち、C₁~C₄ 飽和炭化水素 5 種 (methane. CH₄, ethane. C₂H₆, propane. C₃H₈, n-butane. C₄H₁₀, i-butane. C₄H₁₀), C₂~C₄ 不飽和炭化水素 7 種 (ethylene. C₂H₄, propylene. C₃H₆, acetylene. C₂H₂, butene-1. C₄H₈, butene-2. C₄H₈, i-butylene. C₄H₈, butadiene-1,3. C₄H₆), C₅~C₈ 飽和炭化水素 9 種 (n-pentane. C₅H₁₂, i-pentane. C₅H₁₂, n-hexane. C₆H₁₄, i-hexane. C₆H₁₄, 3-methyl pentane. C₆H₁₄, n-heptane. C₇H₁₆, i-heptane. C₇H₁₆, n-octane. C₈H₁₈, i-octane. C₈H₁₈), C₅~C₈ 不飽和炭化水素 5 種 (amy-

lene. C₅H₁₀, pentene-1. C₅H₈, pentene-2. C₅H₈, hexene-1. C₆H₁₂, hexene-2. C₆H₁₂), 芳香族炭化水素 4 種 (cyclohexane. C₆H₁₂, benzene. C₆H₆, toluene. C₆H₅CH₃, xylene. C₆H₄(CH₃)₂) である。

昭和 39 年 1 月 20 日から 5 月 9 日の間に天王山トンネル東口付近および上り線トンネル内において測定した炭化水素の成績を各測定地点ごとに上記の分類について

表-7 炭化水素の測定成績

	場 所	交通量 (台/h)	検 出 数 成 分 数	C ₁ ~C ₄ 飽和 (ppm)	C ₂ ~C ₄ 不飽和 (ppm)	C ₅ ~C ₈ 飽和 (ppm)	C ₅ ~C ₈ 不飽和 (ppm)	芳香族 (ppm)	総炭化水素 (ppm)
1 月 20 日	出 口	258	27	427.5	216.1	235.6	3.0	16.1	898.3
	出口より東 100 m	248	14	7.2	1.9	1.7	0.0	0.1	10.9
1 月 21 日	トンネル内	322	30	495.2	168.6	227.7	2.6	23.2	917.3
	出口より東 40 m	240	22	43.3	16.4	15.6	0.0	0.1	75.4
	出口より東 100 m	288	14	7.5	1.3	1.6	0.0	0.0	10.4
	中央分離帯	222	11	1.0	0.4	0.4	0.0	0.0	1.8
2 月 1 日	出 口	316	29	552.8	269.5	331.8	3.0	25.8	1182.9
	出口より東 150 m	192	14	2.3	1.1	1.0	0.0	0.2	4.6
2 月 14 日	トンネル内	324	30	487.9	216.5	293.8	2.2	21.1	1021.5
	出口より東 100 m	276	13	3.0	0.9	0.8	0.0	0.2	4.9
	中央分離帯	258	10	1.1	0.2	0.3	0.0	0.0	1.6
2 月 15 日	出 口	330	30	517.1	226.6	240.4	1.9	21.4	1007.4
	出口より東 40 m	470	22	27.6	10.8	19.5	0.1	1.8	59.8
	出口より東 100 m	414	16	3.0	0.4	2.2	0.0	0.2	5.8
5 月 8 日	トンネル内	438	30	483.7	275.1	268.1	2.3	26.5	1055.7
	出口より東 100 m	312	15	2.5	0.3	0.8	0.0	0.2	3.8
	中央分離帯	289	13	2.0	1.5	1.2	0.0	0.1	4.8
5 月 9 日	トンネル内	462	30	594.8	305.2	305.3	3.7	31.9	1240.9
	出 口	324	30	494.2	201.4	246.5	2.9	19.9	964.9
	出口より東 40 m	474	19	45.3	20.3	25.5	0.0	1.8	92.9
	出口より東 100 m	480	11	0.8	0.2	0.3	0.0	0.1	1.4
	出口より東 150 m	467	10	0.3	0.2	0.3	0.0	0.2	1.0
	中央分離帯	516	12	1.8	0.9	1.0	0.0	0.1	1.4

示すと表-7のとおりで、表中には測定時の交通量をも記した。

C₁~C₄ 飽和炭化水素成分の濃度はいずれの地点においてももっとも大で、C₅~C₈ 飽和成分と C₂~C₄ 不飽和成分がこれにつぐ。検出炭化水素の合計値は上り線トンネル内で 917.3~1 240.9 ppm でトンネル出口の値と大差はない。トンネル出口より東 40 m 地点(路側)は 59.8~92.9 ppm でトンネル内の約 1/14 の値を示しており、トンネル排気が急速に希釈されている。トンネル出口より東 100 m 地点(路側から 5 m)は 1.4~10.9 ppm で、トンネル内の約 1/150 の値に低下する。出口より東 150 m 地点(路側より 5 m)は 1.0~4.6 ppm で、トンネル内の約 1/370 と大きく減少する。中央分離帯上では 1.6~4.8 ppm で、トンネル出口から同じ距離の路側での値にくらべて約 1/20 とかなり低い。この地点はトンネル出口より 40 m の路端から 5 m、路面から約 3 m の高さにある。路線北側の側壁が外風を遮ぎるためにトンネル出口よりの排気流は路面上を押し流されて中央分離帯上の斜面をはい上ることが少

表-9 個々の炭化水素成分の測定値 5月7日 (ppm)

区分	場所 時刻 交通量 成分名 (台)	トンネル内 (出口より 100 m 以内)	トンネル 出口	出口より 東 40 m (路側)	中央分離帯 (出口より 40 m)	出口より 東 100 m (路側より 5 m)	出口より 東 150 m (路側より 5 m)
		16°00' ~17°00'	11°00' ~12°00'	13°00' ~14°00'	14°00' ~15°00'	15°00' ~16°00'	16°00' ~17°00'
C ₁ C ₄ 飽和	methane	101.6	96.7	8.8	0.4	0.1	0.1
	ethane	104.1	84.7	10.2	0.4	0.2	0.1
	propane	161.6	122.0	10.4	0.4	0.2	0.1
	i-butane	103.5	93.0	9.0	0.1	0.2	0.0
	n-butane	124.0	89.4	6.9	0.5	0.1	0.0
C ₂ C ₄ 不飽和	ethylene	126.5	75.5	9.1	0.6	0.1	0.1
	propylene	130.7	88.0	6.6	0.2	0.1	0.1
	acetylene	32.4	26.0	4.1	0.1	0.0	0.1
	butene-1	1.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	butene-2	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
C ₅ C ₈ 飽和	i-butylene	11.6	9.4	0.5	0.0	0.0	0.0
	butadiene 1.3	1.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	i-pentane	56.4	44.5	5.0	0.2	0.1	0.0
	n-pentane	88.4	62.7	6.1	0.4	0.1	0.1
	i-hexane	66.4	48.1	3.6	0.4	0.1	0.1
飽和	n-hexane	59.7	66.9	7.4	0.0	0.0	0.0
	3-Me-pentane	14.4	7.9	2.0	0.0	0.0	0.0
	i-heptane	6.0	7.1	1.0	0.0	0.0	0.0
	n-heptane	7.2	4.8	0.3	0.0	0.0	0.0
	i-octane	4.8	3.5	0.1	0.0	0.0	0.1
C ₅ C ₈ 不飽和	n-octane	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	amylene	1.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	pentene-1	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
	pentene-2	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	hexene-1	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
芳香族	hexene-2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	cyclohexane	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	toluene	8.9	6.0	0.2	0.0	0.0	0.1
	benzene	13.8	8.8	1.6	0.1	0.1	0.1
	xylene	7.2	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0
total		1 240.9	964.9	92.9	3.8	1.4	1.0

表-8 トンネル内炭化水素の成分別減衰比率 (トンネル内の値を 100.0% とする)

場所	トンネル内 (%)	出口より 40 m (路側) (%)	出口より 100 m (路側より 5 m) (%)	出口より 150 m (路側より 10 m) (%)	換気塔付近 (%)	中央分離帯 (出口より 40 m) (%)
C ₁ ~C ₄ 飽和炭化水素 (506.7)	100.0	22.9	0.8	0.3	0.02	0.3
C ₂ ~C ₄ 不飽和炭化水素 (234.9)	100.0	20.2	0.3	0.3	0.0	0.3
C ₅ ~C ₈ 飽和炭化水素 (268.7)	100.0	22.5	0.4	0.3	0.01	0.3
C ₅ ~C ₈ 不飽和炭化水素 (2.7)	100.0	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0
芳香族炭化水素 (23.2)	100.0	15.9	0.4	0.6	0.0	0.2

ただし () 内は炭化水素の平均値 ppm

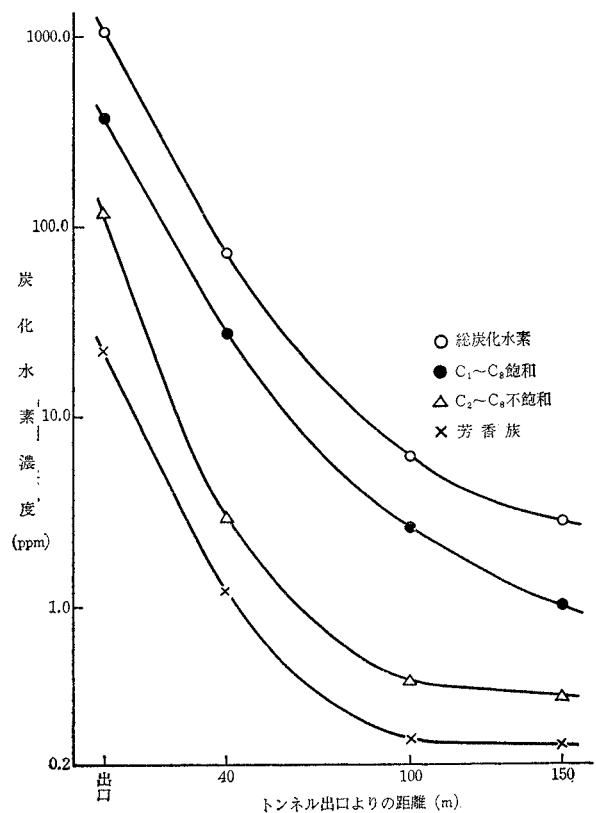
ないとみられる。

炭化水素の合計値および各成分区分の平均値とトンネル出口よりの距離の関係を 図-9 に示す。トンネル出口より 100 m 地点までの炭化水素濃度はいずれも大きく低下しており、その後 150 m 地点までの減少は小さい。すなわち、トンネル排気の影響は出口から、100 m 地点付近までとみられる。

トンネル内で検出された炭化水素の構成比率は飽和炭化水素 71.2~78.8% (平均 74.5%)、不飽和炭化水素 17.8~26.3% (平均 22.8%)、芳香族炭化水素 1.7~2.5% (平均 2.2%) でトンネル出口の値もほぼ同様である。これらの値は 庄司ら¹⁷⁾ がガソリンエンジン排気について測定した成績と大差はない。

各地点で検出した炭化水素成分を 表-5 の場合に準じて分類し、各成分区分ごとにトンネル内の値にたいす

図-9 トンネル出口からの距離と炭化水素濃度



る減少比率を求めて地点別に示すと表-8のとおりである。C₅~C₈ 不飽和成分区の減少比率は他に比べて著しく大きく、トンネル出口から 100 m の地点では検出されない。芳香族成分区はトンネル出口より 40 m 地点で他の成分区よりやや低い。C₁~C₄ 飽和、C₂~C₄ 不飽和、C₅~C₈ 飽和成分区の減少比率はほぼ同様である。不飽和成分は比較的不安定な化合物が多く大気中で速やかに光化学的変質を受ける¹⁸⁾ ことによるものと考えられる。

5月9日に各地で測定した炭化水素の個々の成分の成績は表-9のとおりである。表中には測定時刻および交通量(上り線)をも記す。トンネル内および出口では、C₁~C₄ 飽和成分、C₂~C₄ 不飽和成分中の ethylene, propylene および C₅, C₈ 飽和成分の濃度が大きい。植物に有害^{7), 19)} とされている成分中で ethylene, acetylene の濃度はかなり高く、C₄~C₆ 不飽和成分では *i*-butylene が約 10 ppm とやや大きい値を示すほかはいずれも 2 ppm より低い値である。また、芳香族成分では benzene が、約 10 ppm を示しており、Altshuller²⁰⁾ が自動車排気中の値(5.1 ppm)として述べているものよりも大である。

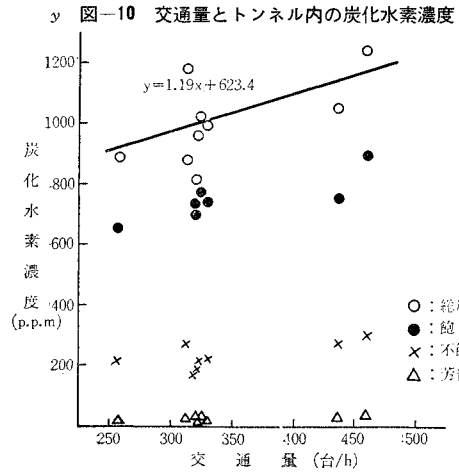
下り線入口より東 20 m の路端から南へ 50 m 離れた換気塔付近で1月21日および5月9日に測定した結果を表-10に示す。検出炭化水素は C₁~C₈ 飽和成分 6~7 種のみで合計値はトンネル内の値の約 1/10⁴ ときわめて低い。この地点での炭化水素値は Altshuller²¹⁾ が都市大気中の濃度として述べた値(0.1 ppm)とほぼ同程度で、Goldsmith²²⁾ が都市の交差点での値(0.94~2.33 ppm)として述べたものよりやや低い。

測定時にトンネルを通過した自動車の時間当り交通量

表-10 換気塔付近の炭化水素 (ppm)

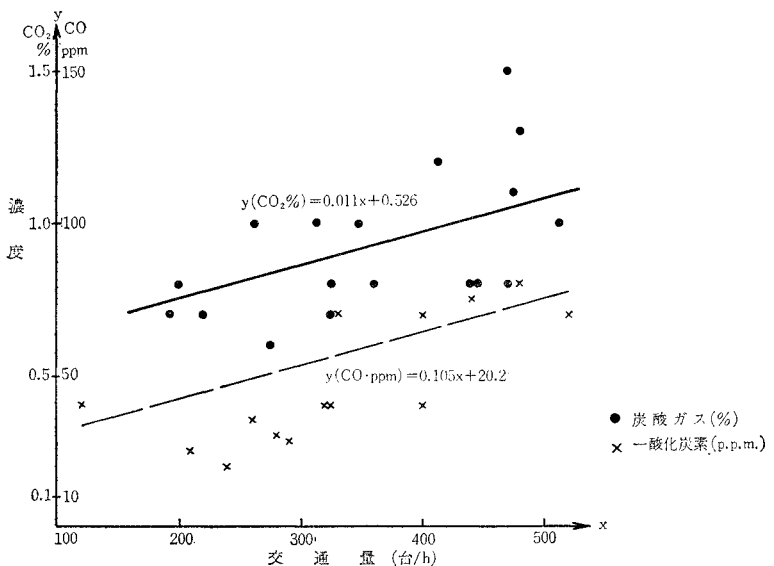
下り線入口から 20 m の路端より 南へ 50 m		
	6 21	5 9
methane	0.02	0.01
ethane	0.04	0.01
propane	0.02	0.01
<i>i</i> -butane	0.01	—
<i>n</i> -butane	0.02	0.01
<i>n</i> -pentane	0.02	0.01
<i>n</i> -hexane	0.01	0.01
total	0.14	0.06

とトンネル内で検出した炭化水素濃度との関係を 図-10 に示す。交通量の増加につれて炭化水素濃度も増大しているが、不飽和成分および芳香族成分の増加傾向は低い。検出炭化水素の合計値と交通量の関係は、 $y(\text{ppm}) = 1.19x(\text{台/h}) + 623.4$



となる。そこで、終日交通量の約 70% が通行する 10°00'~17°00' の間で計画最大交通量時(1750 台/h)のトンネル内の炭化水素濃度を推定すると約 2700 ppm となる。ただし、トンネルの換気装置の運転が停止している場合の推測である。しかしながら、換気装置によってトンネル内に新鮮な空気を送ることによってトンネル内の汚染物質の濃度は低下するが、トンネル出口から排出される汚染物質の絶対量には変化はなく、むしろ排出速度の増大から排気流の影響範囲が拡大されるものと考えられる。とくに、冬期にトンネル出口付近の地表近くで大気の逆転が発生している場合の障害については軽視しがたい。さらに、上り線のトンネル内(F)で測定したトンネル内の炭酸ガス濃度は 0.5~1.5% で、一酸化炭素濃度は 80 ppm 以下を示し、いずれも全調査期間を通じて大差はない。測定時の交通量とそれぞれのトンネル内の濃度との関係は 図-11 に示す。両者とも交通量の増加

図-11 トンネル内の炭酸ガスおよび一酸化炭素濃度と交通量



につれて増しており、その増加勾配もほとんど同様である。また前記の炭化水素の場合とくらべてもほぼ同程度である。計画最大交通量時(1750台/h)におけるトンネル内のそれぞれの濃度を推定すると炭酸ガス濃度は、約2.5%、一酸化炭素濃度は約200ppmとなる。ただし、トンネルの換気装置の運転が停止している場合の推測である。

4. 結 語

昭和39年1月20日から5月9日の間に名神高速道路天王山トンネル内およびトンネル出口付近(上り線)において自動車排気ガスによる炭化水素成分の測定を行った。ただし、測定時にはトンネルの換気装置の運転は行なっていない。測定結果を要約すればつぎのとおりである。

(1) トンネル内の気温は1,2月には外気温よりも高く5月では内外の差が小さい。

(2) 1,2月にはトンネルの出口近くで地上30mの高さに弱い気温の逆転が発生している。

(3) トンネルを通過する自動車の走行速度は60~90km/h、測定時の交通量は240~450台/hで計画交通(片側20000台/日)の約1/4に達している。また、通過自動車の構成は乗用車(貨客車を含む)が約70%でトラック(約22%)がこれにつぐ。

(4) トンネル内の空気から合計30種の炭化水素成分(約900~1200ppm)が検出され、その総量は交通量とともに増加する傾向を示した。

検出炭化水素の構成は飽和成分約75%、不飽和成分約23%、芳香族成分約2%で、自動車排気のそれとほぼ同様である。

トンネル出口では植物に有害な成分のうちでethylene, propyleneは100~170ppm, acetyleneは約90ppmで、 $C_4 \sim C_6$ 不飽和成分は*i*-butyleneが約10ppmを示すほかはいずれも2ppm以下である。benzeneは約10ppmとやや大きい。

(5) トンネル出口より東40m地点での炭化水素値はトンネル内の約7%に減少しておりトンネル排気流の影響がみられる。出口から東100m地点ではトンネル内の値の約0.6%に、出口より東150m地点ではトンネル内の約0.3%にそれぞれ減少しトンネル排気の影響は小さい。中央分離帯上(出口より40m)はトンネル内の約0.3%で、下り線より南へ50m離れた換気塔付近ではトンネル内の約0.02%と大きく低下する。

(6) 調査時の上り線トンネル内の炭酸ガス濃度は、0.5~1.5%、一酸化炭素濃度は80ppm以下で、いずれも交通量とともに増大しており、その増加傾向は炭化水素の場合とほぼ同様である。

(7) 本調査時と同様にトンネルの機械換気が行なわ

れていない場合で、計画最大交通量時(1750台/h)のトンネル内の濃度を推定すると炭化水素は約2700ppm、炭酸ガスは約2.5%、一酸化炭素は約200ppmに達する。

謝 辞 本測定の実施にあたって、多大のご協力を頂いた日本道路公団高速道路試験所および公団関係各位、測定にご助力を頂いた京都大学工学部衛生工学教室技官 出井幸子理学士、大学院学生 八木康雄、学生 石川義紀の諸氏に厚く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Larsen, R.L. and Konospinski, V.J.: Summer Tunnel Air Quality, Arch. Environ. Hlth., (5), 597-608, 1962.
- 2) 村山朔郎: トンネル内における機関車煤煙の衛生学的考察, 土木学会論文集, 16, 44-51, 1953.
- 3) 伊吹山四郎: 道路トンネルの換気, p.140, 理工図書, 東京, 1962.
- 4) 中野文基: トンネル換気の調整試験, 土木学会誌, 49-8, 50-55, 1964.
- 5) London, A.L.: Vehicle Smog Emission, Arch. Environ. Hlth., (6), 672-677, 1962.
- 6) Stern, A.C.: Air Pollution, II, p.586, Academic Press, New York, 1962.
- 7) 江田 茂編: 最新の分析化学, 第16集, p.162, 化学同人, 京都, 1965.
- 8) 庄司 光・山本剛夫・西田耕之助: ガスクロマトグラフによる大気汚染物測定に関する研究, 土木学会論文集, 91, 25-31, 1963.
- 9) Eggertsen, F.T. and Nelsen, F.M.: Gas Chromatographic Analysis of Engine Exhaust and Atmosphere, Anal. Chem., 30, (6), 1040-1043, 1958.
- 10) 荒木 峻・益子洋一郎・丸山正生編: ガスクロマトグラフィ, 第3集, p.210, 南江堂, 東京, 1962.
- 11) 庄司 光・山本剛夫・西田耕之助: 自動車排気ガスによる大気汚染の研究, 日本衛生学会誌, 18, (1), 198, 1963.
- 12) West, P.W.S. and Sant, B.R.: Determination of Total Gaseous Pollutants in Atmosphere, Anal. Chem., 31, (3), 399-401, 1959.
- 13) Keulemans, A.I.M.: Gas Chromatography, p.234, Reinhold Publishing Co., New York, 1959.
- 14) 日暮竜夫: 内燃機関排気ガス触媒浄化装置, 内燃機関, 2, (1), 39-45, 1963.
- 15) 山岸正謙: 自動車排気ガスと大気汚染, 機械の研究, 15, (1), 40-46, 1963.
- 16) Dickinson, J.E.: Air Quality of Los Angeles County, Technical Progress Report, II, p.290, Air Pollution Control District, County of Los Angeles, 1961.
- 17) 庄司 光・山本剛夫・西田耕之助: 自動車排気による大気汚染の研究, 第18回土木学会年次学術講演会概要, 205-206, 1963.
- 18) Leighton, P.A.: Photochemistry of Air Pollution, p.300, Academic Press, New York, 1961.
- 19) Wayne, L.G.: The Chemistry of Urban Atmospheres, Technical Progress Report, III, p.208, Los Angeles County Air Pollution Control District, 1962.
- 20) Altshuller, A.P. and Clemons, C.A.: Gas Chromatographic Analysis of Aromatic Hydrocarbons at Atmospheric Concentration, Using Flame Ionization Detector, Anal. Chem., 33, (8), 991-994, 1961.
- 21) Altshuller, A.P., Bellar, T., Sigsby, J.E. and Clemons, C.A.: Direct Application of Gas Chromatography to Atmospheric Pollutants, Anal. Chem., 34, (7), 763-765, 1962.
- 22) Goldsmith, J.R. and Rogers, L.H.: Health Hazard of Automobile Exhaust, Public Health Report, 74, (6), 551-558, 1959.