

【調査報告】

カンボジア国プノンペン市及びラオス国ビエンチャン都の 環境大気中の揮発性有機化合物濃度について

Levels of Volatile Organic Compounds in Phnom Penh City, Cambodia and Vientiane, Lao PDR

竹内 友規*, 鹿島 勇治*

Tomonori TAKEUCHI*, Yuji KASHIMA*

平成22年12月にカンボジア国プノンペン市、平成24年2月にラオス国ビエンチャン都を対象に環境大気中の揮発性有機化合物濃度の予備的調査を行った。調査の結果、プノンペン市の環境大気から排ガス由来のトルエン、*m*-/*p*-キシレン、*o*-キシレンが検出された。また、1,4-ジクロロベンゼン、1,1,1-トリクロロエチレン、ベンゼンが高い地点があり、市内に局所的に排出源が存在している事が示唆された。ビエンチャン都においても周辺農村に比べるとベンゼン、トルエン、*m*-/*p*-キシレン、*o*-キシレンが高い濃度で検出された。本調査で得られた両都市のVOCsレベルは隣国タイのバンコクに比べると概ね低いレベルといえるが今後も継続的な調査が望まれる。

キーワード： カンボジア、ラオス、加熱脱着、揮発性有機化合物

1. はじめに

近年、東南アジア域では経済発展に伴い、環境汚染が進んでいる。カンボジア国、ラオス国においても同様で、経済発展に伴い事業者数・車両数の増加等が報告されている^{1),2)}。排ガス等による大気汚染も懸念されるが、両国共に環境質モニタリングが職能となっている機関に、設備等を含めて多くの課題があり、モニタリングの実施が行われていないのが現状で³⁾、外部からの散発的な学術調査^{4),5),6),7),8)}がなされているだけである。

本調査では環境大気のパラメータが不足しているカンボジア国首都プノンペン市並びにラオス国首都ビエンチャン都で環境大気中の揮発性有機化合物（以下、VOCs）の予備調査を実施し、プノンペン市及びビエンチャン都大気中のVOCs濃度のデータを収集した。

2. 調査の方法

2.1 調査対象エリアとサンプリング

2.1.1 プノンペン市

プノンペン市は全面積678km²、全人口は150万人のカンボジアの首都だが、人口の38%に当たる57万人は堤防に囲まれた面積29km²(市の全面積の4.3%)の市中心部に居住している(2013年1月現在)⁹⁾。図1にこの中心部の概略図を示す。中心部内

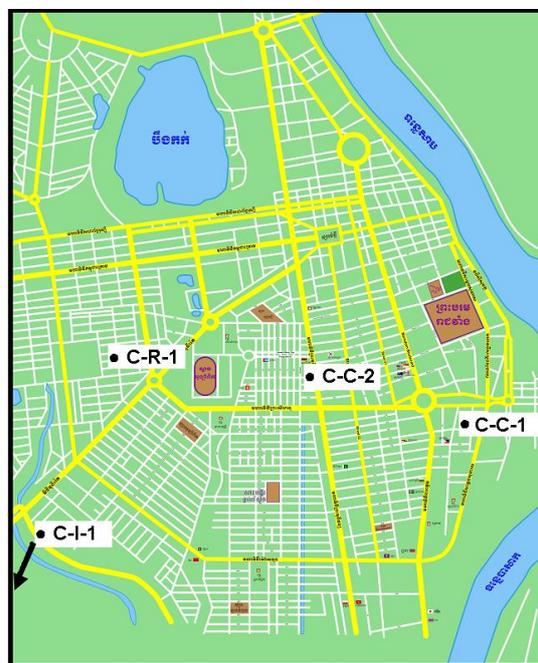


図1 プノンペン市概略図及びサンプリング地点

は居住地、商業地、工業地といった区分けが大まかで、主要道路にそって商店兼住居が並んでおり、家内制レベルの小規模工場（例えば自動車修理工場・木工所等）が散在している。2007年の段階で市に登録されている自動車数は15,800台、工場数は415である¹⁰⁾。

サンプリングは2010年12月5日～12日の日程で現地へ赴き実施した。サンプリング地点はビジネス・商業街兼居住区を走るシハヌーク通りで1ヶ所（C-C-1）、市内を南北に走る主要道路の一つモニボン通り沿線で1ヶ所（C-C-2）、住宅地で1ヶ所（C-R-1）の計3ヶ所で、更に市郊外の比較的大規模な工場が集積している地域の紡績工場の敷地内部

* (財)日本環境衛生センター 東日本支局
環境科学部 Dept. of Environmental Science,
East Branch, JESC

(C-I-1)でもサンプリングを実施した。このうち、C-C-2及びC-R-1では昼夜の2回に分けサンプリングを行った。一方、C-C-1では夜間のみ、C-I-1では昼のみのサンプリングを行った。

2.1.2 ビエンチャン都

ビエンチャン都は3,920km²、人口75万人の同国の中心地で、登録されている自動車数は360,000台、工場数は2,060である(2008年現在)²⁾。プノンペン市と同様に居住地、商業地、工業地といった明確な区分けはなく、主要道路に沿って商店兼住居が並んでおり、未登録の家内制レベルの小規模工場が散在している。

サンプリングは2012年2月9日～11日にかけて実施した。サンプリング地点は銀行、大規模商業施設が集まるTh Lan Hang通り1ヶ所(L-C-1)、また首都圏から北西へ約70kmに位置するNa Long Koung村で1ヶ所(L-V-1、図2の範囲外)の計2ヶ所である。同村は国道から数キロ離れた農村地帯に位置し、サンプリングは村内にある気象観測所で実施した。同観測所はストックホルム条約下で実施されている東アジアPOPsモニタリング調査のバックグラウンドサイトとして採用されており、汚染の少ない地点と言える。両地点共に昼夜の2回に分けて行った。

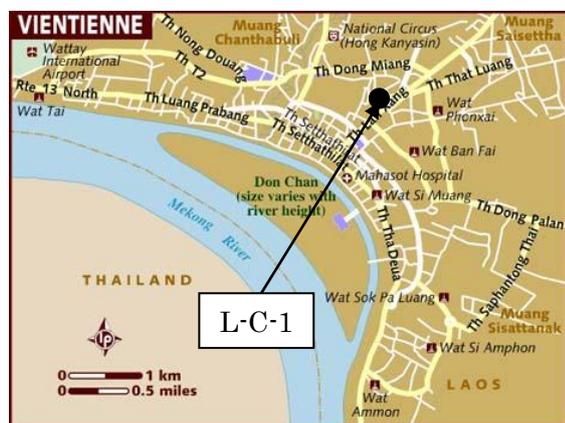


図2 ビエンチャン概略図及びサンプリング地点

2.2 サンプリング及び分析方法

サンプリング及び分析は日本国環境省による「有害大気汚染物質測定方法マニュアル(平成23年3月改訂)」または米国環境保護庁「Determination of Volatile Organic Compounds in Ambient Air Using Active Sampling Onto Sorbent Tubes(EPA-T017)」に準じ、Carbon30と

Tenaxを充てんした捕集管を2本連結し実施した。吸引ポンプとしてShibata MP-Σ30を用いて試料採取を行った。また、捕集時に水分除去を行うため、過塩素酸マグネシウム4gを充てんした金属管を捕集管の前段に接続している。

分析に用いた加熱脱着装置とGC/MS、また脱着・分析条件を表1に示した。測定対象物質はジクロロメタン、trans-1,2-ジクロロエチレン、cis-1,2-ジクロロエチレン、クロロホルム、1,2-ジクロロエタン、1,1,1-トリクロロエタン、ベンゼン、四塩化炭素、1,2-ジクロロプロパン、ブロモジクロロメタン、トリクロロエチレン、cis-1,3-ジクロロプロペン、trans-1,3-ジクロロプロペン、1,1,2-トリクロロエタン、ジブromクロロメタン、テトラクロロエチレン、トルエン、m-キシレン、p-キシレン、ブromホルム、o-キシレン、1,4-ジクロロメタンの計22物質である。内部標準物質としてトルエン-d₃体を使用した。

表1 分析条件

加熱脱着器条件	
機器	パナソニックエルマ社Turbomatrix 650ATD
ガス流量	1ml/min
ページ時間	1min
1次脱着温度	280℃
脱着時間	10min
冷却温度	5℃
2次脱着温度	280℃
脱着速度	40℃/sec
GC/MS 条件	
GC/MS	アジレントテクノロジー社7890A / 5975A:
カラム	GL Science TC-1 (0.25×60m, df:1.0μm)
昇温条件	30℃ (8min) →10℃/min→250℃ (17min)

3. 調査の結果

3.1 プノンペン市調査結果

3.1.1 サンプリング結果

サンプリングの結果を表2に示す。サンプリング期間中は乾季に当たり、降雨はなく湿度が低く気候は安定していた。サンプリング中は日平均で3～16km/hの北風が吹く事があった¹¹⁾。

3.1.2 分析結果

表3に分析した22物質のうち16物質の結果を示す(m-/p-キシレンは分離できないため、まとめて定量した)。分析結果は捕集管2本の合計を示した。

表2 プノンペン市のサンプリング記録

Area	No	Date	Wea-ther	Tem. (°C)	Humidity (%)	Air Pressure (hPa)	Flow R. (mL/min)	T. Volume (L)			
Commercial	C-C-1	Night time	Start	5-Dec-2010	16:30	Fine	31.1	61	985.1	65	55.81
		End	6-Dec-2010	6:48	Fine	-	-	-			
	C-C-2	Night time	Start	8-Dec-2010	18:00	Fine	26.8	58	982.9	50	36.12
		End	9-Dec-2010	6:45	Fine	26.0	50	981.5			
		Day time	Start	11-Dec-2010	6:54	Fine	26.5	49	982.5		
			End		18:12	Fine	26.7	52	981.3		
Residential	C-R-1	Night time	Start	8-Dec-2010	17:20	Fine	30.7	49	983.5	65	31.37
		End	9-Dec-2010	1:00	Fine	27.3	55	987.2			
		Day time	Start	8-Dec-2010	10:00	Fine	29.8	49	987.2		
	End	17:02	Fine		30.5	47	983.7				
	C-I-1	Day time	Start	10-Dec-2010	9:30	Fine	28.0	54	990.8	100	16.74
		End	12:15		Fine	36.0	34	989.0			

*: C-C-1の夜間、C-R-1の夜間にサンプラーが停止したため、停止時間については総捕集量と流量から推定した時間を記載している。

表3 プノンペン市の分析結果

µg/m ³	Commercial Area			Residential Area		Industrial Area
	C-C-1	C-C-2		C-R-1		C-I-1
	Night time	Night time	Day time	Night Time	Day Time	Day Time
dichloromethane	1.1	3.2	8.2	4.6	4.9	0.77
chloroform	< 0.10	0.44	0.98	4.6	< 0.21	2.5
1,2-dichloroethane	< 0.12	1.0	0.68	< 0.22	< 0.25	< 0.41
1,1,1-trichloroethane	0.29	0.25	0.25	16	0.57	8.9
benzene	7.2	6.9	10	15	11	< 2.0
carbon tetrachloride	0.61	0.65	0.61	0.83	0.74	0.56
1,2-dichloropropane	< 0.11	(0.31)	0.18	0.31	< 0.21	< 0.35
trichloroethylene	< 0.09	< 0.14	< 0.15	< 0.17	< 0.19	< 0.31
cis-1,3-dichloropropene	< 0.10	< 0.16	< 0.17	< 0.18	< 0.21	< 0.34
trans-1,3-dichloropropene	< 0.09	< 0.14	< 0.15	< 0.16	< 0.19	< 0.31
1,1,2-trichloroethane	< 0.11	< 0.16	< 0.18	< 0.19	< 0.22	< 0.36
toluene	16	20	32	53	113	24
m-/p-xylene	9.8	6.9	18	13	26	2.7
o-xylene	3.7	2.7	7.0	5.0	9.4	1.1
1,4-dichlorobenzene	0.26	150	180	1.6	2.6	1.5

*括弧内の数字は検出下限値以上定量下限値未満。

すべての地点で、ジクロロメタン、1,1,1-トリクロロエタン、四塩化炭素、トルエン、m-/p-キシレン、o-キシレン、1,4-ジクロロベンゼンが検出された。地点別ではC-R-1ではトルエンが他の区域に比べると高濃度検出され、ベンゼンについても若干高い濃度検出された。C-C-2では1,4-ジクロロベンゼンが昼・夜間共に高濃度で検出された。1,4-ジクロロベンゼンは主に殺虫剤として使用されており、プノンペン市内でも季節問わず殺虫剤が使われているためその影響が考えられるが同国での本物質の流通実態が不明なため推測の域を出ていない。C-I-1からはクロロホルム、また洗浄剤として広く用いられる1,1,1-トリクロロエタンが高濃

度検出された。

昼・夜間試料採取を行ったC-C-2とC-R-1での両者の結果を比較する。C-C-2ではベンゼン、トルエン、m-/p-キシレン、o-キシレン等が昼間濃度が夜間濃度に比べ高い結果になっていた。多くの都市と同様にプノンペン市中心部の昼間人口は夜間人口に比べて多く¹²⁾、また交通は朝・夕にラッシュがあり、深夜から早朝までは殆ど交通量がなくなる¹³⁾。このため、昼間濃度が高かったのは、車両からの排ガス、その他の都市活動の影響である事が推測される。

同様にC-R-1でもトルエン、o-キシレン、1,4-ジクロロベンゼンが夜間に比べて昼間に高濃度検出

された。一方、クロロホルム、1,1,1-トリクロロエタン、ベンゼンは夜間濃度が昼間濃度より高い結果になっていた。

6試料の各物質間の相関係数を取ったところ、トルエン、m-/p-キシレン、o-キシレン間で有意な相関 ($r > 0.811$, $p < 0.05$ $n=6$) が見られ、同一の発生源の存在が示唆された。

以上の結果、プノンペン市の環境大気からは同一発生源と思われるトルエン、キシレン類が検出され、その他の1,4-ジクロロベンゼン、1,1,1-トリクロロエタン、ベンゼン等が局所的に検出された。

3.2 ビエンチャン都調査結果

3.2.1 サンプルング結果

サンプルング概要を表4に示す。サンプルング期間中に降雨はなく、気候は安定しており、日平均で3~11km/hの南東からの風が吹いていた¹⁴⁾。

3.2.2 分析結果

表5に分析した22物質のうち17物質の結果を示す(m-/p-キシレンは分離できないため、まとめて定量した)。分析結果は捕集管2本の合計を示した。一部の物質を除きL-C-1の濃度レベルはL-V-1に比べると高く、交通、都市活動の影響と思われる。

昼間濃度と夜間濃度を比較するとL-V-1ではベンゼン、トルエン、キシレン類等が昼間に比べると夜間が若干高い濃度で検出された。周辺には時々通る車両、また農家以外、特に個別の汚染源は存在しなく、夜間が高くなった原因は不明である。

同様にL-C-1ではベンゼン、トルエン、キシレン類が昼間濃度に比べると夜間濃度が高い結果になっていた。原因の一つとして、サンプルング時の17:00以降に交通渋滞が見られた事が考えられる。その他、1,2-ジクロロエタン、trans-1,3-ジクロロプロペン、1,4-ジクロロベンゼンも夜間が高い結果になっていた。

表4 ビエンチャン都のサンプルング記録

Area	No.	Date	Wea-ther	Tem.(°C)	Humidity(%)	Flow R.(mL/min)	T.Volume(L)
Rural (Na Long Koun Village)	L-V-1	Night Start	9-Feb-12	17:55	Fine	33.4	37
		Night End	10-Feb-12	7:00	Cloudy	23.3	77
		Day Start	9-Feb-12	8:07	Fine	24.5	66
		Day End	9-Feb-12	17:25	Fine	35.7	31
Commerical (Vientiane)	L-C-1	Night Start	10-Feb-12	16:40	Fine	30.4	50
		Night End	11-Feb-12	6:59	Cloudy	24.5	60
		Day Start	11-Feb-12	7:17	Cloudy	24.5	65
		Day End	11-Feb-12	16:34	Cloudy	27.3	51

表5 ビエンチャン都の分析結果

μg/m ³	L-V-1(Rural)		L-C-1(Commerical)	
	Night time	Day time	Night time	Day time
dichloromethane	0.74	1.0	0.71	5.49
chloroform	0.16	0.16	0.25	0.20
1,2-dichloroethane	0.17	0.23	2.9	0.40
1,1,1-trichloroethane	< 0.041	< 0.068	< 0.051	< 0.077
benzene	4.5	2.9	8.6	3.2
carbon tetrachloride	0.54	0.13	0.22	0.52
1,2-dichloropropane	0.11	0.14	0.07	0.19
trichloroethylene	0.03	(0.03)	0.06	0.06
cis-1,3-dichloropropene	< 0.005	< 0.009	< 0.007	< 0.010
trans-1,3-dichloropropene	< 0.009	< 0.009	0.041	< 0.010
1,1,2-trichloroethane	< 0.006	< 0.011	< 0.008	< 0.012
toluene	4.1	3.3	31	7.5
m-/p-xylene	0.94	0.22	6.8	1.2
tribromomethane	0.016	0.055	(0.010)	0.025
o-xylene	0.36	0.093	2.7	0.50
1,4-dichlorobenzene	< 0.10	(0.13)	1.8	0.41

3.3 他国との比較

本調査で得られたプノンペン市 (C-C-2, C-R-1) の結果及びビエンチャン都及びその周辺農村の結果 (L-C-1, L-V-1) をタイ国首都バンコクでの報告値¹⁵⁾と比較したものを図3に示す。プノンペン市とビエンチャン都との結果は、昼・夜間濃度から全日濃度を算出し比較している。なお、参考文献にはBangkok Residential Area のトルエン、キシレン類のデータが報告されていない。

プノンペン市、ビエンチャン都のキシレン類の濃度は交通量、人口が両都市より多いバンコクより低いレベルにあった。しかし、プノンペン市の

ジクロロメタンのレベルはバンコクより高く、また、C-R-1のクロロホルム、ベンゼン、トルエンもバンコクより高い傾向にあった。

今回、得られた試料毎のトルエン、ベンゼンの濃度比 (以下、T/B) を算出し表7に示した。大気中のT/Bは交通量の増加、都市活動の増加に伴い、値が増加すると言った報告がなされており¹⁶⁾、アジアの各都市の報告値はバンコク (T/B=8.4)、マニラ (T/B=10)、香港 (T/B=5) だった^{16), 17), 18)}。プ今回得られた両都市の結果はこれら報告値に比べると概ね低い結果を示した。しかし、プノンペン市のC-R-1の昼間試料のみ10.3と高い値を示した。

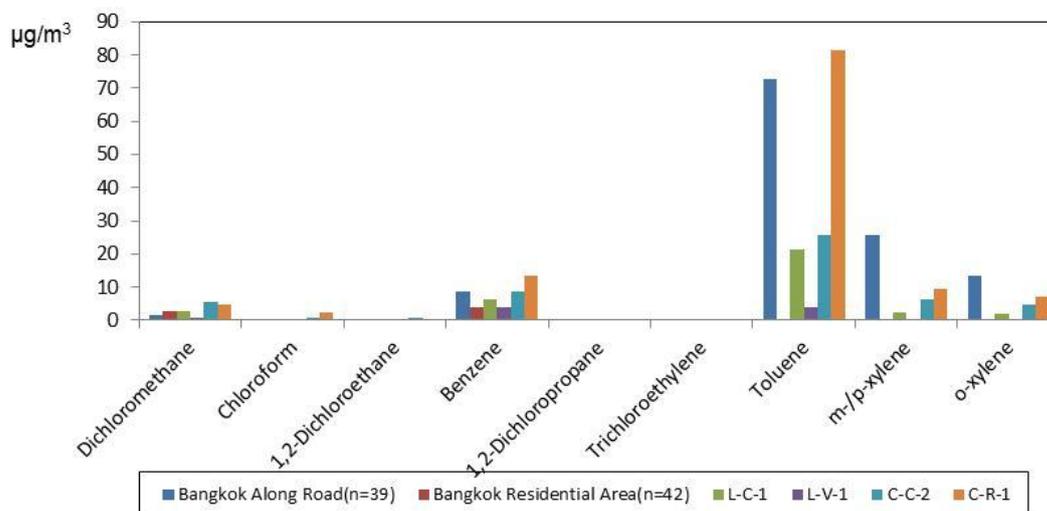


図3 プノンペン市、ビエンチャン都及びタイ国バンコクのVOCsレベルの比較

C-R-1は住宅地だが、前述した通り小規模工場が散在し、本調査でも夜間にベンゼン濃度が高くなるなどの傾向も示しており、周辺に個別な汚染源の存在が示唆された。ビエンチャン都の結果は、都市域での汚染のためか、L-C-1の結果がL-V-1より高い値を示した。

表7 トルエン/ベンゼン比

		Toluene/Benzen
L-V-1	Night	0.9
	Day	1.1
L-C-1	Night	3.5
	Day	2.3
C-C-1	Night	2.2
	Day	2.8
C-C-2	Night	2.8
	Day	3.1
C-R-1	Night	3.5
	Day	10.3

4. まとめ

本調査の結果、プノンペン市及びビエンチャン都の環境大気からトルエン、m-/p-キシレン、o-キシレン等の自動車排ガスに起因すると思われる揮発性有機化合物が検出された。また、プノンペン市では1,4-ジクロロエタンや1,1,1-テトラクロロエチレンなどの特定の物質による局所的な汚染も示唆された。両国共に、今後の経済発展に伴い更に汚染が進んでいく事が考えられるため、定期的なモニタリング体制の確立及び実施が望まれる。

5. 謝辞

本研究の一部は、当センター研究奨励金制度 (H20年度) の助成を受けて実施された。

また、調査はカンボジア国環境省、ラオス国天然資源環境省の協力で実施しており、ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Ministry of Environment, Kingdom of Cambodia (2008): Cambodia Environment Outlook, pp. 18-20
- 2) GTZ(2005), Clean Air for Smaller Cities in the ASEAN Region, pp.3-5
- 3) 竹内友規ら(2010): 東南アジア諸国における環境モニタリング分野の現状とその技術協力におけるセンターの可能性と課題, 日環セ所報 No.37, pp85-91
- 4) 鹿島勇治ら(2001):カンボジア・プノンペン市内の二酸化窒素, 二酸化硫黄, 浮遊粒子状物質濃度. 環境化学討論会講演要旨集, pp396-397
- 5) 鹿島勇治ら(2000):カンボジア・プノンペン市沿道の大気汚染. 環境化学討論会講演要旨集, pp528-529
- 6) 村瀬隆広(2006):カンボジア・プノンペンにおける大気汚染の現状とその特性. J.Aerosol Res. 21(2), pp.101-107
- 7) Tomonori TAKEUCHI *et al* (2005): Sewage Water Quality from Phnom Penh City, Journal of Water Environmental Technology, Vol 3, No. 1, pp133-143
- 8) Tomonori TAKEUCHI *et al* (2008): Water Quality on Water Supply System in Phnom Penh City, Cambodia, 1st IWA ASPIRE, 2008
- 9) プノンペン市のHPより
- 10) カンボジア環境省職員からの聞き取り
- 11) プノンペン市近郊の気象観測所データによる
- 12) 西文彦(2010):カンボジア・プノンペン首都圏の昼間人口, 第62回日本人口学会での発表
- 13) 筆者らの1995年~2010年までの定期的な訪問による観察
- 14) ビエンチャン市の気象観測所データによる
- 15) 芳住邦雄(2009):バンコク及び東京における大気環境中の揮発性有機化合物(VOCs)の環境動

態, 環境と測定技術, Vol.36, No.6, pp25-37

- 16) Wanna Laowagul *et al* (2008): Ambient Air Concentration of Benzene, Toulene, Ethybenzene and Xylene in Bangkok, Thailan during April-August in 2007, Asian Journal of Atmospheric Environment Vol.2-1, pp14-25
- 17) Lee S.C *et al*(2002): Volatile organic compounds (VOCs) in urban atmosphere of Hong Kong, Chemosphere 48, 375-382
- 18) Gee I.L. *et al*(1998): Ambient air levels of volatile organic compounds in Latin America and Asian Cities; Chemosphere, 36, 2497-2506

Summary

A preliminary study of levels of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air was carried out in the Kingdom of Cambodia and the Lao People's Democratic Republic. Samples were taken at four points in Phnom Penh, Cambodia (two points in a commercial area, one point in a residential area, and one point in an industrial area) in December, 2010. Samples were taken at two points in Vientiane, Lao PDR (one point in a commercial area and one point in a rural area) in February, 2012. Ambient air samples were collected by sorbent tube (Tenax TA and Carboxen 1000) and were analyzed by thermal desorption GC/MS systems.

Dichloromethane, toluene, m-/p-xylene, o-xylene and 1,4 dichlorobenzene were detected at all points in Phnom Penh. Significant correlations were found among toluene, m-/p-xylene and o-xylene. An extremely high level of 1,4-dichlorobenzene was found in the commercial area, suggesting that there are specific pollutant sources around this point.

As for the results in Lao PDR, the levels of VOCs in the commercial area were higher than those in the rural area. Especially benzene, toluene, m-/p-xylene and o-xylene were detected at levels of 8.6, 31, 6.8 and 2.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively in the commercial area at night time.

The number of pollutant sources will increase with economic growth. Further study of the levels and pollutant sources of VOCs in ambient air is needed.