アナリティカルレポート

携帯型表面弾性波センサーアレイ式化学剤検知器の性能

松下 浩二^{1,2}, 関口 裕之^{1,2}, 瀬戸 康雄^{®1}

Performance of Portable Surface Acoustic Wave Sensor Array Detector for Chemical Agents

Koji MATSUSHITA^{1,2}, Hiroyuki SEKIGUCHI^{1,2} and Yasuo SETO¹

¹ National Research Institute of Police Science, 6-3-1, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-0882

² Tokyo Metropolitan Police Department, 2-1-1, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8929

(Received 14 April 2004, Accepted 28 August 2004)

The detection performance of a portable surface acoustic wave sensor array chemical agent detector (JCAD, BAE Systems) was investigated with nerve gases, blister agents, and blood agents. The vapors of sarin, soman, tabun and lewisite 1 (low level) were recognized as “NERV (nerve agent)” after about 10 sec of sampling, and the detection limits were about 30, 50, 100 and 300 mg/m³, respectively. The vapors of mustard gas and lewisite 1 (high level) were recognized as “BL (blister agent)” after about 10 sec sampling, and the detection limit for mustard gas was about 40 mg/m³. The gases of hydrogen cyanide and cyanogen chloride were recognized as “BLOD (blood agent)” after about 2 min sampling, and the detection limits were about 30 and 1000 mg/m³, respectively. Many solvents, such as methanol, dichloromethane and ammonia, were also recognized as chemical-warfare agents.

Keywords : chemical-warfare agents; on-site detector; detection performance; surface acoustic wave sensor array.

1 緒 言

第一次大戦から使用され始めた化学兵器は、冷戦時に大量に製造・備蓄され、1980年代のイラン・イラク戦争で再び用いられた。1992年に化学兵器の開発、生産、貯蔵及び使用の禁止並びに廃棄に関する条約が批准され¹⁾、1995年に我が国で化学兵器の禁止及び特定物質の規制等に関する法律（化学兵器禁止法）が成立し、1997年に化学兵器禁止条約が発効した²⁾。しかし、1995年東京地下鉄において不特定の民間人をターゲットとしてサリンが散布され多数の死傷者を出し、全世界に衝撃を与えた³⁾⁴⁾。また、2001年に米国で航空機による同時多発テロ、郵便物炭疽菌によるテロ事件が発生し、生物・化学剤等の大量殺傷型兵器を用いたテロの脅威は高まり、危機管理体制の強化が叫ばれている⁵⁾。化学剤テロ事件においては、被害者

救命、初動捜査の必要上一刻も早い原因物質の特定が要求される。サリン事件では、現場試料が警察鑑定機関や他の検査機関に搬送され、分析がなされた⁴⁾。しかし、現場では初動措置を任務とする警察機動隊や消防隊は、個人防護等を目的として化学剤の検知を実施する。現在、軍用仕様の化学剤検知器が用いられているが、実際に性能を発揮するか否か保証はない。本論文では、化学センサー技術として期待される市販の表面弾性波化学剤検知器JCAD (Joint Chemical Agent Detector)⁶⁾について、化学剤に対する検知性能を検証したので報告する。

2 材料及び方法

2.1 装 置

米国 BAE Systems 製の JCAD は、長さ 19 cm、幅 12 cm、高さ 6.5 cm、本体重量 840 g、バッテリー（充電式電池で 20 時間以上動作）駆動の携帯型化学剤検知器である (Fig. 1)。電源 (keypad 部) をオンにすると、検知モード

¹ 科学警察研究所: 277-0882 千葉県柏市柏の葉 6-3-1

² 現在所属 警視庁: 100-8929 東京都千代田区霞が関 2-1-1

Fig. 1 The picture of JCAD detection unit

(sampling) になり、吸入口 (inlet, フィルター付きキャップあり) から外部空気を連続的に吸引し、本体内部の表面弾性波 (SAW) センサーアレイ (10 相) 部分の流れ本体裏面の排気口から排出される。化学剤が SAW センサー上の特異的ポリマーに吸着し、変化した SAW 周波数が信号処理され、化学剤として認識されると警報が表示され、警告音が発せられる。パネル (display) 上で、化学剤の種類 (NERV: 神経ガス, BL: びらん剤, BLOD: 血液剤), 危険レベル (HIGH ← MED ← LOW), 濃度 (mg/m^3) を表示する。警報表示後、浄化モード (purge) になり、内部流路が変わり、外部から吸引されスクラバーを通して洗浄された空気がセンサー部の残留化学剤の汚染を取り除く。浄化が終了すれば、警報が停止し、検知モードに復帰する。検知器の動作確認の目的で、標準物質 (confidence checker) を用いた認証試験を事前に行う。

2.2 試薬

サリン (*0*-isopropyl methylphosphonofluoridate), ソマン (*0*-pinacolyl methylphosphonofluoridate), タブン (*0*-ethyl *N,N*-dimethyl phosphonocyanidate), マスタードガス {bis(2-chloroethyl)sulfide}, 及びルイサイト 1 (2-chlorovinyl dichloroarsine) は、オランダ TNO Prins Maurits Laboratory より輸入した。5 品ともに常温で無色透明液体であり、純度は 98% 以上 (TNO 保証) であった。その他の試薬は、市販の特級品を用いた。

2.3 ガスの調製

既知濃度の化学剤の *n*-ヘキサン溶液 5 μl を GL サイエンス製 500 ml 容セミニードルバルブ付き気体採取容器 (500 ml ガス採取管) に取り、密封してドライヤーで蒸発させ、気化ガスを調製した。既知濃度の青酸カリウム水溶液をシャーレに取り、10 l 容パイレックスガラス容器に入れ、10% 硫酸水溶液 0.5 ml をシャーレに加え素早くふたをし、密閉にして青酸ガスを調製した。同様に、既知濃度の青酸カリウム水溶液をシャーレに取り、10 l 容器に入れ、次亜塩素酸ナトリウム水溶液 (有効塩素濃度 5%) 0.5 ml を加え素早くふたをして塩化シアンガスを調製した。

2.4 検知実験

化学剤の検知実験は、JCAD 本体を検知モードで待機させ、化学剤気化ガス入りの 500 ml ガス採取管の片方の口を JCAD 本体の吸入口に近づけ、もう一方の口からシリコンチューブで連結したガラス注射塔 (100 ml 容) で連続的に押し出し (約 500 ml/min), 気化ガスを JCAD 吸入口に噴射した。警報が表示されると、気化ガスの噴射を停止した。気化ガス噴射時間は最長 1 分とした。

青酸ガス、クロロシアンを検知実験は、気化ガス入り 10 l 容器に素早く JCAD 本体を入れ密閉にし、警報が表示されるとすぐに本体を容器から取り出し、検知の表示を観察した。有機溶媒の検知実験は、溶媒入り試薬瓶のふたを開け、JCAD 本体の吸入口に近づけ、検知の表示を観察した。

2.5 特定物質使用に関する注意

化学剤は猛毒であり、化学兵器禁止法に従い経済産業大臣より認可を受け、スクラバー式ドラフトチャンバー内で適切な防護マスク、服、手袋を装着して実験を行った。

3 結果

3.1 化学剤の検知結果

化学剤の気化ガスを JCAD に吸引させた場合の検知結果を Table 1 に示す。サリン (*n*-ヘキサン溶液) の気化ガスは、30 mg/m^3 の濃度において 12 秒の吸引で警報率 75% で “NERV” の警報が表示され、50 mg/m^3 以上の濃度において警報率 100% で “NERV” と表示された。ソマン (*n*-ヘキサン溶液) の気化ガスは、50 mg/m^3 以上の濃度において約 10 数秒の吸引で “NERV” の警報が警報率 100% で表示された。タブン (*n*-ヘキサン溶液) の気化ガスは、100 mg/m^3 の濃度において 10 数秒の吸引で “NERV” の警報が警報率 100% で表示された。タブン純液体の気化ガスは、100 mg/m^3 の濃度において 10 秒弱の吸引で “NERV” の警報が警報率 100% で表示された。警

Table 1 Detection of chemical agents by JCAD

Agent	Concentration/ mg m ⁻³	Alarm/ trial	Response time/s	Recovery time/s	Alarm		
					Class	Hazard level	Concentration ^{a)}
Sarin	10	0/3					
	30	4/5	12	235 ~ 238	NERV	LOW-MED	0.58
	50	1/1	13	402	NERV	LOW-MED	1.07
	100	2/2	11 ~ 12	234 ~ 236	NERV	LOW-MED	1.40 ~ 1.59
Soman	30	0/3					
	50	2/2	12	233 ~ 235	NERV	LOW-MED	0.58 ~ 1.59
	100	1/1	10 ~ 11	234 ~ 239	NERV	LOW-MED-HIGH	1.59 ~ 1.90
Tabun	30	0/1					
	50	0/3					
	100	2/2	11 ~ 15	228 ~ 233	NERV	LOW-MED	0.58 ~ 0.68
	100 ^{b)}	2/2	8 ~ 9	238	NERV	LOW-MED	1.09
Mustard gas	13	0/3					
	38	3/4	8	232 ~ 240	BL	LOW-MED	7.0 ~ 9.7
	127	1/1	8	407	BL	LOW-MED	13.5
Lewisite1	57	0/3					
	284	2/2	105 ~ 113	199 ~ 345	NERV	LOW-MED	0.81 ~ 0.88
	567	1/1	59	228	NERV	MED	1.10
	9500	1/1	113	345	NERV	LOW-MED	0.81
	56700	1/1	13	394	BL	LOW-MED	10.9
HCN	22	0/2					
	28	2/4	91 ~ 108	18 ~ 21	BLOD	1.00	
	32	3/3	65 ~ 103	20 ~ 22	BLOD	1.00	
	43	3/3	47 ~ 55	25 ~ 30	BLOD	1.00	
	430	3/3	31 ~ 32	35 ~ 107	BLOD	1.00	
CNCl	472	0/2					
	944	2/4	126 ~ 140	20 ~ 34	BLOD	1.00	
	1889	3/3	76 ~ 106	19 ~ 23	BLOD	1.00	
	3778	3/3	64 ~ 73	19 ~ 23	BLOD	1.00	
	7584	3/3	44 ~ 56	23 ~ 31	BLOD	1.00	

a) Agent concentration (mg/m³); b) Tabun gas was prepared by vaporizing 1 µl of tabun in 10 l glass container.

報の表示濃度は化学剤濃度と一致しないが，高低の相関は認められた．警報が解除されるまでにおおむね4分以上を要した．

マスタードガス（*n*-ヘキサン溶液）の気化ガスは，38 mg/m³ の濃度において8秒の吸引で“BL”の警報が警報率75%で表示された．ルイサイト1の気化ガス（*n*-ヘキサン溶液）は，284～9500 mg/m³ の濃度において59～113秒の吸引で“NERV”の警報が表示され，56700 mg/m³ の濃度において13秒の吸引で“BL”と表示された．警報の表示濃度は化学剤濃度と一致しないが，高低の相関は認められた．警報が解除されるまでにおおむね4分以上を要した．

青酸ガスは，28 mg/m³ の濃度において110秒程度の吸引により警報率50%で“BLOD”の警報が表示された．クロロシアンは，944 mg/m³ の濃度において130秒程度の吸引により警報率50%で“BLOD”の警報が表示された．両ガスともに濃度が高くなるにつれて警報率は100%となり，“BLOD”の警報までの時間は短くなった．警報の表示濃度は1.00であった．警報が解除されるまでに20

秒程度を要した．

3・2 吸入口のフィルターを外した場合の検知実験

吸入口のフィルター付きキャップを外して検知実験を行った．サリン（*n*-ヘキサン溶液）の気化ガスは，5 mg/m³ の濃度においては警報が表示されなかったが，10 mg/m³ の濃度において10秒の吸引で“NERV”の警報が表示された（認識数値1.90）．ソマン（*n*-ヘキサン溶液）の気化ガスは，10 mg/m³ の濃度においては警報が表示されなかったが，30 mg/m³ の濃度において数秒の吸引で“CONFIDENCE CHECK”の警報が表示された．タブン（*n*-ヘキサン溶液）の気化ガスは，30 mg/m³ の濃度においては警報が表示されなかったが，50 mg/m³ の濃度において数秒の吸引で“CONFIDENCE CHECK”の警報が表示された．マスタードガス（*n*-ヘキサン溶液）の気化ガスは，6 mg/m³ の濃度においては警報が表示されなかったが，12 mg/m³ の濃度において1分吸引後約280秒後に“NERV”の警報が表示された（認識数値0.16，0.84）．ルイサイト1（*n*-ヘキサン溶液）の気化ガスは，19 mg/m³ の濃度に

Table 2 Detection of organic solvent vapors by JCAD

Agent	Alarm/ trial	Response time/s	Recovery time/s	Alarm	
				Class	Hazard level
methanol	3/3	8~15	243~249	NERV	LOW-MED
ethanol	3/3	8~18	242~300	NERV	LOW-MED
<i>n</i> -propyl alcohol	3/4	9~11	245~248	NERV	LOW-MED
2-propanol	0/2				
isobutylalcohol	2/2	30	236	NERV	LOW-MED
<i>t</i> -butylalcohol	1/3	31	236	NERV	LOW-MED
	2/3	8~9	5	CONFIDENCE CHECK	
acetone	3/3	5~10	4~10	CONFIDENCE CHECK	
2-butanone	0/2				
ethyl acetate	5/9	4~11	245~248	NERV	LOW-MED
butyl acetate	0/2				
diethyl ether	3/3	4	9	CONFIDENCE CHECK	
1,4-dioxane	1/3	6		NERV	LOW-MED
acetonitrile	3/3	8~10	246~250	NERV	LOW-MED
<i>n</i> -hexane	0/2				
benzene	0/2				
toluene	0/2				
	0/2 ^{a)}				
xylene	0/2				
	0/2 ^{a)}				
dichloromethane	3/3	7~8	249	BL	LOW-MED
chloroform	0/2				
carbon tetrachloride	0/2				
1,2-dichloroethane	2/2	8~10	241	BL	LOW-HIGH
trichloroethylene	0/2				
chlorobenzene	1/3	15		BL	LOW-HIGH
acetic acid	0/2				
HCl	0/2				
ammonia	2/2	13~17	14~27	BLOD	
formaldehyde	0/2				
acetaldehyde	1/3	14	237	NERVE	LOW-MED
	1/3	41	14	BLOD	
carbon sulfide	0/2				
diethylamine	2/2	8~60	5	CONFIDENCE CHECK	
triethylamine	0/2				
<i>N,N</i> -dimethylformamide	2/4	6~7		CONFIDENCE CHECK	
	1/4	8	227	NERV	LOW-MED
pyridine	1/3	31		NERV	LOW-MED-HIGH
	2/3	4~6	5	CONFIDENCE CHECK	

a) The solvent was prepared by vaporizing 5 μ l of the solvent in 500 ml gas container.

においては警報が表示されなかったが、57 mg/m³ の濃度において 11 秒の吸引で“BL”の警報が表示された（認識数値 18.4）。警報が解除されるまでに数分を要した。

3・3 有機溶媒の検知結果

有機溶媒を JCAD に吸引させた場合の検知結果を Table 2 に示す。メタノール、エタノール、イソブチルアルコール及びアセトニトリルは、警報率 100% で“NERV”の警報が表示された。*n*-プロピルアルコール及び酢酸エチルは、警報率数十% で“NERV”の警報が表示された。1,4-ジオキサンは、警報率 33% で“NERV”の警報が表示された。ジクロロメタン及び 1,2-ジクロロエタンは、警報率 100% で“BL”の警報が表示された。クロロベンゼンは、警報率 33% で“BL”の警報が表示された。アンモニアは、

警報率 100% で“BLOD”の警報が表示された。アセトン、ジエチルエーテル及びジエチルアミンは、“CONFIDENCE CHECK”の警報が表示された。*t*-ブチルアルコール及びピリジンは、“CONFIDENCE CHECK”か、“NERV”の警報が表示されるかであった。アセトアルデヒドは、“NERV”か、“BLOD”の警報が表示されるか、又は警報を示さないかの結果となった。*N,N*-ジメチルホルムアミドは、“NERV”か、“CONFIDENCE CHECK”の警報が表示されるか、又は警報を示さないかの結果となった。

2-プロピルアルコール、2-ブタノン、酢酸ブチル、*n*-ヘキサン、ベンゼン、トルエン、キシレン、クロロホルム、四塩化炭素、トリクロロエチレン、酢酸、塩酸、ホルムアルデヒド、二硫化炭素及びトリエチルアミンは、その自然蒸気を 1 分吸引したが警報は表示されなかった。また、

トルエン及びキシレンの 10000 mg/m^3 の濃度の気化ガスを 1 分吸引したが、警報は表示されなかった。

4 考 察

化学剤の携帯型検知器としては、イオンモビリティースペクトロメーター (IMS)、炎光光度検知器、ガスクロマトグラフィー/質量分析計等が市販されているが、感度、応答性が良好で、神経ガス、びらん剤、血液剤の高感度の識別が可能な IMS 型検知器が多く活用されている。検知性能に関しては、メーカーの提供するカタログやレポートが参考になるが、学術的な論文に掲載され科学的に検証されたものはほとんどない。著者らは、Environmics OY 製の IMS 型検知器 M90 について化学剤を用いて検知性能を検証したが、神経ガス及びびらん剤は正しく認識検知され、血液剤は検知されないという成績を得ている⁷⁾。その他、検知紙、ガス検知管、炎光光度検知器に関しても検証しているが、検出感度が低いこと、偽陽性が高いことを確認しており、実験で検知性能を検証する必要性を実感している⁸⁾。

SAW センシング技術は、揮発性有機化合物等のモニタリングに開発研究がなされている⁹⁾。これまでに市場化された SAW 式化学剤検知器は¹⁰⁾、BAE Systems 製の JCAD と Microsensor Systems 製の HAZMATCAD がある。JCAD は 10 種の異なったポリマーに対する化学剤の溶解度 (吸着) の違いに基づく SAW 周波数変化のパターンを多変量解析でデータ処理し、化学剤を識別する原理であるが¹¹⁾、ポリマーの材質に関しては公開されていない。ポリマーとしては、ポリジメチルシロキサン、ポリイソブテン、OV-25、ポリエチレンマレート、ポリエチレンイミン、オルガノポリシロキサン等が用いられる¹²⁾¹³⁾。その他、有機リン剤に特異性を示すヘキサフルオロビフェニル基を有するジメチルシロキサン系ポリマーも開発され¹⁴⁾、JCAD も同様のポリマーが使われている可能性がある。また、アレイ信号の処理-化学剤パターン認識アルゴリズムも公開されていないが、コンピュータ方式のプログラムを用いたと思われる¹⁵⁾。JCAD のカタログ上では数値化された検知性能は提示されていないが、米軍の要求性能として神経ガスやびらん剤を $0.04 \sim 50 \text{ mg/m}^3$ の濃度で 10～30 秒で、血液剤を 22 mg/m^3 以上の濃度で 10～120 秒での検知が必要である¹¹⁾。

本論文では、化学剤気化ガスを JCAD の吸引口に噴射する実験評価系を採用した。JCAD は吸引時に圧が負荷されると正常に作動しないので、直接センサー部分にガスを通気できない。本実験ではガスを吸入口に噴射し、定量的にガスが検知器に吸引されないという限界はあるが、検知結果は再現性の高いものであった。また、低濃度の気化ガスの調製は、高濃度調製ガスを定量的に希釈する必要がある。

り、ガス希釈操作の不正確性及び化学剤の吸着性を考慮し実施しなかった。代わって、化学剤を *n*-ヘキサンに溶解しそれを気化させた。ただ、*n*-ヘキサン蒸気も SAW センサー上のポリマーに溶解込み検知判定に影響を及ぼす可能性も考えられたが、*n*-ヘキサンは本検知器には認識されず、 100 mg/m^3 のタブンそのものの気化ガスの検知結果と *n*-ヘキサン溶液のタブン気化ガスの検知結果は同程度であった (Table 1)。*n*-ヘキサンの妨害は少ないと判断して、本実験では *n*-ヘキサン溶解化学剤の気化ガスを用いた。

実験結果から、低濃度領域でのルイサイト 1 に誤判定を除いて、剤種の認識 (NERV, BL, BLOD) は高いことが判明した。しかし、メタノール等の極性の比較的高い有機溶媒が NERV (神経ガス) と、ジクロロメタン等の塩素系の有機溶媒が BL (びらん剤) と、アンモニア等が BLOD (血液剤) と誤報されている (Table 2)。ヘキサン等の比較的低極性の低い有機溶媒に対しては、誤判定とはならなかった。有機溶媒の SAW センサーアレイの結合パターンが化学剤と類似し誤判定を引き起こすが、現場においては誤警報が起きることを十分認識する必要がある。サリン、ソマン、タブン、マスタードガスの応答時間は 10 秒程度と即時応答に近いものであったが、警報の解除までに数分を要した。これら化学剤は吸引後速やかに SAW センサーのポリマーに溶解込み化学剤の認識に相当する SAW 周波数変化を引き起こすが、センサーからの脱着に時間を要すると思われる。一方、ルイサイト 1 の場合は、応答時間、警報解除時間ともに長く、検出器に到達するまでの配管系への吸着やポリマーへの吸着が強いことが原因であると推察される。青酸ガス及びクロロシアンについては、応答時間は数十秒と長かったが警報解除時間は 20 秒程度であり、SAW センサーポリマーに対する吸着は弱く、結合平衡後の認識時間が長く、ポリマーからの脱着は速やかであると推定できる。

神経ガスやびらん剤の流路配管やセンシング部への吸着は深刻な問題であり、IMS 方式の M90 は化学剤を吸引し、警報が鳴ると解除までに時間を要するという化学剤の吸着の問題が指摘されている⁷⁾。SAW タイプの JCAD も同様であり、結果 3・2 で示された吸引口のフィルターへの化学剤の吸着現象からも明らかである。フィルターを取り外せば感度及び応答性の向上が認められるが、現場での粉塵様の物質によるセンサー部の汚染は防がざるを得ない。

SAW 検知デバイスの感度は、理論的には 0.2 ng/cm^2 程度と非常に高いが¹⁶⁾、デバイスの表面積、吸引空気からの化学剤のポリマーへの吸着平衡等により、実質的には 1 mg/m^3 程度と推定できる¹⁰⁾。JCAD の化学剤に対する検出感度は、サリンや青酸ガスでは 30 mg/m^3 程度であり、他の化学剤では感度は低い。サリン、ソマン、タブン、マス

タードガス, ルイサイト 1, 青酸ガス並びにクロロシアン
の 1 分間吸入半数致死濃度は $70 \sim 100 \text{ mg/m}^3$, $70 \sim 100 \text{ mg/m}^3$, $200 \sim 400 \text{ mg/m}^3$, 1500 mg/m^3 , $1200 \sim 1500 \text{ mg/m}^3$, $2000 \sim 4500 \text{ mg/m}^3$, 11000 mg/m^3 と言われて
おり¹⁷⁾, JCAD の最低検知濃度は青酸ガスを除いてこの半
数致死濃度より若干低い程度であった. 警報の濃度表示に
関しては, ガス濃度と相関は認められたが, 定量的な意味
合いはないものと思われる.

このように, SAW センサーアレイ式化学剤検知器 JCAD
の化学剤検知感度は IMS 型化学剤検知器等と比較して低
く, 応答時間も長かったが, より正確な検知が可能であ
り, 現場検知器のなかではユニークな存在である. 今後の
パターン認識プログラムの改良等が期待されるところであ
る.

文 献

- 1) Organization for the Prohibition of Chemical Weapons: Chemical weapon convention. <http://www.opcw.org>.
- 2) 官報: 化学兵器の禁止および特定物質の規制等に関する法律, 平成 7 年 4 月 5 日, <http://www.houko.com/00/01/H07/065.html>.
- 3) 警察庁: 警察白書, 平成 7 年, 8 年.
- 4) Y. Seto, N. Tsunoda, M. Kataoka, K. Tsuge, T. Nagano: "Natural and Selected Synthetic Toxins-Biological Implications", Edited by A. T. Tu, W. Gaffield, p. 318 (2000), (American Chemical Society, Washington, DC.).
- 5) 内閣官房副長官補付: NBC テロ対策の推進について, 平成 13 年 4 月 18 日, <http://www.kantei.go.jp/jp/kikikanri/nbc/index.html>.
- 6) BAE Systems: Integrated Defence Systems, <http://www.ids.na.baesystems.com/>.
- 7) 瀬戸康雄, 井浦一光, 糸井輝雄, 柘浩一郎, 片岡美江子: 鑑識科学, **9**, 39 (2004).
- 8) 瀬戸康雄, 片岡美江子, 柘浩一郎, 糸井輝雄, 井浦一光: 日本鑑識科学技術学会第 8 回学術集会講演要集, p. 46 (2002).
- 9) D. S. Ballantyne, Jr., H. Wohltjen: *Anal. Chem.*, **61**, 704A (1989).
- 10) C. M. Harris: *Anal. Chem.*, **75**, 355A (2003).
- 11) G. Morris: Joint Chemical Agent Detector JCAD, International CW Demil Conference 2001 at Gifu, 23-24 May 2001.
- 12) J. W. Grate: *Chem. Rev.*, **100**, 2627 (2000).
- 13) J. W. Grate, S. J. Patrash, S. N. Kaganove: *Anal. Chem.*, **73**, 5247 (2001).
- 14) S. D. Harvey, D. A. Nelson, B. W. Wright, J. W. Grate: *J. Chromatogr. A*, **954**, 217 (2002).
- 15) P. C. Jurs, G. A. Bakken, H. E. McClelland: *Chem. Rev.*, **100**, 2649 (2000).
- 16) J. W. Grate, S. J. Martin, R. M. White: *Anal. Chem.*, **65**, 940A (1993).
- 17) C. E. Stewart, J. B. Sullivan, Jr.: "Hazardous Materials Toxicology-Clinical Principles of Environmental Health", Edited by J. B. Sullivan, Jr., G. R. Krieger, p. 986 (1992), (Williams & Wilkins, Baltimore).