

ケミカルタンカーの環境汚染レベル

第3報：主成分分析

環境エネルギー研究領域 *宮田 修、間島 隆博、上田 浩一
山之内 博、柴田 清、山口 勝治

1. はじめに

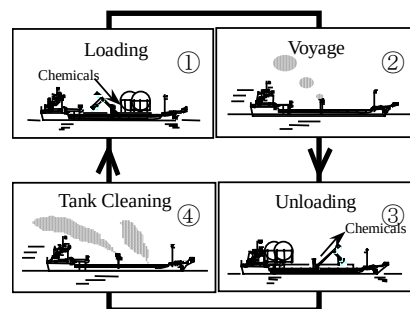
国際海事機関（IMO）では、ベンゼンを 0.5%以上含む物質を海上輸送する場合TWA(Time Weighted Average)で 1ppm、STEL(Short Term Exposure Limit)が 5ppmを越える場合、乗員への保護具の装着を勧告している。当所では平成9年度から平成11年度には「ベンゼン等有害揮発性物質の船舶からの排出量低減に関する研究（環境庁公害防止等試験研究費）」、平成14年度から平成16年度には「船舶から発生する有害揮発性ガスによる複合汚染に関する研究（国土交通省受託研究）」においてケミカルタンカーの積載化学物質の環境濃度や船員の暴露濃度等の実船計測^{1)～5)}を行っている。

ここではケミカルタンカーの積載化学物質の船上での環境濃度と関連した項目間の相関係数による主成分分析を行い、項目のグループ分けとケミカルタンカーの環境汚染レベルを決める要因（主成分）について報告する。

2. 実船計測

ケミカルタンカーの輸送サイクルは図－1に示すように①積み荷役②航海③揚げ荷役④タンククリーニングの順に行われ、次回の積み荷が同じ物質の場合は④のタンククリーニング（以下、クリーニング）を行わない場合もある。ケミカルタンカーの荷役区分ごとに居住区である食堂と作業区であるポンプ室および甲板の環境濃度の実船計測を通常の輸送作業中に行った。環境濃度は、キャニスター（真空ポンプで 1mmHg 以下に脱気された内容積 15 リットルのステンレス製密閉容器で、一定流量で大気中のガスを採取）により気体を採取し、ガスクロマトグラフ質量法にてガス採取時間内の平均濃度として取得した。

（(財)日本環境衛生センターに分析依頼）



図－1 輸送サイクル

表－1 分析項目

項 目	
運航条件	蒸気圧 ^{注1)}
	気温
	総トン数
	積載率 ^{注2)}
	作業時間 ^{注3)}
環境濃度	食堂
	ポンプ室
	甲板

注1) 気温 20℃における蒸気圧

注2) 積載率＝積載量／満載積載量

注3) 作業時間は、各荷役にかかった時間。

3. 主成分分析

主成分分析は項目間の関係を視覚的にとらえ、それに基づいて分類したり、総合的指標（以下、主成分）で代表させる方法である⁶⁾。ケミカルタンカーの環境汚染レベルは、積載化学物質のガスの発生位置と拡散現象による各位置の環境濃度の変化

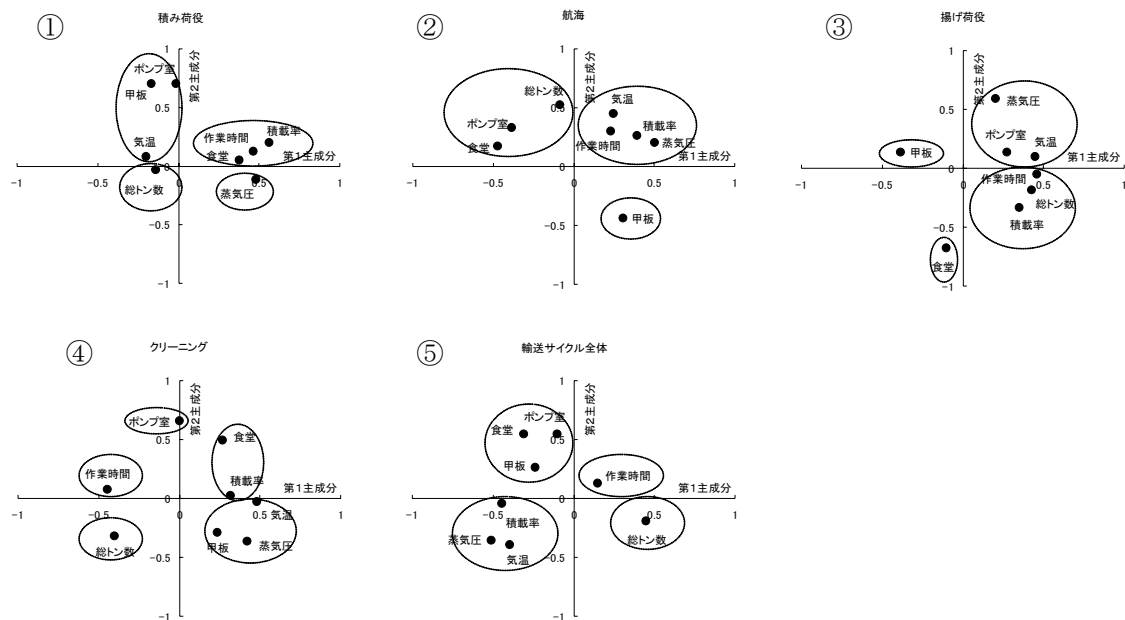
なので、表－１のようにガスの拡散に影響する蒸気圧・気温・総トン数・積載率・作業時間と食堂・ポンプ室・甲板の環境濃度の８項目を選び、項目間の相関係数から求める主成分分析（データ数 39～6、収束条件 10^{-6} ）を行った。得られた結果から項目のグループ化を行い、主成分の表す要因を明らかにし、ケミカルタンカーの環境汚染レベルについて調べた。

４．分析結果

主成分分析は表－２に示す項目間の相関係数を用い行い、図－２に示すような結果を得た。（各荷役における主成分分析の第１第２主成分の散布図）

表－２ 項目間の相関係数

	項目	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧									項目	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧							
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
① 積み荷役	① 蒸気圧	1.000								④ タンククレーン	① 蒸気圧	1.000							
	② 気温	-0.017	1.000								② 気温	0.803	1.000						
	③ 総トン数	-0.267	-0.043	1.000							③ 総トン数	-0.470	-0.589	1.000					
	④ 積載率	0.783	-0.050	-0.177	1.000						④ 積載率	0.415	0.687	-0.260	1.000				
	⑤ 作業時間	0.307	-0.237	-0.050	0.740	1.000					⑤ 作業時間	-0.595	-0.660	0.422	-0.367	1.000			
	⑥ 食堂	0.265	-0.448	0.029	0.430	0.326	1.000				⑥ 食堂	-0.051	0.287	-0.611	0.051	-0.606	1.000		
	⑦ ポンプ室	-0.141	0.136	0.028	0.258	0.113	0.049	1.000			⑦ ポンプ室	-0.276	0.035	-0.314	0.173	0.211	0.291	1.000	
	⑧ 甲板	-0.336	0.045	-0.059	-0.028	-0.112	-0.077	0.839	1.000		⑧ 甲板	0.423	0.151	-0.299	0.038	-0.390	0.106	-0.228	1.000
② 航海	① 蒸気圧	1.000								⑤ 全船送サイクル	① 蒸気圧	1.000							
	② 気温	0.692	1.000								② 気温	0.426	1.000						
	③ 総トン数	0.015	0.247	1.000							③ 総トン数	-0.250	-0.152	1.000					
	④ 積載率	0.635	0.627	0.087	1.000						④ 積載率	0.446	0.217	-0.058	1.000				
	⑤ 作業時間	0.389	0.092	0.306	0.365	1.000					⑤ 作業時間	-0.006	-0.200	0.237	0.141	1.000			
	⑥ 食堂	-0.656	-0.080	0.091	-0.250	-0.268	1.000				⑥ 食堂	-0.077	-0.052	-0.346	0.141	-0.099	1.000		
	⑦ ポンプ室	-0.373	0.326	0.200	-0.115	-0.313	0.892	1.000			⑦ ポンプ室	-0.185	-0.120	-0.164	0.144	0.209	0.403	1.000	
	⑧ 甲板	0.286	0.015	-0.737	0.372	-0.320	-0.408	-0.447	1.000		⑧ 甲板	0.104	-0.110	-0.156	0.113	0.006	0.277	0.006	1.000
③ 揚げ荷役	① 蒸気圧	1.000																	
	② 気温	0.403	1.000																
	③ 総トン数	-0.003	0.789	1.000															
	④ 積載率	0.094	0.457	0.460	1.000														
	⑤ 作業時間	0.396	0.666	0.744	0.769	1.000													
	⑥ 食堂	-0.693	-0.304	0.008	0.325	-0.122	1.000												
	⑦ ポンプ室	0.277	0.413	0.415	0.276	0.364	-0.170	1.000											
	⑧ 甲板	-0.117	-0.643	-0.642	-0.492	-0.600	0.067	-0.200	1.000										



図－２ 各荷役の主成分分析結果（第１、第２主成分の散布図）

①の積み荷役では、ポンプ室と甲板の環境濃度と気温が同じグループに属し、食堂の環境濃度は積載率と作業時間と同じグループに属した。②航海時では、食堂とポンプ室の環境濃度と総トン数

が同じグループで、甲板の環境濃度が単独のグループ、蒸気圧・気温・積載率・作業時間が同じグループに属した。③揚げ荷役では、食堂と甲板の環境濃度はどちらも単独のグループで、ポンプ室の環境濃度は蒸気圧・気温と同じグループに属し、総トン数・積載率・作業時間が同じグループに属した。④クリーニングでは、食堂の環境濃度と積載率が同じグループ、ポンプ室が単独、甲板の環境濃度が蒸気圧と気温と同じグループに属した。また、作業時間と総トン数が単独のグループとなった。⑤輸送サイクル全体の場合を示す。食堂・ポンプ室・甲板の環境濃度は同じグループに属し、蒸気圧・気温・積載率が同じグループに属した。総トン数と作業時間が単独のグループになった。

ここまで主成分分析による項目のグループ化を行ったが、それぞれの主成分の示す要因を表－3に示す主成分負荷量によって示す。

①積み荷役の第1主成分は積載率に代表される環境濃度、第2主成分は発生源の環境濃度に代表される環境濃度、第3主成分は気温に代表される環境濃度を表すと考えられる。(データ数12、累積寄与率81%)その理由は、「積み荷役では事業所からの配管によってケミカルタンカーのタンク(以下タンク)へ化学物質が送られ、送られた化学物質はタンク内の温度条件等によって一部が気化し、さらにタンク内の液面上昇によって気化したガスが甲板中央付近に設置されたベント管により大気中に排出される。この時、積み込み中の化学物質はタンクからの配管によりポンプ室のポンプを含む配管系にも充填され、ポンプやバルブのシール状態によってはポンプ室の環境濃度を増やすことが考えられる。さらに、ポンプ室の扉は監視のため常時開かれた状態にある。」ためである。

②航海時の第1主成分は蒸気圧に代表される環境濃度であり、第2主成分は総トン数に代表される環境濃度、第3主成分は作業時間に代表される環境濃度であることが分る。(データ数8、累積寄与率80%)同様に「航海時には食堂のある居住区やポンプ室の扉は閉じられ、タンク内の蒸発ガスがベント管からのみ排出されている。」ことによっている。

③揚げ荷役の第1主成分は作業時間に代表される環境濃度であり、第2主成分は食堂の環境濃度に代表される環境濃度、第3主成分はガスの発生源であるポンプ室の環境濃度であることが分かった。(データ数9、累積寄与率80%)その理由は、「揚げ荷役は本船に設置されたポンプにより陸上に荷揚げされ、ポンプのシールの状態によりポンプ室の環境濃度が変わることが考えられる。この時、監視のためポンプ室の扉は開かれているが、食堂のある居住区の扉は閉じられている。」によっている。

④クリーニングの第1主成分は気温に代表される環境濃度であり、第2主成分は発生源であるポンプ室の環境濃度に代表され環境濃度、第3主成分は積載率に代表される環境濃度であることが分かった。(データ数10、累積寄与率78%)その理由は、「内航ケミカルタンカーの揚げ荷役は本船のポンプを使用し行うが、この時必ず配管内に残液が発生する。専用船以外の内航ケミカルタンカーは次の積み荷で積載化学物質が変わる場合が多く、新しい積み荷の汚損を防ぐためタンクのクリーニングを行う。この時、配

表－3 主成分負荷量

	①積み荷役の主成分			②航海の主成分			③揚げ荷役の主成分		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
蒸気圧	0.481	-0.118	-0.349	0.504	0.199	-0.092	0.206	0.589	0.067
気温	-0.197	0.075	-0.650	0.247	0.448	-0.431	0.450	0.100	-0.171
総トン数	-0.137	-0.033	0.455	-0.083	0.521	0.322	0.428	-0.184	-0.103
積載率	0.566	0.196	-0.183	0.397	0.262	-0.277	0.354	-0.333	0.203
作業時間	0.467	0.122	0.088	0.232	0.301	0.461	0.461	-0.051	0.008
食堂	0.380	0.045	0.453	-0.473	0.169	-0.286	-0.102	-0.680	0.205
ポンプ室	-0.012	0.699	-0.006	-0.384	0.328	-0.431	0.274	0.131	0.820
甲板	-0.166	0.659	0.047	0.310	-0.439	-0.382	-0.386	0.132	0.447
固有値	2.629	1.923	1.350	3.091	2.217	1.554	3.852	1.817	0.805
寄与率	35.9	26.3	18.4	35.8	25.7	18.0	47.3	22.3	9.9
累積寄与率	35.9	62.2	80.7	35.8	61.5	79.5	47.3	69.6	79.5
要 因	積載率	発生源	気温	蒸気圧	総トン数	作業時間	作業時間	環境濃度	環境濃度
	環境濃度			環境濃度			環境濃度		

	④クリーニングの主成分			⑤全輸送サイクルの主成分		
	1	2	3	1	2	3
蒸気圧	0.424	-0.365	-0.137	-0.509	-0.356	0.196
気温	0.482	-0.029	-0.308	-0.394	-0.393	-0.072
総トン数	-0.398	-0.318	-0.147	0.451	-0.194	0.359
積載率	0.320	0.020	-0.583	-0.445	-0.042	0.498
作業時間	-0.446	0.072	-0.245	0.148	0.127	0.710
食堂	0.270	0.494	0.436	-0.309	0.546	-0.145
ポンプ室	0.004	0.657	-0.240	-0.101	0.544	0.232
甲板	0.235	-0.289	0.465	-0.238	0.263	-0.018
固有値	3.492	1.652	1.244	1.906	1.712	1.326
寄与率	42.5	20.1	15.1	24.8	22.3	17.2
累積寄与率	42.5	62.5	77.7	24.8	47.1	64.3
要 因	気温	発生源	積載率	蒸気圧	環境濃度	作業時間
	環境濃度			環境濃度		

管内の残液はポンプ室に設けた配管のドレンから回収するが、回収中に残液は大気に触れガスが発生しポンプ室の環境濃度を上げる傾向がある。また、タンクのハッチを開放し通風乾燥を行う。さらに、計測用のキャニスターを異常高濃度点近くに設置したことにより高い濃度を示す場合も考えられる。」によっている。

⑤輸送サイクル全体の場合の第1主成分は蒸気圧に代表される環境濃度であり、第2主成分は食堂の環境濃度に代表される環境濃度、第3主成分は作業時間にされる環境濃度であることが分かった。(データ数39、累積寄与率64%)

クリーニングでの残液回収作業等が影響したと考えられるポンプ室の環境濃度が高いデータを除いた場合のクリーニングと全輸送サイクルの相関係数を表-4に示す。クリーニングの主成分分析結果を図-3⑥と表-5に示す。第1主成分の負号が反転し、ポンプ室の環境濃度が第2主成分だけではなく第1主成分にも影響されることが分かった。主成分負荷量は第3主成分が積載率から食堂の環境濃度で代表される環境濃度に変化した。(データ数6、累積寄与率85%) 同様に輸送サイクル全体では、図-3⑦に示すように全ての項目で第1主成分が正の値を示し2つのグループになった。主成分負荷量によると第1主成分は積載率に代表される環境濃度であり、第2主成分は気温に代表される環境濃度、第3主成分は総トン数代表される環境濃度であることが分かった。

表-4 項目間の相関係数(異常値を除く)

⑥ クリーニング 異常値を除く	① 蒸気圧	1.000							
	② 気温	0.931	1.000						
	③ 総トン数	-0.616	-0.413	1.000					
	④ 積載率	0.434	0.614	0.086	1.000				
	⑤ 作業時間	-0.855	-0.875	0.274	-0.713	1.000			
	⑥ 食堂	0.243	0.159	-0.349	-0.122	-0.371	1.000		
	⑦ ポンプ室	0.211	-0.122	-0.562	-0.598	-0.009	0.583	1.000	
	⑧ 甲板	0.143	0.471	0.228	0.690	-0.255	-0.381	-0.906	1.000
⑦ 輸送サイクル全体 異常値を除く	① 蒸気圧	1.000							
	② 気温	0.395	1.000						
	③ 総トン数	-0.231	-0.021	1.000					
	④ 積載率	0.477	0.218	0.035	1.000				
	⑤ 作業時間	0.050	-0.144	0.210	0.138	1.000			
	⑥ 食堂	0.072	-0.242	-0.004	0.227	0.038	1.000		
	⑦ ポンプ室	0.042	-0.022	0.010	0.185	0.114	0.456	1.000	
	⑧ 甲板	-0.049	-0.116	0.137	0.278	0.169	0.182	0.187	1.000

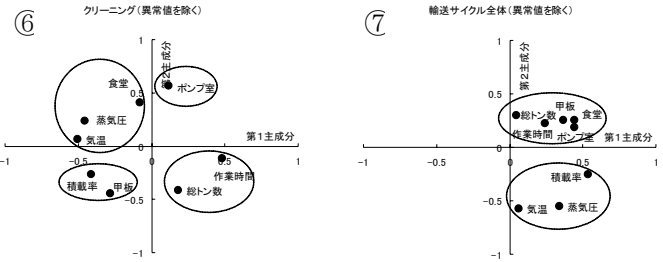


図-3 主成分分析結果(異常値を除く)

表-5 主成分負荷量(異常値を除く)

	クリーニングの主成分			全輸送サイクルの主成分		
	1	2	3	1	2	3
蒸気圧	-0.457	0.236	0.231	0.341	-0.550	-0.003
気温	-0.505	0.061	0.124	0.061	-0.572	-0.212
総トン数	0.182	-0.413	-0.560	0.046	0.299	-0.595
積載率	-0.413	-0.265	-0.227	0.538	-0.255	-0.181
作業時間	0.482	-0.117	0.309	0.240	0.222	-0.477
食堂	-0.078	0.411	-0.680	0.445	0.255	0.439
ポンプ室	0.119	0.564	0.009	0.446	0.190	0.314
甲板	-0.282	-0.446	0.096	0.366	0.257	-0.224
固有値	3.646	2.910	0.775	1.922	1.711	1.220
寄与率	42.4	33.9	9.0	23.2	20.7	14.7
累積寄与率	42.4	76.3	85.3	23.2	43.9	58.6
要因	気温	発生源濃度	環境濃度	積載率	気温	総トン数
		環境濃度			環境濃度	

5. まとめ

当所で計測したケミカルタンカーの環境汚染レベルについて主成分分析を行い、項目のグループ化や環境濃度を決める要因を明らかにした。実船計測に際しては、乗組員、事業所、運航会社、船主の方々に多大な協力を得ました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 宮田、他：ケミカルカーの環境汚染レベル(第2報：トルエン輸送の場合)、海技研第4回研究発表会講演集、平成17年7月。
- 宮田、他：ケミカルカーの環境汚染レベル(第1報：メタン輸送の場合)、海技研第3回研究発表会講演集、平成17年6月。
- 藤井、他：ベンゼン輸送船におけるガス濃度計測、第71回船舶技術研究所研究発表会講演集、平成10年6月。
- 間島、他：ベンゼン積み込み作業時のタンク内拡散について、第73回船舶技術研究所研究発表会講演集、平成11年6月。
- 間島、他：ベンゼン積み込み作業時のタンク内拡散について(第2報：模型貨物タンクによる実験)、第74回船舶技術研究所研究発表会講演集、平成12年6月。
- 田中：多変量統計検定法、平成16年、現代数学社。