

NAIST-IS-DD1161025

博士論文

プラントアラームマネジメントのための  
アラームシステムの性能監視

高井 努

2012年3月1日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報科学専攻

この論文は、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
博士（工学）授与の要件として提出した博士論文である。

審査委員：

杉本 謙二 教授 (主指導教員)

飯田 元 教授 (副指導教員)

野田 賢 准教授 (副指導教員)

NAIST-IS-DD1161025

**Doctoral Dissertation**

**Performance Monitoring of Alarm Systems for  
Plant Alarm Management**

**Tsutomu Takai**

March 1, 2012

Department of Information Science  
Graduate School of Information Science  
Nara Institute of Science and Technology

A Doctoral Dissertation

Submitted to the Graduate School of Information Science,  
Nara Institute of Science and Technology

In partial fulfillment of the requirements for the degree of  
Doctor of Engineering.

Thesis committee :

Professor	Kenji Sugimoto	(Supervisor)
Professor	Hajimu Iida	(Co-Supervisor)
Associate Professor	Masaru Noda	(Co-Supervisor)

## 内容梗概

プラントアラームシステムは化学プラントの安全操業に必要な不可欠なヒューマンマシンインタフェースの一つである。アラームシステムを常に適正に維持することは、安全だけでなく品質や生産性の向上などプラント操業の価値に直結する。一般に既設プラントにおけるアラームマネジメントは CAPDo (Check, Act, Plan, Do) アプローチであり、アラームシステム性能を評価することから始まる。そして、この評価プロセスはその後の改善活動を効果的に実施するために極めて重要である。これまでの評価法は、アラーム発生率やアラーム発生分布、アラーム持続時間などを定量的に評価するものが主流であった。しかし、これらは単に警報 (シグナル) としてのアラームに着目しており、アラームシステムの役割を捉えていないため、アラームシステムの本質的な評価法として問題があると指摘されていた。

本研究では、まず、プラント運転ログデータから連鎖アラームなどの迷惑アラームやオペレータの運転知識を抽出するためのイベント相関解析法を提案した。この方法では、バイナリ変換したアラームや操作のイベント発生系列間の最大相互相関値に基づき、関連するイベント群をグルーピングする。続いて、グループを構成するイベントの種類から、連鎖アラーム、繰り返しアラームおよび対応操作なしアラームを抽出する。またバイナリ変換時に適切なタイムウィンドウ幅を自動的に選択できるように拡張されたイベント相関解析法を、代表的な大規模化学プラントであるエチレンプラントの運転ログデータに適用し、類似度の評価結果に基づきグループ化されたイベント群を詳しく分析した結果、プラント運転ログデータから迷惑アラームや定型操作を抽出できることを示した。

次に、プラントアラームシステムの特徴である操作相関性、一意性、適時性をプラント運転ログデータのデータ解析により定量的に評価する方法を提案した。提案法では、プラント運転ログデータに含まれるアラームイベントや操作イベントの発

生系列間の類似度とタイムラグをイベント相関解析により求め、アラームシステム全体の操作相関性、一意性、適時性を評価する。提案法により共沸蒸留プロセスの運転ログデータを評価した結果、従来の KPIs (Key Performance Indicators) では適正化の対象と判定されなかったアラームイベントや操作イベントの問題点を抽出できることを確認した。

さらに、アラームシステムの 8 特性を定量的に評価するアンケート法を提案した。提案するアンケートは、オペレータのアラームシステムに対する要望等を記述回答する設問を追加することで、アラームシステムの具体的な改善の方向性を詳しく調べることもできる。各製造現場のニーズに応じた設問を追加することや、実際に発報したアラーム数等のデータ解析からの評価値を加えることで、実用性の高い評価ができる。

本研究の成果は、実際の製造現場エンジニアやオペレータといった実務者レベルによる日々のプラントアラームシステムの改善活動に大いに貢献するものと期待される。

キーワード

アラームマネジメント, アラームシステム, イベント相関解析, KPI, EEMUA, 知識抽出

---

\*奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報科学専攻学位論文,  
NAIST-IS-DD1161025, 2012 年 3 月 1 日

## **Abstract**

Plant Alarm systems are essential for ensuring plant safety and effective operations, and the management efforts aiming at maintaining and improving alarm systems have recently intensified in process industries. The alarm management currently in place for existing plants is basically a CAPDo (Check, Act, Plan, Do) approach that begins by evaluating the alarm system performance, and the result is quite important for finding issues to be effectively maintained and improved. The conventional methods for evaluating alarm rates, alarm and event distributions, standing alarm times, etc. in quantity, are still a long way from effectively evaluating alarm systems, because they do not evaluate each alarm as a signal requiring operator attention. The Engineering Equipment & Materials Users' Association (EEMUA, 2007) says that every alarm presented to an operator should be useful and relevant to the operator. Thus, the relationship between an alarm and the operator response is thought of as a new key performance indicator (KPI) of the performance of an alarm system.

In this paper, first, we propose a novel method using event correlation analysis (ECA1) as a means of improving IPL2 and IPL3 performances, including alarm systems and operator actions. ECA1 is a data mining method to quantify the degree of similarity and time lag between two events using the cross correlation function, from the event log data, which is composed of discrete alarms and operator actions at the time they occur. This method's effectiveness was evaluated with data from an alarm system improvement project at a chemical site. However, we had an issue that ECA1 has the potential to be not extracted the similarity between each event pair appropriately when the time

lag between the occurrence times of them is large. Next, Enhanced event correlation analysis (ECA2) that Kurata *et al.* (2011) has been proposed to improve the issue in ECA1 was evaluated with actual alarm and operator action events data from ethylene plant. We verified practical effectiveness of ECA2. Then, we propose calculation methods of Relevant, Uniqueness, and Timeliness in EEMUA 191 (EEMUA, 1999) as new KPIs for evaluating the alarm system performance, by applying the event correlation analysis. Finally, we propose evaluation methods of 8 characteristics for a good alarm in EEMUA 191 focusing on the relationship between them using an operator questionnaire.

The results of proposed methods in this paper will help site engineers and operators in order to improve their alarm system and operation procedure.

Keywords:

Alarm management, Alarm system, Event correlation analysis, KPI, EEMUA, Knowledge Extraction

---

\*Doctoral Dissertation, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute and Science and Technology, NAIST-IS-DD1161025, March 1, 2012.

# 目次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 石油化学産業界における操業損失とその要因 .....	2
1.2 アラームシステム .....	4
1.3 プラントの安全を巡る社会的背景 .....	8
1.4 アラームマネジメント .....	14
1.5 アラームシステムの性能評価 .....	17
1.6 研究の目的 .....	23
第 2 章 プラント運転ログデータのイベント相関解析法 .....	24
2.1 はじめに .....	24
2.2 IPL2, IPL3 性能改善のためのプラント運転ログデータ解析 .....	27
2.2.1 運転ログデータからの迷惑イベント抽出 .....	27
2.2.2 イベント相関解析法 (ECA1) のアルゴリズム .....	28
2.2.3 数値実験 .....	34
2.3 イベント相関解析法による迷惑アラーム抽出法 (その 2) .....	36
2.4 まとめ .....	37
第 3 章 エチレンプラント運転ログデータからの迷惑アラームの抽出 .....	38
3.1 はじめに .....	38
3.2 エチレンプラント .....	40
3.2.1 エチレンプラントのプロセスフロー .....	40
3.2.2 プラント運転ログデータ .....	41

3.3	エチレンプラント運転ログデータのイベント相関解析	44
3.3.1	解析条件	44
3.3.2	類似度の計算結果	44
3.3.3	クラスタリング結果	47
3.3.4	グループの分析結果	58
3.4	まとめ	59
第4章	イベント相関解析によるプラントアラームシステムの性能評価	60
4.1	はじめに	60
4.2	アラームシステムの性能評価法	63
4.2.1	操作相関性の評価法	63
4.2.2	一意性の評価法	64
4.2.3	適時性の評価法	65
4.3	ケーススタディ	67
4.3.1	共沸蒸留プロセスの運転ログデータ	67
4.3.2	イベント相関解析の結果	70
4.3.3	操作相関性の評価結果	71
4.3.4	一意性の評価結果	71
4.3.5	適時性の評価結果	72
4.3.6	総合評価結果	73
4.4	まとめ	74
第5章	オペレータアンケートによるプラントアラームシステムの性能評価	75
5.1	はじめに	75

5.2	アラームシステムの 8 特性 .....	77
5.3	オペレータアンケート .....	78
5.4	エチレンプラントのオペレータに対するアンケート調査 .....	85
5.4.1	エチレンプラントのアラームシステム .....	85
5.4.2	アンケート実施手順 .....	87
5.4.3	評価結果と考察 .....	87
5.5	まとめ .....	90
第 6 章	結論 .....	91
謝辞	.....	94
参考文献	.....	95
研究業績	.....	100

## 図目次

図 1.1	アラームシステムデータフロー	6
図 1.2	Independent Protection Layers (AIChE/CCPS, 1993)	7
図 1.3	米国における化学物質業務上の事故	11
図 1.4	オペレーター人当たりのアラーム設定数	12
図 1.5	パネル計装	12
図 1.6	DCS 計装	13
図 1.7	アラームマネジメントライフサイクル	14
図 2.1	イベント時系列データの生成	29
図 2.2	相互相関関数と類似度	30
図 2.3	イベントペア間の類似性	31
図 2.4	クラスタリング	32
図 2.5	3つのアラームイベントの相関性評価例	33
図 3.1	エチレンプラントのプロセスフロー	40
図 3.2	エチレンプラントのイベントログデータ	42
図 3.3	10分あたりのアラームイベント発生数	43
図 3.4	装置別アラームイベントおよび操作イベント発生数	43
図 3.5	ECA1による類似度評価結果	45
図 3.6	ECA2による類似度評価結果	46
図 3.7	ECA1によるアラーム類似性評価結果	53
図 3.8	ECA2によるアラーム類似性評価結果	54
図 3.9	グループ4内のイベント549と他のイベントとの相関値	55
図 3.10	グループ6内のイベント152と他のイベントとの相関値	56
図 3.11	グループ10内のイベント680と他のイベントとの相関値	57
図 4.1	連続共沸蒸留プロセスのプロセスフロー	68
図 4.2	個々のアラームイベントの一意性評価結果	72
図 4.3	総合評価結果	73
図 5.1	エチレンプラント	86
図 5.2	エチレンプラントの中央制御室	86
図 5.3	アラームシステムの8特性評価結果	88
図 5.4	運転経験年数別評価結果	89

## 表目次

表 1.1	オペレータの役割と求められるアラーム	4
表 1.2	適切なアラームの 8 特性	5
表 1.3	リスクに対する判断	9
表 1.4	アラーム有効性アンケート	18
表 1.5	アラーム有効性アンケート結果の例	19
表 1.6	平均アラーム発生頻度評価のためのベンチマーク	19
表 1.7	異常発生後 10 分間のアラーム発生回数	20
表 1.8	アラームシステム性能評価指標	22
表 2.1	発生順序と時間差の解析結果	35
表 3.1	装置 ID と装置名	41
表 3.2	イベント相関解析のパラメータ設定値	44
表 3.3	ECA1 と ECA2 のタイムウィンドウサイズ	47
表 3.4	ECA1 による TOP10 グループ結果	48
表 3.5	ECA2 による TOP10 グループ結果	49
表 3.6	ECA1 による TOP10 グループ内イベント	50
表 3.7	ECA2 による TOP10 グループ内イベント	51
表 3.8	ECA2 による TOP10 グループ解析	58
表 4.1	アラームおよびオペレーションタイプ別発生イベントリスト	69
表 4.2	イベント相関解析の結果	70
表 4.3	個々のアラームイベントの一意性評価結果	71
表 5.1	アンケートシートの設定内容	79
表 5.2	アンケートの設定と特性の対応関係	84
表 5.3	オペレータの運転経験年数	87

## 第 1 章 序論

安全，安心は万人の，そしてすべての組織における社会的，経済的活動の基本である．日本においても CSR（Corporate Social Responsibility）や健康，安全，環境の重要性が再認識され，研究や現場での実際の取り組みが盛んになってきている．また，ISO（International Organization for Standardization）や IEC（International Electrotechnical Commission）などの国際規格が JIS（Japanese Industrial Standard）化されるようになり，欧米の安全に関する考え方が導入されてきている．そのような中，欧米を中心にアラームマネジメントの取り組みが活発化している．この取り組みは，化学プラントの安全操業を維持する上で，重要な一つの安全防護層の役割を持つアラームとオペレーションを徹底したプロセスハザード解析を基に設計，製作，運用，維持，さらにはそれに関わる人材の教育訓練にいたる広範囲にわたる．日本の化学プラントは，世界に比べて比較的事故が少なく，安全操業を維持してきた．しかし，ここ最近の事故件数は急激な増加傾向にある．

本章では，本研究の対象であるプラントアラームシステムとそのマネジメントサイクルにおけるアラームシステムの性能評価について，プラントの安全を巡る社会的背景と現状の課題，そして改善の必要性について概観する．

## 1.1 石油化学産業界における操業損失とその要因

ASM (Abnormal Situation Management Consortium) は、米国の石油化学業界における事故や故障などによる操業損失は年間 200 億ドルに上ると推定している。またアラームシステムが適正に機能することで、その損失は低減できると報告している (Hollifield and Habibi, 2006)。

1979 年、米国ペンシルバニア州スリーマイルアイランドで起きたスリーマイル島 (TMI) 原子力発電所の事故 (死傷者 0 名、但し、放射能被害は不明確、第二原子炉の炉心の溶解および付近設備の汚染) では、異常状態でアラームが多発し、オペレータは適切に対応できなかつたと報告されている (United States Nuclear Regulatory Commission, 2011)。

1994 年、英国ミルフォードヘブンで起きた TEXACO 製油所の爆発、火災事故 (負傷者 26 名、約 48,000,000 ポンドの損害と深刻な生産損失) では、爆発直前の 11 分間にオペレータは 275 個 (25 個/分の割合) のアラームを受信したと報告されている。また、対象アラームシステムには 2,000 個を超えるアラームが設定されていたが、オペレータ向けに発報される際のそれらのオペレータ対応優先度 (アラームプライオリティ) 配分は、Low : 13%, High : 87%, そして Emergency はたったの 1 個であり、本来重要であるはずのアラームがその他のアラームの中で見過ごされたと報告されている (Health & Safety Executive, 1997)。

2005 年、米国テキサス州テキサスシティで起きた BP 製油所での爆発、火災事故 (死者 15 名、負傷者 17 名) では、アラームマネジメントの不足が起因したと報告されている。米国労働安全衛生局 OSHA (Occupational Safety and Health Administration) は、安全レベル (SIL : Safety Integrity Level) に関するアラームおよび機器の信頼性評価の失敗を指摘、2,170,000 ドルの罰金を科した (J. Mogford, 2005, OSHA, 2005)。

上記三つの事故事例に見られるように、直接的な事故原因の究明もさることながら、安全防護層の役割を担うはずのアラームシステムが適正に機能しなかったことも注目されている。

## 1.2 アラームシステム

EEMUA (Engineering, Equipment and Materials Users' Association) は、アラームシステムとは、プラントの状態を自動的にモニタリングし、プロセスの変調や異常または機器の故障など対応操作が求められるような変化が生じた場合に、オペレータに知らせ、原因を特定するための情報を提供すると共に、対応操作を促し、かつ支援するシステムであると定義している。また、各状態に応じたオペレータの役割と求められるアラームを表 1.1 のように、適切なアラームの特性を表 1.2 のように定義している (EEMUA, 2007)。

表 1.1 オペレータの役割と求められるアラーム

	状態	オペレータの役割	求められるアラーム
Normal 正常時	制御システムが目標に追従させている	目標に追従しているかどうかの監視と微調整	微調整を促すアラーム
Upset 変調・異常時	制御システムでは変動をカバーできない	正常状態に戻すための操作	正常に復帰させるための操作を促すアラーム
Shut-down 緊急停止時	ESD が安全に停止させる	ESD が正常に作動しているかどうかの監視と万一、ESD が正常に作動していない場合の対応操作	ESD が正常に作動しない場合に安全停止のためのオペレータ操作を促すアラーム

注：ESD (Emergency Shutdown System)

表 1.2 適切なアラームの 8 特性

特性	解説
Relevant 操作相关性	各アラームはオペレータによる対応操作を要求するように設計されている。アラーム発生後、その対応操作が実施されている。
Unique 一意性	各アラームは 1 つの異常状態を通知するように設計されている。1 つの異常状態を通知するために複数のアラームが発生していない。
Timely 適時性	各アラームはオペレータによる対応操作のための許容時間を持って早過ぎず、遅すぎず、適切なタイミングで発生するように設計されている。アラーム発生後、その対応操作がある一定の時間内に実施されている。
Prioritized 優先度適正	各アラームはその状態の重大性と対応の優先性を示すメッセージ（優先度）をアラーム発生時に提供するように設計されている。アラーム発生時に、その優先度が正しく提供されている。
Understandable 理解可能性	各アラームはその状況の優先度、現在の状況と予測される将来の状況、そして取るべき対応操作を示すアラームメッセージをオペレータが理解しやすい明快で簡単な情報として提供するように設計されている。アラーム発生時に、その状況の優先度、現在の状況と予測される将来の状況、そして取るべき対応操作を示すアラームメッセージがわかりやすく提供されている。
Diagnostic 診断性	各アラームはその現在の状況を理解し、発生源を特定し、また将来を予測するための情報をメッセージとしてアラーム発生時に提供するように設計されている。アラーム発生時にその現在の状況を理解し、発生源を特定し、また将来を予測するための情報がメッセージとして提供されている。
Advisory 操作支援性	各アラームはオペレータによる対応操作ガイドをアラーム発生時にメッセージとして提供するように設計されている。アラーム発生時にオペレータによる対応操作ガイドがメッセージとして提供されている。
Focusing 注目性	各アラームはオペレータをその異常状態に素早く、かつ確実に注目させ、対応操作へと導くように、視聴覚など五感に訴えるように設計されている。アラーム発生時にオペレータは素早くそのアラームに気付いている。

また ISA (International Society of Automation) は、「アラームシステムは、アブノーマルなプロセス状態や機器の故障をオペレータに気づかせるシステム」とした上で、アラームシステムには BPCS (Basic Process Control System), SIS (Safety Instrumented System), アラームログ機能, オペレータにアラーム情報を提供するための HMI (Human Machine Interface) を含むとしており、アラームシステムデータフローを図 1.1 のように定義している (ISA, 2009)。これをプラントの安全設計コンセプトである IPLs (Independent Protection Layers) (AIChE/CCPS, 1993) に置き換えて考えるとすると、IPL2, IPL3, IPL4 がアラームシステムであると言える (図 1.2)。

以上のことから判るように、現在の国際的な主流として、アラームシステムは、単なる機械的なシステムではなく、オペレータと言う人間によるレスポンスをも含んだシステムであると言える。

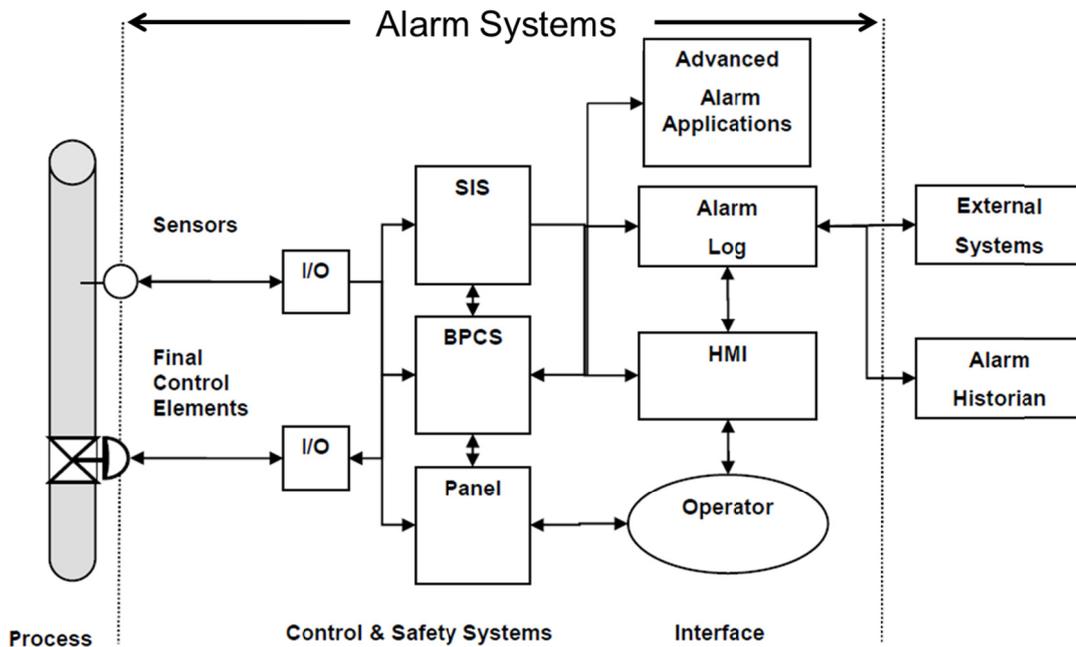


図 1.1 アラームシステムデータフロー

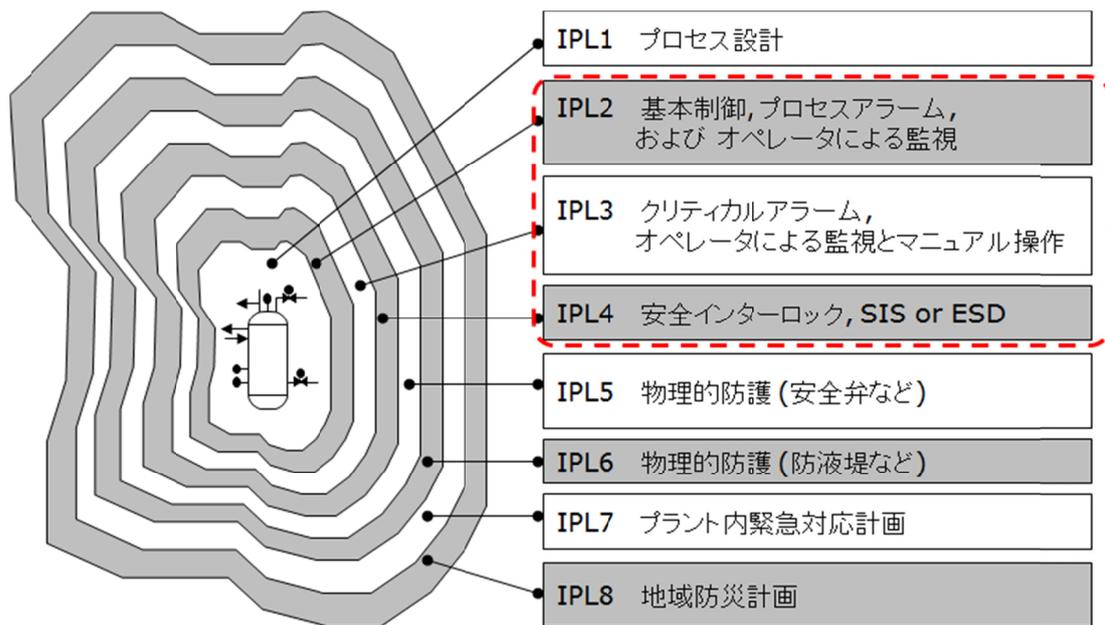


図 1.2 Independent Protection Layers (AICHE/CCPS, 1993)

### 1.3 プラントの安全を巡る社会的背景

欧米では、1970-80年代のプラント事故の多発を機に、プラントの安全に関する法規制や規格、指針が設けられ、プラントの設計段階から運用、保全に至るプラントライフサイクルのすべてのフェーズにおけるリスクマネジメントが実施されるようになった。その中心にあるのが米国連邦法 29CFR Part1910.110 PSM (Process Safety Management) (OSHA, 1992) である (清水, 1999, 宮本, 2001)。OSHA/PSM は、ある一定基準量以上の化学物質を取り扱うプラントを有する事業者に対して危機管理の履行を定めたもので、プラントが正常状態から逸脱し非正常状態に陥った際の緊急対応を目的した次の 14 項目を要求している。

- 1) 従業員の参加 (Employee Participation)
- 2) プロセス安全情報 (Process Safety Information)
- 3) プロセスハザード解析 (PHA : Process Hazard Analysis)
- 4) 作業標準 (Operating Procedures)
- 5) 教育訓練 (Training)
- 6) 協力会社 (Contractors)
- 7) 試運転前安全レビュー (Pre-Startup Safety Review)
- 8) 機器の健全性 (Mechanical Integrity)
- 9) 火気使用工事許可 (Hot Work Permit)
- 10) 変更管理 (Management of Change)
- 11) 事故調査 (Incident Investigation)
- 12) 緊急時対応計画 (Emergency Planning and Response)
- 13) 法令遵守監査 (Compliance Audit)
- 14) 業務上の機密保持 (Trade Secret)

OSHA/PMS は、これらのすべての事項において、プロセスハザード解析結果に基づき対応を要求している。また、プロセスハザード解析結果は最低 5 年毎に見直さ

れることを要求している。さらに OSHA による抜き打ち立ち入り検査が実施され、違反があった場合には、罰金が課せられ、かつ公表するとしている。

ここで、OSHA/PSM がアラームシステムに求める要件をまとめて見ると、次の三つとなる。すわなち、プロセスハザード解析に基づき、アラームシステムを設計、改善すること。重大アラームの文章化と変更管理を実施すること。アラームの正しい理解と対処方法についてオペレータ教育を実施することである。

OSHA/PSM を補完する意味で、電気電子制御系の機能安全に関して規定しているのが国際規格 IEC 61508 (IEC, 1998) および IEC 61511 (IEC, 2003) である。IEC 61508/61511 の対象はプロセス制御システムに限るものではないが、プロセス制御システムが電気、電子機器およびソフトウェアで構成されていることから、その電気電子式の安全関連システムが、万一、安全機能を失った場合のリスクを検討し、表 1.3 (松本, 2004) に示す許容可能なリスク (Tolerable Risk) まで提言させる機能を設計、装備することを規定している。つまり、アラームシステムを設計する上では、IEC 61508/61511 が重要になる。

表 1.3 リスクに対する判断

クラス	リスクに対する判断	
I	極めて大きなリスクであり許容できない	Unacceptable
II	望ましくないリスクであるが、リスク低減が実行不可能 望ましくないリスクであるが、リスク低減に要するコストが得られるリスク低減 (改善) より極めて過大である	Tolerable
III	残留リスクを低減するコストが得られるリスク低減 (改善) より大きい	
IV	無視できるリスク	Acceptable

IEC 61508/61511 に従えば、アラームシステムが以下の二つの条件を満たす場合、安全関連アラームとして安全関連機器を装備するなどの対応が必要となる。

- 1) そのアラームシステムが、プラントの潜在的リスク発生時にそのリスクを許容できないレベル (Unacceptable) から許容可能なリスクレベル (Tolerable) まで軽減する役割を担っている場合
- 2) そのアラームシステムによるリスク低減 (アラームとオペレータ操作) の  $PFD_{avg}$  (Probability of Failure on Demand Average : 平均機能失敗確率) が 0.1 以下の場合

さらに、それらの安全関連アラームは、IEC 61508/61511 に従い、設計、運用、メンテナンスされなければならない、また、プロセス機器システムが安全関連機器として適切に設計されてなく、認証されていない場合には、プロセス制御システムから独立して構成されなければならないと規定している。

ここで触れておきたい二つのデータがある。一つは OSHA/PSM の制定後の米国における事故件数の推移 (図 1.3) である。確実に PSM の効果が現れてきているとみてよいだろう。もう一つはオペレーター一人当たりのアラーム設定数の推移 (図 1.4) である。1990 年にその 10 年前と比べて 2 倍に増えたオペレーター一人当たりのアラーム設定数は、その後 10 年でさらに 2 倍へと増えている。図 1.3 (宮本, 2001) に見られるように 1995 年以降減少傾向にある事故件数に対して、図 1.4 (Hollifield and Habibi, 2006) に見られるアラーム設定数の増加は、結果として 1994 年の英国ミルフォードヘブン TEXACO 製油所や 2005 年の米国テキサスシティ BP 製油所のような大事故につながっているように思える。この背景には、パネル計装 (図 1.5) からコンピュータベースの DCS (Distributed Control System) 計装 (図 1.6) への移行によるアラーム設定の容易さとプロセスハザード解析結果、それに対する処置として不適切な設定 (部分最適化) が繰り返されたこと、そして HMI (Human Machine Interface) の高機能化と比例する形で進んだ省人化の影響があると考えられる。PSM による真の意味での効果は、いざ重大な事故につながる異常が発生した際に、その

状況を的確に知らせ、かつその後のオペレーションをナビゲートするようにアラームシステムが再構築され、かつ管理、運用されてからと言えるであろう。

このような法規制と国際規格の制定を受け、また 1.1 節で述べた事故報告の影響もあり、欧米、特に米国と英国を中心にアラームマネジメントに対する研究が活発に行われるようになった。

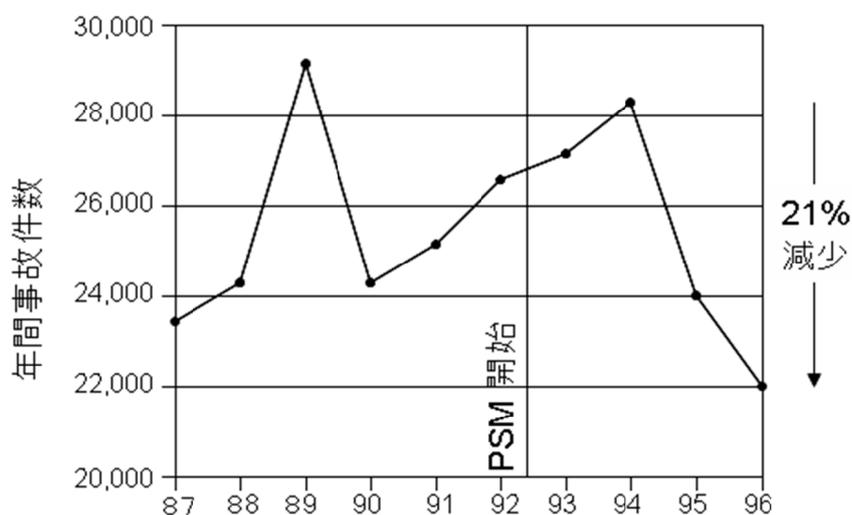


図 1.3 米国における化学物質業務上の事故

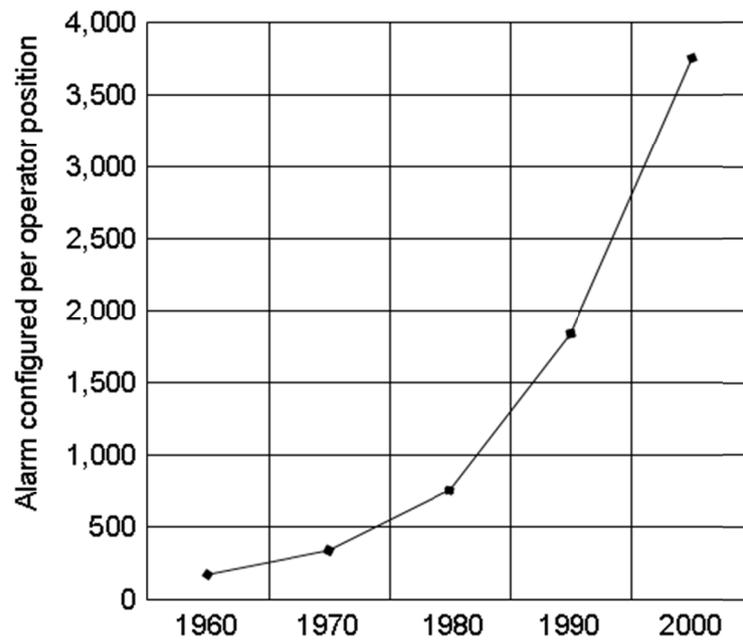


図 1.4 オペレーター人当たりのアラーム設定数



図 1.5 パネル計装



图 1.6 DCS 计装

## 1.4 アラームマネジメント

アラームマネジメントは、1999年にEEMUAがALARM SYSTEMS - A Guide to Design, Management and Procurement (EEMUA, 1999)を発表して以来、研究が進み、2009年には、ISAが米国ANSI (American National Standards Institute) による世界初のアラームマネジメントに関する標準書ANSI/ISA18.2-2009 Management of Alarm Systems for Process Industries (ISA, 2009)を発行した。また、現在IECは、ANSI/ISA18.2-2009をもとにIEC国際標準書の開発に着手している。

ANSI/ISA18.2-2009によれば、アラームマネジメントには10個のステージがあり、それらをプラントのライフサイクルを通して定期的に回すことでアラームシステムの健全性を維持するとしている(図1.7)。

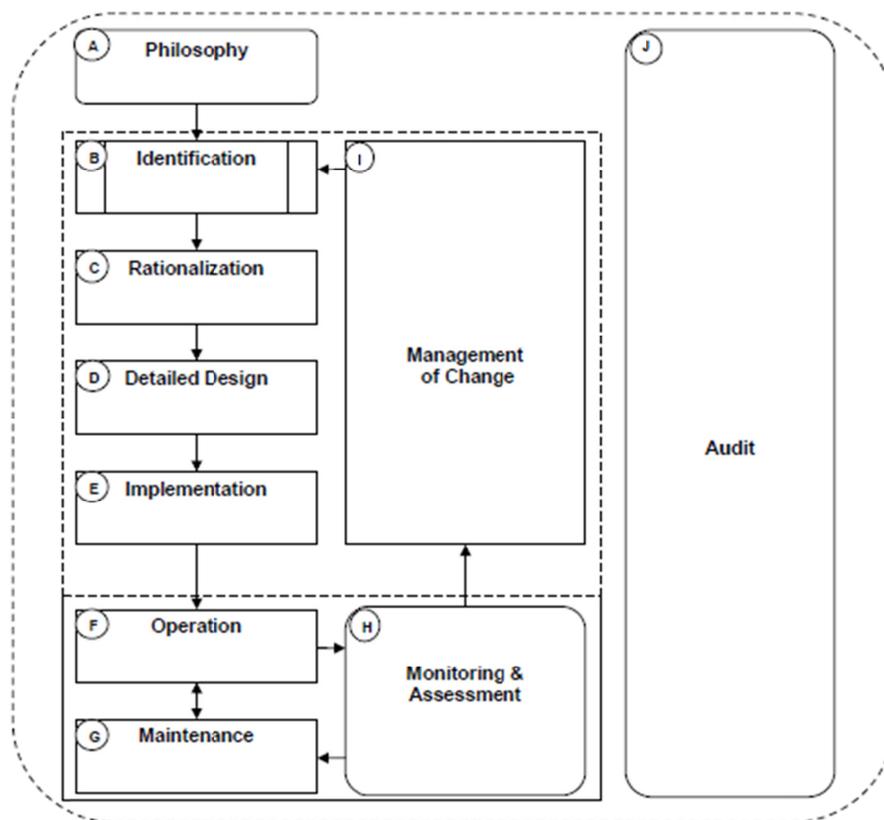


図 1.7 アラームマネジメントライフサイクル

以下に各ステージの概要を示す。

#### A) Philosophy

このステージは新設アラームシステムの設計や既設アラームシステムの改造の際、最初に実施する工程であり、アラームシステムの目的やその目的を実現するための手順、設計思想などを文書化する。また、このステージで決定し、明文化した事項は、アラームマネジメントライフサイクルのすべてのステージで遵守されなければならない。

#### B) Identification

このステージではプロセスハザード解析等を用いて必要なアラームを同定する。

#### C) Rationalization

このステージではステージ B) で同定したアラームの整合性を取ると共に、具体的なアラーム設定値や優先度などを決める。また、決定したアラーム設定情報をアラームマスターデータベースとして記録する。

#### D) Detail Design

このステージではステージ C) で決定したアラームについて DCS 等に設定するための詳細設計を実施する。

#### E) Implementation

このステージでは DCS 等へのアラームの実装、およびオペレータへの教育を実施する。

#### F) Operation

このステージでは完成したアラームシステムを利用して、プラントを運転する。

## G) Maintenance

このステージでは適正なプラント運転を維持するためのアラームシステムの保全を行う。

## H) Monitoring & Assessment

このステージではステージ A) で定義した設計思想をもとに作成したアラームシステム性能評価指標を利用して、アラームシステムの性能評価を実施する。また、必要に応じて性能不良な箇所について、詳細な原因特定などを実施する。

## I) Management of Change

このステージではステージ B) から E) で変更を伴う場合に、それらを明確に記録する。

## J) Audit

このステージは第三者により定期的な実施される監査である。ステージ A) で作成されたアラームシステム設計思想およびアラームマスターデータベースに記録された内容と実際のアラームシステムとの整合性を監査する。また、各ライフサイクルステージにおける実施内容および記録を監査する。

このように、プラントの安全、そして製造物の品質、さらには生産性に関わる気づきをオペレータに与える重要な役割を担うアラームシステムのマネジメント体系は、国際的な標準化が進む中で骨格が形成されてきた。

ISA はこのライフサイクルにおいて、既設プラントにおいては、スタート点としてステージ A) の他に、H) と J) があると説明している。一般的に、既設プラントにおけるマネジメントは、既設アラームシステムの性能評価を実施し、その結果をもとに改善方法が検討され、実行される。つまりステージ H) をスタート点とするケースである。

## 1.5 アラームシステムの性能評価

アラームシステムの性能を定期的に評価することは、新設、既設を問わず重要である。特に既設アラームシステムの改善プロセスにおいては、性能評価により現状を捉えることが、その後の改善に大きく役に立つ。アラームマネジメントに関するこれまでの研究と標準化の動きの中で、既設プラントのアラームシステムの改善を目的としたアラームシステム性能評価ツールが開発されてきた。EEMUA は、アラームシステムは、プラント状況を自動モニタリングし、異常や変調を検知した際には、オペレータにその状況を通知するとともに、オペレータによる対応操作を促すものであると定義した上で、その性能については、オペレータにとって適正であるかが重要であると述べている (EEMUA, 1999, 2007) 。しかし、EEMUA が提案する評価方法でさえ、アラームの発生状態を定量化した KPIs (Key Performance Indicators) を用いるものであり、人間ありきのプラントオペレーションにあって、アラームの受け手であるオペレータを考慮したアラームシステム性能評価には至っていない。また、その他の方法も EEMUA の提案をベースにするものばかりである。

以下に、EEMUA が提案する 5 つの方法を紹介する。

EEMUA は、人間工学的な観点からオペレータが対応可能なアラーム発生頻度であるかを判断することと、オペレータがどの程度アラームの重要度に感度よく反応できるかという視点で、アラームシステムの性能評価のための五つの指標とその目標値を提言している。

### 1) アラームの有効性に関するオペレータアンケートにおける総合評価点

**評価基準：2.0 点以下**

アラーム有効性アンケート調査は、実際の運転中にオペレータが受信したアラーム一つ一つに対して評価するチェックシート (表 1.4) を使用して行われる。これを集計して総合評価点を算出する (表 1.5) 。

この方法は、アラーム一点一点について、実際のオペレーションの中で評価していくため、とても有効な手段である。但し、オペレータの主観性を含むため、同時に複数のオペレータを対象に実施する必要がある。なお、アラームが発生するタイミングで、判断し、記録してもらうことが最も有効であるが、オペレータの業務負荷を上げてしまい、現実的ではない。

表 1.4 アラーム有効性アンケート

日付 YYYY/MM/DD 装置/設備 XXXXXXXX/ZZZZZZZ					
開始時刻 HH:MM					
Alarm Title	Action	Check	Noted	Little use	Nuisance
ボイラー圧力上限		✓			
蒸留塔塔頂圧 上限			✓		
終了時刻 HH:MM					

表 1.5 アラーム有効性アンケート結果の例

	Action	Check	Noted	Little use	Nuisance	総合 評価点
アラーム数	113	89	128	61	58	
割合	25%	20%	28%	14%	13%	
重み (固定値)	0	1	3	6	10	
評価点 (割合×重み)	0	0.2	0.84	0.84	1.3	3.18

2) 定常運転時の平均アラーム発生頻度

評価基準：10 分間に 1 回以下（表 1.6）

この方法は、事後解析を実施する上で有効な定量的評価法である。特に不要アラームの多いアラーム洪水状態の現場においては、現状を知る上で有効である。但し、この評価結果からアラームシステムの性能改善が必要となった場合に具体的に何をどう改善すべきかを判断することは極めて難しい。また、オペレータにとって有効なアラームであったかどうかを判定することはできない。

表 1.6 平均アラーム発生頻度評価のためのベンチマーク

定常運転時の平均アラーム数（長時間）	許容性
1 分間に 1 回以上	許容できない
2 分間に 1 回	多すぎる
5 分間に 1 回	対応可能
10 分間に 1 回以下	非常によい

### 3) 異常 (Upset) 発生後, 10 分間のアラーム発生回数

評価基準 : 10 回未満 (表 1.7)

この方法は, 2) 同様に事後解析を実施する上で有効な定量的評価法である. 特に不要アラームの多いアラーム洪水状態の現場においては, 現状を知る上で有効である. 但し, この評価結果からアラームシステムの性能改善が必要となった場合に具体的に何をどう改善すべきかを判断することは極めて難しい. また, オペレータにとって有効なアラームであったかどうかを判定することはできない.

表 1.7 異常発生後 10 分間のアラーム発生回数

異常発生後 10 分間のアラーム数	許容性
100 回以上	多すぎる オペレータはアラームを利用できない
20~100 回	対応することが難しい
10 回未満	対応可能. 但し, 複雑な対応を要求するアラームが複数発生した場合, 対応することが難しくなる可能性がある

### 4) 平均スタンディングアラーム数

評価基準 : 10 個未満

スタンディングアラーム数とは, ある時点で発生中 (未復帰状態) のアラーム数を意味する. この方法は, アラーム洪水状態の現場において, 現状を知る上では有効である. また, オペレータが失念することなくまだアラーム状態にあるプロセスまたは機器があることを意識した上で引き続きオペレーションを継続するためには, 有効な指標である. 但し, この評価結果からアラームシステムの性能改善が必要となった場合に具体的に何をどう改善すべきかを判断することは極めて難しい. また, オペレータにとって有効なアラームであったかどうかを判定することはできない.

## 5) 平均棚上げアラーム数

評価基準：30 個未満

棚上げアラーム数とは，設備の不調またはメンテナンス中等の理由で，一時的にアラーム設定を解除しているアラームの数を意味する．

この方法は，オペレータに棚上げ状態のアラームがあることを失念させずに，それらを意識してオペレーションを継続させるためには，有効な指標である．但し，この評価結果からアラームシステムの性能改善が必要となった場合に具体的に何をどう改善すべきかを判断することは極めて難しい．また，オペレータにとって有効なアラームであったかどうかを判定することはできない．

Hollifield, B. and Habibi, E. もその著書（Hollifield and Habibi, 2006）の中で，EEMUA の提案をベースとした独自のアラームシステム性能評価指標を提言している（表 1.8）が，いずれもアラームの発生頻度や発生パターンに関する定量的評価指標であり，具体的な改善策の見出しやオペレータにとって有効なアラームか否かを評価することはできない．

表 1.8 アラームシステム性能評価指標

KPI	中間目標	最終目標
目標平均アラーム発生率	300 回/日未満	150 回/日未満
目標平均アラーム発生率を超える時間率	5%	0%
プライオリティ別アラーム発生分布	LOW : 80% HIGH : 15% Emergency : 5%	
抑制アラーム数 アラーム停止機能, アラーム洪水抑制機能, 状態別アラーム設定機能等により抑制されているアラームを除く	0	
繰り返し発生するアラーム数 1 分間に 3 回以上発生するアラームの数	10 回/日以下	0 回/日以下
長時間未復帰アラーム数 24 時間以上未復帰のアラーム数	20 回/日以下	0 回/日以下
アラーム洪水回数 10 分間に 10~20 個のアラームが発生した回数	5 回/日以下	3 回/日以下
アラーム洪水回数 10 分間に 20 個以上のアラームが発生した回数	3 回/日以下	0 回/日以下
運転中のアラーム設定に関する変更回数 プライオリティ変更, 設定値変更, 抑制, 抑制解除, 等 アラーム停止機能, アラーム洪水抑制機能, 状態別アラーム設定機能による変更を除く	権限なき者による変更なし	

## 1.6 研究の目的

前述のとおり、既存のアラームシステム性能評価法は、その結果からアラームシステムの性能改善が必要と判断される場合において、これらの指標からは何をどのように修正すべきかを導き出すことは極めて難しく、またオペレータにとって有効なアラームであるかを評価することもできない。

本研究では、既設プラントのアラームシステムを研究対象とした上で、プラントの安全、製造品の品質、そして生産性に影響を及ぼすアラームシステムの性能改善に向けて、上記の課題を改善した新たなアプローチと性能評価方法を提案する。本論文は、以下の内容で構成される。

第2章では、オペレータのヒューマンファクターを考慮したアラームシステムの改善アプローチ法として、プラント運転ログデータを用いたイベント相関解析法(ECA1, ECA2)について述べる。

第3章では、第2章で述べたイベント相関解析法(ECA2)を実際のエチレンプラントに適用したアラームシステムの改善について述べる。

第4章では、イベント相関解析(ECA1)を用いたアラームシステムの性能評価法について述べる。

第5章では、オペレータアンケートを用いたアラームシステムの性能評価法について述べる。

第6章では、結論と今後の展望について述べる。

本研究成果は、実プラントにおける今後の安全性や生産性に大きく貢献できるものとする。

## 第2章 プラント運転ログデータのイベント相関解析法

### 2.1 はじめに

安全操業は化学プラントにとって最重要事項である。そして化学プラントを危険な事故から守り、また万一事故が起きてしまったとしてもその被害を最小限に止めるためのプラント安全コンセプトとして、広く適用されている八つの独立した防護層機能がある(図 1.2)(AIChE/CCPS, 1993)。第一から第四防護層までは事故を未然に防ぐための防護層である。この内、第二、第三、第四防護層(ILP2, IPL3, IPL4)はアラームシステムと関係している。但し、IPL4 が機能する時は、そのプラントは経済的な損失が発生する。一方、IPL2 と IPL3 は、プラントの安全性と生産性の両方を守る重要な防護層である。IPL2 は、プラントが正常な運転状態にある時は、Basic Process Control System(BPCS)による自動モニタリングを、またプロセス変数とその設定値から逸脱した時には、アラームを発生させ、オペレータによる対応操作を促し、その対応操作により安全性と生産性を確保するための防護層である。また IPL3 は、重要アラームとそれに対応したオペレータによる対応操作によって構成される防護層である。

IPL2 および IPL3 に相当するアラームシステムの適正化において、EEMUA 191 (Engineering Equipment & Materials Users' Association, 1999) は現在デファクトスタンダードとして広く受け入れられている。その中で EEMUA は、「アラームシステムは、プラント状態を自動的にモニタリングし、判断や対応操作を必要とする重要な変化にオペレータの注意を向けさせるためのとても重要な手段である」とした上で、アラームシステムの性能評価についても以下の方法が有効であると述べている。

- ・ Operator questionnaires  
(オペレータへのアンケート調査)
- ・ Alarm usefulness surveys  
(アラームの有効性調査)

- ・ Assessment of number of alarms in a system  
(アラーム設定数の評価)
- ・ Measurement of average alarm rate  
(平均アラーム発生数の測定)
- ・ Measurement of number of alarms following a major plant upset  
(重大なプラント異常時に発生したアラーム数の測定)
- ・ Measurement of operator response time  
(オペレータレスポンス時間の測定)
- ・ Measurement of number of standing alarms  
(未復帰アラームの測定)
- ・ Analysis of the priority distribution of alarms configured and occurring  
(アラーム重要度別設定分布解析および発生分布解析)
- ・ Correlation techniques  
(相関関係技術)

これらのアラームシステム性能評価方法の内、オペレータアンケート(Bransby & Jenkinson, 1998)とアラームの有効性調査(1.5節1)参照)は、その他の方法と比較して、IPL2 および IPL3 の性能を評価する上、オペレータによつてのアラームまたはアラームシステムの適切性を評価しているため有効な手段であると言える。しかし、これらの方法は主観的な評価傾向が強く、またアンケート作成者や回答者個人の偏見等を含みやすい。故に、より客観的に IPL2 および IPL3 の性能を評価するためには、プラントにおける異常発生後、どのようにアラームが発生、伝搬し、またそれらに対してオペレータがどのように反応し、操作介入を行ったかを解析する必要がある。

従来の異常伝搬解析法として、符号付き有向グラフ(Shiozaki, Shibata, Matsuyama, & O'Shima, 1989)やマルチレベルフローモデル(Bergquist, Ahnlund, & Larsson, 2003; Dahlstrand, 2002) が活発に研究されている。またアラームシステム設計評価のためのバーチャルオペレータモデルによる研究(Liu, Kosaka, Noda, & Nishitani, 2007a;

Liu, Kosaka, Noda, & Nishitani, 2007b; Noda & Nishitani, 2009)もいくつか存在する。しかし、これらのモデルベース手法は、対象となるプラント毎にモデルを製作する必要がある上に、対象プラントの改造工事や各種機器の追加、または運転手法の変更があった場合には、モデルを変更する必要がある。実用性の上で実際にアラームシステムの改善を担当する製造現場のエンジニアやオペレータにとっては複雑かつ難しく不向きである。

本章では、プラント運転ログデータに記録されたアラームとオペレータ操作の関係からプラントの安全性と生産性を確保する IPL2 および IPL3 の防護層機能を改善するための製造現場のエンジニアやオペレータにとって実用的なイベント相関解析手法を提案する。

## 2.2 IPL2, IPL3 性能改善のためのプラント運転ログデータ解析

### 2.2.1 運転ログデータからの迷惑イベント抽出

IPL2 および IPL3 の性能改善をデータ解析のスペシャリストの協力を得ずとも、製造現場エンジニアやオペレータなど実務者レベルで素早く、簡単に繰り返し利用でき、そして効果的に改善を進められる新規性のある手法を提案する。また EEMUA191 でも述べられているように、アラームとオペレータ操作との相関関係を時間的な前後関係をもって抽出することで評価する。言い換えるならば、提案手法はアラームとオペレータ対応操作が互いに適切であるかどうか注目し、プラント運転ログデータから抽出した異常伝搬経路や連鎖アラームの原点、オペレータの運転知識等を解析する手掛かりにより、改善活動時のプラント配管計装図 (P&ID) やプロセスフロー図 (PFD) を用いての現場調査を削減する。

IPL2 および IPL3 の性能改善に向けた手掛かりを抽出する方法として、イベント相関解析法(Nishiguchi & Takai, 2010, 以後 ECA1 と呼ぶ)を利用する。ECA1 は、離散的なイベントデータ間の相関性を定義する手法であり、それらの関係性とアラームや操作の発生順を定量化する。但し、対象アラームシステムは、非欠陥システムとして整備されていると仮定する。以下に抽出されるイベント相関関係が示す状況とその改善策の事例を示す。

#### 1) 連鎖アラーム

複数個のアラームに強い関係性がある場合、それらは連鎖的に発生したアラームである可能性が高い。これらを特定することで、連鎖する関連アラームを抑制するなどアラーム発生数を削減でき、オペレータのアラーム対応力を向上できる。

#### 2) 定型操作

複数個の操作に強い関係性がある場合、それらは一連の複合する定型操作である可能性が高く、自動化することができる。

### 3) 対応操作を伴わない不要アラーム

発生頻度の高いアラームであり、かつそのアラームと関係性が認められる操作が存在しない場合、プラントの安全性や生産性などいずれの面からも不要なアラームである可能性が高く、アラーム設定を解除するなどの対応ができる。

### 4) 異常原因

アラームと操作が一連の順で発生している場合、最初に発生したアラームがその異常の発生源に近いアラームである可能性が高い。

## 2.2.2 イベント相関解析法 (ECA1) のアルゴリズム

本項では、アラームやオペレータ操作に関するイベント間の関係性を定量化し、時間的な前後関係からそれらの伝搬性や独立性を表現するイベント相関解析手法 (ECA1) に関する詳細を示す。一般に相関係数は二つの連続値間の関係性を計測するもので、アラームやオペレータ操作のようなイベントデータには適用できないとされている (Li, 1990)。提案するイベント相関解析手法では、イベントペアをプロセスダイナミクスやオペレータレスポンス時間などの要因から決定した一定の時間間隔で分離して連続する時系列データとすることで、関係性を評価できると考える。以下にイベント相関解析手法の四つのステップについて示す。

#### Step 1. バイナリシーケンスへの変換

最初に、DCS (Distributed Control System) からアラームと操作イベントをその発生時刻付きで記録したプラント運転ログデータを入手し、各アラームや操作のイベントタイプ  $i$  について、バイナリシーケンスとして定義されたイベント時系列データ  $s_i(n)$  に変換する (Daley and Vere-Jones, 1998)。その際、(2-1) 式のとおりそのイベントタイプ  $i$  が日時  $n$  付近の単位時間  $\Delta t$  内で 1 回以上発生していた場合  $s_i(n)=1$ 、未発生の場合  $s_i(n)=0$  とする (図 2.1)。

$$s_i(n) = \begin{cases} 1, & \text{if some points in } (n\Delta t, (n+1)\Delta t] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-1)$$

ここで、 $n$  は時間の単位、 $\Delta t$  はプロセスダイナミクスやオペレータレスポンスタイムを考慮した調整可能な単位時間幅を示す変数とする。

バイナリシーケンスは、イベントタイプ毎に生成する。

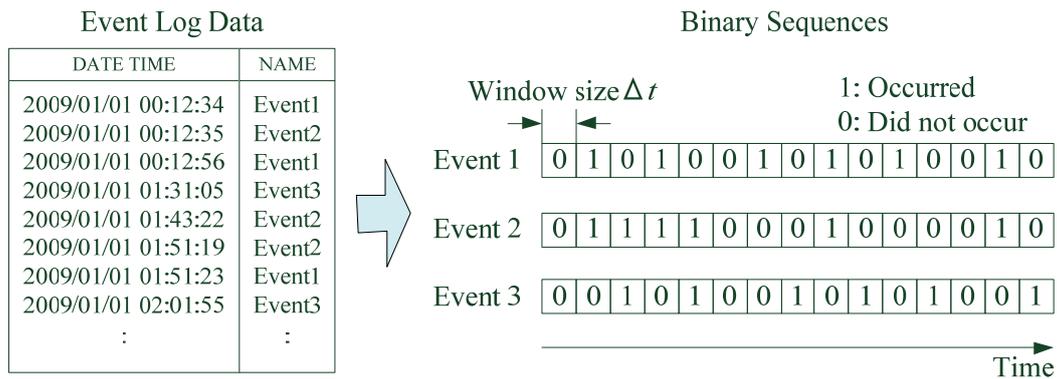


図 2.1 イベント時系列データの生成

## Step 2. 相互相関値の計算

イベントタイプ  $i$  と  $j$  の相互相関値は、(2-2)式のとおり、区間  $(m\Delta t, (m+1)\Delta t)$  内でイベントタイプ  $i$  に続いて  $j$  が共に発生した回数で表す。

$$c_{ij}(m) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{T/\Delta t - m} s_i(n)s_j(n+m) & m \geq 0 \\ c_{ji}(-m) & m < 0 \end{cases}, \quad -K \leq m \leq K \quad (2-2)$$

ここで  $T$  はプラント運転ログデータの観測期間であり、 $K$  は一つの変数として定義する最大遅れ時間である(図 2.2)。相互相関値は、バイナリシーケンスを時間軸で 1 単位時間ずつずらした際に両方のイベントの重なり合う単位時間帯が 1 である回数となる。

最大相関値  $c_{ij}^*$  とその時の遅れ時間  $m_{ij}^*$  を(2-3)式とする。

$$c_{ij}^* = \max c_{ij}(m) \quad , \quad m_{ij}^* = \arg \max_m c_{ij}(m) \quad (2-3)$$

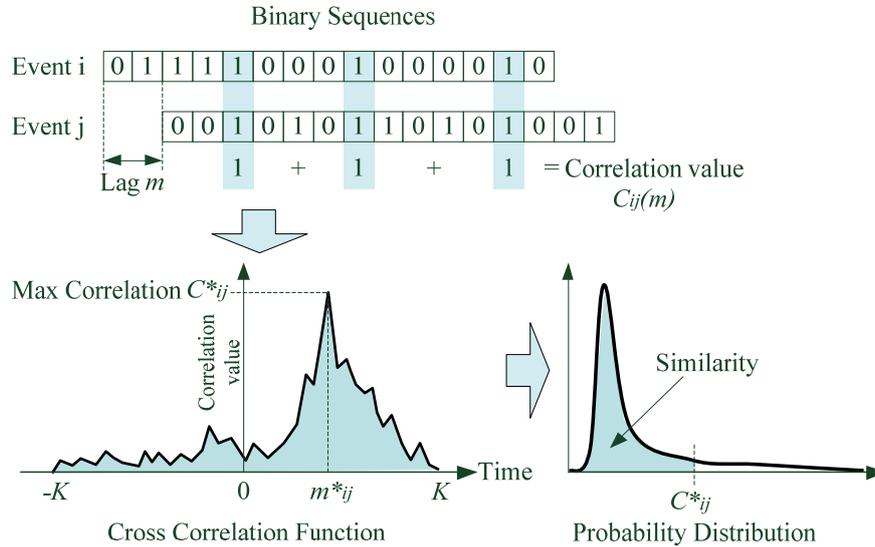


図 2.2 相互相関関数と類似度

### Step 3. 確率分布を用いた 2 つのイベントの類似度の計算

最大相関値  $c_{ij}^*$  は二つのイベントの関係度合いを表しているが、発生率の大きく異なるイベント同士の比較においては適切でない。よってイベントペア間の類似性の評価において、対象イベントの発生率の違いによる影響を受けないために確率分布を用いる(図 2.2)。その結果、二つの独立したイベント間の類似度  $S_{ij}$  は最大遅れ時間  $K$  以内で、かつ最大相関値  $c_{ij}^*$  よりも小さい確率で定義する。

$$S_{ij} = P(c_{ij}(m) < c_{ij}^* \mid -K \leq m \leq K) \cong \left\{ \sum_{l=0}^{c_{ij}^*-1} \frac{\nu^l e^{-\nu}}{l!} \right\}^{2K+1} \quad (2-4)$$

(2-4)式において、 $\nu$  は独立したイベントの発生に関するポアソン分布の期待値であり、(2-5)式に示すとおり二つの独立したイベント間の共通発生数の平均で近似される。

$$v = \frac{T}{\Delta t} \cdot p_i \cdot p_j \cong \frac{\Delta t}{T} \sum_{n=0}^{T/\Delta t} s_i(n) \cdot \sum_{n=0}^{T/\Delta t} s_j(n) \quad (2-5)$$

つまり、この手法は二つのイベント  $i$  と  $j$  が独立して発生したと仮定した上での一つの統計的検定を実施する。実際の最大相関値  $c_{ij}^*$  は二つの独立したイベント間の相関分布と同等であると見なす。類似度  $S_{ij}$  は 1 から棄却率を引いた値となる。

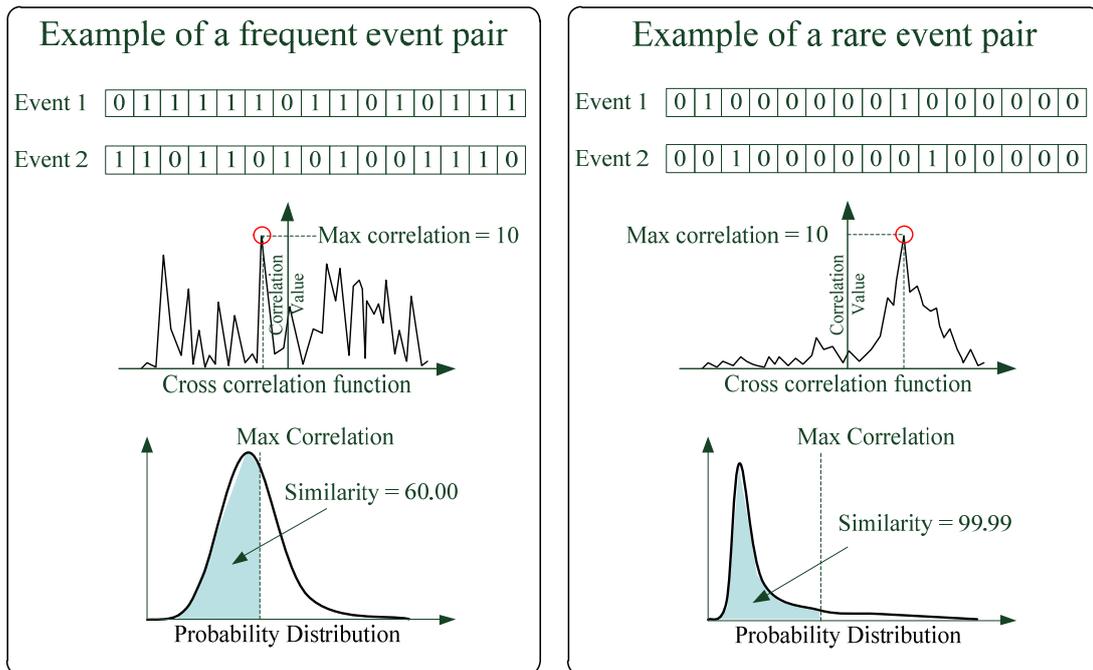


図 2.3 イベントペア間の類似性

たとえ計算により求めた最大相関値  $c_{ij}^*$  が同じ値を持つイベントペアがあったとしても、頻繁に発生するイベントペアの場合は、共通して発生する確率が高くなり、その時の類似度は小さくなる。反対に発生頻度の低いイベントペアの場合、共通して発生する確率は低くなるが、類似度は大きくなる(図 2.3)。

#### Step 4. ペアワイズ類似度によるクラスタリング

最終ステップは、高い関係性を持つイベント同士のグループ化である。ペアワイズ類似度を利用したクラスタリング手法がいくつも存在するが、ここでは広く利用

されており、また理解の容易な階層化クラスタリング手法（群平均法）を利用する。前提条件として、プラントで発生するアラームや操作イベントは、原因となる一現象に関連して発生するものとした上で、解析上のイベントの整理を容易にするため、排他的かつ階層的クラスタを採用する。また、階層化クラスタリング手法の中でもクラスタの結合後も他のクラスタとの距離が変わらず、結果を表現する際に偏りの少ない樹形図となるためデータ解析に精通する技術者以外でも理解しやすい群平均法を採用する。階層化クラスタリング（群平均法）では、類似度の高いイベントペアを含むクラスタを繰り返し組み合わせていく(図 2.4)。類似性の高いイベント群を含むクラスタの抽出には、調整可能な閾値を設け、閾値より高い類似度のクラスタを抽出する。さらに、クラスタのイベントの発生順をクラスタ内のイベントペア毎のタイムラグ  $m_{ij}^*$  によって推定する。

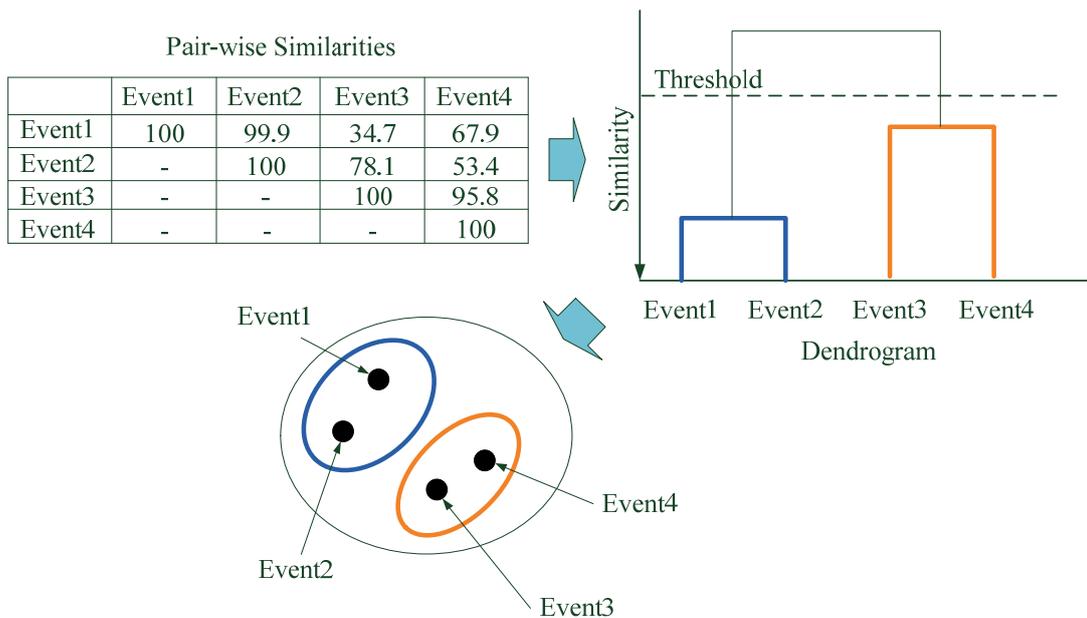


図 2.4 クラスタリング

尚、実際の化学プラントにおいては、一つのイベントの発生確率が、従属性のため他のイベントの発生確率に影響を及ぼす可能性があることに注意する必要がある。提案するイベント相関解析手法（ECA1）では、このような状態におけるイベント間

の確率を考慮されていないため、その類似度は三つ以上のイベント間の関係性としても定義することができる。しかし、三つ以上のイベント間の類似度の推定は、殆ど効果がなく、また多くの計算を必要とする。たとえば、図 2.5 に示す三つの関係性のあるプロセス変数(温度 A、圧力 B、流量 C)とそれらに対する上限アラームについて考えてみる。この例では、各上限アラームは同期して発生していないため、三つのイベントの類似度は 0 となる。対照的に提案するイベント相関解析手法では、イベントペア間の類似性から三つ以上のイベント間の関係性も適切に評価する。図 2.5 の例において、温度 A と圧力 B の類似度および圧力 B と流量 C の類似度は、高い値となる。よってクラスタリングの結果は、これら三つのイベントが同じグループに属すると考えられる。この例のように、実際のプラント運転ログデータにおいて、関係性の高い三つ以上のイベントは滅多に存在しないことから、イベントペアから求めた類似性によるクラスタリングは、実用性において十分であると言える。

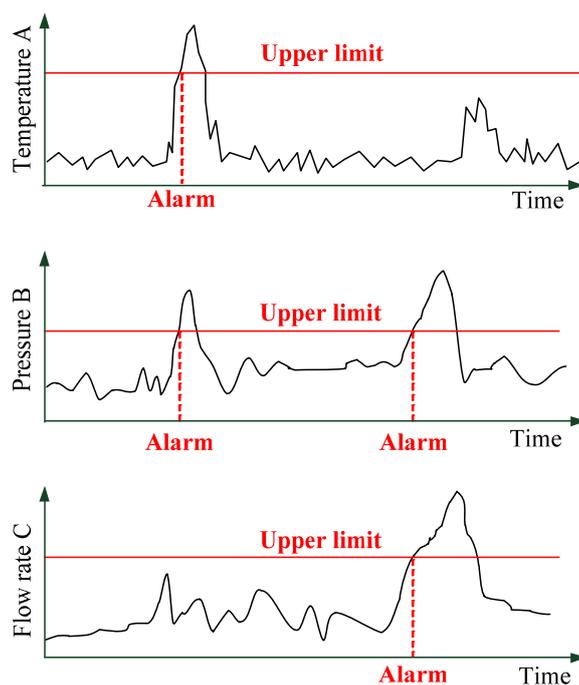


図 2.5 3つのアラームイベントの相関性評価例

### 2.2.3 数値実験

提案するイベント相関解析手法 (ECA1) の評価のため, 人工データによる数値実験を行った. 人工データは, 異常現象の発生を示す原因イベント 2 タイプ (Event 1, 4) とその現象が伝搬することで発生する関連イベント 4 タイプ (Event 2, 3, 5, 6) で構成し, 1 秒単位で 30 日分のデータを生成した.

- ・ 原因イベント Event 1 は, 期待値 0.0001 のポアソン分布に従って発生させた.
- ・ 原因イベント Event 4 は, 期待値 0.0004 のポアソン分布に従って発生させた.
- ・ 関連イベント Event 2 は, Event 1 から伝搬発生するイベントとして, Event 1 に対して, 期待値 0.000005 のポアソン分布を付加した後, 確率 50% で除去した. さらに, 関連ポイントの時間遅れを表すために, 各発生日時に対して平均 600, 標準偏差 100 の正規分布に従った遅れを付加した.
- ・ 関連イベント Event 3 は, Event 1 から伝搬発生するイベントとして, Event 1 に対して, 期待値 0.000005 のポアソン分布を付加した後, 確率 50% で除去した. さらに, 関連ポイントの時間遅れを表すために, 各発生日時に対して平均 1800, 標準偏差 100 の正規分布に従った遅れを付加した.
- ・ 関連イベント Event 5 は, Event 4 から伝搬発生するイベントとして, Event 4 に対して, 期待値 0.000002 のポアソン分布を付加した後, 確率 50% で除去した. さらに, 関連ポイントの時間遅れを表すために, 各発生日時に対して平均 600, 標準偏差 100 の正規分布に従った遅れを付加した.
- ・ 関連イベント Event 6 は, Event 4 から伝搬発生するイベントとして, Event 4 に対して, 期待値 0.000005 のポアソン分布を付加した後, 確率 50% で除去した. さらに, 関連ポイントの時間遅れを表すために, 各発生日時に対して平均 1800, 標準偏差 100 の正規分布に従った遅れを付加した.

人工データに本手法を適用した結果, 類似度 0.9 以上でクラスタリングしたところ, 表 2.1 に示す二つのグループが抽出された. Group A は原因イベント Event 1 から始まり, Event 2, Event 3 へと伝搬する関係性が読み取れ, また Group B でも原因

ポイント Event 4 から始まり, Event 5, Event6 へと伝搬する関係性が読み取れた. これらより本手法の数値実験上での正当性を確認できた.

表 2.1 発生順序と時間差の解析結果

Group A			Group B		
Order $i \rightarrow j$	Similarity $c_{ij}^*$	Delay $m_{ij}^*$	Order $i \rightarrow j$	Similarity $c_{ij}^*$	Delay $m_{ij}^*$
1→2	0.99	600	4→5	0.98	600
1→3	0.98	1800	4→6	0.97	1900
2→3	0.96	1200	5→6	0.95	1100

### 2.3 イベント相関解析法による迷惑アラーム抽出法（その2）

ECA1 は、一定のタイムウィンドウ幅でバイナリ変換したアラームや操作のイベント発生系列間の最大相互相関値に基づき、関連するイベント群をグルーピングする。そして、グループを構成するイベントの種類から、連鎖アラーム、繰り返しアラームおよび対応操作なしアラームを抽出する。しかし、ECA1 は運転ログデータを一定のタイムウィンドウ幅でバイナリデータに変換するため、類似性を持つ二つのイベントの発生点間のタイムラグの分散が大きいとき、タイムウィンドウ幅を適切に選択しなければイベントの間の類似性を正しく検出できない問題がある。適切なタイムウィンドウ幅を二つのイベントの組み合わせごとに設定しなければならないため、エンジニアの負担は大きく、ECA1 を実プラントへ適用する際の課題となっていた。運転ログデータの記録周期をそのままタイムウィンドウ幅に用いたり、試行錯誤的に決めているのが実情である。

Kurata *et al.* (2011) は、イベント間のタイムラグの分散が大きい場合にも、イベント間の類似性を正しく判定できる新しいイベント相関解析法（以後、ECA2 と呼ぶ）を提案している。ECA2 は、運転ログデータのバイナリ変換時のタイムウィンドウ幅を自動的に拡大することで、タイムラグの分散が大きい場合にも物理的に関連するイベント発生パターン間の類似性を正しく判定できる。

ECA2 では、まず、プラント運転ログデータを一定のタイムウィンドウ幅でバイナリ変換し、イベント  $i, j$  の発生パターン間の類似度  $S_{ij}$  を(2-4)式により計算する。類似度がイベント間の類似性を判定するためのしきい値よりも小さいとき、バイナリ変換時のタイムウィンドウ幅を拡大し、類似度を再評価する。その結果、イベント発生点間のタイムラグの分散が大きい場合にも物理的に関連するイベント発生パターン間の類似性を正しく判定できる。プラント運転ログデータに含まれるすべてのイベント間の類似度を求め、類似度に基づきイベントを階層的クラスタリング手法（Miyamoto, 1999）によりグルーピングする。グループ内のイベント構成に基づき、迷惑アラームを抽出する。

## 2.4 まとめ

プラント運転ログデータとして記録されたアラームイベントやオペレータ操作イベント間の相互相関性を解析することでプラントの安全防護層の内の第二，第三防護層機能を改善する方法として ECA1 を提案した．ECA1 は，エチレンプラントの運転ログデータに適用され，個々のイベント情報からだけではわかりにくい迷惑アラームの発生原因を的確に発見できること，発生頻度の少ない迷惑アラームを抽出できることが実証されている（Higuchi *et al.*, 2010）．本手法がデータ解析などの知識を必要とせず，製造現場のエンジニアやオペレータでも素早く，簡単に，そして効果的にプロセスの安全性と生産性の改善に向けた課題の抽出と改善方法の検討ができることを提示した．

また ECA1 の課題を解決する拡張手法 ECA2 を紹介した．なお，ECA2 の適用結果の報告例は，アラームおよび操作イベント種類の合計が 20 程度の小規模な蒸留プロセスのシミュレーションデータに限定され，エチレンプラントのような大規模な化学プラントの実データに対する有効性は示されていないため ECA1 同様に実プラントでの検証が望まれる．

## 第3章 エチレンプラント運転ログデータからの迷惑アラームの抽出

### 3.1 はじめに

プラント監視制御システムの急速な高性能化によって、大量のアラームを低コストで監視制御システムに設定できるようになった。しかし、個々のアラームの必要性や管理範囲の妥当性が十分検討されないままアラームシステムが設計されている運転現場も多く、連鎖アラーム、繰り返しアラームや対応操作なしアラームなどの迷惑アラーム発生の要因となっている (Nimmo, 2002, Alford, 2005)。連鎖アラームとは一つの異常事象に対して複数のアラームが連鎖して発生すること、繰り返しアラームとはアラームが発報と復帰を短時間周期で繰り返すこと、対応操作なしアラームとはアラーム発報時に対応操作が不要なアラームであることを意味する。迷惑アラームは、オペレータに有意な情報を与えないばかりか、オペレータの余計な負担をもたらす。迷惑アラームの削減は、安全なプラントオペレーションのための重要な課題となっている。

プラントアラームシステムの適正化を目的に、様々なプラント運転ログデータのデータ解析法が提案されている。プラント運転ログデータとは、プラントで発生したアラーム（以後、アラームイベントとよぶ）やオペレータによる操作（以後、操作イベントとよぶ）の発生時刻とイベント名を記録したデータである。Wu *et al.* (2010) は、プラント運転ログデータに含まれるアラームイベントの発生系列間の類似性を Jaccard Similarity Index (Lesot *et al.*, 2009) で評価し、Alarm Similarity Color Map を用いて可視化する方法を提案した。しかし、評価結果からアラームを抽出する方法については具体的に言及していない。

Nishiguchi and Takai (2010) は、プラント運転ログデータから迷惑アラームを抽出する方法としてイベント相関解析法 (ECA1) を提案した。ECA1 では、一定のタイムウィンドウ幅でバイナリ変換したアラームや操作のイベント発生系列間の最大

相互相関値に基づき、関連するイベント群をグルーピングする。そして、グループを構成するイベントの種類から、連鎖アラーム、繰り返しアラームおよび対応操作なしアラームを抽出する。しかし、ECA1 には、運転ログデータを一定のタイムウィンドウ幅でバイナリデータに変換するため、類似性を持つ二つのイベントの発生点間のタイムラグの分散が大きいとき、タイムウィンドウ幅を適切に選択しなければイベントの間の類似性を正しく検出できない問題がある。適切なタイムウィンドウ幅を二つのイベントの組み合わせごとに設定しなければならないため、エンジニアの負担は大きく、ECA1 を実プラントへ適用する際の課題となっていた。運転ログデータの記録周期をそのままタイムウィンドウ幅に用いたり、試行錯誤的に決めているのが実情である。

Kurata *et al.* (2011) は、イベント間のタイムラグの分散が大きい場合にも、イベント間の類似性を正しく判定できる新しいイベント相関解析法(ECA2)を提案した。ECA2 は、運転ログデータのバイナリ変換時のタイムウィンドウ幅を自動的に拡大することで、タイムラグの分散が大きい場合にも物理的に関連するイベント発生パターン間の類似性を正しく判定できる。しかし、ECA2 の適用結果の報告例は、アラームおよび操作イベント種類の合計が 20 程度の小規模な蒸留プロセスのシミュレーションデータに限定され、エチレンプラントのような大規模な化学プラントの実データに対する有効性は示されていなかった。

本章では、ECA2 を代表的な化学プラントであるエチレンプラントの運転ログデータに適用し、迷惑アラームや定型操作の抽出法としての有効性について検証した結果を報告する。エチレンプラントのアラームイベントおよび操作イベントの種類の合計は約 4,000 種であり、1 ヶ月間のイベント発生回数は 50,000 回以上にも達する。ECA2 の有効性がエチレンプラントで実証できれば、アラーム数の急増が問題となっている化学プラントのアラームシステムの適正化に対するインパクトは小さくない。

## 3.2 エチレンプラント

### 3.2.1 エチレンプラントのプロセスフロー

エチレンプラントのプロセスフローを図 3.1 に、機器番号と装置名の対応関係を表 3.1 に示す。エチレンプラントは、主原料ナフサを分解炉 (H1~H8) で熱分解し、重質分を V1 で取り除いた後、二次反応を防止するためクエンチタワー (V2) で急冷する。冷却した分解ガスを圧縮、苛性ソーダ洗浄塔 (V10) で洗浄し、水分を除去した後に、V3~V9 の蒸留工程で主製品であるエチレンおよびプロピレンを分離精製する。

エチレンプラントの監視制御システムには、2461 種類のプロセス変数と 775 種類の操作変数が登録されている。プロセス変数や操作変数には、スイッチ (ON/OFF) の変更やアナログ入力 of 管理範囲の変更など複数のイベントが定義される。プラントで発生したイベント名と発生時刻は、1 分単位でプラント運転ログデータに記録される。

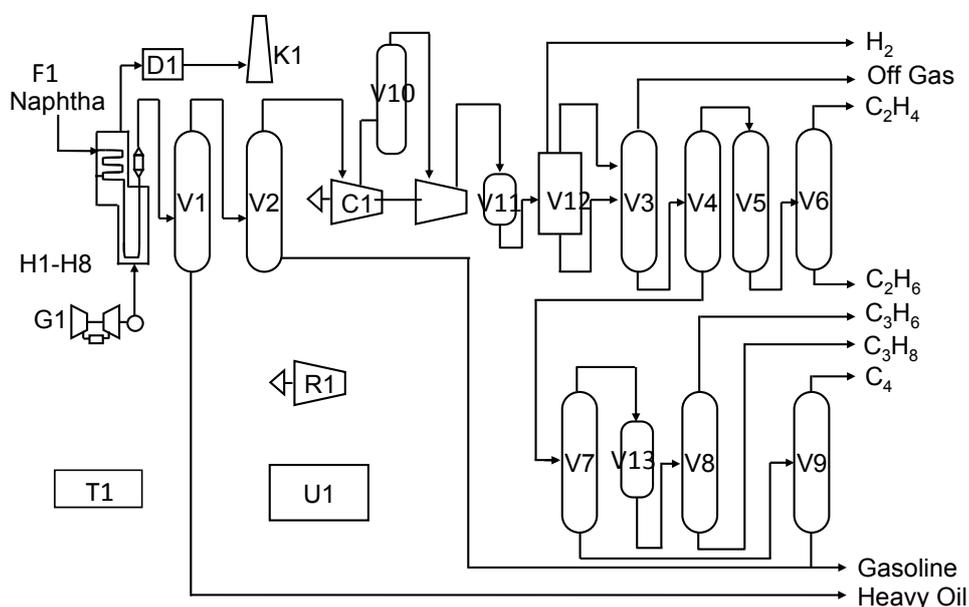


図 3.1 エチレンプラントのプロセスフロー

表 3.1 装置 ID と装置名

ID	装置名	ID	装置名
C1	Cracked gas compressor	V2	Quench water tower
D1	DeNOx section	V3	Demethanizer
F1	Feed	V4	Deethanizer
G1	Gas turbine	V5	Acetylene absorber
H1-H8	Cracking furnace No.1-8	V6	Ethylene fractionator
K1	Exhaust gas stack	V7	Depropanizer
P1	Product processing unit	V8	Propylene fractionator
R1	Refrigeration compressor	V9	Debutanizer
T1	Tank	V11	Dryer
U1	Utility section	V12	Chill train
V1	Primary fractionator	V13	MAPD Hydrogenation Reactor

### 3.2.2 プラント運転ログデータ

ある 1 ヶ月間にエチレンプラントで発生したアラームイベントは 914 種類，操作イベントは 857 種類であった。また，アラームイベントおよび操作イベントの発生回数の合計は，それぞれ 18580 回および 33060 回で，合計は 51640 回であった。発生したアラームイベントに 1～914，操作イベントに 915～1771 のイベント番号を与えた。各イベントの発生時刻を図 3.2 に示す。このグラフからだけでは，イベントの発生パターン間の関連性を評価し，連鎖アラームや対応操作のないアラームなどを見つけ出すことは難しい。

エチレンプラントにおける 10 分あたりのアラームイベント発生数を図 3.3 に示す。エチレンプラントのアラームイベントの発生頻度は，定常運転時のガイドラインで

ある 10 分間に 1 回 (EEMUA, 2007) を頻繁に超えており, エチレンプラントにおけるアラームイベント削減の必要性を裏付けている.

1 ヶ月間に発生したアラームイベントおよび操作イベントの種類を装置ごとに集計した結果を図 3.4 に示す. 一つのイベントで複数の機器に関係するものもあるため, 合計数はアラームおよび操作イベントの種類合計と一致しない. H1~H8 の分解炉で特に多種のイベントが発生しているのは, 分解炉での定期的なデコーキング作業のためである.

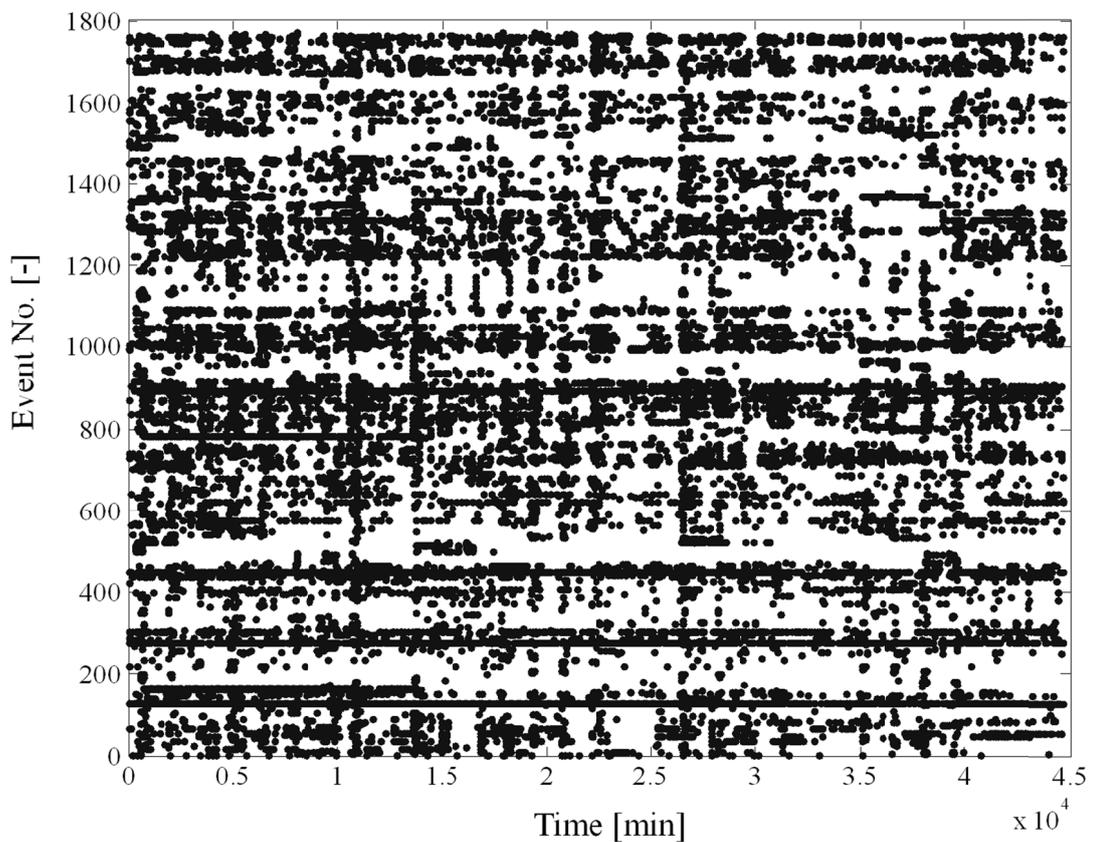


図 3.2 エチレンプラントのイベントログデータ

1ヶ月間に発生したアラームイベントおよび操作イベントの種類を装置ごとに集計した結果を図3.4に示す。一つのイベントで複数の機器に関係するものもあるため、合計数はアラームおよび操作イベントの種類合計と一致しない。H1～H8の分解炉で特に多種のイベントが発生しているのは、分解炉での定期的なデコーキング作業のためである。

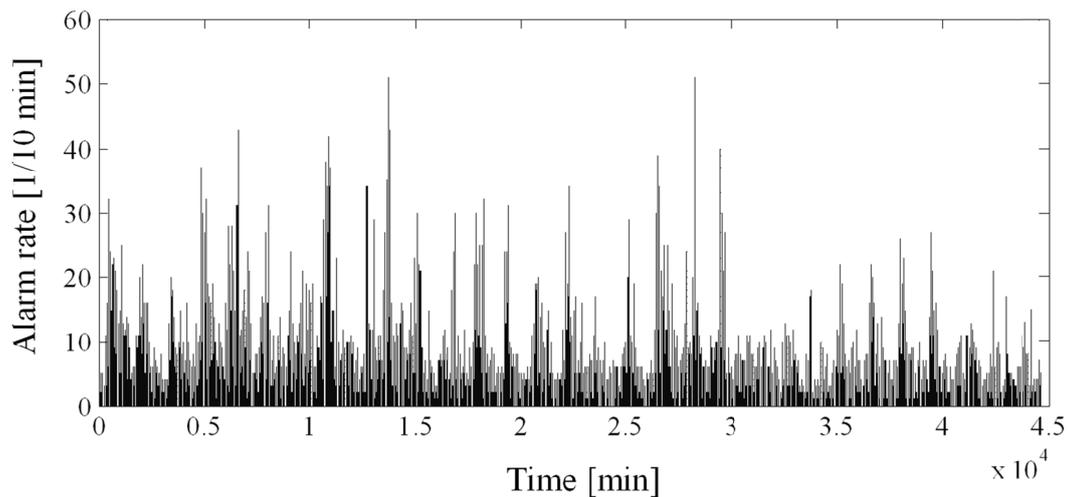


図 3.3 10分あたりのアラームイベント発生数

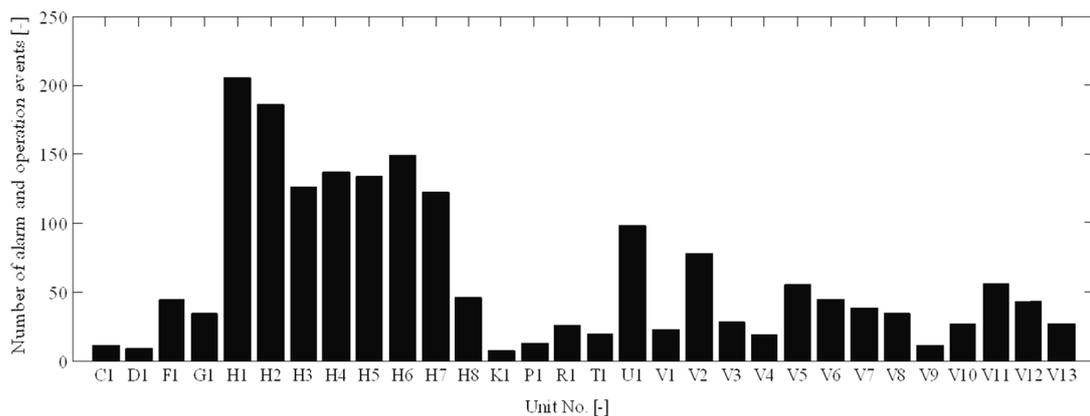


図 3.4 装置別アラームイベントおよび操作イベント発生数

### 3.3 エチレンプラント運転ログデータのイベント相関解析

#### 3.3.1 解析条件

イベント相関解析のパラメータ設定値を表 3.2 に示す。タイムウィンドウ幅の初期値  $\Delta t_{ini}$  は運転ログデータの記録周期である 1 分，最大タイムラグ時間  $K$  は，流体の装置内での平均滞留時間を参考に余裕をみて 30 分に設定した。また，タイムウィンドウ幅の最大値  $\Delta t_{max}$  は，最大タイムラグ時間  $K$  以下の値で，最も大きな 2 の倍数である 16 分とした。さらに，イベント間の類似性を判定するしきい値  $S_{min}$  は 0.995 とした。これは，期待値 0.001 で同期して発生する二つのイベントが，10000 回の 試行において 25 回以上同期して発生するときに類似性ありと判定することに相当する。

表 3.2 イベント相関解析のパラメータ設定値

Parameters	Definition	Value
$\Delta t_{ini}$	Initial size of time window	1 min
$\Delta t_{max}$	Maximum size of time window	16 min
$K$	Maximum time delay	30 min
$S_{min}$	Threshold of similarity	0.995

#### 3.3.2 類似度の計算結果

タイムウィンドウ幅を運転ログデータの記録周期で一定とする ECA1 と，タイムウィンドウ幅を自動的に調整する ECA2 を，エチレンプラントの運転ログデータに適用した。ECA1 および ECA2 によるイベント間の類似度の評価結果を図 3.5 および図 3.6 に示す。グラフには，イベント間の類似度が  $S_{min}$  以上のイベントの組み合わせを点で表した。対角線上の点は同一イベント間の類似度であるため，類似度はすべて 1 である。また， $S_{ij} = S_{ji}$  であるため，グラフは 45 度の線で対称となる。

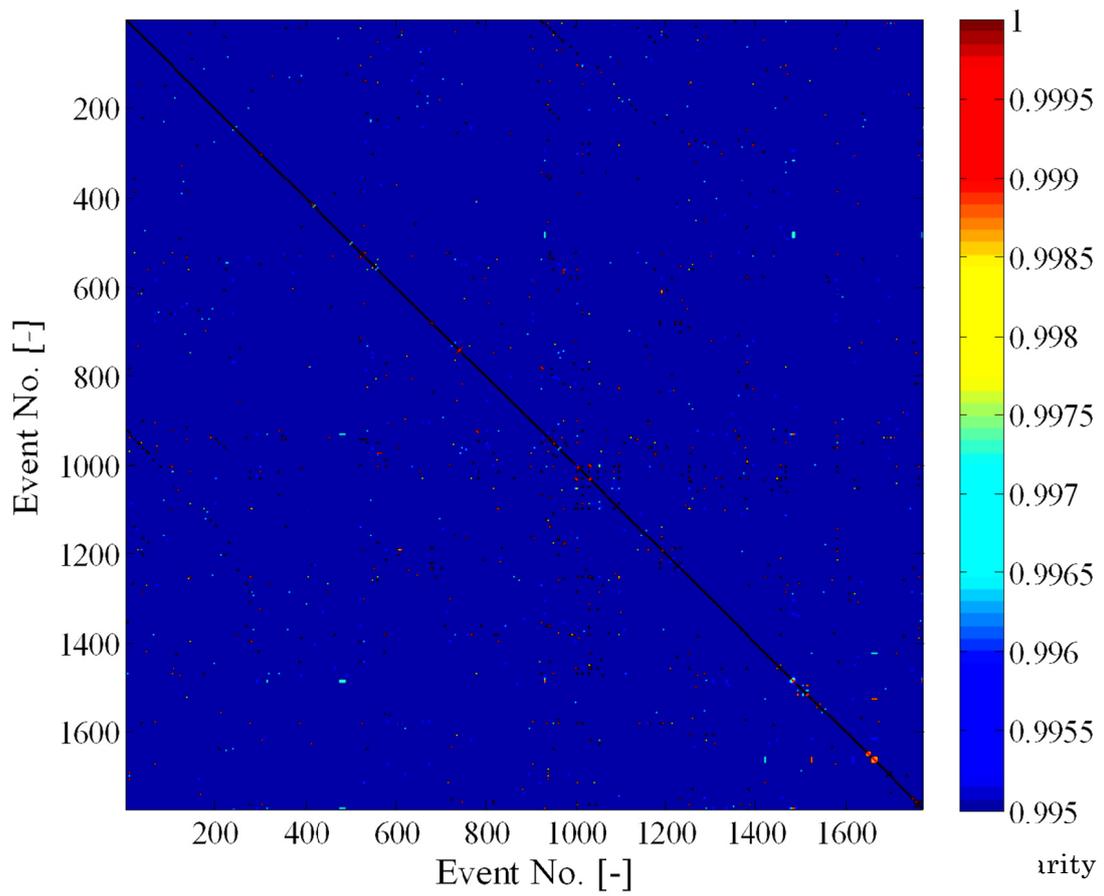


図 3.5 ECA1 による類似度評価結果

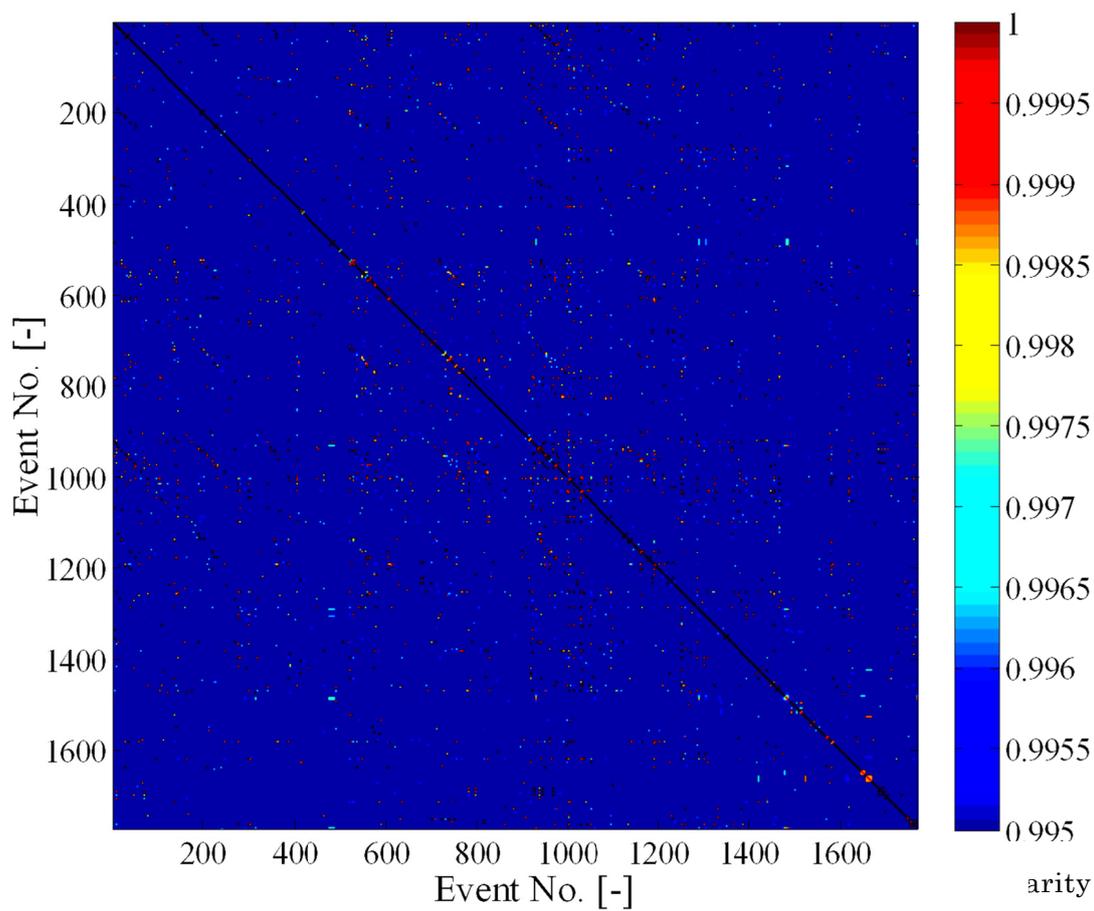


図 3.6 ECA2 による類似度評価結果

二つのグラフを比較すると、図 3.6 は図 3.5 と比べてプロットされている点が多いことが読み取れる。これは ECA2 によって類似度が  $S_{\min}$  以上となるイベントの組み合わせが ECA1 の計算結果に比べて増えたことを意味している。ECA1 と ECA2 において、タイムウィンドウ幅ごとに類似度がはじめて  $S_{\min}$  以上となったときのイベントの組み合わせの数を表 3.3 に示す。ECA1 によって類似度が  $S_{\min}$  以上と評価されたイベントの組み合わせは 13077 通りであった。一方、ECA2 により類似度が  $S_{\min}$  以上と評価されたイベントの組み合わせは 27731 通りで、ECA1 の結果に比べ 112% 増加した。

表 3.3 ECA1 と ECA2 のタイムウィンドウサイズ

$\Delta t$ [min]	ECA1	ECA2
1	13,077	13,077
2	—	3,580
4	—	3,843
8	—	3,594
16	—	3,637
<b>Total</b>	13,077	27,731

### 3.3.3 クラスタリング結果

類似度の計算結果に基づき、イベントを階層型クラスタリング手法によりグループ化した。ECA1 と ECA2 のクラスタ数は、それぞれ 773 グループ、588 グループであった。ECA1 と ECA2 のクラスタリング結果のうち、トータルのイベント発生数が最も多いトップ 10 グループを表 3.4 および表 3.5 に示す。

表 3.4 ECA1 による Top10 グループ結果

Group No.	Number of events			Number of event type	
	Total	Alarm	Operation	Alarm	Operation
1	2,983	212	2,771	5	10
2	2,380	2,380	0	3	0
3	1,795	938	857	1	2
4	1,266	0	1,266	0	7
5	1,193	1,193	0	1	0
6	1,171	61	1,110	1	5
7	1,061	0	1,161	0	5
8	1,003	0	1,003	0	4
9	994	63	831	3	6
10	925	194	731	3	4
<b>Total</b>	14,771	5,041	9,730	17	43

表 3.5 ECA2 による Top10 グループ結果

Group No.	Number of events			Number of event type	
	Total	Alarm	Operation	Alarm	Operation
1	2,983	212	2,771	5	10
2	2,377	2,377	0	2	0
3	1,795	938	857	1	2
4	1,693	25	1,668	1	6
5	1,585	1,585	0	2	0
6	1,507	241	1,266	4	7
7	1,290	0	1,290	0	8
8	1,243	0	1,243	0	6
9	1,214	32	1,182	2	8
10	1,049	118	931	4	6
<b>Total</b>	16,736	5,528	11,208	21	53

ECA1 および ECA2 のトップ 10 グループに含まれるイベントの総発生回数は、それぞれ 14781 および 16736 であり、ECA2 のトップ 10 グループに含まれるイベントの総発生回数は ECA1 に比べて 13.2% 多い。これは、トップ 10 までのグループに含まれるイベントをすべて削減できれば、ECA2 は ECA1 に比べてより多くのイベントを削減できることを意味する。ECA2 のトップ 10 グループに含まれるすべてのイベントを削減することができれば、プラント全体で発生したイベントを 32.4%減らすことができる。

各グループに含まれるイベント番号とイベントに対応する機器番号を表 3.6 および表 4.7 に示す。表中の機器番号は表 3.1 の機器番号に対応する。イベント番号 1～914 はアラームイベントに、イベント番号 915～1771 は操作イベントに対応する。トップ 10 のグループには、分解炉（H1～H8）に関連するアラームイベントおよび操作イベントが多数含まれている。

ECA1 と ECA2 のグループで構成するイベント種類が重複するものがある。ECA2 のグループと構成するイベント種類が類似する。たとえば、トップ 3 グループに含まれるイベントは ECA1 も ECA2 のいずれもそれぞれ V2, U1, V1 に関連するイベント群であった。ECA2 の各グループを構成するイベント種類と重複するイベントを含む ECA1 のグループ番号を表 3.7 に示した。ECA2 の 9 番目のグループのみ、ECA1 のトップ 10 グループに構成するイベント種類が共通するグループはなかった。ECA2 と ECA1 の類似するグループ同士を比較し、ECA2 のグループのみに存在するイベントにアンダーラインを付与した。これらは、タイムウィンドウ幅を自動調整することで、類似度の評価が向上したイベント群であると考えられる。

表 3.6 ECA1 による Top10 グループ内イベント

No.	Event No. (Unit No.)
1	71(V1), 277(V2), 282(V2), 283(V2), 388(V1), 1001(V1), 1004(V2), 1011(V2), 1012(V2), 1015(V2), 1283(V2), 1288(V2), 1289(V2), 1290(V2), 1387(V2)
2	350(H2), 450(U1), 451(U1)
3	278(V2), 1284(V2), 1286(V2)
4	994(H8), 995(H8), 996(H8), 997(H8), 1380(H8), 1558(H8), 1703(H8)
5	128(V1)
6	288(V10), 969(H6), 971(H6), 1296(V10), 1375(H6), 1695(H6)
7	1747(H3), 1750(H4), 1754(H5), 1760(H6), 1763(H7)
8	1032(V6), 1033(V6), 1034(V6), 1088(V8)
9	234(G1), 678(G1), 681(G1), 999(G1), 1186(G1), 1187(G1), 1188(G1), 1219(G1), 1231(G1)
10	147(H3), 150(H4), 154(H6), 1084(H7), 1085(H4), 1680(H7), 1685(H3)

表 3.7 ECA2 による Top10 グループ内イベント

No.	Event No. (Unit No.)	ECA1
1	71(V1), 277(V2), 282(V2), 283(V2), 388(V1), 1001(V1), 1004(V2), 1011(V2), 1012(V2), 1015(V2), 1283(V2), 1288(V2), 1289(V2), 1290(V2), 1387(V2)	1
2	450(U1), 451(U1)	2
3	278(V2), 1284(V2), 1286(V2)	3
4	<u>549(H5)</u> , 969(H6), 971(H6), <u>1371(H5)</u> , 1375(H6), <u>1533(H5)</u> , 1695(H6)	6
5	128(V1), <u>893(V5)</u>	5
6	147(H3), 150(H4), <u>152(H6)</u> , 154(H6), 1084(H7), 1085(H4), <u>1089(H5)</u> , <u>1092(H6)</u> , <u>1095(H7)</u> , 1680(H3), 1685(H4)	10
7	994(H8), 995(H8), 996(H8), 997(H8), <u>1279(H8)</u> , 1380(H8), 1558(H8), 1703(H8)	4
8	<u>1743(H1)</u> , 1474(H3), 1750(H4), 1754(H5), 1760(H6), 1763(H7)	7
9	204(H4), 535(H4), 946(H4), 947(H4), 948(H4), 949(H4), 1106(H1), 1367(H4), 1369(H4), 1524(H3)	None
10	234(G1), 678(G1), <u>680(G1)</u> , 681(D1), 999(G1), 1186(G1), 1187(G1), 1188(G1), 1219(G1), 1231(G1)	9

表 3.6 と表 3.7 を比較すると、ECA1 と ECA2 のグループで構成するイベントが共通するものがあることがわかる。たとえば、ECA1 と ECA2 のトップ 3 グループは、V2, U1, V1 に関連するイベント群を共通に含む。そこで、ECA2 の各グループを構成するイベント種類と共通するイベントを含む ECA1 のグループ番号を表 3.7 の右カラムに示した。ECA2 の 9 番目のグループのみ、ECA1 のトップ 10 グループに構成するイベント種類が共通するグループはなかった。ECA2 と ECA1 の類似するグループ同士を比較し、ECA2 のグループのみに存在するイベントにアンダーラインを付与した。これらのイベントは、タイムウィンドウ幅を自動調整することで、類似度の評価が向上し、新たにグループに加わったイベント群であると推測される。

ECA1 および ECA2 のトップ 10 グループの Alarm similarity color map を図 3.7 および図 3.8 に示す。イベントの並びは ECA2 のグループごとにイベント番号の小さい順にソーティングした。二つのグラフを比較すると、ECA2 により大幅に類似度が向上したイベントの組み合わせが複数存在することがわかる。たとえば、グループ 4 のイベント 549, グループ 6 のイベント 152, グループ 10 のイベント 680 は、同じグループの他のイベントとの類似度が ECA1 の評価結果にくらべて向上している。また、これらのイベントは ECA1 のグループに含まれていない。そこで、これらのイベントと ECA2 によって類似度が向上した同一グループのイベントとの相互相関値の計算結果を図 3.9～図 3.11 に示す。グラフからわかるように、いずれのイベントの組み合わせについても、あるタイムラグでの同時発生回数が多いものの、相互相関値の分散が大きい。したがって、ECA1 ではこれらのイベント間の類似度が低く評価されたと考えられる。これらのイベント群は分解炉のイベントであったり、同じ機器に関連していたり、本来物理的に関係が強い。ECA2 は、このようなイベント間の類似度を高く評価できていることから、タイムウィンドウ幅を自動調整する ECA2 が実プラントの運転ログデータに対して有効であることが確認できた。

一方で、ECA1 のトップ 10 グループに含まれるいくつかのイベントには、ECA2 のトップ 10 グループに含まれないものがあつた。具体的には、ECA1 のグループ 2

の 350(H2), グループ 6 の 288(V10)や 1296(V10)である. これは, ECA2 によりイベント間の類似度の評価値が変化し, 結果としてグルーピング結果が影響を受けたためであると考えられる.

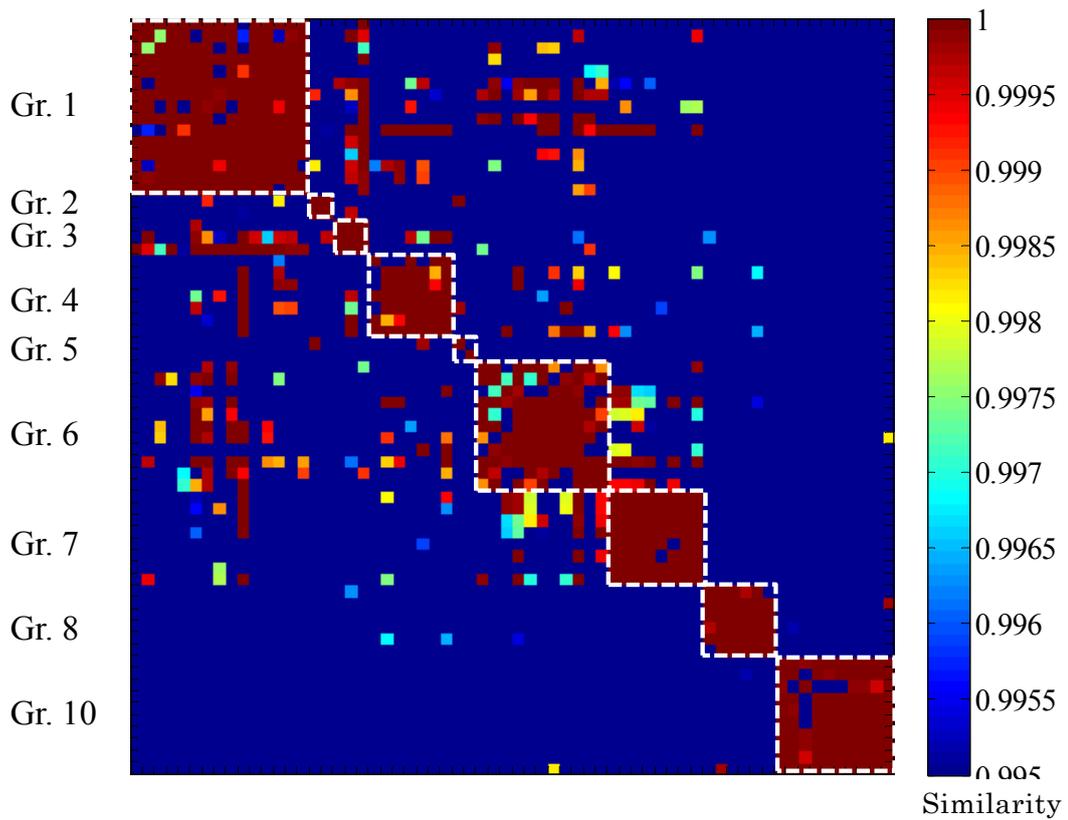


図 3.7 ECA1 によるアラーム類似性評価結果

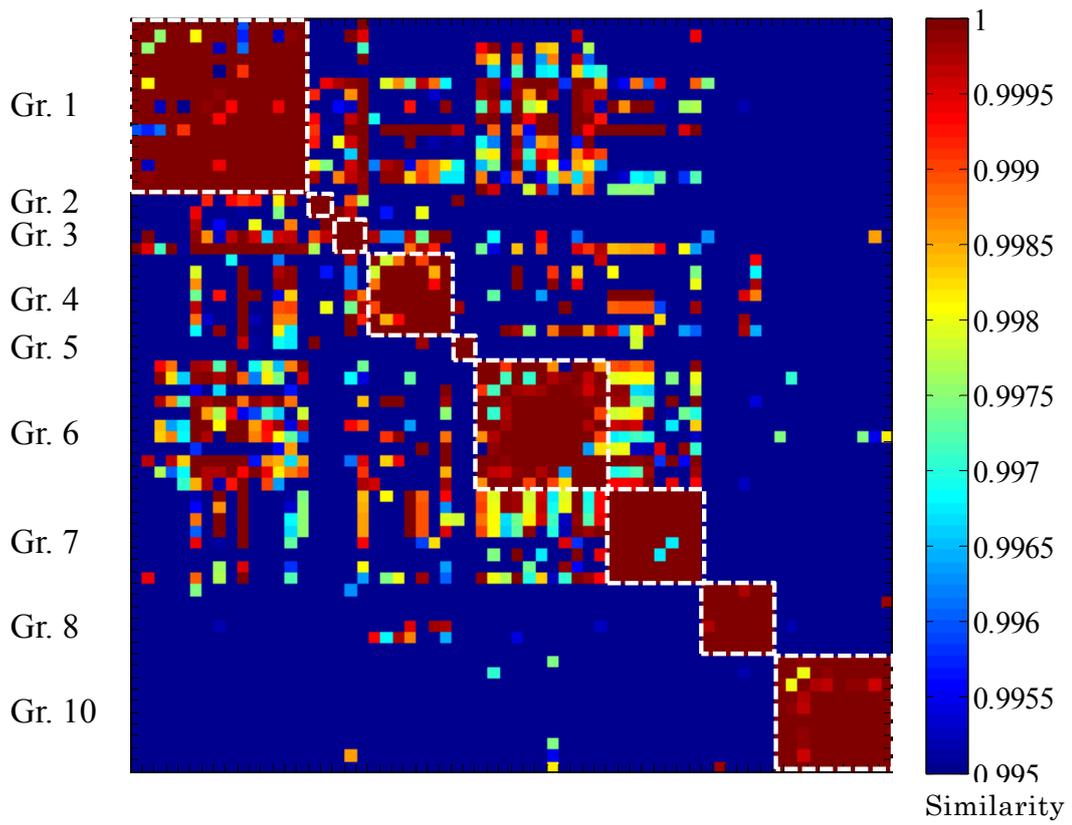


図 3.8 ECA2 によるアラーム類似性評価結果

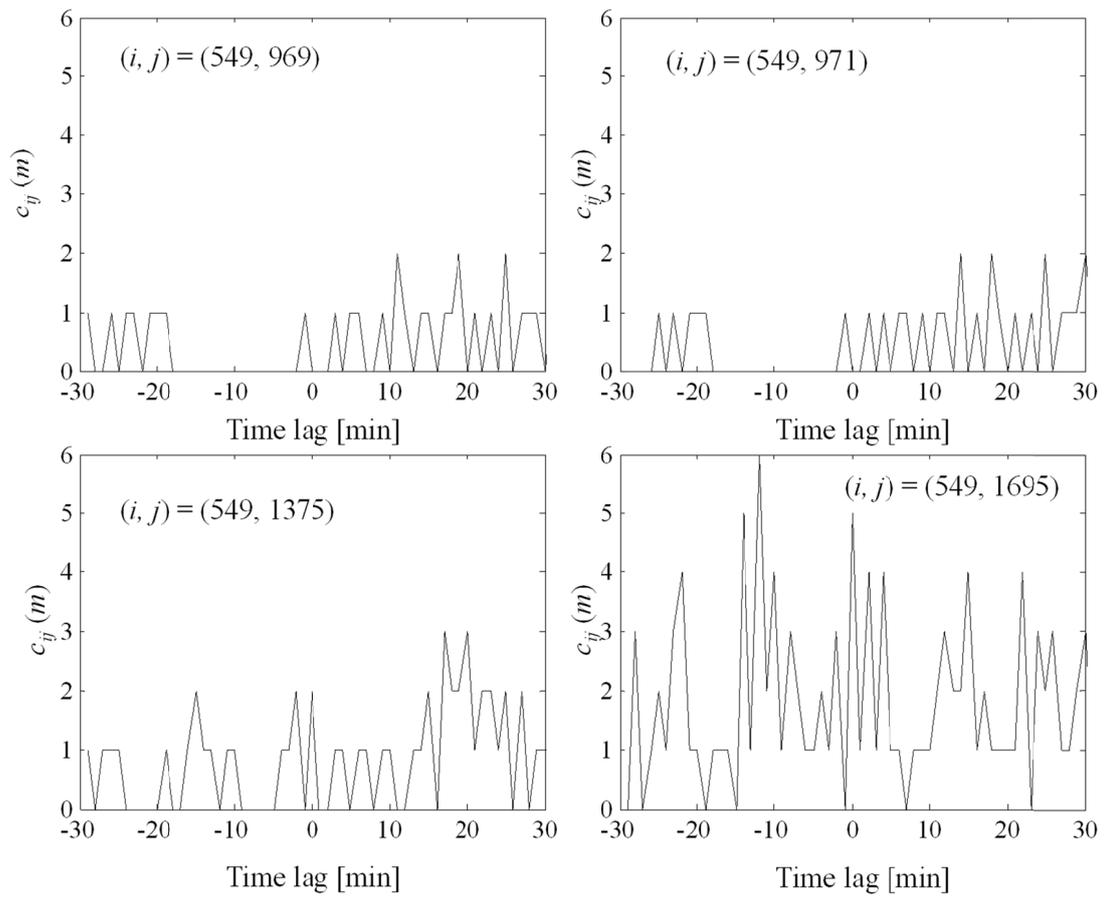


図 3.9 グループ 4 内のイベント 549 と他のイベントとの相関値

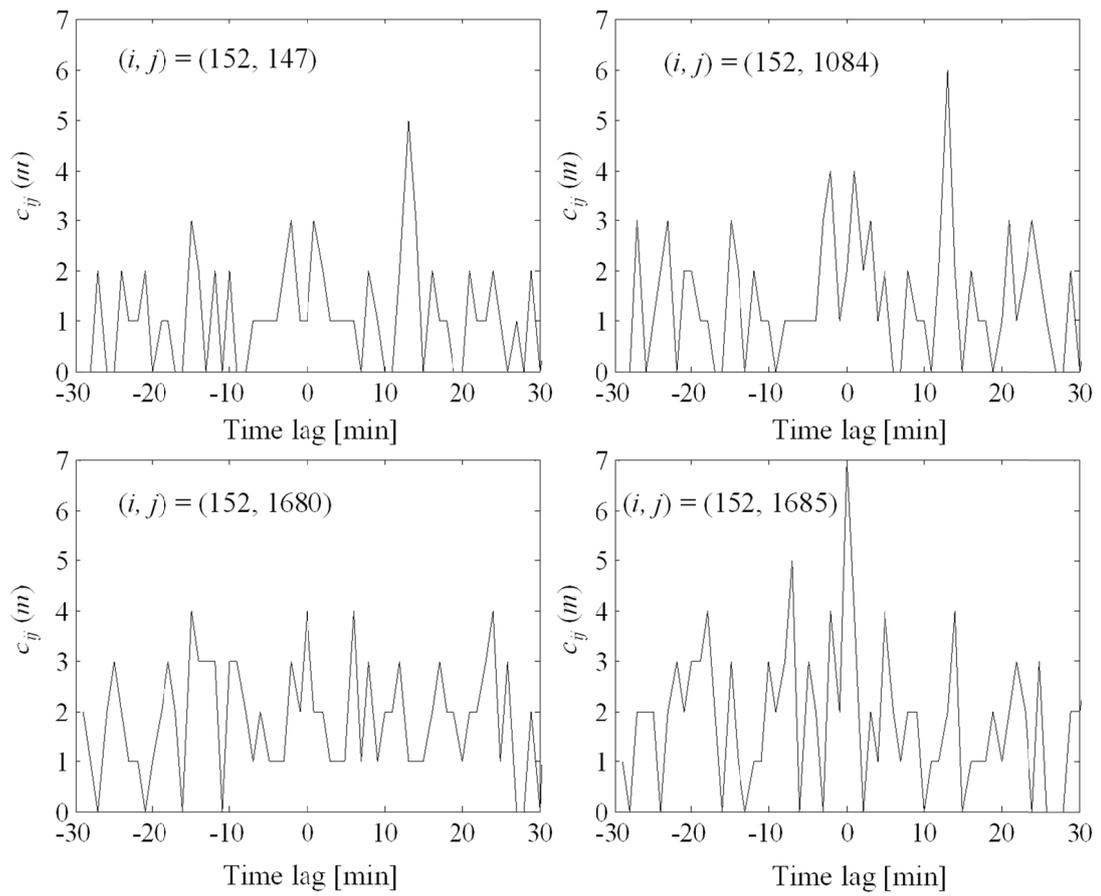


図 3.10 グループ 6 内のイベント 152 と他のイベントとの相関値

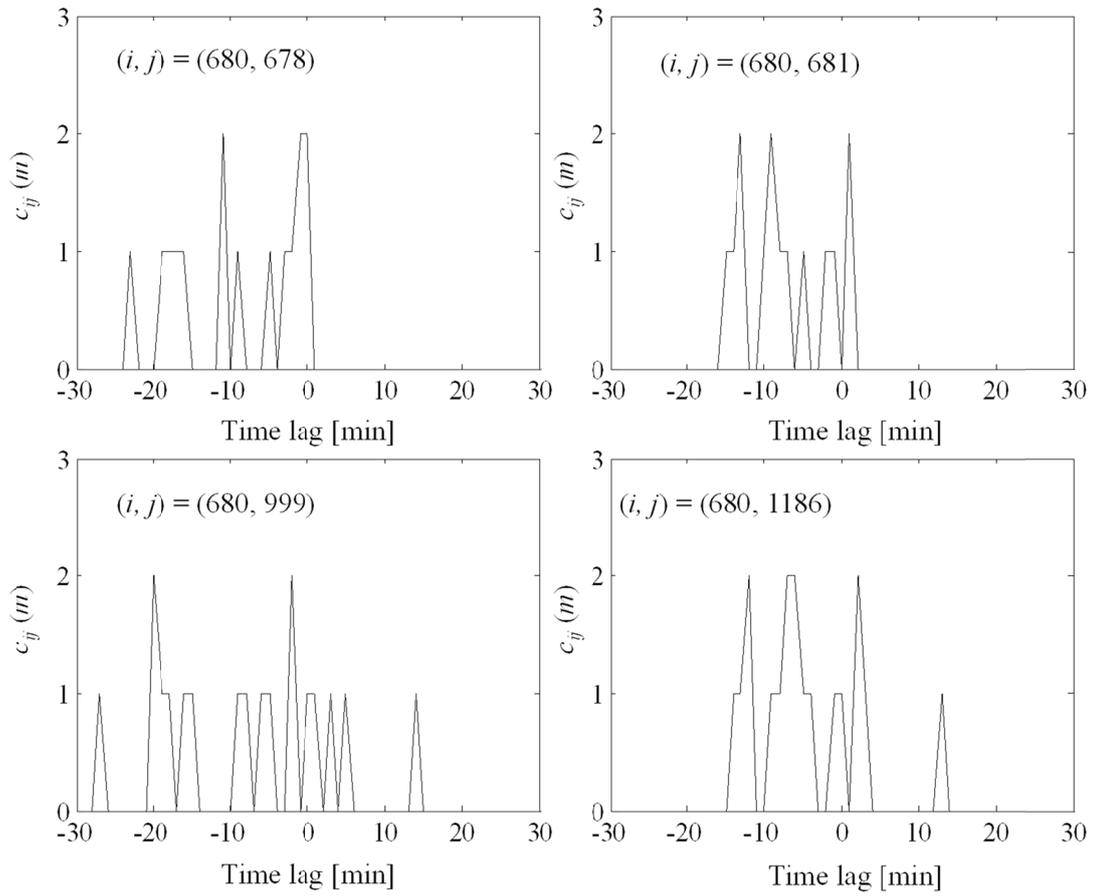


図 3.11 グループ 10 内のイベント 680 と他のイベントとの相関値

### 3.3.4 グループの分析結果

表 3.7 の各グループに含まれるイベント群の種類に基づき、迷惑アラームおよび定型操作を分類した結果を表 3.8 に示す。最上位のグループ 1 には複数のアラームイベントが含まれていることから、グループ 1 に含まれるアラームイベントは連鎖アラームであると考えられる。同様に他のグループも分析した結果、グループ 5 を除きいずれも迷惑アラームもしくは定型操作であることがわかった。これらの解析結果は、迷惑アラームの削減や定型操作の自動化を検討するために役立つ。

表 3.8 ECA2 による Top10 グループ解析

No.	Type	Relate units
1	Redundant alarms, Repeating operations	V1, V2
2	Unnecessary alarms	U1
3	Repeating operations	V2
4	Repeating operations	H5, H6
5	Unable to classify	V1, V5
6	Repeating operations	H3, H4, H5, H6, H7
7	Repeating operations	H8
8	Repeating operations	H1, H3, H4, H5, H6, H7
9	Repeating operations	H1, H3, H4
10	Redundant alarms, Repeating operations	G1, D1

### 3.4 まとめ

イベント間のタイムラグの分散が大きい場合にもイベント間の類似性を正しく判定できるイベント相関解析法 (ECA2) を、大規模化学プラントの代表であるエチレンプラントの運転ログデータに適用した。その結果、従来のイベント相関解析法 (ECA1) では類似度を低く推定していたタイムラグの分散が大きいイベント間の類似度を、ウィンドウ幅を調整する ECA2 により正しく評価できることを確認した。また、類似度の評価結果に基づきグループ化されたイベント群を詳しく分析した結果、意味のあるグルーピングであることがわかった。

ECA1 では、バイナリ変換時のタイムウィンドウ幅を試行錯誤的に調整しなければならず、実プラントに適用する際の課題となっていた。本論文では、タイムウィンドウ幅を自動調整する ECA2 の有効性を実プラントの運転データを用いて実証した。ECA2 は、エンジニアがタイムウィンドウ幅を試行錯誤的に調整する必要がない。今後、様々な化学プラントへの適用が進み、プラントオペレーションの改善に役立つことが期待される。

## 第4章 イベント相関解析によるプラントアラームシステムの性能評価

### 4.1 はじめに

プラントアラームシステムは、化学プラントの安全を守るための最も基本的な仕組みである図 1.2 に示す独立防護層 (AIChE/CCPS, 1993) の第二, 第三防護層において, オペレータによるプラント異常の早期検知と, 適切な対応操作を支援するための重要なシステムである。プラントアラームシステムは, プラントの監視変数が安全や品質, 環境などの監視目的に応じて定められた管理範囲を逸脱したとき, 警報によりオペレータに注意を喚起し, プラントを正常状態に戻すための対応操作を求める。オペレータは, 発生したアラーム情報に基づきどのような対応操作を取るか判断する。このように独立防護層の中で, 唯一人間のリアルタイムな認知情報処理能力に依存するのが, 第二, 第三防護層の特徴である。

プラント監視制御システムの急速な高性能化は, 低コストで大量の監視変数にアラームを設定できる環境を運転現場にもたらした。しかし, 個々のアラームの必要性や管理範囲の妥当性が十分精査されないままアラームシステムが設計されている運転現場も多く, 一つのマルファンクションから連鎖的に多数のアラームが発生する連鎖アラームや周期的に発生する繰返しアラームなどの迷惑アラームの主要因となっている (Takai, 2007)。欧米では, 1970 年~1980 年代に不適切なアラームシステムを要因とするプラント事故の多発を機に, アラームマネジメントの重要性が強く認識されはじめ (Nimmo, 2002, Alford, 2005), 化学プラントの設計から運転, 保全に至るプラントライフサイクルのすべての段階において, 厳密なリスクアセスメントが実施されるようになった。米国の Occupational Safety & Health Administration (OSHA, 1992) は, 米国連邦法 29CFR Part 1910.119 Process Safety Management を制定し, プラントが正常状態から逸脱したときの緊急対応を目的としたプロセス安全情報や作業標準, 教育訓練などの 14 項目についてプロセスハザード

解析を求めた。American National Standard Institute/International Society of Automation の 18.2-2009 (ISA, 2009) は、図 1.6 に示すアラームマネジメントのライフサイクル標準を定義し、アラームシステムが本来持つべき機能や目的を明確にし、標準化された設計法や管理法を通じて、オペレータに有意な情報を何らもたらさないアラームを徹底的に合理化することを求めている。特に、アラームシステムの運用開始後も、オペレーションデータからアラームシステムのパフォーマンスを継続的に監視し、設定値変更などの適正化を通じてアラームシステムを良好な状態に維持することを要求している。

アラームシステムの性能監視のための評価指標 (Key Performance Indicators: KPIs) として、単位時間あたりの平均アラーム発生数や最大アラーム発生数、未復帰の平均アラーム数、一時的にアラーム管理範囲を変更している棚上げアラーム数や発生アラームの優先度割合などが広く運転現場で用いられている。KPIs は、プラントで発生したアラームや操作などのイベントの種類と発生時刻を記録した運転ログデータから求められる。Hollifield and Habibi (2006)は、人間の情報処理能力の限界から、平均アラーム発生数のベンチマークを、短期的に 300 回/日、長期的に 150 回/日としている。KPIs を常時監視し、アラームシステムのパフォーマンスが低下すれば、アラームの管理範囲の変更などのシステムを適正化する。

国内の化学産業では、現場での TPM 活動を中心に KPIs に基づきプロセス改良、運転法の見直し、制御系の改善など日々の地道な改善の積み重ねを通じてアラーム発生数の削減を進めてきた結果、KPIs のベンチマークをはるかに超える超安定プラントも登場している。しかし、これらの KPIs によるアラームシステムの量的適正化は、いざプラント異常が発生したときに、オペレータがアラームシステムによって異常を早期に検出し、正しく診断できるかというアラームシステムの本質的な評価に基づく適正化になっていないという指摘がある。このような問題に対して、オペレータへのアンケート調査によるアラームシステムの主観評価法 (Bransby and

Jenkinson, 1998) も提案されているが、評価結果がオペレータの経験や知識によって左右されるという問題点がある。

Engineering Equipment & Material Users' Association (EEMUA) の Publication No. 191 (EEMUA, 2007) は、アラームの質的特性として表 1.2 の八つを定義している。Relevant (操作相関性) は、アラームに対して対応操作が定義されていること、Unique (一意性) は、同じ異常原因から複数のアラームが発生しないこと、Timely (適時性) は、アラームの発生タイミングが対応操作のタイミングに比べて早すぎたり遅すぎたりしないこと、Diagnostics (診断性) とは、発報アラームによってオペレータが異常原因を同定できることを意味する。しかし、これらの特性の具体的な評価法については言及していない。

Kimura *et al.* (2010) は、アラームの 8 特性の一つである診断性を、異常発生時のプラント運転ログデータから求めたアラームの有効率と再現率により評価する方法を提案した。本論文では、プラント運転ログデータのイベント相関解析により、アラームの操作相関性、一意性および適時性を評価する方法を提案する。提案する手法は、プラント運転ログデータさえあればよく、評価者の知識や経験に左右されることがなく、継続的なアラームシステムの性能監視に役立つと考えられる。

## 4.2 アラームシステムの性能評価法

### 4.2.1 操作相関性の評価法

EEMUA (2007) は、アラームシステム設計の基本理念として、個々のアラームに対して何らかの対応操作がアラームシステムの設計者によって必ず定義されていなければならないとし、このようなアラームシステムの性質を操作相関性 (Relevant) と定義している。しかし実際の化学プラントでは、アラームと対応操作が明確でないケースも多く、対応操作の必要のないアラームが多数発生している。たとえば、お知らせアラームは対応操作の必要のないアラームの代表例である。

膨大なプラント運転ログデータからデータ解析手法により対応操作のないアラームイベントを抽出し、アラームシステム全体の操作相関性を評価することができれば、不要なアラームの削減に役立つ。そこで、運転ログデータに含まれるアラームイベントに対応する操作イベントを、イベント相関解析法 (ECA1) を用いて抽出し、アラームイベントに対する対応操作の有無からアラームシステムの操作相関性を定量的に評価する方法を以下に説明する。

- 1) プラント運転ログデータに含まれるアラームイベント  $i \in A$  とすべての操作イベント  $j \in O$  の発生系列間の類似度  $S_{ij}$  および相互相関値が最大となるときのタイムラグ  $m_{ij}^*$  をイベント相関解析法 (ECA1) により求める。  $A$  および  $O$  は、それぞれプラント運転ログデータに含まれるアラームイベントの集合および操作イベントの集合である。
- 2) アラームイベント  $i$  と操作イベント  $j$  の相関関係の有無を(4-1)式により判定する。変数  $z$  は、アラームイベント  $i$  と操作イベント  $j$  の間に相関関係が存在するとき  $z_{ij} = 1$ 、ないとき  $z_{ij} = 0$  となる。

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } S_{ij} \geq S_{\min} \wedge m_{ij}^* \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (i \in A, j \in O) \quad (4-1)$$

ここで、 $S_{\min}$  は二つのイベント間の類似性を判定するための閾値である。(4-1)式の  $m_{ij}^* \geq 0$  なる条件は、操作イベント  $j$  がアラームイベント  $i$  の発生後もしくは同時に発生することを意味する。これは、操作イベントは、対応するアラームイベントよりも先に発生することはないためである。

- 3) アラームシステム全体の操作相関性の評価指標  $R$  を、(4-2)式により求める。ここで、 $N_{\text{alm}}$  はプラント運転ログデータに含まれるアラームイベントの種類の総数である。

$$R = \frac{\sum_{i \in A} \left( \min \left\{ 1, \sum_{j \in O} z_{ij} \right\} \right)}{N_{\text{alm}}} \quad (4-2)$$

操作相関性の指標  $R$  は 0~1 の間の値を取り、値が大きなアラームシステムほどアラームと操作イベントの対応関係が取れている操作相関性の高いアラームシステムであるといえる。

#### 4.2.2 一意性の評価法

一意性 (Unique) とは、一つの異常に対して複数のアラームイベントが連鎖的に発生しないことを意味する。一つの異常に対してアラームは一つだけ発生すればよく、ファーストアラームに共連れして発生する連鎖アラームは、オペレータに新たな情報を与えないばかりか、アラームの確認操作という余分な負担をオペレータにもたらし。そこで、プラント運転ログデータから、イベント相関解析(ECA1)により連鎖アラームを抽出し、プラントアラームシステムの一意性を評価する方法を以下に示す。

- 1) 運転ログデータに含まれるすべての二つのイベントの発生系列間の類似度  $S_{ij}$  をイベント相関解析法により求める。
- 2) 類似度  $S_{ij}$  に基づきイベントを階層的クラスタリング手法によりグルーピングする (Miyamoto, 1999) 。 イベント間の距離は(4-3)式の非類似度  $D_{ij}$  により定義す

る。また、クラスタ間の距離には二つのクラスタにおけるすべてのオブジェクトの組間の平均距離を用いる。

$$D_{ij} = 1 - S_{ij} \quad (4-3)$$

- 3) 同一グループ内に複数のアラームイベントが含まれているとき、それらのアラームイベントは連鎖アラームであると考えられる。グループ内のアラーム数が多いほど、連鎖アラームが多量に発生している。そこで、アラームイベント  $i$  の一意性  $u_i$  を(4-4)式により評価する。

$$u_i = \frac{1}{N_{\text{alm},g}} \quad (g = \{g | i \in A_g\}) \quad (4-4)$$

ここで、 $N_{\text{alm},g}$  はイベント  $i$  が含まれるグループ  $g$  に含まれるアラームイベントの種類の数である。

- 4) アラームシステム全体の一意性の評価指標  $U$  を(4-5)式により求める。

$$U = \frac{\sum_{i \in A} u_i}{N_{\text{alm}}} \quad (4-5)$$

操作相関性の指標  $U$  は 0~1 の間の値を取り、値が大きなアラームシステムほど一意性に優れる。一意性の低いアラームシステムはオペレータへの負担が大きく、アラームの設定値を見直すなどして連鎖アラームを削減する必要がある。

### 4.2.3 適時性の評価法

アラームは、オペレータが対応操作を行うための時間余裕を考慮して発報させなければならない。アラームの発生タイミングが対応操作の余裕時間に対して遅すぎると、オペレータはアラームが発報しても対応操作を取ることができず、結果として意味のないアラームとなってしまう。

プラント状態が管理範囲を逸脱してから、プラント状態を管理範囲内に戻すための対応操作イベント  $j$  までの許容時間を  $\Delta t_{Cj}$  とする。許容時間  $\Delta t_{Cj}$  は、すべての操作

イベント  $j$  についてオペレータの対応操作に必要な標準的な時間を考慮してあらかじめ定められているとする。このとき、個々のアラームが対応操作に対してタイミリーに発生しているか、プラント運転ログデータから評価する方法を以下に示す。

- 1) イベント相関解析法(ECA1)により運転ログデータに含まれるすべてのイベントを類似度に基づきグルーピングする。
- 2) グループ内にアラームイベントと操作イベントの両方を含むグループの集合を  $G$  とする。操作イベント  $j \in O_g$  と同一グループ  $g$  に含まれるアラームイベント  $i \in A_g$  の適時性  $e_{ij}$  を(4-6)式により評価する。

$$e_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } |m_{ij}^* - \Delta t_{Cj}| > \Delta t_{Cj} \\ 1 - \frac{|m_{ij} - \Delta t_{Cj}|}{\Delta t_{Cj}} & \text{if } |m_{ij}^* - \Delta t_{Cj}| \leq \Delta t_{Cj} \end{cases} \quad (4-6)$$

$$(i \in A_g, j \in O_g, g \in G)$$

$e_{ij}$  は、 $m_{ij}^*$  が  $\Delta t_{Cj}$  に近いほど大きくなり、 $\Delta t_{Cj}$  との差が大きくなるにしたがって小さくなる。これは、標準的な対応操作時間に対して、アラームの発生タイミングが対応操作に対して速すぎても、遅すぎても望ましくないためである。

- 3) アラームシステムの適時性の指標  $E$  を(4-7)式により評価する。ここで、 $N'_{\text{alm}}$  は、アラームイベントと操作イベントの両方を含むグループ中のアラームイベント種類の合計である。

$$E = \frac{\sum_{g \in G} \left( \sum_{i \in A_g, j \in O_g} e_{ij} \right)}{N'_{\text{alm}}} \quad (4-7)$$

適時性の評価指標  $E$  は 0~1 の値を取り、値が大きいアラームシステムほど適時性に優れる。

### 4.3 ケーススタディ

提案する評価手法を，共沸蒸留プロセスのプラント運転ログデータ（Kurata *et al.*, 2011）に適用した．

#### 4.3.1 共沸蒸留プロセスの運転ログデータ

連続共沸蒸留プロセスのプロセスフローを図 4.1 に示す．この蒸留塔は，アセトンをエントレナーとして，ベンゼンとシクロヘキサンの混合物からベンゼンを分離する．共沸蒸留プロセスのマルフアンクションには，冷却水量の低下，リボイラスチーム圧の低下，還流量バルブの固着の三種類がある．

プラントには，図中の丸印で表す 9 個の監視変数がある．監視変数が，アラーム管理範囲の上限値（PH），下限値（PL）を逸脱したときアラームイベントが発生する．また，冷却水量の低下，リボイラスチーム圧の低下，還流量バルブの固着に対応する操作イベントは，それぞれコンデンサの冷却水バルブ操作，リボイラのスチーム流量操作バルブ，還流バルブで，操作イベントの標準的な対応操作時間  $\Delta t_{Cj}$  はすべて 120 秒であるとする．プラントで発生するアラームイベントおよび操作イベントを表 4.1 に示す．

15 日間分の 1 秒単位のプラント運転ログデータにイベント相関解析法を適用した．各イベントの 15 日間の総発生回数を表 4.1 に示す．アラームイベント 1, 2, 10, 11 は発生回数が多く，従来の KPIs では適正化の対象となるが，それ以外のアラームイベントは発生回数が少なく，適正化の対象とならない可能性がある．

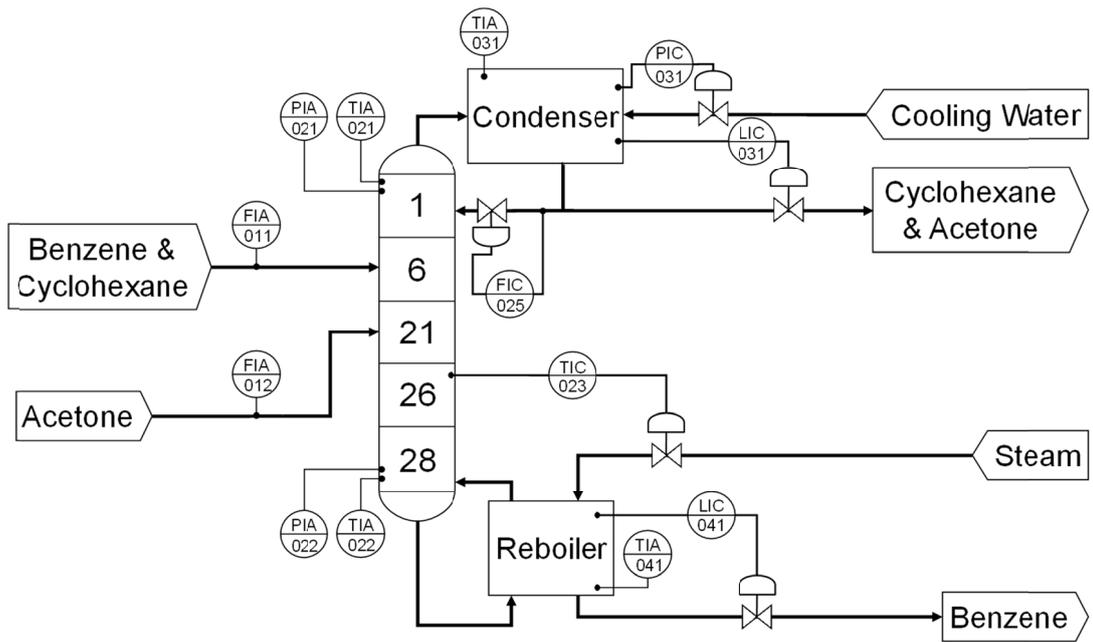


図 4.1 連続共沸蒸留プロセスのプロセスフロー

表 4.1 アラームおよびオペレーションタイプ別発生イベントリスト

Event No.	Descriptions	Types of events	Number of events
1	PH alarm of acetone flow rate (FIA012)	Alarm	1907
2	PH alarm of feed flow rate (FIA011)	Alarm	2349
3	PH alarm of top column temp. (TIA021)	Alarm	14
4	PH alarm of bottom column temp. (TIA022)	Alarm	19
5	PH alarm of reboiler temp. (TIA041)	Alarm	18
6	PH alarm of condenser temp. (TIA031)	Alarm	14
7	PH alarm of top column press. (PIA021)	Alarm	25
8	PH alarm of bottom column press. (PIA031)	Alarm	24
9	PH alarm of reflux flow rate (FIC025)	Alarm	0
10	PL alarm of acetone flow rate (FIA012)	Alarm	1851
11	PL alarm of feed flow rate (FIA011)	Alarm	2921
12	PL alarm of top column temp. (TIA021)	Alarm	23
13	PL alarm of bottom column temp. (TIA022)	Alarm	34
14	PL alarm of reboiler temp. (TIA041)	Alarm	37
15	PL alarm of condenser temp. (TIA031)	Alarm	25
16	PL alarm of top column press. (PIA021)	Alarm	36
17	PL alarm of bottom column press. (PIA031)	Alarm	35
18	PL alarm of reflux flow rate (FIC025)	Alarm	4
19	Manipulation of coolant valve of condenser	Operation	4
20	Manipulation of steam valve of reboiler	Operation	5
21	Manipulation of reflux valve	Operation	4

### 4.3.2 イベント相関解析の結果

共沸蒸留プロセスにイベント相関解析を適用した結果を表 4.2 に示す。アラームイベント 9 は、1 ヶ月間に発生しなかったため、解析の対象外である。表中には、アラームイベントと操作イベント間の発生系列間の類似度  $S_{ij}$  および相関関数が最大値を取るときのタイムラグ  $m^*_{ij}$  を示した。類似度に基づきイベント群をグルーピングした結果、アラームイベントは  $g=1\sim 9$  の九つのグループに分類された。操作イベント 19~21 は、それぞれグループ 3, 8, 9 に分類された。

表 4.2 イベント相関解析の結果

グループ No. $g$	アラーム No. $i$	$S_{i19}$	$S_{i20}$	$S_{i21}$	$m^*_{i19}$	$m^*_{i20}$	$m^*_{i21}$
1	1	0.0	0.0	0.0	-	-	-
2	2	0.0	0.0	0.0	-	-	-
3	3	1.0	0.0	0.0	116	-	-
	4	1.0	0.0	0.0	-32	-	-
	5	1.0	0.0	0.0	64	-	-
	6	1.0	0.0	0.0	115	-	-
	7	1.0	0.0	0.0	140	-	-
	8	1.0	0.0	0.0	106	-	-
6	10	0.0	0.0	0.0	-	-	-
7	11	0.0	0.0	0.0	-	-	-
8	12	0.0	1.0	0.0	-	34	-
	13	0.0	1.0	0.0	-	69	-
	14	0.0	1.0	0.0	-	43	-
	15	0.0	1.0	0.0	-	33	-
	16	0.0	1.0	0.0	-	64	-
	17	0.0	1.0	0.0	-	88	-
9	18	0.0	0.0	0.996	-	-	168

\* Unit of time lag is sec

### 4.3.3 操作相関性の評価結果

表 4.2 より，アラームイベント 3, 4, 5, 6, 7, 8 と操作イベント 19（冷却水バルブ操作），アラームイベント 12, 13, 14, 15, 16, 17 と操作イベント 20（スチームバルブ操作），アラームイベント 18 と操作イベント 21（還流バルブ操作）の間に操作相関性が確認できた．アラームイベント 4 と操作イベント 19 間の類似度が高いが，タイムラグが負値であるため両者の間に操作相関性はない．アラームイベント 1, 2, 10, 11 には対応する操作イベントが検出されなかった．プラント運転ログデータに含まれるアラーム種類の総数 17 のうち，対応操作との相関が検出されたのは 12 種類であるから，対象とするアラームシステムの操作相関性は  $R = 0.71$  となった．

対応操作のないアラームは，オペレータにとって不要なアラームである．特にアラームイベント 1, 2 の発生回数は 1907, 2349 回と非常に多い．これらのアラームの必要性について再検討し，アラームシステムを適正化することで，アラームシステムの操作相関性を改善することができる．

### 4.3.4 一意性の評価結果

表 4.2 のグルーピング結果から，アラームイベント 1~18 の一意性  $u_i$  を計算した結果を表 4.3 に示す．グループ 3 およびグループ 8 には多数のアラームイベントが含まれているため，それらのアラームイベントの一意性は低かった．アラームシステム全体での一意性  $U$  は 0.41 であった．一意性の低いアラームシステムでは，多数の連鎖アラームが発生しオペレータの負担となるため，アラーム変数の見直しが必要である．

表 4.3 個々のアラームイベントの一意性評価結果

$i$	1	2	3	4	5	6
$u_i$	1.0	1.0	0.17	0.17	0.17	0.17
$i$	7	8	10	11	12	13
$u_i$	0.17	0.17	1.0	1.0	0.17	0.17
$i$	14	15	16	17	18	
$u_i$	0.17	0.17	0.17	0.17	1.0	

#### 4.3.5 適時性の評価結果

アラームイベントの適時性の評価結果を図 4.2 に示す。操作イベントとの操作相関性が検出されなかったアラームイベントは評価の対象外である。適時性の評価が最も低かったのは、アラームイベント 4 (塔底部温度 PH アラーム) であった。これは、アラームイベント 4 が、対応する操作イベント 19 (冷却水バルブ操作) の後に発生し、オペレータに何ら情報を与えていないためである。アラームイベント 12～16 の適時性も全体的に低い。これはアラームイベント発生から対応操作イベント 20 (スチームバルブ操作) までのタイムラグが 30～88 秒で、操作イベント 20 の標準的な余裕時間である 120 秒よりも短いためである。アラームシステム全体の適時性の評価結果は(4-7)式より  $E = 0.58$  であった。適時性の低いアラームイベントについては、設定値を見直すことでオペレータに対応操作のための十分な時間的な余裕時間を与えるようにする必要がある。

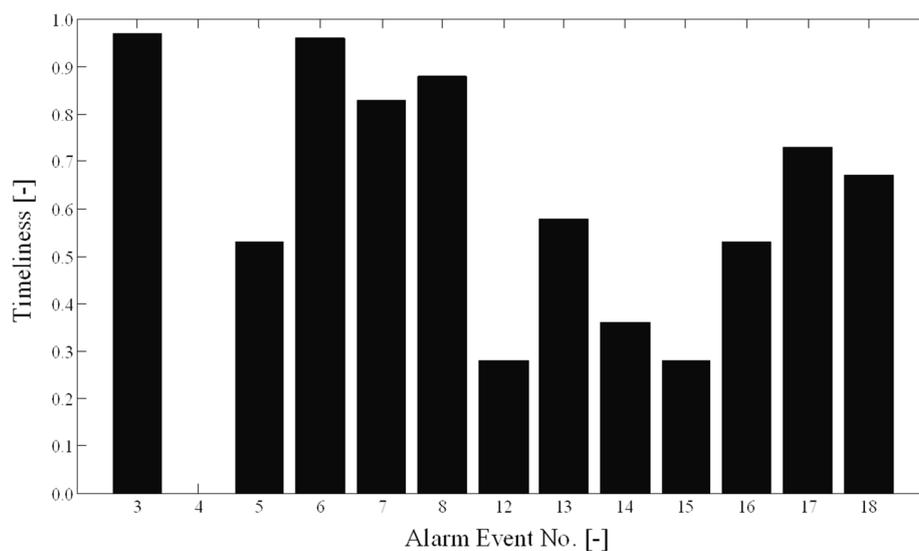


図 4.2 個々のアラームイベントの一貫性評価結果

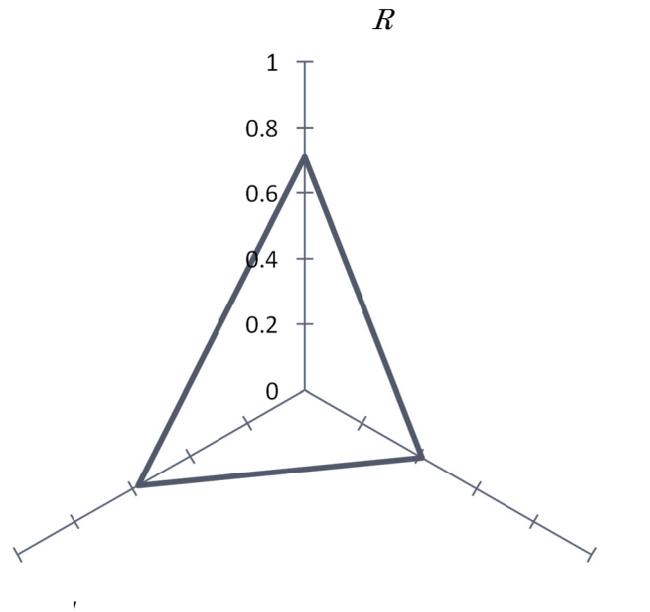


図 4.3 総合評価結果

#### 4.3.6 総合評価結果

操作相関性，一意性および適時性の評価結果を図 4.3 に示す．対象としたアラームシステムの一意性は，他の指標に比べて相対的に低く，このアラームシステムの場合，一意性の向上に向けた改善から着手することがオペレータにとってバランスの良いアラームシステムとなると考えられる．一意性が低い原因は，このプラントで連鎖アラームが多発しているためであり，連鎖アラームの削減のために個々のアラームの必要性について再検討すべきである．また，二番目に評価の低い適時性を改善するためには，アラームの管理範囲を見直す必要がある．適切なアラーム管理範囲の決定法として，Receiver Operating Characteristics Curve (Kondaveeti *et al.*, 2009, Izadi *et al.*, 2009) や SUDA 法 (See, Understand, Decide, and Act) (Rothenberg, 2009) などがある．

#### 4.4 まとめ

プラントアラームシステムの操作相関性、一意性、適時性を、プラント運転ログデータから定量的に評価する方法を提案した。提案法により、従来の KPIs では適正化の対象と判定されなかった発生頻度が少ないアラームイベントの問題点を、オペレータにとってのアラームシステムの有効性を示す操作相関性や一意性、適時性の観点から解析できるようになった。操作相関性、一意性や適時性などの質的評価指標は、従来の KPIs による量的適正化が進んだプラントのアラームシステムのさらなる質的適正化に有効である。提案する手法は、プラント運転ログデータさえあればよく、評価者の知識や経験に左右されない。本手法を用いて定期的な評価を実施し、アラームの利用者であるオペレータによって良いアラームシステムを構築、維持、管理を上で改善すべき点を見出すことへの活用を期待する。今後、様々な化学プラントへの適用が進み、プラントオペレーションの改善に役立つことが期待される。

## 第5章 オペレータアンケートによるプラントアラームシステムの性能評価

### 5.1 はじめに

プラントアラームシステムは、プラントの監視変数が安全や品質、環境などの監視目的に応じて定められた管理範囲を逸脱したとき、警報によりオペレータへ通知すると共に状況確認とその後の対応操作を促す。近年のプラント監視制御システムの急速な高性能化は、低コストで大量の監視変数にアラームを設定できる環境を運転現場にもたらした。しかし、個々のアラームの必要性や管理範囲の妥当性が十分検討されないままアラームシステムが設計されている運転現場も多く、一つのマルチファンクションから連鎖的に多数のアラームが発生する連鎖アラームなどの迷惑アラームの原因となっている (Nimmo, 2002, Alford, 2005, Takai, 2007)。

American National Standard Institute/International Society of Automation 18.2-2009 (ISA, 2009) は、アラームマネジメントのライフサイクルの中で、アラームシステムの性能を常時監視し、評価結果をアラームシステムの適正化に継続的にフィードバックすることを求めている。アラームシステムの性能監視のための評価指標 (Key Performance Indicators: KPIs) としては、単位時間あたりの平均アラーム発生数や最大アラーム発生数、一時的にアラーム管理範囲を変更している棚上げアラーム数や発生アラームの優先度割合などが広く運転現場で用いられている (Hollifield and Habibi, 2006)。しかし、これらの KPIs は、シグナルとしてのアラームに注目しているだけで、オペレータの状況認識や意志決定に役立つアラームであるかどうかについては考慮していない。KPIs に基づくアラームシステムの評価は、いざプラント異常が発生したときに、オペレータがアラームシステムによって異常を早期に検出し、正しく診断できるかというアラームシステムの本質的な評価にならないことが指摘されている (Nishiguchi and Takai, 2010)。

Bransby and Jenkinson (1998) は、アラームシステムの主観評価を目的に、オペレータを対象としたアンケートシートを開発した。このアンケートは Health and Safety Executive (HSE, UK) および Engineering Equipment & Material Users' Association (EEMUA) の Publication No.191 (EEMUA191, 2007) にて公開されており、アラームシステムがオペレータの状況認識や意志決定に役立っているかを調べるのに有効であると考えられる。設問は選択式および数値回答式、自由記述式の合計 27 問から構成される。しかし、個々の質問内容とアラームシステムが持つべき特性との関係が不明確であり、評価結果をアラームシステムの適正化にフィードバックしにくいという問題がある。また、アンケートを継続的に実施するためには、評価結果をエンジニアやオペレータが見やすく理解しやすい形で提示する必要がある。

本論文では、EEMUA191 が提唱する望ましいアラームの 8 特性の観点から、アラームシステムを主観評価するための新しいアンケートシートを提案する。アラームシステムを 8 特性の観点から評価することで、システムの問題点を明確にできる。

## 5.2 アラームシステムの 8 特性

EEMUA191 は、望ましいアラームの特性として表 1.2 の 8 特性を定義している。Relevant（操作相関性）は、アラーム発生時の対応操作が明確に定義されていること、Unique（一意性）は、一つの異常原因から複数のアラームが発生しないこと、Timely（適時性）は、アラームの発生タイミングがオペレータの対応操作のタイミングに比べて早すぎたり遅すぎたりしないことを意味する。Prioritized（優先度適性）は、アラームの重大性と対応操作の優先度がアラームに適切に設定されていること、Understandable（理解可能性）は、アラームの意味がオペレータにとって明確で理解しやすいこと、Diagnostic（診断性）は、オペレータにとってアラームがプラントの状態を理解し、異常原因を診断するのに役立っていること、Advisory（操作支援性）は、オペレータが取るべき対応操作が明確に示されていること、Focusing（注目性）は、アラームがオペレータにプラントで注目すべき重要な事項が発生していることに気づかせられることを意味する。

アラームシステムには、これらの 8 特性が高い次元で調和していることが求められる。しかし、EEMUA191 は、これらの特性を具体的にどのように評価するか言及していない。

### 5.3 オペレータアンケート

Bransby and Jenkinson(1998)のアンケートシートを参考に，EEMUA の 8 特性評価のためのアンケートシート全 19 設問を作成した(表 5.1)．以下にアンケートシートの開発工程を示す．

#### STEP.1 アラームシステム性能評価用設問の選定

Bransby and Jenkinson(1998)のアンケートシートは，回答者属性関連 2 問，アラームシステム全般 9 問，定常時のアラームシステム関連 10 問，トラブル時のアラームシステム関連 6 問の全 27 問で構成されている．回答方式は三択式，四択式，数値回答式，自由記述式と様々である．この中から，提案するアンケートシートには，全般，定常時，トラブル時に関する設問の内，三択，四択，数値回答式の 15 項目(表 2 の設問 1～12 と設問 15～17)を利用した．自由記述式の項目は，三択，四択，数値回答式の回答を補足する設問であるため，提案するアンケートシートには含めなかった．

#### STEP.2 各設問の 8 特性分類

工程(1)で選定した 15 項目の設問(表 5.2 の設問 1～12 と設問 15～17)と 8 特性の対応関係を表 5.3 に示す．設問 1, 2 はアラームシステム全般に関する設問であるため，すべての特性の評価に用いた．設問 3～12 と設問 15～17 は，表 5.1 の各設問解説に示すとおり，定常時またはトラブル時におけるアラームシステムの専門的な特徴を問うものであるため，それらの内容から適切な特性を割り当てた．

#### STEP.3 適時性評価用設問の追加

Bransby and Jenkinson(1998)のアンケートシートから選定した 15 設問は，アラームシステム全般について問う設問 1, 2 を除き，適時性を問う設問がない．そこで，適時性を評価する専門設問として，定常運転時に関する設問 13, 14 とトラブル時に関する設問 18, 19 を追加した．

#### STEP.4 回答方式の4段階化と採点方式

アンケート結果を定量的に集計するために、選択式項目は、すべて四択式かつ高評価側二択と低評価側二択とすることで評価結果の傾向が明確となるようにした。高評価側の選択肢には最高点の4点と3点、低評価側の選択肢には2点と最低点の1点を与えた。なお、数値回答式の設問4および5の配点区分は、EEMUA191のベンチマークやガイドラインを参考に決定した。

各特性の評価は、特性ごとに関連する設問の得点の平均点を計算し、平均点をその特性の評価値とした。平均点が4点に近いほど優れた特性を持つアラームシステムであるといえる。

#### STEP.5 アンケート結果の表現

アラームシステムの8特性による性能評価結果は、各特性を視点とする8角形のレーダーチャートで表現する。レーダーチャートは複数項目の値を同時に比較することができる。また各項目のバランスの善し悪しが一目でわかる。これにより、特性ごとの評価だけでなく、8特性間の相対的な評価を可能とする。

表 5.1 アンケートシートの設問内容

No.	設問	配点：回答
1	定常運転時にアラームシステムはどの程度役に立っていますか？ [解説] この設問では、定常運転時のアラームシステムの有用性に対するオペレータの全体的な印象を把握する。8特性すべての評価に用いることができる。	4: 大変良い 3: 良い 2: 悪い 1: 大変悪い
2	トラブル時、アラームシステムはどの程度役に立っていますか？ [解説] この設問では、トラブル時のアラームシステムの有用性に体するオペレータの全体的な印象を把握する。8特性すべての評価に用いることができる。	4: 大変良い 3: 良い 2: 悪い 1: 大変悪い

No.	設問	配点：回答
3	<p>あなたにとって現状のアラーム発生頻度をどう思いますか？</p> <p>[解説] この設問では、アラームが多いことが問題なのか、少ないことが問題なのか、アラーム発生頻度に対する問題点を把握する。アラームが操作を促すことでその数に関係なく有疑義とする傾向(操作相関性)やアラームが示す原因の特定(診断性)、およびそれらメッセージの理解しやすさ(理解可能性)の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 少ないが困らない 3: 多いが必要 2: 多すぎる 1: 少なすぎる</p>
4	<p>定常運転時のアラーム数は、オペレーター人当たり 1 時間に何回位ですか？</p> <p>[解説] この設問では、定常運転時のオペレータによるアラーム対応の負担を把握する。アラーム数の適性度はオペレータがそのアラームへ対応できているかを見ることができるか(操作相関性)を知ることができる。また、一つの事象に対してアラームが複数発生していないか(一意性)を知ることができる。</p>	<p>4: 6 回未満 3: 6～60 回未満 2: 60～600 回未満 1: 600 回以上</p>
5	<p>設問(4)のアラームの内、5 分以内に再発するアラームの割合はどの程度ですか？</p> <p>[解説] この設問では、繰り返し発生するアラームの割合を把握する。このようなアラームはチューニング不備に起因することが多く、そのためアラームの発生に対して都度、対応操作がとられないことがあるため、操作相関性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
6	<p>優先度が不適切に設定されているアラームの発生頻度はどの程度ですか？</p> <p>[解説] この設問では、優先度が不適切なアラームの発生頻度を把握する。よって優先度適性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
7	<p>シャットダウンしているプラントからのアラームの発生頻度はどの程度ですか？</p> <p>[解説] この設問では、シャットダウン中の不要なアラームの発生頻度を把握する。シャットダウン中のためこれらのアラームはオペレータによる対応操作を必要としないため、操作相関性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>

No.	設問	配点：回答
8	<p>同じ現象(原因)を示す複数のアラームが同時に発生する頻度はどの程度ですか？</p> <p>[解説] この設問では、連鎖アラームおよび重複アラームの発生頻度を把握する。これらのアラームは一意性を阻害するものであるため、一意性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
9	<p>定常時に役に立つアラームが、大規模なトラブル発生時に迷惑アラームとして発生する頻度はどの程度ですか？</p> <p>[解説] この設問では、トラブル発生時の迷惑アラームの発生頻度を把握する。このようなアラームは対応操作がとられないことがあるため、操作相関性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
10	<p>定常運転時、アラームメッセージはどの程度役立っていますか？</p> <p>[解説] この設問では、定常時のメッセージが、異常原因の診断や特定、対応すべき優先度および操作の支援について理解しやすく情報を提供しているか把握する。よって理解可能性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: すべて必需品 3: 大変役に立つ 2: あまり役に立たない 1 殆ど役に立たない</p>
11	<p>アラーム発生時に、各アラームメッセージを十分に理解し、その対応操作がわかりますか？</p> <p>[解説] この設問では、アラームに対してその対応操作を理解できるか把握する。よって操作支援性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 常に 3: 頻繁 2: 度々 1: 時々</p>
12	<p>定常運転時における代表的なアラーム 10 個を思い浮かべたとき、それらは次のどのタイプが多いですか？</p> <p>A. 対応操作に繋がるアラーム(パルプ操作、フィールドへの指示など)</p> <p>B. 何らかの確認/監視を実施するアラーム</p> <p>C. 役立つ情報ではあるが、注意喚起のためのアラームであり、操作や確認などの対応操作を伴わないアラーム</p> <p>D. 読みはするがすぐに忘れてもよいアラーム(シーケンス終了メッセージなど)</p> <p>[解説] この設問では、アラームとオペレータ対応操作との関係を把握する。よって操作相関性の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 回答 D の時 3: 回答 C の時 2: 回答 B の時 1: 回答 A の時</p>

No.	設問	配点：回答
13	<p>定常運転時に、アラームが早過ぎたために、直ぐに対応操作を行わず、その後の状態推移により対応するアラームはどの程度ありますか？</p> <p>[解説] この設問は、適時性の評価用として新たに追加された設問である。アラームの発生タイミングがオペレータの力量やプロセスの変化からみて適切かを把握する。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
14	<p>定常運転時に、アラームが発生しても対応操作が間に合わず、次の異常状態に推移するアラームはどの程度ありますか？</p> <p>[解説] この設問は、適時性の評価用として新たに追加された設問である。アラームの発生タイミングがオペレータの力量やプロセスの変化からみて適切かを把握する。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
15	<p>大規模なトラブル発生中に、一つのアラームが発生してから次のアラームが発生するまでの時間が短すぎて、その事象を理解するのに追いつかないと感じることは、どの程度ありますか？</p> <p>[解説] この設問では、アラームの洪水によってオペレータの状況認識や意志決定の能力が低下していないかを把握する。このような状況の下でもアラームがオペレータにその発生を気づかせることができるか(注目性)や優先度をもってオペレータの対応を導くことができるか(優先度適性)の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
16	<p>大規模なトラブル発生時、あなたはアラームの内容を理解することなく受け入れてしまうことは、どの程度ありますか？</p> <p>[解説] この設問では、トラブル発生時にアラームの見落としが発生していないかを把握する。どのような状況下においても、アラームの示すメッセージがオペレータに理解できるように提供されているか(理解可能性)の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>

No.	設問	配点：回答
17	<p>大規模なトラブルが発生している間、アラームシステムはあなたが重要な安全関連事象に気づくためにどの程度役に立っていますか？</p> <p>[解説] この設問では、トラブル発生時に安全関連アラームの見落としが発生していないかを把握する。どのような状況下においても、アラームがオペレータにその発生を気づかせることができるか(注目性)やアラームの示すメッセージがオペレータに理解できるように提供されているか(理解可能性)の評価に用いることができる。</p>	<p>4: 確実に役に立つ 3: 多少役に立つ 2: あまり役に立たない 1: 迷惑</p>
18	<p>大規模トラブル時に、アラームが早過ぎたために、直ぐに対応操作を行わず、その後の状態推移により対応するアラームはどの程度ありますか？</p> <p>[解説] この設問は、適時性の評価用として新たに追加された設問である。アラームの発生タイミングがオペレータの力量やプロセスの変化からみて適切かを把握する。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>
19	<p>大規模トラブル時に、アラームが発生しても対応操作が間に合わず、次の異常状態に推移するアラームはどの程度ありますか？</p> <p>[解説] この設問は、適時性の評価用として新たに追加された設問である。アラームの発生タイミングがオペレータの力量やプロセスの変化からみて適切かを把握する。</p>	<p>4: 希 3: 時々 2: 度々 1: 頻繁</p>

表 5.2 アンケートの設問と特性の対応関係

設問 番号	操作 相関性	一意 性	適時 性	優先 度適 性	理解 可能 性	診断 性	操作 支援 性	注目 性
1	○	○	○	○	○	○	○	○
2	○	○	○	○	○	○	○	○
3	○					○	○	
4	○	○						
5	○							
6				○				
7	○							
8		○						
9	○							
10					○			
11							○	
12	○							
13			○					
14			○					
15				○				○
16					○			
17					○			○
18			○					
19			○					

## 5.4 エチレンプラントのオペレータに対するアンケート調査

代表的な大規模化学プラントであるエチレンプラントのオペレータを対象に、提案するアンケート調査により、アラームシステムの問題点の抽出を試みた。

### 5.4.1 エチレンプラントのアラームシステム

対象としたエチレンプラント(図 5.1)は、1985 年に運転を開始し、年間生産量は約 37 万 t である。エチレンプラントは、DCS を用いて 4 直 3 交替制(1 直の運転員は 6 名)により、図 5.2 の中央制御室で 24 時間連続運転されている。

エチレンプラントのアラームシステムのアラーム変数は 3236 種類である。アラームは、その重要度に応じて三種類のグレード(重要度)に分けられている。グレード 1 は、装置の安全確保のために、緊急停止・回避措置を執る必要があるアラームである。グレード 1 のアラームが発生した場合は、自動緊急停止シーケンスが作動しプラントは停止する。グレード 1 のアラーム発生時には、オペレータの対応操作は不要である。オペレータにとって自動緊急停止シーケンスが作動したことを知ることは重要であるが、EEMUA191 のアラーム定義では、オペレータによる対応操作を伴わない警報はアラームとしては扱わないため、グレード 1 は EEMUA191 の定義上のアラームではない。グレード 2 は、装置停止やプラント異常につながるアラームであるが、オペレータの対応操作により正常運転に復帰可能なアラームである。グレード 2 のアラームは、DCS 監視画面上部にアラームごとに独立したランプを設置し、アラーム発生時に該当するランプを点滅させる(図 5.2)。グレード 3 は、最も重要度の低い運転を管理するためのアラームで、DCS 監視画面上にのみ表示される。グレード 2 のアラームを独立したランプに割り当てたのは、アラームの洪水が発生したときに重要なグレード 2 のアラームの見逃しを防ぐためと、他のオペレータと重要アラームを共有するためである。



図 5.1 エチレンプラント



図 5.2 エチレンプラントの中央制御室

#### 5.4.2 アンケート実施手順

エチレンプラントの26名のオペレータを対象にグレード2およびグレード3のアラームについてアンケート調査を実施した。グレード1はEEMUA191の定義上アラームではないため、調査対象から外した。

オペレータの運転経験年数の分布を表5.3に示す。直長とは、シフトリーダーとして他のオペレータを指導する立場にあるオペレータである。オペレータには、アラームシステムの現状を調査することが目的であることを事前に説明した。

表 5.3 オペレータの運転経験年数

経験年数	平均年数	人数
10年未満	2	6
10年～19年	15	11
20年以上	22	5
直長	22	4

#### 5.4.3 評価結果と考察

アラームシステムの8特性の評価結果を図5.3のレーダーチャートに示す。図中には、Bransby and Jenkinson(1998)が実施した13サイトの96名に対するアンケート結果を、8特性の評価値に変換した結果(HSE平均値)もプロットした。変換において、三択式の設問で中間値の回答には2.5点を付加した。なお、Bransby and Jenkinson(1998)のアンケートシートには、提案する新アンケートシートで追加した設問13, 14, 18, 19は含まれてないため、適時性の評価は設問1と2の結果から評価した。

すべての特性で現アラームシステムの評価は2.5点以上となっており、全体としてよいアラームシステムであるといえる。また、すべての特性について、HSEの平均値を上回っている。これは、対象のエチレンプラントでは、TPM(Total Productive

Management)活動を通じてアラームの削減が進められてきた結果であると考えられる。優先度適性が他の特性と比べて劣っている理由は、対象とするアラームシステムでは、アラームの優先度(グレード)の設定基準は明確であるが、アラームの優先度がグレード2とグレード3の二段階であり、特にグレード3のアラームにおいて優先度の適正化が十分に進んでいないためと考えられる。

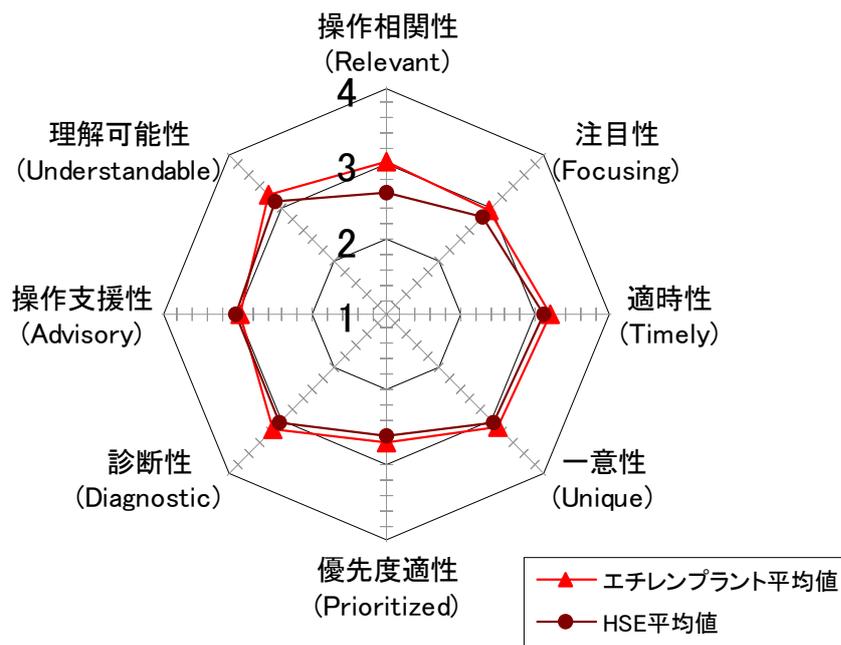


図 5.3 アラームシステムの 8 特性評価結果

オペレータの運転経験年数別の評価結果を図 5.4 に示す。グラフからわかるように、すべての特性で運転経験 20 年以上の熟練オペレータの評価が最も高い。これは、熟練オペレータは本アラームシステムの設計段階から関与し、システムを熟知しているためであると考えられる。優先度適性の評価結果は、運転経験 20 年未満と 20 年以上のオペレータの間で大きく分かれた。現アラームシステムへの慣れが比較的浅いオペレータは、優先度設定が変更できないシステムに満足していないことがこ

の結果から読み取れる。また、注目性についてもオペレータの経験年数でばらつきが生じた。使用しているアラームシステムは同じであるにもかかわらず、経験年数によってアラームシステムの評価が分かれるのは、アラームシステムの設計段階から関与し自らの要望をシステムに反映できた熟練オペレータと、そうではなかった若年オペレータの差であるのではないかと考えている。

アンケートの評価結果から、現在のアラームシステムは、優先度適性が他の特性に比べて相対的に悪いことが明らかになった。この問題を解決するためには、グレード3のアラームの中でも高優先度のアラームについては、他のグレード3のアラームとは区別した表示方法やアラーム音を変えるなどの対策が考えられる。

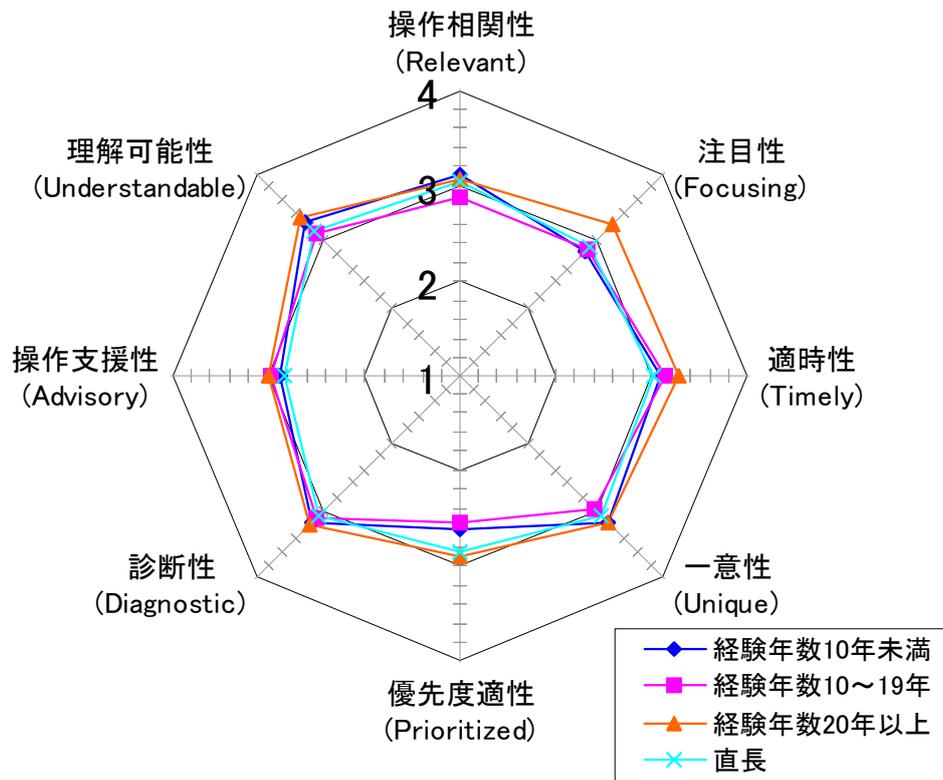


図 5.4 運転経験年数別評価結果

## 5.5 まとめ

アラームシステムの 8 特性を定量的に評価するアンケート法を提案した。8 特性を定量評価することで、効果的なアラームシステムの性能改善に向けた着目すべき特性を抽出できる。提案するアンケートに、オペレータのアラームシステムに対する要望等を記述回答する設問を追加することで、アラームシステムの具体的な改善の方向性を詳しく調べることもできる。各社のニーズに応じた設問を追加することや、実際に発報したアラーム数等のデータ解析からの評価値を加えることで、より実用性の高い評価ができるものと期待される。

今回対象としたエチレンプラントのアラームシステムは熟練者向けに作られている。しかし、今後数年で熟練者は一線を退き、運転経験の少ないオペレータと入れ替わる。新人オペレータが運転する環境は、熟練者が経験してきた環境とは異なり、高度制御の適用や定期修理間隔の長期化により平常運転時そして変動時の操作機会が少なく、平常運転時と異常発生時とのギャップは以前よりも大きくなっている。そのような状況の下、比較的経験が少ないオペレータに限られた時間の中で冷静に判断、処置を行うためには、これまで以上にアラームシステムの質的向上に向けた取組みが必要である。

## 第 6 章 結論

プラントアラームシステムは，プラントの安全，製造品の品質，そして生産性を守る意味で重要な役割を担う必要不可欠なシステムであり，そのマネジメントが国際的に重要視されてきている．本研究では，改善活動を効果的に進める上での第一歩となるアラームシステム性能評価方法について研究し，以下の提案と検証を実施した．

第 2 章では，アラームとオペレータの対応操作との関係から現状のアラームシステムが持つ課題や運転方法上の課題を抽出し，アラームシステムの改善を効果的に実施する方法として，プラント運転ログデータを用いたイベント相関解析法 (ECA1) を提案した．実プラントデータを用いた提案手法の検証結果においては，連鎖アラームや定型操作，不要アラーム，そして異常原因の同定に対して，本手法がデータ解析などの知識を必要とせず，製造現場のエンジニアやオペレータでも素早く，簡単に，そして効果的にプロセスの安全性と生産性の改善に向けた課題の抽出と改善方法の検討ができることを提示した．

第 3 章では，ECA1 の課題とされるプラント運転ログデータを一定のウィンドウタイム幅でバイナリデータに変換するために起こりえる類似性を持つ二つのイベントの発生点間のタイムラグの分散が大きい場合に，ウィンドウタイム幅を適正に選択できないと類似性を正しく検出できない点を改善した拡張イベント相関解析法 (ECA2) (Kurata, *et al.*, 2011) の有効性を実際のエチレンプラントで記録されたプラント運転ログデータに適用して検証した．その結果，ECA1 では類似度を低く推定していたタイムラグの分散が大きいイベント間の類似度を ECA2 により正しく評価できることを確認した．

ECA1 および ECA2 は，従来のアラームシステム性能評価法にはないイベント間の相互相関性に着目し，その関係性からイベントの伝搬経路や発生時間差等を表現

できることで、製造現場のオペレータやエンジニアの知見や経験、さらには運転記録などの他のデータと照合して検討することで、容易に改善方針を導き出せる。今後、様々な化学プラントへの適用が進み、プラントオペレーションの改善に役立つことが期待される。

第4章では、EEMUAが提示するアラーム8特性の内、操作相関性、一意性、適時性をプラントアラームシステムの性能評価用KPIsとして、プラント運転ログデータからイベント相関解析を応用し定量的に評価する方法を提案した。提案法により、従来のKPIsでは適正化の対象と判定されなかった発生頻度が少ないアラームイベントの問題点を、操作相関性や適時性の観点から解析できるようになった。操作相関性、一意性や適時性などの質的評価指標は、従来のKPIsによる量的適正化が進んだプラントのアラームシステムのさらなる質的適正化に有効である。今後、プラントアラームシステム性能を評価する新しいKPIsとして製造現場への適用が進み、プラントオペレーションの改善に役立つことが期待される。

第5章では、EEMUAが提示するアラーム8特性をプラントアラームシステムの性能評価用KPIsとして、オペレータアンケートを用いて定量的に評価する方法を提案した。また、実際のエチレンプラントにおいて現場オペレータの協力のもと、その効果検証を実施した。8特性を定量評価することで、従来のKPIsによる評価と比べて、改善すべき方向性を見いだせ、その後の効果的な改善が期待できる。アラーム8特性を用いたアラームシステム性能評価は、アラームの利用者であるオペレータにとってそのアラームシステムの有効性を評価するこれまでにないKPIsであり、アラームシステムの改善前や改善後、そして定期的な評価の際に利用され、性能維持と改善、さらには強化計画などに活用されることを期待する。

化学プラントの多くの製造現場では、日々、安全、安心、品質、生産性などの向上に向け現場レベルでの改善活動を実施している。そして、アラームマネジメントも継続的に実施する活動の一つとして認知されてきた。しかし、プラントの生産性KPIに直結するような他の取り組みとことなり、アラームシステムの改善は、直接

的な経済効果が見えづらいと言われている (Takai, 2007) . アラームシステムが健全であり常に正常にマネジメントされていれば, 異常状況を緩和することができる. また, オペレータの対処能力を最大限まで引き出すのに役立つ. プラントで起こる事故の原因の大半がヒューマンファクターに起因する中で, 世界的に見ても, 事故発生率が低く, 安全を維持している日本の化学プラントもここ数年の傾向としては事故件数が増加している. また, 装置および機器の老朽化は大きな問題である. 常にリスクマネジメントを実施して, アラームシステムを健全に維持すること, それに伴うオペレータ訓練を徹底して実施することは, 化学プラントの安全と生産性に直結する重要な課題である.

本研究成果は, このような化学プラントでのアラームマネジメントへの取り組み前の課題, そして取り組み後の効果を見えやすくすることで, 上記のような課題を解決できるとともに実プラントにおける今後の安全性や生産性に大きく貢献できるものとする.

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、主指導教員として温かいご指導と研究の場を与えてくださいました奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科知能システム制御講座 杉本謙二教授に心から感謝いたします。また、副指導教員としてご助言をいただきましたソフトウェア設計学講座 飯田元教授、知能システム制御講座 野田賢准教授に深く感謝いたします。そして、イベント相関解析法の研究では、株式会社山武の西口純也氏、その実プラントにおける検証では、出光興産株式会社の樋口文孝氏より貴重なご意見とご助言をいただきました。さらにオペレータアンケートに関する研究では、日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会ワークショップ No.28 「アラームマネジメント」の検討結果と知見を活用させていただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- AICHE/CCPS; Guidelines for Engineering Design for Process Safety, AIChE, New York (1993)
- Alford, J. S., Kindervater, K., and Stankovich, R.; Alarm Management for Regulated Industries, *Chemical Engineering Progress*, 101(4), 25-30 (2005)
- Bergquist, T., Ahnlund, J., and Larsson, J. E.; Alarm reduction in industrial process control, *Proc. of ETFA 2003*, 2, 58–65 (2003)
- Bransby, M. L, and Jenkinson, J.; The Management of Alarm Systems, Contract Research Report for Health & Safety Executive (HSE), 163-176, HSE, London (1998)
- Dahlstrand, F.; Consequence analysis theory for alarm analysis, *Knowledge-Based Systems*, 15(1), 27–36 (2002)
- Daley, D. J., and Vere-Jones, D.; An introduction to the theory of point processes, Springer series in statistics, Springer (1988)
- Engineering Equipment & Material Users' Association (EEMUA); ALARM SYSTEMS A Guide to Design, Management and Procurement, EEMUA Publication No.191, EEMUA, London (1999)
- Engineering Equipment & Material Users' Association (EEMUA); ALARM SYSTEMS A Guide to Design, Management and Procurement, EEMUA Publication No.191 2nd Edition, EEMUA, London (2007)
- Health & Safety Executive; The Explosion and Fires at the Texaco Refinery Milford Haven 24 July 1994, HSE, London (1997)

- Higuchi, F., M. Noda and Nishitani H.; Alarm Reduction of Ethylene Plant using Event Correlation Analysis, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 36(6), 576-581 (2010)
- Higuchi, F., Yamamoto, I., Takai, T., Noda, M., and Nishitani, H.; Use of event correlation analysis to reduce number of alarms, Proc. of the 10th international symposium on process systems engineering, 1521–1526 (2009)
- Hollifield, B. and Habibi, E.; Alarm systems greatly affect offshore facilities amid high oil prices, *World Oil*, September (2006)
- Hollifield, B. and Habibi, E.; *The Alarm Management Handbook*, PAS, Houston (2006)
- International Electrotechnical Commission; 61508 : Functional Safety of Electrical/Electronic/ Programmable Electronic Safety-related Systems, Geneva (1998)
- International Electrotechnical Commission; 61511 : Functional Safety : Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector, Geneva (2003)
- International Society of Automation (ISA); *Management of Alarm Systems for the Process Industries*, ANSI/ISA-18.2-2009, ISA, North Carolina (2009)
- Izadi, I., S. L. Shah, D. S. Shook, S. R. Kondaveeti and T. Chen; “A Framework for Optimal Design of Alarm Systems,” *Proc. of 7th IFAC Symposium of Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, 651-656 (2009)
- Lesot, M. J., M. Rifqi and H. Benhadda; “Similarity measures for binary and numerical data: a survey,” *Int. J. Knowledge Engineering and Soft Data Paradigms*, 1(1), 63-84 (2009)
- Li, W.; Mutual information versus correlation functions, *J. of Statistical Physics*, 60, 823–831 (1990)

- Liu, X., Kosaka, H., Noda, M., and Nishitani, H.; Model-based dynamic evaluation to support the design of alarm systems, Part 1. Development of virtual subject, *Human Factors Jpn.*, 11(2), 118–127 (2007a)
- Liu, X., Kosaka, H., Noda, M., and Nishitani, H.; Model-based dynamic evaluation to support the design of alarm systems, Part 2. Case study of a boiler plant simulator, *Human Factors Jpn.*, 11(2), 128–138 (2007b)
- Kimura, N., M. Noda, K. Takeda, T. Hamaguchi and T. Itoh; A Method of Performance Evaluation of Plant Alarm System on Basis of Cause-Effect Model (in Japanese), *Human Factors Jpn.*, 15(1), 28-35 (2010)
- Kondaveeti, S. R., S. L. Shah and I. Izadi; Application of Multivariate Statistics for Efficient Alarm Generation, *Proc. of 7th IFAC Symposium of Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, 657-662 (2009)
- Kurata, K., M. Noda, Y. Kikuchi and M. Hirao; Extension of Event Correlation Analysis for Rationalization of Plant Alarm Systems, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 37(4), 338-343 (2011)
- Miyamoto, S.; An Introduction to Cluster Analysis (Kurasta Bunseki Nyumon), 88-105, Morikita, Tokyo (1999)
- Mogfor, J.; FATAL ACCIDENT INVESTIGATION REPORT, Isomerization Unit Explosion Final Report (2005)
- Nimmo, I.; Consider Human Factors in Alarm Management, *Chemical Engineering Progress*, 98(11), 30-38 (2002)
- Nishiguchi, J. and Takai, T.; IPL2 and 3 performance improvement method for process safety using event correlation analysis, *Computers & Chemical Engineering*, 34(12), 2007-2013 (2010)

- Noda, M., and Nishitani, H.; Optimal assignment of plant operators on basis of shift's ability evaluation, *Proc. of the 10th international symposium on process systems engineering*, 2067–2072 (2009)
- Normen Arbeitsgen Mess Und Regeltechnik (NAMUR) ; Alarm Management, Publication NA102, NAMUR, Germany (2003)
- Occupational Safety & Health Administration; 09/22/2005-OSHA Fines BP Products North America More Than \$21 Million Following Texas City Explosion, OSHA News Release, OSHA, Wahington (2005)
- Occupational Safety & Health Administration; 29 CFR Part 1910.119 Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals, OSHA, Washington (1992)
- Rothenberg, D. H.; Alarm Management for Process Control, Momentum Press, New York (2009)
- Shiozaki, J., Shibata, B., Matsuyama, H., and O'Shima, H.; Fault diagnosis of chemical processes utilizing signed directed graphs—Improvement by using temporal information, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 36(4), 469–474 (1989)
- Takai, T.; Alarm Management in Chemical Plants (in Japanese), *Human Factors Jpn.*, **12(1)**, 10-23 (2007)
- Takai, T., Higuchi, F., Shimameguri, A., Kurooka, T., and Noda, M.; A Comprehensive evaluation method of alarm system from the standpoint of 8 characteristics, *Proc. of the 5th international symposium on design, operation and control of chemical processes*, 832-841 (2010)
- United States Nuclear Regulatory Commission; Three Mile Island Accident, Fact Sheet, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html> (2011)

Wu, H., Y. Tien and C. Chen; A graphical environment for matrix visualization and cluster analysis, *Computational Statistics and Data Analysis*, 54(3), 767-778 (2010)

清水久二; 国際安全規格とその背景, 計測と制御, 第 38 卷 第 8 号 (1999)

松本俊次; プラントのプロセス安全, 日本プラントメンテナンス協会 (2004)

宮本一郎; アメリカの石油・化学工業における安全管理, 予防時報, 206 (2001)

## 研究業績

### 1. 学術雑誌論文

- 1) 高井努, 野田賢, 樋口文孝: イベント相関解析によるエチレンプラント運転ログデータからの迷惑アラーム抽出, 化学工学論文集 (印刷中)
- 2) 高井努, 野田賢: プラント運転ログデータのイベント相関解析によるアラームシステムの性能評価, 化学工学論文集, Vol. 37 No. 6, pp. 539-545 (2011)
- 3) 高井努, 野田賢, 樋口文孝: オペレータアンケートによるプラントアラームシステムの 8 特性評価, ヒューマンファクターズ, Vol.16 No.2, pp.80-87 (2012)

### 2. 国際会議プロシーディングス

- 1) Tsutomu Takai and Masaru Noda: Performance Monitoring of Industrial Plant Alarm Systems using Event Correlation Analysis, 2011 AIChE Annual Meeting, October 16-21, Minneapolis (2011)
- 2) Masaru Noda, Tsutomu Takai and Fumitaka Higuchi: Operation Analysis of Ethylene Plant by Event Correlation Analysis of Operation Log Data, *Proc. of FOCAPO 2012*, January 8-11, Savannah (2012)

### 3. 国内学会発表

- 1) 高井努, 野田賢: イベント相関解析を用いたアラームシステムのパフォーマンスモニタリング, 化学工学会第 43 回秋季大会, 9 月 14 日~16 日, 名古屋工業大学 (2011)
- 2) 高井努, 岡田智, 野田賢: IEC におけるアラームマネジメントの国際標準化, 化学工学会第 43 回秋季大会, 9 月 14 日~16 日, 名古屋工業大学 (2011)
- 3) 野田賢, 高井努, 杉本謙二: アラームマネジメントのためのプラント運転データ解析, 第 54 回自動制御連合講演会, 11 月 19 日~20 日, 豊橋技術科学大学 (2011)