

博士学位論文

プラントアラームシステム適正化のための
プラント運転データ解析

福岡大学大学院 工学研究科
エネルギー・環境システム工学専攻

王 者興

平成 30 年 3 月

目 次

第1章 序 論	1
1.1 プラントアラームシステム	2
1.2 アラームマネジメント	6
1.3 研究目的	10
1.4 既往の研究	11
1.5 論文構成	14
参考文献	15
第2章 ドットマトリックス解析によるプラント運転データからの連鎖アラーム抽出	17
2.1 はじめに	18
2.2 プラント運転データからの連鎖アラーム抽出	19
2.2.1 プラント運転データ	19
2.2.2 連鎖アラーム	20
2.2.3 連鎖アラームの抽出問題	20
2.3 ドットマトリックス解析による連鎖アラーム抽出法	21
2.3.1 ドットマトリックス解析	21
2.3.2 ドットマトリックス解析の連鎖アラーム抽出問題への適用	22
2.3.3 レーベンシュタイン距離による連鎖アラームの類似度評価	25
2.3.4 レーベンシュタイン距離の計算アルゴリズム	25

2.3.5	プラント運転データからの連鎖アラーム抽出法.....	28
2.4	ケーススタディ.....	29
2.4.1	対象プロセス.....	29
2.4.2	ドットマトリックス解析結果.....	33
2.4.3	連鎖アラームの抽出結果の考察.....	36
2.5	まとめ.....	41
	記号.....	42
	参考文献.....	43
第3章	ノイジーなプラント運転データに対する連鎖アラーム抽出法.....	45
3.1	はじめに.....	46
3.2	ドットマトリックス解析法の問題点.....	47
3.3	スライディングウィンドウを用いたドットマトリックス解析.....	48
3.4	ケーススタディ.....	52
3.4.1	対象プロセス.....	52
3.4.2	連鎖アラーム抽出結果と考察.....	54
3.5	まとめ.....	56
	記号.....	57
	参考文献.....	58
第4章	エチレンプラント運転データからの連鎖アラーム抽出.....	59
4.1	はじめに.....	60

4.2 対象プラント	60
4.2.1 エチレンプラントの概要	60
4.2.2 エチレンプラントの監視制御システム	60
4.2.3 プラント運転データ	63
4.2.4 イベント相関解析による連鎖アラームの抽出	63
4.3 エチレンプラント運転データのドットマトリックス解析	66
4.3.1 対象データの前処理	66
4.3.2 ドットマトリックス解析結果	68
4.4 イベント相関解析の結果との比較	74
4.5 まとめ	76
参考文献	77
第5章 結 論	78
謝辞	81
本論文に関する発表、受賞などの一覧	82

目次

Fig. 1-1 Independent protection layers	3
Fig. 1-2 Distributed control system	4
Fig. 1-3 Alarm counts per operator position	4
Fig. 1-4 An example of sequential alarm.....	5
Fig. 1-5 Alarm management lifecycle	7
Fig. 1-6 Performance levels of alarm system	9
Fig. 2-2 Operation for conversing sequential alarms S_2 into sequential alarm S_1	27
Fig. 2-3 Process flow diagram of azeotropic distillation column	30
Fig. 2-4 Simulated plant operation data	32
Fig. 2-5 Results of Dot Matrix Analysis of plant operation data of azeotropic distillation column.....	34
Fig. 2-6 Similarity color map of sequential alarms in plant operation data of azeotropic distillation column	37
Fig. 2-7 Clustered sequential alarms in plant operation data of azeotropic distillation column.....	38
Fig. 3-1 Example results of Dot Matrix Analysis with sliding window	51
Fig. 3-2 Process flow diagram of azeotropic distillation column	52
Fig. 4-1 Process flow of ethylene plant.....	61
Fig. 4-2 Operation data of ethylene plant	64
Fig. 4-3 Alarm rate per 10 min.....	65
Fig. 4-4 Operation data of ethylene plant without repeating alarm.....	67
Fig. 4-5 Result of Dot Matrix Analysis of operation data of ethylene plant.....	69
Fig. 4-6 Part of the result of Dot Matrix Analysis	70

表目次

Table 1-1 Recommended alarm system key performance indicators	13
Table 2-1 Example of plant operation data	19
Table 2-2 Process variables and alarm settings	31
Table 2-3 Sequential alarms by Dot Matrix Analysis	35
Table 2-4 The list of top 3 sequential alarms.....	36
Table 3-1 Alarm sequence in window	50
Table 3-2 Sequential alarms identified using Dot Matrix Analysis with sliding window	51
Table 3-3 Process variables and alarm settings	53
Table 3-4 Identified sequential alarms by Dot Matrix Analysis with sliding window...	55
Table 4-1 Units in ethylene plant	62
Table 4-2 Specification of computer.....	68
Table 4-3 Top 10 frequent sequential alarms.....	72
Table 4-4 Top 10 longest sequential alarms	73
Table 4-5 List of top 4 frequent sequential alarms by Event Correlation Analysis	75

第 1 章 序 論

1.1 プラントアラームシステム

プラントアラームシステムは、化学プラント、石油精製プラントや発電プラントなどのプラント監視制御システムの重要な構成要素の一つである。アラームシステムは、プラントやプロセスの状態が、安全、製品品質や環境規制などを考慮してあらかじめ定められた管理範囲から逸脱したとき、プラント状態の正常範囲からの逸脱をオペレータに警報や監視画面（警報音、警報ランプ、画面メッセージ、画面色変化など）を通じて知らせ、異常原因を特定するための情報を提供すると共に、プラントを正常状態に戻す対応操作をオペレータに求める（EEMUA, 2013）。

Center for Chemical Process Safety (CCPS) は、Fig. 1-1 に示すプラント安全を担保するための 8 階層からなる独立防護層（Independent Protection Layers）を定義している（AIChE/CCPS, 2012）。プラントアラームシステムは、第 3 層の「重要アラームとオペレータ対応」に位置づけられ 8 階層のうち唯一人間が関与する防護層である。また、英国の Engineering Equipment & Material Users' Association (EEMUA) は、プラントの状態ごとのオペレータの役割をつぎのように定義している（EEMUA, 2013）。プラント正常時のオペレータの役割は、制御システムが目標に追従しているかどうかの監視である。プラントマルファンクション時には、制御システムだけでは変動をカバーできないため、オペレータにはプラントを正常状態に戻すための介入操作が求められる。プラント緊急停止時は、オペレータは Emergency Shutdown System (ESD) が正常に作動しているかどうかチェックし、万一 ESD が正常に作動していない場合には適切な対応操作を行う必要がある。

プラント監視制御システムの急速な発展に伴い、プラントアラームシステムも進化してきた。パネル計装を使用した時代から、Fig. 1-2 のコンピュータベースの DCS 計装への飛躍的な技術進歩は、大量のアラームを低コストでプラント監視制御システムに設定できる環境をもたらした。その結果、Fig. 1-3 に示すようにオペレーター一人当たりの監視アラーム数が急増した（Hollifield and Habibi, 2006）。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、オペレーションに不要な迷惑アラーム発生の原因となっている (Rothenberg, 2009)。

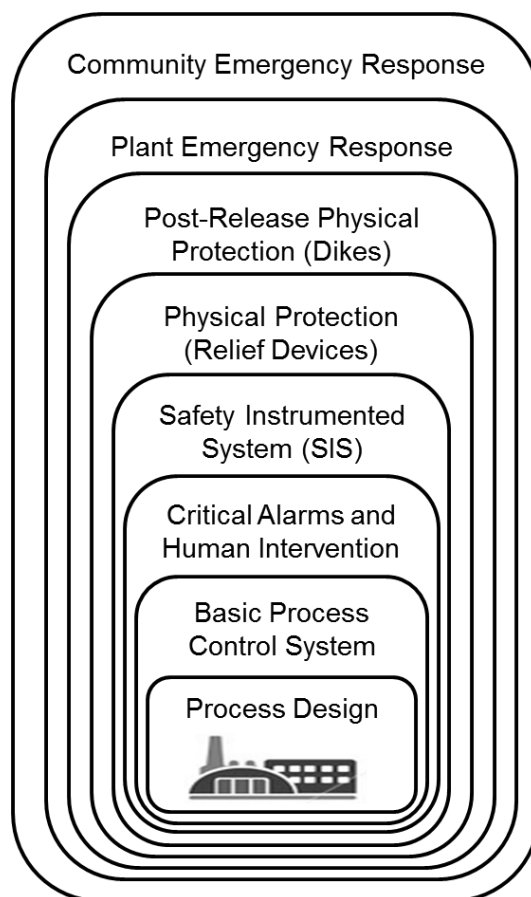


Fig. 1-1 Independent protection layers (AIChE/CCPS, 2012)



Fig. 1-2 Distributed control system (Courtesy of Mitsubishi Chemical Co. Ltd.)

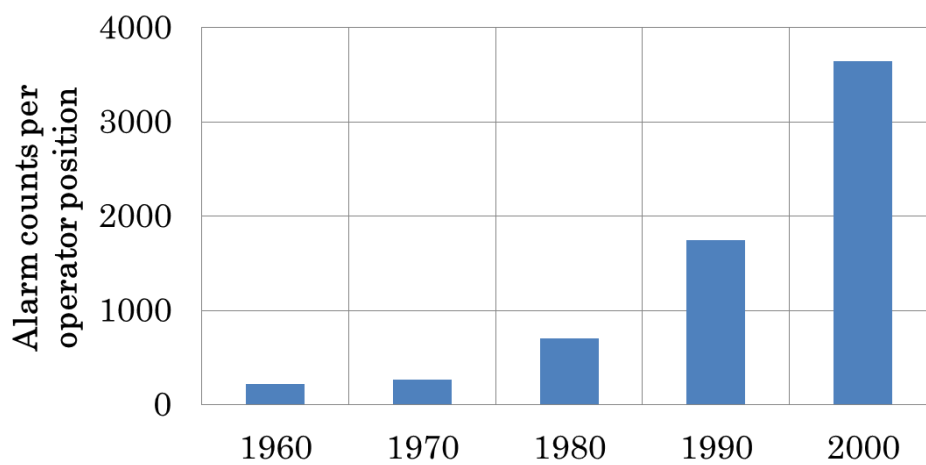


Fig. 1-3 Alarm counts per operator position (Hollifield and Habibi, 2006)

迷惑アラームには、繰り返しアラーム、対応操作なしアラーム、連鎖アラームなどがある。迷惑アラームは、オペレータの重要アラームの見落としを招き、プラント事故の原因となる。対応操作なしアラームは、発報しても対応操作の必要がないアラームのことで、本来メッセージなどとしてオペレータに提示されるべきものである。

連鎖アラームは、一つのマルファンクション発生後に複数の異なるアラームが連鎖的に発報するアラーム群であり、発報したアラームの種類とそれらの発報順（発報パターン）によって特徴付けられる。連鎖アラームの例を Fig. 1-4 に示す。一つのプラントマルファンクションが発生した後に発報したファーストアラーム（アラーム 1）以外のアラーム 2、3 は、オペレータにプラントマルファンクションについての新たな情報を与えないばかりか確認操作の負担だけをもたらし、その結果オペレータによる重要アラームの見落としを招く可能性がある。これらの迷惑アラームは、プラント災害や生産ロスの原因となるため削減が必要となる。

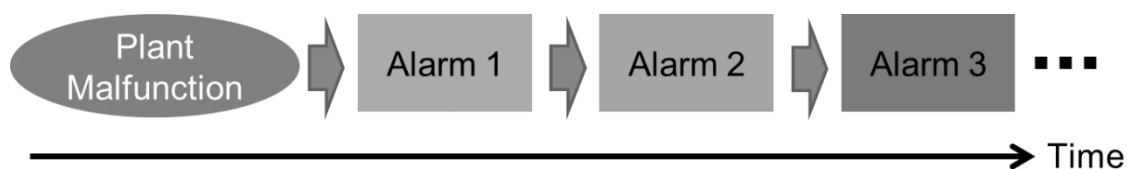


Fig. 1-4 An example of sequential alarm

1.2 アラームマネジメント

1990年以降、アラームシステムの不備によるプラント事故が多発し、欧米を中心にアラームマネジメントへの取り組みが急速に進んだ。Abnormal Situation Management Consortiumは、米国の化学プラントにおけるプラントマルファンクションや事故などによる損失は約年間200億ドルに超えると推定する(Hollifield and Habibi, 2006)。EEMUAは、適切なアラームが持つべき基本特性を定め、迷惑アラームの徹底的な合理化を求めている(EEMUA, 2013)。また、人間工学的な観点から、単位時間あたりに一人のオペレータが対応できるアラーム発報回数の上限を与えた。米国のInternational Society of Automation (ISA, 2009)は、アラームマネジメントの米国標準(ANSI/ISA-18.2-2009)を定め、アラームマネジメントライフサイクルを提唱している。2014年には、International Electrotechnical Commission (IEC)は米国標準(ANSI/ISA-18.2-2009)をベースとしたアラームマネジメントの国際標準IEC 62682 (IEC, 2014)を採択した。今後世界中の化学プラントでIEC 62682に準拠したアラームマネジメントへの取り組みがさらに急速に進むと考えられる。

IEC 62682が定めるアラームマネジメントライフサイクルをFig. 1-5に示す。Philosophy (理念)では、アラームシステムの目的やそれを達成するための手順、方針を文書化する。Identification (同定)では、プロセスハザード解析などを利用し、必要なアラームを決定する。Rationalization (適正化)では、Identificationで同定したアラームの整合性を取るとともに、アラーム優先度を決め、設計に必要な条件をアラームマスターデータベースとして保存する。Detailed design (詳細設計)では、Rationalizationで決定した条件に基づき、アラームを設計する。Implementation (実装)では、アラームをプラント監視制御システムに実装し、試運転およびオペレータに対する訓練を実施する。Operation (運転)では、構築したアラームシステムを稼働させる。Maintenance (保守)では、アラームシステムの適正な機能を維持するために、定期的なメンテナンスを行う。Monitoring & Assessment (監視・評価)では、アラームシステム全体と各アラーム

ムに対して、Philosophy で定めた性能に対する達成度を継続的に監視する。監視評価の結果は、保守、およびアラームシステムや運転手順変更のトリガーとなる。Management of Change (変更管理) では、アラームシステムに対する修正を提案し、承認する。Audit (監査) では、アラームシステムとアラームマネジメントプロセスの健全性が定期的に監査される。

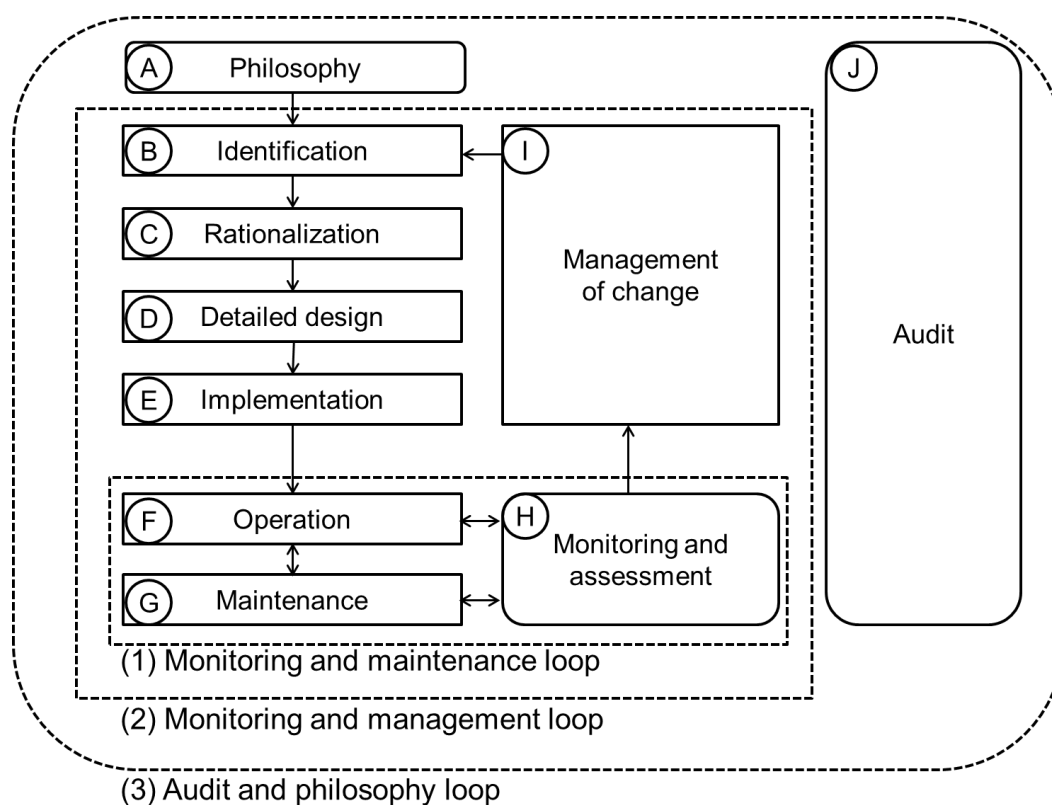


Fig. 1-5 Alarm management lifecycle (IEC, 2014)

アラームマネジメントライフサイクルには、下記三つの機能ループが定義されている。

- (1) モニタリングとメンテナンス・ループ：Monitoring で問題アラームを同定し、Maintenance でそれらをリペアするループである。リペアされたアラームは Operation に復帰させる。
- (2) モニタリングと変更管理・ループ：Philosophy で定められた理念に一致していないアラームをモニタリングし、アラーム設計の見直しを検討する。
- (3) 監査と指針・ループ：ライフサイクル全体における継続的なアラームシステムの監査をするループである。

IEC 62682 のアラームマネジメントライフサイクルは、アラームフィロソフィーの作成、アラームシステムの性能評価、監査のいずれかから開始する。稼働中のプラントでは、プラント運転データがすでに得られているため、アラームシステムの性能評価からアラームマネジメントを開始することが多い。たとえば EEMUA は、10 分間あたりの最大アラーム発報数と平均アラーム発報数から、Fig. 1-6 にしたがってアラームシステムのパフォーマンスレベルを Level 1（最悪）～Level 5（最良）の 5 段階で評価する方法を提案している。しかし、この方法は、アラームシステムのマクロなパフォーマンスを評価することはできるが、アラームシステムの何処に問題があるのかのミクロな評価結果を与えないという問題がある。

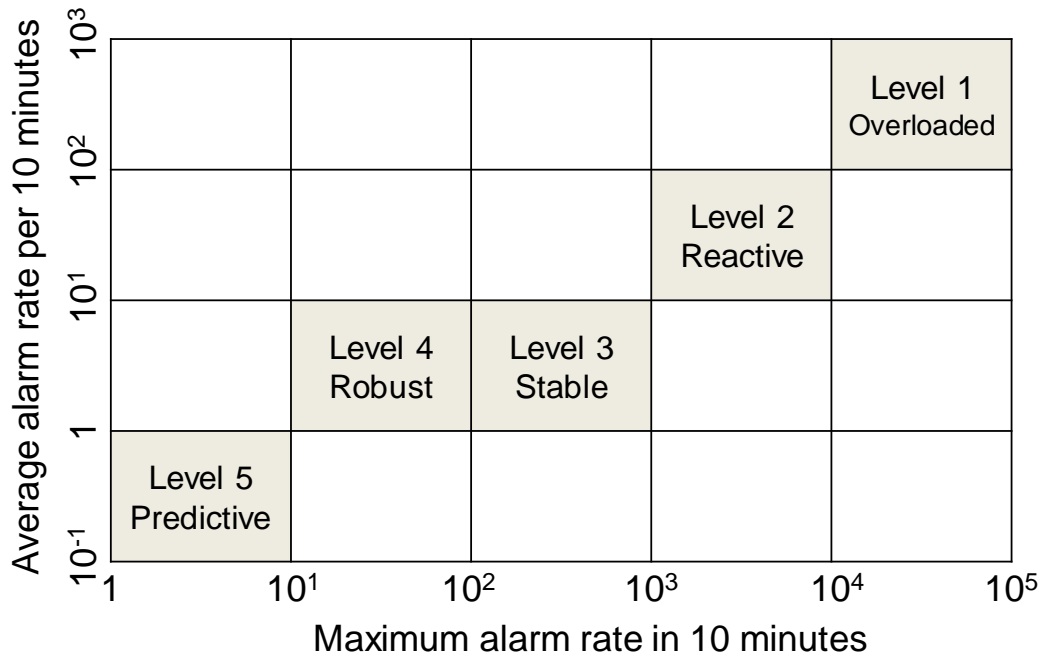


Fig. 1-6 Performance levels of alarm system (EEMUA, 2013)

1.3 研究目的

プラントアラームシステムの高度化により、大量のアラームを低コストでプラント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、オペレーションに不要な迷惑アラーム発生の原因となっている。特に、迷惑アラームの一種である連鎖アラームは、オペレータによる重要アラームの見落としを招き、プラント事故の要因となっている。一方、DCSの進歩により、アラームデータなどの膨大なプラント運転データがデータベースに蓄積されるようになった。しかし、必ずしもこれらのプラント運転データが、プラントオペレーションの改善に有効に利用されているとはいえない。

そこで本研究では、アラームマネジメントライフサイクルのモニタリング&メンテナンスに注目し、プラント運転データから連鎖アラームを抽出するためのデータ解析手法の提案を目的とする。エンジニアが様々なプラントの運転データを簡単に活用できるよう、プラントの情報を用いない手法とすることを目指す。提案する手法の有効性を、シミュレーションデータおよび実際のプラント運転データを用いて検証する。

1.4 既往の研究

日本企業は現場での TPM 活動を中心に、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活動の積み重ねを通じてアラームの削減を進めてきた。アラームや操作などのプラント運転データから、不要なアラームを抽出する方法に、個々のアラームの発報頻度ランキングに基づくトップ 10 アプローチ (井上, 2007) がある。この方法では、プラント運転データから、ある期間におけるアラームの発報回数順のリストを作成し、上位にランクされたアラームから、その異常原因を把握し、アラームの削減を試みる。しかし、この方法は上位にランクされるアラームの占有率が低下するにしがって、アラームの削減効率が低下する。また、個々のアラームに着目した手法であり、連鎖アラームを対象としたものではない。

EEMUA は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) を提案している (EEMUA, 2013)。KPIs の例とそれらのガイドラインを Table 1-1 に示す (Hollifield and Hbibbi, 2006)。それらの指標の中、単位時間あたりの平均アラーム数や最大アラーム発報数、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報アラームの優先度割合などが広く運転現場で利用されている。しかし、KPIs はアラームシステムのマクロなパフォーマンスをプラント運転データに基づき評価できるが、連鎖アラームなどの迷惑アラームをミクロに解析できない。

プラントやプロセスの知識に基づき、アラーム発報データから手作業で関連性のあるアラーム発報パターンを見つけ出す手法がある (Umeda *et al.*, 1980)。この手法では、Signed Directed Graph を用い、プラントマルファンクション発生後のアラーム伝搬経路を解析することにより、関連性のあるアラームの発報パターンをグルーピングする。しかし、知識ベース型の方法では解析に非常に手間がかかり、限られた専門分野のエンジニアしか利用できないという問題点がある。

アラーム洪水時のプラント運転データから連鎖アラームを抽出し解析する手法が提案されている (Cheng *et al.*, 2013)。この手法は、Smith-Waterman アルゴリズム (Smith and Waterman, 1981) に基づき、アラーム発報時刻ベクトルとアラーム発報パターン類似度の両方を考慮して連鎖アラームを抽出する。しかし、連鎖アラームなどの迷惑アラームはアラーム洪水時だけに発生するものではない。したがってこの手法では、プラント運転データに含まれるすべての連鎖アラームを抽出できない可能性がある。

イベント相関解析法 (Nishiguchi and Takai, 2010) は、アラーム発生系列間の類似度に基づき、類似するアラームと操作をグルーピングし、単一グループ内に複数のアラームが含まれるとき、それらのアラーム群は連鎖アラームであると判定する。イベント相関解析法は、エチレンプラントの運転データに適用され、その有効性が確認された (樋口ら, 2010, 高井ら, 2011)。しかし、イベント相関解析法は、個々のアラームの発生系列間の類似度に着目した手法であるため、一種類のアラームは一種類の連鎖アラームにしかな分類できないアルゴリズム上の制約がある。実際のプラントでは、一種類のアラームが複数の異なる種類の連鎖アラームに含まれる場合もあるため、解析精度に限界がある。

イベント相関解析法に類似する手法として、Generalized Sequential Patterns アルゴリズム (Srikant and Agrawal, 1996) に基づくデータ解析手法が提案されている (Cisar *et al.*, 2009, Hostalkova and Stluka, 2010)。この方法は、連鎖アラーム間の類似度を評価しグルーピングする方法である。しかし、プラント運転データから連鎖アラームを抽出できないため、連鎖アラームをプラント運転データから抽出する方法が別途求められる。

その他のプラント運転データの解析法に、アラームの発生系列間の類似度を 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 (Kondaveeti *et al.*, 2009, Yang *et al.*, 2012) もある。

**Table 1-1 Recommended alarm system key performance indicators
(Hollifield and Hbib, 2006)**

Key Performance Indicator (KPI)	Interim Target for Systems Undergoing an Alarm Improvement Effort	Long-Term Target
Target Average Process Alarm Rate	<300 per day	<150 per day
Percentage of time alarm rate exceeds Target Average Process Alarm Rate	5%	0%
Alarm Event Priority Distribution based on at least one week of data	~80% Low, 15% High, <=5% Emergency	~80%Low, 15%High, <=5% Emergency
Suppressed alarms	Zero (Unless as part of defined Shelving, Flood Suppression, or State-based Strategy)	Zero (Unless as part of defined Shelving, Flood Suppression, or State-based Strategy)
Chattering Alarms	10 occurrences or less in a one-week period	0 per day
Stale Alarms (more than 24 hours old)	20 or less in a one-week period	0 per day
Floods (10 to 20 alarms in a 10 minute period)	<= 5 per day	<= 3 per day
Floods (>20 alarms in a 10 minute period)	<= 3 per day	0 per day
Process changes in Alarm Priority, Alarm Trip Point, Alarm suppression Status, Point Execution Status	None that are unauthorized. None that are not part of a defined Shelving, Flood Suppression, or State-based Strategy.	None that are unauthorized. None that are not part of a defined Shelving, Flood Suppression, or State-based Strategy.

1.5 論文構成

本論文では、プラント運転データから連鎖アラームを抽出するためのデータ解析手法を提案する。第1章では、現在のプラントアラームシステムを取り巻く問題点と迷惑アラームのデータ解析手法に関する既往研究を整理し、本論文の研究目的を示した。第2章では、プラント運転データからの連鎖アラーム抽出法として、ドットマトリックス解析に基づく方法を提案する。第3章では、第2章で提案したドットマトリックス解析による連鎖アラーム抽出法の改善を試みる。第4章では、提案手法を実際のエチレンプラントのプラント運転データに適用し、その有効性について検証した結果について考察する。最後に、第5章で本論文を総括する。

参考文献

1. AIChE/CCPS; Guidelines for Engineering Design for Process Safety, AIChE, New York (2012)
2. Cisar, P., Hostalkova, E., and Stluka, P.; “Data Mining Techniques for Alarm Rationalization”, *Proceedings of 19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Cracow, Poland*, 1457-1462 (2009)
3. Engineering Equipment & Material Users’ Association (EEMUA); ALARM SYSTEMS-A Guide to Design, Management and Procurement, EEMUA Publication No.191 3rd Edition, EEMUA, London (2013)
4. Hollifield, B. R., and Habibi, E.; The Alarm Management Handbook A Comprehensive Guide, PAS, Houston (2006)
5. Hostalkova, E., Stluka, P.; “Alarm Rationalization Support Via Correlation Analysis of Alarm History”, *Proceedings of 19th International Congress of Chemical and Process Engineering, Prague, Czech Republic* (2010)
6. International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 62682 Management of Alarm Systems for the Process Industries, IEC, Geneva (2014)
7. International Society of Automation (ISA); Management of Alarm Systems for the Process Industries, ANSI/ISA-18.2-2009, ISA, North Carolina (2009)
8. Nishiguchi, J., and T. Takai; “IPL2 and 3 Performance Improvement Method for Process Safety using Event Correlation Analysis,” *Computers & Chemical Engineering*, 34(12), 2007-2013 (2010)
9. Rothenberg, D. H.; Alarm Management for process Control, Momentum Press, New York (2009)
10. Srikant, R., and Agrawal, R.; “Mining Sequential Patterns: Generalizations and Performance Improvements”, *Proceedings of 5th International Conference of Extending Database Technology*, 3-17 (1996)
11. Umeda, T., Kuriyama, T., O’shima, E., Matsuyama, H.; “A Graphical Approach to Cause

and Effect Analysis of Chemical Processing Systems”, *Computers & Chemical Engineering*, 35, 2379-2388 (1980)

12. 井上敬; アラームマネジメントとアラーム・操作削除活動, 化学工学会 SIS 部会プラントオペレーション分科会第 107 回研究会 (2007)
13. 樋口文孝, 野田賢, 西谷紘一; “イベント相関解析によるエチレンプラントのアラーム削減”, *化学工学論文集*, 36(6), 576-581 (2010)
14. 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*, 37(6), 539-545 (2011)

第2章

ドットマトリックス解析による プラント運転データからの連鎖アラーム抽出

2.1 はじめに

プラント監視制御システムの急速な高性能化は、低コストで多数の監視変数にアラームを手軽に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・運用されている運転現場が多く、単一のプラントマルファンクションから多数のアラームが連鎖的に発報する連鎖アラームや同じアラームが周期的に発報する繰返しアラームなどの迷惑アラームが多発している。迷惑アラームは、オペレータによる重要アラームの見落としを招き、ヒューマンエラーによるプラント事故の原因となる恐れがある。

そこで本章では、プラント運転データからの連鎖アラーム抽出法として、ドットマトリックス解析を応用する方法を新たに提案する。ドットマトリックス解析は、バイオインフォマティクス分野でDNAやタンパク質配列の配列アラインメント手法の一つとして広く用いられている。ドットマトリックス解析を用いてプラント運転データから連鎖アラームを抽出できれば、より効率的な連鎖アラームの削減が期待できる。

2.2 プラント運転データからの連鎖アラーム抽出

2.2.1 プラント運転データ

化学プラントでアラームが発報したとき、アラーム名とアラームの発報時刻は、プラント監視制御システムのプラント運転データベースに記録される。Table 2-1 にプラント運転データの例を示す。表中の A はアラームを、A の添字はアラームの種類を表す。このプラント運転データから、約 50 分間に A₁、A₂、A₃、A₄ の四種類のアラームが A₁→A₃→A₂→A₄→A₁→A₃→A₂→A₁ の順で計 8 回発報したことが読み取れる。

Table 2-1 Example of plant operation data

Date/Time	Alarm
2015/01/01 10:10:15	A ₁
2015/01/01 10:10:36	A ₃
2015/01/01 10:10:42	A ₂
2015/01/01 10:10:58	A ₄
2015/01/01 10:46:08	A ₁
2015/01/01 10:46:08	A ₃
2015/01/01 10:46:33	A ₂
2015/01/01 10:59:46	A ₁

2.2.2 連鎖アラーム

連鎖アラームとは、単一のプラントマルファンクション発生後に連鎖的に発報したアラームの集合である。プラントマルファンクションの発生をオペレータに通知するためには一つのアラームが発報すれば十分である。それ以外のアラームはオペレータの負担となるばかりか、重要なアラームの見落としの原因となる。たとえば、Table 2-1 の最初の四つのアラーム A_1 、 A_3 、 A_2 、 A_4 は同一のプラントマルファンクションが原因で発報したのであれば、これらのアラームは連鎖アラームとなる。このプラントマルファンクションに対しては A_1 だけが発報すれば十分であるため、 A_3 、 A_2 、 A_4 が連鎖して発報しないようにアラームの管理範囲の変更や削除を検討する。しかし、プラント運転データを見ただけでは、どこに連鎖アラームが発生しているかを容易に見つけることはできない。そこで、プラント運転データに潜む連鎖アラームを抽出する方法が必要となる。

2.2.3 連鎖アラームの抽出問題

連鎖アラームは、連鎖アラームに含まれるアラームの種類、それらの発報順で特徴付けられる。本論文では、これらを連鎖アラームの発報パターンとよび、二つの連鎖アラームの発報パターンが同じであるとき二つの連鎖アラームは一致するという。同一のプラントマルファンクションを原因とする連鎖アラームの発報パターンは、互いに完全に一致すると期待される。プラント運転データの中に完全に一致するアラームの発報パターンが複数個見つければ、それらは連鎖アラームの可能性が高い。

2.3 ドットマトリックス解析による連鎖アラーム抽出法

2.3.1 ドットマトリックス解析

ドットマトリックス解析 (Gibbs and McIntyre, 1970) は、DNA やタンパク質配列の配列アラインメント手法の一種である。配列アラインメントとは、二つ以上の DNA の塩基配列やタンパク質のアミノ酸配列間の類似する部分配列の探索である。探索結果は、配列が持つ機能、構造や進化の情報を発見するのに利用される。

ドットマトリックス解析は、様々な配列アラインメント問題に応用できるが、ここでは Eq.(2-1) の二つの文字配列 S_1 および S_2 を例に、その手順について説明する。Eq.(2-1) 中の x_i は S_1 の i 番目の文字、 y_j は S_2 の j 番目の文字、 N_{S_1} および N_{S_2} はそれぞれ S_1 および S_2 の文字数であるとする。ドットマトリックス解析では、はじめに N_{S_1} 行 N_{S_2} 列のマトリックスを準備する。 S_1 の文字配列をマトリックスの左端に下から上に向かって、 S_2 の文字配列をマトリックスの下端に左から右へ記す。 S_1 および S_2 の i 番目と j 番目の文字同士を比較し x_i と y_j が一致するとき、マトリックスの i 行 j 列目にドットを打つ。 x_i と y_j が一致しないときはドットは打たない。この手順をすべての i, j の組み合わせ ($1 \leq i \leq N_{S_1}$ 、 $1 \leq j \leq N_{S_2}$) について繰り返す。

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{N_{S_1}} \\ S_2 &= y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_{N_{S_2}} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

ドットマトリックス解析では、 S_1 および S_2 の文字配列間で文字の種類と順序が完全に一致する部分配列は、マトリックス上の対角線方向に並んだドットの集合として表れる。一方、対角線方向に並んでいない孤立したマトリックス上のドットは、ランダムな一致を表す。マトリックス上に対角線方向に並んだドットに対応する文字配列を S_1 および S_2 から抜き出せば、 S_1 と S_2 の文字配列間で文字の種類と順序が完全に一致する部分配列をもれなく求めることができる。

配列アラインメントの方法には、ドットマトリックス解析の他にダイナミックプログラミング (Smith and Waterman, 1981) などもある。しかし、二つの配列が非常によく似ていることがあらかじめ分かっているならば、ドットマトリックス解析を最初に使うことが推奨されている (Mount, 2004)。これは、ドットマトリックス解析が、すべての可能な配列アラインメントを、マトリックス上の対角線方向に並ぶドットの集合としてグラフィカルに図示できるためである。ダイナミックプログラミングでは見つけにくい配列中の挿入や欠失を、ドットマトリックス解析を用いれば容易に見つけることができる。本論文において、配列アラインメントの方法としてドットマトリックス解析を採用するのは、解析の結果をグラフィカルに図示できるという特徴が、エンジニアによる連鎖アラームの解析に有効であると考えられるためである。エンジニアは、ドットマトリックス解析結果の図を見ることで、プラント運転データのどの部分に連鎖アラームが発生しているのか、同じ連鎖アラームがどのような頻度で発生しているのか、連鎖アラームの長さがどれくらいなのか、プラント運転データに含まれるすべての連鎖アラームを俯瞰できるようになる。

2.3.2 ドットマトリックス解析の連鎖アラーム抽出問題への適用

本論文では、プラント運転データからの連鎖アラームの抽出問題を、プラント運転データ中のアラームの種類とそれらの発報順 (発報パターン) が完全に一致する部分を抽出する問題に帰着する。具体的には、プラント運転データを発報したアラームの種類とそれらの発報順からなる一本のアラーム配列 S に変換し、そのアラーム配列の中の一致する部分配列をもれなく抽出する問題として定式化する。完全に一致する部分配列が、プラント運転データ中に複数回現れるとき、それらの部分配列を連鎖アラームと判定する。アラーム配列 S 中の一致する部分配列の抽出に、ドットマトリックス解析を応用する。たとえば、Table 2-1 のプラント運転データは、Eq. (2-2) のアラーム配列 S に変換される。Table 2-1 の A_1, A_3 のような同時刻に発報したアラームは、本研究では、ランダムにアラーム配列の順番を決める。ドットマトリックス解析は、一般に異なる二つの配列

間の類似する部分配列を求める手法であるが、ここでは同一のアラーム配列 S 同士に適用し、アラーム配列 S 中の一致する部分配列を求める。

$$S = A_1, A_3, A_2, A_4, A_1, A_3, A_2, A_1 \quad (2-2)$$

Eq.(2-2)のアラーム配列 S のドットマトリックス解析の結果を Fig. 2-1 に示す。グラフは対角線を挟んで対称となるので左上三角のみに注目すると、対角線方向に並ぶ三つのドット (○印) が存在することがわかる。これらは、発報パターンが一致する部分配列がアラーム配列 S 中に存在することを意味する。対角線方向に並んだ三つのドットに対応するアラームが A_1, A_3, A_2 であることから、 A_1, A_3, A_2 が連鎖アラームとして抽出される。

プラント運転データから抽出された連鎖アラームをそれらの発生回数順にランキングし、発生回数の多い連鎖アラームから削減を検討すれば、効率的な連鎖アラームの削減が可能となる。

なお、バイオインフォマティクス分野において、ドットマトリックス解析のグラフの書き方は主に二つ方法がある。一般的には左上から右下に向かってプロットされるが、本研究では、ドットマトリックス解析用ソフトウェアの Dotmatcher (<http://emboss.sourceforge.net/>) の出力結果のグラフの書き方 (左下から右上に向かってプロットする) に準拠し、結果グラフを出力した。

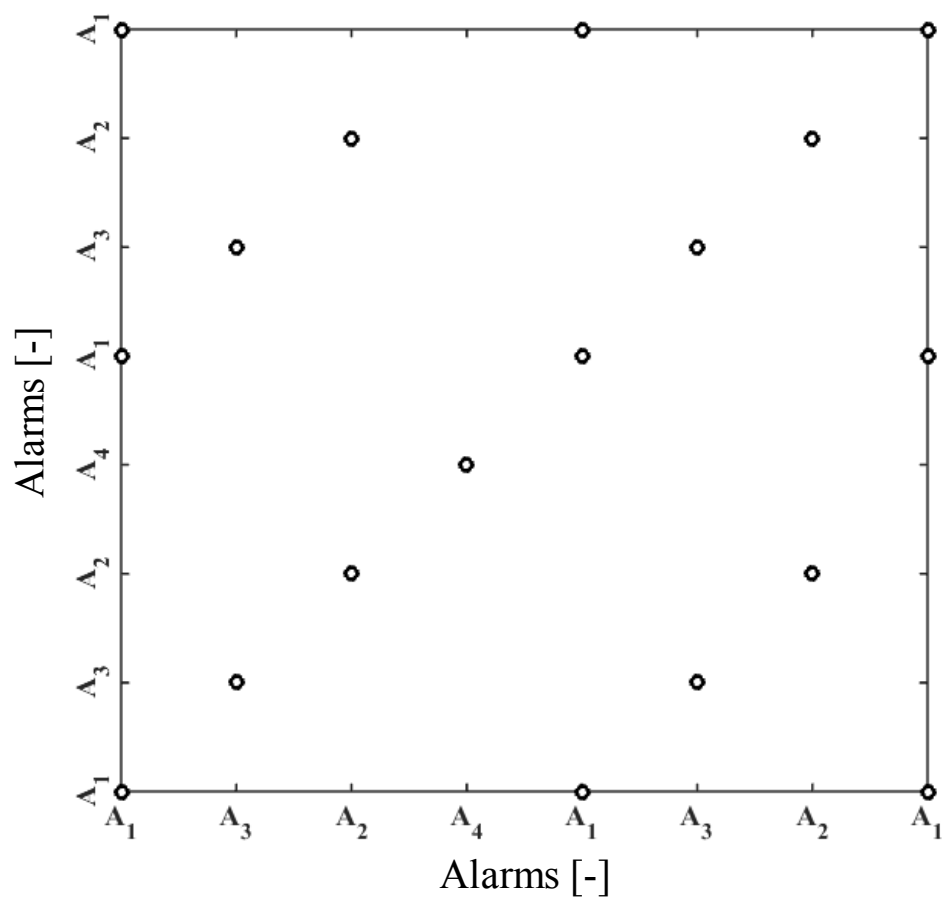


Fig. 2-1 Example of Dot Matrix Analysis

2.3.3 レーベンシュタイン距離による連鎖アラームの類似度評価

本論文では、アラームの種類とそれらの発報順（発報パターン）が完全に同じであるとき、二つのアラーム配列は一致すると定義した。しかし、実際のプラントでは、同一のプラントマルファンクションが原因で発生した連鎖アラーム同士であっても、プラントマルファンクション発生時のプラント状態のわずかな違いによって、連鎖アラームに含まれるいくつかのアラームの種類が異なったり、一部のアラームの発報順が入れ替わったりすることが予想される。このような連鎖アラームは、ドットマトリックス解析では連鎖アラームではないと判定される。そこで、連鎖アラーム間をレーベンシュタイン距離（Levenshtein, 1966）に基づく類似度により評価することを考える。

レーベンシュタイン距離 L は、二つの文字配列がどの程度異なっているかを示す編集距離の一種で、一つの文字配列を別の文字配列に変形するのに必要な操作の最小コストとして定義される（Jurafsky and Martin, 2009）。操作には文字の挿入（Insertion）、削除（Deletion）および置換（Substitution）の三種類がある。

2.3.4 レーベンシュタイン距離の計算アルゴリズム

二つの連鎖アラーム配列 S_i, S_j 間のレーベンシュタイン距離 L_{ij} は、動的計画法（Bellman, 1957）により再帰的に求められる。 S_i の k 番目までのアラームの部分列を $S_i(k)$ ($k=0, \dots, N_i$)、連鎖アラーム S_j の l 番目までのアラームの部分列を $S_j(l)$ ($l=0, \dots, N_j$) とする。連鎖アラームの部分列 $S_i(k)$ と $S_j(l)$ 間のレーベンシュタイン距離を $d(k, l)$ とするとき、 S_i, S_j 間のレーベンシュタイン距離 L_{ij} は、Eqs. (2-3)~(2-7)により求められる（Jurafsky and Martin, 2009）。

$$d(k, l) = \min \begin{cases} d(k, l-1) + c_{\text{Ins}} \\ d(k-1, l-1) + \delta_{\text{Sub}}(k, l) \\ d(k-1, l) + c_{\text{Del}} \end{cases} \quad (2-3)$$

$$(k = 1, \dots, N_i, l = 1, \dots, N_j)$$

$$\delta_{\text{Sub}}(k, l) = \begin{cases} 0 & \text{if } A_{i_k} = A_{j_l} \\ c_{\text{Sub}} & \text{if } A_{i_k} \neq A_{j_l} \end{cases} \quad (2-4)$$

$$(k = 1, \dots, N_i, l = 1, \dots, N_j)$$

$$d(0, 0) = 0 \quad (2-5)$$

$$d(k, 0) = kc_{\text{Del}} \quad (k = 1, \dots, N_i) \quad (2-6)$$

$$d(0, l) = lc_{\text{Ins}} \quad (l = 1, \dots, N_j) \quad (2-7)$$

ここで、 c_{Ins} はアラームの挿入コスト、 c_{Del} はアラームの削除コストである。 δ_{Sub} は Eq. (2-4) によって求められる置換コストであり、 $S_i(k)$ および $S_j(l)$ の最後のアラームが同じではないときは $\delta_{\text{Sub}} = c_{\text{Sub}}$ 、 $S_i(k)$ および $S_j(l)$ の最後のアラームが同じときは置換の必要がないので $\delta_{\text{Sub}} = 0$ となる。Eqs. (2-3)~(2-7) により計算した $d(N_i, N_j)$ が最終的に S_i と S_j 間のレーベンシュタイン距離 L_{ij} となる。たとえば、Fig. 2-2 に示す二つのアラーム配列 $S_1 = A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ と $S_2 = A_1, A_3, A_2, A_4, A_6, A_7$ のレーベンシュタイン距離 L_{12} は、 S_2 を S_1 に変形するために S_2 の A_3 と A_2 を置換し、 A_4 と A_6 の間に A_5 を挿入し、 A_7 を削除する4回の操作が最低限必要であることから、挿入、削除および置換操作のコストをすべて1とすると、 $L_{12} = 4$ となる。

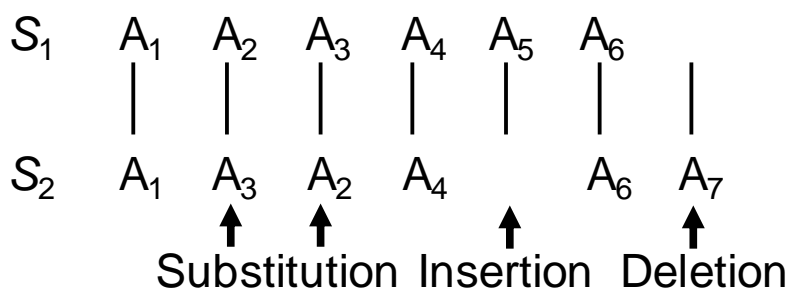


Fig. 2-2 Operation for conversing sequential alarms S_2 into sequential alarm S_1

レーベンシュタイン距離は、連鎖アラームに含まれるアラーム数に依存するため、比較する二つのアラーム配列が長いほどレーベンシュタイン距離は長くなる傾向がある。類似度とレーベンシュタイン距離は、アラーム配列の長さが長いほど、二つの配列間の類似度が低いほどレーベンシュタイン距離が長くなるという反比例の関係であるため、レーベンシュタイン距離をそのまま二つの配列間の類似度の評価指標として用いるのは適当ではない。そこで、二つのアラーム配列 S_i と S_j の類似度の評価指標として、Eq.(2-8) に示す類似度 M_{ij} を用いる (赤塚ら, 2013)。ここで、 \hat{L}_{ij} は、正規化されたレーベンシュタイン距離で、Eq.(2-9) により求められる (Yujian and Bo, 2007)。ここで、 N_i および N_j は、アラーム配列 S_i と S_j にそれぞれ含まれるアラーム数である。類似度 M_{ij} は 0~1 の間の値を取り、値が大きいほど連鎖アラーム間の類似度は高い。

$$M_{ij} = 1 - \hat{L}_{ij} \quad (2-8)$$

$$\hat{L}_{ij} = \frac{2 \cdot L_{ij}}{N_i + N_j + L_{ij}} \quad (2-9)$$

Eq.(2-8) により求めた連鎖アラーム間の類似度評価結果は、類似する連鎖アラームのグルーピングに利用する。類似する連鎖アラームのグルーピングには、クラスタリング手法の一つである最短距離法を用いる。グループ間の最短距離は、二つのグループにそれぞれ含まれる部分配列間の類似度の最小値で定義する。

2.3.5 プラント運転データからの連鎖アラーム抽出法

プラント運転データからの連鎖アラームの抽出法の計算ステップを以下にまとめる。

- (1) プラント運転データに記録された発報したアラーム種類をそれらの発報順に並べたアラーム配列 S に変換する。
- (2) アラーム配列 S 同士のドットマトリックス解析により、 S 中の発報パターンが一致するアラームの部分配列をもれなく抽出する。発報パターンが一致する部分配列が複数存在するとき、これらを連鎖アラームと判定する。
- (3) (2)で求めたすべての二つの連鎖アラーム間のレーベンシュタイン距離を求め、Eq.(2-8)により類似度を評価する。
- (4) 類似度の評価結果に基づき、連鎖アラームをクラスタリング手法の一つである最短距離法によりグルーピングする。
- (5) グルーピングされた連鎖アラーム群を、それらの発生回数の順にランキングする。発生回数のランキングは、連鎖アラーム削減の優先度を決定する際の参考となる。
- (6) 連鎖アラームに含まれるアラームやそれらの発報順の情報とアラームの設定根拠を照らし合わせることで、連鎖アラームの削減方針を決定する。

本研究で提案する手法は、(5)のステップまでを対象とする。(6)のステップは、プラントの知識を有するエンジニアやオペレータが実施する。

2.4 ケーススタディ

2.4.1 対象プロセス

提案手法の有効性を検証するために、共沸蒸留プロセスのシミュレーションデータ（倉田ら, 2011）に提案手法を適用した。プロセスフローを Fig. 2-3 に示す。この連続共沸蒸留プロセスは、アセトンを入レナーナとして、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。このプラントには、図中のグレーの丸印で表す 9 個の監視変数があり、それぞれの監視変数の管理範囲の上下限に 18 個のアラームが設定されている。監視変数タグ名、監視変数の正常状態における定常値、アラーム名、アラーム管理範囲の上限値（PH: Process High）、下限値（PL: Process Low）を Table 2-2 に示す。たとえば、FIA012 のアセトン流量が PH アラーム設定値の 99.1 kg/h を超えたとき、A₁ が発報する。

このプロセスでは、冷却水量の低下、リボイラスチム圧の低下、還流量バルブの固着の三種類のプラントマルファンクションが発生するものとする。還流量バルブの固着とは、還流量バルブが制御系の指示するバルブ開度よりも低い開度で固着し、還流量流量が不足するプラントマルファンクションである。還流量の不足により、カラム内部の温度が上昇する。

それぞれのプラントマルファンクションを、15 日間のダイナミックシミュレーション中にランダムに複数回発生させ、延べ 234 回発報したアラーム種類とそれらの発報時刻をプラント運転データとして収集した。ダイナミックシミュレーションでは、原料流量にノイズを加え、三種類のプラントマルファンクション以外の変動要因とした。得られたプラント運転データをアラーム配列に変換した結果を Fig. 2-4 に示す。

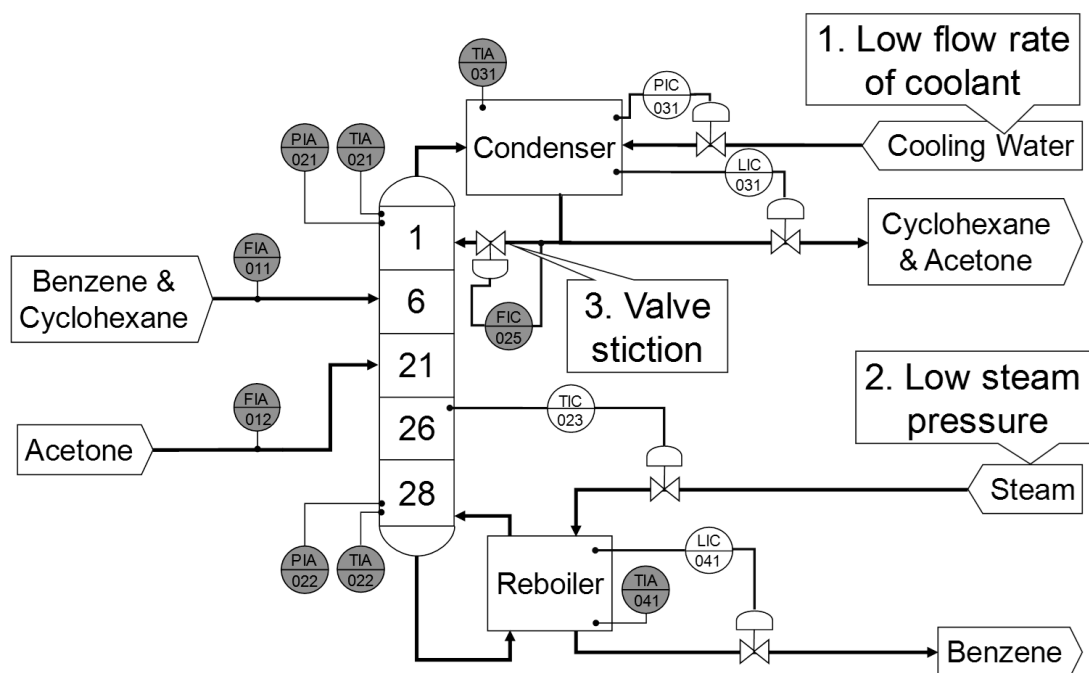


Fig. 2-3 Process flow diagram of azeotropic distillation column (倉田ら, 2011)

Table 2-2 Process variables and alarm settings

Tag	Description	Normal operating condition	Alarm PH	Alarm PL	Unit
FIA012	Acetone flow rate	95.0	99.1(A ₁)	90.9(A ₁₀)	kg/h
FIA011	Feed flow rate	85.0	89.1(A ₂)	80.8(A ₁₁)	kg/h
TIA021	Top column temp.	54.1	54.2(A ₃)	54.0(A ₁₂)	°C
TIA022	Bottom column temp.	79.5	79.6(A ₄)	79.4(A ₁₃)	°C
TIA041	Reboiler temp.	81.1	81.2(A ₅)	81.0(A ₁₄)	°C
TIA031	Condenser temp.	54.0	54.1(A ₆)	53.9(A ₁₅)	°C
PIA021	Top column press.	102.2	102.3(A ₇)	102.1(A ₁₆)	kPa
PIA022	Bottom column press.	115.9	116.0(A ₈)	115.8(A ₁₇)	kPa
FIC025	Reflux flow rate	2830	2831(A ₉)	2829(A ₁₈)	kg/h

$S = A_{11}, A_2, A_7, A_3, A_6, A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_{14}, A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13},$
 $A_{14}, A_7, A_8, A_6, A_3, A_5, A_4, A_5, A_{10}, A_1, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5, A_4, A_{17},$
 $A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_{14}, A_{17}, A_{11}, A_2, A_{11}, A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_7, A_8, A_3, A_6, A_5,$
 $A_4, A_5, A_{17}, A_{16}, A_{17}, A_7, A_3, A_6, A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_{14}, A_1, A_{10}, A_1, A_{17},$
 $A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7, A_6, A_3, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_{11}, A_2,$
 $A_{11}, A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_7, A_8, A_3, A_6, A_5, A_4, A_5, A_7, A_6, A_3, A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16},$
 $A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_{13}, A_{12}, A_{15}, A_{12}, A_{16}, A_{10}, A_1, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7, A_6, A_3, A_5, A_4,$
 $A_5, A_{17}, A_{16}, A_{15}, A_{12}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5, A_{17}, A_{16}, A_{12},$
 $A_{15}, A_{17}, A_{11}, A_2, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{12}, A_{14}, A_{15},$
 $A_{12}, A_1, A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_7, A_8, A_6, A_3, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{17}, A_7, A_3, A_6, A_8, A_5,$
 $A_4, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_{14}, A_{11}, A_2, A_{11}$

Fig. 2-4 Simulated plant operation data

2.4.2 ドットマトリックス解析結果

15 日間分のプラント運転データから、ドットマトリックス解析により連鎖アラームの抽出を試みた。ドットマトリックス解析の結果を Fig. 2-5 に示す。図中の○印はドットを表し、対角線方向に並んだドットを点線の枠で囲んだ。点線で囲んだ領域は、同じ発報パターンのアラーム配列が2回以上発生していること、すなわち連鎖アラームの発生を意味する。Fig. 2-5 から、15 日間に 40 個の連鎖アラームが発生していること、連鎖アラームが時間的に偏りなく発生していること、一つの連鎖アラームに含まれるアラームの数が最少 2 個、最大 14 個であることが読み取れる。

15 日間分のプラント運転データから、18 種類、40 個の連鎖アラームが抽出された。ドットマトリックス解析により抽出された 18 種類の連鎖アラームの発生回数、連鎖アラームに含まれるアラームの種類とそれらの発報順に整理したものを Table 2-3 に示す。連鎖アラームの最多発生回数は 3 回、一つの連鎖アラームに含まれるアラーム数の最大値は 14 であった。Table 2-3 から、たとえば連鎖アラーム s_{18} に含まれるアラーム数は 14、 s_{18} の発生回数が 2 回であることから、 s_{18} を何らかの方法で削減できれば合計 28 個のアラームを削減できることがわかる。

単一の連鎖アラームの発生回数が最大 3 回と少なかったのは、同じ連鎖アラームであっても、プラントマルファンクション発生時のプラントの状態によってアラームの発報順やアラームの種類が一部入れ替わり、異なる連鎖アラームとして抽出されたためと考えられる。そこで、連鎖アラームの類似度をレーベンシュタイン距離により評価し、連鎖アラームのさらなる集約と解析を試みる。

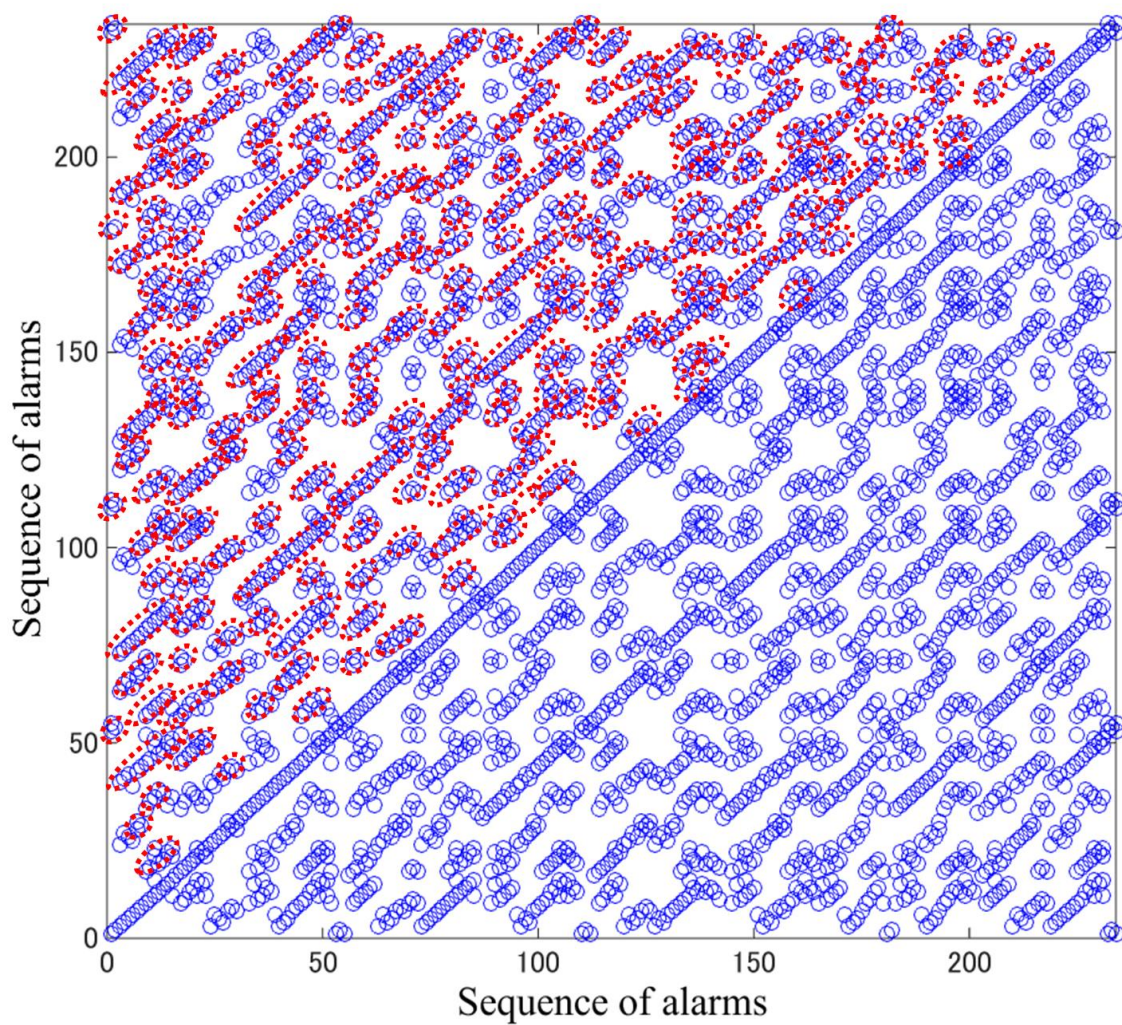


Fig. 2-5 Results of Dot Matrix Analysis of plant operation data of azeotropic distillation column

Table 2-3 Sequential alarms by Dot Matrix Analysis

s	Fre.	Alarm sequence
s_1	2	A_5, A_4
s_2	2	A_7, A_8
s_3	2	A_{12}, A_{15}
s_4	3	A_{15}, A_{12}
s_5	3	A_{17}, A_{16}
s_6	3	A_5, A_{17}, A_{16}
s_7	2	A_7, A_3, A_6
s_8	2	A_{11}, A_2, A_{11}
s_9	2	A_{17}, A_{11}, A_2
s_{10}	2	A_3, A_6, A_5, A_4
s_{11}	2	A_6, A_3, A_5, A_4
s_{12}	2	$A_{15}, A_{12}, A_{14}, A_{15}, A_{12}$
s_{13}	3	$A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_{14}$
s_{14}	2	$A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}$
s_{15}	2	$A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_7, A_8$
s_{16}	2	$A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5$
s_{17}	2	$A_7, A_3, A_6, A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{13}, A_{14}$
s_{18}	2	$A_{10}, A_1, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7, A_6, A_3, A_5, A_4$

2.4.3 連鎖アラームの抽出結果の考察

プラント運転データから抽出された 18 種類の連鎖アラームを、類似度に基づき集約した連鎖アラームのトップ 3 ランキング（合計発生回数基準）を Table 2-4 に示す。なお、レーベシュタイン距離計算のコストは、先行研究（赤塚ら, 2013）を参考に $c_{\text{Ins}} = c_{\text{Del}} = 1$ 、 $c_{\text{Sub}} = 1.5$ で、グルーピング閾値 $M_{\text{min}} = 0.58$ とした。Fig. 2-6 中のセルの色は、赤に近いほど二つの連鎖アラーム間の類似度が高く、青に近いほど二つの連鎖アラーム間の類似度が低いことを意味する。類似度評価結果から、18 個の連鎖アラームをさらにグルーピングした結果を Fig. 2-7 に示す。

Table 2-4 The list of top 3 sequential alarms

G	Fre.	Alarm sequence
G_1	7	$A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_{14} (s_{13})$
		$A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13} (s_{14})$
		$A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_7, A_8 (s_{15})$
G_2	6	$A_{17}, A_{16} (s_5)$
		$A_5, A_{17}, A_{16} (s_6)$
G_3	4	$A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5 (s_{16})$
		$A_{10}, A_1, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7, A_6, A_3, A_5, A_4 (s_{18})$
G_4	4	$A_3, A_6, A_5, A_4 (s_{10})$
		$A_6, A_3, A_5, A_4 (s_{11})$

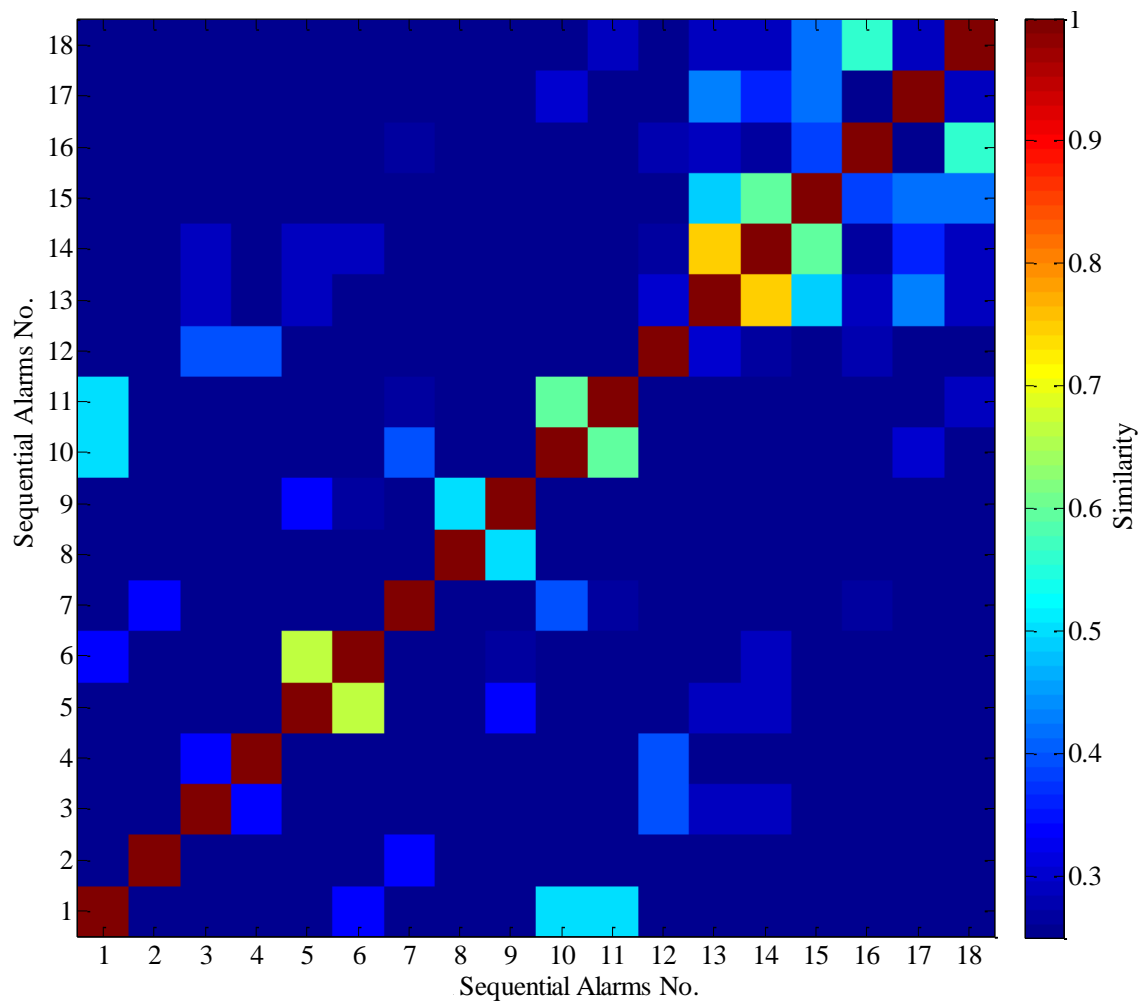


Fig. 2-6 Similarity color map of sequential alarms in plant operation data of azeotropic distillation column

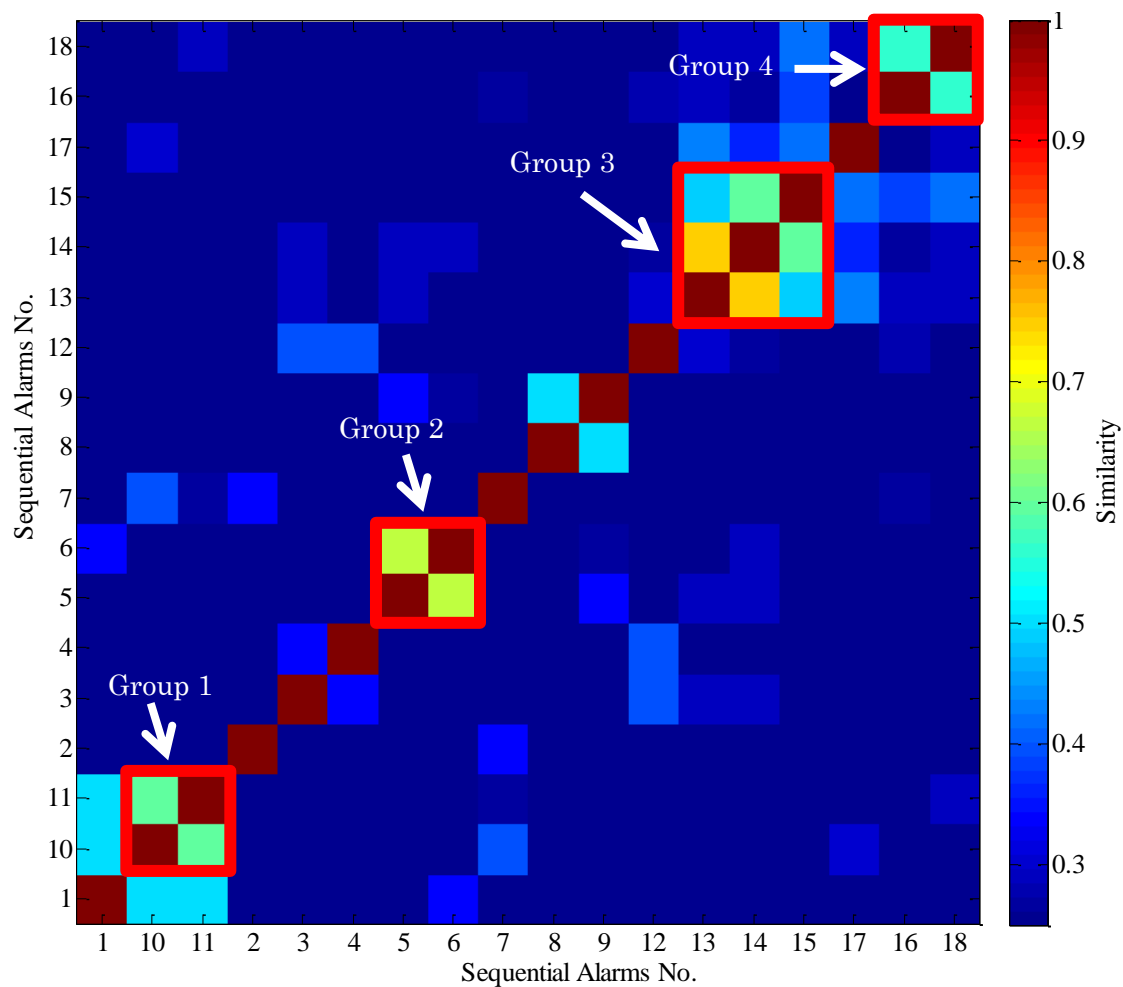


Fig. 2-7 Clustered sequential alarms in plant operation data of azeotropic distillation column

グループ $G_1 \sim G_3$ の連鎖アラームに含まれているアラームを詳しく見ると、すべての連鎖アラームに A_{16} (塔頂圧力 PL) および A_{17} (塔底圧力 PL) が含まれている。また、グループ G_1 と G_3 は、 A_{12} (塔頂温度 PL)、 A_{13} (塔底温度 PL)、 A_{14} (リボイラ温度 PL)、 A_{15} (コンデンサ温度 PL) を共通に含んでいる。 $A_{12} \sim A_{17}$ のアラームはいずれも PL (下限値) アラームであることから、これらの連鎖アラームは、リボイラスチーム圧の低下によるものであると考えられる。

リボイラスチーム圧の低下検知に適したアラームとしては、マルファンクションの発生源に近い A_{13} (塔底温度 PL)、 A_{14} (リボイラ温度 PL) および A_{17} (塔底圧力 PL) が考えられる。現在のアラーム設定では、 A_{17} がほとんどの連鎖アラームのファーストアラームもしくはセカンドアラームであり、また繰り返し発報していないことから、リボイラスチーム圧の低下を検知するためのアラームとして適切であると考えられる。しかし、圧力測定値は外乱によって変動しやすいため、繰り返しアラームとならないよう管理範囲を適切に設定する必要がある。それ以外のアラームについては削減や管理範囲の変更を検討する。

グループ G_4 に分類された連鎖アラームは、 A_3 (塔頂温度 PH)、 A_4 (塔底温度 PH)、 A_5 (リボイラ温度 PH)、 A_6 (コンデンサ温度 PH) の4種類から構成され、これらのアラームはいずれも PH (上限値) アラームである。 $A_3 \sim A_6$ のアラームはすべて塔内温度の上昇を意味することから、これらの連鎖アラームは冷却水量の低下もしくは還流バルブの固着に起因するものであると考えられる。冷却水量の低下を検知するためのアラームとしては、マルファンクションの発生源に近い A_6 (コンデンサ温度 PH) や A_3 (塔頂温度 PH) が適当である。 A_4 (塔底温度 PH) や A_5 (リボイラ温度 PH) は、マルファンクションの発生源から遠いことから、冷却水量低下の検知を目的とするアラームとしては適当ではない。 A_4 (塔底温度 PH) や A_5 (リボイラ温度 PH) は、設定解除や管理範囲の変更を検討する。

同一のプラント運転データからイベント相関解析により抽出された連鎖アラームは、

$J_1=\{A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8\}$ と $J_2=\{A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}, A_{16}, A_{17}\}$ の二種類であった(倉田ら, 2011)。 J_1 および J_2 は、それぞれの連鎖アラームに含まれるアラームの集合を表し、アラームの発報順を表さない。 J_1 のアラームは G_1 、 G_3 のすべての連鎖アラームに含まれているため、イベント相関解析では、 G_1 と G_3 は一つの連鎖アラームに集約される。 G_1 と G_3 には共通部分はあるが、共通しない部分もあるため、異なる連鎖アラームとして抽出できたほうがよい。この結果は、ドットマトリックス解析によりイベント相関解析の問題点を回避できた一つの例である。

2.5 まとめ

プラントアラームシステムで発生した連鎖アラームを、プラント運転データのドットマトリックス解析により抽出する方法を提案した。提案手法を共沸蒸留プロセスの運転データに適用した結果、連鎖アラームを抽出することができた。また、連鎖アラームを構成するアラーム情報から、個々のアラームの管理範囲変更や削除などの方針を検討することができた。

プラント運転データの中から連鎖アラームを抽出し、類似度に基づき少数のグループに集約すれば、連鎖アラームの効率的な削減に寄与できる。また、連鎖アラームの削減効果を定量的に把握できるため、費用対効果の観点から連鎖アラームの削減対策に優先順位をつけることもできる。提案法はプラント情報が不要であるため、異なるプラントにもそのまま適用できる。今後、様々な化学プラントへの適用が進み、アラームシステムの適正化を通じた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。

記号

A	= alarm	[-]
c	= edit cost	[-]
d	= levenshtein distance	[-]
G	= group	[-]
J	= sequential alarm by event correlation analysis	[-]
L	= levenshtein distance	[-]
\hat{L}	= normalized levenshtein distance	[-]
M	= similarity	[-]
N	= number	[-]
S	= sequence	[-]
s	= subsequence	[-]
x, y	= character	[-]
δ	= edit cost	

<下付き>

k, l	= k th and l th
i, j	= i th and j th
Ins	= insertion
Del	= deletion
Sub	= substitution

参考文献

1. Bellman, R.; *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton (1957)
2. Cheng, Y., Izadi, I. and Chen, T.; “Pattern Matching of Alarm Flood Sequences by A Modified Smith-Waterman algorithm”, *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 1085-1094 (2013)
3. Gibbs, A. J., and McIntyre, G. A.; “The Diagram Method for Comparing Sequences. Its Use with Amino Acid and Nucleotide Sequence,” *European Journal of Biochemistry*, 16, 1-11 (1970)
4. Jurafsky, D., and Martin, J. H.; *Speech and Language Processing 2nd Edition*, Prentice Hall, New Jersey (2009)
5. Kondaveeti, S. R., Shah, S. L. and Izadi, I.; “Application of Multivariate Statistics for Efficient Alarm Generation,” *Proceedings of 7th IFAC Symposium of Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, 657-662 (2009)
6. Lesot, M. J., Rifqi, M., and Benhadda, H.; “Similarity Measures for binary and Numerical Data: A Survey,” *International Journal of Knowledge Engineering and Soft Data Paradigms*, 1, 63-84 (2009)
7. Levenshtein, V. I.; “Binary Codes Capable of Correcting Deletions, Insertions, and Reversals,” *Cybernetics and Control Theory*, 10(8), 707-710 (1966)
8. Mount, D. W.; *Bioinformatics Sequence and Genome Analysis Second Edition*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York (2004)
9. 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)
10. Smith, T. F., and Waterman, M. S.; “Identification of Common Molecular Subsequences,” *J. Mol. Biol.*, 147, 195-197 (1981)
11. Yang, F., Shah, S. L., Xiao, D., and Chen, T.; “Improved Correlation Analysis and Visualization of Industrial Alarm Data”, *ISA Transactions*, 51(4), 499-506 (2012)

12. Yujian, L., and Bo, L.; “A Normalized Levenshtein Distance Metric,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(6), 1091-1095 (2007)
13. 赤塚祥太, 野田賢, 杉本謙二; “レーベンシュタイン距離に基づく連鎖アラームの類似性解析”, *化学工学論文集*, 39(4), 352-358 (2013)
14. 樋口文孝, 野田賢, 西谷紘一; “イベント相関解析によるエチレンプラントのアラーム削減”, *化学工学論文集*, 36(6), 576-581 (2010)
15. 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*, 37(6), 539-545 (2011)
16. 倉田浩二郎, 野田賢, 菊池康紀, 平尾雅彦; “プラントアラームシステム適正化のためのイベント相関解析法の拡張”, *化学工学論文集*, 37(4), 338-343 (2011)

第3章

ノイジーなプラント運転データに対する 連鎖アラーム抽出法

3.1 はじめに

第2章では、ドットマトリックス解析によるプラント運転データからの連鎖アラーム抽出法を提案した。しかし、運転データ中にノイズが多い場合、類似した連鎖アラームのグルーピングのためには、レーベンシュタイン距離のコストや閾値などを適切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、実プラントへ適用する際の課題となっていた。本章では、この問題点に対して、連鎖アラーム抽出法の改善を試みる。

3.2 ドットマトリックス解析法の問題点

ドットマトリックス解析法には、プラント運転データ中からすべての重複するアラーム発報パターンを抽出し、視覚的に同定することができるというメリットがある。しかし、ノイズを多く含むプラント運転データに適用する際に、繰返す類似アラーム発報パターンを連鎖アラームとして抽出することができないというデメリットもある。

たとえば、Eq. (3-1)のように、一つのアラーム配列の中に、類似したアラーム発報パターン「 A_1, A_2, A_3, A_4 」と「 A_1, A_2, A_7, A_4 」二つの部分列が存在する場合を考える。この二つの部分列は、三番目のアラーム要素のみが違って、その他の三つのアラームの種類と順番は全部一致する。ノイズを多く含む運転データでは、同じプラントマルファンクションで発生した連鎖アラームの中に、このようなランダムなアラームが混入していることが多い。この例では、類似した連鎖アラームの発報パターン「 A_1, A_2, A_4 」の間に、 A_3 と A_7 が「挿入」されている。ドットマトリックス解析法では、Eq. (3-1)のようなアラーム配列から、連鎖アラーム「 A_1, A_2, A_4 」を抽出することはできない。

$$S = A_5, \underline{A_1, A_2, A_3, A_4}, A_6, \underline{A_1, A_2, A_7, A_4}, A_8, A_9, A_{10}, A_3, A_4, A_6, A_{10} \quad (3-1)$$

3.3 スライディングウィンドウを用いたドットマトリックス解析

ドットマトリックス解析において、スライディングウィンドウを用いて DNA データを比較することでランダムなノイズをフィルタリングする方法がある (Mount, 2004)。この方法を提案する連鎖アラーム抽出法に応用することを考える。具体的にはこれまでのドットマトリックス解析のように、プラント運転データから変換したアラーム配列の一つ一つのアラーム同士を比較するかわりに、アラーム配列中の隣接するアラームを含むウィンドウ同士を比較し、一致数がある数以上のときのみドットを打つ。ウィンドウのサイズと一致条件は任意で、たとえば、ウィンドウサイズが 4、一致条件が 75% の場合、ウィンドウ中に 3~4 の一致があったときにウィンドウの場所にドットを打つ。

例として Eq. (3-1) のアラーム配列 S にフィルタリングのためのウィンドウを適用した場合について説明する。ウィンドウサイズを $N_{ws} = 4$ とすると、Table 3-1 のようにアラーム配列 S は 14 個のウィンドウ W_i ($i = 1 \sim N_{win}$) に変換できる。1 番から 14 番までのウィンドウはすべて 4 個の隣接するアラームで構成される。14 個のウィンドウを一つのグラフの横軸と縦軸に並べ、それぞれのウィンドウを比較し、中に含まれるアラームの順番と種類が全部もしくは一致条件以上一致した場合にグラフにドットを打つ。この例では、一致条件 (M) はウィンドウに含まれるアラーム総数の $M = 75\%$ とする。ドットマトリックス解析の結果を Fig. 3-1 に示す。解析結果グラフの右下三角が空白になっているのは、右下三角の結果と左上三角の結果が同じで、右下三角の結果を省略することにより、計算時間を短縮することができるためである。(2, 7) のドットは W_2 と W_7 中に含まれるアラームは重複した連鎖アラームであることを表す。一方、(3, 13)、(4, 14) のドットは対角線方向に連続するということより、 W_3+W_4 と $W_{13}+W_{14}$ 中に含まれるアラームが連鎖アラームであることがわかる。最終的に、Table 3-2 に示すように、二種類の連鎖アラームとして s_1 と s_2 が抽出された。この結果を利用し、プラント運転データ中の不要アラームの削減が可能である。

ドットマトリックス解析では、ウィンドウサイズ N_{ws} と一致条件 M の設定は任意であ

る。プラントエンジニアは、これらのパラメータの様々な組合せを試みながら、最適な条件で見つけ出す必要がある。そこで、プラント運転データから連鎖アラームを抽出する際に、より効率的な連鎖アラームの削減するために、できるだけ長い連鎖アラームを優先的に抽出するようにウィンドウサイズを決定することとする。具体的には、大きいウィンドウサイズ N_{ws} から小さいウィンドウサイズまで減らしてドットマトリックス解析を繰り返す。提案手法のステップを以下に示す。

ステップ1: プラント運転データ中のアラームを発報順番に並べて、アラーム配列を形成する。

ステップ2: 最初のウィンドウサイズ N_{ws} と一致条件 M を設定する。

ステップ3: スライディングウィンドウを利用し、アラーム配列 S から連鎖アラーム s を抽出し、グルーピングする。抽出した連鎖アラーム s をアラーム配列 S から取り除く。

ステップ4: N_{ws} がウィンドウサイズ最小値に達した場合、ステップ6に進む。

ステップ5: ウィンドウサイズ N_{ws} を $N_{ws}-1$ に取替え、ステップ3に戻る。

ステップ6: 抽出した連鎖アラームをアウトプットする。

Table 3-1 Alarm sequence in window ($N_{win} = 14, N_{ws} = 4$)

Windows	Alarm sequence
W_1	A_5, A_1, A_2, A_3
W_2	A_1, A_2, A_3, A_4
W_3	A_2, A_3, A_4, A_6
W_4	A_3, A_4, A_6, A_1
W_5	A_4, A_6, A_1, A_2
W_6	A_6, A_1, A_2, A_7
W_7	A_1, A_2, A_7, A_4
W_8	A_2, A_7, A_4, A_8
W_9	A_7, A_4, A_8, A_9
W_{10}	A_4, A_8, A_9, A_1
W_{11}	A_8, A_9, A_1, A_3
W_{12}	A_9, A_1, A_3, A_4
W_{13}	A_1, A_3, A_4, A_6
W_{14}	A_3, A_4, A_6, A_{10}

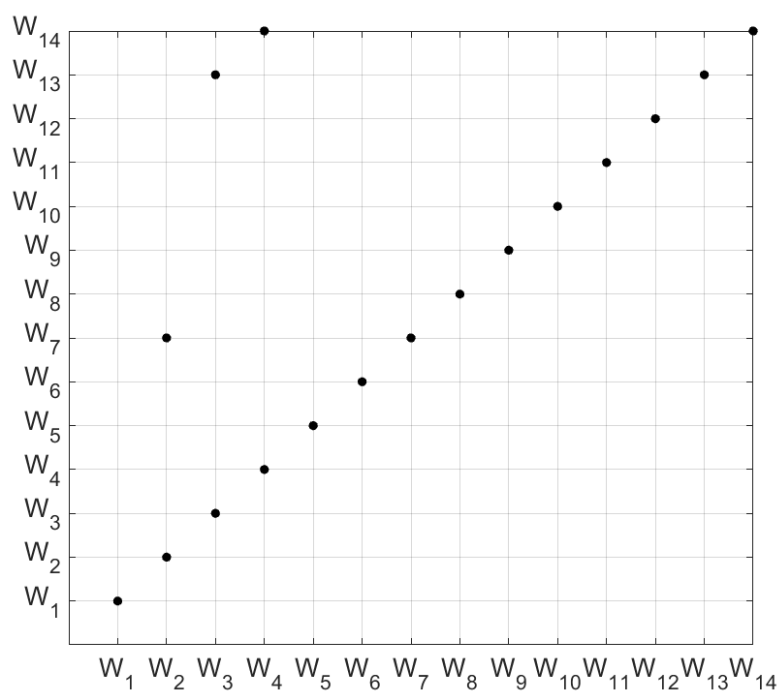


Fig. 3-1 Example results of Dot Matrix Analysis with sliding window
($N_{win} = 14, N_{ws} = 4, M = 75\%$)

Table 3-2 Sequential alarms identified using Dot Matrix Analysis with sliding window
($N_{win} = 14, N_{ws} = 4, M = 75\%$)

Sequential alarms	Window	Alarm sequence
s_1	W_2	A_1, A_2, A_3, A_4
	W_7	A_1, A_2, A_7, A_4
s_2	$W_3 + W_4$	A_2, A_3, A_4, A_6, A_1
	$W_{13} + W_{14}$	$A_1, A_3, A_4, A_6, A_{10}$

3.4 ケーススタディ

3.4.1 対象プロセス

提案する改良型ドットマトリックス解析の有効性を検証するため、提案手法を第2章と同じ共沸蒸留プロセスのシミュレーションデータ（倉田ら, 2011）に適用する。プロセスフローとアラーム設定をそれぞれ Fig. 3-2、Table 3-3 に示す。

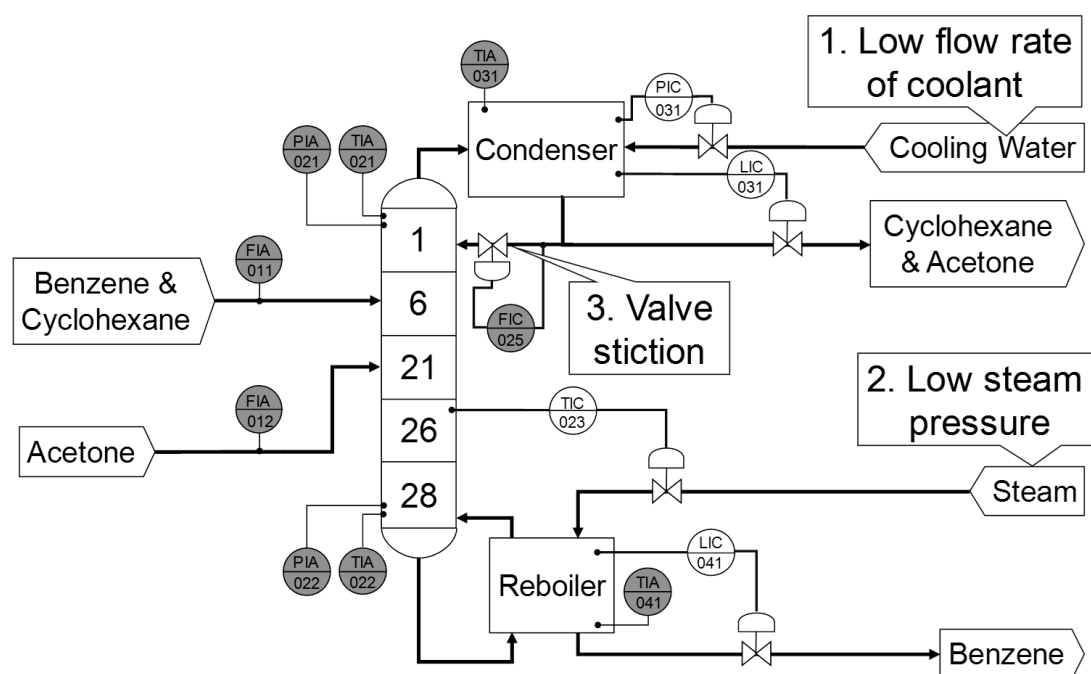


Fig. 3-2 Process flow diagram of azeotropic distillation column (倉田ら, 2011)

Table 3-3 Process variables and alarm settings

Tag	Description	Normal operating condition	Alarm PH	Alarm PL	Unit
FIA012	Acetone flow rate	95.0	99.1(A ₁)	90.9(A ₁₀)	kg/h
FIA011	Feed flow rate	85.0	89.1(A ₂)	80.8(A ₁₁)	kg/h
TIA021	Top column temp.	54.1	54.2(A ₃)	54.0(A ₁₂)	°C
TIA022	Bottom column temp.	79.5	79.6(A ₄)	79.4(A ₁₃)	°C
TIA041	Reboiler temp.	81.1	81.2(A ₅)	81.0(A ₁₄)	°C
TIA031	Condenser temp.	54.0	54.1(A ₆)	53.9(A ₁₅)	°C
PIA021	Top column press.	102.2	102.3(A ₇)	102.1(A ₁₆)	kPa
PIA022	Bottom column press.	115.9	116.0(A ₈)	115.8(A ₁₇)	kPa
FIC025	Reflux flow rate	2830	2831(A ₉)	2829(A ₁₈)	kg/h

3.4.2 連鎖アラーム抽出結果と考察

初期ウィンドウサイズ $N_{ws, ini}$ と最小ウィンドウサイズ $N_{ws, min}$ を $N_{ws, ini} = 25$ と $N_{ws, min} = 6$ に、一致条件 M は 70% と設定した。改良型ドットマトリックス解析による連鎖アラーム抽出した結果を Table 3-4 に示す。連鎖アラームは、ウィンドウサイズ $N_{ws} = 21, 18, 16, 9, 6$ の条件で検出され、全部で 6 種類の連鎖アラーム ($s_1 \sim s_6$) が抽出された。

一番長い連鎖アラーム s_1 はウィンドウ $N_{ws} = 21$ の条件で抽出された。 s_1 の連鎖アラームには「置換」が 4 回発生しているが、二つアラーム配列の 81% の部分が同じアラーム種類と発報順番であるため、同じ種類の連鎖アラームとして抽出された。 s_1 のファーストアラーム A_{10} 以外のアラームは、エンジニアに新しい情報を与えないばかり、 A_{10} が提供した情報の再確認の負担だけをもたらすため、アラームマネジメント適正化の際に、削除するべきと考えられる。

6 種類の連鎖アラーム中に含まれるアラーム総数は 176 個であり、すべてのアラーム発報数の 75% を占めている。このように、スライディングウィンドウを利用する提案手法は、従来のドットマトリックス解析の結果と比べ、連鎖アラームをより少ない種類に集約することができるため、効率的なアラームの削減が可能である。

Table 3-4 Identified sequential alarms by Dot Matrix Analysis with sliding window

s_i	Alarm sequence
s_1	$A_{10}, A_1, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_{14}$
	$A_{10}, A_1, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7, A_6, A_3, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_{14}$
s_2	$A_{17}, A_{11}, A_2, A_{11}, A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_7, A_8, A_3, A_6, A_5, A_4, A_5, A_{17}$
	$A_{12}, A_{11}, A_2, A_{11}, A_{18}, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}, A_7, A_8, A_3, A_6, A_5, A_4, A_5, A_7$
s_3	$A_{12}, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{17}$
	$A_2, A_{17}, A_{13}, A_{16}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_8, A_7, A_3, A_6, A_5, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{12}$
s_4	$A_{11}, A_2, A_7, A_3, A_6, A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_{14}, A_{18}$
	$A_{16}, A_{17}, A_7, A_3, A_6, A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_{14}, A_1$
s_5	$A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{14}, A_{15}, A_{12}, A_{13}$
	$A_8, A_5, A_4, A_{17}, A_{16}, A_{12}, A_{15}, A_{14}, A_{13}$
s_6	$A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_8, A_7$
	$A_{16}, A_{14}, A_{12}, A_{15}, A_{13}, A_7$

3.5 まとめ

スライディングウィンドウを利用した新しいドットマトリックス解析方法を提案した。提案法により、ノイジーなプラント運転データであっても効率的に連鎖アラームを抽出することができる。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。

記号

A	= alarm	[-]
M	= stringency	[-]
N	= number	[-]
S	= alarm sequence	[-]
s	= alarm subsequence	[-]
W	= window	[-]

<下付き>

i	= i th windows
win	= windows
ws	= window size
ws, ini	= initial window size
ws, min	= minimum window size

参考文献

1. Mount, D. W.; *Bioinformatics Sequence and Genome Analysis Second Edition*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York (2004)
2. 倉田浩二郎, 野田賢, 菊池康紀, 平尾雅彦; “プラントアラームシステム適正化のためのイベント相関解析法の拡張”, *化学工学論文集*, 37(4), 338-343 (2011)

第4章

エチレンプラント運転データからの 連鎖アラーム抽出

4.1 はじめに

第4章では、ドットマトリックス解析を石油化学産業の代表的なプラントであるエチレンプラントの運転データに適用し、提案手法の有効性について検証する。

4.2 対象プラント

4.2.1 エチレンプラントの概要

対象とするエチレンプラントのプロセスフローを Fig. 4-1 に、機器番号と装置名を Table 4-1 に示す（樋口ら, 2010, 高井ら, 2011）。

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 で分離した後に、二次反応を防止するため、クエンチタワー（V2）急冷する。冷却した分解ガスを圧縮し、苛性ソーダ洗浄塔（V10）で洗浄し、水分を除去した後に、蒸留処理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。

4.2.2 エチレンプラントの監視制御システム

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が登録されている。プラントで発報したアラームの種類と発報時刻は、1分単位でプラント運転データとしてデータベースに記録される。

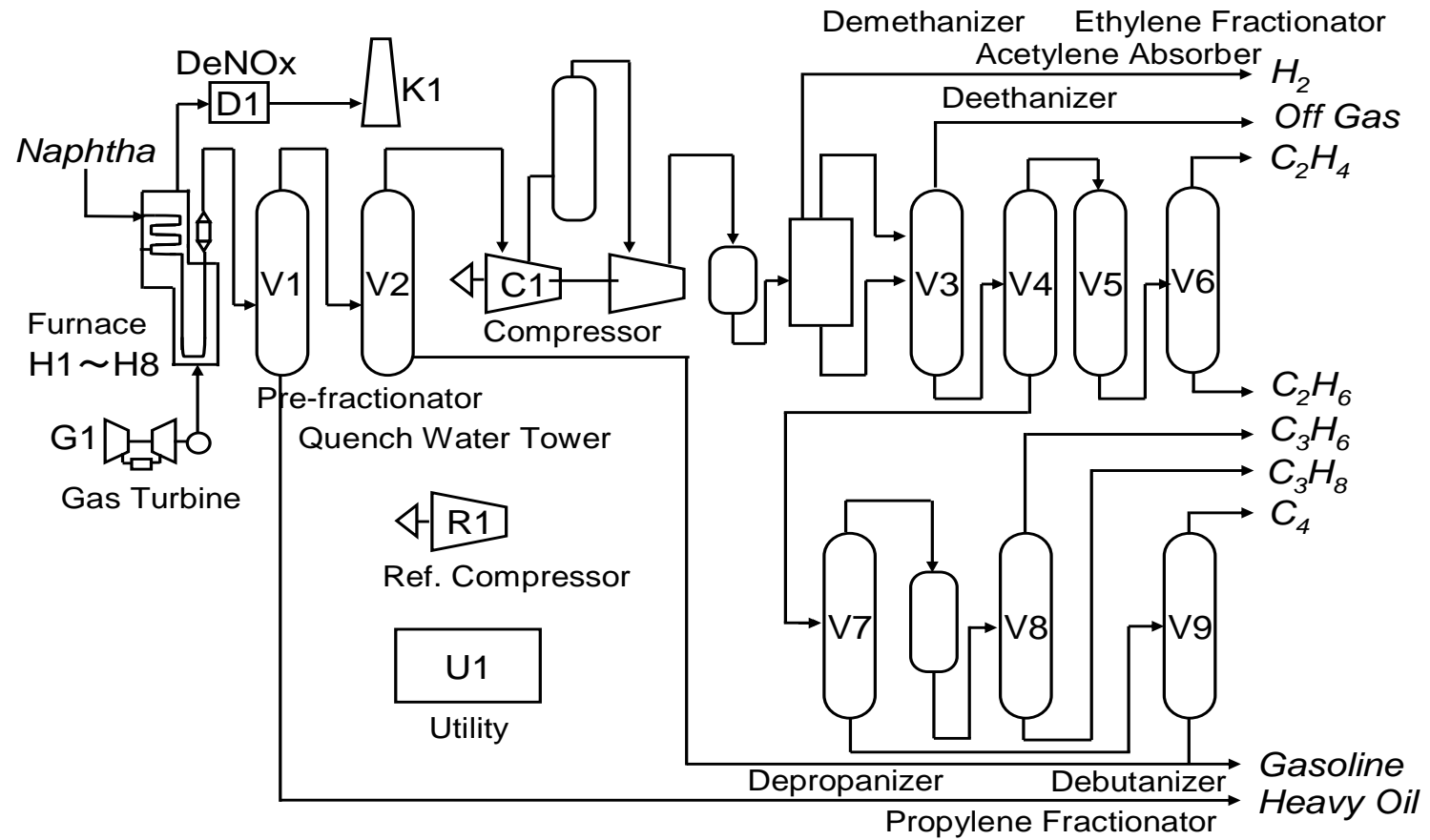


Fig. 4-1 Process flow of ethylene plant (樋口ら, 2010)

Table 4-1 Units in ethylene plant (樋口ら, 2010)

No.	Unit	No.	Unit
C1	Cracked gas compressor	V2	Quench water tower
D1	DeNO _x 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

4.2.3 プラント運転データ

ある1ヶ月間にエチレンプラントで発報したアラームは914種類で、アラームの発報回数の合計は16803であった。発報したアラームに1~914の種類番号を与え、各アラーム毎の発報時刻をFig. 4-2に示す。このグラフから、類似したアラームの発報パターンや連鎖アラームとなっているアラーム群を目視により見つけ出すことは難しい。Fig. 4-3にエチレンプラントにおける10分あたりのアラーム発報数を示す。エチレンプラントのアラームの発報頻度は、EEMUAのガイドライン（定常運転時の平均アラーム発報数は10min間に1回）を頻繁に超えており、発報頻度の最大値は10min間あたり30回以上にも達した。この結果から、エチレンプラントにおけるアラーム削減の必要性がわかる。

4.2.4 イベント相関解析による連鎖アラームの抽出

本章では、提案手法の適用結果とイベント相関解析（Nishiguchi and Takai, 2010）による連鎖アラーム抽出結果を比較する。イベント相関解析とは、機器の故障、地震や洪水などのタイミングなような離散的に発生するイベントの発生時間からなるイベントデータを対象としたデータマイニング手法である。プラント運転データに基づき、アラームや操作の発生系列の類似度をイベント相関解析により求め、連鎖アラームや不要アラーム・操作などを抽出する。同じエチレンプラント運転データに対するイベント相関解析による解析結果が報告されている（樋口ら, 2010）。

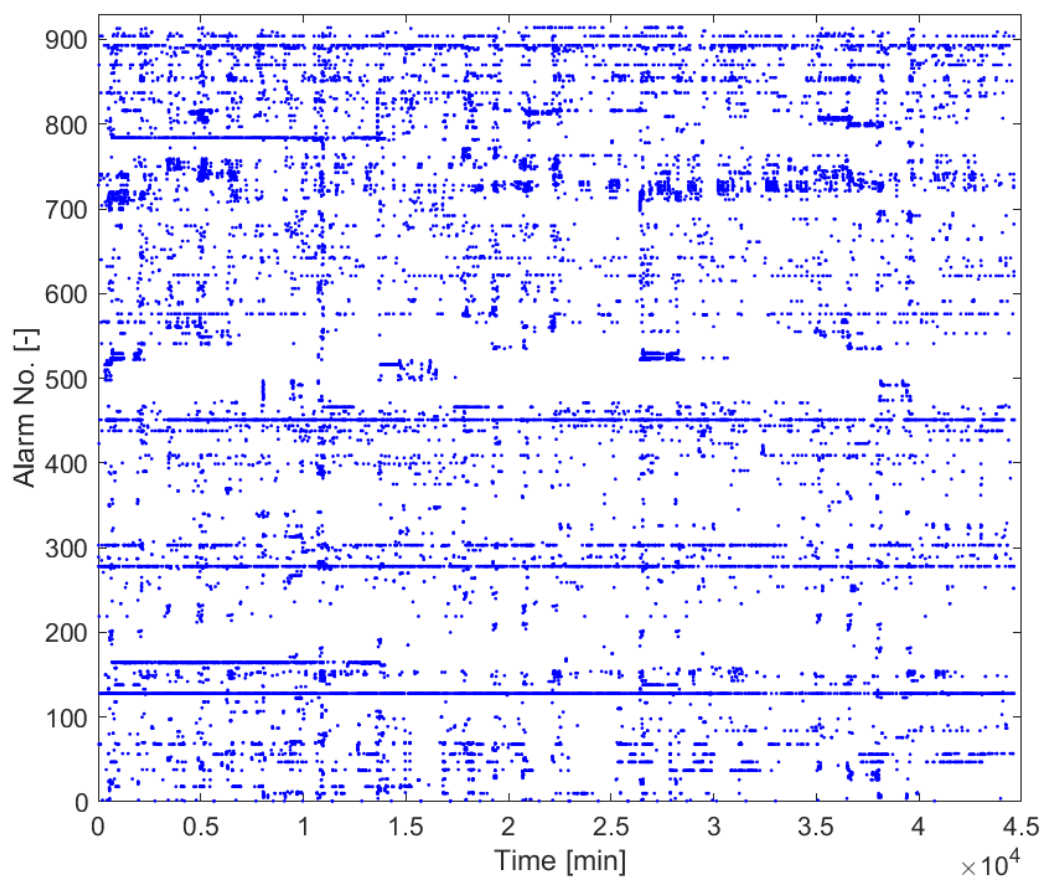


Fig. 4-2 Operation data of ethylene plant

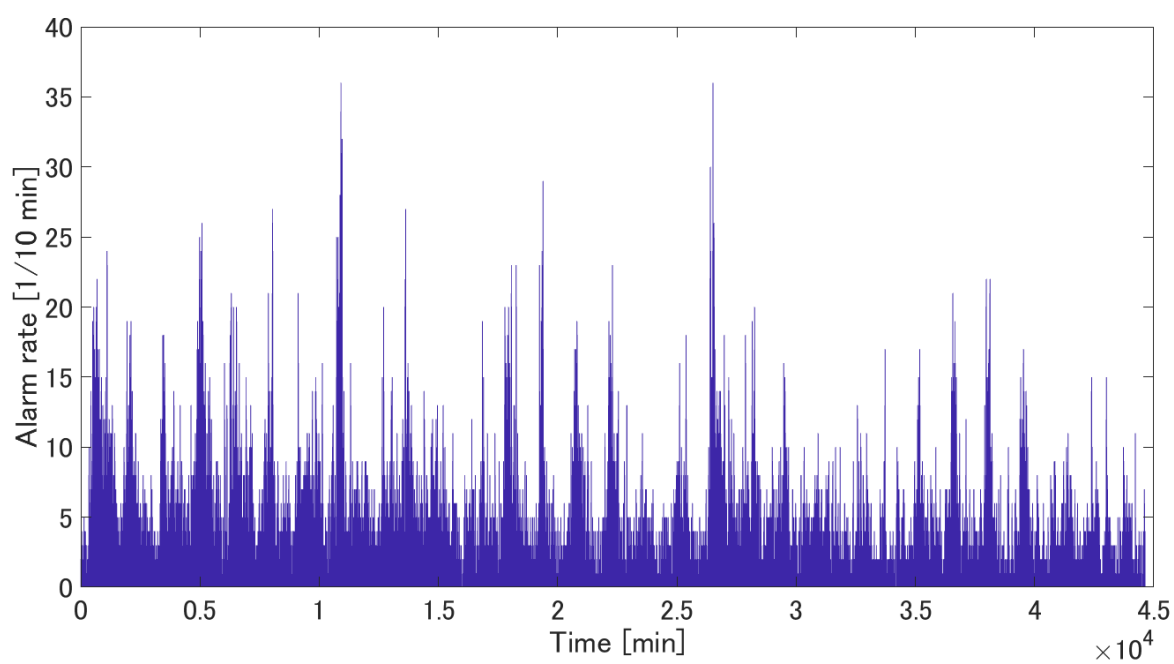


Fig. 4-3 Alarm rate per 10 min

4.3 エチレンプラント運転データのドットマトリックス解析

4.3.1 対象データの前処理

提案するドットマトリックス解析によるプラント運転データからの連鎖アラーム抽出法の有効性を検証するために、エチレンプラントの1ヶ月分の運転データにドットマトリックス解析を適用した。横軸に平行なドット列が連続して直線のようにになっている部分が多く存在している。これらの部分は、同じ種のアラームが繰り返し発報していること、すなわち繰り返しアラームの存在を意味する。繰り返しアラームは、運転データから類似するアラーム発報パターンを抽出する際に障害となるため、本研究では繰り返しアラームをデータ前処理の段階で運転データから削除する。具体的には、繰り返しアラームを取り除くために同一のアラームが2回以上連続して繰り返し発報したとき、それらを一個のアラームに集約した。その結果、アラームの総発報回数は16803回から15953回に減少した。前処理したプラント運転データを Fig. 4-4 に示す。

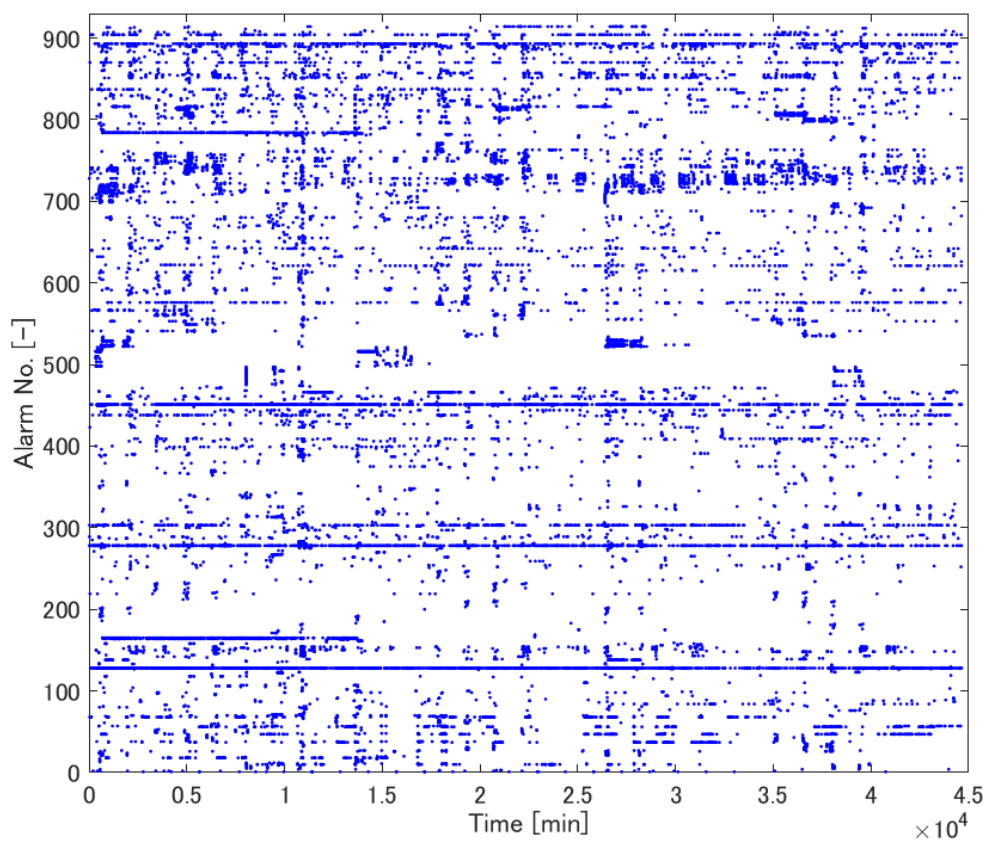


Fig. 4-4 Operation data of ethylene plant without repeating alarm

4.3.2 ドットマトリックス解析結果

前処理されたプラント運転データに第2章で紹介した従来型のドットマトリックス解析を適用した。ドットマトリックス解析には Table 4-2 に示すスペックのコンピュータとソフトウェアを用いた。プログラミングソフトウェアは MathWorks 社の MATLAB を用いた。MATLAB は行列演算処理が高速であるが、ループ演算が多い場合、演算処理の速度が極端に低下する。そこで本研究では、ループ演算部分のコーディングに、C 言語を用いた。C 言語のコードを MEX 化することで、ループ演算の高速化を実現した。

1ヶ月分の運転データのドットマトリックス解析の計算時間は10時間43分であった。ドットマトリックス解析の結果を Fig. 4-5 に示す。左上半面のドットはすべてのマッチしたアラームを示し、連鎖アラームとして抽出したアラームを右下半面のドットで示す。右下半面にドットの列が複数存在することから、運転データ中に多数の連鎖アラームが含まれていることがわかる。結果を詳しく解析するため、アラーム発報順番100番から200番までのドットマトリックス解析結果を拡大したグラフを Fig. 4-6 に示す。右下半面のドット列は対角線に平行であることから、これらのドット列は連鎖アラームであることがわかる。

Table 4-2 Specification of computer

CPU	Intel (R) Core (TM) i7-3770K 3.50GHz
Memory	16GB
Operation system	64-bit windows 7
Software	MATLAB R2017a

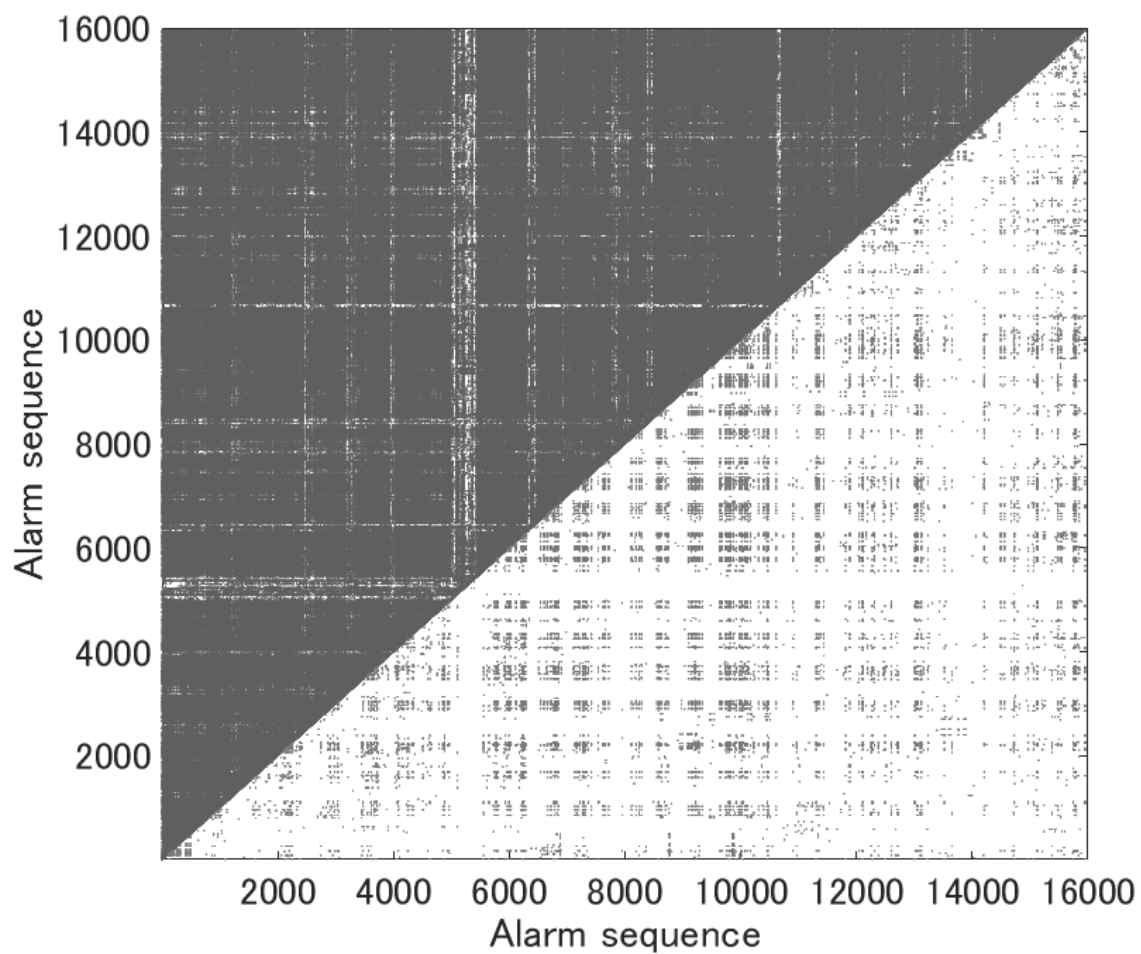


Fig. 4-5 Result of Dot Matrix Analysis of operation data of ethylene plant

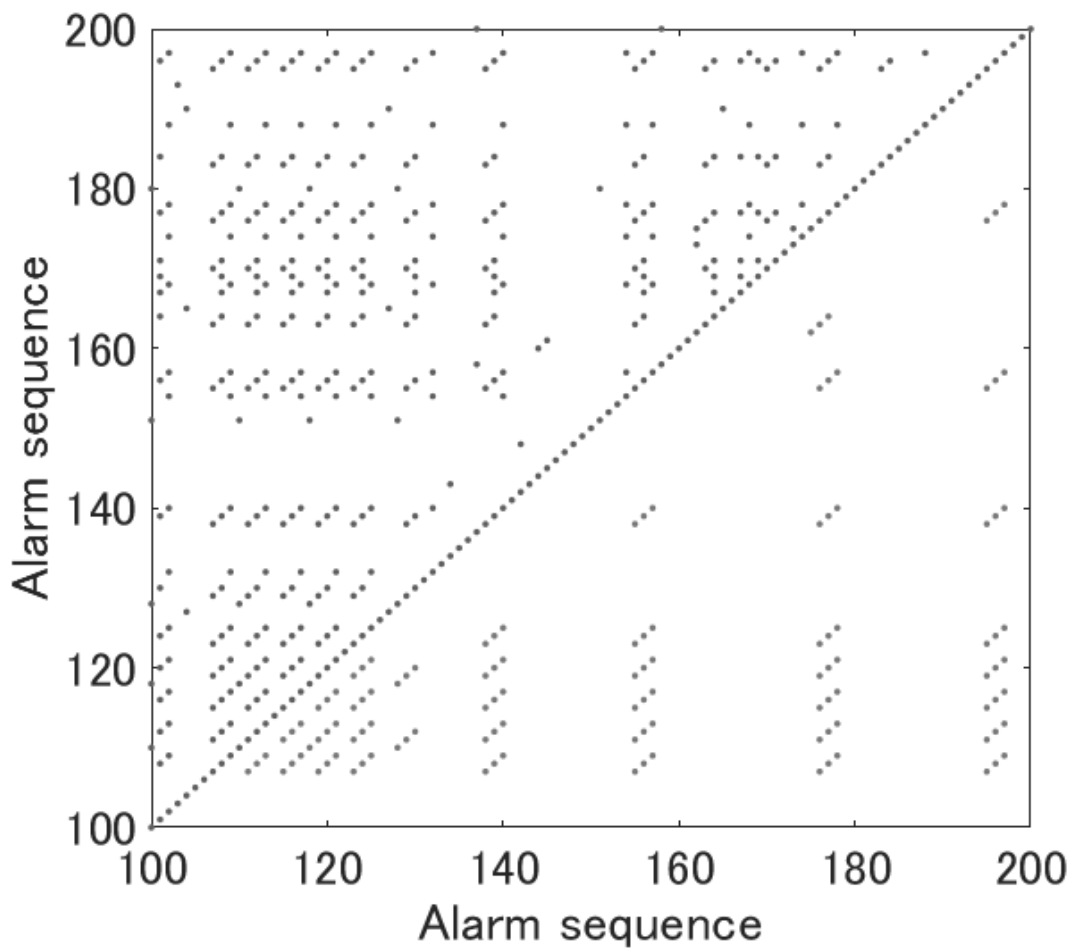


Fig. 4-6 Part of the result of Dot Matrix Analysis

ドットマトリックス解析の結果、437種類の連鎖アラームが抽出された。すべての連鎖アラームに含まれるアラーム総数は3853個であり、アラーム総発報回数の約24%を占めた。

連鎖アラームの発報頻度は最小6回から最大16回であった。発報頻度の上位10種類の連鎖アラームをTable 4-3に示す。たとえば、最上位の連鎖アラームは1ヶ月間の運転データに16回現れ、三つのアラーム A_{451} , A_{128} , A_{451} が $A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{451}$ の順に発報している。 A_{128} , A_{451} は用役装置 (U1) 中の冷却用海水に関連するアラームであるため、連鎖アラームの原因マルファンクションとして、U1 (用役装置) の冷却海水が関係していると推定される。Table 4-3の10種類の連鎖アラームは、ランキング5番と8番を除きU1 (用役装置) と関連する A_{451} , A_{128} が含まれている。このことから、エチレンプラントで発生する連鎖アラームの多くが、U1 (用役装置) の運転を見直すことで削減できると考えられる。

つぎに、長さの上位10位までの連鎖アラームをTable 4-4に示す。それぞれの連鎖アラームには6個から8個のアラームが含まれていた。たとえば、最上位の連鎖アラームでは、8個のアラームが $A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{451} \rightarrow A_{278} \rightarrow A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{451} \rightarrow A_{128}$ の順に発報し、1ヶ月間に2回現れた。 A_{128} , A_{451} は用役装置 (U1) 中の冷却用海水に関連するアラームであり、 A_{278} は急冷塔 (V2) に関連するアラームであるため、連鎖アラームの原因マルファンクションは、U1 (用役装置) の冷却用海水に関係していると推定される。

以上の結果から、用役装置 (U1) 中の冷却用海水に関連するアラームの発報頻度は高いことがわかった。発報頻度の高い A_{450} , A_{451} , A_{128} などのアラームを運転データで追跡した結果、それらのアラームが1ヶ月分の運転データ中でよく繰り返し発報していたことがわかった。対象データの前処理では、一部の繰り返しアラームを除去したが、 A_{450} , A_{451} , A_{128} などのような繰り返しアラームは対象データ中から除去しきれなかったため、連鎖アラーム抽出結果中に繰り返しアラーム多く見られた。今回の解析対象となるエチレンプラントの運転データが、ドットマトリックス解析を適用するデータとして、

必ずしも適切なデータとなっていないと考えられる。

Table 4-3 Top 10 frequent sequential alarms

Rank	Fre.	Alarm sequence	Related units
1	16	$A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{451}$	U1
2	15	$A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{451} \rightarrow A_{128}$	U1
3	14	$A_{128} \rightarrow A_{451} \rightarrow A_{128}$	U1
4	14	$A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{278}$	V2, U1
5	11	$A_{805} \rightarrow A_{806} \rightarrow A_{807} \rightarrow A_{808}$	H5
6	9	$A_{450} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{893}$	V5, U1
7	8	$A_{450} \rightarrow A_{451} \rightarrow A_{128}$	U1
8	7	$A_{278} \rightarrow A_{165} \rightarrow A_{784}$	V2, H2
9	6	$A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{56}$	H6, U1
10	6	$A_{451} \rightarrow A_{128} \rightarrow A_{303}$	V8, U1

Table 4-4 Top 10 longest sequential alarms

Rank	Fre.	Len.	Alarm sequence	Related units
1	2	8	A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₄₅₁ →A ₂₇₈ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈	V2, U1
2	2	7	A ₄₅₀ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₅₁₆ →A ₄₅₀ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈	H2, U1
3	2	7	A ₁₂₈ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₁₆₅ →A ₇₈₄	H2, U1
4	2	6	A ₈₉₃ →A ₁₂₈ →A ₈₁₂ →A ₈₁₃ →A ₈₁₄ →A ₈₁₅	H6
5	2	6	A ₈₂₆ →A ₁₆₄ →A ₁₆₅ →A ₇₈₄ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈	H2, U1
6	2	6	A ₅₁₆ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₄₅₁ →A ₅₁₆ →A ₁₂₈	H2, U1
7	2	6	A ₄₅₁ →A ₈₁₆ →A ₄₅₁ →A ₈₁₆ →A ₁₂₈ →A ₈₁₆	H6, U1
8	2	6	A ₄₅₁ →A ₈₁₂ →A ₈₁₃ →A ₈₁₄ →A ₈₁₅ →A ₁₂₈	H6, U1
9	2	6	A ₁₆₅ →A ₇₈₄ →A ₂₇₈ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₈₉₃	V2, U1
10	2	6	A ₁₂₈ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈ →A ₂₇₈ →A ₄₅₁ →A ₁₂₈	U1

4.4 イベント相関解析の結果との比較

ドットマトリックス解析による連鎖アラーム抽出結果と樋口らによるイベント相関解析の連鎖アラーム抽出結果を比較した。イベント相関解析結果（樋口ら, 2010, 高井, 2012）から抽出された不要な操作を取り除き、イベント相関解析による連鎖アラーム抽出結果のみを整理し、発報頻度上位4位までの連鎖アラームを Table 4-5 に示す。ランキング1位の連鎖アラームは、 A_{350} , A_{450} , A_{451} 三種類のアラームにより構成され、三種の発報回数の合計は2380回であった。 A_{350} はH2（分解炉）のフィードに関連するアラームであり、 A_{450} , A_{451} はU1（用役装置）の冷却用海水に関連するアラームである。アラームの種類から想定される異常原因はH2（分解炉）、U1（用役装置）に関係したものであることが考えられる。しかし、この結果からは、三種類のアラームが連鎖アラームとして、どのような順で発報したかということはいわからない。また、 A_{350} , A_{450} , A_{451} が同じ連鎖アラームに含まれているとは限らない。

ドットマトリックス解析では、連鎖アラームの発報回数と順番（発報パターン）が結果として得られる。Table 4-5 のイベント相関解析のランキング1位の連鎖アラーム A_{350} , A_{450} , A_{451} は Table 4-4 のドットマトリックス解析結果の5位と8位以外の連鎖アラームにすべて含まれている。このように、イベント相関解析とドットマトリックス解析の結果はよく一致しているが、イベント相関解析の結果に比べてドットマトリックス解析の結果は、アラームの発報順まで明確であり、より適確な原因調査と対策立案が可能であると考えられる。また、Table 4-3 には A_{350} , A_{450} , A_{451} をすべて含む連鎖アラームはなく、イベント相関解析の結果はかえって誤解をもたらす恐れがある。以上の理由より、ドットマトリックス解析はイベント相関解析と比べてより有効な連鎖アラーム抽出法であると考えられる。

Table 4-5 List of top 4 frequent sequential alarms by Event Correlation Analysis
 (樋口ら, 2010, 高井, 2012) により著者作成

Rank	Fre.	Alarms	Related unit
1	2380	A ₃₅₀ , A ₄₅₀ , A ₄₅₁	H2, U1
2	212	A ₇₁ , A ₂₂₇ , A ₂₈₂ , A ₂₈₃ , A ₃₈₈	V1, V2
3	194	A ₁₄₇ , A ₁₅₀ , A ₁₅₄	H3, H4, H6
4	63	A ₂₃₄ , A ₆₇₈ , A ₆₈₁	G1

4.5 まとめ

ドットマトリックス解析を石油化学産業の代表的なプラントであるエチレンプラントの運転データに適用した。提案手法により大規模プラントの1ヶ月分のデータを実用的な時間で計算・解析できることがわかった。イベント相関解析の結果と比較したところ、ドットマトリックス解析とイベント相関解析の結果は類似しているものの、ドットマトリックス解析のほうがより詳細に連鎖アラームを抽出することができた。その結果から、提案手法によりエンジニアがより適確にアラームの削減対策やアラームシステムの改善に取り組むことができると考えられる。提案手法は、プラント情報が不要であるため、今後、様々な化学プラントのアラームシステムの適正化や評価に役立つことが期待される。

参考文献

1. 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)
2. 樋口文孝, 野田賢, 西谷紘一; “イベント相関解析によるエチレンプラントのアラーム削減”, *化学工学論文集*, 36(6), 576-581 (2010)
3. 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*, 37(6), 539-545 (2011)
4. 高井努; “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性能監視”, 奈良先端科学技術大学院大学博士学位論文, (2012)

第5章 結 論

プラントアラームシステムは、プラントの安全、オペレータの安全および製品の品質を守る意味で重要な役割を担う必要不可欠なものであり、アラームマシシステムの改善、アラームマネジメントの高度化の重要性は国際的に認知されている。本研究では、これまでの知見や研究を踏まえ、プラント運転データから連鎖アラームを抽出するアラームシステムの適正化のためのデータ解析手法を提案した。また、提案したデータ解析手法の有効性をシミュレーションデータや実プラントデータにより検証した。

第1章では、プラントアラームシステムに関する研究背景について説明し、本研究の目的と論文構成について述べた。

第2章では、ドットマトリックス解析によるプラント運転データからの連鎖アラーム抽出方法を提案した。提案手法を共沸蒸留プロセスのシミュレーションデータに適用した結果、連鎖アラームを抽出することができた。類似度評価手法に基づき連鎖アラームを少数のグループに集約し、連鎖アラームを構成するアラーム情報から、個々のアラームの管理範囲変更や削除などの方針を検討することができた。提案手法は、連鎖アラームの削減効果を定量的に把握できるため、費用対効果の観点から連鎖アラームの削減対策に優先順位をつけることもできる。

第3章では、ノイズを多く含むプラント運転データからの連鎖アラーム抽出のために、従来のドットマトリックス解析法を改善した新しい方法を提案した。提案法は、スライディングウィンドウを用いることでノイズが含まれる連鎖アラームを正しく集約できる。

第4章では、提案するドットマトリックス解析を石油化学産業の代表的なプラントであるエチレンプラントの運転データに適用した。その結果、連鎖アラームを抽出した結果を、先行研究であるイベント相関解析の結果と比較し、ドットマトリックス解析はより詳細な解析ができることを示した。

提案したプラント運転データからの連鎖アラーム抽出法は、シンプルであり、プラント情報不要であるため、現場のエンジニアやオペレータが利用しやすい。今後、提案手法のさまざまなプラントへの適用が進み、アラームシステムの適正化による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。

謝辞

本論文は、福岡大学工学研究科エネルギー・環境システム工学専攻プロセスシステム工学研究室で、平成25年から平成30年までにプラントアラームシステムの適正化に関する研究成果をまとめたものでございます。大学院受験時からの五年間にわたり終始暖かいご指導、ご鞭撻を賜りました福岡大学大学院工学研究科エネルギー・環境システム工学専攻 教授 野田賢 先生に心より感謝申し上げます。この五年間の蓄積は必ずや将来の私のキャリアに役立つものと確信しております。また、助教 吉原直記 先生、助教 松永浩貴 先生、および山崎吉一研究員には日頃から研究や留学生活を通じ多くの面でご助力頂き、心より感謝申し上げます。

本論文を作成するにあたり副査をお引き受け下さりました、九州大学大学院工学研究科 教授 柘植義文 先生、福岡大学大学院工学研究科 教授 鈴川一己 先生には、本論文の審査過程において、貴重なコメントを賜りました。心より感謝申し上げます。

大学院在籍以来、福岡大学大学院私費留学生奨学生として五年間のご支援頂き、学費に不安なく勉強や研究に最も力を入れることができましたことに心より感謝申し上げます。

出光興産株式会社には本研究の主要解析対象であるエチレンプラントのプロセス情報や運転データなどをご提供頂き、ここに深く感謝の意を表します。

最後になりましたが、中国でいつも暖かく支えて頂き、留学の機会を与えてくれた両親に感謝の念に絶えません。

平成30年1月 王者興

本論文に関する発表、受賞などの一覧

1. 学術雑誌等に発表した論文

Journal

- 1) 王者興, 野田賢; “ドットマトリックス解析によるプラント運転データからの連鎖アラームの抽出”, *化学工学論文集*, 41(5), 333-339 (2015) (第2章対応)
- 2) Zhexing Wang and Masaru Noda; Identification of Repeating Sequential Alarms in Noisy Plant Operation Data, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 50(6), 445-449 (2017) (第3章対応)

Proceedings

- 3) Zhexing Wang and Masaru Noda; “Identification of Sequential Alarms in Plant Operation Data by Using Dot Matrix Method”, *Proceedings of The 27th International Symposium on Chemical Engineering*, Kuala Lumpur, Malaysia, (2014)
- 4) Zhexing Wang and Masaru Noda; “Dot Matrix Analysis of Plant Operation Data for Identifying Sequential Alarms Triggered by Single Root Cause”, *Proceedings of HCI 2015: Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge in Context*, 152-158, Los Angeles, USA, (2015)
- 5) Zhexing Wang and Masaru Noda; “Dot Matrix Method with Sliding Window for Identifying Sequential Alarms in Noisy Plant Operation Data”, *Proceedings of The 28th International Symposium on Chemical Engineering*, Jeju, Korea, (2015)
- 6) Zhexing Wang and Masaru Noda; “Identification of Repeating Sequential Alarms in Noisy Plant Operation Data”, *Proceedings of The 7th International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Processes (PSE Asia 2016)*, Tokyo, Japan, (2016)

2. 国際会議における発表

- 1) Zhexing Wang and Masaru Noda; “Comparison of Two Identification Methods for Identifying Sequential Alarms in Plant Operation Data”, *2016 AIChE Annual Meeting*, Nov. 13-18, San Francisco (2016)

3. 国内学会・シンポジウム等における発表

- 1) 王者興, 野田賢; “ドットマトリックス法によるプラント運転データからの連鎖アラームの抽出”, *化学工学会第79回年会*, 3月18日～3月20日, 岐阜大学柳戸キャンパス (2014)
- 2) 王者興, 野田賢; “ドットマトリックス解析によるプラント運転データからの連鎖アラームの抽出～共沸蒸留プロセスへの適用～”, *2014年度日本プラント・ヒューマンファクター学会大会*, 9月12日, 日本大学津田沼キャンパス (2014)
- 3) 王者興, 野田賢; “運転データのドットマトリックス解析結果に基づく連鎖アラームのグルーピング”, *化学工学会第46回秋季大会*, 9月17日～9月19日, 九州大学伊都キャンパス (2014)
- 4) 王者興, 野田賢; “安全なプラントオペレーションを目指したアラームシステム適正化のための統計的アプローチ”, *第59回自動制御連合講演会*, 11月10日～11月12日, 北九州国際会議場 (2016)
- 5) 王者興, 野田賢; “Identification of Sequential Alarms in Operation Data of Ethylene Plant by Using Dot Matrix Analysis”, *化学工学会第82回年会*, 3月6日～3月8日, 芝浦工業大学豊洲キャンパス (2017)
- 6) 王者興, 野田賢; “プラント運転データからの連鎖アラーム抽出法”, *第60回自動制御連合講演会*, 11月10日～11月12日, 電気通信大学 (2017)

4. 受賞

1) ***Best Oral Presentation Award***

Zhexing Wang and Masaru Noda; “Dot Matrix Method with Sliding Window for Identifying Sequential Alarms in Noisy Plant Operation Data”, *Proceedings of The 28th International Symposium on Chemical Engineering*, Jeju, Korea, (2015)

2) ***Excellent Student-Paper Award***

Zhexing Wang and Masaru Noda; “Identification of Repeating Sequential Alarms in Noisy Plant Operation Data”, *Proceedings of The 7th International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Processes (PSE Asia 2016)*, Tokyo, Japan, (2016)