熟練者の手法を取り入れた造粒制御システム*

中村 誠^{*1}, 田中 恭治^{*2}, 白上 貞三^{*3}
堺 敏明^{*4}, 森元 映治^{*1}, 酒井 義郎^{*5}

A Granulating Process Control System Based on Human Expertise

Makoto NAKAMURA^{*6}, Kyoji TANAKA, Teizoh SHIRAGAMI,
Toshiaki SAKAI, Eiji MORIMOTO and Yoshiro SAKAI^{*6} National Fisheries University, Dept. of Ocean Mechanical Engineering,
Nagata-honmachi 2-7-1, Shimonoseki Yamaguchi, 759-6595 Japan

In targeting the production process of the vulcanizing accelerator, a newly developed granulation control system is proposed for saving labor in the process and improving the quality of the product. The system is assembled referring to the expert's procedure for the regulation of the granulating state that is made up of two images about the shape of pellets and the state of the granulating machine. To cope with these tasks, the proposed system includes the following two independent feedback controls. The shape of pellets is regulated through an image processing and a combined estimation with a neural network and a fuzzy model. Similarly, the state of granulating machine is also regulated by using fuzzy inference. Through the examination of the experimental results concerning the accuracy of the models and the following of the assembled system, it is confirmed that the system proposed is useful for practical applications.

Key Words: Process Control, Intelligent Equipment, Granulating State, Human Expertise, Reasoning

1. 緒 言

加硫促進剤の製造プラントは長期間連続的に稼働され、その工程では熟練を要する作業が多い。特に、造粒工程における“造粒具合”の評価とそれに基づく界面活性剤の流量の調整は、これを誤ると団粒やフラッシングなどの現象が発生し、品質や歩留まりの悪化のみならず環境上の問題も生じることから、古くより熟練者の判断に大きく依存している⁽¹⁾。プラントの運転管理は、少数の作業員により日々交代勤務の体制で行われる。よって作業員個人の労働負荷が大きく人手不足の状態が続いていることから、高齢化する熟練者の後継の育成も容易でない。これらのことを背景として、業界では熟練の手法に相当する処理が可能な自動化システムの実現が望まれている。

熟練者は豊富な経験により培われたメンタルモデルを基に、目標に向けて正確にプラントの状態を評価するとともに最適な運転条件を見積もり、状態を調整する。よってその熟練の手法には、工程での事象に的確に対処し得る知識が集約されているものと解釈でき、これを分析して制御系の構成に反映することは、人間中心のシステム⁽²⁾の実現への一つの足掛かりになるものとする。すなわち、熟練の手法を制御系に活かしたシステムを構築することにより、現場に馴染みやすくして、かつ現状の技術および技能的水準の維持向上を期待するものである⁽³⁾。

そこで著者らは、このような観点から、熟練者の造粒の手続きに相当する処理を取り入れた新しい造粒制御システムの開発を目指した。本研究では、熟練者との対話と挙動の観察を基に組み立てた実験により、まず造粒工程における熟練の手法を整理した⁽⁴⁾。次に、この結果に基づいて制御系の枠組みとモデルの構成を検討してシステムを構築し、実機運転による実験により有用性を評価した。その結果、実用に供し得る制御システムを構築することができたので、評価結果とともに報告する。

* 原稿受付 1999年2月12日。

^{*1} 正員、水産大学校(☎759-6595 下関市永田本町2-7-1)。^{*2} 山口県工業技術センター(☎755-0151 山口市朝田湯垣585-1)。^{*3} 正員、山口県工業技術センター。^{*4} 三新化学工業(株)(☎742-8576 柳井市南町4-1-41)。^{*5} 正員、山口大学工学部(☎755-8611 宇部市常盤台2557)。

E-mail: nakamura@fish-u.ac.jp

2. 熟練者の手法とその解釈⁽⁴⁾⁽⁵⁾

加硫促進剤の製造工程は、貯蔵、混合、解砕、練合、造粒、篩過、乾燥および小分け包装の各工程から成る。図1に本研究で対象としたプラントの練合から乾燥工程までの概略を示す。このプラントは解砕後の生原料に二種類の界面活性剤（以下、E溶剤、PN溶剤とよぶ）を添加しながら混練機で練合した後、押し出し型の造粒機により図2に示す直径4mm程度の加硫促進剤（以下、ペレットとよぶ）を成形する。造粒後は振動フィーダでペレットの団粒化を防ぎつつ予備乾燥を行い、流動層乾燥機を経て固化した製品に仕上げて小分け包装へ送るものである。

2.1 熟練者の手法 熟練者は、生原料、ペレットおよび製品についての品質検査の結果、プラントの稼働状況などに応じて、主に次の二つのステップの作業を繰り返す。

Step 1; 造粒具合の評価

- (1) 管理室のモニター画面で造粒中のペレットの流れを、また計器類で造粒機の駆動電流、造粒直後のペレットの温度、流動層乾燥機内の乾燥温度などを監視する。
- (2) 異常を確認した場合、現場へ出向いて目視と触手により造粒具合を官能的に評価する。

Step 2; 運転条件の調整

- (1) 各溶剤の流量を調整する。
- (2) 流動層乾燥機内の乾燥温度を微調整する。

2.2 解釈 溶剤の流量や造粒機の駆動電流などの9点のプラントの状態量、ペレットのかたさや含水率などの4点の物性、造粒具合やペレットの色調など

に対する4件の熟練者の官能評価について、それらの関連を統計的に解析した結果は次のようである。

- ・ E溶剤の流量と造粒直後のペレットのかたさとの間には強い正の相関 ($0.40 < r \leq 0.70$) がある。
- ・ E溶剤の流量は、造粒機の駆動電流および造粒直後のペレット温度とやや正の相関 ($0.20 < r \leq 0.40$) がある。
- ・ E溶剤の流量とPN溶剤の流量との間には強い負の相関 ($-0.70 < r \leq -0.40$) がある。
- ・ PN溶剤の流量と造粒直後のペレットのかたさとの間にはかなり強い負の相関 ($-1.00 < r \leq -0.70$) がある。
- ・ PN溶剤の流量は、造粒機の駆動電流および造粒直後のペレット温度と強い負の相関 ($-0.70 < r \leq -0.40$) がある。
- ・ 造粒機の駆動電流は、造粒直後のペレット温度およびかたさとかなり強い正の相関 ($0.70 < r \leq 1.00$) がある。
- ・ 流動層乾燥機内の乾燥温度と乾燥後の製品のかたさとの間にはやや正の相関 ($0.20 < r \leq 0.40$) がある。
- ・ 熟練者の造粒具合の評価についての判別分析では、式(1)に示す判別関数 f の構造で正答率が約70%と最も高くなり、また評価が高いカテゴリーに属するペレットは相対的に色調の評価についても高くなる傾向が認められる。

$$f = a_0 + a_1 FL_e + a_2 FL_{pn} + a_3 TE_{sp} + a_4 HD_{sp} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 FL_e 、 FL_{pn} 、 TE_{sp} 、 HD_{sp} はそれぞれE溶剤の流量、PN溶剤の流量、造粒直後のペレット温度およびかたさを表し、 a_0 は定数、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 は係数である。

Fig. 1 Flow of the target granulating plant

以上から、E 溶剤はペレットに対して増粘性を有し、逆に P N 溶剤は軟粘性を有することが判る。これにより、熟練者はペレットの成形状態を高める目的で E 溶剤の流量を調整し、その効果をペレットの形状やかたさにより官能的に評価する。また、熟練者は造粒機の過負荷を防止して稼働状態の円滑さを維持する目的で P N 溶剤の流量を調整し、その効果を負荷の程度が反映される駆動電流やペレット温度で評価する。これらの行為は互いにトレードオフの関係にあり、熟練者は生産性や保守面での緊急性などから、適宜優先すべき目標に重点を移して各溶剤の流量を調整する。すなわち、熟練者の造粒具合の調整に係わるメンタルモデルは、図 3 に示すように、製品の品質の維持向上と機械システムの保守管理という両立すべき二つの課題から培われる。ペレットの成形状態と造粒機の稼働状態についての確度の高いイメージから構成されるものと解釈する。

3. モデリングとシステム構成

システムはペレットの成形状態と造粒機の稼働状態を調整する目的の二つのフィードバック制御系から構成する。前者は目標値に造粒直後のペレットの成形状態の程度を、また後者にはペレット温度を定め、制御量には各々 E 溶剤と P N 溶剤の調整流量を用いるものとする。

Fig. 2 Appearance of the vulcanizing accelerator (pellet)

Fig. 3 Mental image on the regulation of granulating state

3.1 ペレットの成形状態の推定 ペレットの成形状態はペレットの形状やかたさの程度に反映される。熟練者による官能検査では、成形状態の良いものとして評価されるペレット表面は全般的に滑らかで、評価の低下に伴いざらつきや亀裂の程度が強まる。造粒直後のペレット表面についての画像から特定帯域における空間周波数成分を抽出した場合、表面が滑らかなものの周波数成分は低域に集中して輝度分布の分散が小さくなる。逆に表面の粗いものは周波数成分が広域に分布して輝度分布の分散も大きい⁽⁶⁾。そこで本システムでは、まずサンプリングした造粒直後のペレットに対して画像処理を行い、個々の画素が持つ周波数成分からペレット全体の輝度分布の特徴を抽出する。次にこの結果を用いて、図 4 に示す 4 層のパーセプトロン型ニューラルネットワーク（以下、NN と称す）に、式（2）の位置型規則と図 5 に示すメンバーシップ関数（以下、MF と称す）とで構成されるファジィモデルを組み合わせ、成形状態の程度を推定す

Table 1 Interpretation of ranking of evaluation

Class	Interpretation
1	Inferior *
2	Slightly inferior
3	Ordinary
4	Good
5	Superior

*; No commercial value

Fig. 4 Neural network for estimating the certainty to each class of the shape of pellets

る。NNでは、表1に示す成形状態の程度を目安に熟練者により分類された各階級に属する試料を教師データとして用い、画像を 512×400 に分解した後 Steerable フィルタを介して輝度分布を 256 階調に正規化して求めた信号 b_{ri} を入力して、中間層を経て各階級に対する確信度 ($Cl_1 \sim Cl_5$) を出力する。ファジィモデルでは、この確信度を各階級に対応した五つの前件部に入力して、max-min 重心法により確定演算を行ない総合的な成形状態 SP_i を推定する。

If Cl_1 is A_i and Cl_2 is B_i and, ..., Cl_5 is E_i

then SP_i is F_i (2)

ここに、 $A_i, B_i, \dots, F_i$ はファジィラベルである。

3.2 溶剤の調整流量の推定 E 溶剤の調整流量 ΔFE_i は、操作員が設定するペレットの成形状態の目標値 SS_0 と前のモデルから得る成形状態の推定値 SP_i との偏差を基に、式 (3) の速度型規則と図6に示す MF とで構成されるファジィモデルにより推定する。

If DS_i is G_i and ΔDS_i is H_i then ΔFE_i is I_i

..... (3)

ここに、 $DS_i = SS_0 - SP_i$, $\Delta DS_i = DS_i - DS_{i-1}$, $\Delta FE_i = FE_i - FE_{i-1}$ であり、 G_i, H_i, I_i はファジィラベルである。

同様に、PN 溶剤の調整流量 ΔFPN_i は、造粒直後のペ

レット温度の目標値 TS_0 とその測定値 TP_i との偏差に応じて、式 (4) の規則と図7に示す MF とで構成されるファジィモデルにより推定する。

If DT_i is J_i and ΔDT_i is K_i then ΔFPN_i is L_i

..... (4)

ここに、 $DT_i = TS_0 - TP_i$, $\Delta DT_i = DT_i - DT_{i-1}$, $\Delta FPN_i = FPN_i - FPN_{i-1}$ であり、 J_i, K_i, L_i はファジィラベルである。

Fig. 5 Membership functions for inferring degree of the shape of pellets

Fig. 6 Membership functions for inferring regulated flow rate of E-additive agent

Fig. 7 Membership functions for inferring regulated flow rate of PN-additive agent

3.3 システム全体の処理 図8に構築したシステムの処理の流れを示す。処理系は、STAGE 1で設定されるペレットの成形状態の目標値 SS_0 と造粒機の稼働状態を反映するペレット温度の目標値 TS_0 に対して、STAGE 2の造粒具合の評価とSTAGE 3の運転条件の調整を繰り返す。STAGE 2では、造粒直後のペレットを自動サンプリング装置で採取して、CCDカメラで入力されるペレット表面画像から輝度分布の特徴を抽出した後、NNとファジィモデルによりペレットの成形状態の程度 SP_i を推定する。また、造粒機出口に取り付けられた熱電対によりペレット温度 TP_i を測定する。STAGE 3では、STAGE 1で設定された目標値とSTAGE 2で得る状態量との偏差、およびその一階差分に基づき、ファジィモデルによりE溶剤の調整流量 ΔFE_i とPN溶剤の調整流量 ΔFPN_i を推定し、各溶剤流量を調整する電動バルブにこれらを出力する。なお、システムは管理室に設置したパーソナルコンピュータを核として構成され、各種増幅器やプログラマブルコントローラを介して入出力信号を処理する。

4. 評価

4.1 方法 ペレットの成形状態を推定するモデルの確度を、造粒直後の成形状態に対する熟練者の評価結果と、サンプリングから画像処理を経て、NNと式(2)のファジィモデルとで得る推定値とを比較す

ることにより評価する。なお推定値は、1.5以下をClass 1に、1.6から2.5まで、2.6から3.5まで、3.6から4.5まで、4.6以上をそれぞれClass 2からClass 5に階級化するものとする。

構築した処理系全体の有用性は、造粒機の稼働状態が大きく変動せず過負荷にならないこと、すなわち造粒直後のペレット温度が一定に保たれることを前提として、ペレットの成形状態の程度の目標値 SS_0 を経時的に変更した場合の追従性で評価する。

4.2 結果 表2にペレットの成形状態についての熟練者の評価結果に対して、本モデルで得た推定値を階級化した後、両者の分布を求めた結果を示す。計882個の試料のうち、熟練者の評価とモデルによる推定結果が一致したものは598個であり、総数に対する割合は約68%となった。各階級については、Class 3とClass 4における一致が比較的低いものとなっている。これは、NNに用いたこれらの階級への教師データが、他の階級ほどの輝度分布の特徴を有していなかったこと、成形状態の推定値に対する尺度化などに起因するものと推察する。しかし、表2に示すとおり、モデルでの推定結果は隣接した階級にほぼ分布し、かつその中位数が熟練者の評価結果をよく代表していることから、実用上での大きな支障はないものと考えられる。

図9に300minの実機運転における造粒具合の調整の履歴を示す。ペレットの成形状態では、目標値 SS_0 に対して、E溶剤の流量調整後の推定値 SP_i が約20minの遅れをもってよく追従している様子がわかる。この遅れは、主にサンプリングから推定に至るまでの間の処理と、混練機と造粒機における原料の滞留とに起因するものである。また造粒直後のペレット温度の測定値 TP_i には、約40min程度の脈動が見受けられるが、目標値 TS_0 との差は最大でも1℃以内に納まっている。このことからシステムでは、造粒機の稼働状態が安定するよう、よくPN溶剤の流量調整がなされてい

Fig. 8 Flow of the present control system

Table 2 Distribution of the estimated results by the present models against the evaluation about the shape of pellets by the expert

		Expert				
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
Models	Class 1	107	21			
	Class 2	34	134	21		
	Class 3		20	98	19	2
	Class 4		5	41	116	55
	Class 5			4	62	143
Conformity		107/ 141	134/ 180	98/ 164	116/ 197	143/ 200

Fig. 9 Experimental result of the regulation of the granulating state

と言える。上述したとおり、造粒直後のペレットの成形状態の評価値とペレット温度の測定値はともに目標値に対してよく追従している。よって、これらにより、熟練者の造粒具合の調整の手続きに相当する処理が可能であるとともに、本システムの有用性が示唆されたものと考ええる。

5. 結 言

加硫促進剤製造の造粒工程を対象として、工程における熟練者の手法を取り入れた実用的な制御システムの開発を目指した。本研究では熟練者の造粒具合の調

整動作を、ペレットの成形状態と造粒機の稼働状態に対する確度の高い評価と、それらに基づく溶剤流量の調整から成るものと解釈した。すなわち、製品の品質の維持向上と機械システムの管理という、特に連続処理の工程における作業員が両立すべき課題を背景として培われていくものである。本システムはこれらに対応するための二つのフィードバック制御系から構成される。制御系を構成するモデルの確度と処理系全体の追従性を実機運転により評価した。その結果、確度の高い処理がなされたことから、ほぼ実用に供せ得る基本的なシステムが構築できたものとする。

本研究において実験にご協力頂いた三新化学工業(株)小泉達也取締役とプロジェクトに参加頂いた各位に謝意を表す。また、本研究について終始懇切なご指導を頂いた岩手大学工学部高浪五男教授に感謝する。

文 献

- (1) 布重 徹, アグロ製剤の製造に関する現状と問題点, 化学装置, 35-7(1993), 140-145.
- (2) Norman, D., A., and Draper, S., W., edit., USER CENTERED SYSTEM DESIGN, (1986), 31-61, Lawrence Erlbaum Associates.
- (3) Sakai, Y. and Nakamura, M., A Unified Viewpoint of Automatizing Human Expertise, *Proc. of '95 Korea Automatic Control Conf.*, (1995), 199-202.
- (4) 中村 誠・堺 敏明・田中恭治・白上貞三・小泉達也・酒井義郎, ペレット造粒プラントのためのファジィ制御システム, 第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, (1995), 87-90.
- (5) Shiragami, T., Nakamura, M., Tanaka, K. and Sakai, Y., A Granulating Plant Control System Equipped with Pellet Sampling and Evaluation System, *Proc. of 20th Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering*, (1996), 1055-1058.
- (6) 田中恭治・白上貞三・中村 誠・堺 敏明・鳥岡豊士, 押し出し造粒プラント制御のための視覚品質推定, 計測自動制御学会論文集, 33-6 (1997), 517-523.