

高度プロセス制御に関するアンケート調査結果報告書

< アンケート調査実施 >

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.27 「プロセス制御技術」

< 責任者・報告書作成 >

ワークショップ No.27 代表世話人
京都大学大学院工学研究科化学工学専攻 准教授
加納 学

2009年1月 アンケート調査実施

2009年6月 報告書発行

まえがき

産学連携の場である日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会において、2007 年から、プロセス制御技術に関わる問題解決を目的としたワークショップ No.27 が活動を行っています。PID 制御、モデル予測制御、プラントワイド制御、ソフトセンサーなど様々な課題について取り組みを進めているところですが、日本の産業界におけるプロセス制御の現状と課題を整理し、今後の技術開発の方向性を明らかにするために、アンケート調査を実施することになりました。本報告書はその調査結果をまとめたものです。

本アンケート調査が、プロセス制御技術の現状を正しく認識し、優先して取り組むべき課題を明確にすることで、プロセス制御技術者に技術開発の指針を与え、プロセス制御技術の発展を通して、その存在価値を高めることに貢献できることを期待しています。

最後になりますが、貴重な時間を割いて本アンケート調査に回答していただいた皆様に、心よりお礼申し上げます。また、長年の実務経験を活かしてアンケート調査項目を選定していただいた小河守正様（山武）、ワークショップ No.27 世話人として調査企画から報告書作成までたずさわっていただいた樋口文孝様（出光興産）をはじめ、本アンケート調査を実施する上で貴重なコメントをいただきましたワークショップ No.27 のメンバーの皆様に厚くお礼申し上げます。

2009 年 5 月
京都にて
加納 学

目次

まえがき	i
第 1 章 調査対象	1
第 2 章 モデル予測制御の応用に関する調査	3
2.1 適用状況	3
2.2 適用規模と特徴	4
2.3 従来の制御の課題	6
2.4 選択理由	7
2.5 設計方法	10
2.5.1 制御アルゴリズムと動作環境	10
2.5.2 プロセスモデル	11
2.5.3 チューニング	11
2.5.4 実装時の問題点	13
2.5.5 非線形モデル予測制御と PFC の特徴	14
2.6 適用効果	15
2.7 成功要因	15
2.8 今後の課題	17
第 3 章 ソフトセンサーの応用に関する調査	21
第 4 章 制御技法の応用に関する調査	25
第 5 章 高度制御プロジェクトに関する調査	27
過去のアンケート調査結果との比較	31
アンケート調査票	33

第 1 章

調査対象

本章では，本アンケート調査に協力していただいた回答者の概要を示す．

アンケート回答数は合計 21 件であった．会社単位での回答と事業所単位での回答が混在しているため，会社ごとにまとめると合計 15 社であり，出光興産，協和発酵バイオ，ジャパンエナジー，昭和電工，新日本石油精製，住友化学，ソニー，ダイセル化学工業，東洋エンジニアリング，日揮，三井化学，三菱化学，森永エンジニアリング，山武，横河電機（以上五十音順）の各社から回答をいただいた．業種ごとの回答数を表 1.1 に示す．日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会の会員企業を本アンケートの調査対象としたことから，石油・化学産業からの回答が大半を占めている．

表 1.1 業種ごとの回答数（問 1-2）

業種	回答数
石油化学	7
化学	6
エンジニアリング	3
石油	2
電気機器	2
半導体	1
合計	21

次に，回答者の所属部門を表 1.2 に示す．制御システム設計担当者が約半数を占め，その他様々な部門の担当者から回答を得た．回答者 21 人のうち，モデル予測制御の適用実績がある回答者は 14 人であり，うち 11 人が制御システム設計，2 人が制御を含めた生産技術，残る 1 人が購買を担当している．

表 1.2 回答者の所属部門 (問 1-3)

所属部門	回答数	MPC 適用実績あり
制御システム設計	12	11
プロセス設計	3	0
企画	1	0
マーケティング	1	0
その他		
シミュレーション・高度制御技術	1	1
生産技術	1	1
プラントシステムの発注・購入	1	1
全般	1	0
合計	21	14

第2章

モデル予測制御の応用に関する調査

本章では，モデル予測制御（MPC: Model Predictive Control）の適用状況と課題についてまとめる．

2.1 適用状況

- モデル予測制御適用実績は9社で合計329件．
- 自社技術は5%以下．ほぼすべてがベンダーからの導入技術．
- 蒸留プロセスへの適用が約40%，反応プロセスへの適用が約30%．

モデル予測制御の適用実績があると回答したのは，出光興産，ジャパンエナジー，昭和電工，新日本石油精製，住友化学，東洋エンジニアリング，日揮，三井化学，三菱化学（以上五十音順）の合計9社である．これまでにモデル予測制御を適用したプロセス設備の数，適用検討中のプロセス設備の数，および現在も稼働中のプロセス設備の数を表2.1に示す．モデル予測制御適用件数は9社合計で329件，単独での適用件数が最も多かった会社（三菱化学）での適用件数は132件である．そのうち，現在稼働しているモデル予測制御は9社合計で286件，最も稼働数の多い会社（三菱化学）で102件である．

表 2.1 9社における MPC 適用実績（問 2-1, 2-2）

	プロセス数	1社での最大プロセス数
適用した	329	132
適用検討中	7	2
稼働中	286	102

これまでに適用した，または適用検討中のモデル予測制御について，自社開発技術であるか，ベンダー（ソフトウェアや適用技術の提供会社）からの導入技術であるかをまとめた結果を表 2.2 に示す．合計 9 社 336 件のうち自社開発技術はわずか 2 社 14 件であり，9 社すべてにおいてベンダーからの導入技術が利用されている．

表 2.2 MPC 技術開発元（問 2-3）

プロセス数		
自社開発	14	2/9 社
ベンダー	322	9/9 社
合計	336	

プロセス設備ごとのモデル予測制御適用数を表 2.3 に示す．約 40% が蒸留系（単体または複数の蒸留装置，常圧蒸留装置，反応 + 蒸留系），約 30% が反応系（単体または複数の反応装置，分解炉，重合反応器，反応 + 蒸留系）である．その他には，空気分離プラント全系，硫酸プラント全系，用役全系，ガソリン脱硫全系，プロパン脱磯全系など大規模なものから，微生物培養装置，塩化ナトリウム電解槽，大型ポンプなどまで様々なプロセスが含まれている．

2.2 適用規模と特徴

- SISO 系が 18 件，MISO 系が 6 件，SIMO 系が 22 件，MIMO 系が 259 件．
- SISO MPC の主な導入目的はむだ時間補償．
- 操作変数 30 以上，制御変数 80 以上の大規模 MPC は 7 件．

モデル予測制御の規模についてまとめた結果を表 2.4 および表 2.5 に示す．単純な 1 入力 1 出力（SISO: Single-Input Single-Output）系としての適用件数が 18 件，多入力 1 出力（MISO: Multi-Input Single-Output）系が 6 件，1 入力多出力（SIMO: Single-Input Multi-Output）系が 22 件であり，その他 259 件が多入力多出力（MIMO: Multi-Input Multi-Output）系である．SISO モデル予測制御の適用は全体の 6% にとどまっており，多変数プロセスへの適用が主体であることがわかる．また，操作変数（MV: Manipulated Variable）が 10 変数以上の適用件数は全体の 26% ，制御変数（CV: Controlled Variable）が 10 変数以上のものは 43% ，外乱変数（DV: Disturbance Variable）が 10 変数以上のものは 13% であり，操作変数に比べて制御変数の数が多い非正方のプロセスへの適用件数が多いこともわかる．

合計 18 件の SISO モデル予測制御系の特徴は以下のようにまとめられる．適用対象は，粉体 9 件，分解炉 3 件，重合反応 2 件，精製・分離 2 件，動力 1 件，ガス 1 件であり，動力とガ

表 2.3 適用プロセス (問 2-4)

プロセス	適用数
蒸留装置	108
反応装置	54
分解炉	19
重合反応器	12
常圧蒸留装置	10
粉体乾燥	8
ボイラー + タービン	8
ボイラー	8
圧縮機系	7
蒸気系	6
反応 + 蒸留系	5
ガス回収系	5
ブレンダー	4
加熱炉	3
晶析装置	3
流動接触分解装置全系	3
その他	42
合計	305

スを除く計 16 件において、「従来の制御の問題 (問 2-5)」として、むだ時間が長いことが指摘されている。つまり、SISO モデル予測制御の主たる導入目的はむだ時間補償である。また、技術的には、DMC/DMCplus が 5 件、RMPCT が 5 件、その他 8 件となっている。

合計 6 件の MISO モデル予測制御系の適用対象は、晶析 3 件、重合反応 2 件、分解 1 件であり、晶析 3 件の「従来の制御の問題」としては手動運転であること、重合反応 2 件の「従来の制御の問題」としては相互干渉が強いことが指摘されている。

合計 22 件の SIMO モデル予測制御系の適用対象は、ボイラー 4 件、蒸留装置 3 件、圧縮機系 3 件、ガス回収 2 件、モノマー 2 件、蒸気系 2 件、その他 6 件と様々であり、「従来の制御の問題」についても、相互干渉 7 件、多変数系 6 件、手動運転 5 件、むだ時間 4 件と多様な問題の解決にモデル予測制御が利用されていることがわかる。

さらに、操作変数が 30 変数以上、制御変数が 80 変数以上の非常に大規模なモデル予測制御系は合計 7 件あり、それらの適用対象は、エチレン全系 2 件、流動接触分解装置全系、常圧蒸

表 2.4 MPC の規模 (問 2-4)

	適用数
SISO 系	18
MISO 系	6
SIMO 系	22
MIMO 系	259
合計	305

表 2.5 MPC の規模 (問 2-4)

変数の数	MV	DV	CV
0	0	28	0
1	40	45	24
2	57	50	33
3-5	83	103	58
6-9	47	40	59
10-19	59	27	48
20-29	12	5	25
30-39	1	3	29
40-49	1	3	16
50≤	5	1	13

留装置全系，化学品精製系，分解炉，用役系（ボイラー＋タービン）と報告されている．これら 7 件のうち 6 件の「従来の制御の問題」として相互干渉が強いことが指摘されている．また，分解炉 1 件の「従来の制御の問題」としては非線形性と手動運転が指摘されている．

2.3 従来の制御の課題

- 多変数系であることと相互干渉が強いことで 60% 以上．
- 分解炉，重合反応器，粉体乾燥での主要な問題はむだ時間が長いこと．
- 晶析装置，蒸気系での主要な問題は手動運転であること．

モデル予測制御が適用されているプロセスについて，従来の制御の課題をまとめた結果を

表 2.6 に示す．多変数系と相互干渉をあわせると全体の 60% を超え，モデル予測制御以前の制御方法では，多変数プロセスの制御が満足には行えていなかったことがわかる．その他としては，むだ時間が長い，外乱が多い，手動運転である，などが主たる問題点として指摘されている．

表 2.6 従来の制御の問題点 (問 2-5)

問題点	最重要項目		上位 2 項目	
	回答数	[%]	回答数	[%]
多変数系である	123	40	157	37
相互干渉が強い	81	27	103	24
むだ時間が長い	63	21	75	17
手動運転である	22	7	27	6
外乱が多い	14	5	51	12
プロセス特性の変動	1	0	3	1
非線形性が強い	1	0	9	2
その他	0	0	5	1
合計	305	100	430	100

SISO 系，MISO 系，SIMO 系，大規模系それぞれについての従来の制御の問題点は，前節にまとめた通りである．さらに，適用プロセスごとに従来の制御の問題点をまとめた結果を表 2.7 に示す．いずれのプロセスにおいても，多変数系であること，または相互干渉が強いことが数多く指摘されている．これ以外の特徴について以下に述べる．分解炉では 16/19 で，重合反応器では 9/12 で，むだ時間が長いことが主要な問題として指摘されている．重合反応器では，プロセス動特性の変動が多いことも指摘されている．粉体乾燥では 8/8 すべてで，むだ時間が長いことと外乱が多いことが指摘されている．蒸気系では過半数の 4/6 で，手動運転であることが問題とされている．晶析装置では 3/3 すべてで，手動運転であることと非線形性が強いことが主要な問題として指摘されている．

2.4 選択理由

- 選択理由は，安定な制御を確保できること，多変数プロセスを一括して制御できること，費用対効果が適切であること，手動調整による運転に無理があること．

モデル予測制御の選択理由について，技術面と技術面以外とにわけて尋ねた．技術面と技術

表 2.7 適用プロセスごとの従来の制御の問題点（問 2-4，問 2-5）

プロセス	適用数	従来の制御の問題点
蒸留装置	108	多変数系または相互干渉が多い
反応装置	54	多変数系または相互干渉が多い
分解炉	19	むだ時間 (11)，むだ時間 + 外乱 (4)， むだ時間 + 多変数系 (1)，多変数系 + 外乱 (1)， 外乱 + 多変数系 (1)，非線形性 + 手動運転 (1)
重合反応器	12	多変数系 + むだ時間 (4)，相互干渉 (2)，むだ時間 (2)， むだ時間 + 特性変動 (2)，むだ時間 + 手動運転 (1)， 手動運転 + 非線形性 (1)
常圧蒸留装置	10	相互干渉 (4)，相互干渉 + 多変数系 (3)， 外乱 + 相互干渉 (3)
粉体乾燥	8	むだ時間 + 外乱 (8)
ボイラー + タービン	8	多変数系 (7)，相互干渉 + 外乱 (1)
ボイラー	8	多変数系 (7)，相互干渉 + 多変数系 (1)
圧縮機系	7	相互干渉 + 多変数系 (2)，相互干渉 + 外乱 (1)， 多変数系 + 外乱 (1)，多変数系 (1)，手動運転 (2)
蒸気系	6	手動運転 (4)，相互干渉 + 多変数系 (1)，多変数系 (1)
反応 + 蒸留系	5	多変数系 (3)，相互干渉 + むだ時間 (1)， むだ時間 + 特性不明確 (1)
ガス回収系	5	相互干渉 + 多変数系 (3)，相互干渉 (2)
ブレンダー	4	相互干渉 + 多変数系 (4)
加熱炉	3	多変数系 (2)，相互干渉 (1)
晶析装置	3	手動運転 + 非線形性 (3)
流動接触分解装置全系	3	相互干渉 (2)，外乱 + 相互干渉 (1)
その他	42	
合計	305	

面以外とを明確に区別することは難しいが，それぞれの回答結果を表 2.8 と表 2.9 にまとめた．モデル予測制御を選択した技術的な理由としては，安定な制御を確保できること，多変数プロセスを一括して制御できることが主要なものである．その他，プロセス設備の運転条件を最適化できること，オペレータ操作を自動化できることなどが理由として指摘されている．

一方，モデル予測制御を選択した技術面以外の理由としては，費用対効果が適切であるこ

表 2.8 MPC 選択の技術的な理由（問 2-6）

問題点	最重要項目		上位 2 項目	
	回答数	[%]	回答数	[%]
安定な制御を確保	5	33	7	23
多変数プロセスを一括して制御	5	33	6	20
オンライン最適化の実現	1	7	1	3
生産量最大化	1	7	1	3
プロセス設備の運転条件最適化	1	7	4	14
オペレータ操作の自動化	0	0	4	14
制約条件のある多変数系の安定化制御	1	7	1	3
時定数が長いプロセスへの適用	1	7	1	3
干渉系への対応	0	0	2	7
その他	0	0	3	10
合計	15	100	30	100

と、手動調整による運転に無理があることが挙げられている。その他、実績が豊富であること、プロセスの安定化ができること、競合他社に後れをとらないことなどが理由として指摘されている。

表 2.9 MPC 選択の技術面以外の理由（問 2-7）

問題点	最重要項目		上位 2 項目	
	回答数	[%]	回答数	[%]
費用対効果が適切	4	29	6	21
手動調整による運転に無理がある	2	15	5	18
実績が豊富	1	7	3	11
プロセスの安定化	1	7	2	7
競合他社に後れをとらない	1	7	2	7
その他	5	35	10	36
合計	14	100	28	100

2.5 設計方法

本節では、モデル予測制御システムの構築に関する調査結果を示す。

2.5.1 制御アルゴリズムと動作環境

- DMCplus（または DMC）と RMPCT で適用件数の 80% 。
- 非線形 MPC は自社開発。
- パソコン上で動作している MPC が 62% 。

まず、利用されているモデル予測制御アルゴリズムについてまとめた結果を表 2.10 に示す。既に表 2.2 で示したように、調査対象となったモデル予測制御システム全体の 322/336 がベンダー技術を導入したものである。その多くは DMCplus（または DMC）と RMPCT であり、両者で全体の 80% を占める。Connoisseur、IDCOM、SMOC、MECMACS はいずれも全体の 3~5% にすぎない。上記以外のベンダー技術としては、PFC が利用されている。なお、回答数 8 件のその他についてもベンダー技術ではあるが、詳細は不明である。また、回答数 3 件の非線形モデル予測制御は自社開発技術である。

表 2.10 MPC アルゴリズム（問 3-1）

	回答数	[%]
DMCplus / DMC	140	46
RMPCT	108	34
Connoisseur	14	5
IDCOM / IDCOM 修正版	11	4
SMOC	10	3
MECMACS	8	3
PFC	3	1
非線形 MPC	3	1
その他	8	3
合計	305	100

モデル予測制御システムを実装しているハードウェアシステムについてまとめた結果を表 2.11 に示す。合計 305 件のうち 62% がパソコン(PC)上で動作している。DCS(Distributed

Control System) 上で動作している計 16 件の内訳は，DMCplus (または DMC) が 7 件，IDCOM 修正版が 1 件，その他が 8 件である．また，PLC (Programmable Logic Controller) 上で動作している計 3 件については，すべて PFC である．

表 2.11 ハードウェアシステム (問 3-2)

	回答数	[%]
PC	189	62
ワークステーション・サーバ	77	25
プロセスコンピュータ	20	7
DCS	16	5
PLC	3	1
合計	305	100

2.5.2 プロセスモデル

- ステップ応答またはインパルス応答モデルが 64% ，伝達関数モデルが 35% ．
- 98% でプラントテストによるモデリングを実施．

プロセスモデルの形式およびモデリング方法についてまとめた結果を表 2.12 および表 2.13 に示す．古くから利用されているステップ応答またはインパルス応答を採用しているシステムが全体の 64% ，伝達関数を採用しているシステムが 35% であり，両者で 99% を占める．残る 1% のシステムでは，解析的モデリングによって導出された非線形微分方程式と代数方程式が採用され，非線形モデル予測制御が実装されている．解析的モデリングを実施しているのは，非線形モデル予測制御の 3 件に加えて，重合反応器 (2 件) と電解槽 (1 件) を対象とした SMOC の 3 件においてである．ただし，これら SMOC の 3 件すべてにおいて，線形モデルが利用されている．

2.5.3 チューニング

- 75% で制御シミュレーションを利用したチューニングを実施．
- 目標は，目標値追従性が 56% ，外乱抑制性が 38% ．

モデル予測制御システム実装時の初期チューニング方法およびチューニング目標についてま

表 2.12 プロセスモデル形式 (問 3-3)

	回答数 [%]	
ステップ応答, インパルス応答	196	64
伝達関数	106	35
非線形微分方程式 + 代数方程式	3	1
合計	305	100

表 2.13 モデリング方法 (問 3-4)

	回答数 [%]	
プラントテスト	299	98
解析的モデリング	6	2
合計	305	100

とめた結果を表 2.14 および表 2.15 に示す。全体の 75% において制御シミュレーションが利用され、21% においてベンダー推奨値が利用されている。自社チューニング則を用いているのは全体の 4% にすぎない。その内容を詳細に見ると、対象プロセスは、発電所のボイラー (またはボイラー・タービン) が 6 件、アンモニアプラントが 3 件、硫酸プラント全系が 2 件、空気分離プラント全系が 1 件、重合反応器が 1 件となっている。利用技術は、重合反応器 1 件に SMOC が適用されているのを除いて、残る 12 件すべてにおいて DMCplus が利用されている。

表 2.14 初期チューニング方法 (問 3-5)

	回答数 [%]	
制御シミュレーション	227	75
ベンダー推奨値	65	21
自社チューニング則	13	4
合計	305	100

チューニング目標については、目標値追従性が全体の 56%、外乱抑制性が 38% であり、両者で 94% を占める。最適運転条件への到達速度を目標としているプロセスは、種々の蒸留塔が 7 件、常圧蒸留塔が 3 件、圧縮機が 3 件、分解炉が 1 件、ナフサ接触改質装置が 1 件、用役

設備が 1 件，クエンチ塔 1 件の合計 17 件である．この目標実現のために利用されている技術は，Connoisseur が 12 件，DMCplus が 3 件，IDCOM-M が 2 件である．また，機器能力の最大限利用および品質の安定化を目標としているプロセスはいずれも反応系であるが，詳細は不明である．利用されている技術は，2 件ともに SMOC である．

表 2.15 チューニング目標（問 3-6）

	回答数 [%]	
目標値追従性	170	56
外乱抑制性	116	38
最適条件到達速度	17	6
機器能力最大利用	1	0
品質安定化	1	0
合計	305	100

2.5.4 実装時の問題点

- 過半数で実装当初に問題が発生．
- 58% で再チューニング，17% で制御系再設計によって問題を解決．

実装当初に問題が発生したかどうかを尋ねたところ，表 2.16 に示すように，問題があったという回答が過半数であった．

表 2.16 実装当初の問題点の有無（問 3-7）

	回答数 [%]	
あり	169	56
なし	131	44
合計	300	100

実装当初の問題点の解決方法についてまとめた結果を表 2.17 に示す．複数回答を許し，合計 189 件の回答があった．その内訳を見ると，再チューニングが最も多く全体の 58% ，続いて制御系再設計が 17% である．その他，再モデリング，PID 再調整，ヒューマンインタフェース増強と続き，ソフトセンサーの再調整や適用という回答もある．

表 2.17 実装当初の問題点の解決方法 (問 3-8)

	回答数	[%]
再チューニング	110	58
制御系再設計	32	17
再モデリング	15	8
PID 再調整	12	6
ヒューマンインタフェース増強	12	6
ソフトセンサー再調整・適用	3	2
その他	5	3
合計	189	100

2.5.5 非線形モデル予測制御と PFC の特徴

本節の最後に、適用件数は少ないものの、その特徴が把握しやすい非線形モデル予測制御と PFC について、調査結果から浮かび上がる特徴を表 2.18 にまとめておく。

表 2.18 非線形モデル予測制御と PFC の特徴

	非線形 MPC	PFC
適用プロセス	反応器 (3)	薬品製造反応器 (2) 重合反応器 (1)
MPC の規模	MV:9, DV:19, CV:7 MV:8, DV:17, CV:7 MV:8, DV:19, CV:7	MV:2, DV:3, CV:2 (製薬) MV:2, DV:1, CV:2 (重合)
従来の制御の問題点	手動運転	手動運転, 非線形性
ハードウェアシステム	プロセスコンピュータ	PLC
プロセスモデル形式	非線形微分方程式 + 代数方程式	伝達関数
モデリング方法	解析的モデリング	プラントテスト
初期チューニング方法	制御シミュレーション	制御シミュレーション
チューニング目標	目標値追従性	目標値追従性 (製薬) 外乱抑制性 (重合)

2.6 適用効果

- 最大の適用効果は自動運転の実現。
- 省資源・省エネルギーの実現と生産能力の向上に効果あり。

本節では、モデル予測制御を適用した結果得られた効果に関する調査結果を示す。

まず、モデル予測制御適用以前の問題点に対して、特に制御性能改善に効果があったと思われる事項を尋ねた。その調査結果を表 2.19 に示す。目標値追従性の向上や外乱抑制性の向上という一般的な制御性能改善効果に加えて、多くの回答者が自動運転の実現を重要な効果として挙げている。

表 2.19 制御性能改善効果（問 4-1）

	最重要項目		上位 2 項目	
	回答数	[%]	回答数	[%]
自動運転の実現	8	53	10	36
目標値追従性の向上	4	27	5	18
外乱抑制性の向上	3	20	12	43
むだ時間補償の向上	0	0	1	3
合計	15	100	28	100

モデル予測制御の適用実績をふまえて、その生産性向上における主要な効果について尋ねた。その調査結果を表 2.20 に示す。省資源・省エネルギーの実現という回答が最も多く、続いて生産能力の向上が挙げられている。さらに、オペレータ作業負荷の軽減という効果が重要であるとの指摘も少なくない。その他の効果としては、品質の安定化と向上、銘柄・原料・生産量など運転条件の変更に対する柔軟性の向上が挙げられている。

2.7 成功要因

- モデリングを入念に実施することが成功への鍵。
- 相互干渉のある多変数プロセスやむだ時間が長いプロセスに有効。

モデル予測制御適用の鍵を探るべく、モデル予測制御適用における成功要因とモデル予測制

表 2.20 生産性向上効果 (問 4-2)

	最重要項目		上位 2 項目	
	回答数	[%]	回答数	[%]
省資源・省エネルギーの実現	7	47	11	38
生産能力の向上	5	33	9	31
オペレータ作業負荷の軽減	2	13	5	17
品質の安定化と向上	1	7	3	10
銘柄・原料・生産量変更の柔軟性向上	0	0	1	4
合計	15	100	29	100

御が有効なプロセスについて尋ねた。その結果を表 2.21 および表 2.22 にまとめる。

まず、最も重要な成功要因として、過半数の回答者がモデリングを入念に実施することを挙げている。その他、最適性、経済性、安全性、柔軟性などの制御目標に適合した方法であるかどうか、長いむだ時間などプロセス特性に適合した方法であるかどうか、についての見極めも重要である。さらに、モデル予測制御の適用や利用に関わるオペレータやエンジニアの教育も大切であると指摘されている。

表 2.21 成功要因 (問 4-4-1)

	最重要項目		上位 2 項目	
	回答数	[%]	回答数	[%]
モデリングの入念な実施	8	53	10	37
制御目標への適合性	4	27	9	33
プロセス特性への適合性	2	13	3	11
オペレータ・エンジニアの教育	1	7	4	15
実現環境の整備	0	0	1	4
合計	15	100	27	100

モデル予測制御が有効なプロセスとしては、相互干渉のある多変数プロセスとの回答が全体の 41% で最も多く、続いて、むだ時間が長いプロセスが 31%、最適運転が必要なプロセスおよび外乱が多いプロセスがそれぞれ 14% の回答数であった。

表 2.22 有効なプロセス (問 4-4-2)

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
相互干渉のある多変数プロセス	12	41
むだ時間が長いプロセス	9	31
最適運転が必要なプロセス	4	14
外乱が多いプロセス	4	14
合計	29	100

2.8 今後の課題

- 42% がモデルまたはモデリングに関する課題を指摘。
- 44% がエンジニアリング技術の伝承を指摘。
- モデリング技術，効果推算方法，実装容易性の改善が急務。
- 理論面では，特性変動への対処，モデル精度と制御性能の関係明確化。

本節では，モデル予測制御が抱える課題に関する調査結果を示す。

まず，これまでに適用したモデル予測制御に関する課題についてまとめた結果を表 2.23 に示す。様々な問題点が指摘されているが，類似した項目をまとめると，表 2.24 のように整理できる。このようにまとめると，モデルまたはモデリングに関する課題が全体の 42% と最も多いことがわかる。これは，先に表 2.21 において，モデリングを入念に実施することが最も重要な成功要因だと指摘されていたこととも整合しており，モデル予測制御の適用を成功させるためには，高いモデリング技術が必要であると考えられる。その他の課題としては，チューニングに関する課題が全体の 23% と多く，個別の制御目的への対応に関する課題，オペレータの利用・教育に関する課題，制御性能に関する課題と続く。

続いて，適用したモデル予測制御を維持していく上での課題，つまりメンテナンス上の課題についてまとめた結果を表 2.25 に示す。エンジニアリング技術の伝承（設計者が異動しても大丈夫なように技術やノウハウを伝える）という回答が全体の 44% と最も多く，制御性能劣化への対処（制御性能の劣化に対して，再モデリングするか，チューニングで済ますかの判断が難しい）という回答 33% とあわせると 2 項目で全体の 77% を占める。その他のメンテナンス上の課題としては，オペレータの教育やチューニングの複雑さが挙げられているのに加えて，実装計算機更新時の移行作業負荷，異常時の処置，改造の困難さも指摘されている。

表 2.23 一般的課題（問 5-1）

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
設計パラメータが多く，チューニングが困難	6	23
プロセスに特有な制御目的に対応できない	4	15
プロセスの特性変動や非線形性に対するロバスト性が低い	4	15
モデル誤差に対するロバスト性が低い	3	12
相関の弱い / 非線形性が強いプロセスのモデリングが困難	3	12
ヒューマンインタフェース機能が不十分	2	8
外乱抑制性能が不十分で定常偏差が残る	2	8
オペレータへの教育・フォロー	1	4
モデルメンテナンスの手間とコスト	1	4
合計	26	100

表 2.24 一般的課題を整理したもの（問 5-1）

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
モデルまたはモデリングに関する課題	11	42
チューニングに関する課題	6	23
個別の制御目的への対応に関する課題	4	15
オペレータの利用・教育に関する課題	3	12
制御性能に関する課題	2	8
合計	26	100

多くの成果を出しながらも，なお課題を持つモデル予測制御について，より具体的に今後改善が望まれる課題について尋ねた．その結果を表 2.26 に示す．ここまでの調査結果から予想される通り，モデリング技術の発展を望む回答者が最も多く，全体の 27% を占めている．次いで，制御ニーズ発掘手順と効果推算方法の明確化が全体の 24% を占める．モデル予測制御を適用すべきかどうかを事前に判断できる仕組みが求められている．さらに，1990 年代に高度プロセス制御の導入が積極的に進められて以降，成果を享受しやすい大規模プロセスへの導入が一巡すると，プロセス制御技術者の数は減少していくことになった．この結果，現在では，プロセス制御技術者の量的拡大を求める声が出てきている．その他，計測器やアクチュ

表 2.25 メンテナンス上の課題（問 5-2）

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
エンジニアリング技術の伝承	13	44
制御性能劣化への対処	10	33
オペレータの教育	2	7
チューニングの複雑さ	2	7
その他	3	9
合計	30	100

エータの精度と機能の向上，制御システム機器の機能・性能・信頼性の向上，モデル予測制御技術のPRと普及，制御性能評価および保守技術の発展が指摘されている。

表 2.26 一般的な改善事項（問 5-3-1）

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
プロセス動特性のモデリング技術の発展	10	27
制御二ーズ発掘手順と効果推算方法の明確化	9	24
モデル予測制御の実装容易性向上	8	22
プロセス制御技術者の量的拡大	5	13
計測器・アクチュエータの精度と機能の向上	2	5
その他	3	9
合計	37	100

理論面において，今後改善が望まれる課題についてまとめた結果を表 2.27 に示す．プロセスの特性変動への対処という回答が全体の 26% で最も多く，モデル精度と制御性能の関係の明確化，非定常操作（スタートアップとシャットダウン）への対処，プロセス特有のノウハウの組み込み，非線形性への対処と続く．その他の課題としては，アルゴリズムの簡素化と高速化，より大規模な多変数プロセスへの適用能力の向上，チューニングパラメータの非干渉化と数の削減も指摘されている．

最後に，プロセスの非線形性や特性変動に対処する方法として実用性が高いと思われる方法を尋ねた．その結果を表 2.28 に示す．

表 2.27 理論の改善事項 (問 5-3-2)

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
特性変動への対処	10	26
モデル精度と制御性能の関係明確化	9	23
非定常操作への対処	6	15
プロセス特有のノウハウの組み込み	6	15
非線形性への対処	5	13
その他	3	8
合計	39	100

表 2.28 非線形性・特性変動への実用的な対処方法 (問 5-3-3)

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
複数の線形モデルを切り替える	8	28
線形モデルを使い, ロバスト性を向上させる	7	25
非線形モデルまたは時変モデルを利用する	5	18
線形モデルを使い, 適応機能を導入する	5	18
他の技法 (知識ベース制御など) と組み合わせる	3	11
合計	28	100

第3章

ソフトセンサーの応用に関する調査

- 適用件数は 439 件，その 75% が蒸留プロセスを対象．
- 88% で重回帰分析または PLS を利用．
- 最重要課題はメンテナンス（特性変化への対応）．作業負担も大きい．

本章では，ソフトセンサー（推定モデル）の適用状況と課題についてまとめる．

現在稼働中のソフトセンサーの数を，プロセスおよびモデル構築手法ごとにまとめた結果を表 3.1 に示す．適用件数は合計 439 件あり，そのうちの 75% が蒸留プロセスを対象としている．その他では，反応プロセスが 20% ，重合反応プロセスが 5% であり，蒸留と反応以外のプロセスへの適用はほとんど見られない．

蒸留プロセスを対象とする場合のモデル構築手法としては，重回帰分析が 77% と最も多く，PLS およびその他の線形手法をあわせると，線形回帰手法が全体の 90% 以上を占めている．このことから，蒸留プロセスを対象にソフトセンサーを設計する場合，線形モデルで十分であることが多いことがわかる．

反応プロセスを対象とする場合には，PLS が 50% とちょうど半数を占めている．重回帰分析とあわせると，全体の 87% を線形回帰手法が占めており，やはり線形モデルで十分であることが多いことがわかる．また，蒸留プロセスと反応プロセスについては，プロセスの特性変化や非線形性に対応するために，Just-In-Time モデルの利用が試みられている．

重合反応プロセスを対象とする場合にも，やはり線形回帰手法の利用が多いが，ニューラルネットワークや灰色ボックスモデルも活用されている．特に，合計 439 件のうち 3 件しか適用されていないニューラルネットワークはすべて重合反応プロセスを対象としている．また，適用数 9 件の灰色ボックスモデルについても，過半数が重合反応プロセスを対象としている．

次に，適用したソフトセンサーの課題についてまとめた結果を表 3.2 に示す．プロセス特性

表 3.1 ソフトセンサーの応用 (問 6-2)

プロセス	モデル構築手法							計
	Phys	MRA	PLS	O.L.	ANN	JIT	Gray	
蒸留	20	256	41	6	0	5	3	331
反応	5	32	43	0	0	5	1	86
重合	0	4	8	0	3	0	5	20
その他	0	1	1	0	0	0	0	2
計	25	293	93	6	3	10	9	439

Phys: 物理モデル

MRA: 重回帰分析

PLS: partial least squares

O.L.: その他の線形回帰手法

ANN: ニューラルネットワーク

JIT: Just-In-Time モデル

Gray: グレイボックスモデル (ハイブリッドモデル)

変化による推定精度の劣化への対応, つまりソフトセンサーのメンテナンスが課題であるとの回答が全体の 30% を占め, 最も多い。その他, データ収集, モデル構築作業, データの前処理の負担が大きいことも課題として指摘されており, ソフトセンサーの構築を支援する仕組みが必要とされている。また, 予測精度が低いことも課題に挙げられており, 高精度化も求められている。

表 3.2 ソフトセンサーの課題（問 6-3）

	上位 2 項目	
	回答数	[%]
予測精度の劣化，メンテナンス（特性変化）	4	30
モデル構築に必要なデータ収集の負担が大きい	3	23
モデル構築作業そのものの負担が大きい	2	15
収集したデータの前処理の負担が大きい	1	8
予測精度が低い（導入当初から）	1	8
予測精度が低い（運転条件変更）	1	8
コストパフォーマンスが低い	1	8
合計	13	100

第 4 章

制御技法の応用に関する調査

- 高度制御利用は線形モデル予測制御に限定され，現代制御理論は使用されず．

本章では，モデル予測制御に代表される高度な制御技法が現場でどのように評価され応用されているのかについて調査した結果をまとめる．様々な制御技法の応用レベルを 4 段階評価した結果を表 4.1 に示す．この表において，数値は回答数である．

フィードフォワード制御，オーバーライド制御，バルブポジション制御といった古典的高度制御は多くの企業で適用されており，また適用方法が標準化されているところも少なくない．ただし，プロセスガスクロなどを用いるサンプル値制御，むだ時間補償，ゲインスケジューリングについては，あまり適用されていない．

モデルベース制御については，本アンケート調査の主要な対象でもある線形モデル予測制御が多くの企業で適用され，標準化もなされているのに対して，非線形モデル予測制御はほとんど利用されていないのが現状である．

さらに，セルフチューニングを含めた適応制御，現代制御理論に基づく制御などに至っては，全く利用していない企業がほとんどである．この傾向は，同じプロセス制御ではあっても，例えば鉄鋼プロセスと大きく異なり，化学プロセス制御の特徴であると考えられる．

表 4.1 制御技法の応用に関する調査

制御技法	応用レベル			
	A	B	C	D
古典的高度制御				
フィードフォワード制御	3	9	6	2
オーバーライド制御	2	6	5	7
バルブポジション制御	4	5	6	5
サンプル値制御	1	5	9	5
むだ時間補償 PID 制御	0	2	11	7
ゲインスケジューリング PID 制御	1	1	9	9
モデルベース制御				
内部モデル制御	2	5	3	9
線形モデル予測制御	4	6	6	3
非線形モデル予測制御	0	1	2	16
適応制御				
セルフチューニング PID 制御	0	1	1	17
モデル規範型適応制御	0	0	1	18
現代制御理論応用制御				
状態フィードバック制御	0	0	4	15
予見制御	0	0	1	18
H_{∞} 制御	0	0	0	19
知識ベース制御				
ファジー制御	0	0	5	14
AI 応用	0	0	2	17
ニューラルネットワーク応用	0	0	4	15
統計的プロセス管理	0	1	3	15
ソフトセンサー	3	7	4	5

応用レベル:

A: 適用方法を標準化しており必要な対象には必ず応用する

B: 応用しているが適用方法の標準化は行っていない

C: ときどき応用する

D: 応用していない

第 5 章

高度制御プロジェクトに関する調査

- 費用対効果が重要であり，計画，予算化，プラントテストで苦労．
- プロセス改造への適応，制御性能の妥当性評価が主な技術的課題．
- メンテナンス体制の問題は，要員の育成と意欲付け．

本章では，高度制御プロジェクトの実施体制や課題について調査した結果をまとめる．調査結果を表 5.1，表 5.2，表 5.3 に示す．この表において，数値は回答数である．

表 5.1 高度制御プロジェクトの実行主体

	自社	ベンダー	共同	その他
プロジェクト計画	15	1	2	0
設計	9	0	9	0
プラントテスト	9	1	7	1
モデリング	10	3	5	0
制御シミュレーション	10	3	5	0
実装	9	2	7	0
チューニング	9	2	7	0
運用教育	14	1	2	1
メンテナンス	11	1	5	1

表 5.2 高度制御プロジェクトの進め方

プロジェクトリーダーの所属部門計測制御技術	8		
企画	3		
運転	2		
プロセス技術	2		
生産技術，制御システム設計	各 1		
プロジェクトチームの編成			
専任と兼任の混成	7		
兼任	7		
専任	2		
新規導入時に編成	1		
プロジェクト実行時の苦勞			
		1 番	2 番
計画と予算化	6	1	
プラントテスト	6	2	
設計	1	1	
モデリング	1	2	
実装	1	0	
チューニング	0	5	
DCS などのシステム増強	0	2	
成果の検証と評価	0	3	
製造部門に使ってもらうこと	1	0	
工程管理	0	1	
その他	1	0	
プロジェクトでの重視点			
		1 番	2 番
費用対効果	10	1	
機能と性能	3	4	
工程	1	4	
プラントテスト時の安全確保	1	1	
オペレータの理解と協力	1	5	
製造部門に使ってもらうこと	1	0	
使いやすさ・経営へのアピール	0	1	

表 5.3 高度制御プロジェクトのメンテナンス

主担当部門	
計測制御技術	5
運転	3
プロセス技術	3
生産技術，制御システム設計	各 1
その他	2
問題の有無	
問題がある	13
問題がない	0
漠然とした不安がある	2
問題点	
プロセス増強や改造への適応	8
制御性能の妥当性の判定	8
DCS 更新時の改造	5
最適条件に維持できているかの確認	5
低い稼働率	5
人的資源などの制約	4
人材不足	1
メンテナンス体制の問題	
要員の育成と意欲付け	10
専任者を置けない	7
日常作業がなく兼務となる	5
運転部門との連携，引き継ぎ困難	各 1
制御性能の監視と評価	
稼働率	9
重要な操作変数の動き	5
最適運転条件への適合度	4
運転部門との定期連絡会	4
重要な制御変数の変動幅	3
ベンダーツールを活用	2
その他	3

過去のアンケート調査結果との比較

かつて日本において、本アンケート調査と同様の調査が実施され、その調査結果が1995年に開催された国際会議CPC-Vで発表された[1]。その調査が行われた1990年代前半は、世界的に、プロセス制御研究者によってモデル予測制御に関する研究が精力的に行われ、石油・化学産業においてモデル予測制御の導入が進められた時期である。それから約15年の時を経て、日本の石油・化学産業における高度制御の姿はどのように変貌したのか。ここでは、この15年間でモデル予測制御技術の適用実態がどのように変わったかを簡単にまとめる。

まず、モデル予測制御の適用件数は15年間で約1.5倍に伸びた。しかしこれは、Qin and Badgwellによる主要ベンダーを対象とした調査報告[2,3]において、2倍を超える伸びが示されているのに比べて緩やかである。その背景には、効果のある対象に集中して投資し、それを改善増強して使いこなしていく日本特有の文化があると思われる。

前回の調査では、ベンダー製品が揺籃期にあり、モデル予測制御アルゴリズムを勉強して、プロセス制御技術者みずから手作りしようという気運が強かった。ところが、今回の調査では様相は一変し、淘汰を経て生き残った特定の製品を採用し、そのベンダーに適用エンジニアリングまで任せ、手早く経済効果を得ようとする傾向が強い。結果的に、課題として、メンテナンスと技術者の育成を挙げる会社が多くなってきたと考えられる。

また、この間にソフトセンサーの応用が急速に進み、モデル予測制御に不可欠な要素技術として広く定着した。

参考文献

1. M. Ohshima, H. Ohno, I. Hashimoto: "Model Predictive Control – Experiences in the University-Industry Joint Projects and Statistics on MPC applications in Japan –," International Workshop on Receding Horizon and Predictive Control, Seoul, Korea (1995)
2. S.J. Qin, T.A. Badgwell: "An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology," Proceedings of Chemical Process Control – V, Tahoe City, California, AIChE Symposium Series 316, 93, 232–256 (1997)
3. S.J. Qin, T. A. Badgwell: "A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology," Control Engineering Practice, 11, 733–764 (2003)

アンケート調査票

今回用いたアンケート調査票を以下に示す。

アンケート調査へのご協力依頼（産側委員）

2009.01.24

日本学術振興会第 143 委員会

ワークショップ No.27 代表世話人

京都大学准教授

加納 学

産学連携の場である日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会において、現在、プロセス制御技術に関わる問題解決を目的としたワークショップ No.27 が活動を行っています。PID 制御、モデル予測制御、プラントワイド制御、ソフトセンサーなど様々な課題について取り組みを進めているところですが、日本の産業界におけるプロセス制御の現状と課題を整理し、今後の技術開発の方向性を明らかにするために、アンケート調査を実施させていただくことになりました。

本アンケート調査が、プロセス制御技術の現状を正しく認識し、優先して取り組むべき課題を明確にすることで、プロセス制御技術者に技術開発の指針を与え、プロセス制御技術の発展を通して、その存在価値を高めることに貢献できることを期待しています。そのために、できるだけ多くの方々に本アンケートへご回答いただけますよう、委員以外のプロセス制御担当者への配布にも、ご協力宜しくお願いいたします。

なお、本アンケートの集計結果および分析結果は、

- 1) 本 143 委員会において、研究会やワークショップの立案に利用する
- 2) 学術的会議において、日本のプロセス制御の現状を紹介する
- 3) 回答者に詳細版報告書を送付する（詳細版は回答者のみに提供する）

のために利用させていただくものとし、それ以外の目的では利用しません。また、集計作業は大学側委員のみで実施し、個人や企業が特定できる情報は集計担当者以外には漏らしません。

— アンケート調査回答要領 —

提出期限：2月13日（金）

回答方法：電子メール（添付ファイル PC_responseshet.xls を返送）

提出先：加納 学（京都大学准教授） manabu@cheme.kyoto-u.ac.jp

本件についてご質問等がありましたら、加納までご連絡下さい。

以上、ご協力よろしくお願いいたします。

モデル予測制御の応用に関する質問表

以下の設問にお答え下さい。回答は全て別紙の回答シートに記入下さい。

問1 貴社・貴事業所の概要

問1-1 貴社・貴事業所の規模

資本金と従業員数を回答シート1に記入下さい。

問1-2 貴社・貴事業所は、どの業種になりますか。

下表の該当する番号を回答シート1に記入（プルダウンメニューから選択）下さい。その他のときは、26を選び、右欄に具体的に業種を記入下さい。

表1-2 業種

- | | |
|---------------|--------------------------|
| 1. 鉄鋼 | 14. 上下水道 |
| 2. 非鉄金属 | 15. 環境インフラ（産業廃棄物処理など） |
| 3. 石油 | 16. 窯業 |
| 4. 石油化学 | 17. 半導体 |
| 5. 化学 | 18. 電気機器 |
| 6. 医薬 | 19. 機械 |
| 7. 繊維 | 20. 造船 |
| 8. フィルム | 21. 航空・宇宙 |
| 9. 食品 | 22. 自動車 |
| 10. パルプ・紙 | 23. 輸送・交通 |
| 11. 電力（火力・水力） | 24. エンジニアリング |
| 12. 電力（原子力） | 25. 情報システム（ソフトウェアベンダー含む） |
| 13. ガス | 26. その他 |

問1-3 貴方の現在の所属部門

該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、10を選び、右欄に部門名を記入下さい。

表1-3 所属部門

- | | |
|-------------|---------------------|
| 1. 研究開発 | 6. 設備管理（計装・工務・保全など） |
| 2. プロセス設計 | 7. 品質管理 |
| 3. 制御システム設計 | 8. 営業 |
| 4. 製造・運転 | 9. マーケティング |
| 5. 企画 | 10. その他 |

以下の設問は、問2から問5まであります。問2および問3は、モデル予測制御を適用した（する）プロセス設備（たとえばオレフィン製造設備）の、一つのモデル予測制御の制御対象ユニット（以下『対象ユニット』たとえばエチレン精製塔）ごとに回答していただくものです。問4および問5は、貴方の適用経験に基づき、モデル予測制御の評価を行っていただく設問です。回答可能な範囲で記入いただければ幸いです。

問2 モデル予測制御の適用プロセス設備

問2 - 1 適用プロセスの数

モデル予測制御を、これまでに適用した、もしくは現在適用検討中のプロセス設備の数を回答シート1に記入下さい。モデル予測制御を今まで適用したことがなく、適用検討中のプロセス設備もない方は、問5 - 3に進んで下さい。

問2 - 2 現在、稼働中のモデル予測制御の数

モデル予測制御の適用プロセス設備をお持ちの方にお聞きします。適用したモデル予測制御の中で、現在も稼働中のプロセス設備の数を回答シート1に記入下さい。

問2 - 3 自社開発かベンダー（モデル予測制御のソフトウェアや適用技術を提供している会社）からの導入か。

モデル予測制御をこれまでに適用した、もしくは現在適用検討中のプロセス設備で、制御アルゴリズムを自社開発した（しようとしている）ものと、ベンダーから導入したものの、プロセス設備の数を回答シート1に記入下さい。

問2 - 4 適用プロセスおよび制御対象ユニットの名称

モデル予測制御を適用した、もしくは適用検討中の、プロセス設備と対象ユニットの名称（抽象的な略称でも結構です）、およびモデル予測制御の変数（操作変数・外乱変数・制御変数）の数と制御周期を回答シート2に記入下さい。

また、モデル予測制御のベンダーの方は、納入先事業所との間で、同じプロセス設備のダブルカウントを確認できるように、モデル予測制御を納入した会社名・事業所名を記入下さい。

問 2 - 5 従来の制御の問題点

回答シート 2（問 2 - 4）に記入いただいたプロセス設備ごとに、従来の制御上の問題点を下表から選択して、その番号を回答シート 2 に記入下さい。複数ある場合は、重要な順に上位 2 つまで記入下さい。その他のときは、12 を選び、右欄に具体的に記入下さい。

表 2 - 5 従来の制御の問題点

- | | |
|------------------|--------------------|
| 1. 外乱が多い | 7. プロセス動特性が不明確である |
| 2. むだ時間が長い | 8. モデル化が困難 |
| 3. 相互干渉が強い | 9. 多変数系である |
| 4. 不安定系である | 10. 計測が困難か不可能な系である |
| 5. プロセス動特性の変動が多い | 11. 手動運転である |
| 6. 非線形性が強い | 12. その他 |

問 2 - 6 モデル予測制御選択の技術的な理由

モデル予測制御を選択した技術的な理由を、下表から該当する番号を選択して回答シート 1 に記入下さい。複数ある場合は、重要な順に上位 2 つまで記入下さい。その他のときは、14 を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表 2 - 6 モデル予測制御選択の技術的な理由

1. 安定な制御を確保できる
2. オペレータ操作の自動化ができる
3. 目標値追従の応答速度を向上できる
4. 外乱抑制性が改善できる
5. 外乱やプロセス設備の特性変動に対してロバストな制御ができる
6. 制御の非干渉化を実現できる
7. 多変数プロセス一括して制御できる
8. プロセス設備の運転条件を最適化できる
9. 操作変数と制御変数の不等号（上下限）制約条件を処理できる
10. 制御パラメータの自動調整が可能になる
11. プロセス設備の状態や外乱を把握できる。
12. 理論がわかりやすい
13. インパルス応答やステップ応答などのプロセスモデル作成が容易である。
14. その他

問 2 - 7 モデル予測制御選択の技術面以外の理由

モデル予測制御を選択した技術面以外の理由について、下表から該当する番号を選択して回答シート 1 に記入下さい。複数ある場合は、重要な順に上位 2 つまで記入下さい。その他のときは、10 を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表 2 - 7 モデル予測制御選択の技術面以外の理由

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1. たまたま選択した | 6. 手動調整による運転に無理がある |
| 2. 理論的な興味から | 7. プロジェクト期間が短い |
| 3. 実績が豊富だから | 8. ベンダーからの提案 |
| 4. 競合他社に遅れを取らないため | 9. 上司の指示 |
| 5. 費用対効果が適切 | 10. その他 |

問 3 モデル予測制御の設計方法

問 3 - 1 モデル予測制御アルゴリズム

問 2 -4 で挙げられたモデル予測制御は、下表のどのアルゴリズムに分類されますか？該当する番号を回答シート 2 に記入下さい。その他のときは、7 または 17 を選び、右欄に具体的に記入下さい。

表 3 - 1 モデル予測制御アルゴリズム

- | ベンダー製品 | 自社開発アルゴリズム |
|----------------------|----------------|
| 1. DMCplus | 11. IMC |
| 2. RMPCT | 12. GPC |
| 3. SMOC | 13. DMC |
| 4. Connoisseur | 14. QDMC |
| 5. Process Perfecter | 15. MAC |
| 6. PFC | 16. 非線形モデル予測制御 |
| 7. その他 | 17. その他 |

問 3 - 2 ハードウェアシステム

問 2 - 4 で挙げられたモデル予測制御は，下表のどのハードウェアシステムで動作していますか（させますか）？該当する番号を回答シート 2 に記入下さい．その他のときは，5 を選び，右欄に具体的に記入下さい．

表 3 - 2 ハードウェアシステム

1. プロセスコンピュータ
2. D C S
3. ワークステーション・サーバー
4. P C
5. その他

問 3 - 3 プロセスモデル形式

問 2 - 4 で挙げられたモデル予測制御のプロセスモデルは，どのような形式で記述しましたか？該当する番号を回答シート 2 に記入下さい．その他のときは，5 を選び，右欄に具体的に記入下さい．

表 3 - 3 プロセスモデル形式

1. ステップ応答あるいはインパルス応答
2. 伝達関数
3. 状態方程式
4. 非線形微分方程式+代数方程式
5. その他

問 3 - 4 モデリング方法

問 2 - 4 で挙げられたモデル予測制御では，モデリングをどのような方法で行ないましたか？該当する番号を回答シート 2 に記入下さい．その他のときは，4 を選び，右欄に具体的に記入下さい．

表 3 - 4 モデリング方法

1. プラントテスト
2. 解析的モデリング
3. 過去に作成したモデルを再利用
4. その他

問 3 - 5 初期チューニング

問 2 - 4 で挙げられたモデル予測制御で、実装前の制御パラメータの初期値は、どのような方法で決めましたか（行おうとしていますか）？該当する番号を回答シート 2 に記入下さい。その他のときは、4 を選び、右欄に具体的に記入下さい。

表 3 - 5 初期チューニング

1. 制御シミュレーションによる
2. ベンダー推奨値とする
3. 自社のチューニング則による
4. その他

問 3 - 6 チューニング目標

問 2 - 4 で挙げられたモデル予測制御のチューニングにあたり、チューニングの目標を何に設定しましたか（しますか）？該当する番号を回答シート 2 に記入下さい。その他のときは、4 を選び、右欄に具体的に記入下さい。

表 3 - 6 チューニング目標

1. 目標値変更に対する追従性
2. 外乱抑制性
3. 最適条件への到達速度
4. その他

問 3 - 7 実装当初の問題点の有無（適用検討中のものは回答不要です）

実装当初、問題は発生しましたか？問題の有無を回答シート 2 に記入下さい。

表 3 - 7 実装当初の問題点の有無

1. 何らかの問題があった
2. 問題が発生しなかった

問3 - 8 実装当初の問題点の解決方法（適用検討中のものは回答不要です）

当初発生した問題点をどのように解決しましたか？下表から該当する番号（複数項目を選択可）を回答シート2に記入下さい。その他のときは、12を選び、右欄に具体的に記入下さい。

表3 - 8 問題解決方法

1. 制御系再設計
2. 再プラントテスト
3. 再モデリング
4. 再チューニング（制御周期変更を含む）
5. 計測器改善
6. 操作部改善
7. PID再調整
8. ソフトセンサー適用
9. ハードウェアシステム増強
10. ヒューマンインタフェース増強
11. オペレータ再教育（教材見直しを含む）
12. その他

注）制御系再設計は、制御変数や操作変数などの見直しや、制約条件の再検討などを意味します。

問4. 適用効果

モデル予測制御を適用した結果得られた効果についてお伺いします。

問4 - 1 制御性能改善効果

適用以前の問題点に対して、特に効果があったと思われる事項について、重要な順に2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、6を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表4. 1 制御性能改善効果

1. 目標値変更に対する追従性がよくなった
2. 外乱に対する制御性能がよくなった
3. プロセス設備の非線形性に対する補償が改善された
4. プロセス設備のむだ時間に対する補償が改善された
5. 自動運転が可能になった
6. その他

問4 - 2 生産性向上効果

適用実績から、生産性向上に効果があった事項を、重要な順に2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、8を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表4. 2 生産性向上効果

1. 省資源・省エネルギーを実現できた
2. 生産能力が向上した
3. 品質の安定化と向上につながった
4. 銘柄や原料の変更、生産量の変更に対する柔軟性が増した
5. 運転を安定化できた（アラーム回数低減など）
6. オペレータの作業負荷を軽減できた（手動調整操作回数低減など）
7. 少人化を実現できた。
8. その他

問4 - 3 他の制御方式との比較

適用後の制御性能について、適用以前の方式、あるいは他に採用した方式と比較した結果があれば、回答シート1に記入下さい。複数ある場合はすべて記入下さい。その他のときは、6を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表4 - 3 他の制御方式との比較

- | | |
|------|---|
| 制御方式 | 1. 手動運転 2. PID制御 3. アドバンス制御
4. 現代制御理論応用
5. 知識ベース制御（ファジー・AI・ニューロ）
6. その他 |
| 比較項目 | 1. 目標値追従性
2. 外乱抑制性
3. 制御アルゴリズムの分かりやすさ
4. 制約条件処理の容易性
5. オペレータが介入し手動調整する作業負荷
6. 実装調整期間
7. その他 |
| 比較結果 | 1. 改善された
2. やや改善された
3. 同等である
4. やや悪くなった |

5. 悪くなった

問4-4 適用上のキ-ポイント

問4-4-1 モデル予測制御適用の「成功要因」は何ですか？

適用された経験の中から特に重要と思われる事項を、重要な順に2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、6を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表4.4.1 成功要因

1. プロセスのモデリングを入念に行った
2. プロセス特性（例えばむだ時間）にあった制御方法であった
3. 制御目標（例えば最適性、経済性、安全性、柔軟性）にあった方法だった
4. オペレータ、エンジニアの教育に力をいれた
5. 実現環境が整っていた（ソフトウェア、ハードウェアなど）
6. その他

問4-4-2 モデル予測制御が有効なプロセスはどのようなものですか？

適用された経験の中から特に有効と思われる対象を、有効と思われる順に2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、8を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表4.4.2 有効なプロセス

1. 外乱が多い
2. むだ時間が長い
3. 非線形性が強い
4. 特性変動（プロセス動特性の変化）が多い
5. 相互干渉のある多変数プロセス
6. 最適運転が必要なプロセス
7. モデル化が難しい
8. その他

問4 - 5 適用時の所要工数

最も大規模なモデル予測制御を適用したときに要した工数（人日単位）について、差しつかえなければ、回答シート1の所定の欄に下記の区分ごとに記入下さい。

教育・学習

設計（制御目標，操作・制御・外乱変数選定など）

モデリング（プラントテスト，モデル作成・評価・確定）

実装調整（制御動作の調整と性能確認）

運用（運用マニュアル作成，オペレ - タ教育など）

問5 今後の課題

問5 - 1 一般的課題

適用したモデル予測制御に課題がありましたら，下表から上位2項目（1個だけでも結構です）選択し，該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは，11を選び，下欄に具体的に記入下さい。

表5. 1 一般的課題

1. コントロ - ラの入出力変数の最大点数が不足している
2. プロセス設備に特有な制御目的に対応できないことがある
3. ヒューマンインタフェース機能が十分でない
4. 外乱抑制性能が不十分で定常偏差があるように見えることがある
5. モデル誤差が制御性に及ぼす影響が大きくロバスト性が低い
6. プロセスの特性変動や非線形性に対するロバスト性が低い
7. 測定変数間の相関からコントロ - ラの入出力変数を決定するのが困難
8. 操作変数の自由度が大きく評価関数に基づく最適化が困難
9. 相関の弱い／非線形性が強いプロセスではモデリングが困難
10. 設計パラメ - タが多く，チュ - ングの自由度が大きいため，適正值を見つけるのが困難
11. その他

問5 - 2 メンテナンスの課題

適用したモデル予測制御を維持していく上で課題と考えられることがありましたら、下表から上位2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、6を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表5. 2 メンテナンスの課題

1. オペレータの教育
2. エンジニアリング技術の伝承（設計者が異動しても大丈夫なように技術やノウハウを伝える）
3. 性能変化に対する対処（制御性能の劣化に対して、再モデリングするか、チューニングで済ますかの判断が難しい）
4. 異常時の処置（特定の入出力変数が不具合の時に、制御を継続できる保証がない）
5. チューニングの複雑性（制御性能低下時、簡単にチューニングできない）
6. その他

問5 - 3 モデル予測制御の今後の課題

問5 - 3 - 1 改善が必要な一般的事項

モデル予測制御に今後改善が望まれる課題を、下表から上位2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、10を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表5. 3. 1 一般的改善事項

1. プロセス動特性のモデリング技術の発展
2. 計測器，アクチュエータの精度と機能の向上
3. 制御ニーズ発掘の手順と効果推算方法の明確化
4. 社内関係部署のプロセス制御技術の理解と教育の強化
5. モデル予測制御の実装容易性向上
6. プロセス制御技術者の量的拡大
7. モデル予測制御技術のPRと普及
8. 適用のためのツールの開発とシステム整備
9. 制御システム機器の機能，性能，信頼性の向上
10. その他

問5 - 3 - 2 理論の改善事項

モデル予測制御に今後改善が望まれる理論的課題を、下表から上位2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、9を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表5. 3. 2 理論の改善事項

1. 非線形性への対処
2. 非定常操作（スタートアップ&シャットダウン）への対処
3. アルゴリズムの簡素化と高速化
4. より大規模な多変数プロセスへの適用能力の向上
5. 特性変動に対する対処（ロバスト性の向上，適応機能の付加と強化）
6. モデリングの精度と制御性能の明確化（どこまでの精度でモデルを作成すれば，期待する制御性がでるか）
7. 制御プロセス設備特有のノウハウを組み込める柔軟構造への対応
8. 緩やかな速度で変化するランプ状外乱の抑制性能の向上
9. その他

問5 - 3 - 3 プロセスの非線形性・特性変動への対処法

プロセスの非線形特性やプロセス動特性の変動に対処する方法として、下表から実用性の高い順に2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、6を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表5. 3. 3 プロセスの非線形性・特性変動への対処方法

1. 非線形モデルあるいは時変モデルを処理できる制御アルゴリズムにする
2. 線形モデルを使い，制御のロバスト性を向上させる
3. 線形モデルを使い，制御に適応機能を導入する
4. 線形モデルを複数用意し状態に応じて切り替える
(ゲインスケジューリングを取り入れる)
5. 他の技法（たとえば知識ベース制御）と組み合わせる。
6. その他

問5 - 4 これからのモデル予測制御に期待する具体的事項

回答シート1に具体的に記入下さい。

ソフトセンサー（推定モデル）の応用に関する質問表

以下の設問にお答え下さい。回答は全て別紙の回答シートに記入下さい。

問6 ソフトセンサー（推定モデル）の応用

問6 - 1 適用プロセスの数

ソフトセンサーを、これまでに適用した、もしくは現在適用検討中のプロセス設備の数を回答シート1に記入下さい。

問6 - 2 現在、稼働中のソフトセンサーの数

ソフトセンサーの適用プロセス設備をお持ちの方にお聞きします。適用したソフトセンサーの中で、現在も稼働中のプロセス設備の数を、プロセス設備およびモデル構築手法ごとに、回答シート1に記入下さい。

問6 - 3 課題

適用したソフトセンサーに課題がありましたら、下表から上位2項目（1個だけでも結構です）選択し、該当する番号を回答シート1に記入下さい。その他のときは、9を選び、下欄に具体的に記入下さい。

表6.3 課題

1. モデル構築に必要なデータ収集の負担（時間・コスト）が大きい
2. 収集したデータの前処理の負担（時間・コスト）が大きい
3. モデル構築作業そのものの負担（時間・コスト）が大きい
4. どのモデル構築方法を採用すべきかわからない
5. 予測精度が低い（導入当初から）
6. 予測精度が低い（運転条件の変更に対応できない）
7. 予測精度の劣化、メンテナンス（プロセス特性変化により精度が経年劣化）
8. 予測値の信頼性が評価できていない
9. その他

制御技法の応用に関する質問表

以下の設問にお答え下さい。回答は全て別紙の回答シートAに記入下さい。

P I D制御は基本制御（regulatory control）として広く用いられています。これに対して、本アンケートのモデル予測制御に代表される高度な制御技法は、現場でどのように評価され応用されているのか、それぞれの技法の応用レベルを次の5段階で評価していただき、評価点数を**回答シートA**に記入下さい。産業界における制御技法応用の現状を正しく認識し、今後の研究開発目標を設定する際に活用させていただきます。

評価点	応用レベル
5	適用方法を標準化しており必要な対象には必ず応用する
4	応用しているが適用方法の標準化は行っていない
3	ときどき応用する
2	まったく応用していない
1	応用できるほど技法を理解できていない

1. デジタル制御システムを活用した古典的アドバンス制御

- 1.1 フィードフォワード制御 ()
- 1.2 オーバライド制御 ()
- 1.3 バルブ開度制御 ()
- 1.4 サンプル値制御（たとえばプロセスガスクロ） ()
- 1.5 むだ時間補償 PID 制御 ()
- 1.6 ゲインスケジューリング PID 制御 ()
- 1.7 その他（具体的に記入下さい） ()

2. モデルベース制御

- 2.1 内部モデル制御（internal model control） ()
- 2.2 線形モデル予測制御 ()
- 2.3 非線形モデル予測制御 ()

3. 適応制御

- 3.1 セルフチューニング PID 制御 ()
- 3.2 モデル規範型適応制御 ()

4. 現代制御理論応用制御

- 4.1 状態フィードバック制御 ()
- 4.2 オブザーバー併用状態フィードバック制御 ()
- 4.3 予見制御 ()
- 4.4 H^∞ 制御 ()

5. 知識ベース制御

- 5.1 ファジィ制御 ()
- 5.2 AI 応用 ()
- 5.3 ニューラルネットワーク応用 ()

6. 統計的プロセス制御

- 6.1 管理図応用 ()
- 6.2 CUSUM chart 応用 ()
- 6.3 ソフトセンサー応用 ()

高度制御プロジェクトに関する質問表

以下の設問にお答え下さい。回答は全て別紙の回答シートBに記入下さい。

モデル予測制御を核とした高度制御プロジェクトの進め方と、その完成後の運用とメンテナンスが大きな関心事となっています。これについてさらに追加質問しますので、**回答シートB**に記入下さい。産業界における課題を正しく認識し、今後の研究開発目標を設定する際に活用させていただきます。

問B 1 高度制御プロジェクトの進め方について

問B 1-1 プロジェクト推進の主体となるプロジェクトリーダーの方が所属される部門の番号を記入下さい。その他を選択された場合は、差し支えない範囲で具体的に記入下さい（以下同様）。

1. 運転
2. プロセス技術
3. 企画
4. 計測制御技術
5. その他

問B 1-2 プロジェクトチーム編成の該当する番号を記入下さい。

1. 専任
2. 専任と兼任の混成
3. 兼任
4. その他

問B 1-3 プロジェクトの、計画・設計・プラントテスト・モデリング・制御シミュレーション・実装・チューニング・運用教育、メンテナンスの9段階について、実行主体を番号で記入下さい。

1. 自社
2. 自社とベンダーの共同
3. ベンダー
4. その他

- ・プロジェクト計画
- ・設計
- ・プラントテスト
- ・モデリング
- ・制御シミュレーション
- ・実装
- ・チューニング
- ・運用教育
- ・メンテナンス

問B-4 プロジェクト実行時、以下のどこで苦勞されていますか。重要な順に2項目を選び番号を記入下さい。

1. 計画と予算化
2. 設計
3. プラントテスト
4. モデリング
5. 実装
6. チューニング
7. オペレータ教育
8. DCSなどのシステム増強
9. 現場計装設備などの増強
10. 成果の検証と評価
11. その他

問B-5 プロジェクトで重視されているのは以下のどれですか。重要な順に2項目を選び番号を記入下さい。

1. 投資性：費用対効果
2. 工程
3. 機能と性能
4. ヒューマンインタフェース
5. プラントテスト時の安全確保
6. オペレータの理解と協力
7. その他

問B2 高度制御システムのメンテナンスについて

問B2-1 メンテナンスの主担当部門の番号を記入下さい。

1. 計測制御技術
2. プロセス技術
3. 運転
4. ベンダー
5. その他

問B2-2 メンテナンスに問題を感じていますか。該当する番号を記入下さい。

1. 問題ない
2. 漠然とした不安がある
3. 問題がある

問B2-3 どのようなことに問題を感じていますか。該当する項目の番号をすべて記入下さい。

1. 高度制御を広く展開していきたいが、人的資源などの制約があり実行できない
2. プロセス増強や改造に高度制御を適応させるのが大変である
3. DCS更新に併せて高度制御システムを改造しなければならない
4. 高度制御がプロセスを最適条件に維持できているのか確認が難しい
5. 高度制御の制御性能が妥当なのかどうか判定が難しい
6. 高度制御の稼働率が低い
7. その他

問B 2－4 メンテナンスの体制などに問題があれば，該当する項目の番号をすべて記入下さい．

- 1．専任者を置けない
- 2．要員の育成と意欲付けが難しい
- 3．運転部門との連携が不十分で稼動状態を把握するのに手間がかかる．
- 4．日常の作業がほとんど無いので他の業務を兼務せざるを得ない．
- 5．安く外注したいが適切な請け手がいない
- 6．その他

問B 2－5 制御性能の監視や評価はどのようにしていますか．該当する項目の番号をすべて記入下さい．

- 1．稼働率
- 2．重要な制御変数の変動幅
- 3．重要な操作変数の動き
- 4．最適運転条件への適合度
- 5．ベンダーツールを活用している
- 6．運転部門との定期連絡会で問題点や改善要望を把握する
- 7．その他

ご協力誠にありがとうございました．ご回答いただいた情報は，本アンケートの目的以外に使用しないことをお約束いたします．

<問い合わせ先>

〒615-8510

京都市西京区京都大学桂

京都大学大学院工学研究科化学工学専攻

准教授 加納 学

FAX 075-383-2687

E-mail manabu@cheme.kyoto-u.ac.jp

<関連情報>

日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会

<http://www.pse143.org/>

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.27

<http://ws27.pse143.org/>

京都大学大学院工学研究科化学工学専攻 加納 学

<http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/~kano/>

高度プロセス制御に関するアンケート調査結果報告書

発行日 2009年6月5日

著者 加納学(編集)

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.27

発行所 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.27

〒615-8510 京都市西京区京都大学桂

京都大学大学院工学研究科化学工学専攻プロセスシステム工学研究室

FAX 075-383-2687 E-mail manabu@cheme.kyoto-u.ac.jp

印刷所 大学生協京都事業連合ブックプリントセンター

〒606-8106 京都市左京区高野玉岡町 23-3

TEL 075-711-3839 FAX 075-711-1150