

制御技術とソフトウェア

中野 道雄

東京工業大学工学部制御システム工学科教授

〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1

Tel: 03(5734)2543

Fax: 03(5734)3596

呉 敏

東京工業大学工学部制御システム工学科客員研究員

〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1

Tel: 03(5734)2329

Fax: 03(5734)3596

余 錦華

東京工科大学工学部機械制御工学科講師

〒192-8580 東京都八王子市片倉町1404-1

Tel: 0426(37)2487

Fax: 0426(37)2487

1. はじめに

近年，制御理論，コンピュータ，人工知能(AI)などの急速な発達により，制御技術が大きく変わろうとしている．特に，コンピュータとソフトウェア産業のすざましい革新は制御技術に巨大なインパクトを与え，ファクトリーオートメーション(FA)とプロセスオートメーション(PA)において，様々な高度な制御技術が広く使われるようになり，制御システムはインテリジェント化，オープン化とライトサイジングに向かって着実に発展している．

この小論では，制御技術の進展およびコンピュータとソフトウェア技術の革新のそれへの影響を回顧し，著者らが実際に設計した亜鉛湿式製錬における浄化プロセス制御システムを用い上記の主旨に基づいた高度な制御技術の応用例を紹介する．

2. 制御技術の進展

制御理論は古典制御理論から現代制御理論を経て，アドバンスト制御理論に至っている．それをもとに確立した制御技術は数式に基づくものである．一方，これと同時に，AIの発展にともなって確立した制御技術はエキスパートと熟練オペレータの経験的知識に基づくものである．近年，よりよい制御性能を求めて数式に基づく制御と知識に基づく制御を融合した統合制御技術が盛んに研究されている．

2.1. 数式に基づく制御技術

現在，現場では制御の基盤となっているのはやはり古典制御の代表であるPID制御である．近年，新しい制御理論が適用され，I-PDと2自由度PID，非干渉PID，PIDオートチューニングなどのような改善が行われている^{(1),(2)}．

現代制御技術に関して，最適レギュレータ，オブザーバー，カルマンフィルタなどの実用例も報告されているが，古典制御ほど普及されていないのは現状である⁽³⁾．

しかしながら，実プラントの制御において，制御対象は様々な不確かさを持っている．ロバスト制御などのアドバンス制御はこのような制御対象の持つ不確かさを十分に考慮しており，今後強力な制御手法となることが予想される．最近，現場での応用例も報告されはじめている．しかし，その応用に際しては，実プラントの不確かさの記述，コントローラの低次元化などの問題は解決しなければならない．

現場では上で述べたもののほかに，実用的な制御技術としては，モデル予測制御，繰返し制御などの手法も広く使われており，特に，化学プロセスにおいてモデル予測制御は大きな成果を収めている^{(4), (5)}．

2.2. 知識に基づく制御技術

制御対象は数学モデルで厳密に表現できる場合には，数式に基づく制御技術により満足な制御結果が得られるが，そうでない場合，制御対象に関する種々の知識をいかに生かすかは極めて重要となり，知識に基づく制御技術が必要になる．その技術としては，現在FAN (Fuzzy, AI, Neural Network) に基づく制御方式が広く用いられ，特に，鉄鋼産業と化学プロセスなどではファジィとエキスパート制御，家電などではファジィとニューロ制御を適用した実績が数多く報告されている^{(6), (7)}．

一方，制御の新しいニーズに対して，FANに基づく制御だけでは対応できない場合もある．したがって，数式に基づく制御技術との融合により与えられたより高度な制御仕様を満たすような統合制御技術が期待される．

2.3. 統合制御技術

近年，数式と知識に基づく制御技術を融合し，より高度な制御を実現し，従来では得られなかった制御効果を求める試みが数多く行われている．その中，ファジィ + エキスパート + PID制御，ファジィ + ニューロ + PID制御などはよく知られている．

このような統合制御技術においては，数学モデルと知識モデルをいかに融合して制御対象を記述するか，またこのような制御対象の記述に対して，いかに制御系を設計するかは制御効果を大きく左右する要因となり，重要な課題である．この統合制御技術を広範囲に応用するために，この種の制御システムを解析・設計する一般的手法の開発が急務である．

3. 制御用ソフトウェアの進展

近年，コンピュータ技術の急速な発展は制御技術の応用によりよい環境を提供し，制御用オペレーティングシステム(OS)はWindowsファミリーのような汎用OSも広く用いられるようになり，このような汎用OSのもとで様々な制御システム構築用ツールが開発市販され，また制御システム間の情報・データ授受が標準化されつつある．

3.1. 制御用OS

初期の段階でのコンピュータ制御システムは，いかにリアルタイム制御を実現するかを念頭におき専用OSまで構築したものはほとんどであった．1980年代に入ってから，オフィスオートメーション(OA)で使用されてきたDOSとUnixのような汎用OSを制御システムに導入し実現したシステムの例も見られるようになった⁽⁸⁾．昨今，Windowsファミリーのような汎用OSを計測制御システム用OSとして用いるメーカーが多くなり，関連製品の開発に力を入れている．

3.2. 設計用ソフトウェア

1980年代後半までに制御理論が飛躍的に発展したが，制御システム設計CAD(Computer Aided Design)ソフトウェアが完備・普及されていなかったため，先端的制御技術の応用が制約されていた．1990年代に入り，MATLAB，MATRIXxなどの数値計算に基いた汎用パッケージ上で構成された種々の設計用ツールにより制御系の設

計は容易になり，高度な制御手法も手軽に実現可能となり，設計したコントローラはDSP (Digital Signal Processer) で即座に実現し，実時間による評価が簡単にできるようになった⁽⁹⁾．

また，コンピュータの提供された開発環境で制御アルゴリズムの自主開発も容易になり，その実現も短期間でできるようになった．

3.3. 標準化インターフェース

プロセス制御では，従来から各制御システムおよびその中の各レベルが独立した系として独自のデータフォーマットが存在し，また複数メーカーの機器と複数メーカーのアプリケーションが利用されている場合も多い．Windows環境下において，異なる制御システム，機器とアプリケーション間のデータを容易に授受する機能を実現する基礎がオブジェクト技術OLE(Object Linking Embedding)である．OPC(OLE for Process Control)はOLEをプロセス制御分野に拡張し，Windowsの基幹技術であるOLE/COM(Component Object Model)をベースにしたものであり，異なるメーカーの制御システム，機器とアプリケーション間のインターフェースを標準化し，プロセス制御におけるデータ授受を容易に行うことを目的としている⁽¹⁰⁾．OPCにより，異機種間のアプリケーション相互接続が一種類のインターフェースで実現できるとともに，プロセス制御の目的に応じて最適なソフトウェアが多くの販売商品から選択でき，かつオブジェクトの内部構造は規定されていないため，固有の作り込みができる自由度をもち，固有技術に基づく高性能のアプリケーション開発に集中できるようになった．

4. 制御システムのアーキテクチャ

制御システムは1970年代半ばからデジタル化への移行が行われた．1975年には，DCS (Distributed Control System) が登場し，これによって制御の分散化と高度化が実現で

き，画期的なシステムとして現在の制御システムの基礎を作りあげた．近年，DCSによって数多くの高度な制御技術が様々なプラントに応用されている．制御システムはインテリジェント化，オープン化とライトサイジングへと進んでいる．

4.1. 基本的なアーキテクチャ

図1は制御システムの基本的なアーキテクチャを示している．縦から見ると，このような制御システムは四つのレベルに分けられる．レベル1はフィールド計測・制御であり，インテリジェントフィールド機器とデジタルセンサおよびアクチュエータが含まれている．レベル2はオンライン制御であり，分散型コントローラとプログラマブルコントローラ(PLC)などはこのレベルに属す．レベル3は制御最適化であり，オペレータステーションとなり，プロコン，パソコンとワークステーションからなっている．レベル4は品質最適化であり，各種のパソコン，サーバとワークステーションなどが含まれる．

レベル1とレベル2の間ではフィールドバス，レベル2とレベル3の間では制御LAN(Windows NT, Ethernetなど)，レベル3とレベル4の間では情報・制御LAN(Ethernetなど)，レベル4はオープン情報ネットワークによりその上のレベルと接続される．各レベルの間でのデータ授受はOPCにより実現される．現在MAP(Manufacture Automation Porotocol)も制御LANに使われ続けている．

レベル1とレベル2の機能は数式に基づく制御技術をDCSによって実現することがほとんどである．レベル3は主に数式と知識を統合して制御を行う．レベル4は経営工学およびAIなどの手法により品質の管理を行う．

4.2. インテリジェント化

制御システムのインテリジェント化はインテリジェントフィールド機器とインテリジェント制御技術の採用をその特徴としている．

プラントの現場に分散配置されているセンサ，バルブなどのインテリジェントフィールド機器と制御システム間の情報交換はフィールドバスにより行われる．フィールドバスでは従来の4～20mAアナログ電流信号ではなくデジタル値で双方向の通信をする．現在，フィールドバスの規格が統一され，実用化はいよいよ現実のものとなる⁽¹¹⁾．

DCSの主流はまだまだPID制御に代表される手法が中心であるが，制御システムの柔軟性を向上するために，最近，ソフトウェア技術の発展をあわせて，FANなどの取り込みを行い様々な統合制御技術がDCSにおいて実現可能となっている．

4.3. オープン化とライトサイジング

最近のコンピュータ，ネットワークと情報処理の分野でのオープン化とライトサイジングにともない，制御システムもその傾向が強まっている⁽¹²⁾．

Windowsで動作する市販ソフトパッケージ，オブジェクト技術の採用，Windows NTとEthernetなどの制御用LANでの本格的なオープン環境，フィールドバスとOPCの標準化，工業制御用ワークステーションとパソコンの導入などは制御システムのオープン化とライトサイジングの基礎である．小規模生産に対して，パソコンをベースとして制御システムがよく用いられるようになるであろう．

今後の制御システムの構築では，ワークステーション，パソコン，フィールド機器などのハードウェアおよび市販ソフトパッケージをコンポーネントとして作り組みを行う傾向である．高度な制御などのソフトウェアはオープン化の要求に適應するように開発する必要がある．

5. 統合制御システムの実用例

統合制御技術の産業応用への一例として，亜鉛湿式製錬における浄化プロセス制御システム^{(13), (14)} について述べる．

5.1. 浄化プロセスとその要求

亜鉛湿式製錬工程を大別すれば、焙焼、浸出、浄化、電解という四つのプロセスからなっている。このうち特に浄化プロセスでは、次段の電解プロセスで高純度亜鉛を析出させるため、前段の浸出プロセスで得られた硫酸亜鉛溶液に含まれているCu、Cd、Coなどの不純物を亜鉛末、エチルキサントゲン酸ナトリウムと硫酸銅で置換除去し、良質の電解液を生成する。

不純物の除去は2段階に分けて行われる。第1段浄化では亜鉛末でCuとCdを、第2段浄化ではエチルキサントゲン酸ナトリウム、硫酸銅と亜鉛末でCdとCoを除去することを主な目的とする。表1に浄化前後の主な不純物の濃度基準を示す。制御の目標は表1の基準を満たす浄化前の溶液に対して、浄化後の主な不純物の濃度は表1の基準を満たせ、かつ溶液に加えた亜鉛末、エチルキサントゲン酸ナトリウムと硫酸銅を最小にすることである。

5.2. 制御システム設計の基本的な考え方

浄化プロセス制御では、溶液中の不純物を効率よく除去するために、まず、操作量として加える亜鉛末、エチルキサントゲン酸ナトリウムと硫酸銅の最適値を求め、次に、それへの追従を行うことが要求される。

浄化プロセスは、諸要素間の関係が非常に複雑であり、これらの関係を正確に表現することは難しいため、従来使われてきた数学モデルだけでは満足な制御を行うことは困難である。一方、浄化プロセスのような化学プロセスは、反応条件が常に一定であり、定常プロセスと考えてよいから、数学モデルで表わせない複雑な関係でもエキスパートと熟練オペレータの経験的知識と経験的データに基づくルールモデルにより表わすことができる。したがって、浄化プロセスの制御において、経験的知識を数学モデルに取り入れ、数式と知識に基づく制御技術を融合した統合制御技術により有効な制御を実現することが

可能である。

著者らは、経験的知識の利用に重点をおいたエキスパート制御技術とアドバンスト PID制御技術を融合した統合制御技術を浄化プロセス制御に適用し、浄化プロセス制御システムを開発した。このような統合制御技術に基づいて亜鉛末、エチルキサントゲン酸ナトリウムと硫酸銅の最適値を求め、それへの追従制御を実現した。

5.3. 制御システムの構成

浄化プロセス制御システムの構成を図2に示す。品質最適化コンピュータ(QOC)とエキスパート制御コンピュータ(ECC)はそれぞれIPC 610型とIPC 810制御用パソコンを用いた。I/Aシリーズ分散型制御システム(I/A DCS)には、フィールドバスモジュール(FBM)、コントロールプロセッサ(CP10)、アプリケーションプロセッサ(AP20)、ワークステーションプロセッサ(WP30)、コミュニケーションプロセッサ(COMP)、パーソナルワークステーションノートバスインタフェース(PW-NB)などが含まれている。オンライン濃度分析装置(OCA)はCOURIER-30型蛍光X線分析装置、EC25型電化学分析装置とOTI95型自動滴定分析装置から構成された。

QOCとECCはそれぞれ品質最適化と制御最適化の機能を実現し、I/A DCSは浄化プロセスに対してオンラインの制御と監視を行い、OCAは不純物濃度をオンラインで検出している。特に、亜鉛末、エチルキサントゲン酸ナトリウムと硫酸銅の最適値がECCで求められている。

浄化プロセス制御システムは、DOSとWindowsの環境下で動作する。I/A DCS内のデータ交換はMAPに基づいて行う。

5.4. 統合制御技術の手法

浄化プロセスに適用する統合制御技術は、最適な操作量の決定に関しては、浄化プロセスの定常数学モデルとルールモデルに基づく「エキスパート制御+2自由度PI制

御」，最適な操作量への追従制御に関しては，オートチューニングPI制御が用いられた．

操作量の最適設定値を求めるモデルベースエキスパートシステムを構築した．経験的知識と経験的データを用いて，最適なP，Iゲインを決めることにより，最適な操作量を決定することができた．操作量の最適値を求めるモデルベースエキスパートシステムはC言語を用いて構築したパッケージにより実現した．

操作量の最適値への追従制御はI/A DCSにおけるオートチューニングPI制御の機能を組み合わせることにより実現した．単ループ制御技術に基づく分散制御方式が採用された．

5.5. 現場運行結果

統合制御技術の手法は，浄化プロセス制御システムに適用して以来，良好な結果が得られている．統計データによると，従来の置換反応方程式に基づく手法に比べて，統合制御技術を用いた手法を適用した場合には，操作量として加える亜鉛末，エチルキサントゲン酸ナトリウムと硫酸銅の量は節約され，特に，大量に加えて経済的效果と密接に関連している亜鉛末の量は，約11.5%節約されている．また，電解プロセスに使われた電解電力も抑えられている．

6. おわりに

急速に発展している制御技術とそれに関連するソフトウェア技術について考察した．要約すると，以下の通りである．

(1) PID制御を基盤にする制御技術については，すでに十分に実用化されており，相当な実施効果を上げている．現代制御技術の実用例が増加しているが，適用効果に対する期待はPID制御ほどではないのは実状である．今後期待する制御技術としては外乱やパラメータ変動に強いアドバンスト制御，モデル予測制御，ファジィ・ニューラ

ルネットワーク制御などが挙げられる．様々な制御を融合した統合制御技術も大きく期待され，進んで行くであろう．

(2) 制御用ソフトウェアはWindows環境下で動作する市販ソフトパッケージがますます使われ，その開発においてオープン技術環境での性能面を考えなければならない場合が多くなる．性能の良いCADソフトパッケージは制御システム的设计に広く用いられている．

(3) インテリジェント化，オープン化とライトサイジングの制御システムの開発とその応用が進んでいる．DCSの構築では，いかに高度な制御技術を取り込んで実現するかが大きな課題となっている．

(4) 設計された制御システムの実現が容易となり，実制御対象に対してどのような制御手法を適用すればよいか，どのように全体の制御系を構成すればよいかに関する検討を中心におき，基本的なアイデアがしっかりしていれば，それを実現する手段は容易になるであろう．

参考文献

- (1) 高津・伊藤：制御技術動向調査報告 プロセス装置産業における制御技術の適用状況 ，計測と制御，36-4，238 (1997)
- (2) 須田・桑田：PID制御の最近の話題，計測と制御，36-4，245 (1997)
- (3) 高橋：アドバンスト制御の現状と今後の動向，オートメーション，42-1，23 (1997)
- (4) 高田：石油・化学制御システムのライトサイジングへの取組，計測と制御，34，848 (1995)
- (5) 中野・井上・山本・原：繰り返し制御，計測自動制御学会，(1989)
- (6) 湯井・西川・渡辺・天野・財部・中森・関・河村：高炉プロセスの操業監視支援における知識システムの適用，計測と制御，31，712 (1987)
- (7) 化学工学会：知的プロセスシステム，槇書店 (1993)
- (8) 新井：DCSとその周辺におけるオープンソフトウェア利用システ

ム技術，オートメーション，42-1, 35 (1997)

- (9) 山本・上田：ロバスト制御系開発用CADシステムとその適用事例，計測と制御，30-8, 675 (1991)
- (10) 曾禰：OPC (OLE for Process Control) 技術とプロセス・オートメーション，オートメーション，43-1, 14 (1998)
- (11) 森岡：フィールドバスの現状と将来，計測技術，26-1, 55 (1998)
- (12) 島貫・桑田：オープン・ライトサイジング制御システムのアーキテクチャ，計測と制御，34-11, 856 (1995)
- (13) M. Wu *et al*: An Expert Control System for the Purification Process. Trans. NFsoc, 6-2, 101 (1996)
- (14) 呉・中野・余：浄化プロセス制御の最適操作量のモデルベースエキスパートシステム，電学論(D)，117-2, 856 (1997)

表1 浄化前後の主な不純物の濃度基準(mg/l)

成分	Cu	Cd	Co	Ni
浄化前	160 ~ 450	400 ~ 1000	8 ~ 25	8 ~ 15
一段浄化後	≤ 0.2	< 100	< 10	< 6
二段浄化後	≤ 0.2	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0
成分	As	Sb	Ge	Fe
浄化前	0.4 ~ 1.0	0.2 ~ 0.5	0.14 ~ 0.5	20 ~ 35
一段浄化後	< 0.36	< 0.5	< 0.1	< 30
二段浄化後	≤ 0.24	≤ 0.3	≤ 0.05	≤ 20

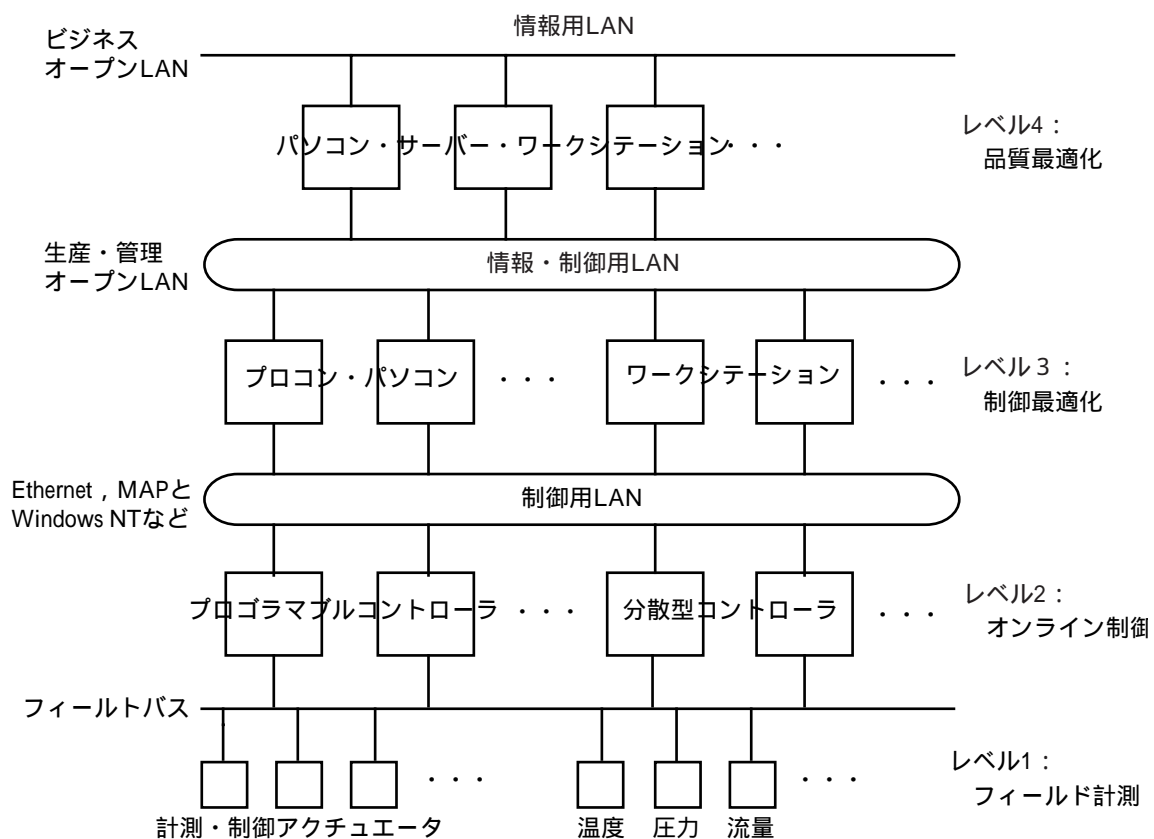


図1 制御システムのアーキテクチャ

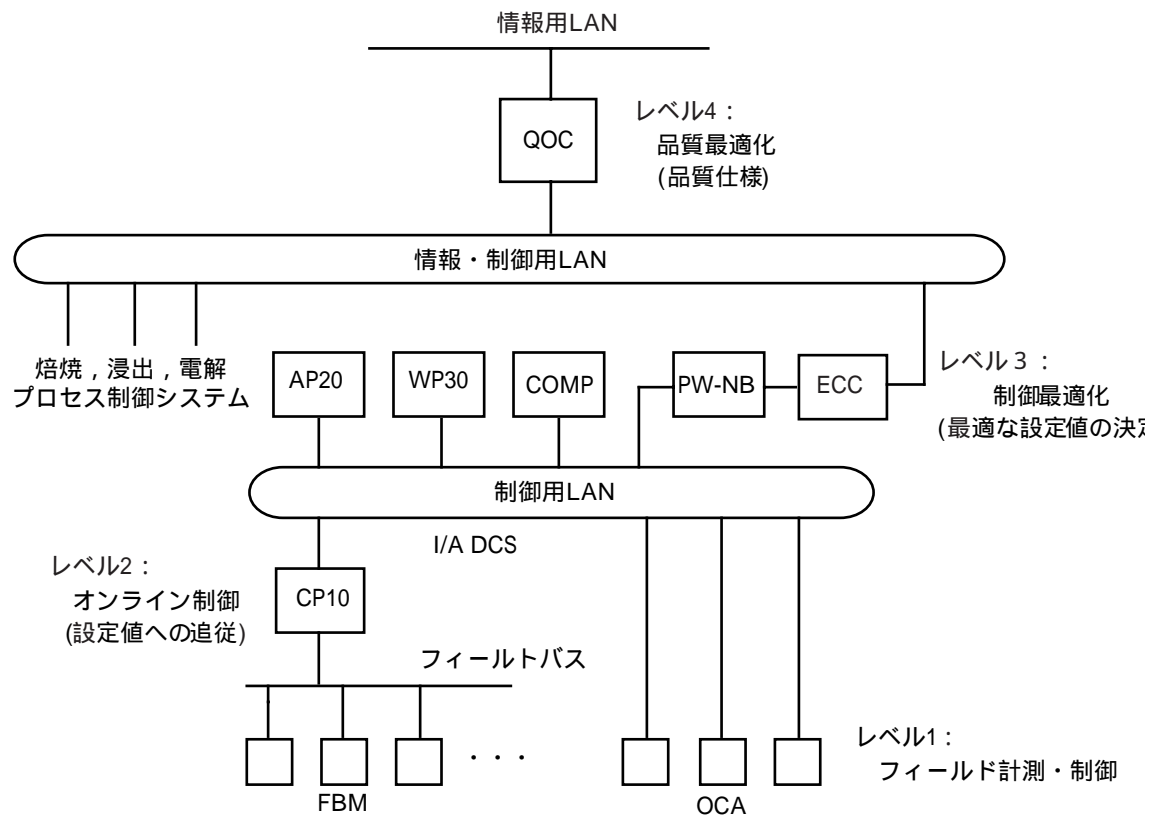


図2 浄化プロセス制御システムの構成