

です。逆の言い方をすれば、築後30年程度のアパートです。そこで、給水管もどちらかといえば新しく、これらの給水管では水漏れが起きる可能性は低いのです。これも無収水量が少ない大きな理由だと思います。

座長（小田弘登） ウォン・キー・ウェイさん、ありがとうございました。クアラルンプール市のモハマド・アサリさん、よろしいでしょうか。では、シンガポールのウォン・キー・ウェイさんの事例発表はこれで終わらせていただきたいと思います。どうもありがとうございました。

事例発表

上海市自来水制水有限公司 経理 周 雅 珍

座長（小田弘登） それでは次に上海市に発表していただきます。上海市の周雅珍さん、よろしくお願いたします。

周雅珍（上海市） 座長および各都市の代表の皆さん、こんにちは。アジア太平洋都市サミット第3回実務者会議に参加できますことをたいへん光栄に思います。私は上海市水道会社から参りました周と申します。本日は「凝集剤自動注入システムにおけるファジィ制御の応用」についてお話しいたします。主にファジィ制御技術の原理とそれを凝集剤自動注入システムに応用することにより、当該システムにおけるタイムディレイや影響要素の多さなどの問題を克服し、水質の効果的なコントロールが実現したことをご紹介いたします。



はじめに、上海市の水道について簡単にご紹介させていただきます。ここにあるスライドの丸い点が浄水場とポンプ場を示しています。上海市には十数か所の浄水場があり、最も大きな浄水場は1日140万 m^3 の浄水能力があります。現在、上海市の総浄水能力は1日680万 m^3 で、発展する上海市の需要を満たし、水質を少しでも国際先進水準に近づけるため、この2年間で黄浦江上流の導水工事と長江導水工事を実施しました。スライドをご覧ください。赤いパイプは黄浦江第一期工事を示し、オレンジ色のパイプは黄浦江第二期工事を示しています。もともと浄水場は黄浦江の中流・下流にありましたが、原水の水質をさらに向上させるために上海市による投資と世界銀行の融資とでそれぞれの導水工事を行い、黄浦江上流からと長江からも取水しています。この工事は順調に行われ、現在、黄浦江上流及び長江の原水によって水質は改善されましたが、浄水処理の技術は何ら変化がありません。原水の水質のパラメータの変化が大きいことや薬品注入の人による制御においてタイムリーな調整がなされないことなどから、作業員の負担が大きく、さらに凝集剤の注入量も多くなって、浄水処理後の水質に大きな変動が生じていました。

現在、上海市の浄水処理は自動化が進んでいます。凝集剤の注入量と原水濁度等の指標との関係を明らかにすることは、水道事業の専門家や技術者のかねてからの目標でした。しかし、薬品注入量を決定する際には原水の濁度、水温、水量、pHなどの条件や凝集、沈殿、ろ過の各作業行程における条件、それから浄水処理後に到達すべき水質基準等多くの影響要素があり、薬品注入量のコントロールは非常に複雑で掌握しにくいものとなっていました。もともとはジャーテスト法によって凝集剤の

最適量が決められていました。しかし、実際は原水の水質が時間の経過とともに変化するため、採水時の水質をもとにするジャーテスト法では、凝集剤の注入量を一貫して最適に保つことは困難です。近年は、薬品注入システムにおける自動制御の応用に伴って、処理後水質フィードバック法、すなわち小規模の水処理システムから1つの加速量を得て大きなシステムに導く方法や、原水水質フィードバック法、PLC法などが発展してきました。しかし、これらの方法は理論上での確実性はありますが、現実的には次のような問題が存在します。

濁度等の水質変数の測定時間にタイムディレイが生じる。

凝集剤注入量と大量の原水変数との数式モデルが求めにくい。

泳動電気では測定できない不純物が水中に含まれている。

凝集工程の非直線性が高い。

そのため実際の運用においては、先程述べた制御方法は確実なものとは言い難いことがわかり、私達はこれまでの方法に加えファジィ制御を取り入れました。現在、ファジィ制御は先進的な制御法として自動制御分野での応用が始まっています。ファジィ制御は特に明確な数式モデルが確立しにくく入出力を公式化できない制御分野に適しています。私達は1つの浄水工程において、凝集剤自動注入システムを構築しました。それは主に3つの部分からなり、第1の部分はフィードフォワード部、第2の部分はPID制御部、最後がフィードバック修正部です。このフィードバック部においてファジィ制御という先進的方法を導入し、同時に適応型計算法を加えて、PID制御部の流動電流の設定値を修正し、硫酸バンド注入量のコントロールを行っています。この方法によって浄水処理の際の影響要素の多さやタイムディレイが大きいことなどの問題を克服し、実際の応用においても、硫酸バンド使用量が減少し、かつ水質が向上するという顕著な効果をあげています。

次にファジィ制御の概念を簡単にご説明します。

ファジィ制御は、自動制御法の1つで、人の思考方法を真似て推論を行うものです。ファジィ推論を可能にするファジィ制御器は3つの部分からなっています。第一はファジィ化部であり、まずセンサーとADコンバータによって測定した物理量を正確な数字量に転換し、入力された正確な数字量をさらにファジィ集合の従属度に転換します。つまり、学習データベースが理解し計算できるコンピュータ言語に転化するわけです。2番目は、ファジィ推論部です。この部分を実現するために、経験豊富なオペレーター又は専門家が定めたファジィ制御規則に基づいて、第1部分で得られたファジィ従属度とファジィ規則に基づいた推論とを合成し、さらに加重平均をとりコンピュータで理解できる言語と従属度を得ます。第3の部分は非ファジィ化です。ファジィ推論によって得られたコンピュータ言語のパラメータと従属度に基づき、それに相応した非ファジィ法により最適な正確値を求めてそれを出力量とします。

実際の応用でファジィ制御を実現する方法には、主に表による方法と数式法の二種類があります。数式法はより高度なハードウェアが必要で、必要なメモリも多く計算量が大きいため、速度は遅いのですが、応用性が高く汎用度にも優れていてファジィ制御の主流となっています。それに対して表による方法は、必要なメモリも少なく、計算が速く即応性に富み、比較的簡単なシステムで広く応用されています。

ファジィ制御は、実際の応用には適応型計算法と組み合わせられることがしばしばあります。制御システムの長期運転を行うことによりある程度のデータが蓄積され、ファジィ推論部の規則に対して適

当な調整を行うことにより、システムを実状により適応させることができるのです。

次に自動制御コントロールシステムの設計についてご説明します。

制御システムの開発は完成し、当社の浄水場で使用を開始しています。この浄水場では1日当たり10万 m^3 の水を浄水処理し、原水は黄浦江から取水しています。隔膜式計量ポンプ4台で硫酸バンドを注入し、その注入量はサーボモータによって調節され、水平流沈殿池及び普通急速ろ過池での処理を経て浄水池に入ります。

第1に原水の水質状況についてですが、この浄水場の原水は黄浦江の水です。原水は濁度の変化が大きく、気候の影響を受けます。季節の変化と黄浦江の水位の変動によって濁度にも顕著な変化が見られます。原水の濁度の変化が大きいため、人による薬品注入制御は時機を得た調整ができず、水質が安定しませんでした。また薬品使用量が多いため、作業員にも大きな負担がかかっていました。さらに原水のパラメータの変化が大きいため、これまでの制御法では思わしい効果をあげることが困難で、浄水処理の水質にもかなり大きな変動が見られていました。具体的には、水温が 10°C から 34.5°C 、アンモニア性窒素が 0.05mg/l から 0.8mg/l 、濁度が6 NTU から94 NTU、電気伝導率が $36\mu\text{s/cm}$ から $53\mu\text{s/cm}$ 、pHが7から7.5、酸素消費量が 2.5mg/l から 9mg/l 、溶存酸素が 1.2mg/l から 5.6mg/l の変動があります。

こういった変数状況のもとで、私たちは凝集剤自動注入のファジィ制御システムを設計しました。この自動注入ファジィ制御システムは、PLCに基づいた複数入力単一出力のファジィセンター制御システムです。センターはシステムに入力された後、学習データベースの情報に基づいて、Mamdani法によってファジィ推論を行い、そして単一出力の重心法によって非ファジィ計算を行って正確な出力値を得ます。

浄水の理論によれば、凝集剤注入量に影響を与える要素には、濁度、pH値、流量、水温等の原水変数と浄水処理後に到達すべき水質変数との2つがあります。そこでファジィ制御のために、原水濁度、原水流量、沈殿後濁度、泳動電気などの物理量を収集しています。これらの物理量をPLCに入力し、PLCが沈殿後濁度の変化量を計算してその処理を適宜行い、原水流量に突然の変化があったかどうかを判断します。その後、収集した物理量と計算によって得られた中間量とをファジィ制御器に入力するのです。

実際の設定では2グループにわけてファジィ推論を行います。

第1グループは入力変数2、出力変数1の推論システムです。ファジィ入力するものは、沈殿後濁度の偏差、一定時間の沈殿後濁度の平均ろ過値と設定値の間の偏差であり、5段階のファジィ従属度関数（正大、正小、ゼロ、負小、負大）を採用しています。沈殿後濁度の変化傾向は、同じ時間帯の濁度変化の偏差の積分値を取り、3段階のファジィ従属度関数（正大、ゼロ、負大）を採用します。従属度関数の入力には三角形従属度関数を採用し、2つの入力値に基づいてファジィ推論を行い、出力の際は5段階の出力従属度関数（正大、正小、ゼロ、負小、負大）を採用して、単位原水あたりの薬品注入量の修正値を得ています。

第2グループもまた入力変数2、出力変数1の推論システムです。入力するのは泳動電気値と原水流量値です。PLC学習データベースの行ったファジィ推論と検索に基づき、現在の原水流量下での泳動電気が到達すべき数値を得たのち、実際の泳動電気値をこれと比較し、PID演算法で単位原水あたりの薬品注入量のもう1つの修正値を求めるのです。

以上の方法で得られた2つの修正値に対し、加重平均を行い、最終的な単位原水あたりの薬品注入量の修正値を得ます。そして現行の単位原水あたりの薬品注入量に修正量を加え、さらに原水流量を乗じ現在設定すべき凝集剤の注入量が得られます。

ファジィ制御のシステムとして、調整と試運転を行いました。実際の状況との差異があるため、専門家が定めた規則は完全に実状に即しているわけではありません。よって試運転の際、当初制定された推論規則の調整を行いました。学習データベースは経験的データであり、過去のデータの累積であるため、運転開始当時には完備されておらず、試運転の際にそれを充実させ完備していくことも私達の調整の目的でありました。

調整が終了し、システムは処理に応用される段階へと入りました。その際、システムの維持と保護のため、実際の運転状況に緩慢な変化が生じた場合にシステムは自らの学習機能を利用して自己調整を行うことができます。

最後に、応用の効果についてお話しします。ファジィ制御システムの運転開始以来、一連のデータを記録してきましたが、以前の人による薬品注入と比較分析した結果、このシステムは処理後の水質向上だけでなく、収益向上にも大きな効果をあげていることが分かりました。以前に比べ処理後の水の濁度の変動は明らかに縮小し、合格率が大幅にアップしました。人による制御の場合、処理後の水の濁度の変動幅は0.3NTUから0.75NTUでしたが、ファジィ制御を利用した場合の処理後の水の濁度の範囲は0.5NTUの前後となり、ほとんど変動がなくなりました。

以上が薬品注入システムにおけるファジィ制御の応用です。

私達が設計した凝集剤自動注入システムは、浄水処理過程のファジィ制御システムの一部です。試運転開始から現在の運用まで、このファジィ制御システムは正確で実用性に富むものであることが証明されています。本システムは他の浄水場にも普及させることが可能です。私たちは現在、浄水処理とコントロールの仕事に力を入れており、多くのユーザーがさらに良質の水道水を使用できるよう願っております。私の発言は以上です。

最後に、アジア太平洋都市サミット第3回実務者会議の事務局とのお招きに対し、深く感謝申し上げます。ありがとうございました。(拍手)

意見交換

座長（小田弘登） 上海市の周雅珍さん、ありがとうございました。浄水場での凝集剤自動注入システムへのファジィ制御技術の応用についてご発表いただきました。先端技術を活用した事例発表でもあり、私も大変興味深くお聞きしました。今後の応用を含めて、関心をお持ちの方も多いのではないのでしょうか。

それでは、今の発表につきまして何かご質問等ございますでしょうか。皆さんの浄水場での水質制御の方法等を紹介していただいても結構です。どうぞ、クアラルンプールのアサリさん。

モハマド・アサリ・ビン・ダウ（クアラルンプール） ありがとうございます、座長。クアラルンプールのアサリと申します。硫酸バンドの使用量を少なくするため、2つの要素、つまり水量と水質に注意しておられました。先程グラフを拝見しましたが、凝集剤注入量に対する水量と水質の影響に

実際何らかの数学的関係があることをグラフが示している可能性はありますか。投与量への影響という点で、水量と水質のどちらの影響が大きいのでしょうか。また割合は何%なのでしょう。

座長（小田弘登） モハマド・アサリさん、ありがとうございました。グラフによる数学的な問題で、量の影響が大きいのか、質の影響が大きいのかというご質問です。周雅珍さん、いかがでしょうか。

周雅珍（上海市） 硫酸バンドの注入量に対しては、濁度も水量もどちらも大きな影響があるというべきでしょう。原水の様々な水質が注入量に影響します。上海市の黄浦江上流地域の原水の水質は非常に不安定なため、このシステムを設計する際、様々な要素を考慮しました。特に水量と硫酸バンド注入量の間には一定の比例関係があるはずであり、このシステムでは主に濁度の変化による注入量のコントロールを考慮しています。さらに温度や電気伝導度との変数も間接的には考慮しています。もともと上海市の水供給は巨大なシステムですが、昔は人によってコントロールされていました。もともと黄浦江の中・下流から原水を取水しており、取水する場所によって濁度が違っていました。現在は上流からの導水工事によって比較的安定した濁度の原水を引くことができます。しかしそれでも季節や黄浦江上流の水量の変化により、濁度の変化の幅も大きく、よって濁度の影響が比較的大きいと言えます。

座長（小田弘登） ありがとうございました。それでは、国際協力専門員の山本専門員どうぞ。

山本敬子（国際協力事業団） 原水の水質変動が非常に大きいので、こういうファジー制御方式を採用入れられたということですが、年間の変化、それから日変化はどのぐらいあるのでしょうか。

座長（小田弘登） 周雅珍さん、どうでしょうか。

周雅珍（上海市） 上海市の原水には2つの水系があります。1つは黄浦江水系、もう2つは長江水系です。この2つは水質の変数が異なります。たとえば黄浦江水系の場合で言いますと、原水濁度の最高は250NTU以上、最低は冬の低温低濁度の水で、処理が難しく、おおよそ4～5NTUです。濁度は年間この位の幅があります。他に、比較的難しいのがアンモニア性窒素です。アンモニア性窒素は、1～2月頃が比較的高く、黄浦江水系で1.3～1.5mg/ℓ、一番低い時は10月で0.0001mg/ℓ以下になります。平均は0.0002mg/ℓ位です。よって、システム全体の処理が比較的難しく、上海市のほとんどの浄水場では今も人がコントロールしており、普通は上海市に1つあるセンター実験室が行います。さらに環境保護監視測定部門に原水監視測定ステーションがあり、データを取って十数の浄水場に通知します。原水の状況によってさらに処理をする場合もあります。よって、変数が比較的大きい状況のもとで、いかに処理の自動化を実現するかという課題に大変知恵を絞っているわけです。ここで挙げた2つは変数のうち主要なものです。

座長（小田弘登） ありがとうございました。他にございませんでしょうか。

タン・ナム・セン(シンガポール) 2つ質問があります。上海市の水質をみますと、2つのパラメーター指標のうち、アンモニア性窒素の変動は0.5~0.8mg/lですが、濁度は6 NTU からなんと94NTU までのばらつきがあります。そこで質問ですが、アンモニア性窒素の数値が高い場合、どのような除去法を取られているのでしょうか。

2つ目は濁度についてです。6~94までの大きな差があります。上海市では基本的に濁りを取るのに硫酸アルミニウムを使用しておられると思いますが、今までの最低注入量と最高注入量はどのくらいでしょうか。

座長(小田弘登) ありがとうございます。アンモニア性窒素除去の状況と、それから濁度をなくすために、硫酸アルミニウムをどれくらい使っておられるかということです。

周雅珍(上海市) まず、アンモニア性窒素が高い場合の除去方法についてですが、私は水質が専門ではありませんが、おそらく塩素処理でコントロールしていると思います。つまり大量の塩素を加えて処理する方法です。この方法に問題が多いことは存じていますが、今のところ、これを採用してアンモニア窒素が高い場合の処理を行っています。

次に濁度に対する凝集剤の注入量ですが、注入量は主に原水の濁度の変化によります。一般に、濁度が高い時に量が多くなり、低いとき少なくなるというわけではなく、低温低濁度の場合でも注入量が少なくない場合もあります。普通は水1,000m³あたり20~40kgの硫酸バンドを注入します。現在は、当地で取水を行っていた頃よりずっと状況が良くなりました。長距離の導水を行っていますし、上流の原水の方が濁度が低く、長距離導水ののちさらに沈殿の工程もあります。よって全体的からみれば原水の濁度は前よりずっと低くなっているはずですが。

座長(小田弘登) ありがとうございます。アンモニア性窒素の除去には、塩素処理を使用しているのではないかということです。硫酸バンドの量は1,000m³あたり20~40kgということです。よろしいでしょうか。

タン・ナム・セン(シンガポール) 分かりました。ご参加の皆様にも聞いていただきたいと思います。シンガポールはジョホールにジョホール川浄水場を所有しており、そこから私共は水を引いており、上海の場合と同様に濁度の差が大きいという問題に直面しています。20~30NTU の通常値の場合もあれば、230NTU にもなる場合もあります。ですから、硫酸アルミニウムの投与量も20mg/l から3倍の60mg/l まで変化します。ありがとうございます。

座長(小田弘登) シンガポールのタンさん、ありがとうございます。それでは大分市さん、どうぞ。

平松公義(大分市) 私も同じような水処理に携わっていますので、経験上から申し上げます。先ほど凝集剤について、上海市さんからお話がありましたが、私共もいろいろな制御を試みました。一

一般的には、原水濁度をフィードフォワードし、それから処理水濁度をフィードバックしますが、実際は原水水質の、特に濁度、pH、アルカリ度、電気伝導度などにより大きな変化があります。一般的に、凝集剤の量は水量が倍になれば倍になります。しかし私どもの場合、原水濁度は、3 NTUくらいから上は500NTUくらいまで上がります。pHも、実際大雨のときは7.0くらいで、高い時は9.5程度まで変化します。pHやアルカリ度の変動は大変大きいのですが、凝集剤の量は倍程度しか変化しません。水量が10倍になれば当然注入量は10倍になると思います。私どもの制御にしましても、当初は演算数字、つまり、ある程度の濁度までは段階的に注入率を上げていき、それを越えればマニュアルで修正をかけます。つまり、掛け率を2分の1、3分の1というような数値換算で制御していました。皆様方が言われていましたように、凝集剤の注入量は原水水質によって変わるとは思います。私どもは、濁度よりpHやアルカリ度等による影響が大きいのではないかと、経験上申し上げたいと思います。

座長（小田弘登） どうもありがとうございました。大分市さんも非常に苦慮されているということで、濁度よりもpHやアルカリ度がかなり影響するのではないかとという報告でした。それでは、これで上海市の周雅珍さんのご報告を終わらせていただきたいと思います。どうもありがとうございました。

以上をもちまして、午前の部を終了させていただきます。午後の部の前に、福岡市水道局が制作しましたビデオを上映しますので、ご鑑賞いただきますようご案内申し上げます。

----- 昼 食 -----

事例発表

北九州市水道局浄水部水質試験所 主査 田 邊 明

座長（小田弘登） それでは、ただ今から午後の部に入らせていただきます。北九州市の発表をお願いいたします。北九州市の田邊明さん、よろしくをお願いいたします。

田邊 明（北九州市） 皆さん、初めまして。私は北九州市水道局水質試験所に勤務しております田邊と申します。どうぞよろしくお願いいたします。

北九州市は、この福岡市から東に約60kmのところであり、観光名所として、スペースワールドや門司区レトロ地区がございます。時間がおありの方はぜひお立ち寄りください。

では、今から北九州市の水道の概要についてお話ししていきたいと思えます。どうぞよろしくお願いいたします。では、OHPを使って説明させていただきます。

これは、北九州市の水道普及率の推移です。北九州市での水道事業は、旧門司市において1911年に給水を開始して以来、約90年になります。北九州市は旧八幡、小倉、戸畑、門司、若松の五市が合併してできましたが、合併して5年後の約30年前に水道普及率が75%強だったのが、最近では99%を超え、ほぼ全市に行き渡るようになりました。

