

制御と管路系流体解析

秋村 友香*

The Control and Fluid Analysis of Piping System

Yuka Akimura*

制御は自動車のエンジン、燃料輸送パイプラインや天然ガス施設、農業・上水道施設、原子炉、ダム、空調などさまざまな分野で用いられている。本稿ではこれらの例を挙げて、流体の物理量の測定値と制御機器（バルブやポンプ）の関係をモデリングすることにより、数値シミュレーションの必要性を検討する。また、制御系のモデリングや制御系のシミュレーションソフトについても簡単に紹介する。管路系流体解析では、制御系と流体の連成計算を行うことにより、圧力波応答、水撃、ハンチング、水位変化、温度変化などさまざまな現象を解析して系のバランスを見渡すことができる。アドバンスソフト株式会社の管路系流体解析ソフトウェアを用いた制御系と流体の連成解析事例について紹介する。

Key word: 自動制御、ポンプ制御、バルブ制御、ON-OFF 制御、PID 制御

1. はじめに

管路系流体解析では、配管やバルブ、ポンプ、送風機、タービンなどの流体機器を含むシステム全体の過渡応答を対象とする。特に、液体系では、バルブ遮断時に起こる水撃現象や、ポンプトリップ時の液柱分離・再結合により圧力上昇が問題となる。ガス系でもバルブ遮断時の圧力脈動のほか、チョーキングやサージングなどの問題がある。

自動制御によってバルブやその他の流体機器の特性が時々刻々と変化するとき、これに付随した流体の状態がどのように変化するか、それが安定的であるかそうでないか、適切な状態に落ち着くかを調べることは重要であり、これらがシミュレーションによって把握できるようになれば、システム運転条件変更時の検討や、効率化検討に役立てることができるようになる。

本稿では以上の視点から、制御、特に自動制御について事例を挙げ、これらについて管路系流体解析と制御系の連成計算を検討する。

2. 自動制御とは

目標値に適合するように、操作対象に操作を加えることを自動制御という。例えば、目標の圧力になるようにバルブの開度を調整し、目標の水位となるようにポンプの回転数を調整することである[1][2][3]。このような制御では、検出部、受信部、操作部の3つの要素から成り立っている。

ここでは簡単のために検出部を計測器、受信部をコントローラー、操作部をバルブとして話を進める。自動制御では測定値が目標値に合うようにバルブ開度を調整するが、調整方法が悪いと系が不安定になり振動を起こすことがある。

数値計算の観点では、定常解析においては、自動応答によってバルブの開度がいくつに落ち着くかを調べることができる。バルブが全開または全閉となれば制御不能を意味する。また、過渡解析においては、外乱を与えたときに自動制御によって系が不安定とならないか、どのくらいの時間で目標値を再現するかを計算によって知ることができる。

3. 制御の操作

ここでは制御の例として代表的である、ON-OFF 操作と PID 操作の2つを紹介する。

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部
2nd Computational Science and Engineering
Group, AdvanceSoft Corporation

3.1. ON-OFF 操作

ON-OFF 弁は、ON 信号時は全開、OFF 信号時は全閉状態となる弁である。これにより流体が流れる、あるいは止めるという単純な制御を行う。

例えば、バスタブの温度を冷水と熱水を混合させて調整するとき、バスタブ温度が目標値よりも高ければ熱水を OFF とし、目標値よりも低ければ熱水を ON とすればバスタブの温度を目標温度に近づけることができる。このような ON-OFF 制御による温度調整がうまくいくのはバスタブや炉のように、熱容量の大きい系である。これがシャワーの温度であれば、シャワーの水は熱容量を持たずに放出されるため、シャワーの水の温度は振動的になる。

3.2. PID（比例積分微分）操作

PID 制御は広く使われている制御方式で、設定値と測定値の偏差に対し、比例、積分、微分の演算を行うものである。圧力制御、流量制御、温度制御などに使用されている。

PID 制御の制御偏差を x とすると、制御出力 y は以下の式で表される。

$$y = K_p \left(x + \frac{1}{K_i} \int x dt + K_d \frac{dx}{dt} \right) \quad (1)$$

ここで、 K_p は比例ゲイン、 K_i は積分時間、 K_d は微分時間を表す。

第一項は偏差に比例した出力を表す動作で、比例動作という。第二項は偏差の時間積分に比例した出力を表す動作で積分動作、第三項は偏差の時間変化に比例した動作を表し、微分動作という。

比例動作のみを考慮する場合、設定値と目標値は一致せず定常偏差（オフセット）が残ってしまうことが知られている。これに積分動作を加えて比例積分動作（PI）動作とすると、偏差をゼロとすることができる。さらに微分動作を加えて比例積分微分動作（PID）動作を考慮した場合、PI 動作よりも速くてよい応答を得ることが知られている。

筆者らが関わったことのあるプラント等の業務においては、微分時間をゼロとする PI 制御が

多く見られた。

4. 制御の実例

制御の例としていくつかの分野で実際に用いられているものをピックアップし紹介する。

4.1. 燃料輸送システムの緊急遮断弁

燃料などのプラントやパイプラインでは緊急遮断弁（トリガーバルブ）が設置されている。緊急遮断弁は、通常運転時は全開状態にあるが、遮断信号により遮断操作（全閉）をする弁である。遮断信号は、緊急を知らせる信号であり、例えば「地震を計測した」「異常流量を検知した」「火災を検知した」などの信号がある。図 1 に緊急遮断弁のイメージ図を載せた。下流側の流量や圧力の測定値が異常値の場合に緊急遮断信号が発せられ、緊急遮断弁が閉まる仕組みになっている。

都市ガスパイプラインは地震を計測すると遮断信号により供給が止まり、各家庭ではガスが使えなくなる。可燃燃料のプラントでは、漏えいが検知されると緊急遮断弁に閉信号が発せられ、燃料の供給が遮断される。供給側と需要側のバルブが同時に遮断すると、パイプライン中にはしばらく圧力波が往復し、摩擦によって減衰する。このような数値計算は管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ などのソフトウェアによって実際に行われている。

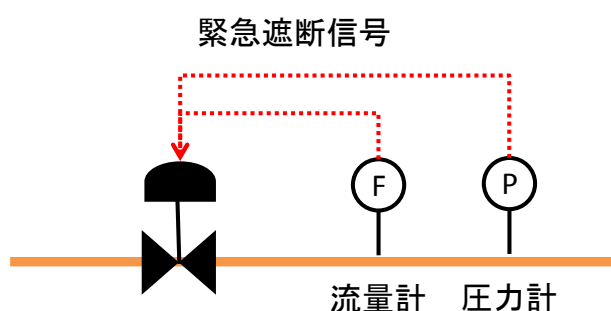


図 1 緊急遮断弁の例

4.2. 都市ガスパイプラインの熱量調整

天然ガスはメタン、エタン、プロパン等から構成されており、その産地によって組成割合もさまざまであるため、熱量にもばらつきがある。天然ガスは液化されて LNG として LNG 受入れ基地

に受け入れられ、貯蔵される。LNG を都市ガスとして使用するときには、海水を使った気化器によってガス化される。このガスは、高熱量の液化石油ガス LPG と混合され、規定の熱量に調整される。図 2 にこれらの関係を図示した。この図では、LPG(液)と、LNG が気化器によってガスになったものがミキサーで合流している。LPG(液)の流量が下流側の制御系によって制御される。参考文献[3]の例では、熱量調整には振動式ガス密度計を利用した熱量計と流量計センサーにより、比例制御が行われ、熱量の調整がなされている。

このような数値計算は管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/ Γ などのソフトウェアによって行われている。

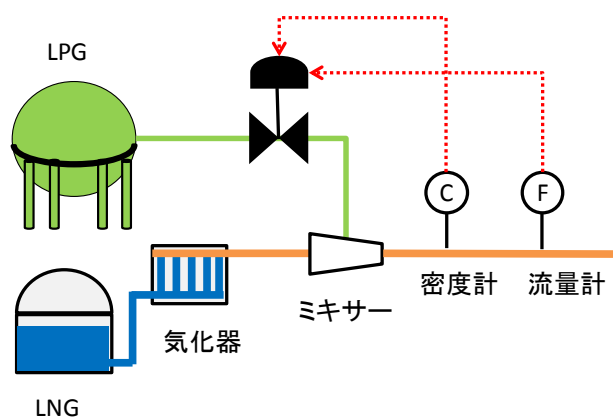


図 2 LNG と LPG の混合

4.3. 農業・上水道のポンプ制御

農業用パイプラインや上水道では、流量や水圧を制御するためにポンプを制御する[4][5][6]。ポンプの制御方式は以下のようなものがある。

①台数制御

需要水量または揚程の変動が大きい場合、2 台以上のポンプを運転、停止することによって水量の調整を行う。並列運転と直列運転があるが、一般的には並列運転のことを指す。流量の変化は運転台数切り替え時には段階的となる（連続的ではない）ため、バルブ制御や回転数制御を組み合わせる必要がある。

②バルブ制御

ポンプの掃出し側に設置したバルブ開度を変化させることによって水量調整を行う。

③回転数制御

ポンプ内の流量が回転数に比例することを利用して水量の調整を行う。回転数制御は効率がよく運転コストが安い制御装置が複雑で、維持管理には高い技術レベルが必要とされる。

農業用パイプラインや上水道は、数十キロ以上に渡る高低差のあるパイプラインに水を流す必要がある。このとき、ポンプの運転が最もコストがかかるものであり、これを効率化させるために以上のようなポンプに対する制御が発展してきたと考えられる。

このような台数制御および回転数制御は複雑であり、管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/ Ω では今後の導入も検討されている。

4.4. 原子力発電所（BWR）の制御

原子力発電所内の原子炉周りでは、複雑な制御が行われている[7]。図 3 に BWR 型原子炉の制御系の例を示す。ここでは、給水タービン系統があり、給水タービンが給水ポンプを回している。復水器から給水ポンプが水をくみ上げ、原子炉圧力容器内の燃料棒を冷やしている。原子炉圧力容器内で蒸気となった水は主蒸気タービンを回し、発電を行う。

燃料棒ではウランの核分裂反応によって熱が生じている。原子炉緊急停止（スクラム）信号が発せられると、制御棒が原子炉内に挿入され、ウランの核分裂反応を促す中性子を吸収することにより燃料棒内の各生成物反応を抑制し、原子炉出力を停止させることができる。

また、原子炉の水位は燃料棒が水に浸かるように制御されている。原子炉水位制御系では、主蒸気流量と給水流量を計測し、これらの偏差から給水ポンプを駆動する給水タービン流量をバルブによって調整し、給水ポンプの動力を調整することによって給水量を変えることにより行われている。このほか、主蒸気タービン制御系や再循環流量制御系などの複雑な制御系によって、原子炉の運転が行われる。

これらの原子力施設に対する制御系は BWR および PWR プラントの過渡事象解析用に INFL(ア

イダホ国立工学研究所) で開発された熱流動解析コード RELAP5[8]等に取り入れられ、原子力規制委員会に依り原子力安全解析が実施されている。

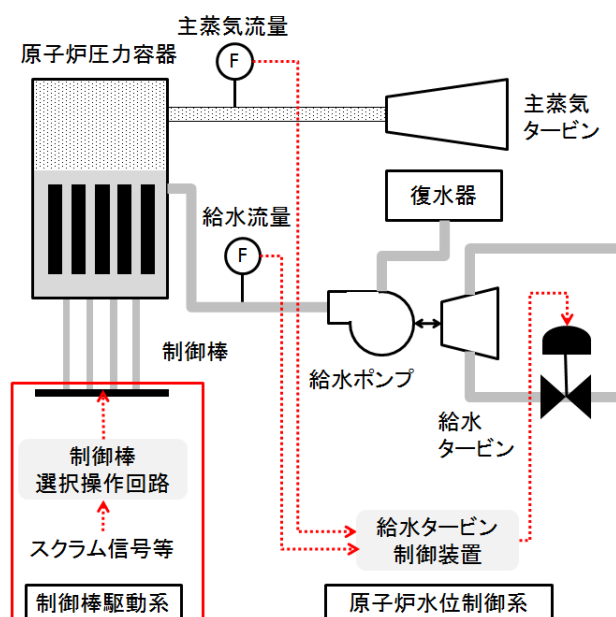


図 3 BWR の制御系の例

4.5. ダムの水位調整

大雨により河川の水かさが増し、時には河川の外に氾濫することがある。これらの現象は洪水と呼ばれる[9]。ダムは、水をためこんで下流域への河川流量を調整し、周辺地域の洪水被害を低減させる役割を持つ。

現在建設が進められている八ッ場ダムの仕様を表 1 に示す[10]。また、資料[10]を基に作成した水位と貯水容量の関係を図 4 に示す。

表 1 八ッ場ダム仕様[10]

項目	標高[m]
常時満水位	583.0
洪水期制限水位	555.2
最低水位	536.3
項目	容量[m ³]
総貯水量	107.5×10 ⁶
有効貯水量	90×10 ⁶
非洪水期利水容量	90×10 ⁶
洪水調整容量	65×10 ⁶

ここで、最低水位から洪水期制限水位までは通常のダム運用時のものである。洪水期制限水位から満水位までの間の容量が洪水調整に利用できる容量となる。流量では、2400m³/s が洪水調整量となる。洪水期は 6～9 月とされているダムが多く、洪水期には貯水池の水位は制限水位まで下げておき洪水調整容量を増やしておく措置がとられる。

洪水調整は、洪水調整容量を最大限に有効利用して放流洪水のピーク流量を下げるようにする必要がある。現在慣用されている洪水調整方式は以下がある。

①定開度放流制御

ダムのクレストゲート（非常用洪水吐）を一定開度に保持して放流する方法。ON-OFF 制御とみなすこともできる。場合によっては洪水伝播を速める結果になることもある。

②定量放流制御

洪水時の放流量を指定流量に制御する方法。大洪水には効果が大きいが中小洪水については調整機能は小さい。

③定率定量放流制御

ダムへの流入量のうち一定の割合で放流量を決める方法。中小洪水についても効果が大きい。ただし、ゲートの急開放操作を行う必要出てくる場合が出てくる。

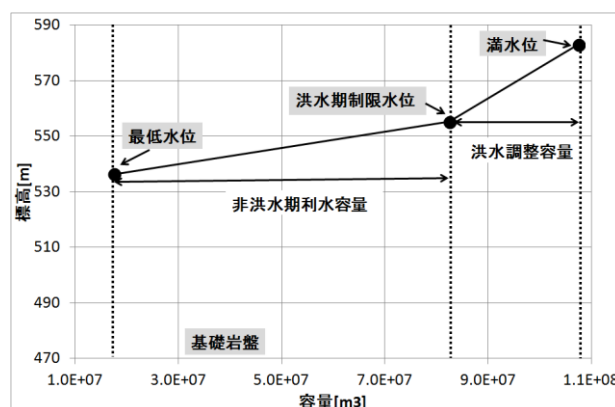


図 4 八ッ場ダムの水位と容量

以上のように、ダムの洪水調整では下流側の河川流量や水位をモニターしてフィードバックするというよりはダム側の流入および流出のバラ

ンス（つまり水位）に大きく制限された制御を行っていることが分かる。

ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレーション・システムとしては、片田、桑沢らがツールを開発している[11]。

4.6. 室内の空調

室内の空気調和（空調）の4要素は温度、湿度、気流、清浄度で表される。これらの4要素を調整することによって居住者の快適性を向上させることができる[12]。図5に居室内の気流と温度分布のイメージ図を載せた。人は発熱をして、空気温度が上昇し、密度差の対流によって上部の温度が高くなる。部屋には空気質センサーや温度センサーが取り付けられており、吸気や排気などの空調が行われている。

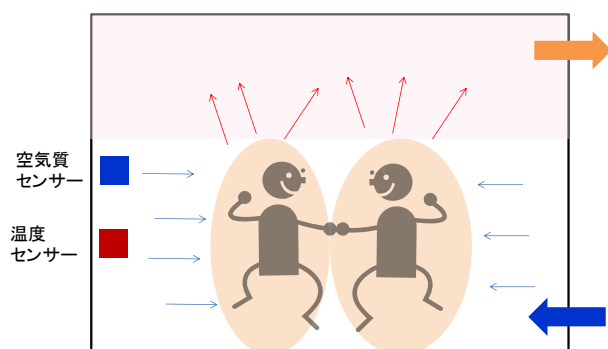


図5 室内の温度分布と気流

一般に室内の温度や湿度を自動制御するとき、定風量方式（CAV方式）が採用されている。この方式は、空調中は送風機の送風量（つまり気流）を一定に保ち、室内の冷暖房不可の変動に応じて送風温度や湿度を変化させる方法である。

温度の制御は、設定温度と室内に設置された温度計からの偏差に対し、オンオフ制御または比例制御により弁開度を調整して送風温度を調整する。

湿度の制御に関しては、夏季の冷房時には除湿、冬季の暖房時には加湿を行う必要がある。冷房時には空気冷却器で自動的に冷却減湿が行われる。暖房時には、湿度計の検出した湿度と設定湿度の偏差から加湿器をオンオフ動作または比例動作させ、室内湿度を所定範囲に維持する。

4つめの要素である清浄度に関しては、外気取り入れ制御が行われる。外気取り入れ制御はCO₂制御とも呼ばれ、室内空気のCO₂濃度を所定値以下に制御することをいう。室内の平均温度、湿度を表す床上1.5mの高さの内壁または換気ダクト内にCO₂調節器を配置し、これより発信させるCO₂の制御信号に応じて、外気ダクトに設置されたバルブの開度を調節し、室内CO₂濃度に応じて自動的に外気取り入れ量をコントロールする。

室内は送風量に対して室内体積が大きく、熱容量も大きいので、オンオフ制御でも十分よい精度で制御されることが考えられる。

室内の空調に対する数値シミュレーションはIEA都市とコミュニティの省エネルギープログラムAnnex23により開発された換気量計算プログラムCOMIS[13]などで実施されている。また、アドバンスソフト（株）のソフトウェアでは、管路系流体解析ソフトウェアAdvance/FrontNet/Γと建物内の火災安全防災のためのシミュレータAdvance/EVE SAYFA[14]の連成計算により解析可能であると考えられる。

5. 自動制御の理論

5.1. ラプラス変換と伝達関数

ラプラス変換を使うと微分積分が乗除算になる。制御系の動特性は微分方程式で表されることが多い。微分方程式をラプラス変換したものを伝達関数と呼ぶ。制御系では、これらの伝達関数を乗除算して制御動特性を算出する。伝達関数を使って信号の入出力の流れを表す図をブロック線図と呼ぶ。図6にブロック線図の例を示す。

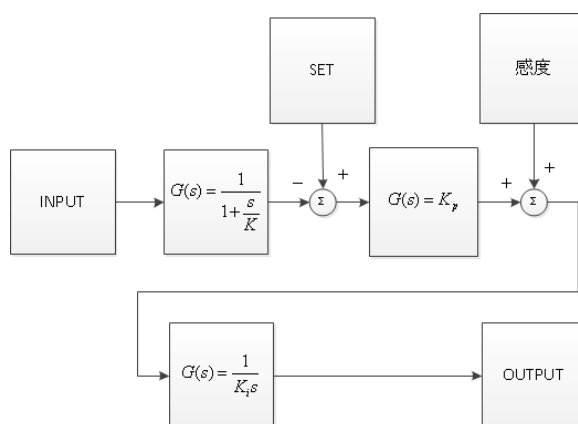


図6 ブロック線図の例

表 2 に代表的な伝達関数をまとめる。

表 2 代表的な伝達関数

制御要素名	定義式	伝達関数
1 次遅れ	$\frac{1}{K} \frac{dy}{dt} + y = x$	$G(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{K}}$
比例要素	$y = K_p x$	$G(s) = K_p$
積分要素	$y = \frac{1}{K_i} \int x dt$	$G(s) = \frac{1}{K_i s}$
微分要素	$y = K_d \frac{dx}{dt}$	$G(s) = K_d s$

ここで、1 次遅れ中の K は時定数の逆数を表す。1 次遅れの意味は、出力が入力の 63.2% に到達するまでの時間が一時遅れ系の時定数である、という意味となる。PID 制御については 3.2 節で説明した通りである。

6. 制御系とシミュレーション

6.1. 制御系のシミュレーションソフトウェア

制御系の数値シミュレーションソフトウェアとして最も有名なのは MATLAB/Simulink である。本ソフトウェアでは制御系のブロック線図を描き、シミュレーションを実行して制御系の信号出力を得ることができる。

6.2. PID 制御パラメータ

PID 制御系のチューニングに関しては多くの方法が提案されている。文献[1]、[15]には「限界感度法」や「ステップ応答法」などについて記述されている。

流体と制御系の連成計算では、PID 制御パラメータが不適切な場合、バルブ開度が振動的となり、これに付随して圧力および流量が振動的となる。このような現象をハンチングという。

6.3. Advance/FrontNet の流体－制御系連成

表 2 にある伝達関数を使った Advance /

FrontNet における圧力制御弁の制御系のモデリングフローの例を図 7 に示す。

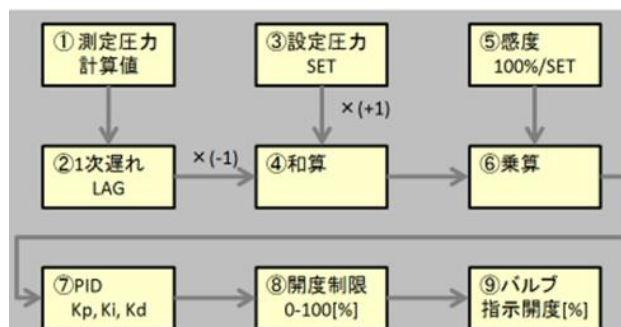


図 7 制御系のモデリングフローの例

ここで、制御の流れは以下になる。

- ①番：流体計算を行って得られた圧力を、指定箇所の計算メッシュから取り出す。
- ②番：圧力の 1 次遅れを考慮する。
- ③番：設定圧力を定義する。
- ④番：3 番と 2 番の偏差をとる。
- ⑤番：信号の単位を 0-100%に変換するための感度（または測定範囲）を設定する。
- ⑥番：4 番の値と 5 番の値を乗算する。これで信号は 0-100%になる。
- ⑦番：6 番から得られる信号に PID 制御を行う。
- ⑧番：PID 制御によって得られた信号がマイナスになり、100%を超えないように制限をかける。
- ⑨番：得られた信号[%]を次のステップの弁の開度として指示する。

数値シミュレーションの注意事項としては、積分要素の積分定数の扱いがある。積分定数は入力与えられるか、または、シミュレーション開始時の時刻=0s におけるバルブの初期開度を利用して求める。Advance/FrontNet では後者を利用している。ここで、バルブ初期開度が実際のもの（設計圧力損失から逆算される開度）と異なる場合、偏差が数値計算の中でずっと残ってしまい、制御系が所望のバルブ指示開度を示さない場合があるので注意が必要である。

6.4. 水系の流量変動時の圧力制御の事例

主に農業用パイプラインに対して開発された分岐のない管路系に対する管路系過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/ΩLE1.3を使用した事例を紹介する[16]。本ソフトウェアでは流量の変動を与えたときに、1次遅れとPIDを考慮した制御が行われる圧力制御弁の開度変化を模擬することができる。

計算体系は図8に示すように分岐のない管路に水が流れている場合で、圧力制御弁があり、制御弁下流に圧力計が設置されている。上流側を圧力指定境界条件、下流側を流量指定境界条件で取り扱う。配管は圧力制御弁上流側100m、下流側100mで考えた。

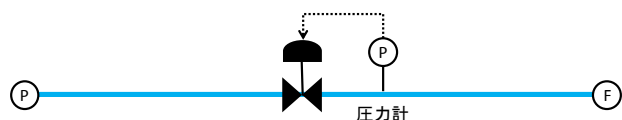


図8 計算体系

表3 計算条件

分類	項目	数値等
流体	上流側境界条件	圧力指定 200000PaG
	下流側境界条件	流量指定 0.5m ³ /s →0.25m ³ /s
配管	配管長	100m+100m
	内径	500mm（各）
バルブ	開度特性	リニア特性 全開時 Cv 値 10000
測定器	位置	バルブから 4m 下流
	測定頻度	1s に 1 回
制御系	設定圧力	150000PaG
	1次遅れ	2s
	比例ゲイン	80
	積分時間	60s
	微分時間	0s

計算は初期値を適当に与え、定常状態を得るた

めに時刻0sから500sまで計算をし、時刻500sから10sかけて流量を半分にしたときの圧力制御弁および流体の挙動を調べた。計算条件を表3にまとめる。制御系は図7のフローを用いた。

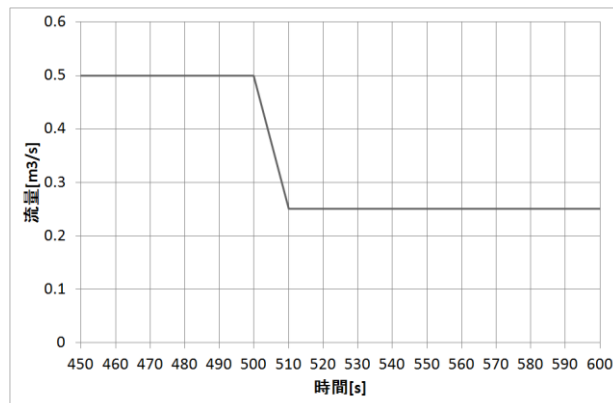


図9 流量の条件

下流側の流量境界条件を図9に示す。流量の需要を0.5m³/sから0.25m³/sに変化させる条件となっている。

図10に流量の変化に対して圧力制御弁が指示したバルブ開度の時間変化を示す。初期開度は約38%であるが、流量の変化のある時間500sに25%程度まで開度を絞り、その後、圧力変化に対してゆっくりと開度を調整していることが分かる。時間600sには開度は15%程度に落ち着いていることが分かる。なお、計算では仮のバルブ特性を用いるため、初期開度は38%程度であるが、この数値は流量の急減少に対してあまり余裕のない数値である。

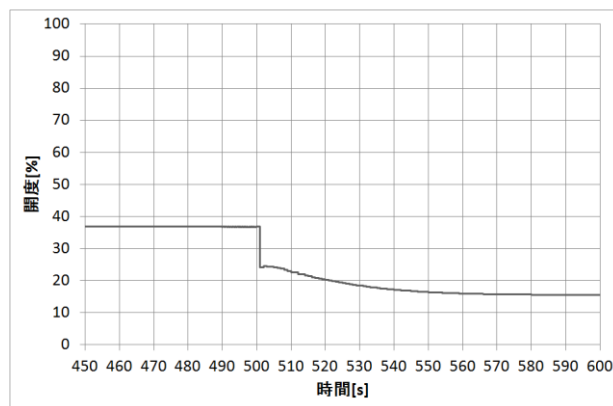


図10 圧力制御弁の開度の時間変化

図 11 に圧力制御弁から上流側 50m の位置における水の圧力の時間変化を示す。流量変動前では圧力は約 190kPaG であるが、流量変動に応じて圧力制御弁開度が変化したために圧力脈動が生じ、その後、制御弁が絞られたために圧力値が上昇していることが分かる。

図 12 に圧力制御弁下流 50m における水の圧力の時間変化を示す。流量変動前では圧力は約 140kPaG であるが、制御弁の開度変化により圧力が変化している。特に、流量が減り、さらに弁が絞られることにより、圧力が一時かなり低下していることが分かる。この例では、圧力が負圧まで下がらなかったために液柱分離は起こっていない。

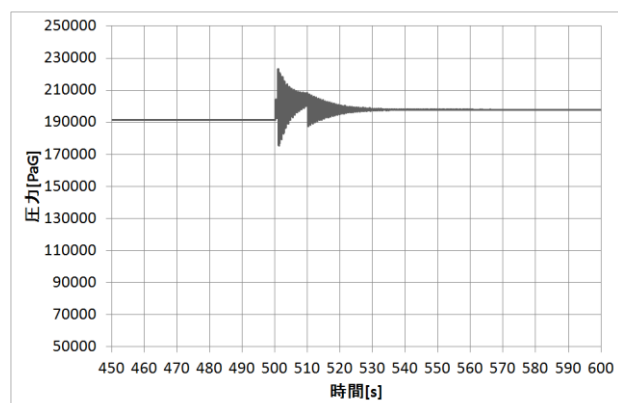


図 11 制御弁上流側 50m の位置の圧力変化

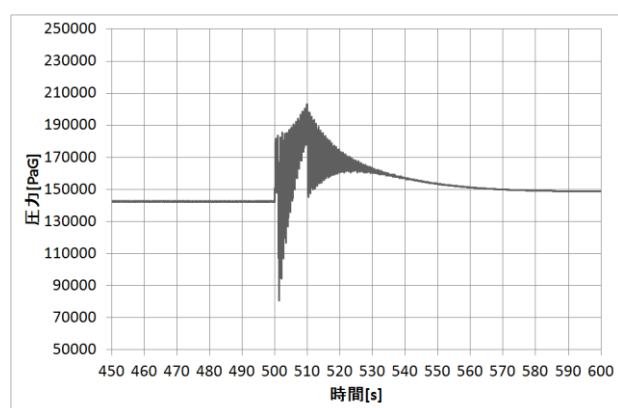


図 12 制御弁下流側 50m の位置の圧力変化

7. おわりに

自動制御の実用例と理論についてまとめ、シミュレーションで必要な制御要素をモデリングし

た。また、これらを管路系流体解析ソフトウェアに取り入れ、流体－制御系の連成計算を実施し、紹介した。このような計算は系の安全性検討や、効率化評価に貢献している。

実用例で挙げた空調の自動制御に関しては、アドバンスソフト株式会社が開発している建物内の火災安全防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA[14]と Advance/FrontNet/Γ の連成により計算可能となるため、今後の検討事項としたい。

参考文献

- [1] 山本重彦, 加藤尚武著, “PID 制御の基礎と応用”, 朝倉書店
- [2] 松山裕著, “だれでも分かる自動制御”, 財団法人/省エネルギーセンター
- [3] 川村貞夫, 石川洋次郎著, “工業計測と制御の基礎”, 工業技術社
- [4] 水道用ポンプマニュアル 1992, 日本水道協会
- [5] 水管理制御方式技術指針 (計画設計編), 平成 14 年 3 月, 農林水産省農村振興局整備部設計課監修
- [6] 土地改良事業計画設計基準および運用・解説設計「ポンプ場」、平成 18 年 3 月、農林水産省農村振興局整備部設計課監修 社団法人農業土木学会発行
- [7] ATOMICA,BWR の原子炉制御系系統図,
<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/02/02030601/03.gif>
- [8] <http://www.atom-library.jnes.go.jp/seika/00009612.pdf>
- [9] 高橋保著, “洪水の水理－被害の評価と対策－”, 近未来社
- [10] 国土交通省関東地方整備局,
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000050263.pdf
- [11] 片田敏孝, 桑沢敬行, “ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレーション・システムの開発”,
<http://dsel.ce.gunma-u.ac.jp/doc/p101.pdf>

- [12] 中井多喜雄著, “空調の技術”, 学芸出版社
- [13] <http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s12/Resource/ap/COMIS/COMIS.htm>
- [14] アドバンスソフト株式会社ホームページ,
Advance/EVESAYFA 紹介ページ,
http://www.advancesoft.jp/product/advance_evesayfa/
- [15] システム制御情報学会編, 須田信英著者代表,
“PID 制御”, 朝倉書店
- [16] アドバンスソフト株式会社ホームページ,
Advance/FrontNet/ Ω LE 紹介ページ,
http://www.advancesoft.jp/product/advance_frontnet/advance_frontnet_le_10.html
(ウェブアドレスは 2013 年 10 月時点)

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、【カラー版】がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)