ワンポイント講座

PID 制御†

須田 信英*

制御とは、ある目的に適合するように対象となっているものに所要の操作を加えることであり、対象となる機械、プロセス・システムなどを**制御対象**、それに組み合わされて制御を行なう装置を**制御装置**、制御対象・制御装置などを系統的に組み合わせた全体を**制御系**という。制御対象に属する量のうちで制御目的を代表するものを**制御量**、その望ましい値を**目標値**、制御量を支配するために制御対象に加える量を**操作量**、制御量に影響を及ぼす外的作用を**外乱**と呼ぶ。制御装置において、制御に必要な信号を取り出すセンサの部分**検出部**、操作量を発生して制御対象に働きかけるアクチュエータの部分**操作部**という。検出部から得られる信号を**観測量**と呼んでおく。観測量は本来の信号に加えて、測定の際にノイズが混入している場合もある。

制御に際して利用できる信号は、目標値と観測量である。外乱の一部に直接測定できるものがあれば、それも利用できるが、ここでは外乱は測定できないとしておく。制御装置において、利用可能な信号から、制御系が適切な挙動をするように、しかるべき操作量を決定する部分を**調節部**という。

これらの定義に基づいて、制御系の構成を模式的に図示したのが図1である。破線で囲った部分、すなわち制御対象、検出部、操作部をひとまとめたものを、**広義の制御対象**とみなすことにする。調節部から広義の制御対象へ伝達される信号は、正確には操作信号であるが、誤解のおそれは

ないと思うので、以下これを簡単に操作量と呼んでおく。

この図で網目をかけた部分が調節部であり、そこで目標値と観測量から操作量を決定する方式を**制御則**という。しかるべき評価基準に照らして制御系が望ましい挙動をするように、適切な制御則を選定することが**制御系の設計**である。操作量の決定に観測量を利用しない場合、制御系における信号の流れは目標値から制御量へ向かう一方向に限られる。これを**フィードフォワード制御**という。観測量も操作量の決定に反映すると、操作の結果をみて操作量を修正するという機能が加わり、信号の流れはループを形成する。これを**フィードバック制御**という。

フィードバック制御の技術はジェームズ・ワットが遠心调速器を蒸気機関の速度制御に応用したのに始まるとされている。18世紀末のことであるから、約2世紀の歴史があることになる。19世紀の後半から理論的な研究が活発になり、微分方程式、関数論、線形代数など、数学的手法を駆使し

図1 制御系の構成

† PID Control

* Nobuhide SUDA

大阪大学基礎工学部システム工学科

Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University

た制御系設計の理論が発展し、今日なお着実に進歩しつつある。

この流れの中で、**PID 制御**はごく早い時期に着想され、制御系設計の手法として最も歴史の長いものである。その着想は1922年のMinorskyの船の自動操舵に関する論文に見られる。そうして現在なお広範囲に利用されている。まずそのあらましを述べよう。

ノイズを除いた観測量と制御量とは同じものであるとする。そうすると目標値から観測量を引いたものが、制御量の望ましい値と現実の値とのくいちがいを表すとみなせるので、これを**偏差**(あるいは**制御偏差**)と呼ぶ。目標値が変化したり、外乱が加わったりして、偏差を生じたときにこれを打ち消すのが制御の目的であるから、偏差に基づいて操作量を決めるというのは一つの自然な発想といえよう。

PIDという略語は、比例(proportional)、積分(integral)、微分(derivative)の頭文字を並べたもので、操作量を偏差そのものに比例する項、偏差の積分に比例する項、偏差の微分に比例する項という、3項の和として構成するのがPID制御である。そこで**3項制御**と呼ぶこともある。もとより完全な微分は実現できないから、ある種の不完全微分で代用されるのであるが、ここではその詳細には立ち入らない。何らかの理由で一部の項を含まない場合は、含むものだけを明示して**P 制御**、**PI 制御**、**PD 制御**などと区別する。PID制御ということばはこれらの総称としても用いられている。積分項は過去の偏差の累積値、比例項は現在の偏差の大きさ、微分項は将来の変化動向を、それぞれ現在の操作量に反映する役割をもっており、おおまかにいえば、偏差の過去・現在・未来が操作量に反映しているのである。

PID制御を実行する制御装置を**PID 調節器**という。操作量の演算を行うとともに、制御量の表示、記録の機能も併せもつものが多く、そういう場合には**調節計**と呼ばれる。PID調節器の原型はCallenderたちの1936年の論文に登場する。その後、油圧式、空気圧式、電気式、電子式の各種ア

ナログ方式を経て、マイクロ・プロセッサによるデジタル方式へと変貌した。

制御方式としてPID制御を採用することになれば、制御系の設計は比例、積分、微分各項の比例係数という三つのパラメータの値を適切に選定することに集約される。これをPID制御の**調整**(チューニング:tuning)と呼んでいる。調整法の原点であり、今でもしばしば引用されるものに、ジグラー・ニコルス(Ziegler and Nichols)の限界感度法というのがある。その提案が1942年であり、それからでもすでに半世紀以上経過している。その間に数多くの調整法が提案されている。制御理論の発達を踏まえて、古い方法の意義が見直されたり、新しい方法が提案されたり、次第にきめ細かいものへと発展した。調整を自動的に行なう方法も研究され、オン・ラインの自動調整機能を有する制御装置も開発された。

半世紀の歴史を経て、PID制御は現在でも広く実用されている。少しデータが古いが、1990年に行われた産業界のアンケート調査によると、現在実用されている制御方式の中でPID制御は84%を占め、その改良型を含めると90%を超えている。PID制御の実用上の魅力はその汎用性にあるといえよう。主としてプロセス制御の分野において、多くの場面に適用して、最適とはいえないまでも、十分実用に足る効果をもたらすといわれている。素朴な発想で、理論的な洗練度に欠けることは否定できないが、逆に言えば比例・積分・微分という単純な動作から構成されており、各制御動作の役割が直観的に理解しやすいことも長所の一つである。理論的洗練度の高い新しい制御方式の開発や適用においても、知らず知らずPID制御とひき比べて、その動作や意義を理解する場合が少なくないと思われる。さらに、歴史が長いだけに、リセット・windアップ対策、バンプレス切り替え、ゲイン・スケジューリングなど、実用面からの工夫が蓄積されているのも特色である。そういう工夫が必要となった背景を理解し、必要ならば同様の工夫を織り込むことが、新しい理論に基づく制御方式が実用性をもつために重要と思

われる。

このように、歴史が長く、しかも現在生き続けており、示唆に富んでいるという意味において、PID 制御は制御系設計の原点ともいえよう。もとよりこれが制御系設計のすべてではなく、つねに最善であるわけもないが、PID 制御について知ることとは設計論の出発点として十分意義のあることと考えられる。近年、PID 制御を主題とする本 [1,2] が刊行されたのも、このような視点からの PID 制御の重要性の認識のあらわれと思っている。実をいえば、文献 1 を編集したのは筆者であるが、執筆中にある人から「PID 制御だけで一冊の本を書くのですって?」と聞かれたことがある。「なに、ごく薄い本ですよ」とはぐらかしておいたが、実際には多くの共著者の協力を得て、200 ページ近いものになった。文献 2 の方は 350 ページに近い。PID 制御はそれだけの内容をもっているのである。

さて、PID 制御のはたらきをもう少し深く調べてみよう。

たとえば、加熱量を加減して温度を制御したいとする。加熱量を一定値だけ増加すると、温度は上昇するが、それに伴って周囲への放熱量も増えるから、加熱量の増加と放熱量の増加とがバランスするところで温度上昇は頭打ちとなり、どこまでも上昇するわけではない。また、温度上昇を維持しようとすれば、加熱量は増加したままにせねばならず、加熱量をもとに戻せば温度ももとに戻ってしまう。このような性質を持つ制御対象を**定位性**であるという。

定位性の制御対象に対して、比例制御だけを適用すると、目標値の変化や外乱に対して最終的に一定の偏差が残ってしまう。これを**定常偏差**または**オフセット**という。目標値が一定量だけ高くなったとしよう。制御量を目標値に近づけるために上昇させ、その上昇を維持しようとする、操作量も増加したまま保持しなければならないのは、上述の通りである。ところが操作量は偏差に比例するのであるから、操作量の増加を保持するためには一定の偏差が継続する必要があるというわけ

である。目標値の変化や外乱が一定値の場合、積分制御を導入することによって、定常偏差をなくすることができる。偏差そのものが零になっても、過去の偏差の累積値によって操作量の増加が保持されるからである。これが積分制御の基本的な役割である。そのことは 19 世紀頃から知られていたといわれる。定常偏差特性の理論が進み、1970 年代の半ばには、一定値と限らず一般の目標値変化に対して、**内部モデル原理**という統一原理が確立されて、積分制御はその一例と位置づけられるようになった。

現実の操作部には、弁の全開と全閉、モータの回転速度の限界など、飽和特性を持つものが多い。飽和に達した状態で、積分制御が偏差の累積を続けると、調節部が発信する操作信号と実際の操作量とのくいちがいが大きくなる。そのために制御結果が劣化するのが、**積分ワインドアップ**とか(積分制御を**リセット動作**ともいうので)**リセットワインドアップ**とか呼ばれる現象である。その対策がいろいろ工夫され、理論的にも整理されている。

偏差に基づいて操作量を決定する上述の PID 制御はもちろんフィードバック制御である。フィードバック制御は結果をみながら修正動作を調節するものであるから、測定できない外乱とか、制御対象の特性の不確かさとか、直接検知できない要因に対しても修正ができる強みをもっている。その一面、目標値変化のように、既知の要因に対しても、その影響が偏差にあらわれてから後追いで修正する形となっている。既知の要因に対してはそれを修正するのに必要な操作量が求められるから、それを直接制御対象に加える方が、迅速に制御量を調節できるはずである。実際、制御対象が安定で、外乱が作用せず、操作量変化に対して制御量がどのように変化するか、たとえば加熱したときどのように温度が上昇して行くか、そういう制御対象の特性が、完全に正確にわかっているならば、期待される制御量変化を発生する操作量を逆算して、フィードフォワード制御をすれば目的が達せられる。

フィードバック制御が必要となるのは、一つは

制御対象が不安定なときである。たとえば、棒を立てようとすれば、棒の傾きを検知してそれを修正するように手を動かすフィードバック制御なしには不可能である。これをフィードバック制御による安定化というが、PID 制御が適用される制御対象は通常安定なので、この点についてはこれ以上深入りしない。もう一つが直接検知できない要因に対する対策である。

そこで、既知の要因にはフィードフォワード制御で、未知の要因にはフィードバック制御で対応するという、フィードフォワード・フィードバック併用制御が、どちらか単独で用いるよりも一層有効であることがわかる。これをふつう **2 自由度制御**と呼んでいる。その着想は 1950 年代半ばにすでにあったが、実用化されたのは比較的最近、マイクロプロセッサの進歩により複雑な制御則でも容易に実現できるようになってからである。PID 制御についても、フィードフォワード機能を加えた **2 自由度 PID 制御**がかなり普及している。積分制御は、先に述べたように、定常偏差を除くためのものであるから、専らフィードバック部分に用いられ、フィードフォワード部分は比例制御と微分制御から構成される。したがって、調整用のパラメータは 3 個から 5 個に増えることになる。また従来、実用上の工夫として微分先行型 PID 制御とか、I-PD 制御などの変形 PID 制御が提案されてきたが、それらは 2 自由度 PID 制御に包含され、その特殊な場合と位置づけられる。

最後に、ファジィ理論との接点を考えてみよう。すでに述べたように PID 制御は素朴な、直観に訴える着想から生まれており、ファジィ制御と一脈

相通じるものがあるような気がする。ここでは詳しく述べられなかったが、PID 制御の調整法は制御対象の特性に関して、少数の特徴パラメータを手がかりとする大づかみな認識に基づいている。この点では、制御対象についての詳細な情報を利用する制御理論とファジィ制御の中間に位置するのではないかと思われる。そこで、積分制御の役割とか、そのマイナス面であるリセットワインドアップへの対策、フィードフォワードとフィードバックの使い分け、さらにはここで述べなかったことも含めて、PID 制御半世紀の蓄積は、ファジィ制御にも役立つであろう。あるいはすでに役立っているのかもしれない。一方では、PID 制御の自動調整、制御結果をみながら比例・積分・微分のどれを強め、どれを弱めるかという場面で、ファジィ推論が活用されている事例がみられる[1の 6.2 節など]。

参 考 文 献

- [1] 須田信英ほか：PID 制御、朝倉書店、1992
- [2] Åström, K. J. and T. Hägglund : PID Controllers : Theory, Design, and Tuning, 2nd edition, Instrument Society of America, 1995

(1995年 7 月10日 受付)

[問い合わせ先]
〒560 豊中市待兼山町1番3号
大阪大学基礎工学部システム工学科
須田 信英
☎ : 06-850-6355
☎ : 06-850-6341
E-mail : suda@sys.es.osaka-u.ac.jp