

# 2016 Aleph Review

## 制御理論のプロムナード ～古典からポストモダンまで～ (石川徹也さん)

荻田裕也

2016年3月15日

今回の石川さんの発表では、制御理論への導入として、現代制御に軸を置きつつ、古典制御からポストモダンと称されるロバスト制御に至るまでの制御理論の歩みを紹介していただきました。

制御理論の歴史は调速器 (Governor) の研究を持って幕開けとなります。そののちに定式化された古典制御では、伝達関数の周波数特性をもとに制御を設計します。(古典制御に関しては、2015 Aleph で深津さんが発表して下さいました。) 線形と時間遅れで表現できる系を仮定しているため、適用範囲に限られる上、時には職人技の泥臭い parameter 設定が求められます。その一方で、解析の簡便さと強力さから、現代に至るまで古典制御は根強く利用されてきました。

一方、現代制御では、system の数理モデルを基として、状態変数の時間発展に着目します。system を測定し推定する手続き (observe) と、それを制御に feedback する手続き (control) を明示的に定式化し、制御の取束性を行列の固有値問題に帰着させて議論します。発表では、2 水槽の水位の制御を具体例として、制御設計の実際の手続きを紹介していただきました。

数理的に見通しが良く、拡張も容易な現代制御ですが、実用上は大きな問題があります。それは、system のモデル構築における不確かさを考慮していない点です。この欠点を補うべく生まれたのが、ポストモダンとも言うべきロバスト制御です。複数のモデルを一挙に安定化する parameter を得るため、幅をもった Bode 線図を用いて、周波数領域の不確かさを考慮します。ただ、ロバスト制御は理論的に難解であり、まだ実用としては流行っていないというお話でした。

今回のお話を聞いて自分が物理学徒として個人的に思ったことは、非平衡統計力学との関連です。従来の熱力学の枠組みでは、system から取り出せる仕事というものは、system の自由エネルギーの減少分を超えることはできませんでした。

$$W_{\text{ext}} \leq -\Delta F$$

ですが、system の状態を測定しながら操作に feedback をかけることを理論に組み込むと、取り出せる仕事の上限を増やすことができます。

$$W_{\text{ext}} \leq -\Delta F + k_B T I$$

ここで,  $k_B$  は Boltzmann 定数,  $T$  は系の温度,  $I$  は測定による操作者と system 間の相互情報量です. ここにおいて, 相互情報量という情報理論の言葉を用いて, 熱力学と feedback 制御との関係をつなぐことができます. 現代制御において性能評価を行う際, 非平衡統計力学の言葉に変換してあげることで, 性能の理論的上限を評価できるのではないかと夢想しました.

石川さんの講演の最後の言葉が印象に残っています. 意識ですが, 以下のような内容でした. 「よい仕事をするためには数理的な知識だけでは足りず, 制御する対象そのものに対する理解が重要です. つまり, 異分野間の交流が不可欠となります. 一方で, 異分野間の交流は決して, “広く浅く”を意味しません. 自分の専門分野に精通した上でこそ, はじめて学際研究が意味を持ちます. 」学際領域の研究を志す自分には, 特に響くお言葉でした.

今回の発表では制御理論へのすばらしい導入をいただきました. 次に講演する機会がありましたら, Lyapunov の一連の仕事をはじめとする, 石川さんの考える現代制御の “最も面白いところ”の講演を是非お聞きしたいです.