

# 制御系解析

## 担当教員名・単位数

西田 健 2単位 選択必修 (知能制御) ・ 選択 (機械, 宇宙)

教室・時間 4-1B教室 木曜1限

## 授業計画

- (1) 制御の基礎概念 (1)
- (2) 制御の基礎概念 (2)
- (3) 線形モデル (1)
- (4) 線形モデル (2)
- (5) システムの要素と表現 (1)
- (6) システムの要素と表現 (2)
- (7) 応答の周波数特性 (1)
- (8) 応答の周波数特性 (2)
- (9) 中間試験
- (10) フィードバック制御 (1)
- (11) フィードバック制御 (2)
- (12) フィードバック制御 (3)
- (13) システムの時間応答 (1)
- (14) システムの時間応答 (2)
- (15) 試験解説等

## 評価方法

中間試験 (50%), および期末試験 (50%) の結果により評価を行う。60点以上を合格とする。

## 履修上の注意事項

学部において、制御数学、制御数学演習、及び電気基礎理論Iを修得していることが望ましい。

本講義内容の演習を制御系解析演習で行うので合わせて履修すること。

## 授業外学習(予習・復習)の指示

講義内容に関連する課題を出すので復習すること。

## 教科書・参考書

教科書:

鈴木, 板宮, 例題で学ぶ自動制御の基礎, 森北出版

参考書:

木村, 制御工学の考え方, 講談社

山田, 山北監訳, 制御工学の歴史, コロナ社

# 第1回 制御の基礎概念 (1)

## 0. ねらい

制御 = 目的通りに対象を作用させること

制御では動的に変化するものを対象とし、最終的にはその対象を「自分の意のままにする」ことが求められる。このために動的な現象の定式化、その時間的な挙動や収束性などの解析手法と、自分の意のままにするための設計が必要となる。

本講義では動的システムの特徴表現およびその応答解析を通して、制御系の解析の基本的な手法を習得することを目的とする。

制御対象の動的解析に至るまでの基本的な内容であり、その後の設計法の導入部となる。

人間が設計し運用するものは、制御無しでは安全に動作できない

製造装置, 機械装置, 電気回路, 電気機器, 電子製品, 情報, 化学反応, 流通, 金融, 政治, コンピュータ, 機構, 機械, 構造,

制御工学の誕生 (18世紀～)

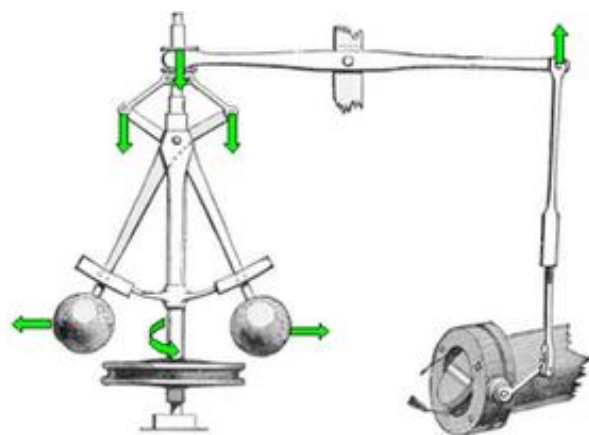
蒸気機関の改良 (Watt 18世紀～19世紀)

遠心调速器「ガバナ」の開発により蒸気機関の普及に貢献

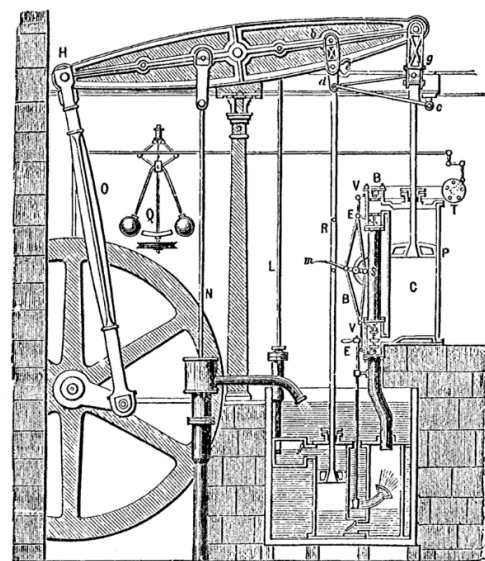
工業的に用いられた最初の「フィードバック制御」機構

蒸気の圧力の調整

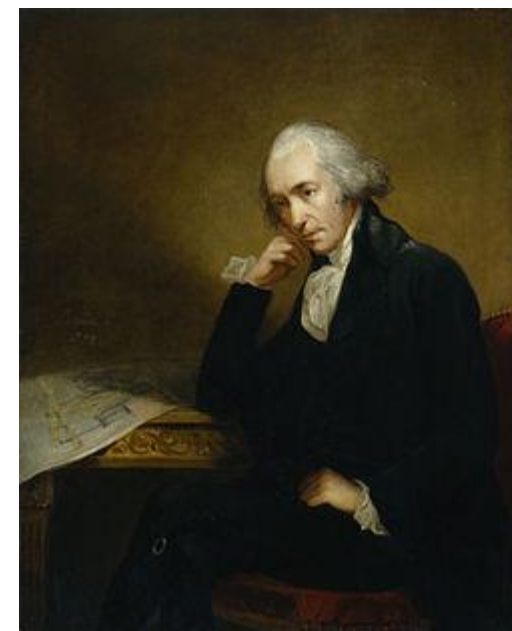
「必要な時に必要なだけのエネルギーを供給する」



遠心调速機 (ガバナ)  
(ウィキペディアより転載)



1784年にボルトンとワット  
が設計した蒸気機関の図面



ジェームズ・ワット James Watt  
1736年1月19日 - 1819年8月25日)  
(ウィキペディアより転載)

ワットは豊かな想像力を持つ熱心な発明家だった。彼は手先の器用さのみならず、系統的な科学的測定を行うことで自身の開発品を定量的に評価することが出来、その機能を深く理解していた。

仕事率や電力、工率、放射束を表すSIの単位であるワットの名称はジェームズ・ワットにちなんで名づけられた。

「産業革命の父」  
「制御工学の生みの親」

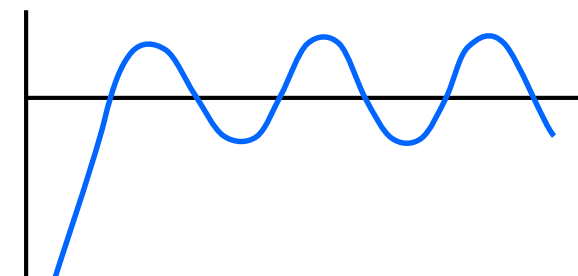
## 制御理論の誕生 (1868年)

### マクスウェルによるハンチング現象の解明と解消

调速器に共通する定量的な表現を用いた 「モデル」 の構築

動的システムの安定理論の誕生

制御が技術であるだけでなく科学であることを明らかにした。



ハンチング現象

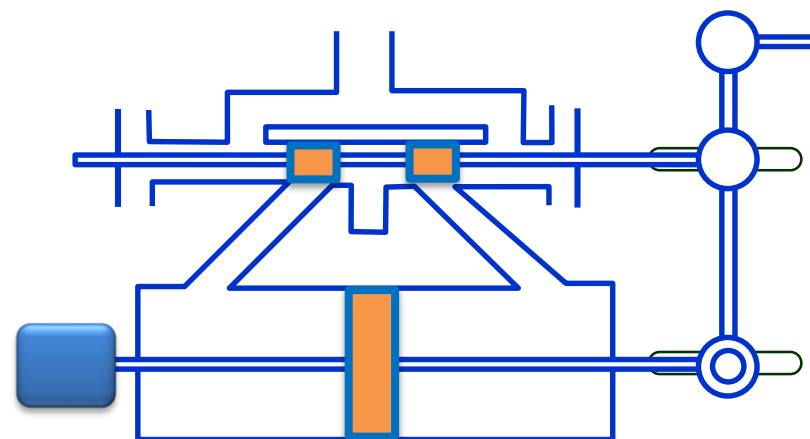
## サーボ機構の誕生 (19世紀中ごろ～)

19世紀半ばには2万トンを超える巨大蒸気船が建造された。

舵をきるための歯車機構の代替として考案。  
操舵の動力源として蒸気を利用する機構。

### サーボ機構 (servo mechanism)

ラテン語で「召使」を意味する  
「サーブ Servus」が語源



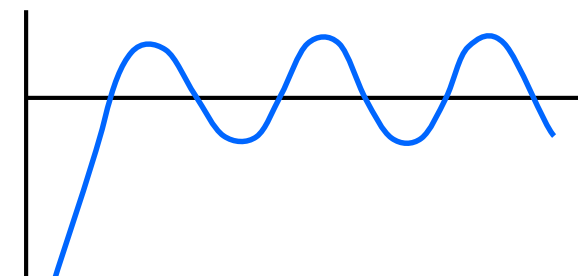
## 制御理論の誕生 (1868年)

### マクスウェルによるハンチング現象の解明と解消

调速器に共通する定量的な表現を用いた 「モデル」 の構築

動的システムの安定理論の誕生

制御が技術であるだけでなく科学であることを明らかにした。



ハンチング現象

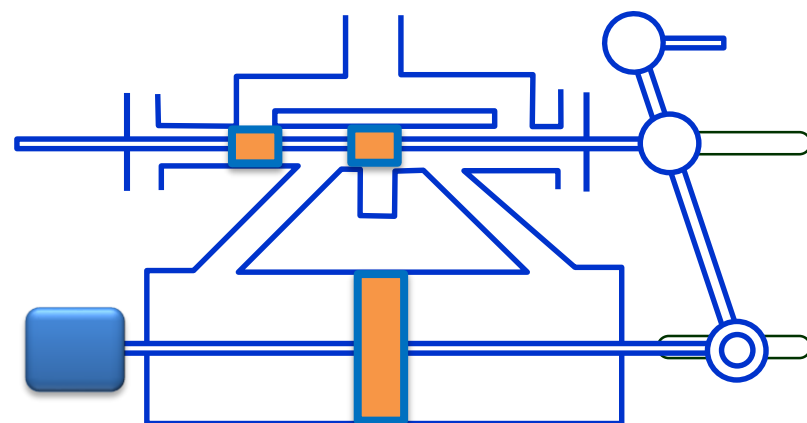
## サーボ機構の誕生 (19世紀中ごろ～)

19世紀半ばには2万トンを超える巨大蒸気船が建造された。

舵をきるための歯車機構の代替として考案。  
操舵の動力源として蒸気を利用する機構。

### サーボ機構 (servo mechanism)

ラテン語で「召使」を意味する  
「サーブ Servus」が語源



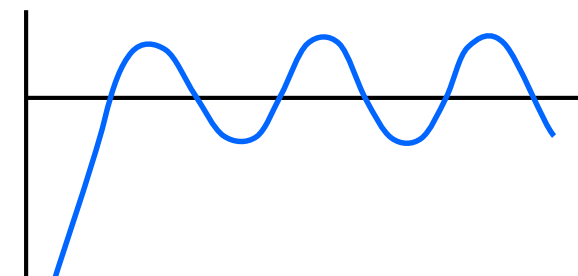
## 制御理論の誕生 (1868年)

### マクスウェルによるハンチング現象の解明と解消

调速器に共通する定量的な表現を用いた 「モデル」 の構築

動的システムの安定理論の誕生

制御が技術であるだけでなく科学であることを明らかにした.



ハンチング現象

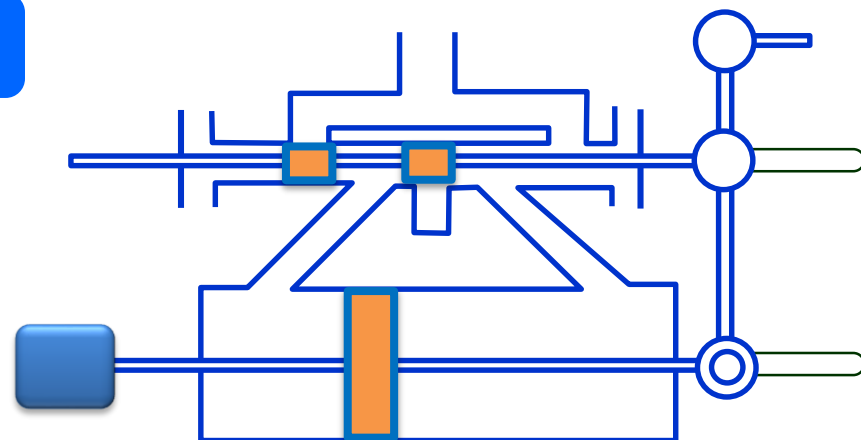
## サーボ機構の誕生 (19世紀中ごろ～)

19世紀半ばには2万トンを超える巨大蒸気船が建造された.

舵をきるための歯車機構の代替として考案.  
操舵の動力源として蒸気を利用する機構.

### サーボ機構 (servo mechanism)

ラテン語で「召使」を意味する  
「サーブ Servus」が語源



## 自動操縦の開発の歴史 (19世紀後半～)

- 圧縮空気を動力源とする無人航行魚雷の開発 1870年代初頭 (ホワイトヘッド)  
振り子とジャイロスコープの利用で方位と深度をフィードバック制御する自動操縦システムが搭載された。
- 水雷艇の建造 (1881年 日本)
- 誘導魚雷の開発 (1870年代半ば)  
誘導 (ガイダンスの始まり)  
自律誘導装置 (ホーミング装置)
- 超音波ソナーの開発 (1916年)  
第二次世界大戦中にソナー搭載型  
ホーミング魚雷が実践に投入された
- 磁気コンパスと気圧計に基づくミサイルの方向と高度の自動制御  
飛行爆弾V-1, V-2 (ドイツ 第2次世界大戦 1939年～1945年)

## 航空機のための制御技術の発達 (20世紀初頭～)

### ○ ライト兄弟が36mの飛行に成功 (1907年)

撓み翼の開発： 飛行中に複葉機の上下の羽を結ぶワイヤーを引いたり緩めたりすることで翼を撓ませる機構を開発。

後に補助翼へと進化

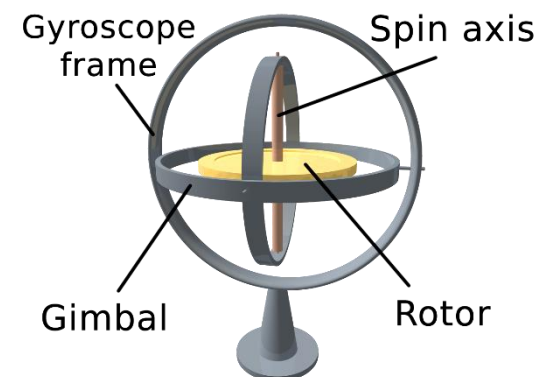
### ○ ジャイロスコープによる姿勢保持フィードバック制御 (エルマー・スペリー1914年)

ジャイロスコープ：方向の記憶装置として利用

### ○ レートジャイロの活用

ジャイロスコープの軸回りに回転が生ずると「ジャイロ効果」により、ジンバルに回転角速度に比例したトルクが発生する。

トルクを測定すると角速度がわかる。



現在では小型化されている



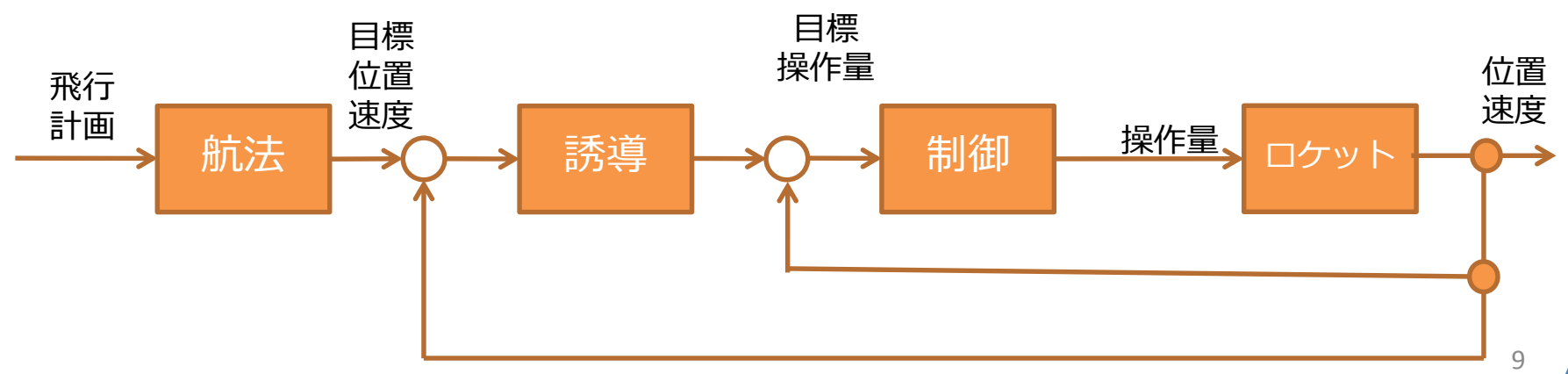
## ロケットのための制御技術の発達 (20世紀中期)

### 第2次世界大戦後

米ソのミサイル開発競争においてミサイル技術の中核として制御技術が研究された。

1950年代～ 人工衛星, 宇宙探索などの宇宙開発競争において制御技術が研究された。

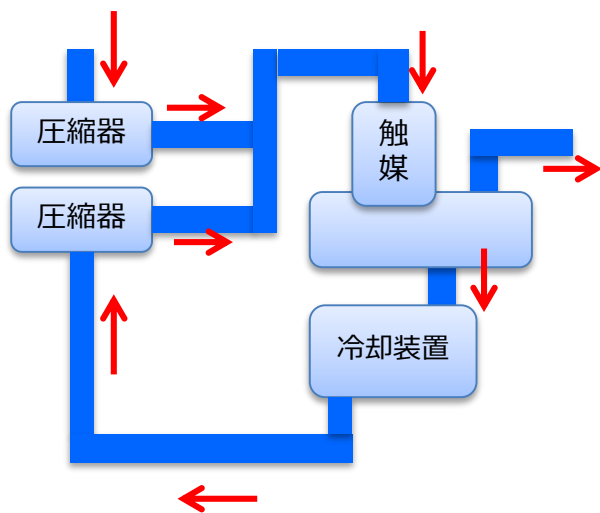
- 航法：目標に到達するための都合の良い経路を様々な状況下で決める。
- 誘導：目標と現在地との差を測定し、それをもとに適切な推進力を計算する。制御に目標を与える。
- 制御：誘導で求めた推進力をアクチュエータ (操作器) を通して実際に発生し、望ましい動きをさせること



# 化学合成のための制御技術の発達 (20世紀初頭)

## 食糧危機に対する窒素肥料の製造

ハーバー・ボッシュ法とは、鉄を主体とした触媒上で水素と窒素を400 - 600 °C, 200 - 1000気圧の超臨界流体状態で直接反応させ、  
 $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$   
 の反応によってアンモニアを生産する方法



アンモニアの反復合成装置

化学反応の工業化には制御が欠かせない

圧力・温度・pHを一定に保つ

フィードバック制御

原料ガスの量の厳密な管理

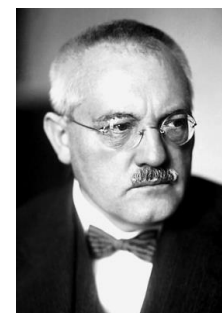
工程の連続化

石油精製への応用

## プロセス制御



フリッツ・ハーバー



カール・ボッシュ

この方法は、「水と石炭と空気とからパンを作る方法」とも言われた。

小麦の育成には窒素分を含む肥料の十分な供給が不可欠だが、痩せた氷河地形で土壌が未発達な土地が多いドイツでは、小麦の栽培は困難で、主要な穀物生産は硝石などの海外産窒素肥料の輸入によるか、痩せた土壌に強いライ麦に頼る、あるいは穀物の代替品として新大陸産のジャガイモに頼らざるを得なかった。

本法によるアンモニア合成法の開発以降、生物体としてのヒトのバイオマスを従来よりもはるかに多量で保障するだけの窒素化合物が世界中の農地生態系に供給され、世界の人口は急速に増加した。現在では地球の生態系において最大の窒素固定源となっている。

しかしこの方法は同時に平時には肥料を、戦時には火薬を空気から作ることも形容され、爆薬の原料となる硝酸の大量生産を可能にしたことからその後の戦争が長引く要因を作った。

さらに、農地生態系から直接間接双方の様々な形で、他の生態系に窒素化合物が大量に流出しており、地球全体の生態系への窒素化合物の過剰供給をも引き起こしている。この現象は、地球規模の環境破壊の一端を成しているのではないかと懸念も生じている。

# 制御とは何か？

英語の control の和訳

Control の語源は contrarotulare ラテン語

「対して」 「古い文書」

「昔の権威に照らして」

昔の権威に照らして現状が正しいかチェックし  
正しくなければそれを直す行動をする

Under control 制御の下にある

Out of control 制御がきかない

バースコントロール：産児制限

クオリティコントロール：品質管理

コントロールタワー：管制塔

# 制御とは何か？

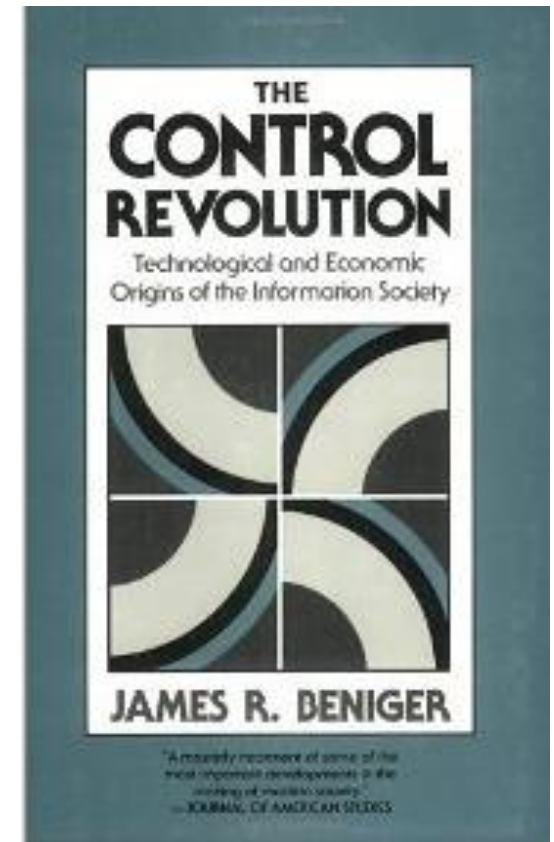
- コントロールの定義 (James Beniger)  
「目的に向けた影響力の行使」
- コントロールの定義 (木村 英紀)  
「目的に向けた影響力の**持続的**行使」

## よい制御の資格

「合わせる」：サーボ制御

「保つ」：レギュレーション制御

「省く」：最適制御



The Control Revolution:  
Technological and  
Economic Origins of the  
Information Society

James Beniger