

公益社団法人日本工学会 CPD協議会  
2020年度第1回CPD協議会公開シンポジウム  
2020年11月20日

1

～ 原点に立ち返り 新時代の技術者継続教育を考える ～

## 「自分もできると気付かせる教育」

東京大学名誉教授 北森 俊行

T. Kitamori

## 創造性～ひらめきか論理か

2

- ◆ ひらめきは、それを得ようと長い間、準備・苦心した者だけに与えられる。偶然は準備のできていない人を助けない。  
(パズール)
- ◆ ひらめかない人は論理に頼る道がある。
- ◆ 小学校の算数の時間、応用問題は図を描いてみたり、式を書いて考えなさいと教えられた。
- ◆ 式が立つ問題もあるけれど、どう式を立てたらよいかなかなか分からない問題もある。

T. Kitamori

## 制御 — 気づいてほしい

3

- ◆ 制御対象に関する認識
  - ◆ 物理的システムである：非線形、時変、分布定数システムの複合システム
  - ◆ どのモデルも近似である
  - ◆ 制御時間区間が短ければ時不変で間に合う
  - ◆ 制御の速度を極限まで要求しなければ集中定数近似で間に合う
  - ◆ 制御の速度が遅くてよければ低次の集中定数近似で間に合う
  - ◆ 動作範囲が狭ければ線形近似で間に合う
  - ◆ 平衡状態だけが問題なら静特性近似で間に合う
- ◆ システムに関する認識
  - ◆ 線形系表現は非線形系表現の特別な場合(線形と非線形の連続性)
  - ◆ 静的特性は動的特性の特別な特性(静特性と動特性の連続性)
  - ◆ サンプル値制御系は連続時間制御系である

T. Kitamori

## 制御 — 気づいてほしい(つづき)

4

- ◆ 制御対象の動特性を完全に補償することはできない
  - ◆ 制御対象の次数は無量大、補償要素・制御装置の次数は有限だから
  - ◆ 補償しないで済ませられる手の抜きどころはどこかが問題
  - ◆ 安定で速応的な制御系ができれば、それより遅い制御系は容易にできる
  - ◆ 不安定な制御対象の制御には速やかで大きい操作量が必要である
- ◆ 注：システムの次数は何で決まるのか
  - ◆ システムに含まれる物質やエネルギーの蓄積要素の総数(=無量大)

T. Kitamori

5

## 関心を持っていて良かったこと

- ◆ 計測、制御の他に:
- ◆ ブール代数, 論理回路の他にパズルの論理的処理にも
- ◆ 母関数 (generating function) の概念, 数式表現とシステムの特徴パラメータの関連付け
- ◆ 摂動 (perturbation) 理論による近似論, 物理に使えるのだから当然工学にも, 計算に便利
- ◆ 価値解析 (VA), 価値工学 (VE), 機能定義へのヒント

T. Kitamori

6

## 制御工学の流れ

- ◆ 制御工学の一つの中心的課題は制御系の設計問題です.
- ◆ お客からの制御対象と呼ばれる装置やシステムを補償要素や制御装置を設計して付け加え, 制御系としてうまく動くようにしてあげることです.
- ◆ 設計法にはいろいろ変遷がありました.
  - ◆ パラメータチューニング (試行錯誤の反復)
  - ◆ Ziegler-Nichols の経験則 (制御対象の動的特性を2つのパラメータで表現し, 制御装置の3つのパラメータの値を決めていた)
  - ◆ 周波数応答による表現と図式計算法 (複素表現, Bode線図, Nichols線図表現上での特性曲線の位置と形状の調整)
  - ◆ 状態方程式表現, “正確な”表現での数学的解析と設計法
  - ◆ ... ..
- ◆ ここでは方程式を立てて考えてみます.

T. Kitamori

7

## “設計方程式”から考える

$$[\text{制御対象}] \text{ (接続) } [\text{補償要素} \cdot \text{制御装置}] = [\text{望ましい制御系}]$$

これでは解けない

どんな表現で記述するかが問題となる

[制御対象]を同定(計測)しやすい表現

[望ましい制御系]を規定しやすい表現 **表現論**

[補償要素・制御装置]を解きやすい表現

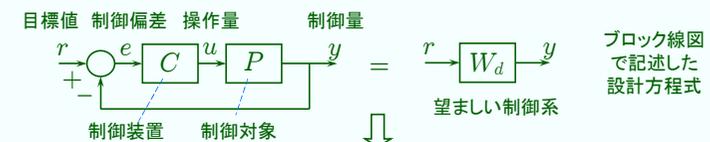
**(接続)の構造も解くべきこと** **構造論**

T. Kitamori

8

## 設計方程式を解きやすい表現とは?

- ◆ 具体的に解いてみて何が必要だったか整理する



$$e \rightarrow [C] \rightarrow u = ?$$



伝達要素とは:

入力が与えられれば出力が決まる何らかの表現

T. Kitamori

9

### 目標値から制御量への関係を求める計算

このシステムの  $r$  から  $y$  への特性を求めよう。それには中間変数  $e$  と  $u$  を消去すればよい。まず  $C$  と  $P$  を直列接続すれば  $u$  が消える。

$e$  を消去したいが、 $e$  は、 $e$  から  $y$  が計算できるが  $e$  は  $y$  に依存しているというループの中にある。これでは  $e$  を消去できないので、ループをループでなくする。それには  $e$  から  $y$  への入出力関係を逆転する。

そうするとループが消えて並列接続になる。

並列接続を計算すると  $e$  を消去できる。  $I$  は出力が入力に等しい単位要素を表す。

入出力関係を逆転すれば  $r$  から  $y$  への関係を得る。

T. Kitamori

10

### 設計方程式を解く

$r \rightarrow W_d \rightarrow y$

$r \rightarrow \text{inv}(W_d) \rightarrow y$

$e \rightarrow \text{inv}(C) \rightarrow u \rightarrow \text{inv}(P) \rightarrow y$

$e \rightarrow C \rightarrow u \rightarrow P \rightarrow y$

$=$

$=$

$=$

$=$

左辺に  $C$  のみが残るように処理する  
直列接続, 並列接続, 逆 だけできる

T. Kitamori

11

### 設計方程式を解く(続)

$e \rightarrow C \rightarrow u \rightarrow P \rightarrow y$

$e \rightarrow C \rightarrow u \rightarrow P \rightarrow y \rightarrow \text{inv}(P) \rightarrow u$

||

$e \rightarrow C \rightarrow u$

$=$

$=$

$C = \text{ser}(\text{inv}(P), \text{inv}(\text{par}(-I, \text{inv}(W_d))))$

T. Kitamori

12

### 補償要素・制御装置を解きやすい表現

- ◆ 入力を与えられたら出力が決まる表現で、
- ◆ 2つの要素の直列接続が計算しやすい表現
- ◆ 2つの要素の並列接続が計算しやすい表現
- ◆ 各要素の逆が計算しやすい表現
  - ◆ 逆とは: 出力からそれをもたらす入力を計算する表現

T. Kitamori

13

## 物理的システムの表現は近似

物理的システムは**分布定数非線形システム**

集中定数システム**近似**

非線形動的システム <b>近似</b> (1~∞次0~∞階)	線形動的システム <b>近似</b> (1次0~∞階)
非線形静的システム <b>近似</b> (1~∞次0階)	線形静的システム <b>近似</b> (1次0階)

T. Kitamori

14

## 直列接続, 並列接続, 逆を計算しやすい表現は何か

- ◆ 静的システムは3計算が容易
 

$u(t) \xrightarrow{K} y(t) = Ku(t)$
- ◆ その本質は**任意の入力に対して出力は入力**の定数倍
- ◆ 動的システムでは出力は任意の入力に対して定数倍にはならない
- ◆ 動的システムは静的システムの連続的拡張
- ◆ 広がった世界では限定されたことしか成り立たない
- ◆ **ある特別な入力に対して出力が入力の定数倍になるか?**

$$\dot{y} = u \text{ に対して } u(t) = ce^{st} \quad c, s : \text{任意定数}$$

T. Kitamori

15

## 入力の表現と要素の表現の分離

$a_2\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = b_0u + b_1\dot{u}$  に対して
 定数倍

$u(t) = ce^{st} \Rightarrow y(t) = \frac{b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} ce^{st}$ 
入力信号の表現

$u(t) = \sum_{i=1}^N c_i e^{s_i t} = \frac{1}{2\pi j} \oint \left( \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{s - s_i} \right) e^{st} ds = \frac{1}{2\pi j} \oint U(s) e^{st} ds$ 
Cauchyの積分公式

$\Rightarrow y(t) = \sum_{i=1}^N \frac{b_1s_i + b_0}{a_2s_i^2 + a_1s_i + a_0} c_i e^{s_i t}$ 
伝達要素の表現

$= \frac{1}{2\pi j} \oint \left( \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{s - s_i} \right) \frac{b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} e^{st} ds$ 
重ね合わせの原理

$= \frac{1}{2\pi j} \oint U(s) G(s) e^{st} ds = \frac{1}{2\pi j} \oint Y(s) e^{st} ds$

$Y(s) = G(s)U(s)$ : 伝達関数表現  $G(0) = \frac{b_0}{a_0} (= K)$ : 静特性

T. Kitamori

16

## 伝達関数表現

$U(s) \equiv \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{s - s_i}, \quad G(s) \equiv \frac{b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0}$

$\Rightarrow y(t) = \frac{1}{2\pi j} \oint U(s) G(s) e^{st} ds \equiv \frac{1}{2\pi j} \oint Y(s) e^{st} ds$

よって入出力関係は  $Y(s) = G(s)U(s)$

$G(s)$  を伝達関数と呼ぶ

直列接続は  $G_b(s)G_a(s)$ , 並列接続は  $G_a(s) \pm G_b(s)$ , 逆要素は  $\frac{1}{G(s)}$

静特性を包含:  $a_1 = a_2 = b_1 = 0$  と置いて  $G(s) = \frac{b_0}{a_0} (= K)$

このとき  $Y(s) = \frac{b_0}{a_0} U(s)$  であり,  $y(t) = \frac{b_0}{a_0} u(t)$  である

T. Kitamori

17

### 制御対象を同定しやすい表現とは？

- ◆ 現象が連続的ならば表現も連続的であること
  - ◆ 現象を観測してモデル表現の係数の値を推定
  - ◆ 現象が近ければ係数の値も近い
  - ◆ 近い現象から大きく異なる係数の値を求めるのは難しい
  
- ◆ 現象そのものの観測データは最も同定しやすい
  - ◆ モデル予測制御はそれを使っている

T. Kitamori

18

### 現象の次数間の連続性

現象は連続的

T. Kitamori

19

### 伝達関数表現の次数間の連続性

伝達関数表現は連続的

T. Kitamori

20

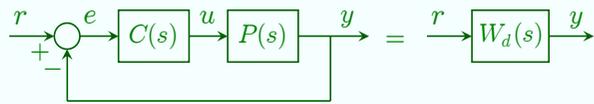
### 状態方程式表現の次数間の不連続性

状態方程式表現は不連続

T. Kitamori

21

### PID制御系の設計方程式とその解



$$\frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)} = W_d(s)$$

$$C(s) = \frac{1}{P(s)} \frac{1}{\frac{1}{W_d(s)} - 1}$$

$$P(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + \dots}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + \dots}$$

この形に表現すると  $c_0, c_1, c_2, \dots$  が  $P(s)$  と  $W_d(s)$  のパラメータで決まってくる

$$C(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = \frac{c(s)}{s} = \frac{c_0 + c_1s + c_2s^2 + c_3s^3 + \dots}{s}$$

T. Kitamori

22

### PID制御系の設計に必要な情報

$$\frac{\frac{c(s)}{s} \frac{b(s)}{a(s)}}{1 + \frac{c(s)}{s} \frac{b(s)}{a(s)}} = \frac{b_d(s)}{a_d(s)}$$

必要な情報

$$\frac{a(s)}{b(s)} = a'(s) = a'_0 + a'_1s + a'_2s^2 + \dots$$

$$\frac{a_d(s)}{b_d(s)} = a'_d(s) = a'_{d0} + a'_{d1}s + a'_{d2}s^2 + \dots$$

分母系列表現！

$$c(s) = c_0 + c_1s + c_2s^2 + \dots = \frac{a(s)}{b(s)} \frac{s}{\frac{a_d(s)}{b_d(s)} - 1}$$

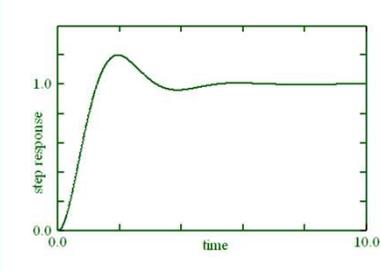
制御対象      望ましい制御系

T. Kitamori

23

### 望ましい制御系の仕様

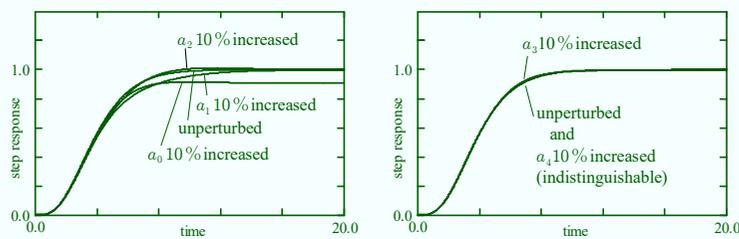
- ◆ 制御系のよさの判断(現場の感覚)
  - ◆ ステップ応答の姿がもっとも分かりやすい
    - ◆ 数値よりも**パターン**
      - ◆ 定常偏差
      - ◆ 応答時間
      - ◆ 減衰特性



T. Kitamori

24

### 係数の変化とステップ応答形状



$$\frac{1}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + a_4s^4} = \frac{1}{1 + 4s + 6s^2 + 4s^3 + 1s^4}$$

高次の項の係数はステップ応答形状にほとんど影響しない  
手の抜きどころ!!!

T. Kitamori

25

### 参照モデル

$$W_d(s) = \frac{1}{1 + \sigma s + \alpha_2 \sigma^2 s^2 + \alpha_3 \sigma^3 s^3 + \alpha_4 \sigma^4 s^4 + \alpha_5 \sigma^5 s^5 + \dots}$$

- ◆ ステップ応答の定常位置偏差ゼロ  
 $W_d(0) = 1$
- ◆ 適切な減衰(ダンピング)  
 $\{\alpha_i\} = \{1, 1, 0.5, 0.15, 0.03, 0.003, \dots\}$
- ◆ 速応性  
 $\sigma \rightarrow$  正でできるだけ小さく

ゲインの規格化  
時間の規格化  
ダンピング形状

T. Kitamori

26

### 補償の構造の再考

制御対象:  $\ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 y + a_0 y + a_{000} y^3 = b_0 u$   
 望ましい系:  $\ddot{y} + a_{d2} \ddot{y} + a_{d1} \dot{y} + a_{d0} y + a_{d000} y^3 = b_0 v$

uをvとyの関数として解けばよい

$$\ddot{y} + (a_{d2} + a_2 - a_2) \ddot{y} + (a_{d1} + a_1 - a_1) \dot{y} + (a_{d0} + a_0 - a_0) y + (a_{d000} + a_{000} - a_{000}) y^3 = b_0 v$$

$$\ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 y + a_0 y + a_{000} y^3 = b_0 \left( v - \frac{a_{d2} - a_2}{b_0} \ddot{y} - \frac{a_{d1} - a_1}{b_0} \dot{y} - \frac{a_{d0} - a_0}{b_0} y - \frac{a_{d000} - a_{000}}{b_0} y^3 \right)$$

u

T. Kitamori

27

### 補償の効果

$$u = v - \frac{a_{d0} - a_0}{b_0} y - \frac{a_{d1} - a_1}{b_0} \dot{y} - \frac{a_{d2} - a_2}{b_0} \ddot{y} - \frac{a_{d000} - a_{000}}{b_0} y^3$$

$$= v - f_0 y - f_1 \dot{y} - f_2 \ddot{y} - f_{000} y^3$$

フィードバック補償!

$$\ddot{y} + a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y + a_{000} y^3 = b_0 (v - f_0 y - f_1 \dot{y} - f_2 \ddot{y} - f_{000} y^3)$$

$$\ddot{y} + (a_2 + b_0 f_2) \ddot{y} + (a_1 + b_0 f_1) \dot{y} + (a_0 + b_0 f_0) y + (a_{000} + b_0 f_{000}) y^3 = b_0 v$$

一対一, 加法的補償

T. Kitamori

28

### 制御の構造 (I-PD制御方式)

$$\begin{cases} \dot{v} = ke \\ \ddot{y} + a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y + a_{000} y^3 = b_0 v \\ e = r - y \end{cases}$$

$$\ddot{y} + a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y + 3a_{000} y^2 \dot{y} = b_0 ke = b_0 k(r - y)$$

$$\ddot{y} + a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y + 3a_{000} y^2 \dot{y} + b_0 ky = b_0 kr$$

T. Kitamori

29

### I-PD 制御系の設計方程式とその解

$$\frac{P(s)C(s)}{P(s)C(s) + (1 + P(s)F(s))} = W_d(s)$$

$$F(s) = C(s) \left( \frac{1}{W_d(s)} - 1 \right) - \frac{1}{P(s)}$$

$$P(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + \dots}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + \dots}$$

$$C(s) = \frac{k}{s}$$

$$F(s) = f(s) = f_0 + f_1s + f_2s^2 + f_3s^3 + \dots$$

この形に表現する

T. Kitamori

30

### 連続時間制御とサンプル値制御の連続性

T. Kitamori

31

### サンプル値制御系の設計

**サンプル値制御系**  
(連続時間ベース)

入力も出力もラプラス変換できるのだから  
サンプル値制御系もラプラス変換で  
記述されるべきである

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = W(s)$$

T. Kitamori

32

### サンプル値 PID 制御系の設計例

サンプリング周期がゼロに近づくとき、連続時間制御に近づく

T. Kitamori

### 線形と非線形の連続性

線形近似が有効そうな範囲

しかしどこまでが線形で、どこからは非線形性を考えるべきか、その境界は明確でない

T. Kitamori

### 動特性表現の非線形への拡張

$a_0 y$	$+ a_1 \dot{y} + a_2 \ddot{y} + \dots$
$+ a_{00} yy$	$+ a_{01} y\dot{y} + a_{10} \dot{y}y + a_{02} y\ddot{y} + \dots$
$+ a_{000} yyy$	$+ a_{001} yy\dot{y} + a_{010} y\dot{y}y + a_{100} \dot{y}yy + a_{002} yy\ddot{y} + \dots$
$+ \dots$	$\dots$
$= b_0 u$	$+ b_0 \dot{u} + b_0 \ddot{u} + \dots$
$+ b_{00} uu$	$+ b_{01} u\dot{u} + b_{10} \dot{u}u + b_{02} u\ddot{u} + \dots$
$+ b_{000} uuu$	$+ b_{001} uu\dot{u} + b_{010} u\dot{u}u + b_{100} \dot{u}uu + b_{002} uu\ddot{u} + \dots$
$+ \dots$	$\dots$

直列接続, 並列接続, 逆要素の計算ができる

T. Kitamori

### 出力系列表現(分母系列表現)

これは  $a_0 b_0 \neq 0$  ならば

$$u = c_0 y + c_1 \dot{y} + c_2 \ddot{y} + c_3 \dddot{y} + \dots$$

$$+ c_{00} yy + c_{01} y\dot{y} + c_{11} \dot{y}\dot{y} + c_{02} y\ddot{y} + c_{12} \dot{y}\ddot{y} + \dots$$

$$+ c_{000} yyy + c_{001} yy\dot{y} + c_{011} y\dot{y}\dot{y} + c_{111} \dot{y}\dot{y}\dot{y} + c_{002} yy\ddot{y} + \dots$$

$$+ \dots \dots \dots$$

と書くことができる. ここで

$c_0, c_1, c_2, c_3, \dots; c_{00}, c_{01}, c_{11}, c_{02}, c_{12}, \dots; c_{000}, c_{001}, c_{011}, c_{111}, c_{002}, \dots$

は前頁の式に代入し, 係数比較して順次決定できる. この表現は線形の場合の分母系列表現の拡張になっていて, p.7で提起した表現論の非線形まで拡張した解なのである.  $a_0 b_0 \neq 0$  ならば  $c_0 \neq 0$  となり, 直列接続, 並列接続, 逆が計算できる.

T. Kitamori

### トカマクプラズマプラントの動作点近傍の非線形性と その線形近似および2次近似

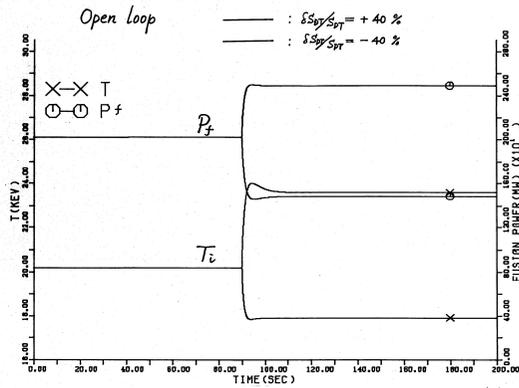
状態方程式には **8次の非線形項** が含まれている

Shimotohno, et al. [9]

T. Kitamori

37

### 温度とパワー出力の相互干渉

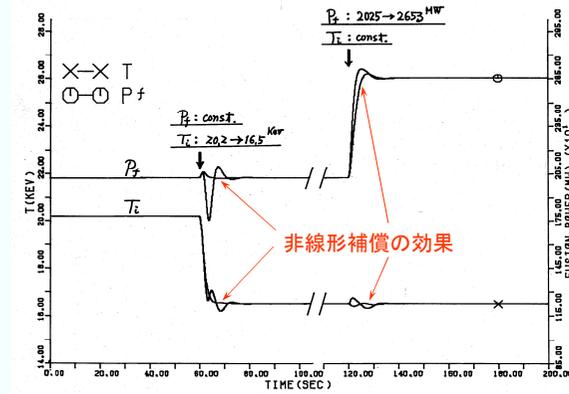


Shimotohno, et al. [9]

T. Kitamori

38

### 2次 I-P 非干渉制御の応答



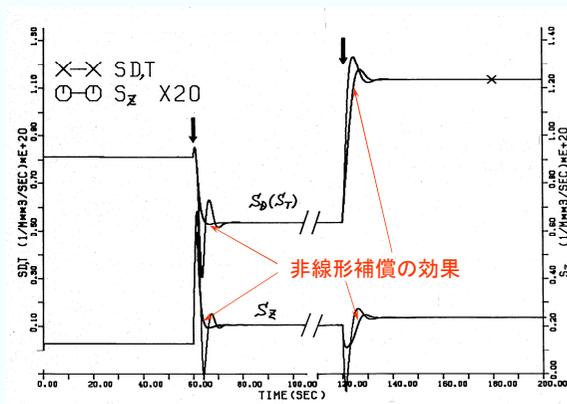
2次の非線形の補償で干渉が大幅に減少している

Shimotohno, et al. [9]

T. Kitamori

39

### 操作量(燃料粒子および不純物粒子)



より小さい操作量(の変化)でよい制御ができている

Shimotohno, et al. [9]

T. Kitamori

40

### 参考文献

- [1] 北森俊行: 制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, 15, 549-555 (1979)
- [2] 北森俊行: 制御対象の部分的知識に基づくサンプル値制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, 15, 695-700 (1979)
- [3] 北森俊行: 制御対象の部分的知識に基づくI-PD方式非干渉制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, 16, 112-117 (1980)
- [4] 北森俊行: 制御対象の部分的知識に基づくPID方式非干渉制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, 16, 139-140 (1980)

T. Kitamori

41

## 参考文献(つづき)

- [5] Kitamori, T.: A design method for **nonlinear control systems** design based upon partial knowledge about controlled objects, *Preprints of the Eighth IFAC World Congress, Kyoto*, Paper no. 17.5, IV25-IV30 (1981)
- [6] 重政 隆・高木康夫・市川義則・北森俊行: 制御系設計のための実用的な汎用**参照モデル**, 計測自動制御学会論文集, **19**, 592-594 (1983)
- [7] 北森俊行: **連続時間制御と離散時間制御理論の融合**, 計測と制御, **22**, 599-605 (1983)
- [8] 森 泰親・重政 隆・北森俊行: **異なるサンプリング周期を有するサンプル値非干渉制御系の設計法**, 計測自動制御学会論文集, **20**, 300-306 (1984)

T. Kitamori

42

## 参考文献(つづき)

- [9] Shimotohno, H., T. Kitamori and S. Kondo (1989): Power control of RFP fusion power reactor, *Bull. of the Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Sapporo*, 151.
- [10] Kitamori, T.: Smooth extension of control system design algorithm from linear to **nonlinear** systems, *Preprints of 2<sup>nd</sup> Japan-China Joint Symposium on Systems Control Theory and Its Applications, Osaka*, 17-26 (1990)
- [11] Kitamori, T.: Partial model matching method conformable to physical and engineering actualities, *Proceedings of the IFAC Symposium on System Structure and Control, Prague, Czech Republic, 2001*, 141-146 (2001)

T. Kitamori

43

## 参考文献 (工学的でない部分的モデルマッチング)

- [12] Emre, E. and L. M. Silverman (1980): Partial model matching of linear systems, *IEEE Trans. Automatic Control*, **AC-25**, 280-281.
- [13] Martínez García, J. C., M. Malabre and V. Kučera (1995): The partial model matching problem with stability, *Systems Control Letters*, **24**, 61-74.
- [14] Kučera, V., J. C. Martínez García and M. Malabre (1997): Partial model matching: Parametrization of solutions, *Automatica*, **33**, No.5, 975-977.

T. Kitamori

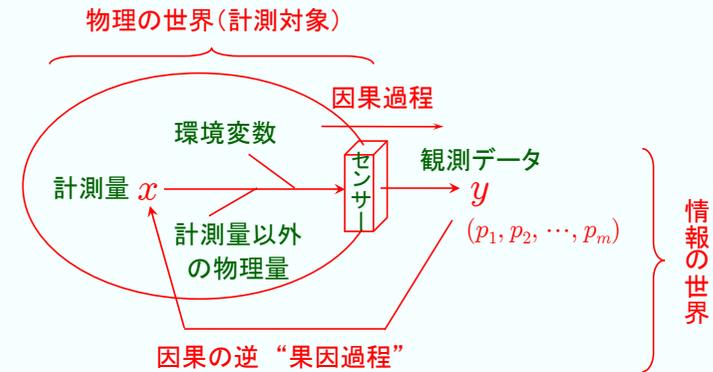
44

## 計測システム—気づいてほしい

- ◆ 沢山の計測システムが厚い便覧にまとめられているが、便覧を**薄くする計測理論**が見当たらない
- ◆ アナログ計測システムにはいろいろな姿(**構造**)が見える.
- ◆ 空間的, 時間的**反復構造**, **対称構造**, **差分構造**, **加算構造**, **積算構造**, てこの**構造**, **フィードバック構造**, **人手による調整**, **人手による計算**, **正確な直線**, **正確な並行**, **正確な円形**, **正確な筒形**, **緩やかな傾斜**, **走査**, ...
- ◆ **人手による調整**, **人手による計算**なども計測システムの**構造部品**である.
- ◆ システムに**構造**があるならば**機能**があるはず, **構造と機能の関係**を明らかにしよう.

T. Kitamori

### 計測システムの構造



自然界は因果過程のみが起こる。因果過程は方程式を解く過程で因果の逆。自然には起こらない。  
 デジタル計算機は因果律から独立な論理演算で組み立てられているので因果過程に使える  
 人手の介入が必要であった。

T. Kitamori

### 計測システムの機能と構造

機能		構造	構成要素	
データの採集	物理量の変換	物理効果・物理法則・保存則	エネルギー変換機構	
	感度の向上	微細な1目盛の実現、利用	物理的要素、現象	
	分解能の向上	高ゲインによる拡大	拡大要素	
		並列加算	測定系と加算機構	
		低ゲインフィードバックを用いた零位法 差動フィードバックを用いた零位法	縮小機構とゼロ化機構	
データの処理	偶然誤差の低減	各種平均の計算	測定系と演算機構	
	系統誤差の消去	計測量以外の物理量、未知パラメータの消去	複数回の独立な測定と消去演算 特別な場合として補償、置換法、零点調整、双極差動法など	測定系と演算機構
		線形性の向上	逆関数による直列補償、校正	逆関数
		フィードバック補償(零位法)	非線形特性とゼロ化機構	

T. Kitamori

### 物理量の変換過程

並べると相互関係がわかる

応答	働きかけ	力学	熱学	電気	磁気	化学
力学	可逆	質量 弾性	膨張	電圧効果	磁圧効果 (Joule効果) Wiedemann効果	浸透圧
	非可逆	粘性 (Newtonの法則)				
熱学	可逆	断熱効果	熱容量	逆Peltier効果	磁気熱効果 (断熱消磁)	
	非可逆	Joule-Thomson効果	熱伝導 (Fourierの法則)	Peltier効果		
電気	可逆	圧電効果	Thomson効果	逆Peltier効果	Ettingshausen効果	
	非可逆			Right-Lenax効果		
磁気	可逆	圧電効果	焦電 (Peltier)効果	静電容量 誘電分極 インダクタンス	磁気抵抗効果	電池 膜電位差
	非可逆		Seebeck効果	電気抵抗 Hermot効果	Hall効果	
化学	可逆	Villari効果 逆Wiedemann効果	熱磁気効果	電磁誘導	磁化	
	非可逆					

表中の各種効果は熱力学で説明される

原著: 高橋秀俊に若干補足

T. Kitamori

オリフィスは? 物指は? ノギスは?

### 計測方程式とその解

$$\begin{cases}
 y_1 = f(x; p_1, p_2, \dots, p_m; \uparrow c_1) \\
 y_2 = f(x; p_1, p_2, \dots, p_m; \uparrow c_2) \\
 \dots \dots \dots \\
 y_n = f(x; p_1, p_2, \dots, p_m; \uparrow c_n) \\
 y_{n+1} = f(x_s; p_1, p_2, \dots, p_m; \uparrow c_{n+1}) \\
 y_{n+2} = f(x_s; p_1, p_2, \dots, p_m; \uparrow c_{n+2}) \\
 \dots \dots \dots \\
 y_{n+n'} = f(x_s; p_1, p_2, \dots, p_m; \uparrow c_{n+n'})
 \end{cases}$$

$x$  : 計測量  
 $x_s$  : 既知資料  
 $y_j$  : 測定データ  
 $p_i$  : 未知パラメータ  
 $c_j$  : 操作変数

これから未知パラメータを消去して計測量を解く

$$x = g(x_s; y_1, \dots, y_n, y_{n+1}, \dots, y_{n+n'}; c_1, \dots, c_n, c_{n+1}, \dots, c_{n+n'})$$

T. Kitamori

49

## 物理量の変換関係式(1)

保存則が成り立つとき:  $f(x_1, x_2) = \text{const.}$

$$\text{全微分して } \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 = 0 \quad \therefore dx_2 = -\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} / \frac{\partial f}{\partial x_2}\right) dx_1$$

$$\text{あるいは逆の関係 } dx_1 = -\left(\frac{\partial f}{\partial x_2} / \frac{\partial f}{\partial x_1}\right) dx_2$$

$x_1$  の変化が  $x_2$  に、あるいは  $x_2$  の変化が  $x_1$  に現れる。

極値条件が成り立つとき:

可逆過程の平衡状態は自由エネルギーが最小の状態に落ち着く

非可逆過程の平衡状態はエントロピーが最大の状態に落ち着く

非可逆過程の定常状態はエントロピー生成が最小の状態に落ち着く

T. Kitamori

50

## 物理量の変換関係式(2)

可逆過程の平衡状態は自由エネルギー最小の状態に落ち着く。

物理量  $x_1, x_2$  の平衡状態からの変化分を  $dx_1, dx_2$  とすると、平衡状態の近傍でエネルギーは

$$E - E_{\min} = a_{11} dx_1^2 + 2a_{12} dx_1 dx_2 + a_{22} dx_2^2 \quad (a_{11}a_{22} - a_{12}^2 > 0)$$

と近似できる。

ここで  $dx_1$  が与えられたとき、 $E$  を最小にする  $dx_2$  は

$$\frac{\partial E}{\partial dx_2} = 2a_{12} dx_1 + 2a_{22} dx_2 = 0 \quad \text{から } dx_2 = -\frac{a_{12}}{a_{22}} dx_1 \quad \text{となる.}$$

あるいは  $dx_2$  が与えられたとき、 $E$  を最小にする  $dx_1$  は

$$\frac{\partial E}{\partial dx_1} = 2a_{11} dx_1 + 2a_{12} dx_2 = 0 \quad \text{から } dx_1 = -\frac{a_{12}}{a_{11}} dx_2 \quad \text{となる.}$$

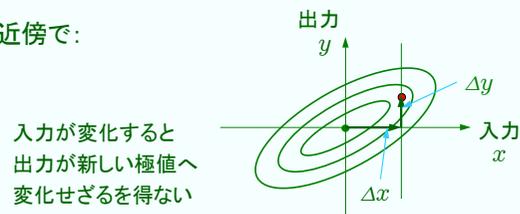
T. Kitamori

51

## 極値の近傍で

- ◆ 可逆平衡状態: 自由エネルギー最小
- ◆ 非可逆平衡状態: エントロピー最大
- ◆ 非可逆定常状態: エントロピー生成(単位時間当たりのエントロピーの増加)最小

- ◆ 極値近傍で:



T. Kitamori

52

## 参考文献

- [1] 北森俊行: 計測と観測理論—複数回の測定操作について—, 計測と制御, **15**, No.1, 92-99 (1976.1)
- [2] 北森俊行: 計測系の構造と機能, 計測と制御, **19**, No.1, 27-32 (1980.1)
- [3] 北森俊行: 計測の本質と計測工学, 計測と制御, **26**, No.2, 145-152 (1987.2)

T. Kitamori

53

## 工学: 目的を実現・運用する“学”

- ◆ Prof. Steve Senturia (MIT) defined engineering to be the purposeful use of science.
- ◆ 数学や物理学は装置やシステムの創り方を教えてくれない
- ◆ 工学には工学のあり方, 方法がある. 装置やシステムを創る立場から考えるべきである.
- ◆ 人工の装置やシステムは**目的**があって創られる.
- ◆ 目的を達成するためには, それに**必要な機能**を組み込まなければならない.
- ◆ 機能はそれを実現する下位の機能で支えられる
- ◆ システムは機能のtree構造になる

T. Kitamori

54

## 機能の標準的表現

- ◆ 機能は  
「**…A… を …B… する**」という表現形態をとる.  
ここで  
A は機能の対象となる名詞(**目的語**)  
B は機能の働きかけを表わす**他動詞**  
である.
- ◆ A. E. Mudge: Value Engineering: A Systematic Approach, McGraw-Hill, Inc.<sup>[1]</sup>

T. Kitamori

55

## 機能の表現の整理

- ◆ 機能の表現は無数にあり得る  
分類, 整理, 体系化が必要
- ◆ **目的語**: { 物質・物体(もの)  
エネルギー  
情報
- ◆ **他動詞**: { 輸送, 伝達, 連結, 変換する(**導通**)  
蓄える, 洩れ・異物の侵入を防ぐ(**遮断**)
- ◆ 機能を目的語とする機能: 機能の起動, 切替, 停止
- ◆ 導通と遮断の中間値を維持する機能: 調節, 制御(**遮蔽**)

T. Kitamori

56

## 目的語についての考察

- ◆ 目的語 “物質”と“エネルギー”と“情報”の関係は?  
◆ “**キャリアー**”になれる関係(矢印の根元側が矢先側のキャリアーになれる)
- 
- ◆ 三つ組みとして閉じているわけではない
  - ◆ 相対性理論によれば物質とエネルギーは等価であるから逆向きもありえようが, 1kgが $10^{24}$ ergに対応するから実用上は現実的ではない.
  - ◆ しかし陽子1個は $1.67 \times 10^{-30}$ gで,  $1.6 \times 10^{-9}$ ergに対応するから, 簡単な匂い物質を電氣的に送れるかも.

T. Kitamori

57

## 他動詞についての考察

- ◆ 他動詞 “連結”と“遮断”の関係は？
  - ◆ 互いに“否定”の関係
- ◆ 連結: 2つの場所, 状態, 部材などを関係づける, 一方から他方へ物質(物), エネルギー, 情報を伝達する, 状態を変換する, 物質を変える(反応)
- ◆ 遮断: 2つの場所, 状態, 部材などの関係を切る, 一方から他方への物質(物), エネルギー, 情報の移動を遮断する, 異物の侵入を遮断する, 状態が変化することを抑制する, 物質の変質を抑制する
- ◆ 2つの場所, 状態などを(1次元の)線<sup>①</sup>で結ぶイメージと(2次元の)面<sup>②</sup>で遮るイメージ

T. Kitamori

58

## Functional basis reconciled function set<sup>[3]</sup>

Class(Primary)	Secondary	Tertiary
Branch	Separate	
		Divide
		Extract
		Remove
	Distribute	Diffuse
Channel	Import	
	Export	
	Transfer	
		Transport
		Transmit
	Guide	
		Translate
		Rotate
		Allow DOF
Connect	Couple	
		Join
		Link
	Mix	Add
Control	Actuate	
Magnitude	Regulate	
		Increase
		Decrease
	Change	
		Increment
		Decrement
		Shape
		Condition
	Stop	
		Prevent
		Inhibit
Convert	Convert	
Provision	Store	
		Contain
		Collect
	Supply	
Signal	Sense	
		Detect
		Measure
	Indicate	
		Track
		Display
	Process	
Support	Stabilize	
	Secure	Constrain
	Position	Align

T. Kitamori

59

## ブール代数表現

- ◆ 基本的に, 機能は「働いている」, 「働いていない」の2値なので, 機能のtree構造は論理変数で簡単に記述することができる. 一つの機能をより細かく記述したり, tree構造の一部分を一つの機能として記述して簡略化することもできる.
- ◆ いずれかの機能が故障したときの故障検出にも便利な構造である(これは一種の計測で, 計測方程式がブール代数表現になる).

T. Kitamori

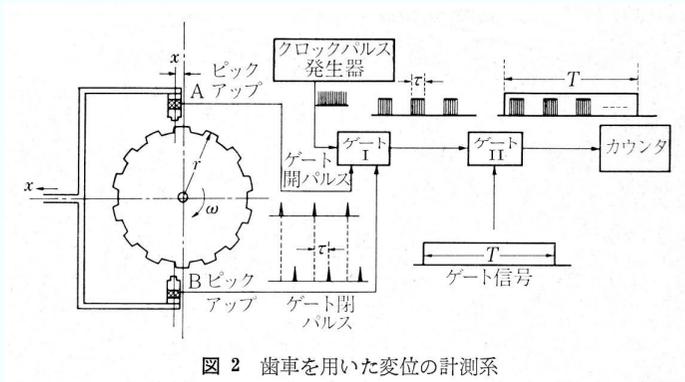
60

## 制御の機能構造

T. Kitamori

## 小野義一郎氏の変位計測系

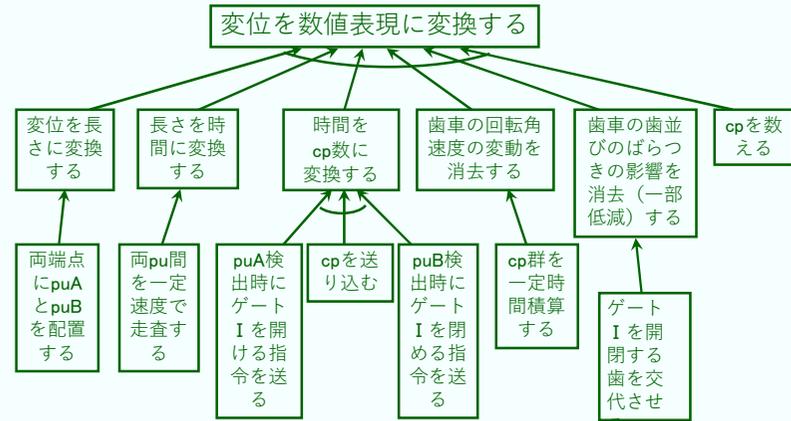
61



T. Kitamori

## 変位計測系の機能構造

62



T. Kitamori

注: pu: ピックアップ, cp: クロックパルス

## 参考文献(機能)

63

- [1] アーサー E. マッジ著・玉井正寿監修・中神芳夫・山路陽三・鈴木長生訳: 実例による分析の手順 VEアプローチ, 産業能率短期大学出版部(1974.11)
- [2] 北森俊行: 未だ経験せざる事故を予測するために, 高压ガス, 16, No.1, 39-42 (1979.1)
- [3] J. Hirtz, R. B. Stone, D. A. McAdams, S. Szykman, and K. L. Wood: A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts, Research in Engineering Design, Vol. 13, No. 2, 65-82 (2002)
- [3] 北森俊行: 未経験の異常を予知するためのモデリング, 計測と制御, 53, No.2, 98-103 (2014.2)

T. Kitamori