

課題37. 非線形・共鳴・同期現象の探求

～多自由度系での非線形制御手法の構築と実証～

鈴木康浩

- ユニット≠プロジェクト。LHD後継計画は大規模学術フロンティア促進事業に採択されなかった。再び大規模学術フロンティア促進事業に申請するのであれば、現行のプロジェクト体制の延長線上にない、新しい研究テーマを構築しなければならない。
- 今やっている事をそのまま続けるのならば、誰と組もうが意味はない。（烏合の衆）
- 研究者一人一人が、**今後10年間で何に取り組むかを考え直さなければならない**。ユニットは新しい研究テーマを創出するためのもの。（新しい酒を注ぐ、新しい革袋）
- 研究グループの規模（プラットフォームを含む）を追求するのではなく、**コミュニティから多様な提案を用意できるか？**

例：天文学・宇宙物理学分科会のMP2023へ向けた意思表示は34件

- 学術的普遍性を持つ≠他分野との連携。（昨日の友は今日の敵）
- ここで話す内容も含めて**他分野が先行している研究課題を謙虚に学ばなければならない**。（後の先を取る）

物理・工学にまたがる考察が必要な共鳴・同期現象の例 (日本物理学会誌2014年9月号より)

例：ロンドン・ミレニアムブリッジの横振動



ロンドン・ミレニアムブリッジのオープン初日に設計尤度を超える横揺れが発生。約2年間閉鎖となり約8億円の費用をかけて改修を余儀なくされた。

原因：

橋を渡る人間の歩行による加重はランダムにかかる
と仮定したが、多くの人数が集まることにより、歩
行が揃ってしまった！

フェーズ1

混み合うことにより、全員の歩幅が揃う。歩行者の
加重による振動が、橋の固有振動と揃ってしまった。
=> 共鳴！

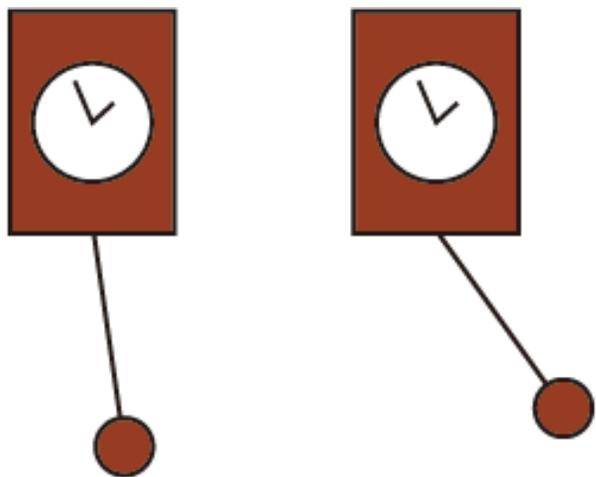
フェーズ2

橋の振動に合わせて全員がバランスを取ろうとした
結果、体重移動が揃うことで振動の増幅が発生。
=> 同期現象

**後から考えれば当然のこと。しかし、設計時は
考慮されなかった。**

非線形性とそこに現れるパターン形成は、物理・工学にまたがる共通の課題

例えば振り子の同期性



$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = F(x_1) + G(x_1, x_2)$$
$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = F(x_2) + G(x_1, x_2)$$

関数Gを通して相互作用

一般化すると、

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = F(x_i) + \sum_{j=1}^N G(x_i, x_j)$$

関数Fに対して関数Gの影響が非常に大きい場合、
=> 共鳴

関数Gを通して、運動が揃う場合、
=> 同期現象

これらの現象は物理に限らず、工学（電気回路、制御回路…）
に普遍的に見られる。
=> カオスの発見はアナログ計算機！

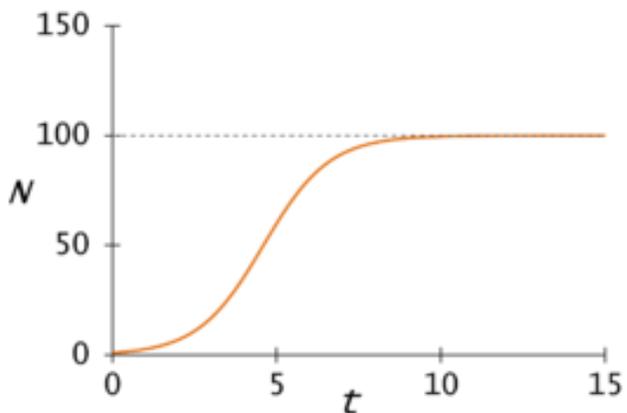
**核融合プラズマと関連分野は他に類を見ない
非線形・多自由度系。**
**我々はこのような非線形・多自由度系を理解
し、制御できるのか？**

- 強い非線形性を持ち、多自由度系である核融合プラズマとその周辺領域を対象に、先進的な非線形制御手法の構築とその実証を行う。
- 非線形制御手法の構築は、次の課題をそれぞれ考察し、統合化する。
 1. 非線形制御モデルの構築
 2. 非線形性同定のための先端計測、及び解析手法の確立
 3. 非線形制御のためのアクチュエータ開発

以上の考察から強い非線形性を持つ系に対してもロバストに適用できる制御システムを開発し、他分野へも応用する。

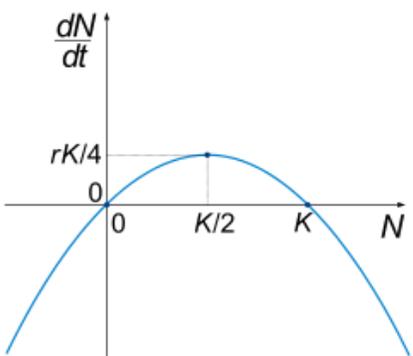
非線形制御モデルの構築 ～リアプノフ安定解析を例に～

非線形モデルの例：ロジスティック方程式



$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

N ：個体数、 r ：内的自然増加率、 K ：環境収容力
個体数が増えて環境収容力に近づけば飽和する。

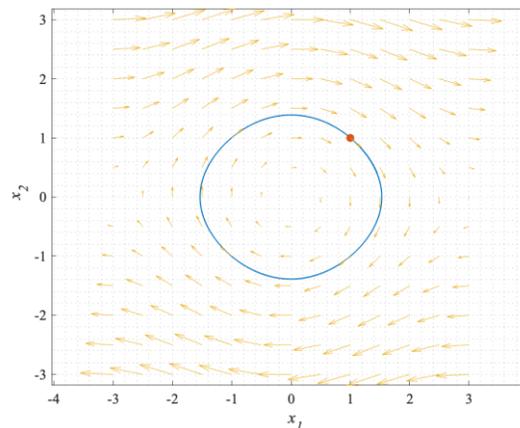


方程式を N の2次方程式と考えると、系の振る舞いを考察できる。

- $N = K/2$ -> 成長率最大
- $N = 0$ -> 成長率0
- $N = K$ -> 成長率0

$N = 0$ と $N = K$ は平衡（安定）状態
非線形な振る舞いの中にも安定な状態が存在できる。

非線形システムに対し、リアプノフ関数（エネルギーのようなもの）を定義し、位相空間を書いてみる。



x_1 ：位置、 x_2 ：速度

- 非線形な振る舞いに安定状態があるか調べる。
- 安定状態がない場合もある。
- 安定状態がどのぐらいの大きさで存在するか調べる。



制御できるかどうかの目安

もし系に安定状態がない場合は？

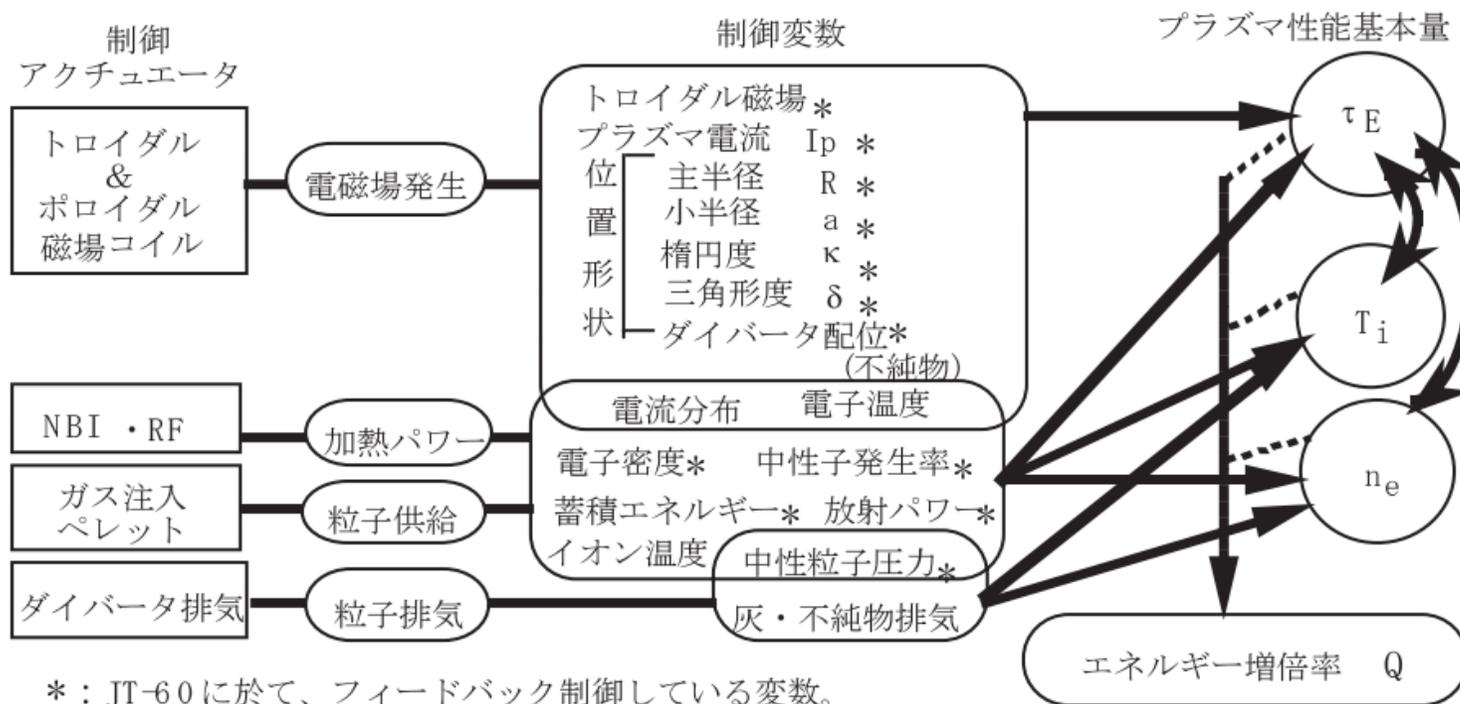
$$\frac{dx}{dt} = F(x) + G(x) \quad \longrightarrow \quad \frac{dx}{dt} = F(x) + G(x)\alpha(x)$$

制御関数を追加して安定になるよう系を設計する。

安定性解析と制御関数の設計が根幹

核融合プラズマは制御可能か？

JT-60U トカマク装置における制御フローの例



* : JT-60 に於て、フィードバック制御している変数。

原子力学会誌2005年3月号

これはプラズマ制御の例で、磁場、加熱、燃料供給、排気にそれぞれ非線形性が現れ、制御フローは複雑になる。

制御変数に対して、アクチュエータの数が極端に少ない。



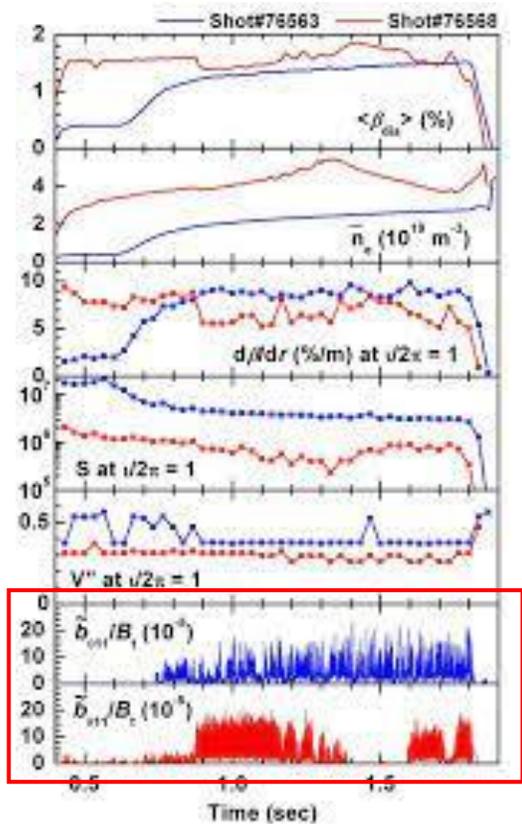
その意味で必ずしも制御可能ではない。
例：ディスラプション

多自由度の非線形制御システムが構築できるかが鍵。

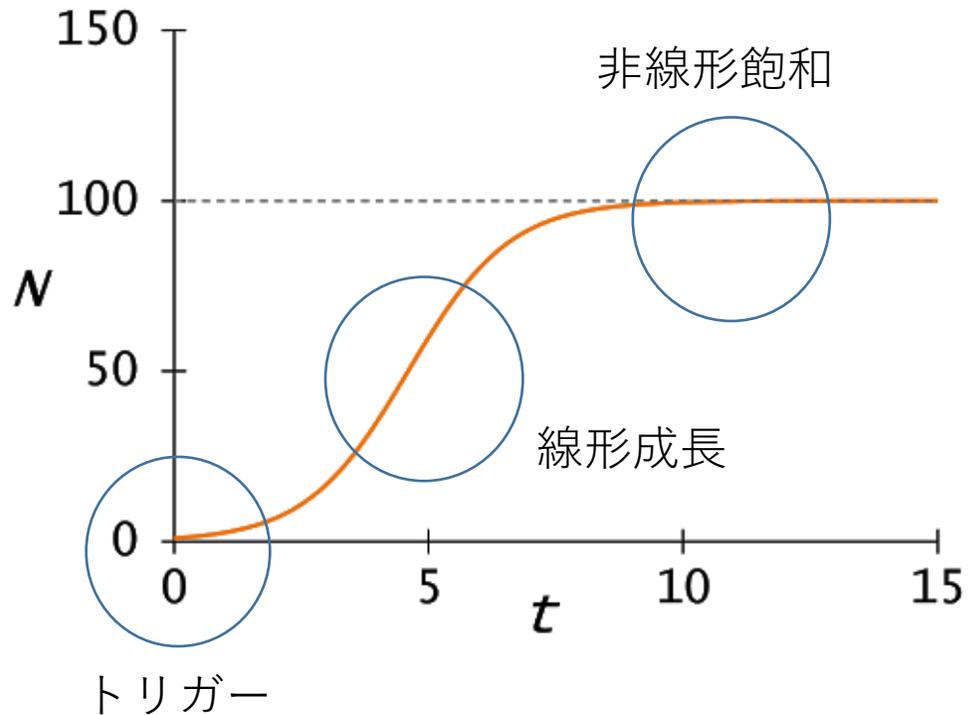
逆に多自由度で制御不完全で不安定な核融合プラズマが、本課題をドライブする。

我々は何を計っているのか？

例：LHDで観測される磁場揺動



我々はすでに非線形飽和した量を計っている！

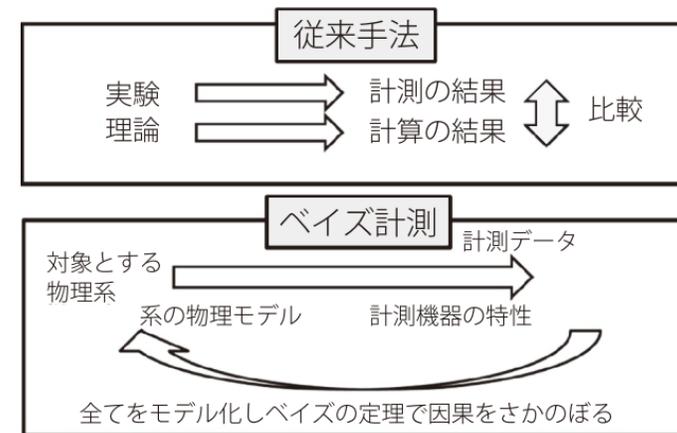


トリガーから非線形飽和に至る過程は不明のまま。

- 何を計れば良いのか？
 - どこを計っているのか？
 - 計ったものから何がわかるのか？
- これらの理解に機械学習が役に立つのではないか？

核融合プラズマは極限環境
温度、密度を計るのも最先端の
計測技術が必要。その分…

計測インフォマティックスの例

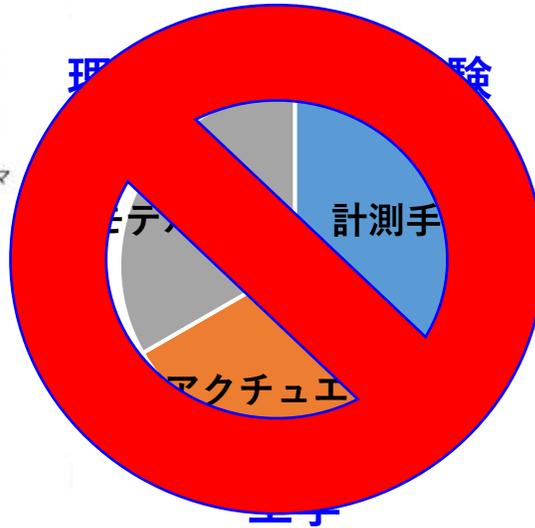
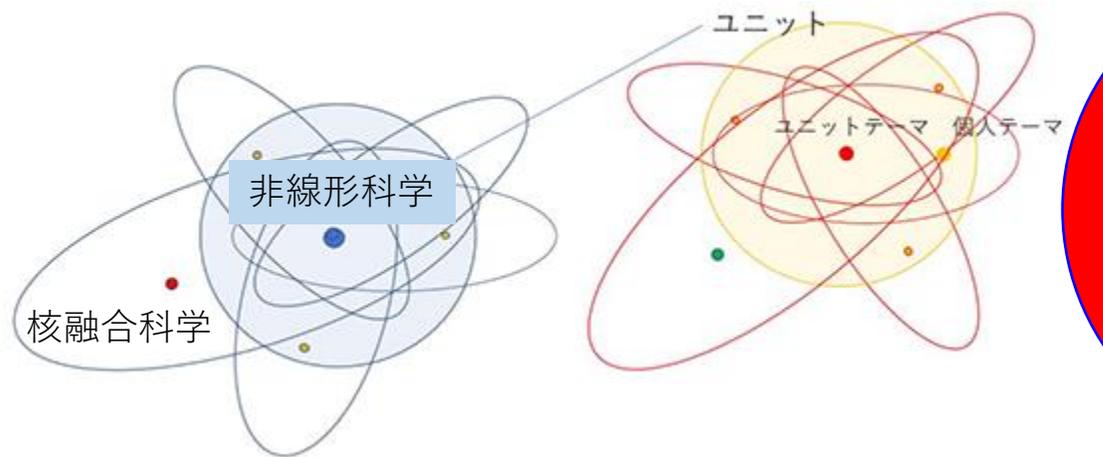


電気学会誌2021年6月号

あるいは…
計測器を改良し、全部計る、計りたい現象を
トリガする。

プラズマの持つ強い非線形性を考察することで、よりロバストな非線形制御システムの構築に道が開ける。

- 核融合プラズマは完全に制御可能ではない。
- しかし、制御可能な範囲で極端に不安定な状況を作り出すことが出来る。
- そのような状況を研究することで、トリガーから非線形飽和に至る過程の解明（モデル開発、計測手法、アクチュエータ開発）をめざす。
- これは、物理現象の理解にとどまらない、工学を含めた重要な課題。
- この知見が、よりロバストな非線形制御システムの構築に貢献する。



各々の今後10年の研究計画に基づいてテーマと手法を決定。

