

蔵本モデルに基づく同期温度制御方式に関する研究

Synchronization temperature control system based on the Kuramoto model

○高橋 賢*, 舘松達矢**, 高原良幸**, 佐藤 涼**, 千葉茂樹**, 伊藤孝徳***,
阿部貴美**, 伊藤菊一**, 仲摩 崇†, 石橋政三†, 長田 洋**

○Ken Takahashi*, Tatsuya Tatematsu**, Yoshiyuki Takahara**, Ryo Sato**,
Shigeki Chiba**, Takanori Ito***, Takami Abe**, Kikukatsu Ito**, Takashi Nakama†,
Shozo Ishibashi†, Hiroshi Osada**

*株式会社大昌電子, **岩手大学, ***岩手県立大学, †株式会社チノー

*Daisho Denshi Co., Ltd., **Iwate University, ***Iwate Prefectural University, † Chino Corporation

キーワード: 同期制御 (synchronization control), 蔵本モデル (Kuramoto model), 温度制御 (Temperature control),
多ループ制御 (multi-loop control), PID 制御 (PID control)

連絡先: 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学理工学部システム創成工学科 長田 洋, Tel/Fax:019-621-6381,

E-mail:osada@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

近年, さまざまな用途に対する温度制御の高精度化が求められており, 放射温度計や赤外線カメラの校正においては, 面における温度の均一化が課題となっている. このように点ではなく面における温度制御方式として, 複数のヒーターおよびセンサを用いる多ループ制御が考えられるが, 実際には熱干渉, 熱伝導や伝達などの非線形現象により従来の単一入出力系での温度制御では調整が困難である^{1,2)}. また, 制御アルゴリズムの係数の調整も課題となる.

一方, 複数の個体の相互干渉に関して興味深い報告がある. 一列に並べたメトロノームは振

り子の振動が互いに伝わることで, ばらばらだったリズムが完全にそろい, また, コイルとキャパシタからなる複数の LC 発振器が磁界結合により周波数と位相が完全に一致するといった同期現象が報告されている³⁾. さらに, 自然界においてもある種の蛍が一斉に集団で同期点滅するといった報告もある^{4,5)}. 個々で見ると一見無秩序な現象が, お互いに干渉することで同期に至る現象を工学的に応用することはとても興味深い. そこで著者らはこれらの集団同期現象に着目し, 多ループ制御による平面の温度制御に応用することを試みた.

2. 制御アルゴリズム

2.1 蔵本モデル

結合振動子の同期現象を記述する代表的なモデルとして蔵本モデルがある^{6,7)}。このモデルは蛍の集団発光や人間の拍手における個々の持つ位相や自然振動数になんらかの作用によって、徐々に位相が同期していく様子を数式で表現したものである。蔵本モデルは下記の式で表される⁴⁾。

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i) \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

ここで、 θ_i は自身の振動波形の位相、 θ_j は他者の振動波形の位相、 ω_i は固有周波数、 K は結合係数、 N は振動子の数である。

2.2 PID 制御と蔵本モデルとの組み合わせ

制御アルゴリズムとして広く一般的に用いられている PID 制御アルゴリズムを以下に示す。

$$MV(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

$$e(t) = SV(t) - PV(t)$$

ここで、 MV は操作量、 e は偏差、 SV は目標値、 PV は現在値、 K_p 、 T_i 、 T_d はそれぞれ比例ゲイン、積分時間および微分時間である。

PID 制御と蔵本モデルとの組み合わせに際し、各ループで PID 制御により計算された操作量 MV_i を蔵本モデルの固有周波数 ω_i とし、各ル

ープの偏差 e_i を蔵本モデルの \sin 関数の位相 θ_i とした。全ループの目標値が同一であれば、偏差を同期させることは現在値 PV_i を同期させることに相当する。以上を踏まえると制御アルゴリズムは以下のように表せる。

$$MV_i = MV_{PIDi} + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(e_j - e_i) \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

Fig. 1 は、蔵本モデルと PID 制御からなる同期制御アルゴリズムのブロック図を示す。

3. 実験方法

本研究で用いた実験装置の外観を Fig. 2 に示す。制御対象としてペルチェ素子 (TES1-12705) を用い、制御ループ数 N は 16 とした。ペルチェ素子は 1 辺が 30 mm の正方形型であり、それを定盤上に縦 4×横 4 個等間隔に配置した。各素子の間隔は 10 mm とした。また各ペルチェ素子上には同サイズの銅ブロックを乗せ、その銅ブロックの温度を熱電対 (T 型) で計測し現在値 PV_i とした。なお、ペルチェ素子は同ブロックに対して発熱素子としてのみ動作するように極性を固定した。

各制御ループの制御器は、マイクロコンピュータを用いて、Fig. 1 に示した PID 制御と同期制御からなる制御アルゴリズムを実装した。制御器の制御サイクルは 10~50 ms とし、操作量 MV_i に応じた電力を PWM 方式によりペルチェ

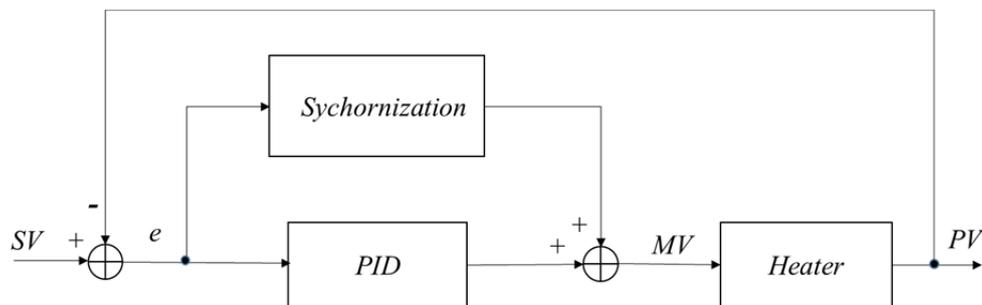


Fig. 1 蔵本モデルと PID 制御からなる制御アルゴリズム. Block diagram of Control algorithm based on Kuramoto model with PID control.

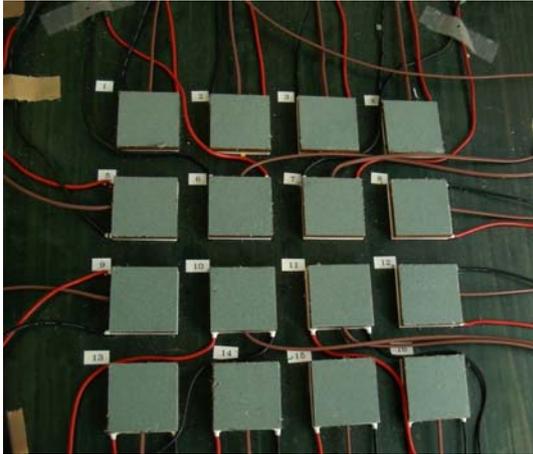


Fig. 2 熱源素子の配置. Arrangement of heat sources

素子へ供給した。

同期制御では他の制御ループの偏差 e_i を知る必要があり，制御サイクル毎にモジュール間通信を行った。

4. 実験結果と考察

上述した実験装置，制御アルゴリズムを用いて制御特性を検証した。

PID 制御の比例ゲイン，積分時間および微分時間は限界感度法⁸⁾により求めた。ただし，それらは全 16 ループで同一の設定としたため，厳密には各制御ループには最適値とはなっていない。

また，PID 制御の出力は上限を 80% とし，下限を 10% とした。これは加熱を始める際に，PID での計算値だけで 100% になってしまうと，同期制御による操作量が考慮されず無効となるためである。実験に際しては，PID 制御のみと同期制御ありの場合の比較と，結合係数を変化させた場合の制御特性への影響も検証した。

4.1 過渡応答特性

目標値 SV を 60°C とし，結合係数 K を 0, 100, 200, 300 と変化させたときの応答を Fig. 3 に示す。なお，このときの周囲温度はおよそ 30°C で

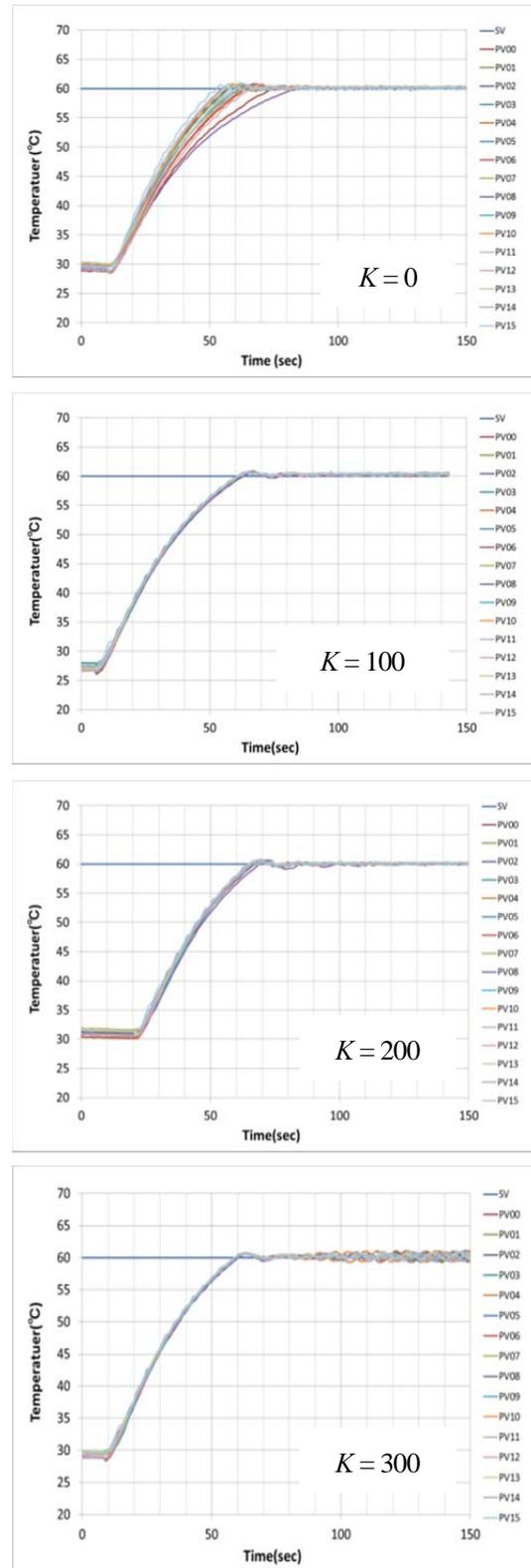


Fig. 3 過渡応答特性. Step response of the proposed control.

あった。同図より，同期制御有効 ($K = 100, 200, 300$) の場合は，PID 制御のみ ($K = 0$) の場合

と比較して、目標値に到達するまでの各 CH の温度差が最大でも 1~2°C と少なく、ほぼ同時に目標値に到達し定常状態に移行していることが分かる。また、PID のみの場合の各 CH の温度差は最大約 8°C であった。

また、結合係数による制御特性の違いは、目標値に達するまでは大きな違いが見られないが、係数が大きい場合、例えば $K = 200$ では定常状態において各 CH の温度が目標値にて振動的となり、 $K = 300$ では持続振動が発生した。

このように、同期制御を用いると、PID 制御の制御係数が各グループに対し厳密に最適でなくとも同期することが分かった。制御係数にはある程度の許容範囲があり、調整の負担の軽減も期待できる。とは言え、結合係数が大きいと定常状態において不安定な傾向が確認されたため、最適な値を選ぶ必要がある。

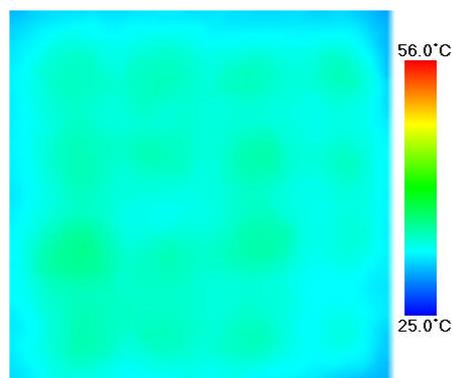
4.2 平板試料に対する 2 次元平面温度制御

銅ブロックの表面に放熱用シリコンオイルコンパウンドを塗り、その上に 200×200 mm の平板状試料をのせ、試料の温度変化を赤外線カメラで観察した。

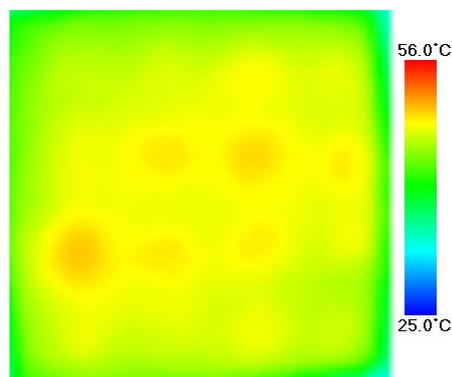
試料として、アルミニウムとステンレス鋼平板を用いた。なお、試料の厚さは 1 mm である。また、試料の熱伝導率は、アルミニウムとステンレス鋼で、それぞれ 236 W/mK および 15 W/mK である。

Fig. 4 および Fig. 5 は、目標値 SV を 50°C とし、結合係数 K は 0 および 100 とした場合のアルミニウム試料の赤外線画像を示す。同図より、加熱開始時 (a) と目標値到達時 (c) の温度分布には大きな差は見られないものの、過渡状態において違いが観測できる。

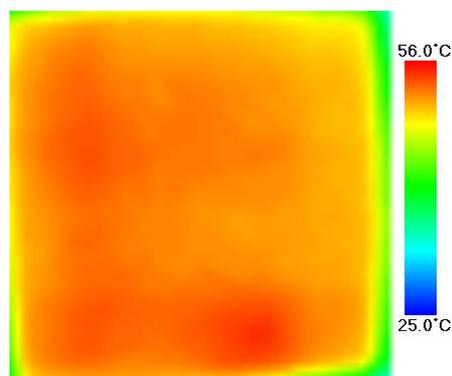
Fig. 6 は、表面温度分布のばらつき Td を時間経過に従って示したものである。なお、Fig. 4 および Fig. 5 よりわかるように、試料端の温度は極端に異なるため、計測値は試料の内側 3/4



(a) 0 seconds after



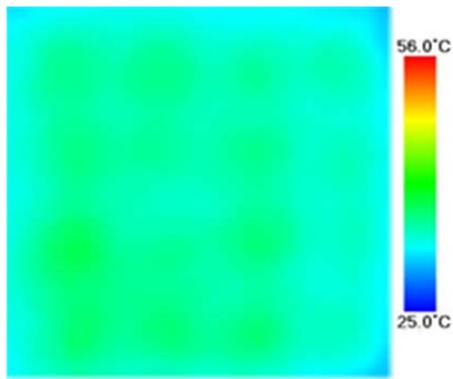
(b) 30 seconds after



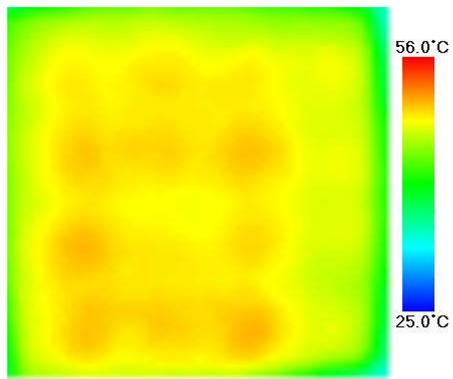
(c) 60 seconds after

Fig. 4 $K = 0$ の場合のアルミニウム試料の赤外線画像. Thermal imaging for Aluminum plate with $K = 0$.

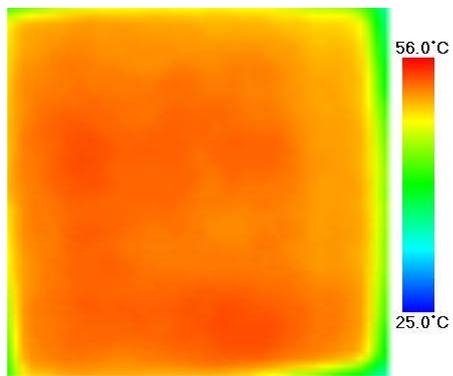
の領域の値を用いた。同図より、過渡状態が終了する近傍 (約 50 秒前後) で、結合係数の違いによる差が顕著に表れており、結合係数 $K = 100$ の場合に温度のばらつきが少なくなっていることが分かる。これは、Fig. 3 に示した平板



(a) 0 seconds after



(b) 30 seconds after



(c) 60 seconds after

Fig. 5 $K = 100$ の場合のアルミニウム試料の赤外線画像. Thermal imaging for Aluminum plate with $K = 100$.

試料がない場合の発熱素子の温度特性とも合致している。

Fig. 7 は、ステンレス鋼平板の表面温度分布のばらつきを示すが、Fig. 6 と同様に、過渡状態が終了する近傍（約 60 秒前後）で、結合係

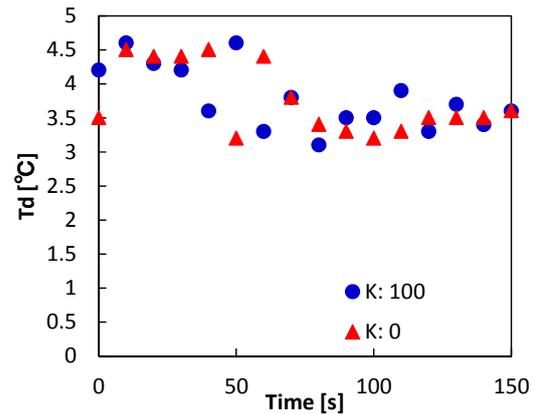


Fig. 6 結合係数が異なるアルミニウム平板試料表面の温度ばらつき T_d . Temperature dispersion T_d of Aluminum plate surface for various K .

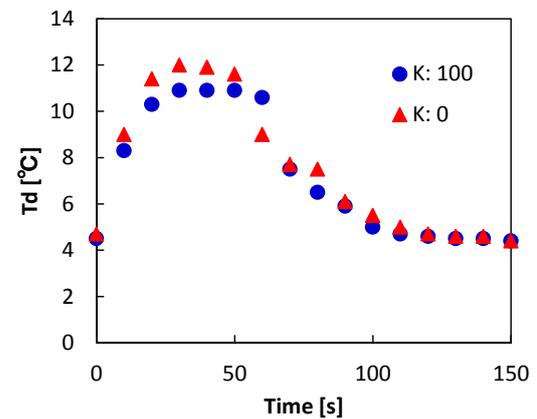


Fig. 7 結合係数が異なるステンレス鋼平板試料表面の温度ばらつき T_d . Temperature dispersion T_d of stainless-steel plate surface for various K .

数の違いによる差が表れていることがわかる。しかし、アルミニウム平板試料に比べてその差は小さい。本実験装置では発熱素子を密に配置しておらず、そのため熱伝導率が小さい試料では、発熱素子間の温度追従性が著しく劣るためと考えられる。

5. おわりに

本研究では複数の熱源による同期現象（蔵本モデル）と PID 制御との組み合わせによる温度

制御への応用を検証した。その結果、PID 制御のみの制御特性と比較して、同期制御を用いた場合は、最適な結合係数を選べば個々の熱源の温度差を小さく抑えられた。また、熱源の上に平板試料をのせた場合、熱伝導率が大きい試料であれば、PID 制御よりも同期制御ありの場合は、平板上の温度分布に斑が少なかった。

今後は制御アルゴリズムの安定性の評価や結合係数の決定手法などを検討していく。

参考文献

- 1) 南野郁夫, 田中政仁, 松永信智, 川路茂保 : 温度均一化を目的とする傾斜温度制御法の開発, 電気学会論文誌, **122-C-11**, 1954/1960 (2002)
- 2) 今村隆司, 南野郁夫 : 傾斜温度制御の原理と金型温度面内均一化の事例, 計測と制御, **47-11**, 952/956 (2008)
- 3) 黒田忠広 : 自然界の集団同期現象をエレクトロニクスに応用, 日経エレクトロニクス, 2011.6.13, 85/94 (2011)
- 4) 田中久陽 : 同期現象の科学の最近の発展, 電気情報通信学会誌, **80-11**, 1175/1179 (1997)
- 5) スティーブン・ストロガッツ : SYNC—なぜ自然はシンクロしたがるのか—, 29/33 早川書房 (2014)
- 6) Y. Kuramoto: Self-entrainment of a population of coupled nonlinear oscillators, *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*, **39**, 420/422 (1975)
- 7) 蔵本由紀 : 非線形科学—同期する世界—, 102/107 集英社 (2014)
- 8) 森泰親 : 制御工学, 180 コロナ社 (2001)