

## ピーク電力制約を確保する同報送信型分散ヒーター制御システム

梅田啓右, 大木優介 (東京大学大学院工学系研究科),  
川口淳一郎, 佐伯孝尚, 森治 (宇宙航空研究開発機構)

### Heater electric power control with the autonomous distributed system

Keisuke Umeda, Yusuke Oki (Graduate School of Engineering, the University of Tokyo),  
Kawaguchi Junichiro, Takanao Saiki, Osamu Mori (Japan Aerospace Exploration Agency)

#### 摘要

複数のヒーターを有する宇宙探査機では、電力が不足しないよう各ヒーターの電力を制御する必要がある。従来の、サーバーが各ヒーターを集中監視し制御する方式では、ヒーターの増加に伴い通信時間が増大する、熱制御システムを柔軟に構築できない、といった問題があった。本研究ではそのような問題を解決するため、サーバーを必要としない独立分散方式による制御を提案し、シミュレーションと実験によって電力の制御が可能であることを示す。

#### 1. 序論

電力を消費する複数の要素から構成されるシステムにおいて、各要素が電力を奪い合い、電力が不足するという危険性がある。電化製品を所有する家庭、鉄道システムなどがその例である。ヒーターを多数有する宇宙機にも同じことが言え、各ヒーターが同時に ON になると、宇宙機全体の消費電力が急激に増大する。発電量が大きくない宇宙機ではこのような消費電力の急激な増大に対応するのは困難である。

JAXA の小惑星探査機「はやぶさ」や小型ヒーターソーラー電力セイル実証機「IKAROS」では多チャンネルのヒーターを搭載していたが、これに使用できる電力は非常に厳しく制限されていた。そのため、消費電力のピークを指定値以下に抑えるよう各ヒーターの ON/OFF を管理する装置 Heater Control Electronics(HCE)が搭載されており、各ヒーターへの電力割り当てを計算し、ヒーターの消費電力を平滑化していた<sup>[1][2]</sup>。

「IKAROS」においては、一定時間ごとに ON にするチャンネルのパターンを衛星内に登録しておき、そのパターンを切り替えることでヒーターの ON/OFF を制御していた<sup>[1]</sup>。この方法では、予め熱解析結果から温度をある一定範囲内に制御するためのデューティーを計算しておく必要があり、熱環境の変化や機器の故障が発生した場合は再度デューティーを計算しなければならず、柔軟性に欠けていた。

「はやぶさ」においては、各機器の温度状態に基づいて優先度を計算し、固定デューティーテーブルをもとに、優先度の高い順にヒーターを ON にし、電力のピークが指定値を超えないように制御していた<sup>[3]</sup>。これをサーバークライアントシステムと呼び、サーバー (HCE) とクライアント間で双方向に通信を行い、クライアントから送られてきた情報をもとにサーバーが各クライアントの ON/OFF を管理する。これによって消費電力を平滑化するとともに、熱環境の変化にも対応するこ

とができた。しかし、デューティテーブルは固定されており、熱制御モデルに誤差がある場合には温度が振動的となり収束しない問題が発生した。

これらの従来の方式は、各要素を集中監視し、集中制御する方式である。そのため、予めヒーターの配置場所を特定し、各ヒーターの消費電力を確定させておく必要があり、全ての電子機器が出揃うまで熱制御システムを構築できないことから、設計期間の長期化や設計コストの増大につながる。また、各要素と管理装置が双方向に通信を行い、管理装置による電力割り当ての計算時間や通信時間が要素数に依存するため、要素数が莫大な値となると短いスパンで制御が行えない。さらに HCE がとても高価であるため、冗長性の確保が難しい。

本論文では、柔軟なシステム構築を可能とし、通信時間及び計算時間が要素数に依らず、高価な HCE を必要としない独立分散方式による制御を提案する。シミュレーションや実験によって提案する手法によって各ヒーターの温度を考慮した電力の制御が可能であることを示す。

## 2. 独立分散型制御

### 2.1. 独立分散型制御

独立分散方式では、サーバークライアント方式と同様に各ヒーターの温度をもとに、電力割り当て量を決定するのだが、サーバークライアント方式と異なるのはサーバーを設けない点である。サーバーを設けないかわりに送信機を設け、この送信機は常にシステム全体の電力消費量の総和を同報送信する。同報送信とはテレビの放送局のように、送信先を決めた通信を行うわけではなく、不特定多数の送信先に情報を垂れ流すようなもののことを言う。そして、送信機によって送信されたシステム全体の電力消費量情報をもとに、各ヒーターが自分で電力割り当て量を決定し電力を消費する。このサイクルを繰り返し、最終的にシステム全体の電力消費量を目標値へ近づけていく。

このシステムがサーバークライアント方式と大きく異なるのは、送信機は各ヒーターの情報を把握する必要がないこと、送信機ヒーター間の通信は片方向であること、各ヒーターの電力割り当て量を決定するのは各ヒーター自身であることが挙げられる。これらの特徴がサーバークライアント方式で挙げられた欠点を解決する。サーバークライアント方式では、サーバーが全ヒーターの情報を一括管理する必要があるため、全てのコンポーネントが出揃うまで熱制御試験が行えない問題があったが、独立分散方式では、送信機は各ヒーターの情報は一切把握する必要がないため、コンポーネントごとに熱制御試験を行うことができ、開発期間の短縮につなげることができる。また、各ヒーターが自身の電力割り当て量を決定するため、ヒーターの数が増えようとも送信機の負担は増えず、短いスパンでも制御が可能である。そして、送信機も各ヒーターも高度な計算を行う必要がなく、コスト削減につながる。

独立分散方式では各ヒーターが自身の電力割り当て量を計算するが、複雑な計算は必要としない。i番目のヒーターがk回目のステップにおいて消費する電力量を $f_{i,k}$ とおくと、 $k+1$ 回目のステップで消費する電力量は以下の式で求められる。

$$f_{i,k+1} = f_{i,k} - \frac{1}{Q_{ii}} \times \Delta P_k \quad (1)$$

式(1)において $\Delta P_k$ とは k 回目のステップにおける総電力から目標値を引いたもので、 $Q_{ii}$ は i 番目のヒーターの電力使用優先度を表す。温度の低いヒーターは優先度が高くなり、温度の高いヒーターは優先度が低くなるように、各ヒーターの温度をもとに算出される値である。

この制御方式をヒーター電力に適用するうえで 1 点問題がある。式(1)では、電力が連続な値をとることを前提としているが、ヒーターの電力は ON と OFF の 2 値しかなく、式(1)をそのまま適用することができない。したがって、いかに式(1)を 2 値の制御に応用するかが重要となる。

## 2.2. カウンター方式

まず、式(1)を変形する。各ヒーターが ON になったときの電力量を  $p$  とし、式(1)の両辺を  $p$  で割ると、

$$\frac{f_{i,k+1}}{p} = \frac{f_{i,k}}{p} - \frac{1}{Q_{ii}} \times \frac{\Delta P_k}{p} \quad (2)$$

となる。今回、この  $\frac{f_{i,k}}{p}$  をカウンター  $C_{i,k}$  とおき、今回提案する制御ロジックは、このカウンターがある閾値  $C^*$  を超えたら ON、下回っていたら OFF というものである。すなわち、次のようになる。

$$C_{i,k+1} = C_{i,k} - \frac{1}{Q_{ii}} \times \frac{\Delta P_k}{p} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \text{ヒーター-ON} (C_{i,k+1} > C^*) \\ \text{ヒーター-OFF} (C_{i,k+1} \leq C^*) \end{cases}$$

## 2.3. ファクタライゼーション

カウンター方式では、温度の近いヒーターのカウンターは似た挙動を示し、同じタイミングで ON/OFF を繰り返すことになり、総電力が目標値付近で激しく振動することが予想される。そのため、予め、各ヒーターをいくつかのグループに分けておき、そのグループごとにカウンターを再計算できるタイミングを決めておくとそのような集団行動を避けることができる。このように、ステップごとにカウンターの再計算をできるヒーターを制限することをファクタライゼーションという。

ヒーターの数を  $N$  とし、送信機による総電力の同報周期を  $steptime$  とおく。仮に全ヒーターを  $n_{group}$  個のグループに分け、ファクタライゼーションを行うとすると、各ヒーターのカウンターの再計算周期  $cycletime$  は、

$$cycletime = n_{group} \times steptime \quad (2)$$

となる。各ヒーターは、カウンターを再計算するまでの間、ON/OFF は変化しないため、温度を一定に制御するという観点からだと、この  $cycletime$

は小さい方が良い。すなわち、 $n_{group}$  や  $steptime$  が小さい方が良い。しかし  $n_{group}$  が小さいと、集団行動するヒーター数が多くなることを意味し、ファクタライゼーションの効果が薄れる。そのため、送信機の同報周期  $steptime$  はある程度小さくしておく必要がある。

## 2.4. min-max 制御

式(3)における  $Q_{ii}$  は各ヒーターの電力使用優度を表し、温度の低いヒーターは優先度が高くなり、温度の高いヒーターは優先度が低くなるように、各ヒーターの温度をもとに算出される値であることは先に述べた。このような最も低いものにリソースを割り当てる制御を min-max 制御と呼ぶ。このような条件を満たすように、優先度算出式を以下のように設定した。

$$\begin{cases} \frac{1}{Q_{ii}} = \frac{1}{N} \cdot \frac{T_{i,k} - T_L}{T_H - T_L} & (\Delta P \geq 0) \\ \frac{1}{Q_{ii}} = \frac{1}{N} \cdot \frac{T_H - T_{i,k}}{T_H - T_L} & (\Delta P < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)における  $N$  とはヒーターの数を表しており、 $T_H$  と  $T_L$  はそれぞれ温度上限値、下限値である。このように、設定することで、 $\Delta P$  が正のとき、すなわち電力が不足しているときは温度の高いものほどカウンターを下げ、逆に  $\Delta P$  が負のとき、すなわち電力が余っているときは温度の低いものほどカウンターを上げるという、min-max 制御を行うことができる。

## 3. 数値シミュレーション

実際にこのカウンター方式による独立分散型制御で総電力のピークを抑え、各ヒーターの温度を目標値に維持することができるかをシミュレーションによって検証した。本来宇宙機は宇宙環境に置かれているが、今回行うシミュレーションは次章で行う地上実験と比較するため、地上の外気のある環境を想定した。

### 3.1. シミュレーションモデル

シミュレーションでは、図 1 に示すようなモデルを考えた。



図 1. シミュレーションモデル

50 チャンネル存在し、各チャンネルはヒーター部分、温度センサー部分、ベース部分から成っている。各ヒーターの電力は 3W で、外気は 25°C、各チャンネルの初期温度は 25°C から 27°C の間からランダムに設定した。その他の値は次の表 1 のとおりである。

表 1: シミュレーションにおける各諸元

諸元	値
チャンネル数	50
ヒーター電力[W]	3
目標電力 $P_r$ [W]	65.0
全消費電力の最大値 $P_{max}$ [W]	150
外気温 $T_\alpha$ [°C]	25
初期温度[°C]	25
目標温度[°C]	35
$T_L$ [°C]	20
$T_H$ [°C]	50

また、各チャンネルの熱平衡方程式は以下のようにモデル化し、この熱平衡方程式を Runge Kutta 法によって数値計算することで各チャンネルの温度変化を得た。

$$M\dot{T} = \alpha(T_\alpha - T) + h \quad (5)$$

式(5)における $M$ はチャンネルの熱容量、 $T$ は温度、 $\alpha$ はチャンネルと外気間での熱伝達係数、 $T_\alpha$ は外気温、 $h$ はヒーターによる熱入力である。熱容量と熱伝達係数は以下の表 2 の値とした。

表 2: シミュレーションにおける熱特性

諸元	値
$M$ [J/s/°C]	400

$\alpha$ [J/s/°C]	0.13
-------------------	------

### 3.2. シミュレーション結果

独立分散方式によって電力が制御できることを示すために、比較対象としてまず、電力をフィードバックしない場合のシミュレーションを行った。このケースでは、各ヒーターは自身の温度にのみ基づいて ON/OFF を切り替える。

温度が目標値に達していなければ ON、達していれば OFF となる。システム全体の消費電力は制御に全くフィードバックされない。その結果を図 2, 3 に示す。図 2 は総電力の時間変化を表しており、図 3 は各チャンネルの温度の時間変化を示している。

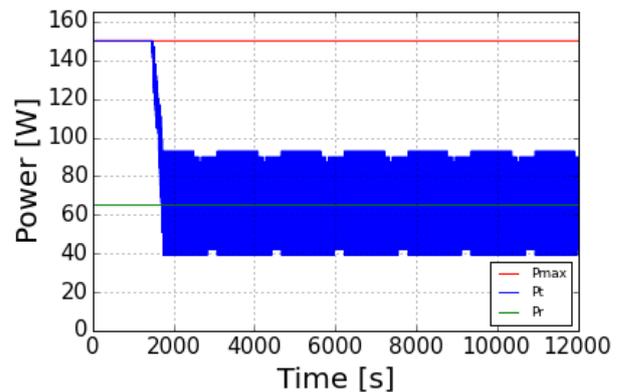


図 2. 電力をフィードバックしない場合の総電力の時間変化

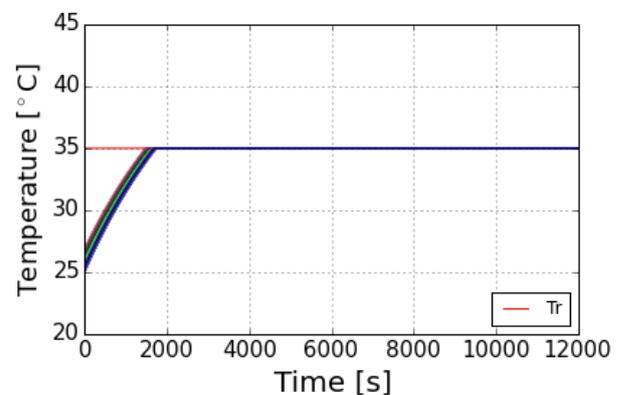


図 3. 電力をフィードバックしない場合の各チャンネル温度の時間変化

図 2, 3 を見てわかるように、たしかに各チャンネルの温度は目標値に達し維持されている。しかし、全体の消費電力は、各チャンネルの温度が目標値に達するまでは、最大値を維持し、各チャンネルの温度が目標値に達した後は、39W と 93W の間で激しく振動している。したがって、電力の余裕のない宇宙機ではこのようなヒーター制御を行うと、一度に必要以上の電力を消費してしまい、他に電力を消費する機器が使用できなくなる恐れがある。

次にカウンター方式でシミュレーションを行った。このシミュレーションにおけるファクタライゼーションのグループ数  $n_{group}$  を 5, 1 ステップあたりの時間  $steptime$  を 1 秒とした。その他の各諸元は表 1 に従った。その結果を図 4, 5 に示す。図 4 は総電力の時間変化を、図 5 は各チャンネルの温度の時間変化を表している。

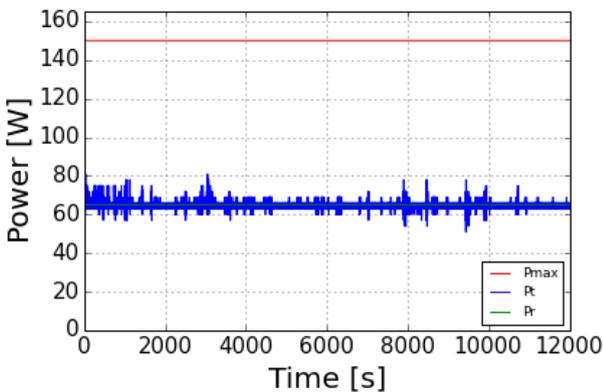


図 4. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの総電力の時間変化

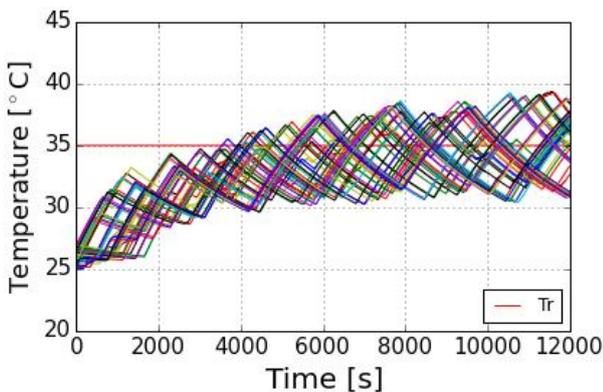


図 5. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの各チャンネルの温度の時間変化

図 4 を見てわかるように、電力は目標値付近に抑えられている。しかし、図 5 を見ると、温度は目標値周辺にはいるものの大きく振動していることがわかる。この独立分散方式によるヒーター制御はあくまでも総電力を制御するものであり、優先度として間接的には考慮されてはいるものの、温度を制御するものではないからである。一般の連続値をとる電力制御と異なり、このカウンター方式はあくまでもヒーターの出力は 2 値のみであるため、このように目標値付近に近づけることはできても収束させることはできないことがわかる。

そこで、グループ数  $n_{group}$ , 1 ステップの時間  $steptime$  はそのまま、温度が目標値を超えるとファクタライゼーションに依らず強制的に OFF するというロジックを追加してシミュレーションを行った。目標温度を超えているとそのヒーターのカウンターを閾値までリセットし、式(3)より OFF になるというロジックである。すなわち制御ロジックを図にすると図 6 のようになる。

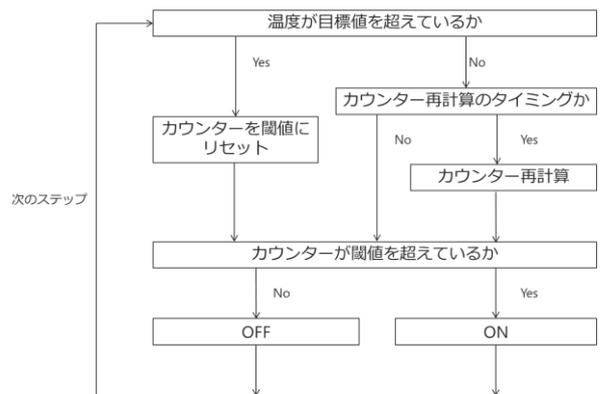


図 6. 温度制約を設けた場合の制御ロジック

この制御ロジックのもと行った結果が図 7, 8 である。

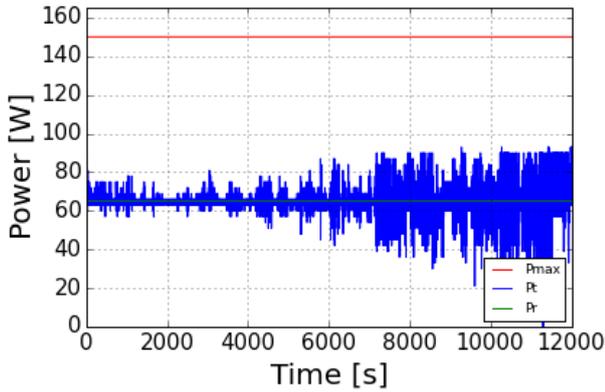


図 7. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの総電力の時間変化 (温度制約あり)

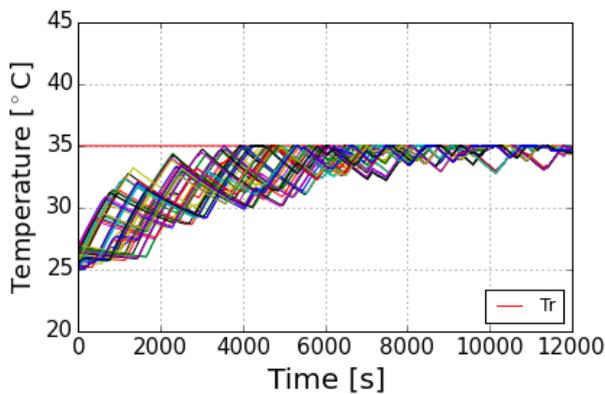


図 8. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの各チャンネルの温度の時間変化 (温度制約あり)

図 8 を見てわかるように、目標温度を超えると OFF するというロジックを追加したことで、ヒーターが目標温度に到達するとその付近にとどまることができるようになり、温度の幅を狭めることができた。しかし、図 7 を見ると 6000 秒あたりから、総電力の振幅が大きくなっていることがわかる。これは、全ヒーターが目標値を下回っている間は振幅が小さかったことからわかるように、各ヒーターが目標値に近づくにつれて、各ヒーターのグループごとの集団行動が起きるようになったと考えられる。このシミュレーションではグループ数は 5 であり、ヒーター数は 50 あるため、1 グループあたり 10 個のヒーターがありこれらが同時にカウンターの再計算を行い ON/OFF を切

り替えるため、10 個ずつの集団行動が起きたと考えられる。

そこで、集団行動をより小さくするため、次にグループ数  $n_{group}$  を増やした場合を検証する。グループ数  $n_{group}$  を 50、1 周期のステップ数  $cycletime$  を 1 秒としてシミュレーションを行った。ヒーター数が 50 なので、1 ステップでカウンターの再計算を行えるのは 1 ヒーターのみということになる。その結果が図 9、10 である。

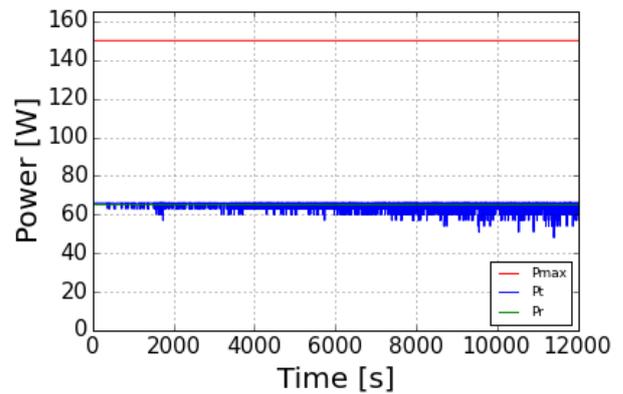


図 9. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの総電力の時間変化 (温度制約あり、グループ数 50)

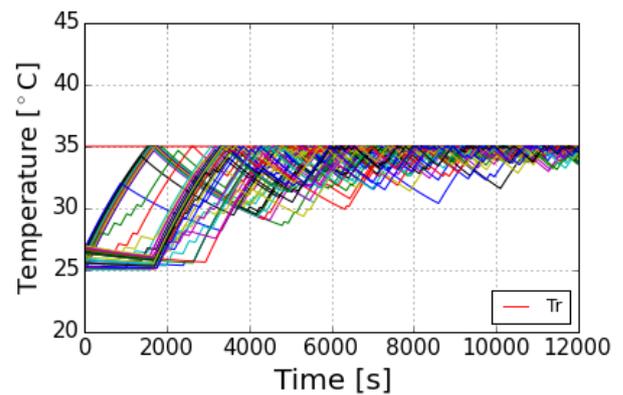


図 10. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの各チャンネルの温度の時間変化 (温度制約あり、グループ数 50)

図 7、9 を見比べるとわかるように、グループ数を増やすことで集団行動をなくした結果、総電力が目標値を大きく逸脱することはなくなった。しか

し、図 8 と 10 を見比べると、たしかに両者とも温度制約があるため目標温度付近に制御できているが、グループ数を増やしたことで温度の振動が大きくなったことがわかる。これは、グループ数  $n_{group}$  を大きくしたことで、カウンターの再計算周期  $cycletime$  が大きくなり、待ち時間が大きくなったことが原因であると考えられる。

そこでグループ数を大きくしたうえで各ヒーターの待ち時間を減らすため、1 ステップの時間  $steptime$  を 0.1 秒と小さくしてシミュレーションを行った。その結果が図 11, 12 である。

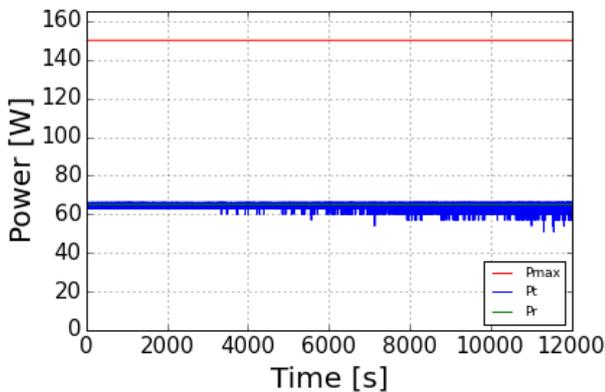


図 11. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの総電力の時間変化  
(温度制約あり, グループ数 50,  
1 ステップ 0.1 秒)

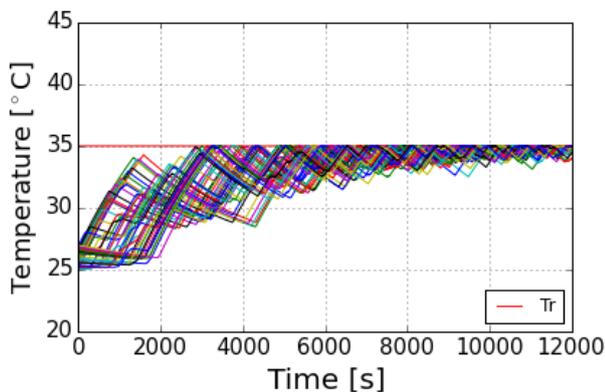


図 12. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの各チャンネルの温度の時間変化  
(温度制約あり, グループ数 50,  
1 ステップ 0.1 秒)

図 10 と 12 を比較すると、1 ステップの時間を短くしたことで各ヒーターの待ち時間が短くなり、各チャンネルの温度の幅が小さくなっていることがわかる。

これらのシミュレーション結果より、カウンターを用いた独立分散方式によっても、各チャンネルの温度を目標値に維持し、システムの総電力を目標値付近に抑えることができることがわかった。温度を目標値付近にとどめるためには温度目標を超えると OFF するというロジックを追加すればよく、総電力の振動を小さくするにはファクタライゼーションのグループ数を大きくすればよく、温度の振幅を小さくするには 1 ステップの時間を短くすればよい。

#### 4. 実験

シミュレーションによってカウンター方式による独立分散制御が可能であることがわかったので、実際に実験を行うことで、制御が計算上のみならず、実験装置含め、実現可能であることを検証した。

##### 4.1. 実験装置

実験の全体図を図 13 に示す。5 つのチャンネルを用意し、送信機は電流センサーから得られた電流情報から総電力を計算し、各チャンネルに同報送信する。各チャンネルは得た総電力情報から ON/OFF を判断する。

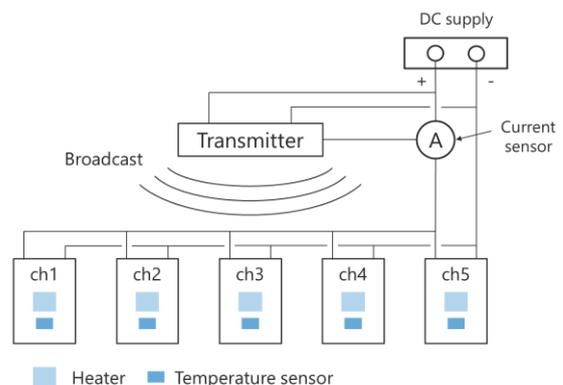


図 13. 実験全体図

実験装置の画像を図 14 に示す. 各チャンネルはペイロードと熱制御モジュールで構成されており, 熱制御モジュールによってペイロードの温度を制御する. ペイロードはアルミ板でできている.

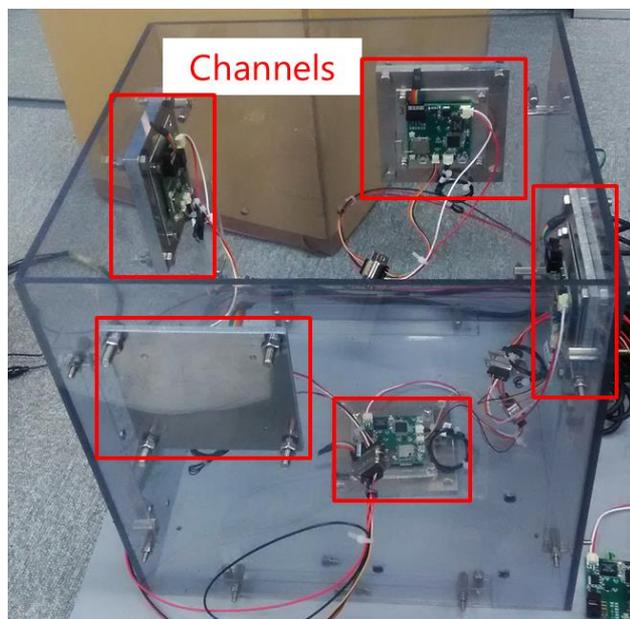


図 14. 実験装置

熱制御モジュールの詳細な画像を図 15 に示す. 各モジュールは表面にヒーターと温度センサー, 裏面にマイコン, 無線通信チップを備えている. 送信機から送られてきたシステムの総電力情報を無線通信チップによって受信し, 温度センサーによって得られたペイロードの温度情報と合わせて, マイコンが計算を行い, ヒーターの ON/OFF を操作する.

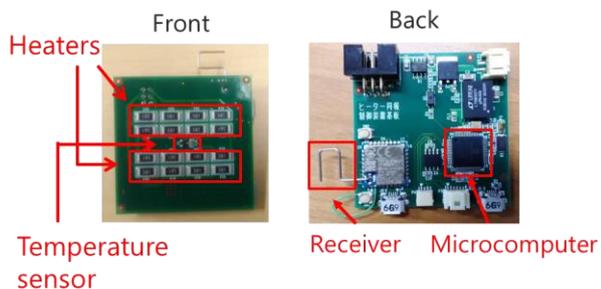


図 15. 熱制御モジュール

この熱制御モジュールは今回の実験, そして今後の実際の宇宙機で使用することを想定して設計開発を行った. 5cm 四方のコンパクトな基板になっている. また, この独立分散方式による制御は, 簡素なシステムであることから熱制御装置を標準化しやすく, 標準化という観点から無線通信と相性が良い. そのため, 今回熱制御モジュールを開発するにあたって Zigbee という, 1 対多通信が可能な無線通信ユニットを使用した<sup>7)</sup>. この標準化された熱制御モジュールを必要な数だけペイロードに貼り付けるだけで熱制御が可能となり, 仮にペイロードなどに変更があったとしても貼り付けるモジュールの数を変更するだけでよく, 熱制御システムがとても容易となり, 開発期間の短縮が可能となる. また, この熱制御モジュールに搭載されている無線通信チップを受信機ではなく, 送信機として使用すればこのモジュールをそのまま送信機として使用することができる. この熱制御モジュールは一度設計を行ってしまえば, とても安価に量産することができ, 独立分散方式の利点の一つであるコスト削減が可能である.

実験における各諸元を以下の表 3 に示す.

表 3: 実験における各諸元

諸元	値
チャンネル数	5
ヒーター電力[W]	2.79
全チャンネル OFF 時の総電力[W]	0.489
目標電力 $P_T$ [W]	7.98
外気温 $T_a$ [°C]	24
初期温度[°C]	24
目標温度[°C]	35
$T_L$ [°C]	20
$T_H$ [°C]	50

また, 各チャンネルは熱特性がそれぞれ異なる. それらの値は予備試験によって計測され, 表 4 に示す.

表 2: 実験における熱特性

チャンネル	$M$ [Js/°C]	$\alpha$ [Js/°C]
1	446.58	0.1309
2	605.78	0.1387
3	619.06	0.1492
4	433.72	0.1334
5	411.42	0.1246

## 4.2. 実験結果

まず、総電力をフィードバックせず、各チャンネルの温度が目標値より上か下かで ON/OFF を切り替えるケースで実験を行った。温度が目標値より下回っていればヒーターを ON に、上回っていればヒーターを OFF にする。全体の総電力情報は制御にフィードバックされない。その結果を図 16, 17 に示す。

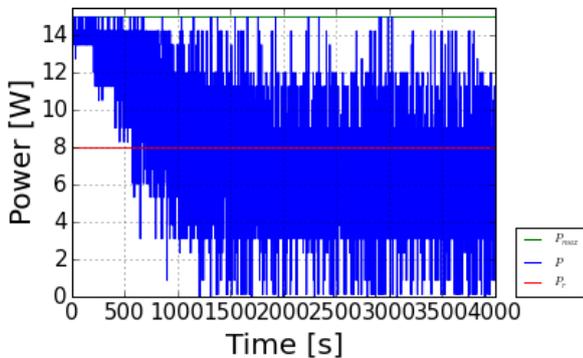


図 16. 電力をフィードバックしない場合の総電力の時間変化

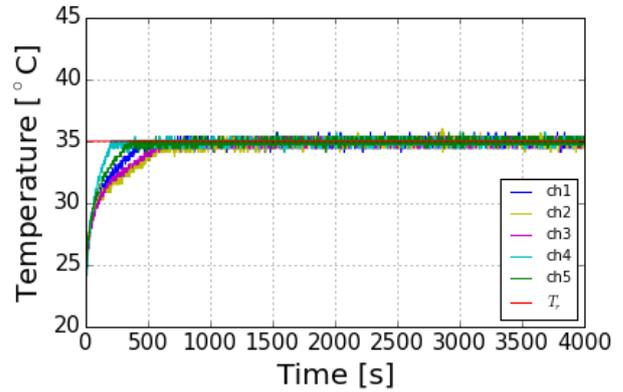


図 17. 電力をフィードバックしない場合の各チャンネル温度の時間変化

図 16 及び図 17 を見てわかるように、各チャンネルの温度が目標値に達するまでは全体の消費電力は最大値となり、温度が目標値に達した後、全体の総電力は目標電力を中心に激しく振動している。この結果はシミュレーションでも見られた傾向である。

次にカウンター方式を用いて実験を行った。各チャンネルの温度を目標値に一致させるためには、目標温度を超えると OFF するというロジックを取り入れる必要があるとシミュレーションによって示されたため、この実験においても図に示すような制御ロジックで行った。また、今回ファクタライゼーションのグループ数  $n_{group}$  は 5 で、チャンネル数は 5 であるため、各チャンネルのカウンター再計算のタイミングは全て異なることになる。1 ステップ 0.19 秒で行った。結果を図 18, 19 に示す。

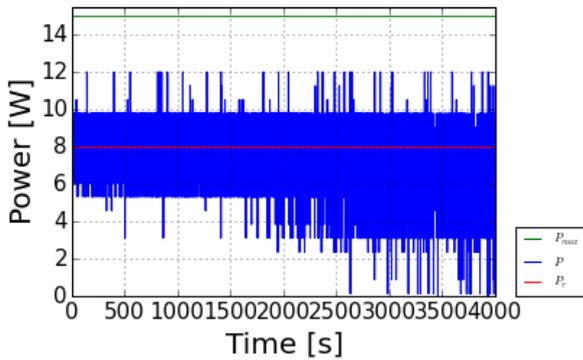


図 18. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの総電力の時間変化  
(温度制約あり, グループ数 50,  
1 ステップ 0.19 秒)

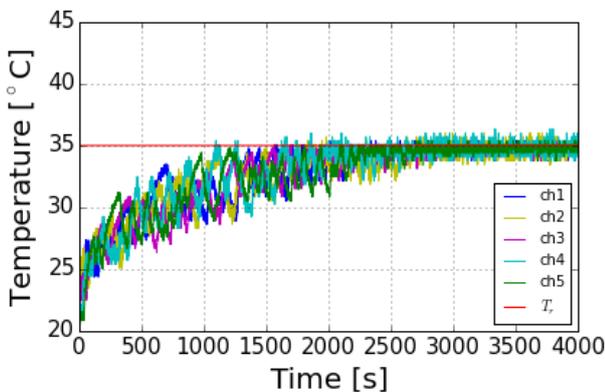


図 19. カウンター方式で独立分散制御を行ったときの各チャンネルの温度の時間変化  
(温度制約あり, グループ数 50,  
1 ステップ 0.19 秒)

図 19 を見ると, 各ヒーターの温度は最終的に目標温度に収束していることがわかる. また, 目標温度に達するまでの間, 各ヒーターの温度に偏りが大きく生じることはなく, それぞれのヒーターが電力を分け合いながら目標温度に向かっていることがわかる. 次に総電力についてだが, ピークを抑えることができています. 今回全ヒーターOFF時の総電力が 0.489W, 各ヒーターの消費電力が 2.79W であるため, 総電力は 0.489W から 2.79W 刻みで 0.489, 3.279, 6.069, 8.859, 11.649, 14.439W の 6 値をとりうる. 目標電力が 7.98W で

あることから, 6.069W と 8.859W の間を上下するはずであるが, 図 18 を見ると何度か 12W 付近まで達していることがわかる. これは 4 つ分ヒーターが ON になっていることを意味する. しかし, ファクタライゼーションで各ヒーターのカウンター再計算タイミングは異なるため, 理論上では同時に 4 つ ON 状態になることはあり得ない. これは電力測定値の誤差で, 総電力が目標値を超えているにもかかわらず, 下回っていると測定されてしまったために, 起きたものである.

この実験によって, カウンター方式を用いた独立分散制御によって総電力のピークを抑え目標値付近に抑えることができ, 各チャンネルの温度を目標値付近に維持することが可能であることがわかった.

## 5. 結論

本論文では, 宇宙機のヒーター電力制御において, 従来の集中管理型制御方式で問題となっていた, 設計期間の長期化・設計コストの増大, 要素数に依存する制御周期を解決するため, 独立分散方式を用いることを提案した. そして, 一般の連続値をとる電力制御とは異なり, 2 値しかないヒーター電力の制御に対して, カウンター方式を用い, ファクタライゼーションと併用することで独立分散方式を 2 値の電力制御に応用することを考えた. 提案した制御方式で, シミュレーションと実験を行うことで, 独立分散方式を用いたうえで, システムの総電力のピークを抑え, 各ヒーターの温度を目標値に維持できることを示した.

## 参考文献

- [1] 梅里真弘, 岡橋隆一: 小型ソーラー電力セイル「IKAROS」の開発, NEC 技報, 64, 1(2011),pp.46-49.
- [2] 萩野慎二: 小惑星探査機「はやぶさ」の開発と成果, NEC 技報, 64, 1(2011), pp.130-138.

- [3] 白澤洋次, 森治, 川口淳一郎: リソース制約に対応する分散化ヒーター制御装置の開発, 日本航空宇宙学会論文集, 62, 2(2014), pp.69-75.
- [4] 川口淳一郎: 電力制御システム、方法、及び、情報伝達能力制御システム、方法, 特開 2016-33817(2016)
- [5] 川口淳一郎: 電力管理方法、及びシステム, 特開 2015-141482(2015)
- [6] Kawaguchi,J.:POWER CONTROL SYSTEM AND METHOD, AND INFORMATION COMMUNICATION ABILITY CONTROL SYSTEM AND METHOD, WO 2015/115385(2015)
- [7]Zigbee Alliance,  
<http://www.zigbee.org/>(accessed November 7, 2017)