

ステンレス箔テープヒータによる 植物体加温制御システムの検討

竹本 優太^{*1} 山田 健仁^{*2} 木宮 康雄^{*3}
鶴山 浄真^{*4} 日高 輝雄^{*4} 御旗 寛^{*5}

Plant Body Heating Control System using Stainless Steel Foil Tape Heater

Yuta TAKEMOTO^{*1}, Takehito YAMADA^{*2}, Yasuo KIMIYA^{*3},
Joshin TURUYAMA^{*4}, Teruo Hidaka^{*4} and Hiroshi MIHATA^{*5}

Abstract

A stainless steel foil is a useful material since it has superior properties such as flexibility, lightweight and corrosion resistance. Therefore, the stainless steel foil is used at various industrial parts especially for precision machinery components. However, many of the processed foil will be discarded and reproduced because the precision components require a high quality. A stainless steel foil tape heater is made from the parts outside the specification of precision components. In this study, we propose a control system of the foil tape heater for plant bodies spot heating. For the controller designing, the physical model of the controlled plant has been constructed by a physical theory and experiments. The control system performance has been confirmed in the simulation of Xcos program.

Key Words : Stainless Steel, Foil Tape Heater, Model Predictive Control, Plant Body Heating

1. はじめに

ステンレス箔は、ステンレス素材を高精度な圧延により、板厚 100 μ m 以下まで薄くしたもので、柔軟性、軽量性、耐食性に優れている。そのため、精密部品の材料として広く使用されている。写真 1 は、磁気ディスク装置 (HDD) の磁気ヘッドサスペンションに使用されている例である。このような精密部品の材料としてのステンレス箔には、非常に高い精度と無疵痕などの高い品質を要求される。部品の材料として加工する場合、圧延製造されたステンレス箔のコイルからスリッターにより切り出すことになるが、この際、厳しい品質要求から精密部品用としては仕様外となる部材が大量に発生する。一般に仕様外になったステンレス箔はスクラップ処理され、再処理工程を経て新たなステン

レス箔が製造されることになる。このようなリサイクル過程は、多大なコストが掛かるとともに再生産に掛かるエネルギー消費の観点からも環境負荷の増大を招くことから、仕様外品を出さないこと、または仕様外品の用途を創出することは、ステンレス箔加工業において、大きな課題となっている。



写真 1 磁気ディスク装置のヘッドサスペンション

*1 情報電子工学専攻

*4 山口県農林総合技術センター

*2 情報電子工学科

*5 新立電機株式会社

*3 中國工業株式会社

ステンレス箔はその材質の特性から、アルミ箔、銅箔に比べて耐食性、強度、電気抵抗に優れている。このことからステンレス箔をテープ状に整形し、樹脂で被覆することで100℃以下の低温ヒータとして使用することが考えられる（この様なテープ形状のヒータをテープヒータと称する）。この低温型ヒータの用途としては、温床マット、配管の凍結防止、園芸農作物の加温¹⁾などが考えられる。

ステンレス箔テープヒータの利活用技術は、仕様外ステンレス箔の応用技術の観点から、また、優れた特性を持つヒータとなる可能性の観点から、重要であると考えられる。特に農作物加温などの低温ヒータの用途は、技術的ハードルが比較的低いと考えられ、ステンレス箔ヒータの用途創出課題として適している。

本研究では、以上のことより精密部品の仕様外となったステンレス箔を、テープ状のヒータに加工したテープヒータにより、園芸作物等の植物体を加温する制御方式について検討したので報告する。

2. ステンレス箔テープヒータの特徴

ステンレス箔は、テープ状に加工することで、良好な抵抗体として活用できる。表1は、ステンレスと抵抗率の低い金属（アルミニウム）と発熱体として多く利用されている金属（ニクロム）の特性を比較した例である。それぞれの抵抗率は、2～30倍程度異なり、強度（引張強さ）も1.5～5倍程度異なる。

抵抗値は式(1)で表されるので、厚さ、幅、長さを調整することで、抵抗値を任意に設定できる。しかし、断面積（厚さ×幅）を小さくすると引張り強さなどの強度が低下することになる。

$$R = \rho \frac{l}{w \cdot d} \quad [\Omega] \quad (1)$$

（R：抵抗値[Ω]， ρ ：抵抗率[Ω・m]，l：長さ[m]，w：厚さ[m]，d：幅[m]）

図1は、小規模なテープヒータとして使用するのに適したサイズを想定し、幅6[mm]、長さ5[m]に設定し、表1に示す3種類の金属の厚さに対する抵抗値を式(1)により求め、比較したグラフである。

表1 金属箔の特性比較例

物質	抵抗率[Ω・m]	引張強さ[N/mm ²]
アルミニウム(A1050)	2.65×10^{-8}	1.05×10^2
ステンレス(SUS304)	7.20×10^{-7}	5.20×10^2
ニクロム(SNC631)	1.50×10^{-6}	8.30×10^2

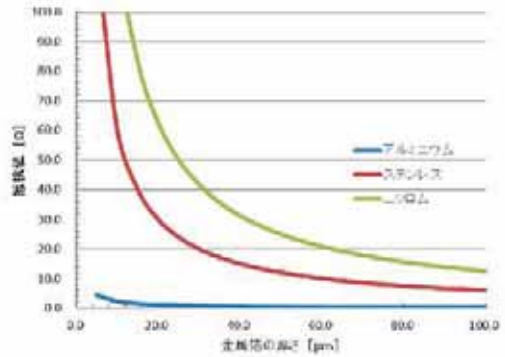


図1 金属箔の厚さに対する抵抗値の変化



写真2 ステンレス箔テープヒータ

表1、及び図1より明らかなようにアルミニウムは抵抗率が低いため発熱用の抵抗体には適していない。また、断面積を小さくして抵抗値を大きくするには強度上問題がある。ステンレスは、ニクロムの抵抗率の半分程度であるため、厚さの調整で抵抗値を容易に調整でき、引張強さはニクロムにやや劣ることになるが、柔軟性、耐食性などを考えるとヒータ素材として適していると言える。通常、ステンレスは高価な金属であるが、精密部品の仕様外品として本来再処理されるステンレス箔であれば、コスト的な問題も小さい。

以上のように、ステンレスの箔加工技術の高度化により、本来高価なステンレス箔をヒータとして活用するという用途が現実的になった。

写真2は、樹脂によりラミネート加工したステンレス箔テープヒータの例である。ラミネートする樹脂の材質、厚さ等は、使用環境に応じて、強度、耐久性、耐候性などを考慮して選択する必要がある。ここでは、テープヒータの加温制御方式の検討を目的としているため、被覆樹脂の問題に関しては別課題とする。

3. 植物体加温におけるモデル

植物体加温システムの加温対象として、園芸作物であるイチゴを選択した²⁾。一般にイチゴ栽培では、成長サイクルに応じ高温期・低温期が必要となるが、中小規模の園芸農家では、低温時期である秋冬期を利用

して生産を行うことで、高温期のサイクルだけに着目して作物を積極的に加温することで生育及び収穫量を維持している。通常の施設内（ビニールハウス等）加温では、灯油燃焼型温風暖房機などを用い、8℃以上に施設内全体を加温しており、生産者の暖房コスト負担は大きい。このような状況の中で、植物体の温度感応性が高い部位を集中的に加温する局所加温法により、施設全体の管理温度を下げ、暖房経費を削減する省エネルギー技術が生産者から大きく注目されている。

本研究では、イチゴの根元部のクラウンをテープヒータにより局所加温する制御方式を検討するものとし、制御対象を、クラウン部を含む培土とする。

・周囲温度を考慮した制御対象の簡易物理モデル³⁾

テープヒータによる熱をテープヒータ下面より培土と植物に伝達させ加温することを想定し、加温対象の培土と植物を均一な大きさのセルとする。また、テープヒータ上面から空気中へ熱が放出されると仮定するとセルの温度変化に関して式(2)が成立する。

$$c\rho V \frac{dy}{dt} = u - Q1 - Q2 \tag{2}$$

c:セルの比熱 [J/(kg・℃)] (土の比熱は0.8程度)

ρ:セルの密度 [kg/m³]

(園芸用の培土の比重は0.4程度なので約400kg/m³)

V:セル体積 [m³]

y:セルの温度 [℃]

u:テープヒータへの入力 [W]

Q1:培土表面から空気への熱伝達による熱流 [J/s]

Q2:テープヒータ上面から空気への熱伝達による熱流 [J/s]

さらに、以下を定義すると式(3)と表せる。

A1:空気に熱を放出する培土表面の面積 [m²]

h1:空気に熱を放出する培土表面の熱伝達率 [J/°Csm²]

A2:空気に熱を放出するテープヒータの上面面積 [m²]

h2:空気に熱を放出するテープヒータの上面熱伝達率 [J/°Csm²]

d:外気温 [℃]

y2:テープヒータの温度 [℃]

$$c\rho V \frac{dy}{dt} = u - A1h1(y - d) - A2h2(y2 - d) \tag{3}$$

式(3)の右辺第3項のテープヒータから空気中への放熱に関しては、テープヒータが非常に薄く、熱伝導性も高いことから、テープヒータ温度は培土とほぼ同じになるので、第3項は第2項に含まれるとして、式(4)をエネルギー収支の式とする。

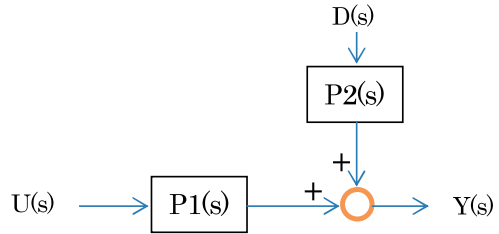


図2 制御対象のブロック図

$$c\rho V \frac{dy}{dt} = u - A1h1(y - d) \tag{4}$$

式(4)をラプラス変換し、伝達関数を求めると式(5)となる。

$$Y(s) = \frac{1}{as + b} U(s) + \frac{b}{as + b} D(s) \tag{5}$$

ただし、 $a = c\rho V$ 、 $b = A1h1$ である。

式(5)より、テープヒータへの入力U(s)からセルの温度Y(s)までの伝達関数P1(s)は式(6)、外気温D(s)からセルの温度Y(s)までの伝達関数P2(s)は式(7)で表せる。

$$P1(s) = \frac{1/b}{1 + (a/b)s} \tag{6}$$

$$P2(s) = \frac{1}{1 + (a/b)s} \tag{7}$$

a/b[s]は時定数、1/b[℃/W]は利得で、各伝達関数は制御対象が一次遅れ系となることを示している。以上より、制御対象のブロック図は図2のように表せる。

4. 実験による制御対象のモデル導出

テープヒータへの電圧印加（電力供給）から、培土温度変化までの伝達特性は3.の簡易物理モデルの考察より、基本的に一次遅れ系となることが分かる。しかし、実際の培土へのテープヒータの設置では、テープヒータ表面からの放熱を防ぐための保温材や植物体の熱伝達特性の影響もあり、より複雑な特性となると考えられる。ここでは、実験によるステップ応答特性から制御対象を同定することを検討する。

目標電力消費量を20[W/m]とし、以下の実験条件を設定した。

- ・テープヒータ:材質 SUS304, 厚さ 20[μm], 幅 6[mm], 長さ 5[m], 抵抗値 31.5 [Ω]
- ・供給電力: AC56[V], 1.78[A], 20[W/m]

なお、印加電圧はテープ長で変える必要があるのですが、家庭用 AC100[V]を使用する場合は、それに合わせてテープの厚さ、長さを調整することになる。

写真2に示すように、プランターに培土を入れテープヒータの約20cmが培土に接触するようにした。イチゴの高設栽培(写真3)では、プランター毎に数株のイチゴを植生する形態であるため、実験に於ける制御対象を写真2のようにすることは妥当である。

制御機器は以下の構成とし、PCにより実験データを自動収録するようにした。

- ・PC : 汎用パーソナルコンピュータ Windows-XP
- ・制御ソフト : LabVIEW システム (NI 社製)
- ・SSR (ソリッドステートリレー) : GP3PF-225B-CTB (オムロン社製)
- ・DAC (DA 変換器) : NI9263 (NI 社製)
- ・熱電対入力器 : NI9211 (NI 社製)
- ・熱電対 : K 型熱電対

ステップ応答特性の測定では、DAC を介して SSR を ON にしてテープヒータに電力を供給し、熱電対により培土温度を測定する。なお、SSR を設定温度に対して ON/OFF することで ON/OFF 制御が実現できる。また、LabVIEW により制御プログラムを組み込み SSR を PWM 駆動することで、この機器構成で PID 制御などの高度な制御器を実装することも可能である。

プランターは保冷庫に入れ周囲温度を約 6°C に管理した。また、温度測定点は、テープヒータ直下の土中(以下 H 点)とテープヒータから離れた点(以下 C 点)とした。これは保冷庫により温度管理しているが、培土接触部分以外のテープヒータの発熱のために保冷庫内全体の気温が上昇し、培土温も変動してしまうため、H 点とテープヒータの熱による直接の影響が小さい C 点との温度差をテープヒータによる培土加温への寄与とするためである。

写真2の状態でのテープヒータ加温特性(C点を基準としたH点の温度上昇)を図3に示す。この特性図より、電圧印加から培土温度変化までの伝達特性は、FOPDT(一次遅れ+むだ時間)系となっていることがわかる。このむだ時間は、保冷庫内で培土及びテープヒータが低温状態にあるため、テープヒータの発生熱量が培土の温度上昇に寄与するまでにかかる時間と考えられる。FOPDT 系の伝達関数は式(8)で表せる。

$$P(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls} \quad (8)$$

T: 時定数, L: むだ時間



写真2 培土加温実験における制御対象



写真3 イチゴの高設栽培例

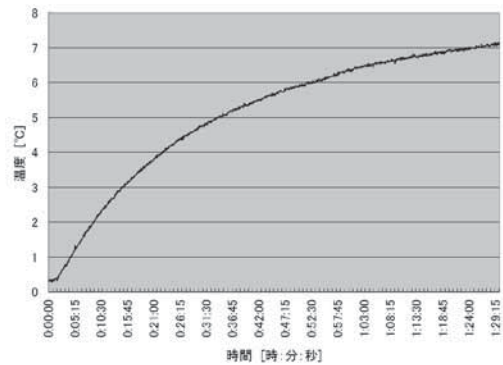


図3 テープヒータ加温による培土温度変化(実験値)

図3の実験結果から、 $L=100$ [s], $T=1485$ [s], $K=7$ が読み取れる。従って、テープヒータ加温特性は式(9)とモデル化できる。

$$P(s) = \frac{7}{1+1485s} e^{-100s} \quad (9)$$

テープヒータがH点の培土を加温するのに寄与している長さを0.1[m]と仮定し、SSRがONの時、すなわちテープヒータに電力が供給されている時、2[W]の電力がセル(加温対象の培土)に供給されているとすると式(6)は、式(10)と書ける。

$$P(s) = PI(s) \cdot PP = \frac{PP/b}{1+(a/b)s} \quad (10)$$

$PP=2$ [W]であるので、 $b=2/7$ [W/°C], $a=424.3$ [J/°C]となる。このように推定されたa, bの値は3. で記した培

土の比熱や密度を満たす妥当な値であり、本実験による制御対象の同定法が有効であることを示している。

以上の実験及び物理モデルから制御対象の伝達関数は、式(11)、式(12)となる。ただし、テープヒータの上面が開放の場合の伝達関数であることに注意する必要がある。

$$P1(s) = \frac{3.5}{1+1485s} e^{-100s} \quad (11)$$

$$P2(s) = \frac{1}{1+1485s} e^{-100s} \quad (12)$$

5. 加温制御方式の検討

制御対象のモデルを元に制御器を設計する。簡易な制御としてON/OFF制御器の使用が考えられるが、この場合、図4のシミュレーション結果に示すように振動的な振る舞いをする。また、図の10000[s]のところで外乱D(s) (外気温)を3[°C]ステップ上に変化させているが、振動の振幅が大きくなるのが分かる。この様な振動を抑制するには、設定温度の近傍でON/OFF動作にヒステリシス特性を持たせることなどが考えられるが、ロバスト性を考慮すると十分な手法とは言えない。そこで、化学プラントへの応用を中心に研究が進んでいるモデル予測制御器をテープヒータ加温制御に適用することをシミュレーションにより検討する。

・モデル予測制御器の設計⁴⁾

本実験では、モデル予測制御器として理論の単純な1段予測制御器を検討する。これは、1ステップ先のサンプリング時刻において予測値と参照軌道が一致するように操作量を決定する予測制御手法である。

プラントモデルに式(11)の周波数伝達関数を用いるとモデル出力 $Y_M(z)$ は、式(12)で与えられる。

$$Y_M(z) = z^{-1} P1_M(z) U(z) \quad (12)$$

ここで、 $P1_M(z)$ は制御対象の連続系モデル $P1(s)$ を離散化(Z変換)したものである。ただし、時定数に比較してむだ時間が小さいので、むだ時間要素は省略している。予測出力 $Y_P(z)$ はモデル出力 $Y_M(z)$ に1ステップ前の出力とモデル出力の差を加えたもので表し、予測式を式(13)とする。

$$Y_P(z) = Y_M(z) + z^{-1} \{Y(z) - Y_M(z)\} \quad (13)$$

また、参照軌道 $Y_R(z)$ は式(14)で与える。

$$Y_R(z) = \alpha z^{-1} Y(z) + (1-\alpha) R(z) \quad (14)$$

α はチューニングパラメータで、 $\alpha=0$ のとき参照軌道は目標値 $R(z)$ そのもので、 $\alpha=1$ のとき参照軌道は1ステップ前の出力のままであり変化しないことになる。従って、 α を小さくすると制御系の速応性を高め、大きくするとロバスト性を高めることになる。

制御則は、予測値 $Y_P(z)$ と参照軌道 $Y_R(z)$ を一致させることなので、式(15)となる。

$$Y_P(z) = Y_R(z) \quad (15)$$

以上の式(12)～式(15)より、操作量 $U(z)$ について解くと、式(16)の操作量の式が求まる。

$$U(z) = \frac{z(1-\alpha)}{z-1} \cdot \frac{1}{P1_M(z)} \{zR(z) - Y(z)\} \quad (16)$$

制御器は、式(17)に示すように $C1(z)$ と $C2(z)$ に分けることができ、 $C1(z)$ は積分補償器、 $C2(z)$ は安定化制御器となっている。ただし、 $C2(z)$ を決める際には、安定となるように極配置に注意する必要がある。

$$C1(z) = \frac{z}{z-1} \cdot (1-\alpha) \quad (17)$$

$$C2(z) = 1/P1_M(z)$$

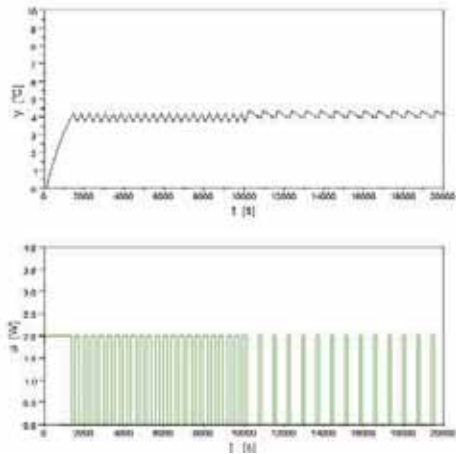


図4 ON/OFF制御によるテープヒータ加温制御 (シミュレーション)

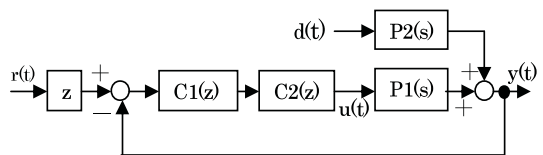


図5 モデル予測制御系のブロック線図

($r(t)$: 目標温度, $d(t)$: 外気温, $u(t)$: 操作量, $y(t)$: 出力温度)

式(16)を基に制御系のブロック線図を表すと図5となる。式(11)を双線形Z変換することで $PI_M(z)$ を求め、 $C2(z)$ を決定する。 α は積分補償器のゲインになるので、シミュレーションを元に決定する。式(18)に設計した制御器の数値例を示す。

$$C1(z) = \frac{0.1z}{z-1} \quad (18)$$

$$C2(z) = \frac{0.29(z-0.98)}{0.04z+0.035}$$

なお、サンプリング時間は制御対象の時定数(1485[s])を考慮し、30[s]とした。

6. シミュレーション実験と考察

制御器の設計計算にはScilabを、時間領域シミュレーションにはXcos⁵⁾を使用した。式(11)、式(12)、式(18)、及び図5を元に作成したXcosによるシミュレーションプログラムを図6に示す。

図7にモデル予測制御によるテープヒータ加温制御のシミュレーション結果を示す。立ち上がり時は、制御器設計の際に考慮に入れていないむだ時間により、操作量の変動が少し大きくなるが、むだ時間を入れずにシミュレーションした結果と大きな差はない。また、10000[s]のところで外乱D(s)(外気温)を3[°C]ステップ上に変化させているが、ON/OFF制御の場合(図4)と比較して、出力温度は滑らかに目標値に漸近しており、操作量も滑らかな振る舞いとなっている。

以上のように、一段予測制御という簡易な手法であっても安定性、速応性、外乱抑圧特性とも十分な性能であることが分かった。

制御器の構造は、デジタルPID制御器と同様となっており、設計の容易さを考えると植物体の加温制御のようなFOPDT系には、モデル予測制御器の実装が適していると考えられる。

7. まとめ

ステンレス箔テープヒータによる植物体の加温制御に関して、制御対象をイチゴのクラウン部(培土)として、その物理モデルを実験等により明らかにした。また、加温制御方式として一段予測制御器を設計し、シミュレーションによりその有効性を確認した。

圃場においてテープヒータを使用する場合、保温性を考慮し、ミラマットなどの保温材で被覆する。この場合、時定数やむだ時間が変わるが今回の制御器設計手法は、問題なく適用できる。

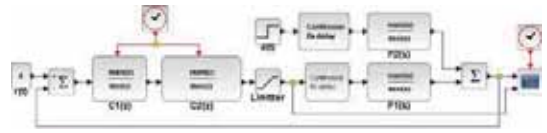


図6 Xcosによるシミュレーションプログラム

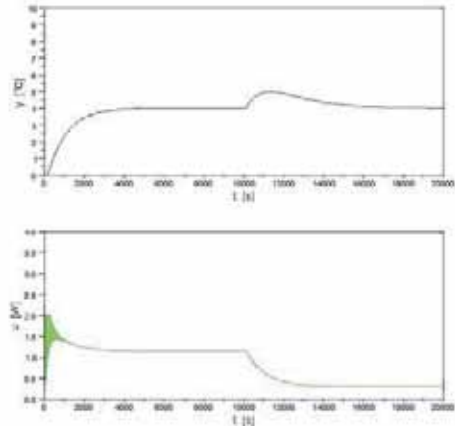


図7 モデル予測制御によるテープヒータ加温制御(シミュレーション)

今後は、他の制御器との比較やより高度なモデル予測制御器の適用について検討を進める。

謝辞

本研究の一部は、徳山高専テクノ・アカデミア共同研究の助成により実施しました。また、本研究の関連課題として、「イチゴの植物体局所加温技術を中心としたステンレス箔テープヒータ利活用技術の開発」が新産業創出研究会に採択され、ちゅうごく産業創造センターより研究会開催の助成を受けました。これらの研究助成に対し、深く感謝の意を表します。

文献

- 1) 鶴山, 日高, 木宮, 岡田, 山田: イチゴ局所加温用テープヒータの開発と実用化に関する研究(第1報), 園芸学会平成22年度秋季大会論文集, (2010)
- 2) 佐藤公洋, 北島伸之: 高設栽培におけるクラウン部局所加温の温度がイチゴの生育および収量に及ぼす影響, 福岡県農業総合試験場研究報告 29, (2010)
- 3) 寺村浩徳: ビニールハウスの温度制御シミュレーション, <http://hdl.handle.net/2298/11458>
- 4) ジャック・リシャレ, 江口元: モデル予測制御, 日本工業出版, (2007)
- 5) Scilab: <http://www.scilab.org/> 2011.09.01 確認 (2011.9.20 受理)