地下環境制御の基礎的研究 (2)

電算機による地温の P.I.D. 制御¹⁾

原 道宏*・市居 謙一**

岩手大学農学部農業機械学科*

岩手大学農学部農業機械学科 (現在, 緑産株式会社)**

本報の目的は, 前報¹⁾で述べた試作の「デジタル電子計算機による地温制御システム」を用い, 前報¹⁾で同定した制御対象 (熱的パラメータが一定な均質土壌試料) に対し P.I.D. による地温制御を試み, 実験により地温制御結果を得るとともに, この地温制御実験のシミュレーションを行い, 地温制御に対する P.I.D. 制御アルゴリズムの適用性を検討することである。

目標値がステップ状に変化する代表的な場合に対し, C.H.R. の方法による P.I.D. パラメータの 4 種類の最適値を用いた地温制御実験の結果, いずれの P.I.D. パラメータ最適値を用いても最終的には地温を目標値に保つことが可能であるが, P.I.D. パラメータ最適値の種類により過渡応答が著しく異なることが明らかになった。この地温制御実験を前報¹⁾で求めた地温系の数式モデルによりデジタル・シミュレーションを行った結果, 細部を除きシミュレーションと実験とは一致し, P.I.D. 地温制御系を数式モデルによりシミュレートできることがわかった。

ゆえに, 電算機により単に P.I.D. 地温制御が可能であることにとどまらず, 電算機に状態空間表示の P.I.D. 地温制御系のシミュレーションモデルを組みこむことにより, 事前における P.I.D. 地温制御系および地温分布の検討はもとよりのこと, 実際に P.I.D. 地温制御を行っているときでも, 制御量以外の点の地温を計測によらずシミュレーションにより検討を行うことが可能なことが明らかになった。

1977 年 8 月 5 日受付

1. ま え が き

前報¹⁾で同定した制御対象 (熱的パラメータが一定とみなせる均質な円柱状土壌温度系) に対し, P.I.D. 制御アルゴリズムに基づき D.D.C. による地温制御を試みた。地下環境制御に関しては, このような線形制御アルゴリズムに基づく制御が従来なされていないゆえ, 第 1 段階として非常に理想化された制御対象に対し, 最も典型的と考えられる古典制御理論における P.I.D. 制御ア

ルゴリズムの適用性を確かめることから着手した。

地温制御に対する P.I.D. 制御アルゴリズムの適用性を検討するために, 目標値がステップ状に変化する代表的な場合に対し, P.I.D. パラメータの代表的な調整方法である C.H.R. (CHIEN-HRONES-RESWICK) の方法による P.I.D. パラメータの 4 種類の最適値を用いて地温制御実験を行い実験結果を得るとともに, この地温制御実験を前報¹⁾で求めた地温系の数式モデルにより, デジタル・シミュレーションを行い結果を得, 両結果を相互に比較検討した。

2. P.I.D. 制御アルゴリズムによる地温制御の方法, 結果およびそのシミュレーションによる検討

2.1. P.I.D. 地温制御の方法

前報¹⁾で述べた試作の「電算機による地温制御システム」を用い, P.I.D. 制御アルゴリズムによる地温制御を D.D.C. で行った。アナログ調節計の場合と異なり, サ

¹⁾ Michihiro HARA* and Ken'ichi ICHII**: Fundamental Studies on Rhizosphere Environment Control (2). P.I.D. Control of Soil Temperature Using a Digital Computer.

*, ** Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka, Iwate.

** Presently, Ryokusan Co., Ltd., Sagami, Kanagawa.

ンプリング P.I.D. 制御アルゴリズムとなる。結局、式 (1-a) で示される P.I.D. 制御式を用いた²⁾。

$$Q_h(k) = K_P \left[e(k) + \sum_{i=0}^k \frac{\tau}{T_I} e(i) + \frac{T_D}{\tau} \{e(k) - e(k-1)\} \right], \\ k=0, 1, 2, \dots \quad (1-a)$$

ここに、

K_P : proportional sensitivity (cal cm⁻¹ min⁻¹ °C⁻¹)

T_I : reset time (min)

T_D : rate time (min)

τ : sampling period (min)

$e(k) = \theta_o(k) - \theta(k)$: deviation (°C)

$\theta_o(k)$: desired value (°C)

$\theta(k)$: controlled variable (temperature of controlled point) (°C)

$Q_h(k)$: manipulated variable (power of the heater) (cal cm⁻¹ min⁻¹)

ただし、操作量 Q_h には不等式 (1-b) で示される下限および上限がある。

$$Q_{h \min} \leq Q_h \leq Q_{h \max} \quad (1-b)$$

ここに、

$Q_{h \min}$: lower limit of Q_h (cal cm⁻¹ min⁻¹)

$Q_{h \max}$: upper limit of Q_h (cal cm⁻¹ min⁻¹)

実際には $Q_{h \min} = 0$ であり、 $Q_{h \max}$ は電源圧の調節により最大 50 W (25 cm)⁻¹ = 28.67 cal cm⁻¹ min⁻¹* までの値を選べるが、土壌温度が過度に上昇するのを防ぐために、さらに小さな値にする。P.I.D. 制御においては、制御系の特性に応じて式 (1) 中の K_P , T_I , T_D および τ の諸定数をどのように選ぶべきか、また実際上の制約条件であるところの $Q_{h \max}$ および $Q_{h \min}$ の影響がどのようになるかなど検討項目は多い。さらに、土壌中の伝熱がほとんど熱伝導のみであるため、熱源から制御点までおよび、それ以外にも温度分布が生じ、植物に与える影響のことを考えるとき、温度制御の結果を評価する際、制御点における制御結果のみならず、その他の点における制御結果にも目を向ける必要がある。そのため、土壌温度の制御は本質的に分布定数系の制御となり、制御結果の評価のしかたも複雑になる。ゆえに本研究においては、集中定数系の P.I.D. 制御についてなされてきた従来からの諸研究結果を活用し、それに基づいて制御した結果、同時に分布定数系であるため、他の点における制御結果がどのようになるかをも測定あるいは計算

し、制御結果を総合的に評価する方法をとった。

集中定数連続時間系の P.I.D. 制御における K_P , T_I および T_D の選定方法については、ZIEGLER-NICHOLS の方法^{2,3)}、TAKAHASHI の方法^{2,4)} およびその他の研究による方法があり、典型的な場合について検討がなされているが、ここでは本論文の第 1 報¹⁾ で得られたインディシャル応答を定性的によく近似する“(むだ時間)+(1 次遅れ)”要素の伝達関数で表わされる系の P.I.D. 制御について検討した C.H.R. の方法^{2,5,6)}を用いた。

C.H.R. は、系の伝達関数 $G(s)$ が式 (2) で表わされる場合について、P.I.D. パラメータの組み合わせと系の応答との関係をアナログコンピュータを用いて検討し、いずれも整定時間を最小にする意味で、(A) 外乱 (負荷) のステップ状変化に対して行き過ぎなし、(B) 外乱のステップ状変化に対して 20% 行き過ぎ、(C) 目標値のステップ状変化に対して行き過ぎなし、および (D) 目標値のステップ状変化に対して 20% 行き過ぎの 4 種類の場合に注目して、最適調整パラメータの値を式 (2) の K , L および T を用いて表わした (Appendix table 1 を参照)。

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (2)$$

ここに、

$G(s)$: transfer function of the controlled system

K : plant gain (°C cal⁻¹ cm min)

L : dead time (min)

T : time constant (min)

実際の地温制御場においては、外乱としては環境温度の変化、蒸発や降雨あるいは灌水による水分移動に伴う地温および熱的パラメータの変化などが主として考えられる。これらの外乱のうち、熱的パラメータの変化は、本論文が均質な定係数系を制御対象としていることから、論理的には考察の範囲外となるが、現実には重要な問題である。このようなシステムパラメータの変化は、少なくとも短期的には外乱とみなして対処することができるので、一般的にいって P.I.D. 制御のごとく積分動作を含むフィードバック制御においては過渡特性が若干悪くなるが定常偏差は残らず、全体として制御特性はあまり劣化しないと考えられる。しかし熱的パラメータの変化は当然、むだ時間および時定数の変化を伴うから、P.I.D. パラメータを再調整することが必要である。これらの点については、5 でさらに論ずる。

環境温度の変化や水分移動に伴う地温変化が本論文で考察すべき外乱であるが、ここではそのステップ状変化を想定している。現実には、環境温度がステップ状に変

* 1 cal = 4.186 J とした。

化することは少ないであろうし、土壌伝熱系であるゆえ制御点ではさらにゆるやかな温度変化になるであろう。それゆえ、ステップ状外乱の想定は非常に厳しい条件であり、制御系の設計の観点からは、この設定条件は現実に対して安全側にあると考えられる。

また、目標値をステップ状に変化することも、地温制御においては通常は非現実的であるが、なめらかなプログラム信号発生器をもたない簡単な制御装置の場合には、むしろ妥当な想定であろう。

C.H.R. の方法を適用するため制御対象の静利得 K 、等価むだ時間 L および等価時定数 T を本論文の第1報¹⁾で得られたインディシャル応答のシミュレーションについて、最急勾配部における接線を用いる Fig. 1 に示す方法により求めた。Table 1 に、このようにして得

Fig. 1 An approximation method of the indicial response of the distributed parameter controlled system with the dead time element and the first-order lag element.

Table 1 The plant gain (K) and the dead time (L) and the time constant (T) of the controlled system.

Measuring point	Experiment			Simulation		
	K	L	T	K	L	T
R_7	8.59	0.14	12.6	8.86	0.07	4.03
R_1	7.09	0.78	30.3	7.22	0.35	24.9
R_2	6.00	2.46	61.4	6.18	1.35	49.4
R_3	5.33	3.84	92.6	5.15	3.58	98.7
R_4	4.14	8.40	195	4.11	7.72	178
R_5	3.09	18.8	310	3.08	17.5	271
R_6	2.25	38.2	350	2.05	37.5	384
R_7	1.16	74.0	447	1.03	74.1	439

K : $^{\circ}\text{C cal}^{-1} \text{ cm min}$, L : min, T : min.

Fig. 2 The approximated indicial response of the controlled system with the dead time element and the first-order lag element.

られた K , L および T の値を示す。

制御系の伝達関数を“(むだ時間)+(1次遅れ)”要素で近似した場合、制御系のインディシャル応答は式(3)で表わされる。Table 1 に示したシミュレーションに対する K , L および T の値を用い、式(3)により計算したインディシャル応答を Fig. 2 に示す。

$$y_i(t) = \begin{cases} y_i(0), & 0 \leq t < L_i \\ K_i \cdot Q_h \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right) \right\} + y_i(0), & L_i \leq t \end{cases} \quad (3)$$

$0 \leq i \leq 8$

Fig. 2 と状態移行方程式を用いてシミュレーションした前報¹⁾の Fig. 8 およびそのもととなった実験値(前報¹⁾の Fig. 6)を相互に比較すると、前報¹⁾ Fig. 8 が前報¹⁾ Fig. 6 と大局的に良く一致しているのにくらべ、本報 Fig. 2 は前報¹⁾ Fig. 8 と立ち上りの部分および定常部分では良く一致しているが、中間部分で一致の良くないものがある。これは、この制御対象を“(むだ時間)+(1次遅れ)”要素の伝達関数で近似する場合の限界を示すものであろう。このように、近似された伝達関数が本来の系に合致しない場合に対して C.H.R. の方法を適用することについて、C.H.R.⁵⁾ はほとんどの工学的目的に対しては十分な精度で、P.I.D. パラメータの最適調整値が得られることを示している。ゆえに本論文では、最適な P.I.D. パラメータを求めるために、C.H.R. の方法を用いた。

土壌温度の P.I.D. 制御として、第1に上述の(A)~(D)の4種類の設定条件に対し、制御点として対数的中央点 R_4 を選び、D.D.C. により実験した。サンプリング周期については、今回はサンプリング周期の影響を

最小限にするため、じゅうぶん短いサンプリング周期として $\tau=1\text{ min}$ とした²⁾。制御系の操作能力によっても制御結果が影響される報告はあるが⁷⁾、土のように、特に分布定数系を重視した例はみられない。ゆえに、本論文においては制御の目標値を全操作能力による定常値の50%に設定する場合から検討することとした。 $Q_{h\text{max}}=1.96\text{ cal cm}^{-1}\text{ min}^{-1}$ とするとき、 R_4 における目標値は温度差で $+4.0^\circ\text{C}$ となる。

第2に、上記の実験に対応する D.D.C. による地温の P.I.D. 制御を、前報¹⁾ 式 (17) で得られた状態遷移方程式による制御対象の数式モデルを用い、電算機によりデジタル・シミュレーションした。制御変数、目標値、P.I.D. パラメータの値およびサンプリング周期は、実験

の場合と同様である。

2.2. P.I.D. 地温制御の結果およびその検討

制御対象のインディシャル応答の実験から求めた K ,

Table 2 P.I.D. parameters determined by the C.H.R. method for system constants obtained by experiment.

Type	A	B	C	D
K_P	5.33	6.74	3.37	5.33
T_I	20.2	16.8	195	264
T_D	3.36	3.53	4.20	3.95

The controlled variable: $\theta(R_4)$, K_P : $\text{cal cm}^{-1}\text{ min}^{-1}$ $^\circ\text{C}$, T_I : min, T_D : min.

(a) experiment-chart

(b) simulation-chart

Fig. 3 Relations between experiment-chart and simulation-chart in the P.I.D. soil temperature control. P.I.D. parameters: C.H.R. pattern (A), controlled point: No. 4.

(a) experiment-chart

(b) simulation-chart

Fig. 4 Relations between experiment-chart and simulation-chart in the P.I.D. soil temperature control. P.I.D. parameters: C.H.R. pattern (B), controlled point: No. 4.

(a) experiment-chart

(b) simulation-chart

Fig. 5 Relations between experiment-chart and simulation-chart in the P.I.D. soil temperature control.
P.I.D. parameters: C.H.R. pattern (C), controlled point: No. 4.

(a) experiment-chart

(b) simulation-chart

Fig. 6 Relations between experiment-chart and simulation-chart in the P.I.D. soil temperature control.
P.I.D. parameters: C.H.R. pattern (D), controlled point: No. 4.

L および T の値に対して、C.H.R. の方法で求めた最適な P.I.D. パラメータの値を Table 2 に示す。P.I.D. 制御アルゴリズムによる土壌温度制御の実験には、この値を用いた。

前項の方法により得られた D.D.C. による土壌温度の P.I.D. 制御の実験、およびシミュレーションによる制御結果のチャートを Fig. 3~Fig. 6 に示す。

得られた D.D.C. による土壌温度の P.I.D. 制御の実験、およびシミュレーションによる制御結果 (Fig. 3~Fig. 6) を相互に比較して、次のことがいえる。

(1) パターン (A)~(D) の 4 種類のいずれの場合においても、実験とシミュレーションの一致は大局的に良好であるものの、前報¹⁾のインディシャル応答の場合

と同様の不一致点 (定常誤差、過渡誤差および実験値における高周波成分の重畳) がみられるが、その不一致の程度は小さい。

(2) 制御点の温度 (制御変数) は、いずれの場合も定常においては目標値とよく合致しており、オフセットはない。しかし定常に至るまでの過渡応答は、(A)~(D) の 4 種の場合について、それぞれ異なるパターンを示している。特に、外乱に対処した (A) および (B) の場合では、制御変数は行き過ぎた後、減衰振動的に整定するのに対し、目標値変化に対処した (C) および (D) の場合では、制御変数は若干行き過ぎるものの、フレア動作的に軟着陸して目標値に整定するという大きな違いがある。

(3) 制御点よりもヒーターに近い側では、かなり大きな行き過ぎがみられる。P.I.D. 制御においては通常、制御変数以外の応答は重視されないが、分布定数系においては無視できない。

3. 結 び

円柱座標系の半径方向 1 次元地温場の中心軸に円筒状電気ヒーターを設け、試料外周とヒーター外周の対数的中央点 R_4 の温度を制御量に選び、地温制御に対する P.I.D. 制御アルゴリズムの適用性を検討した。制御対象としては、均質な定係数系（時不変系）とみなせる場合をみつかった。制御対象のシステム同定は、すでに前報¹⁾でなされているので、本報では直接的に地温制御のみを論じた。土壌温度系は分布定数系であり応答の遅れも大きく、かつ試料としての土壌が土壌固相・液相・気相という 3 相構造を有し、温度勾配による水分移動現象という単相固体にはみられない多孔体特有の特異な温度・熱的性質をもっている。このような特異な性質を有する土壌温度系に対しては、P.I.D. のごとき制御アルゴリズムの適用は従来なされていなかった。P.I.D. では、制御量を複数個とすることはむずかしいゆえ、土壌温度系は分布定数系であるにもかかわらず 1 個の制御量の制御となり、他の部位の温度は結果的に観測するのみとならざるをえない。電子レンジに用いられている高周波加熱のような分布発熱によらない限り、本報のような通常の伝導加熱では、土壌のごとき分布定数系の温度をダイナミックに制御しようとすれば、注目する制御量以外の温度が成り行きまかせになるのは止むをえない。本報でも、制御量は R_4 の 1 点の温度のみであり、他点の温度は P.I.D. 制御自体には関係ない。しかし、植物生育場の温度制御であるゆえ、当然、制御点温度の制御結果のみならず、他点の温度経過も含めた地温分布全体が問題となる。しかるに P.I.D. といった制御アルゴリズムでは、地温分布全体を監視して全体を任意の希望状態に制御することは不可能である。ゆえに地温分布全体をみれば、P.I.D. 制御された結果が、たとえばヒーター付近の温度が一時的にせよ過度に高温になるというように不都合な場合がありうる。

地温の P.I.D. 制御における上記の問題に対し、本報の結果から以下のように述べる可以考虑えられる。

第 1 に、前報¹⁾で述べたように制御対象のシステム同定を行い、本報 2 で述べたように C.H.R. の方法で P.I.D. パラメータの最適調整を行うことにより、土壌温度系においても P.I.D. 制御により 1 個の制御量（地温）

を定常状態において目標値に保つことができる。ただし、定常に至るまでの過渡状態は、P.I.D. パラメータの最適値の選び方により、2 で述べたように著しく異なるので注意を要する。地温の目標値が変化しない定常運転では外乱対策が問題となるが、プログラム制御のごとく地温の目標値が変化する場合には、当然目標値変化に対する追従性が問題となり、2 で述べたごとく C.H.R. (C) あるいは (D) が望ましい。電算機で制御する場合は、P.I.D. パラメータのオンライン変更が可能であるので、定常運転時と目標値変更時で最適な P.I.D. パラメータ調整値を選択すればよい。

第 2 に、本報のごとき伝導加熱系では土壌中に温度分布が生じ、注目している制御量（地温）以外の点の地温は、熱源との幾何学的位置関係、土壌の熱的特性、初期条件およびヒーター発熱量の時間経過により定まる時間経過をする。ヒーター発熱量は、制御量と目標値の差による P.I.D. フィードバックとして決定されるので結局、制御量以外の点の地温は成り行きとなり制御できない。しかし、制御量以外の点の地温も観測は可能である。この観測は当然、センサを希望位置に埋設することによっても可能であるが、2 で述べたように電算機によるデジタル・シミュレーションによっても可能である。制御対象のシステム同定が正しくなされていれば、シミュレーションの結果は 2 で述べたごとく、細部を除き信頼できるものである。ゆえに、実際の地温制御の場では全点に地温センサを埋設しなくても、オンライン電算機シミュレーションの活用により、全点の地温観測が可能である。さらに、実際の地温制御を行う以前でも、制御対象のシステム同定が正しくなされていれば、事前に P.I.D. 地温制御の結果をオフライン電算機シミュレーションにより高い信頼度で予測できる。このようにオンラインおよびオフラインで、P.I.D. 地温制御の結果を全点の地温について知ることができるので、土壌という分布定数系に対して有している P.I.D. 制御アルゴリズムの上述のごとき弱点を補うことができる。

第 3 に、本研究では土壌という本来熱的には複雑な特性を有する対象を数式モデルを用いて抽象的に扱い、その結果として前節 2 のごとき結果の得られたことから、逆に次のように考えられる。すなわち、本研究ではまず前報¹⁾で土壌の熱的特性を熱伝導率 λ と温度伝導率 κ の 2 個のパラメータに集約し、さらにそれらの値はインディシャル応答法により求められることを示した。これらの値を基礎にして行われた P.I.D. 制御実験の結果は、上述のごとき数値計算によるシミュレーションにより十分精度よく予測することができ、かつ C.H.R. の方法に

よる P.I.D. パラメータの調整はほぼ満足できる制御結果を与えている。以上の結果は、本来複雑と考えられてきた土壌においても、温度制御に関する限りは、数式モデル(およびその差分近似解をも含めて)による抽象的なとりあつかいの可能なことを示していると考えられる。ゆえに、本論文の結果および前報¹⁾の数式モデルを基礎として、実用的な地温制御に対し、一般的に次のような整理が可能である。ただし、いずれも均質な定係数系(時不変系)であることが前提条件である。

まず、地温制御系として形状および制御点位置が変わらず土壌の熱的性質のみが異なる場合、プラントゲイン K (前報¹⁾の式(3)により $K=(\theta-\theta_s)/Q_h=(\ln r_s-\ln r)/(2\pi\lambda)$ は熱伝導率 λ に反比例し、むだ時間 L および時定数 T は温度伝導率 κ に反比例する。ゆえに、C.H.R.の方法により得られる最適 P.I.D. パラメータ値は (A)~(D) いずれの場合も、 K_P は熱伝導率 λ に正比例し、 T_I および T_D は温度伝導率 κ に反比例する。また、地温制御系の形状および土壌の熱的性質が変わらず制御点位置のみが異なる場合、プラントゲイン K は $(\ln r_s-\ln r)$ に正比例し、むだ時間 L および時定数 T は r^2 にほぼ正比例する。ゆえに、C.H.R. の最適 P.I.D. パラメータ値は (A)~(D) いずれの場合も、 K_P は $(\ln r_s-\ln r)$ に反比例し、 T_I および T_D は r^2 にほぼ正比例する。

次に、地温制御系として制御対象の形状が異なる場合、一般的な場合について言及することはできないが、相似形の場合には本研究の結果が相似変換のみでそのまま適用できるので、C.H.R. の最適 P.I.D. パラメータ値は (A)~(D) いずれの場合も、 K_P は $\lambda/(\ln r_s-\ln r)$ に正比例し、相似の位置にある制御点についての T_I および T_D は r_s^2/κ に正比例する。

2 の結果は上記第1の知見を与え、上記第2の可能性を保証しているものであると考えられる。

以上のことから、本論文におけるごとく均質な定係数系とみなせる場合については、地温制御に対して P.I.D. 制御アルゴリズムを電算機に実行させるのみならず、電算機に当該の P.I.D. 地温制御のシミュレーションを行わせ全点地温の時間経過を得ることにより、制御点の地温を定常状態において目標値に保つことができ、かつ制御点以外の点の温度も含めて、全点の地温の時間経過が望ましい範囲にあるか否かの事前検討および制御実施中の監視を行うことができるようになった。

このように、非常に理想化した実験室段階での検討結果ではあるが、従来複雑として顧みられることのほとんどなかった土壌温度系の制御動特性の向上に対して、P.I.D. 制御アルゴリズムが有用なことが明らかになっ

た。しかし、本研究で行った理想化の裏面に、土壌の有する本来的な複雑さがあることを問題点として記す必要があろう。すなわち、現実の土壌は不均質な時変系であり、制御対象としての形状もさまざまで、外乱の性質も単純ではない。厳密には、個々の場合それぞれに対して異なった P.I.D. パラメータの最適値が存すると考えられる。ゆえに、厳密な最適 P.I.D. 制御を行おうとするのであれば、個々の場合について最適パラメータ値を求め、時々刻々その値を変更していく必要がある。しかし、現実にはこのようなことを行おうとしても、現在の技術レベルでは不可能に近いと考えられる。すなわち、C.H.R. が示したごとく、最適パラメータ値は K , L あるいは T といったシステムパラメータによって定まるのであるが、これらを P.I.D. 制御が実際に行われている場で時々刻々測定することは、一般的な制御論の見地からみても、非常に困難だからである。また、水分移動があったり土壌構造が変化していったりする現実の熱系においては、特殊な場合を除いて、上記のシステムパラメータを土壌物理学的に推定することも困難である。

さらに、生物環境調節として厳密な最適 P.I.D. 制御により地温を制御しなければならないことはほとんどないと思われ、多くの場合、近似的な最適制御で十分と考えられる。というのは、フィードバックによる最適制御の場合、その性質上、パラメータが最適値から若干ずれても制御結果への影響(劣化)はごくわずかだからである。すなわち、フィードバック最適制御系はシステムパラメータの変化に対して、いわゆる低感度システムになっているからである。

このことは、現実問題としての地温制御を本研究のごとく理想化された実験条件の下で検討することを全面的に肯定することを意味するものではないにしても、土壌においては熱的システムパラメータが多くの場合、緩慢にしか変化しないことを考えあわせれば、少なくとも第1近似として本研究の結果は現実利用できるものと考えられよう。

しかし、種々の、より現実的な制御系における地温制御に対して今後とも研究を重ね、地温制御系に対するさらに明確な見通しを得ていく努力は当然必要と考える。

本研究を行うにあたり、杉 二郎東京大学名誉教授および伊藤 實岩手大学教授には有益なる示唆をたまわり、岩手大学大学院生赤田健児君には多大の協力をいただいた。

本研究を行うために、岩手大学生物環境制御装置室(電子計算機 YHP 2100 A を含む)を使用した。

本研究は、文部省科学研究費の補助を受けた。
関係各位に深甚の謝意を表明いたします。

文 献

- 1) 原 道宏・市居謙一・赤田健児. 1976. 地下環境制御の基礎的研究 (1) 電算機による地温制御システムとその同定. 生物環境調節 **14** (2): 23-31.
- 2) 山下 直・保志 尚. 1969. 「デジタルプロセス制御」78-172, コロナ社, 東京.
- 3) ZIEGLER, J. G. and N. B. NICHOLS. 1942. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME **64**: 759-768.
- 4) 高橋安人. 1949. 「自動制御」, 科学技術社.
- 5) CHIEN, K. L., J. A. HRONES, and J. B. RESWICK. 1952. On the automatic control of generalized passive systems. Trans. ASME **74**: 175-185.
- 6) 計測自動制御学会編. 1968. 「改訂自動制御便覧」, 381-546, コロナ社, 東京.
- 7) 船田 周・橋本 康・大政謙次・今村真逸. 1973. ファイトロンにおける制御系のアナログシミュレーション (IV). 温湿度制御系の操作能力を変えた場合の動特性. 生物環境調節 **11** (1): 13-24.

Summary

The applicability of the P.I.D. control algorithm for an identified soil temperature system¹⁾ was investigated using both experiments and computer simulations.

Results:

1) The P.I.D. soil temperature control experiments showed that although every four optimally adjusted P.I.D. parameter sets lead the controlled variable, (the soil temperature at the logarithmical middle point) to the stepwise desired value in the steady state, the transient response curves are differ greatly when four sets of optimal P.I.D. parameters from the C.H.R. method are used. The simulated P.I.D. soil temperature controls were similar to the above experiments except for slight differences in detail. This implies that investigations of P.I.D. soil temperature control systems can be carried out using computer simulations composed of the mathematical model for a soil temperature system developed in a previous paper¹⁾.

2) Not only was it determined that P.I.D. soil temperature control can be performed using a digital computer, but that the P.I.D. soil temperature control system, itself, and the soil temperature distributions can be investigated with computer simulations while the soil temperature is P.I.D. controlled, if the digital computer possesses the state space simulation model of the P.I.D. soil temperature control system developed in the present paper.

(Received August 5, 1977)

Appendix table 1 Relationships for various types of controls (from C.H.R.⁵⁾).

Types of controls		Quickest response without overshoot		Quickest response with 20 per cent overshoot	
Step change in load	K_P		0.95 T/KL		1.2 T/LK
	T_I	(A)	2.4 L	(B)	2.0 L
	T_D		0.4 L		0.42 L
Step change in desired value	K_P		0.6 T/KL		0.95 T/KL
	T_I	(C)	T	(D)	1.35 T
	T_D		0.5 L		0.47 L

* Confer equations (1) and (2) in the text.