

# 作物葉生長自動測定装置及び水温制御装置の試作研究\*

——いね科作物葉の伸長に着目して——

宮 里 満\*・植 木 健 至\*\*

(昭和 51 年 8 月 31 日 受理)

## Design and Construction of Recording-Apparatus for Leaf-Growth Measurement and Water-Temperature Controller

—Applied on the Measurement of Leaf-Elongation in Cereal Crops—

Mitsuru MIYAZATO\* and Kenji UEKI\*\*

\*(Laboratory of Agricultural Physics)

\*\* (Laboratory of Crop Science)

### 緒 言

従来、作物生態学の領域において、外温と作物葉の生長との関係については、時間或は日単位のいわばマクロ的観察によって多くの推定がなされてきたが、ここでは時々刻々に微妙に変化する外温に葉生長がどのように追従しているかを理解することは出来ない。この点に着目したのが、Silberschmidt<sup>4)</sup>で、エンバク子葉鞘の生長と急激に変化する外気温との関係を目盛をしたガラス管を用い、最大限の肉眼的観察を行ったのが最初と思われる。その後この種の試みは見られなかったが、最近著者ら<sup>2)7)</sup>は水稻幼植物を用い、電気抵抗線式歪計を利用して葉生長をミクロン単位で測定することが可能であることを実証した。しかし以上の試みは肉眼的観察或は手動式操作のために短時間は可能であっても長時間の測定は不可能といえる。

元来温度変化に対応した作物の生長を実験的に追跡するためには、先づ作物の生長を微量でかつ自動的に記録する装置が、第二には環境条件として任意関数の波形の温度変化を自動的に制御する装置が必要であり、両者が一対となって具備されねばならない。このような観点から、本研究はいね科作物葉に対する自動生長測定装置の試作と任意関数の波形の水温変化に対する自動制御装置を作製するとともに、得られた若干の測定例を示したものである。

なおここで試料として水稻幼植物葉を用いたのは、他のいね科作物と同様初期の葉身の伸長が外形的にみて直上の伸長する現象に着目したためであり、また

温度環境として気温より水温を選んだのは水稻の生長点が水面下に位置する生育前半期においては、その生長は気温に比べて水温の変化により強く影響を受けるとの認識<sup>5)6)</sup>によるものである。

なお本研究は昭和 48 年度 文部省科学研究費の援助を受けたことを附記する。

### 葉生長自動測定装置

本測定装置の動作原理は Fig. 1 に示す如く、電気抵抗線式歪計の非接着型ゲージ (U) (以下Uゲージという) に作物葉が伸長して接触すると、その信号を直流増巾器 (A) で増巾し記録計 (R) に記録すると同時に、記録計にセットされたリミットスイッチ (S<sub>1</sub>) が作動し、サーボモータ (M) が回転し減速ギヤ (G) 及び駆動軸をへて可動軸が上昇する。可動軸

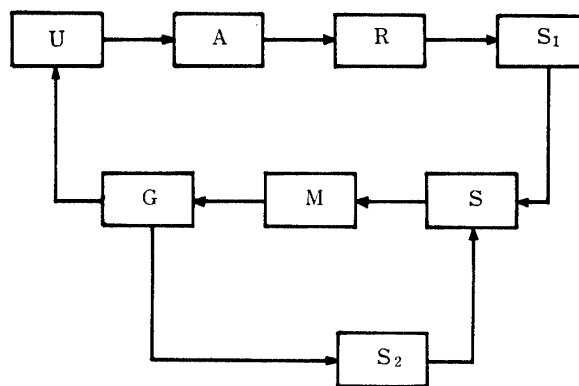


Fig. 1 Flow diagram of measurement apparatus

U: U gage, A: Amplifier, R: Recorder, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>: Limit switch, S: Switching circuit, M: Servomotor, G: Gear

\* 大要は日本作物学会第 160 回講演会 (昭和 50 年 10 月 16 日) において発表した。

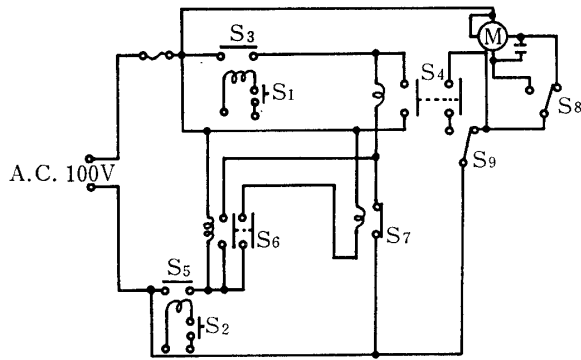


Fig. 2 Switching circuit

S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>: Limit switch, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub>, S<sub>7</sub>: Relay switch, S<sub>8</sub>, S<sub>9</sub>: Snap switch, M: Servomotor

に取り付けられたゲージが 0.1 [mm] だけ上昇すると、歯車に取付けたカムによってリミットスイッチ (S<sub>2</sub>) が作動しスイッチング回路 (S) を通じて作物葉の先端より 0.1 [mm] 離れた位置に保持され、さらに葉が伸長してゲージに接触すると上記の動作を繰り返す。かくして信号間の時間と回数を調べることでより単位時間内の伸長量及び、全伸長量を連続的に測定することが出来る。

サーボモータをオン、オフさせるスイッチング回路を Fig. 2 に示した。被測定作物葉の先端が U ゲージに接触してから 20 μ ストレインの歪を受けた時にオンになるよう調整したリミットスイッチ (S<sub>1</sub>) が記録計にセットされている。いまこのスイッチが作動すると (S<sub>4</sub>) がオンになり、サーボモータ (M) が回転して U ゲージを上昇させる。ゲージが 0.1 [mm] 上昇すると、歯車に取付けたカムによりもう一つのリミットスイッチ (S<sub>2</sub>) がオフになり、(S<sub>5</sub>) (S<sub>4</sub>) が次々にオフになってサーボモータは停止して最初の状態にもどる。(S<sub>7</sub>) は (S<sub>4</sub>) がチャタリングを防止するための補助遅延リレースイッチで、(S<sub>8</sub>)、(S<sub>9</sub>) は U ゲージの上下動及び手動・自動の切換用スイッチである。

Fig. 3 は測定装置本体の構造図で、いまサーボモータ (M) が回転すると、カムを取り付けた減速歯車 (G) を介して固定軸の周囲を自由に回転出来るように取付けた駆動軸を駆動する。駆動軸の外側にはピッチ 1 [mm] のネジ溝が切っており、これに噛合った外側の可動軸は駆動軸が回転すると、固定軸に作られた案内溝にそって上下する。従って、駆動軸が 1 回転すると可動軸に取付けられたアームの先端の U ゲージが 1 [mm] 上下に移動する。実際には駆動用の歯車の円周を 10 等分してカムを取付けて 0.1 [mm] 上昇した時にサーボモータは停止する。

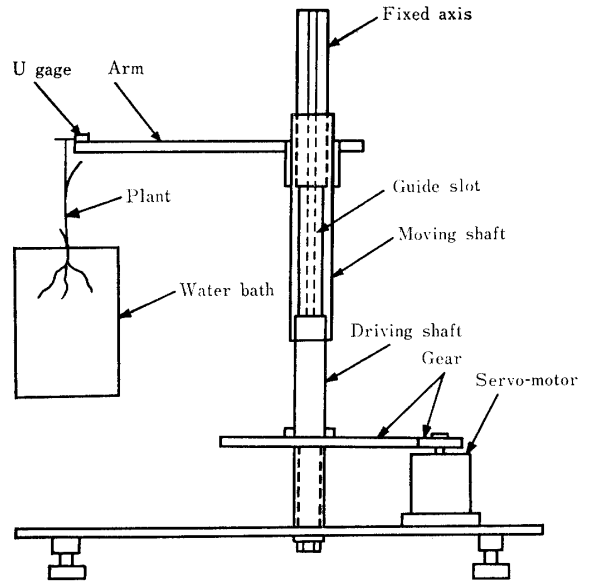


Fig. 3 Schematic of automatic measuring apparatus for leaf growth

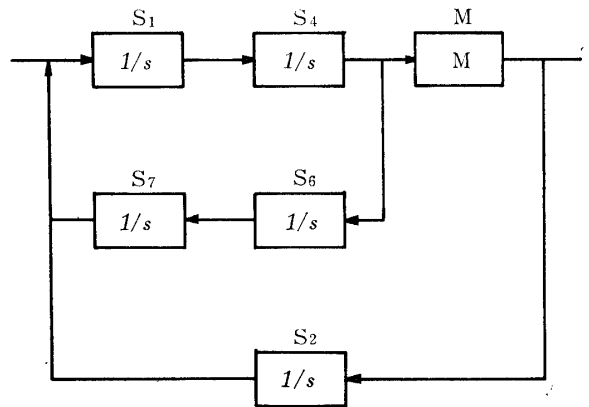


Fig. 4 Block diagram of switching circuit

S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>: Limit switch, S<sub>4</sub>, S<sub>6</sub>: Relay switch, S<sub>7</sub>: Delay switch, M: Servomotor, 1/s: Transfer function of switch, M: Transfer function of servomotor

以上これら試作したスイッチング回路及び測定装置全部について伝達関数<sup>1)3)</sup>を求めると次のようになる。

先づ Fig. 4 に示すスイッチング回路のブロック線図より、伝達関数は

$$G_1(s) = \frac{s^2 M}{s^4 + 1 + sM} \quad \dots\dots (1)$$

となり、これより周波数伝達関数は

$$G_1(j\omega) = \frac{-\omega^2 M}{-\omega^4 + 1 + j\omega M} \quad \dots\dots (2)$$

但し 1/s: リミットスイッチ, リレースイッチ, 遅延リレースイッチの伝達関数, M: サーボモータの伝

達関係,  $\omega$ : 角速度 [rad/sec]. 今サーボモータの制御電圧を 100 [V], 回転数を 6 [r.p.m.] とすると  $M = 2\pi/100$  で, これより

$$\text{ゲイン: } 20\log\{\log\omega^2 M - \log\sqrt{(1+\omega^4)^2 + \omega^2 M^2}\} \dots\dots (3)$$

$$\text{位相: } -\tan^{-1} \frac{\omega M}{1+\omega^4} \dots\dots (4)$$

となり, これを用いボード線図を書くと Fig. 5 の様になる.

次に実際に使した増巾器の利得調整は  $20 \times 100 \mu$  ストレイン, Uゲージのブリッジ電圧は D.C. 2 [V], 記録計の入力電圧レンジは 100 [mV/cm], 零点よりリミットスイッチが作動するまでの示針の振れ巾は 0.4 [cm], 又  $200 \mu$  ストレインの時の振れ巾は, 16.4 [cm] であった. これらを用いUゲージ, 増巾器, 記録計の全伝達関数は  $0.41 \times 10^3$  となる. 従って測定装置全体の周波数応答は

$$\text{ゲイン: } 20\{3 \times \log 0.41 + \log \omega^2 M - \log \omega^2 M - \log\sqrt{(1+\omega^4)^2 + \omega^2 M^2}\}$$

$$\text{位相: } -\tan^{-1} \frac{\omega M}{1+\omega^4}$$

これよりボード線図を求めると Fig. 6 なる.

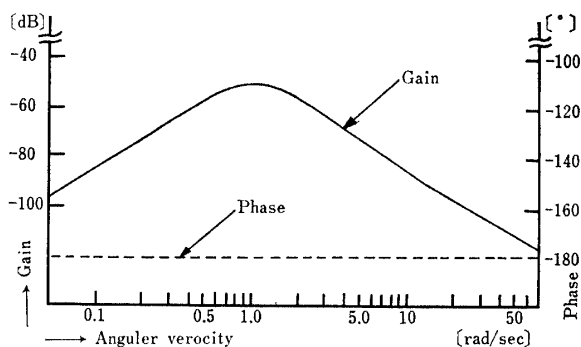


Fig. 5 Bode diagram of switching circuit

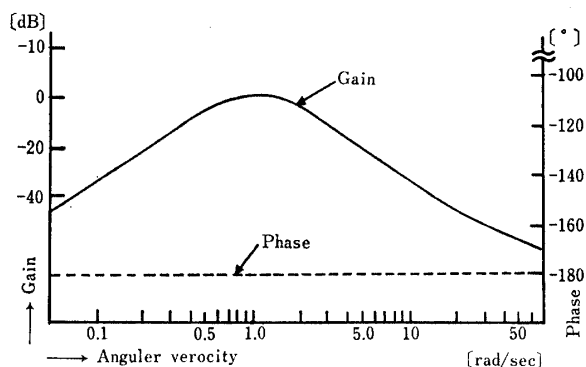


Fig. 6 Bode diagram of measurement apparatus

本装置開発に当って使用した器機仕様は次の通りである. (1) Uゲージ: 新興通信工業製 UL-120-2 型, 定格容量  $\pm 2$  [gm] 又は  $\pm 0.4$  [mm], (2) 増巾器: 横河電機製 3126 型, 感度 15 [mV/ $\mu$  ストレイン], (3) 記録計: 横河電機製 3072 型, 感度 0.5 [mV/cm]  $\sim 20$  [V/cm] (4) サーボモータ: 横河電機製 SMP 2 B 5 型, 100 [V], 60 [Hz], 6 [r.p.m.], その他スイッチング回路, 測定用スタンド等である.

水温調節装置

本装置は水温の変化を任意関数の波形たとえば, 正弦波, 三角波, 鋸歯状波, 矩形波等に応じて自動的に調節するもので, その流れ線図を Fig. 7 に示した.

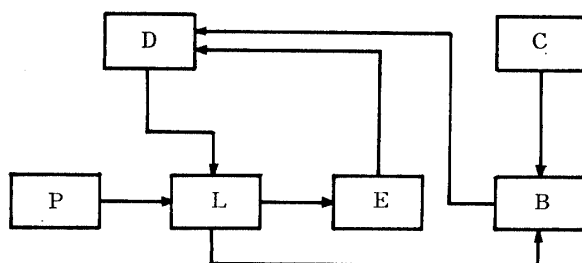


Fig. 7 Flow diagram of water temperature controller

D: Detector, C: Cooler, P: Program, L: Control circuit, E: Power regulator, B: Motor valve

今希望する任意の温度変化の波形をプログラム設定用紙に記入し, これをプログラム設定器にセットすると, 接点がプログラム線上を走査し, その波形に応じた  $0 \sim 10$  [mV] の電圧  $e_1$  が発生し調節回路 L に送られる. 一方水槽内の温度を検出器 D で検出し, 同様にこれを水温に比例した  $0 \sim 10$  [mV] の電圧  $e_2$  に変換して記録計に記録すると同時に, 同一信号電圧を調節回路に送る. 調節回路においては, 送られてきた  $e_1, e_2$  両信号の偏差に応じて演算増巾されて  $4 \sim 20$  [mA] の調節信号として各調節器へ送られる. もし水温が設定温度より低い場合には  $12 \sim 4$  [mA] の電流信号によって加熱用 SCR 電力調製器が作動してヒーターを加熱し, 水温の方が高い場合は  $12 \sim 20$  [mA] の信号電流で電動バルブを開閉して冷却水の流入量を調節し, 常に設定温度と同一温度になるように制御を行う.

本装置に使用した器機は, (1) 温度調節記録計: 横河電機製 ER 4031 型, 測定範囲は  $0 \sim 50$  [°C], 調節方法 PID 動作, 測定精度は全目盛巾の  $\pm 0.3$  [%] 以下, (2) プログラム設定器: 横河電機製 4056 型,

出力信号精度は全目盛巾の $\pm 0.5$  [%], (3) 冷却器: 小松製作所製クールニクス CTR-1 A型, (4) SCR 電力調製器: 富士電機製 MS 3 C188 a 型等である.

### 測定例及び考察

前掲の機器を用いて試作した本生長測定装置においては Fig. 6 より明らかなように, ゲイン特性において  $\omega = 1$  で最大値を示すが, 実際には  $\omega < 0.1$  で使用する為, 実用上は何等影響はない. また本装置の作動試験においては, 増巾器の利得調整を  $20 \times 100 \mu$  ストレインに, 記録計の入力レンジを  $100 [mV/cm]$  にセットした. これは照明用の陽光ランプの発熱による気温上昇防止の冷却用ファンを用いたことにより空気の移動が生じ, 記録計の針が振動を記したためあえて感度を落して使用したものである. 上記の定数から葉の先端の受ける最大の力は,  $0.005 [gm]$ , 変位量にして  $1$  [ミクロン]である. 空気の急激な移動やドアの開閉等測定器以外の雑音を除去出来るならば増巾器の利得及び記録計の入力感度を上げる事によりさらに  $20 [dB]$  以上の感度を上げる事が出来る. またもし作物の先端に  $0.005 [gm]$  以上の力を加えても作物葉に影響を与える事がないならば, 最大感度  $10 [gm]$  又は  $20 [gm]$  等の Uゲージを使用することにより, さらに安定度を増す事も可能と考える.

一方水温自動調節装置については, 実測の結果は加熱用ヒーターに  $500 [W]$  を使用して, 室温  $30 [^{\circ}C]$  水温  $28 [^{\circ}C]$  における最大水温上昇速度は  $1.54 [^{\circ}C/$

$min]$ , 最大下降速度は  $0.27 [^{\circ}C/min]$  であった. これらの結果から水温が正弦波の温度変化をする時, 振巾の最小値が  $20 [^{\circ}C]$  で最高値が  $35 [^{\circ}C]$  の場合 1 日 8 cycle までは充分追従する事が出来た. しかし水槽の容量が大きくなると完全に追従できる周期は長くなるが, 冷却器及び加熱用電力の容量を増加する事により温度変化の振巾及び周波数を増加する事も可能である.

最後に水稻 (品種コシヒカリ) を用い, 第 2 葉鞘より約  $1 [cm]$  抽出し, 未だ針状を呈する第 3 葉の伸長に着目し,  $10 [klx]$  の照度下で任意波形の水温との関係を 24 時間追跡した場合の若干の測定例を Fig. 8~ Fig. 11 に示した. Fig. 8 は  $1 [cycle/day]$  の正弦波で振巾  $20 [^{\circ}C] \sim 36 [^{\circ}C]$ , Fig. 9 は  $2 [cycle/day]$  の正弦波で振巾  $23 [^{\circ}C] \sim 33 [^{\circ}C]$ , Fig. 10 は  $6 [cycle/day]$  の正弦波で振巾  $20 [^{\circ}C] \sim 36 [^{\circ}C]$  そして Fig. 11 は  $6 [cycle/day]$  の鋸歯状波で振巾  $25 [^{\circ}C] \sim 36 [^{\circ}C]$  の水温条件下において, それぞれ  $0.2 [mm]$  単位で表示した生長速度ならびに生長量を示している. ここに呈示したのはわずかに 4 例であるが, 他の測定例をもあわせ考えるとき, 2, 3 の事実が推定される. 即ち, 外観的には規則的な単純増加をすると思われる葉身長が意外にジグザグ状の伸長速度を示し—これは葉基部に存在する数多くの細胞の伸長速度の不均一性による所が大であると思われるが明言はさける—ているにもかかわらず, 全体的にはよく水温変化に順応していることが明らかである. また葉身長が水温変

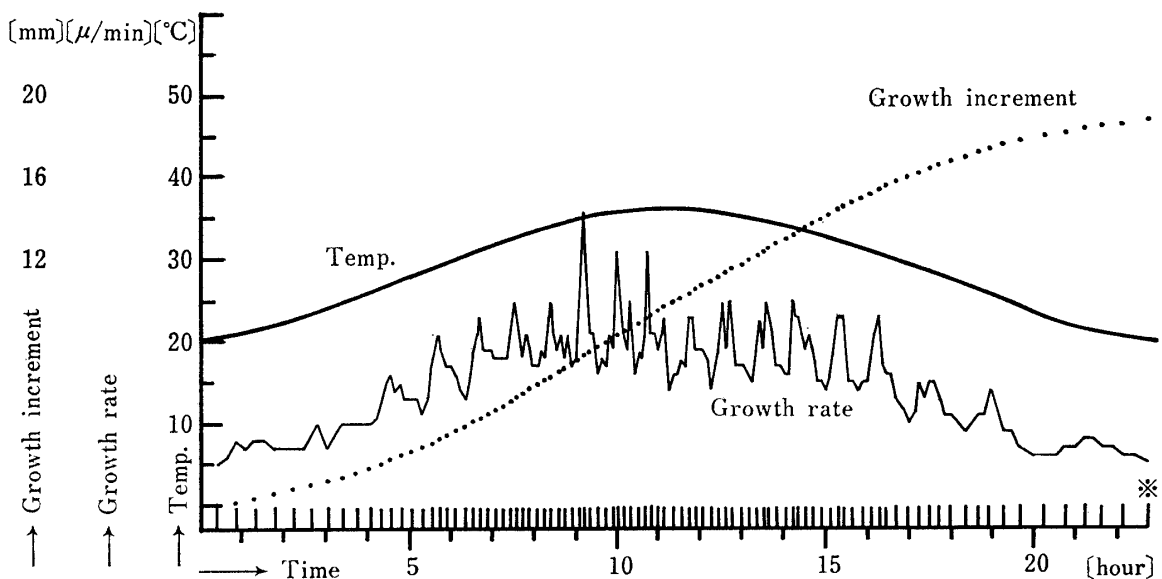


Fig. 8 Effect of water temperature (sine wave, 1 [cycle/day]) on the leaf growth of rice

\* A scale in compression waves indicates  $0.2 [mm]$  leaf elongation

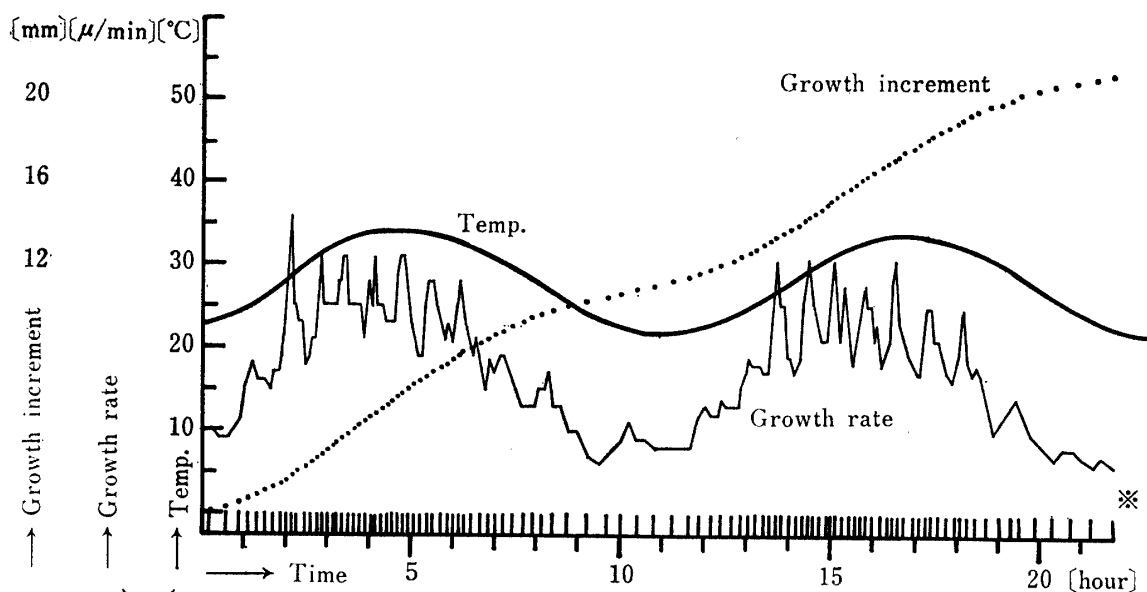


Fig. 9 Effect of water temperature (sine wave, 2 [cycle/day]) on the leaf growth of rice

\* A scale in compression waves indicates 0.2 [mm] leaf elongation.

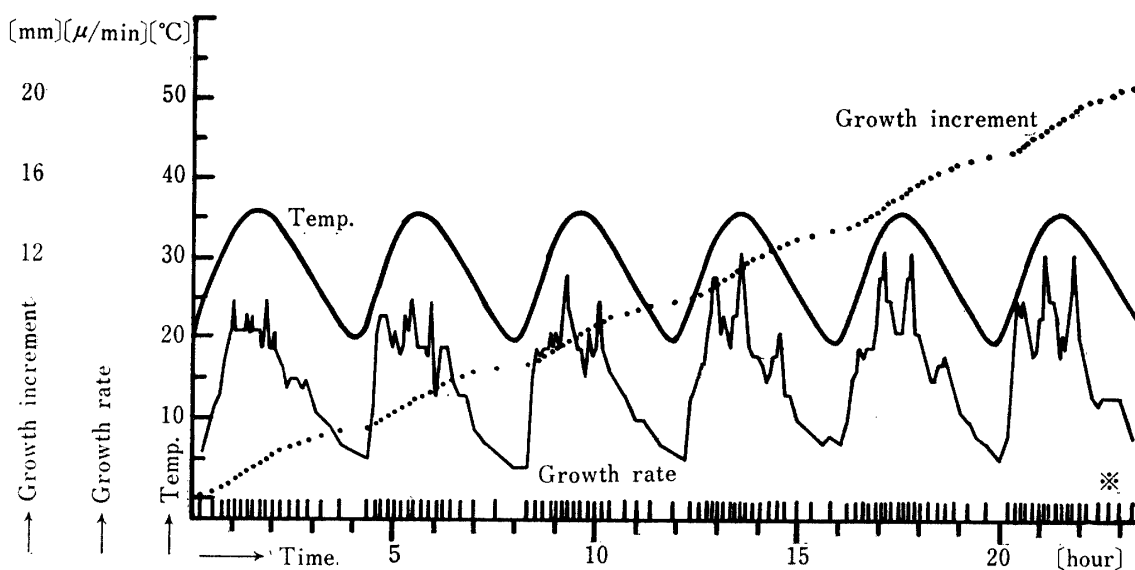


Fig. 10 Effect of water temperature (sine wave, 6 [cycle/day]) on the leaf growth of rice

\* A scale in compression waves indicates 0.2 [mm] leaf elongation.

化に順応するとはいっても、微量単位でこれを見れば水温のパターンによって差異を示し、水温の cycle 数を増加した場合、或は正弦波と鋸歯状波とを比較した場合にみるように温度上昇勾配の増加によって伸度速長もいちぢるしく増加することが認められる。即ち同一水温にあってもそれが上昇過程にあるか下降過程にあるかによってその伸長量を異にすることが推定されるのである。以上は測定例も少なく、推測の域にとどめるが、いうまでもなく水温のパターンは無限であ

り、一方品種、葉位など作物自身の条件もまた数多い。従ってこれら複雑な組合せに対応した伸長を追求することによって、普遍的な法則性を見出してゆくことが今後の課題と考える。

一般的にみて葉の生長は、不定方向への伸長傾向を示すために、その自動測定装置の作成は極めて困難であるが、少なくとも縦方向に生長の習性をもついね科作物の生長測定については本装置の利用意義は極めて高いものと考えられる。同時に水温自動制御装置にし

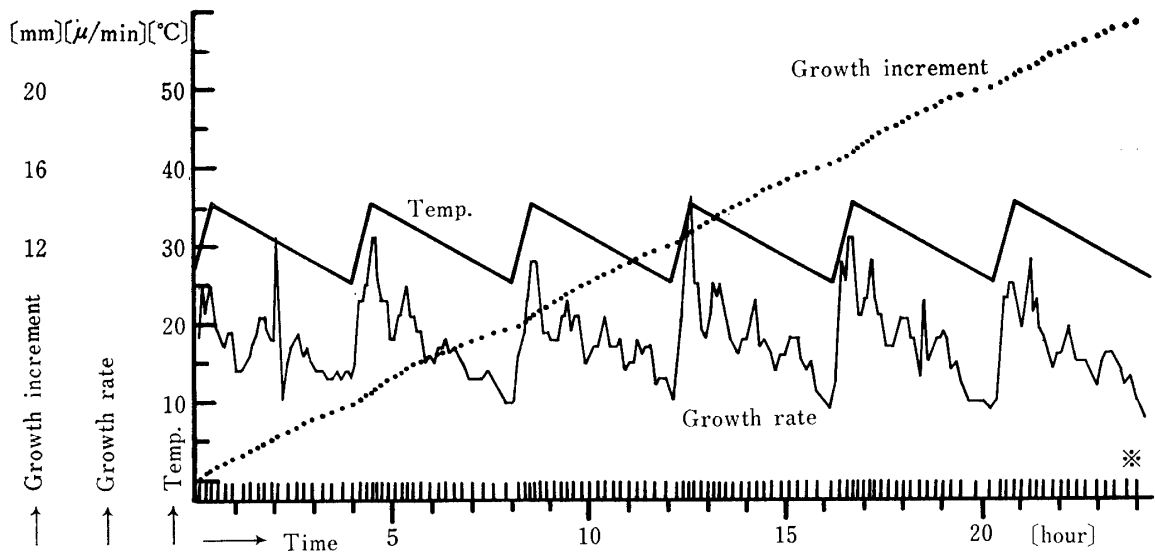


Fig. 11 Effect of water temperature (saw tooth wave, 6 [cycle/day]) on the leaf growth of rice

\* A scale in compression indicates 0.2 [mm] leaf elongation.

ても、生態学領域においては人為的にプログラムした水温条件を必要とする場合が極めて多く、その利用範囲も多目的に使用し得るものといえよう。

### 要 約

いね科作物を対象とし抵抗線歪計を応用して、葉身の微小伸長量及び伸長速度の自動生長記録装置を作成した。同時に環境制御の手法として任意関数の波形の水温変化を自動的に調節しうる装置をも試作した。

本生長記録装置は、作物葉が 0.1 [mm] 伸長するに要する時間と作動回数を測定する事により作物葉の伸長速度及び伸長量を算出することに特色がある。この時、葉の先端に加わる力は 0.005 [gm] 以下でUゲージの変位量は 1 [ミクロン] であり、測定誤差は 1 [%] 以下であった。又測定条件、回路定数及び使用器機を適当に選ぶ事により、より安定に、しかも高感度で測定することが出来る。

水温調節装置の総合特性において、室温 30 [°C] 水温 28 [°C] における最大水温上昇速度は 1.56 [°C/min] で最大下降速度は 0.27 [°C/min] であった。また最高水温 35 [°C]、最低水温 20 [°C] の振中で1日

の周期が 8 [cycle/day] の正弦波の場合の温度誤差は  $\pm 0.2$  [°C] 以下であった。加熱用ヒーター、冷却器及び水槽の容量を変えることによりさらに水温の振巾、周波数を大きくすることも可能である。

上記両装置を併用することにより、水温と水稻第3葉の伸長との関係を見た結果、全体的には葉伸長は水温の高低に順応しながらも、水温変化のパターンによっては特異的な生長曲線をえがくことが推定された。

### 文 献

- 1) 水上憲夫：自動制御，136-144 (1974)，朝倉書店。
- 2) 二ノ方兼武，宮里 満：鹿大農学術報告，**8**，76-88 (1959)。
- 3) 制御工学ハンドブック，178-182 (1964)，朝倉書店。
- 4) Silberschmidt, K.: *Ber. Deut. Bot. Gesell.*, **43** (1926)。
- 5) 角田公正：農技研報告，**A11** (1964)。
- 6) 植木健至：日作紀，**35**，8-12 (1963)。
- 7) 植木健至・宮里 満：日作九支報，**24**，28-30 (1965)。

### Summary

In order to measure the micro-growth-increment and -rate in the cereal crops, an automatic recording-apparatus was designed and constructed, using electrical strain-meter. For environment control, an automatic controller of programing water-temperature in a water-bath was constructed.

By measuring the period of 0.1 [mm] leaf elongation and recording the frequency using this apparatus, the growth-increment and the growth-rate could be known. Applied forces on the leaf apex were less 0.005 [gm], displacement quantities of the U gage were 1 micron and the accuracy of this apparatus was 1 percent. If the selection of environmental condition, circuit constants, and components were made, the more increasing stabilization and sensibility could be expected.

In the overall characteristics of this water-temperature controller under the conditions of 30[°C] room temperature and of 28[°C] water temperature, the maximum rising velocity is 1.56[°C/min] and the maximum dropping velocity is 0.27[°C/min]. When the function of water temperature indicates a sine wave having the frequency of 8[cycle/day] and the amplification from 20 to 35[°C], the accuracy of temperature is less than  $\pm 0.2$ [°C]. If the selection of capacities in heater, cooler, and water-bath were made, the more increasing amplification and frequency of water temperature could be expected.

As an example, the relation between the water temperature in the water-bath and the third leaf elongation of rice was measured, using these apparatuses. Generally, the growth increments were adapted to the change of the water-temperature curve. However, it was estimated that the micro-growth-rate curve was kept characteristic appertaining to each pattern in the change of water temperature.