載荷板による群落状態植物の重量生長計測

玉 木 浩 二*

東京大学農学部*

植物の重量生長を非破壊、連続的に計測することは環境条件と植物生長との相互関係を研究するうえの基礎的技術と考えられる。このような観点から既報では片持はりセンサを用いて、水耕栽培状態の植物の重量生長計測法について報告した。この方法は一個体の植物の生長計測法としては植物の姿勢変化の影響を受けないなどの長所を有しているが、群落規模での重量生長を問題とする場合には計測チャンネルの数が増加し、計測管理が複雑化するなどの欠点を有していた。本研究では試料植物を群落状態で載荷板上に栽培し、それらの植物と載荷板の重量とを同時に載荷板を支持する4個の重量センサの出力の和として計測するシステムを開発した。このシステムを用いて、水耕栽培におけるシュンギクの重量生長を35日間非破壊、連続的に計測する実験を試みた。実験終了後、試料シュンギクを刈り取って秤量した結果と開発したシステムによる計測値との誤差はシュンギク群落重量の約1.5%であった。

1984年3月5日受付

実験装置

緒 言

植物の重量生長を非破壊、連続的に計測することは、植物生長研究の基礎的技術である。この観点から既報¹⁾では、片持はりセンサを用い水耕栽培状態の植物の重量計測法について報告した。この方法によると一個体の植物の重量生長および、群落状態の植物の重量生長を群落を構成している植物相互のかさなり合いが増加する段階まで計測することが可能である。しかし、群落状態の植物相互のかさなり合いが著しくなると、植物個々の重量生長を分離して計測することが困難であることが示された。また、群落を構成している植物個体数が多くなるに伴い計測に必要なチャンネル数が増加し、装置の管理も複雑になってくる。小型の軟弱野菜等の栽培においては個体の植物の重量ではなく群落全体の重量が問題とされることが多く、群落レベルの重量生長を計測することが必要である。本研究では上記の目的を達成するための計測システムを開発し、水耕栽培状態の植物の重量生長計測を行った。

群落状態の植物の重量生長計測を行うシステムは、植物栽培装置、計測装置、環境制御装置、システム制御装置から構成される。これらの装置は既報と重複する部分が多いので以下に相違した個所について記述する。

1. 載荷板

既報で開発した重量センサは、小型であること、構造が簡単で長期的な安定性を有すること、植物の姿勢変化に対して影響を受けることなく精度高い計測が可能である。植物の小群落を重量の小さな載荷板上で栽培し、載荷板と共に植物小群落の重量を測定する方式とすれば群落状態の重量生長計測を行う場合にもこの重量センサを利用することが可能であると思われた。この場合、分解能の高い計測を行うためには載荷板の重量はできる限り小さく、植物小群落の重量が十分大きくなっても損傷したり、曲げを受け計測不可能になるなどの不都合を生じないことが必要である。

実験では、載荷板として Fig. 1 に示したように寸法 $440 \times 440 \text{ mm}^2$ 、厚さ 7 mm の表面を硬質ポリエチレンシート被覆した硬質発泡スチロール板を用いた。栽培用の光源の光が植物群落内で反射することがないように表面を黒色 ヴィヴェール紙で被覆した。40 mm 間隔で 9×9 個、合計 81 個所、直径 10 mm の穴をあけ試料植物の支持部とした。上記の載荷板の四隅には、栽培液

Koji TAMAKI*: Measurement of Plant Growth in Community State Using a Loading Plate.

* Faculty of Agriculture, University of Tokyo, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

Fig. 1 Loading plate and water culture tank.

面との間隔が調整しうるように先端を針のように尖らせた 3 mm のビスをとりつけ、載荷板の支持を行った。載荷板全体の重量は 200 g であった。

植物の小群落と載荷板の重量とを支持し計測するための重量センサは厚さ 0.7 mm のバネ用リン青銅板 (J5210 P) を幅 20 mm, 長さ 150 mm に切断し製作した。ゲージ抵抗 500 Ω , ゲージファクタ 2.0, ベース寸法 5×11 mm² の箔フェステルゲージを 100 mm 離れた二断面に 2 枚ずつ 4 枚接着し、片持りの二断面に生ずるモーメントの差を検出しうるようにブリッジ回路を構成した。さらに、スプレー型テフロン樹脂液を重量センサ全面に塗布し防湿処理を行った。重量センサの設計最大荷重は 200 g, 荷重 1 g 当りのひずみ出力は 5.5×10^{-6} strain, 最大設計荷重に対する先端のたわみ量 13.8 mm であった。重量センサは 4 個 1 組で載荷板を支持し、それぞれの重量センサ出力の和を求め重量を計測する。したがって、システム全体の設計最大荷重は 800 g, 載荷板重量を除いた計測可能な植物群落の最大重量は 600 g である。重量センサの取付、載荷板、載荷板の支持状態を Fig. 1 に示した。

2. 計測システム

載荷板による重量計測は 4 チャンルの重量センサの出力を処理すれば良いので、各チャンネルにそれぞれ計装増

幅器を直結し信号増幅を行った。増幅器はオフセット温度ドリフト 0.75 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ の精密計装増幅器 (AD 524 B) を 1,000 倍のゲインで使用した。ゲージ抵抗による発熱を考慮し 1 チャンル当たり 5 mA の電流, すなわち DC 2.5 V の印加電圧を安定化電源より供給した。最大設計荷重における出力電圧は 5.775 V である。計装増幅器の出力はカットオフ周波数 1 Hz, 4 次ベッセル型低域通過フィルタを通した後, 入力範囲 0~10 V, 分解能 12 BIT, 変換速度 50 μs の 8 チャンル AD 変換器によりデジタル変換しマイクロコンピュータに入力した。

3. 環境制御システム

試料植物を栽培し計測を行うためのチャンバは既報のものを使用し、温度制御方式も同一である。栽培用の光源として、100 V, 400 W のメタルハライドランプ 2 個と 100 V, 300 W のカラー撮影用ハロゲンランプ 4 個を使用した。サイリスタを使用した調光装置によりハロゲンランプを制御しランプを組み合わせることによって、載荷板上 0~30 klux での光量制御が可能である。

4. システム制御

光源より発する熱線を吸収するフィルタ用の水循環ボ

Fig. 2 Block diagram of measurement and control system. CPU: central processing unit, CMT: cassette magnetic tape, PRT: printer, DAC: digital to analog converter, ADC: analog to digital converter, AMP: amplifier, MH: metal halide lamp, HR: halogen lamp, I/O: input and output interface.

ンプ、栽培液ポンプ、排水ポンプの ON-OFF 制御、栽培用の光源の ON-OFF 制御、測定データの温度補償を行うためのチャンバ内温度の計測、重量センサからのデータの収集と処理、等を行うためマイクロコンピュータを使用した。計測、実験制御システムの概要を Fig. 2 に示した。

載荷板を用いた重量計測上の問題

1. 載荷板上の荷重点位置による誤差

載荷板方式によって重量生長を計測する場合、温度ドリフト、ヒステリシス等の荷重計測に付随する一般的な問題のほかに載荷板方式独自の以下のような問題を有している。すなわち、この方式は測定しようとしている植物群落の重量とそれを栽培するための載荷板自体の荷重とを4個所の重量センサにより計量し、各重量センサに生ずる出力ひずみの和をとって全体の重量とする方式であるから、載荷板と重量センサの接触状態、あるいは載荷板上の荷重の位置いかにによって計測誤差を生ずる可能性がある。そこで、100 g の分銅を載荷板上の任意の位置にくり返し 35 回載荷し計測した荷重の読みの最大値は 100.6 g、最小値 99.5 g、平均値 100.2 g、標準偏差 0.36 g であった。次に、載荷板上にのせる分銅の重さを X 、そのときの計測出力を Y とする。 X を 10 g から 200 g まで 10 g ずつ増加し、そのときの X に対応する計測値を求めた。分銅の重さ X と計測値 Y との回帰直線を $Y = X$ としたとき、回帰直線からのデータの分散、標準偏差を計算した結果、それぞれ 0.24, 0.49 であった。また、分銅の値と計測値との差は最大 0.95 g であった。上述の結果から見て、載荷板による重量測定誤差は 1 g 以内であり、200 g の荷重に対し 0.5% 以内の精度で計測可能であることがわかった。

2. 測定データの温度補正

(1) 重量センサの温度特性

チャンバ内温度の制御はクーラーユニットを ON-OFF 制御することにより行った。不感帯幅は約 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ であった。チャンバ内温度の検出は温度係数 4,000 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 抵抗値 1 k Ω の感温抵抗素子 (RP 1/4 A 1 k Ω J) をブリッジ回路に構成して行った。

Fig. 3 上段の曲線はチャンバ内温度変化に伴う重量センサの出力変化を示している。曲線が急激に変動している部分は温度制御用クーラーが運転状態にあって、風による重量センサへの影響を表わしている。クーラーの運転期間を除くと、約 2°C のチャンバ内温度変化に対し重量換算で約 1 g の出力変化を生ずることがわかる。同図下段の曲線はチャンバ内温度変動に伴う感温センサの出

Fig. 3 An example of output of sensors. Upper and lower diagram indicate output of a load and a thermo sensor respectively.

力を表わしている。感温抵抗素子は金属等のブロックに埋め込んで使用していないため時定数が小さく、全体では 5°C 近くの温度変動を示している。しかし、約4分間のクーラー運転期間が終了した後は温度の変化幅、約 2°C になっている。Fig. 3 に見られるように、クーラー運転期間中計測出力はきわめて不規則に変化するので、実験プログラムではクーラー運転期間中を避けて、クーラー停止後一定時間経過後にデータの収集を行った。

(2) 温度補正

Fig. 3 で見たように、チャンバ内の温度変化 2°C に対し重量センサの出力変動は重量値換算で約 1 g 生じた。チャンバ内温度を検出し、温度と重量センサ出力との回帰曲線を求め計測データを補正することによって計測精度を高めることが可能であると思われた。チャンバ内温度制御用のクーラーの運転が停止し、チャンバ内の状態が定常になった期間について、感温抵抗素子および各重量センサ出力との回帰曲線係数を Fig. 4 にフローチャートで示したプログラムに従って求めた。測定は 30 秒間隔で 20 点、10 分間行った。回帰曲線として感温抵抗素子出力を独立変数とする二次関数を用いた。得られた結果の一例を Table 1 に示した。相関係数はいづれも 0.92 以上と高い相関を示し、データのあてはめも良好であった。次に、回帰曲線による温度補正の効果を確認するために、Fig. 5 のブロックダイアグラムで示したように直流増幅した重量センサ出力を直接記録計に記録した結果と、同じ重量センサ出力を AD 変換しマイクロコンピュータに入力した後、回帰曲線で温度補正し

Table 1 Regression parameter and coefficient of correlation.

	Ch. 0	Ch. 1	Ch. 2	Ch. 3
A0	0.886×10^4	-0.109×10^3	-0.309×10^4	0.126×10^4
A1	-2.85	0.357	1.45	-4.23
A2	0.255×10^{-3}	-0.264×10^{-4}	-0.125×10^{-3}	0.380×10^{-3}
Correlation coefficient	0.96	0.97	0.97	0.96
Standard error.	3.18	3.00	1.95	5.95

Fig. 4 Flow chart of on-line test program to estimate regression parameters between output of loads and thermo sensors. ADC: analog to digital conversion. DT: time interval.

再びDA変換したアナログ出力を記録した結果とを比較した。Fig. 6は上述の処理結果を示す一例である。同図上段は重量センサの直接出力、下段は温度補正を行った出力を記録した結果である。直接出力の温度による変動は重量値換算で約1gであるのに対して、温度補正を行った場合、約0.1gと1/10程度に出力変動が抑えられ温度補正による効果が示されている。Fig. 6の例は、重量センサ出力と感温抵抗素子出力との相関係数が0.97と相関の高い場合であるが、相関の最も悪かった0.79の場合でも温度補正を行うことによって出力変動を1/2以下に抑えることができた。この場合でも、二次曲線以外の適当な回帰曲線を用いることによってさらに精度を上げることは可能であると思われる。なお、Fig. 6の結

Fig. 5 Block diagram of test systems and flow chart of test program to check effectiveness of thermo compensation of load sensor's output. AMP: amplifier, ADC: analog to digital converter, CPU: central processing unit, DAC: digital to analog converter, DT: time interval, $F(X)$: compensation function.

果は Fig. 5 下段にフローチャートで示した実験プログラムに従って得た。プログラムからわかるようにチャンバ内温度制御用クーラーの運転期間中はデータの収集は中断し、定常状態時のデータについてのみ取り込んで温度補正を行った。Fig. 6を見ると、チャンバ内温度変化による重量センサ出力の変動はほぼ同じような過程をくり返していることがわかる。したがって、チャンバ内温度制御用クーラーの運転期間が終了し一定期間が経過した時点で、常に重量センサの出力を計測することによってかなりの精度高い計測が期待しうと思われる。載荷板上に試料植物を植付けないが、システムを栽培計測時と同一の状態に保ち、計測時間間隔を30分として15時間、重量センサ出力のゼロ点移動を計測する実験を行った。測定はクーラー運転停止後150秒に行い、各重量セ

Fig. 6 An example of effect gained by thermo compensation of load sensor's output. Upper and lower diagram indicate non-compensated and compensated output respectively.

ンサについて 50 点データを収集し平均を求め測定値とした。ゼロ点移動の標準偏差は各重量センサについて重量値換算最大 0.28 g, 4 個の重量センサの和については 0.56 g であった。この値は載荷板の計測可能な植物群落の最大重量 600 g の 0.1% 以下であり、回帰曲線による温度補正を行った場合に比し 5 倍程度大きくなるが、チャンバ内の温度条件を変化させない栽培実験では十分実用的な計測法であると思われる。

実験および結果

1. 栽培条件

開発した載荷板による重量計測システムを用いて群落状態の植物の生長計測実験を行った。試料植物として、シュンギク (*Chrysanthemum coronarium*) を使用した。ピーカ中に活性炭素中を通過させた水を満たし、シュンギクの種子を水表面上に浮かした状態で 4 日間経過させ、発芽した苗を厚さ 2 mm の発ぼうスチロール板に格子間隔 10 mm, 直径 1 mm 程度の穴をあけ植付けた。苗を植付けた発ぼうスチロール板を、水 300 cc に対して 300 mg の粉末肥料 (ハイポネックス) を溶かした水耕液を満たした容器中に浮かせ、室温 20°C の恒温室内で植物栽培用蛍光灯の照明下で 7 日間栽培した苗を実験に使用した。実験に用いた試料苗 25 個体合計の重量は 925 mg, 平均個体重 37 mg であった。これらの試料苗を 40 mm 間隔で載荷板上の穴に発ぼうスチロールで茎部を保持し取付けて実験を行った。

Fig. 7 において、実線は一日中快晴で、しかも全日建

Fig. 7 Light intensity change as time of day proceeds. Circles are measured data and were gained at November 14 in the campus of Univ. Tokyo where was all day long shaded by buildings. Full and dotted lines indicate an estimated curve connecting measured data and simulated light pattern used in the test.

物の影になっていた東京大学構内のある場所において 1 時間ごとに水平照度を測定した結果を表わしている。同図点線は実線で表わされた水平照度パターンに近似して栽培計測実験で与えた光照射パターンを示している。すなわち、実験開始直後、4 klux, 8 klux, 12 klux の照射時間は各 70 分×2, 100 分×2, 260 分, 合計 600 分間として、1 日 2 分ずつ 12 klux の光照射時間を短縮した。同時に、初期設定値を 20°C としたチャンバ内温度を 6 日に 0.5°C の割合で温度調節器のダイヤルを手動で設定することにより低下させた。これらの光、温度条件は 10 月 15 日から 35 日間の東京における気象条件の一部を模擬したものである。10 l の蒸留水に 5 g の割合で粉末状肥料 (ハイポネックス) を溶かしたものを水耕液として使用した。容量 50 l の栽培槽と水耕液を循環させる水槽全体の水耕液量は 100 l で、5 日ごとに 10 l 水耕液を交換した。

2. 実験プログラムと結果

Fig. 8 にフローチャートで示したプログラムに従って実験を行った。計測の時間間隔は 6 時間、1 日 4 回とした。フィルタ用の蒸留水、および水耕液は 3 時間ごとに 20 分間ポンプを運転し循環させた。実験開始に先だって各計測チャンネルのゼロ点、較正值、温度補正係数を入力した。各サブルーチンの実行時刻になると、計測、ポ

Fig. 8 Flow diagram of experiment program. TM: measurement time, TP: pump operating time, TL: light operating time, ADC: analog to digital conversion.

ンプ運転・停止, 栽培用ランプの点燈・消燈等が実行される。計測はポンプにより栽培水槽から水耕液を排除した後, 一定時間が経過し試料植物の根部に付着している水が十分除かれた状態で行った。この経過時間は既報¹⁾で述べたように, 測定時の各チャネルの出力を随時記録

計に出力し確認しながら設定した。実験では, 実験開始直後 20 秒, 終了直前で 120 秒であった。各重量センサの出力を 100 点 AD 変換し, 平均値を求め測定値とした。計測時刻と計測時刻の間の時間を利用して, 実験パラメータの再設定, データのプリンタ出力, 再計測, 収集データの重量換算, 生長過程のグラフィック表示, 等の各種処理の実行が可能である。

Plate 1 Measuring weight of plant (*Chrysanthemum coronarium*) in community state by the use of load plate.

Table 2 Experimental results obtained from plants in community state.

No.	Weights measured by a balance			
	Subterranean part (g)	Terrestrial part (g)	Total weight (g)	Dry weight (g)
1	7.98	1.02	9.00	0.386
2	4.98	0.27	5.25	0.260
3	8.84	0.66	9.50	0.523
4	2.96	0.11	3.07	0.123
5	4.32	0.40	4.72	0.236
6	7.17	0.55	7.72	0.389
7	8.43	1.24	9.66	0.514
8	1.83	0.11	1.94	0.077
9	4.31	0.23	4.54	0.221
10	4.63	0.34	4.97	0.234
11	2.69	0.26	2.95	0.133
12	3.45	0.40	3.85	0.204
13	8.87	0.95	9.82	0.544
14	3.78	0.20	3.98	0.186
15	6.03	0.45	6.48	0.343
16	6.94	0.51	7.45	0.382
17	2.09	0.18	2.27	0.100
18	4.03	0.46	4.49	0.217
19	6.98	0.54	7.52	0.399
20	3.45	0.13	3.59	0.159
21	3.84	0.11	3.95	0.196
22	10.75	1.03	11.78	0.623
23	1.87	0.04	1.91	0.071
24	5.35	0.25	5.60	0.249
25	6.71	1.42	8.13	0.466
Total	132.28	11.87	144.16	7.256

実験は 35 日間, 840 時間行った。実験終了後, 試料シュンギクを刈り取って秤量した結果を Table 2 に示した。計測システムによる群落植物重量の測定値 146.3 g に対して, 秤量値 144.1 g であり, 測定誤差は試料植物群落重量の 1.5% 以内であった。この値を単純に 10 a 当りの収量に換算すると約 3,600 kg となり, シュンギクの推定施設内反収 2447 kg²⁾ の約 1.5 倍の収量に相当している。

計測した試料シュンギクの植物群落の生長曲線を Fig. 9 に示した。この段階では, 生長は指数生長を示しており飽和している状態には達していないと思われる。

Fig. 9 Growth curve of plant (*Chrysanthemum coronarium*). Experiment was carried out by setting light condition shown in Fig. 7.

文 献

- 1) 玉木浩二. 1983. 片持はりセンサを用いた植物重量

生長計測. 生物環境調節 21: 27-35.

- 2) 小田雅行・景山美葵陽. 1980. 省エネルギー時代における施設野菜の選択. 農業および園芸 55: 243-248.

Summary

Continuous and nondestructive measurement of plant growth in weight is considered to be one of the fundamental techniques used in studying mutual relations between plant growth and its environment. In the previous paper, a method of weighing growth of plant cultivated in water culture by the use of cantilever beam sensors was reported. In single cultivation, this method had some merits on measuring weight growth of a plant such as was not affected by changes of plant's posture, whereas in community state had demerits such as more channels for measurement and complicated operations were required.

In this paper, developing new measurement system of plant growth in community state was reported. The system was composed of two parts. The one was four load sensors and the other a loading plate. The former was the cantilever beam sensors developed in the previous paper and the latter, supported by the former above a water culture tank, was provided for the purpose of holding plants in community. The net weight of plant in community state could be measured by summing up the outputs of four load sensors and subtracting the weight of the loading plate.

By using these measurement systems and setting light condition showed in Fig. 7, an experiment was carried out for 35 days, in order to measure weight growth of *Chrysanthemum coronarium* in community state cultivated in water culture. The result was shown in Fig. 9 and the difference between weight measured by the loading plate and by a balance was about 1.5% of total plant weight in community state.

(Received March 5, 1984)