機械的刺激による植物の短期育成に関する基礎研究 (第2報)*

—風の適応周期が植物の生長に及ぼす影響—

出口 陽平** 石田 和義*** 岡田 勝蔵***

A Fundamental Study on the Short-term Growth of Plants by Mechanical Stimulation (2nd Report)

—The Effect of Artificial Wind Period on Plant Growth—

Yohei DEGUCHI, Kazuyoshi ISHIDA and Katsuzo OKADA

In our earlier report, the results demonstrated that the addition of mechanical stimulation by artificial wind and vibration was related to an increase in the amount of moisture transported in the plant. The increased amount of moisture transported in the plant will activate photosynthesis and increase the absorption of nutrients from the roots. Based on those earlier results, the present study entailed providing artificial wind via mechanical stimuli to the Komatsuna plant (botanical name: *Brassica campestris*) and examining the relationship between the amount of growth (leaves area and total weight) and the photosynthetic rate in this plant. We used 1, 10, 30, 60 and 120 minutes as wind periods, with an artificial wind of 0.5 m/s. For example, a 30-minute wind period consisted of 15 minutes of wind time and 15 minutes of windless time. As a result, we confirmed that both the photosynthetic rate and the amount of growth with artificial wind during the 30-minute wind period increased compared to the windless case. This result was qualitatively proved by the simulation of photosynthetic rate using the electrical circuit model.

Key words: mechanical stimulation, short-term growth, wind period, photosynthesis rate, electrical circuit model

1. 結 言

植物の生長に影響する環境要因としては、光、二酸化炭素、水、温度、湿度、風などがあるが、風に関する研究は非常に少ない。前報¹⁾では、人工風や機械振動の機械的刺激を植物に付与したときの植物内水分移動量を実験的に求め、水吸上げ増加量が風速や機械振動の振幅の増大に伴って大きくなり、風速1.5m/s以上で飽和することを明らかにした。風速と光合成に関する研究はトウモロコシ、イネ、キュウリなどにおいて調べられている^{2)~4)}。しかし、風の適応時間、適応周期が植物の生長に及ぼす影響に関する研究はないように思われる。

本研究の目的は、短期育成の植物からミネラル含有水を強制的に取得するための植物ポンプに関する基礎資料を得ることである。そこで水耕栽培用小型インキュベータを用いて、あおい小松菜に人工風の機械的刺激を付与し、風の適応周期が生長に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 水耕栽培

実験では、種を蒔いてから30日位で収穫できるあおい小松菜を用いて、植物育成用蛍光灯による水耕栽培を行なった。

水耕栽培として保水性に優れ、植物に十分な水と空気を供給できるロックファイバー（(株)日東紡績）を培地とし、液肥は大塚ハウス1号、大塚ハウス2号（共に(株)大塚化学）を3:2の割合で混合し水溶させた標準培養液を用いた。

2.2 光合成速度測定法

図1に光合成速度測定機の概略図を示す。マイコンでファンの風速と適応時間、適応周期を制御し、箱の内部は光の反射率を高めるためアルミ箔を貼り付けた。上部は光を透過させるため透明のエンビ板により蓋をして、箱内部のCO₂の濃度減少量より風の適応周期が光合成速度に及ぼす影響を調べた。

本葉が5, 6枚になる種蒔後21日もしくは22日目に、生育の良い4株のあおい小松菜を水耕栽培用の鉢ごと図1の測定機用箱に入れ、CO₂濃度を約1200ppmに設定して密閉した。その後、光合成による濃度の減少量を1時間毎に測定した。種蒔後21日目のあおい小松菜4株の写真を図2に示す。なお、風による葉と葉の摩擦は植物の生長を遅らせる懸念がある⁵⁾ことから、本実験では株間ができるだけ広くなるように配置した。

実験時間は10時~16時とし、風速0.5m/s、風の適応周期は1分、10分、30分、60分、120分である。ここで例えば、風の適応周期10分とは、風を5分間付与した後、5分間付与しない動作の繰返しを意味する。なお、風を付与しない無風時の場合も調べた。

光合成速度 v (gCO₂/m²/h) は、みかけの光合成量に呼吸量を加えた真の光合成量⁶⁾として式(1)より求めることができる。

$$v = \frac{\rho V(d_1 + d_2)}{10^6 A} \quad (1)$$

ここで、 ρ : CO₂の密度 (g/m³)、 V : 箱内部の体積 (m³)、 d_1 : 光合成によるCO₂の吸収量 (ppm/h)、 d_2 : 呼吸によるCO₂の排出量 (ppm/h)、 A : あおい小松菜4株の合計葉面積 (m²) である。本研究では箱内部の温度26℃、1気圧時のCO₂の密度1801.8g/m³、箱内部の体積0.0359m³における式(1)の光合成速度

* 原稿受付 平成17年1月4日

** 学生会員 山梨大学大学院（甲府市武田4-3-11）

*** 正会員 山梨大学大学院

Fig. 1 Schematic diagram of the tester

Fig. 2 Komatsuna

Fig. 3 Appearance of the incubator for plants

Table 1 Experimental conditions

Chamber Temperature		26 °C
Humidity		60 %
Liquid manure temperature		22 °C
CO ₂	Concentration	1200 ppm
	Giving time	a.m.6 ~ p.m.6
Light	Brightness (Photosynthetic photon flux)	12000 Lx (240 μmol/m ² /s)
	Irradiation time	a.m.6 ~ p.m.6
Wind	Velocity	0.5 m/s
	Giving time	a.m.10 ~ p.m.4
	Period	1 min, 10 min, 30 min, 60 min, 120 min

を用いた。

2.3 生長量測定法

図3に本研究で用いた水耕栽培用小型インキュベータの概観写真を示す。インキュベータの外形は縦×横×奥行が660×700×500mm³、栽培空間は370×700×500mm³である。インキュベータ内の温度、湿度、液肥の温度、二酸化炭素濃度、風速、風の適応周期はマイコンにより表1の条件に設定して実験した。

図4にインキュベータ内の概略図を示す。蛍光灯と栽培室の間に隔離用の透明なエンビ板を設置し、蛍光灯を常時ファンで冷却した。栽培室の内壁は光の反射率を高めるためアルミ箔を貼り付けた。

種蒔後の14日間はCO₂を付与せず無風下において発芽させた。その後、生育の良い12株のおおい小松菜について、無風4株、風の適応周期10分、30分を各4株ずつ、の3つに分けて14日間（種蒔後28日間）実験した。7日毎に葉面積を、また、実験後に全体の重量を測定した。この測定は3回繰り返して行った。

Fig. 4 Schematic diagram of the incubator

Fig. 5 Photosynthesis rate versus wind period

Fig. 6 Relative photosynthesis ratio versus wind period

3. 実験結果

3.1 光合成速度

風の適応周期に対する光合成速度を図5、相対光合成速度比を図6に示す。ここで、相対光合成速度比とは無風時の光合成速度を基準とした光合成速度の相対比を示す。なお、無風、風の適応周期30分、120分の測定は2回繰り返して行ったが、いずれも誤差は1%以内であった。図6より、風の適応周期1分、10分、60分、120分の相対光合成速度比は1.00±0.02であるが、30分では1.10の最大値を示すことがわかる。

3.2 生長量

本葉が大きくなり始める14日目以降の無風、風の適応周期10分、30分における1株当たりの葉面積の経日変化を図7に示す。これより、種蒔後21日目から28日目の間で葉の生長は促進されていることがわかる。

得られた1株あたりの葉面積平均値を図8、全体（葉、茎、根）の重量平均値を図9に示す。なお、横軸は風の適応周期である。

Fig. 7 Total leaf area per bundle of several leaves versus time

Fig. 8 Total leaf area per bundle of several leaves versus wind period

Fig. 9 Total weight per bundle of several leaves versus wind period

Fig. 10 Relative growth ratio versus wind period

Fig. 11 Results of plant growth for 28 days

Fig. 12 Photosynthesis rate versus wind period converted into frequency

いずれも大きなばらつきを示すが、葉面積、全体の重量の算術平均はいずれも風の適応周期 30 分が最大であることがわかる。

図 8, 9 より得られる風の適応周期に対する相対生長比の変化を図 10 に示す。ここで、相対生長比とは無風における葉面積、全体の重量を基準とした相対比である。同図から、葉面積、全体の重量はいずれも対応する曲線形状を呈しており、風の適応周期が 30 分で葉面積 1.36、全体の重量 1.44 の最大値を示す。無風、および風の適応周期 30 分において得られたあおい小松菜の概観写真の一例を図 11 に示す。また、図 6 および図 10 から、光合成速度と生長量は風の適応周期に対して対応関係にあることがわかる。

4. シミュレーション

4.1 電気回路モデル

あおい小松菜に風速 0.5m/s の微風を周期的に付与し、水吸上げ量を増加させることによって、光合成の活性化や根から吸収する栄養分の増加による生長促進効果を期待して実験した結果、風の適応周期 30 分ときの光合成速度、生長量はともに無風の場合よりも良好であることがわかった。そこで、光合成速度と植物内の水吸い上げ量の間に比例関係があるとの仮定において、風の適応周期と植物内の水吸い上げ量（光合成速度）の関係を電気回路シミュレーションにより考察する。

本研究における風の適応周期は、例えば 10 分の場合、風を 5 分間付与した後、5 分間付与しない動作の繰返しである。そのため、本研究の風の適応周期は全て周波数変換させることができる。図 5 の横軸を周波数変換（対数軸で表示）したときの光合成速度一周波数曲線を図 12 に示す。なお、同図の測定点は左から風の適応周期 120 分、60 分、30 分、10 分、1 分に対応する。

Fig. 13 Simple model of moisture transport

Fig. 14 Electrical circuit model of moisture transport

Fig. 16 Current versus frequency on wind model of electrical circuit simulation

 (a) Wind model (b) Windless model
Fig. 15 Electrical circuit simulation analysis

以下では図12を再現する電気回路モデルに基づくシミュレーションについて述べる。大気の水蒸気圧勾配に伴う水分移動の原動力を直流電圧で、各組織・部位・器官の抵抗を電気抵抗で、水分移動量に相当する光合成速度を電流で示すことにより得られる植物の簡易モデル¹⁾を図13に示す。ここで、R1は根の抵抗、R2は茎の抵抗、R3は液体から気体への変換抵抗、R4はクチクラ抵抗、R5とR6は気孔抵抗、R7は境界層抵抗、V1は水蒸気圧差、V2は風の適応周期、に対応する。

図13の電気回路モデルを図14に示す。前報¹⁾では、水分移動の飽和に対応させるため、トランジスタ回路を用いた。本報では光合成速度が風の適応周期30分で増大することを示すことから、共振現象を有するRLC直列回路²⁾を、また、風は連続付与ではなく、周期的付与であることから、交流電圧V2を用いた。

4.2 シミュレーション

シミュレーションには電子回路シミュレータ PSpice を用いた。図14の電気回路において直流電圧V1と交流電圧V2を併用してシミュレーションすることはソフトウェアの制約上不可能であることから、風を付与したときの電気回路モデル図15(a)と

無風時の電気回路モデル図15(b)とに分けて解析した。回路中の各抵抗値、電圧値は前報¹⁾の値を参考に決定し、また、コンデンサとコイルの値は、図12の光合成速度測定結果で最大値となるときの周波数を共振周波数となるよう任意 ($C1=50F$, $L1=1.64kH$) に決定した。葉の境界層抵抗 R7 は、無風時で 2.5Ω , $0.5m/s$ で 0.35Ω とした。本研究では風の適応時間の総和と無風時間の総和が等しいため、風を周期的に付与したときの境界層抵抗 R7 は 1.425Ω とした。交流電圧 V2 では電圧値が風速に、また、周波数が風の適応周期に対応する。

シミュレーションの結果、風付与時の図15(a)では $0.56mHz$ のとき電流が $0.16A$ の最大値を示す図16となり、無風時の電気回路モデル図15(b)では電流 $1A$ が流れる。したがって、図15の(a)と(b)の合成回路である図14のシミュレーションは図16の電流軸を $1A$ シフトした曲線に相当する。これより、図12の実測値はシミュレーションにより定性的に裏付けられる。

5. 考 察

風の適応周期 30 分で光合成速度が増大するメカニズムを図14および図15の電気回路モデルで考察する。植物の葉内にRLC直列回路に対応するメカニズムが存在すると仮定すれば、共振曲線の形状はLとCに依存して変化する。LとCの積を一定としてLとCの値を変化させた図16より、Lを大きくしCを小さくすれば、共振曲線の鋭さは特定の共振周波数でインパルス波形の近似形状となる。なお、RLC直列回路におけるL、Cと植物メカニズムとの関連は不明である。

小松菜における風速と光合成の関係がキュウリのそれ²⁾に対応するものと仮定すれば、小松菜の光合成は風速に伴って増大し、 $0.5m/s$ 以上の風速で飽和する。光合成がある風速で最大になる理由として、①風速が大きくなると境界層が薄くなり炭酸ガス拡散が容易になること、②風による機械的振動に起因して水吸い上げ量が増大すること、の2つの重畳効果をあげることができる。後者の効果は、風速あるいは振動振幅が大きくなると水吸い上げ量は増大し、ある振幅で水吸い上げ量が飽和することを前報のボトス¹⁾において確認した。さらに、本報では最大の光合成を示す風の適応周期が存在することを明らかにした。

光合成が人工風の適応周期に依存する原因のひとつとして機械的ストレスが考えられる。植物が水分過剰や水不足になると水ストレスが現れる。水分過剰では酸素を必要とする根の呼吸が阻害されるため、根の嫌気生活が水ストレスの原因と考えられている³⁾。しかし、本研究の機械的刺激に起因する機械的ストレスの関与、あるいはそれと水ストレスの関連については現在

明らかでなく、今後の課題である。

6. 結 言

本研究では、あおい小松菜の生長に及ぼす人工風の適応周期について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 風速 0.5m/s を適応周期 30 分とすることで、光合成速度は無風時に比べ約 10% 向上した。
- (2) 風速 0.5m/s を適応周期 30 分とすることで、無風状態に比べ、葉面積は 36%、全体（葉、茎、根）の重量は 44%、それぞれ向上した。
- (3) RLC 直列回路の電気回路モデルを用いることで、風の適応周期が光合成速度に及ぼす影響をシミュレーションできた。

謝 辞

本研究の一部は高橋産業経済研究財団による助成をもとに進め

たものである。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 石田和義, 出口陽平, 岡田勝蔵: 機械的刺激による植物の短期育成に関する基礎研究 (第1報) — 機械的刺激を考慮した植物の水分移動シミュレーションモデルの構築 —, 精密工学会誌, **69**, 12(2003)1780.
- 2) 矢吹万寿, 宮川秀夫: 風速と光合成に関する研究 (第2報) — 風速と光合成との関係 —, 農業気象, **26**, 3(1970)21.
- 3) T. Takeda: In Photosynthesis and Utilization of Solar Energy, Level III Experiments, Contribution to IBP from Japan, (1968)80.
- 4) J. D. Hesketh, R. B. Musgrave: Crop Sci., **2**, (1962)311.
- 5) 松浦昌平: 循環扇でトマトの灰色カビ病激減!, 現代農業, 12(2004)152.
- 6) 増田芳雄 編著: 絵とき 植物生理学入門, オーム社, (1988)84.
- 7) 鈴木雅臣: フレッシュヤーズに贈るインピーダンスすっきり講座, トランジスタ技術, **41**, 5(2004)191.
- 8) 網野真一, 駒嶺穆 監訳: 植物生理学, シュプリンガー・フェアラーク東京, (1998)528.