

第2章 人工光源とその光質が数種蔬菜の生育に及ぼす影響

近年、気象条件などに左右されない栽培法として植物の工場的生産が注目されている。もともと、植物の工場的生産（植物工場）は、海底や宇宙空間、砂漠といった不毛な場所での人間の食料生産を目的として計画された。しかし、都市空間など十分栽培面積を確保することができないところでも植物を生産することができるということで、スーパーマーケットなどに併設し、その場で生鮮野菜を生産する事例もある（小倉、1998）。一方、植物の工場的生産を実用化するためには、解決しなければならない問題点が多く存在する。たとえば、設備や栽培のための費用の節減や、人工環境下での短期間の栽培に起因すると考えられる低品質生産物の改善等である。人工光源を作物の生育促進に利用する植物工場の場合、人工光源がこれらの問題点について関与する部分は大きい。

植物工場は光源の種類によって分類でき、自然光人工光併用型と人工光専用型の2種類に大別される（鈴木ら、1995）。しかし、いずれの場合も、人工光源を使用して植物の生育を最大にすることを目的としている。序章や第1章でも述べたように、現在、植物栽培に使用されている代表的な人工光源としては、白熱灯、メタルハライドランプ、高圧ナトリウムランプ、水銀ランプ、蛍光灯等が知られている。蛍光灯については、光合成や形態形成に作用する波長分布特性について検討した3波長型ならびに4波長型の植物育成用蛍光ランプが開発されている（田澤、1997）。しかし、蛍光灯は1灯当たりの出力が小さく（田澤、1997），高圧ナトリウムランプやメタルハライドランプのように強光条件を作り出すことが難しく、トマトなど生育に十分な光強度を要求する作物の試験を行うことは難しい。ところが、高圧ナトリウムランプやメタルハライドランプのような光源は、大幅に偏った波長分布特性をもたせることが難しく、蛍光灯の様に自由に波長分布を調整することができないことから、光質に関する研究は限定される。

陽光ランプは、太陽光に波長分布特性が近いものの、光合成有効放射外の赤外線の量が多く、光合成有効放射の発光効率が悪い。一方、陽光ランプと同じメタルハライド系ランプでも波長分布を光合成有効放射の単色波長域に集中させた光源の場合、光

合成有効放射で比較すると発光効率が陽光ランプよりも高くなるはずである。植物工場での光合成促進に人工光源を用いる場合、上記の様な光源が陽光ランプと同程度の生育を達成することができるのであれば、陽光ランプに代わって植物工場において使用することができる。筆者は、東芝が試作した波長分布が赤、黄、緑、青色の波長域に集中している4種類のメタルハライド系ランプを使用し、人工光源による光環境としては比較的強光条件において波長分布の偏った光環境を設定し、光合成有効放射波長域の光質の違いが、数種蔬菜の生育ならびに光合成にどのような影響を及ぼすかを調査し、人工光源の波長分布特性と植物の生育に関する考察を行った。

2-1 人工光源の光質が数種蔬菜の生育に及ぼす影響に関する生長解析

従来、植物栽培に使用する光源の研究では、その光強度と光合成あるいは生育との関係が主に調査されてきた。特に、太陽からの放射量が少ない北欧では光合成補助のための補光光源の重要性が指摘されており、人工光源の有効性が検討されている。また、環境制御室を使用し、各種人工光源を比較した例もある。Helson (1964) は、グロースチャンバーの光源について、冷白色蛍光灯の光に白熱灯の光を加えることによって、トマトの生育が向上したことを報告し、植物の生育に、400-700nmの波長域の光である光合成有効放射が重要であることを示した。Deutch and Rasmussen (1974) は、蛍光灯とメタルハライドランプにおいてトマトの生育を比較し、赤外線を多く含むメタルハライドランプでは茎の伸長が促進されることを報告した。Grimstad (1981) は、蛍光灯、低圧ナトリウムランプ、メタルハライドランプ、白熱灯下でトマトを栽培し、低圧ナトリウムランプ下での生育がもっとも良かったことを示した。しかし、このような光質による生育の違いをもたらす要因に関する解析は進んでいない。

光質が、植物の光合成速度に及ぼす影響については比較的研究が進んでおり、光合量子取率に基づき、光合成有効放射の範囲内では赤で高い一方、青、緑、黄の波長域の光の下では比較的光合成速度が低いとされている (McCree, 1972)。しかし、植物の生長は光合成速度だけで決定されるわけではなく、葉の形状や葉面積などの受光体勢による影響も大きいと考えられる。光質は、植物の形態に様々な影響を及ぼす (福田ら, 1993a,c)。したがって、光質が植物の生育に及ぼす影響を評価する場合は、植物の同化能力と形態形成の両面から考察する必要がある。

植物の生育については、生長解析によって要因別に検討を行うことができる（今井、1981）。生長解析は、植物の生長量を、相対成長率（RGR）、純同化率（NAR）、葉面積比（LAR）によって説明する。本節では、対象とする植物を果菜類ならびに葉菜類からそれぞれ2種類ずつ選び、太陽光に波長分布の近い陽光ランプと、光合成有効放射の波長域である赤、黄、緑、青の各波長域に偏った人工光源の光質が生育に及ぼす影響を生長解析手法を用いて分析した。

2.1.1 材料および方法

供試品種および育苗：光質に関する蔬菜における試験では、トマト（Helson, 1964; Deutch and Rasmussen, 1974）やマメ科植物（Roberto et al., 1992）、レタス（Tibbitts et al., 1983; Knight and Mitchell, 1987）、ホウレンソウ（Tibbitts et al., 1983）などの植物を扱った事例が多い。本実験では、過去の事例と比較しやすいように、また属の異なる植物で今回設定した光条件下での反応を観察できるようにトマト‘TVR-2’（サカタのタネ）、わい性インゲンマメ‘EZ-PICK’（味の素東海シーズ）、レタス‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）、ホウレンソウ‘リード’（同）を選び供試した。いずれも農林水産省農業工学研究所別棟に設置された小型環境実験室で、バーミキュライトに播種した。発芽後、インゲンマメは5日間、トマト、レタス、ホウレンソウは7日間経過後水耕装置に移植し、トマトは第5葉出葉時、インゲンマメは本葉2枚が完全に展開するまで、レタス、ホウレンソウとともに本葉5枚が完全に展開するまで水耕育苗した。育苗時の環境条件は、光はメタルハライドランプを光源とし、光合成有効光量子束（PPF）で $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、気温は 22°C 、明暗各12時間とした。育苗に使用した培養液は大塚ハウス肥料A処方（pH 5.5, EC1.7 dS/m）である。

人工光源：今回の実験で使用した光源は、東芝製ランプの白、赤、黄、緑、青の5種類で、それぞれ第2.1.1図に示すような波長分布特性を有するものである。いずれのランプも、メタルハライド系のランプである。白は、陽光ランプ（D400、東芝ライテック）である。赤、緑、青は、メタルハライドランプにLi, Cu, Mgをそれぞれ封入した東芝ライテック製HID系400Wランプであり、黄は高圧ナトリウムランプ（NH360、同）である。各光源の各波長帯が全体に占める割合を第2.1.1表に、また、植物の生理有効放射の波長分布についてその比を示したもの第2.1.2表に示す。特徴としては、赤、黄、緑、青の各可視域に偏った波長分布が得られ、従来型のメタルハライド系ラ

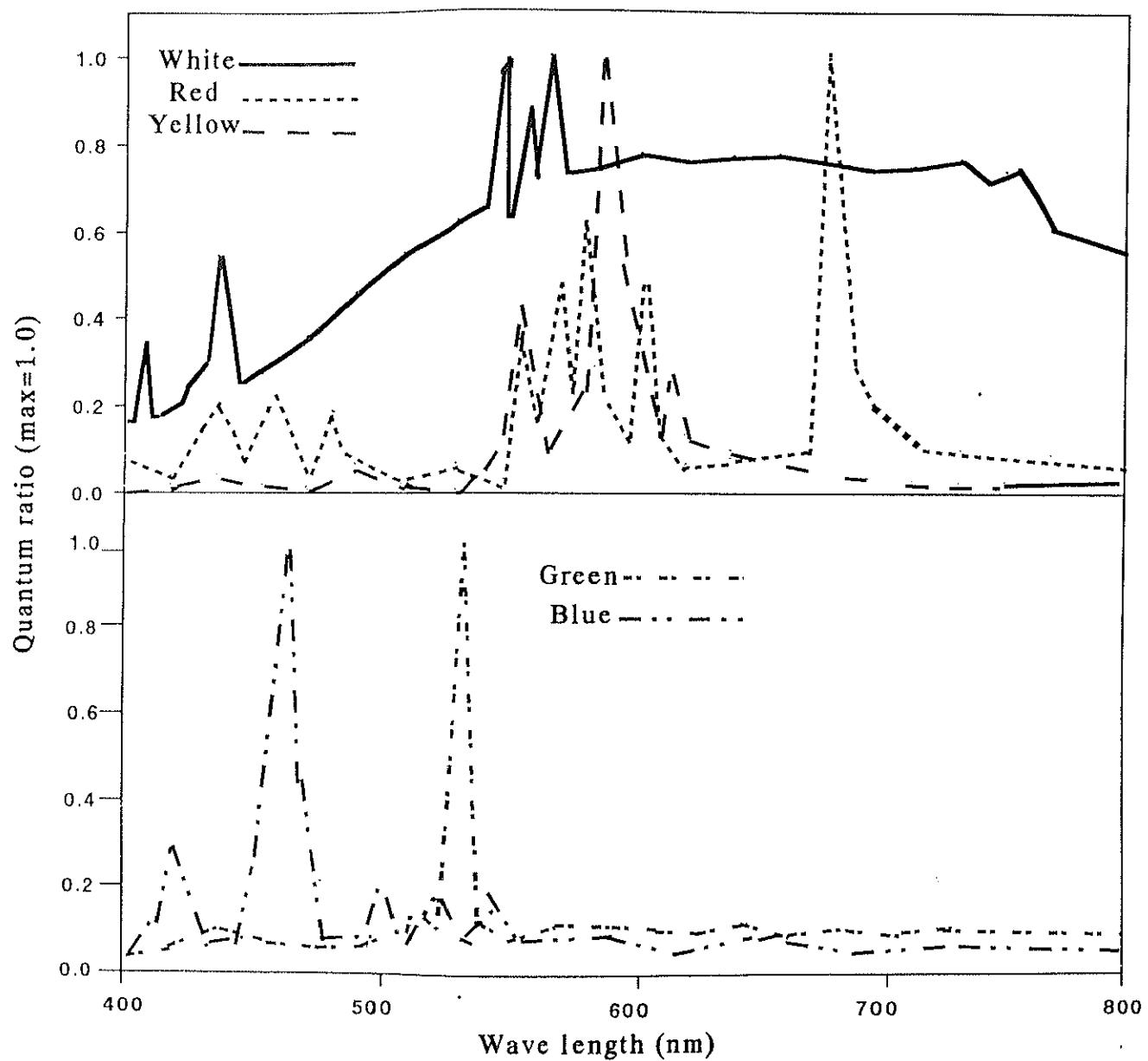


Fig. 2.1.1 Spectral composition of photosynthetic photon flux (PPF) of the white, red, yellow, green and blue lamps used in this experiment.

Table 2.1.1. Relative quantum distribution in percentages of total quanta.

	UV-A	Blue	Green	Yellow	Red	Far red	Infrared	
Wave length (nm)	330-400	400-500	500-550	550-600	600-700	700-750	>750	
Lamps	White	2.25	9.67	5.69	10.41	15.31	10.00	46.67
	Red	1.80	6.77	2.68	21.41	32.62	4.60	30.12
	Yellow	0.35	3.17	0.36	47.06	5.85	1.11	42.45
	Green	7.43	9.07	33.95	5.49	6.68	3.70	33.68
	Blue	6.15	40.88	5.84	6.68	5.18	3.62	31.65

-18-

Table 2.1.2. Relative quantum ratio between the various regions of activating phytochrome.

(Derived from Table 2.1.1)

	Blue/Red	Blue/Far red	Red/ Far red	Visible/Infrared	
Lamps	White	0.63	0.97	1.53	1.02
	Red	0.21	1.47	7.09	2.13
	Yellow	0.54	2.85	5.27	1.35
	Green	1.36	2.45	1.81	1.61
	Blue	7.90	11.28	1.43	1.72

ンプ（田澤、1997）では得られない青色光／赤色光比や赤色光／遠赤色光比など形態形成に関係する波長帯別エネルギー比となるように設定した。

光強度は強弱2段階とし、ランプの数と植物体からランプまでの距離により調節した。トマトの場合は茎頂付近において、インゲンマメの場合には群落頂上付近において、それぞれPPF値でトマトでは400および200、インゲンマメでは300および $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、レタスならびにホウレンソウは250、 $125 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ という強弱2段階の光強度を設定した。光強度は、栽培中生育に伴って調節した。なお光強度ないし波長分布は、アナログ万能光度計Li-185（ライカ社）ならびに波長別エネルギー分析装置Li-1800C（同）により測定した。

栽培条件：実験処理は、小型環境制御室（第2.1.2図）にそれぞれ設けた各光質処理区において行った。その処理区は、各光源ごとに白色光区（白）、赤色光区（赤）、黄色光区（黄）、緑色光区（緑）および青色光区（青）の5区とした。小型環境制御室は、コンピュータ制御による空調を行い気温を一定条件に維持するように設計しており、それぞれ個別の環境条件で実験を行うことができる。環境条件は明/暗各12時間、気温22°C、相対湿度70%とした。培養液は大塚ハウス肥料A处方（pH 5.5、EC 2.0 dS/m；N 10.5、P 2.9、K 4.3、Ca 4.7およびMg 2.1 me/l）を使用した。処理開始時、60×75cmの水耕用パットに、トマトは10個体、インゲンマメは8個体定植し、トマトは14日間、インゲンマメは30日間、レタスならびにホウレンソウは各処理区20個体定植し15日間各光源の下で水耕した。

調査項目：実験開始後トマトは14日目に、インゲンマメは30日目にそれぞれ、トマトは5個体を、また、インゲンマメは4個体を採取し、葉数、葉面積、葉長、葉幅などを測定し乾物重を求めた。レタス、ホウレンソウについては、実験開始時に各区15個体ずつ定植し、実験開始後5、10、15日目に各区5個体を採取し、葉数、葉面積などを調査し、その後乾物重を求めた。実験は、同じ条件で2回繰り返し、データは繰り返しの平均値とした。また、求めたデータについては今井（1981）の方法を参考にして生長解析を行った。

2.1.2 結 果

トマトならびにインゲンマメでは、強光条件の場合、緑において処理開始後5～6日に両作物ともに葉焼け様の症状が発生した。しかし弱光条件では、そのような症状

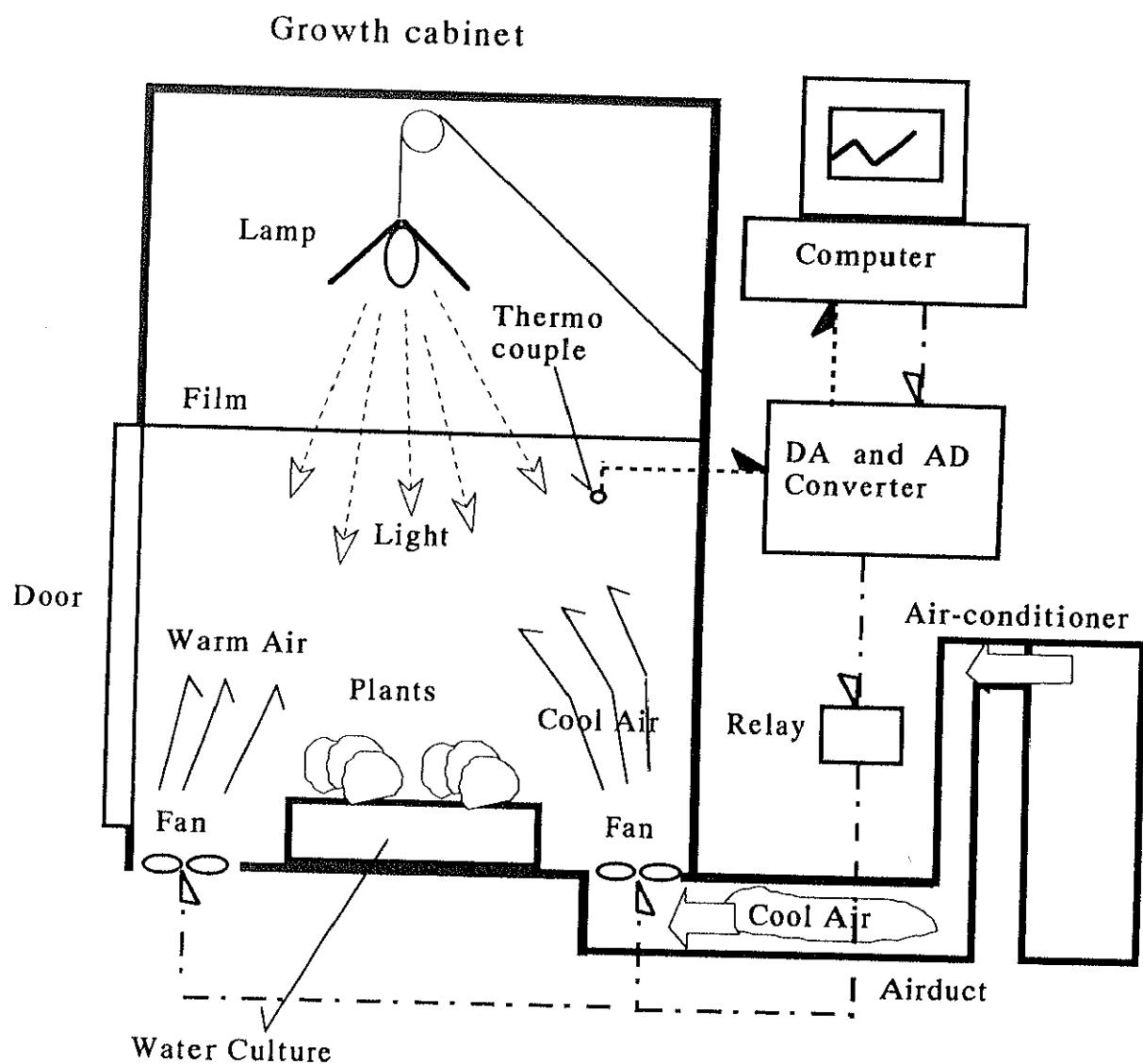


Fig.2.1.2 Schematic diagram of growth cabinet used in the experiment.
z : The size of cabinet ; depth 130 cm, width 130 cm, height 150 cm.

----- Sensor signal input into computer
 - - - ▶ Control signal output from computer

は処理終了日まで現われなかった。またトマトの草丈は、いずれの光強度の場合も処理開始後7日目から白が他の処理区よりも高く、また、その外観は徒長的であった。インゲンマメでは青、緑において葉の就眠運動が起こり、明期中は上向きに反り上がり、暗期中は下に垂れ下がった。

レタスならびにホウレンソウについても処理開始後しばらくして、いくつかの特徴ある外観症状が発現した。すなわち、レタスでは強光下の場合、定植3~4日後に、緑色光において葉焼け様症状が発生した。しかし、弱光下ではそのような症状は発現しなかった。また、強光下においても弱光下においても、赤、黄では定植5~6日後から本葉が下向きに巻き込むようになった。ホウレンソウでも、葉の巻き込みはレタスと同様に観察された（第2.1.3図）。植物全体の形は、レタス、ホウレンソウとともに、緑、青では開張型となり赤、黄では直立型となった。

トマトならびにインゲンマメについては、処理終了時の個体乾物重（第2.1.3表）は、強光条件では黄が最も大きく、トマトでは18%、インゲンマメでも10%白を上回った。これに対して、青および緑では生育が抑制され、トマトでは15~20%、インゲンマメでは約30%、白より小さい乾物重となった。一方弱光条件では、トマトは強光条件と同様に黄が最も大きくなったもののその差は小さく、また、緑、青と白との間に差がなく強光条件の反応とは異なった。インゲンマメでも、弱光条件と強光条件では光質に対する反応が異なり、弱光条件では黄が処理中最小の乾物重となり、白を30%程度下回った。

一方、強光下におけるレタスの個体乾物重は、15日目には白>赤>黄=青>緑の順となり、緑は白の67%となった。これに対しホウレンソウでは、白と赤の生育が優れ、緑での生育不良が目立った。弱光下におけるレタスの生育は、白が他の光より明らかに優れた。ホウレンソウでも白が最も優れ、赤>青>黄>緑の順に不良となったが、青、黄、緑の間では有意差は認められなかった。

光質が作物の形態におよぼす影響についてみると（第2.1.4図）、強光条件下において、トマトの葉面積は、定植後14日目には緑、青が白、赤、黄よりも小さくなかった。一方弱光条件では、トマトの場合、白より青、緑が大幅に小さくなることはなかった。葉面積は、インゲンマメでも、30日目にはトマトと同様に、緑、青が白、赤、黄よりも小さくなかった。しかしインゲンマメの場合は、弱光条件でも強光条件と同様に葉面積が白より小さくなる結果となった。いずれの作物とも葉数についてはほとんど



Fig. 2.1.3. Spinach under high light intensity at 14th day after treatment. A: Blue. B and C: Red.

Table 2.1.3. Total dry matter weights^z of plants in tomato, snap bean, lettuce and spinach after cultivation under the various lighting conditions.

Light intensity	Tomato	Snap bean	Lettuce	Spinach
<u>High light int.</u>				
White	7.91	27.88	5.41	2.85
Red	7.82	25.54	4.90	3.03
Yellow	9.30	30.90	4.35	2.45
Green	6.47	20.17	3.62	2.14
Blue	6.89	18.95	4.92	2.61
LSD ^y	1.01	7.24	0.45	0.41
<u>Low light int.</u>				
White	7.82	19.48	3.58	1.85
Red	7.24	18.80	2.96	1.69
Yellow	9.19	13.05	2.60	1.17
Green	7.25	14.98	2.75	1.00
Blue	8.81	19.20	2.85	1.35
LSD	1.60	3.23	0.35	0.55

z : After 14 days of lighting treatment in tomato, 30 days in snap bean, 15 days in lettuce and spinach, plants were uprooted, dried and measured in g/plant.
y : LSD indicates statistically the least significant difference at 5% levels.

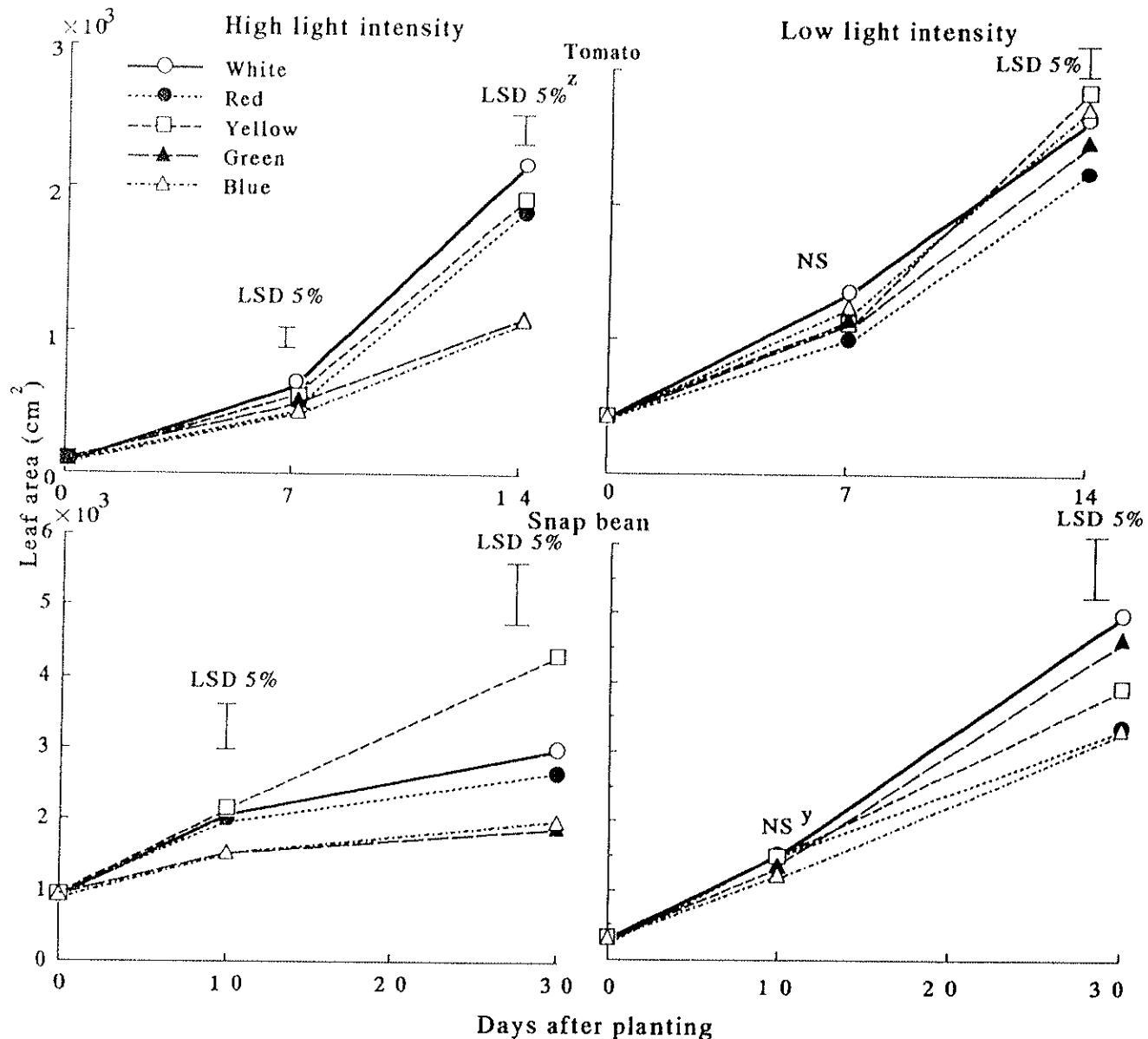


Fig. 2.1.4. Effects of light quality on the leaf area of tomato and snap bean under high or low light intensity.

z : See Table 2.1.3

y : NS shows non-significant difference at 5% level.

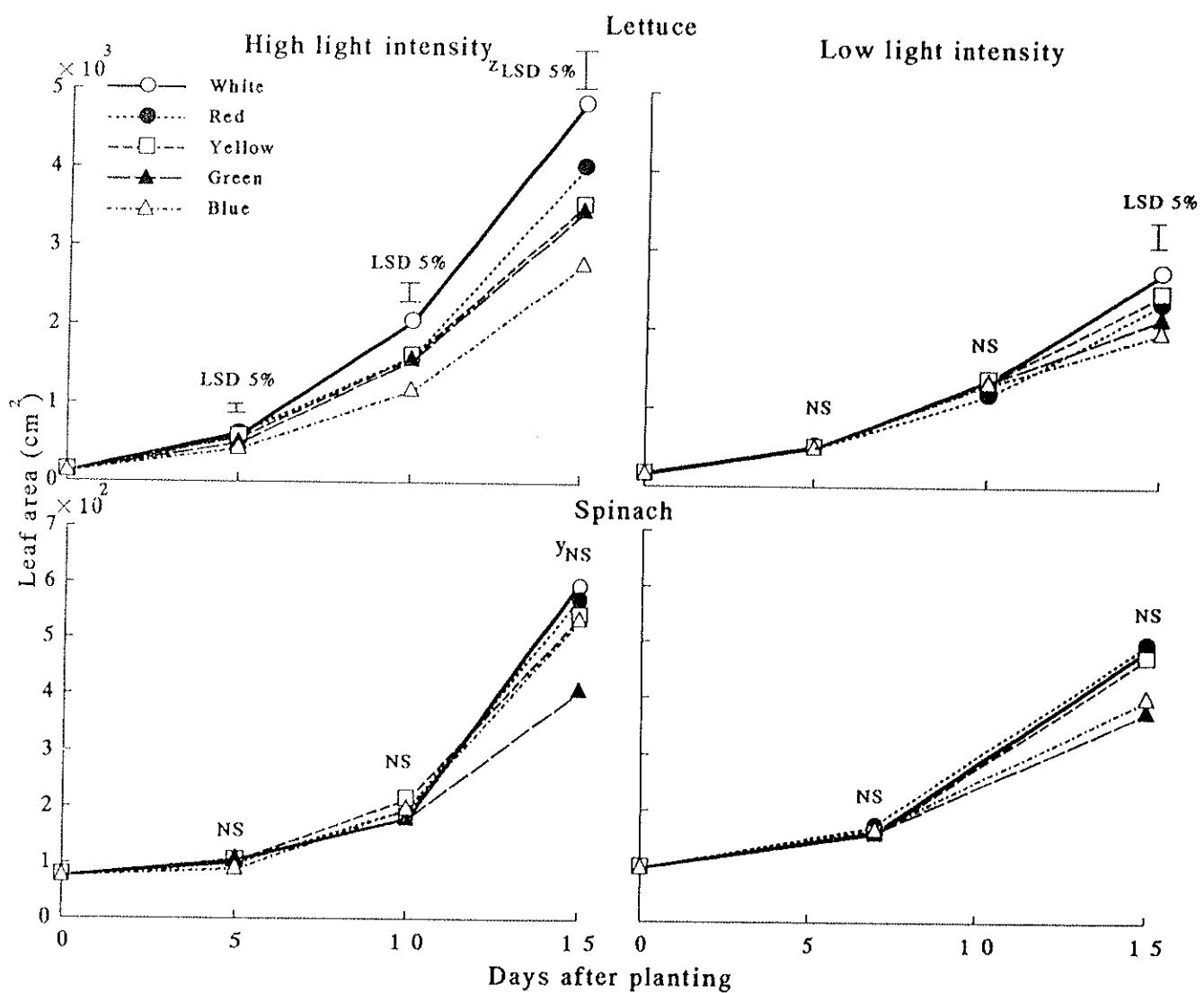


Fig. 2.1.5. Effects of light quality on the leaf area of lettuce and spinach under high or low light intensity.

z : See Table 2.1.3

y : See Fig. 2.1.4

処理区間に違いがなかった（データは示さず）。

第2.1.5図に示すように、レタスの葉面積は強光下では15日目には白>赤=黄>緑=青の順となり、青は白の60%と少なかった。ホウレンソウでは、15日目に緑で他区より少なくなったが処理間に有意差は認められなかった。弱光下において、レタスでは強光下と類似の白>黄>赤=緑>青の順で葉面積に差がみられ、青は白の70%程度になった。ホウレンソウでは、青、緑が白よりも小さくなる傾向を示したもの、有意差はなかった。葉数については、光質の影響は、特にレタスにおいて顕著であり、青で抑制され白の60%程度でしかなかった（データは示さず）。

強光条件での相対生長率（RGR）は、トマトでは白、黄、赤が緑、青よりも10%程度大きな値を示した（第2.1.4表）。インゲンマメでは、黄でやや大きな値を示し、青ではやや小さかったが、それ以外では顕著な差はなかった。一方、両作物とも弱光条件では処理間に顕著な違いは観察されなかった。

強光条件におけるトマトの純同化率（NAR）は、緑、青では白、赤より大きな値を示した。一方、インゲンマメでは処理間に有意差は見られなかった。弱光条件についてみると、NARはトマトでは緑が強光条件とは異なった結果を示し、白と同じ程度となつた。一方インゲンマメでは黄、緑と青との間に有意差が見られ青が大きくなつたが、その他には有意差はなかった。

LAR（葉面積/個体乾重比）は、トマトではNARとほぼ逆の傾向を示し、白=赤>黄>緑=青の順となつた。しかしインゲンマメでは、黄がその他の処理より大きい値を示したもの、処理間に有意差はなかった。

トマトの相対葉面成長率（RLGR）は、緑、青が白、赤、黄と比べて小さな値を示した。また、RLGRはインゲンマメでも同様な傾向を示したが、特に黄の値が顕著に大きかった。弱光条件では、トマトの場合、黄=青>白>緑>赤という順となつた。一方インゲンマメは、白=緑>黄>赤=青の順となり、強光条件の結果とは異なつた。

葉の厚さの指標となる比葉重（SLW）は、強光条件のトマトでは、白よりも他区が大きくなつた。特に青、緑は白と比較して著しく大きくなり、非常に厚い葉となつた。インゲンマメでは、トマトとは傾向が異なり、青、緑は白より大きな値を示したもの、有意差はなかった。弱光条件の場合SLWは、トマト、インゲンマメともに強光条件とは異なる結果を示し、トマトでは赤=青>緑>黄>白となり、インゲンマメでは処理間に有意差はなかった。

Table 2.1.4. RGR, NAR, LAR, RLGR and SLW of tomato and snap bean plants as affected with light qualities under high or low light intensity. Calculations were carried out based on the data obtained during 14 and 30 days of experiments for tomato and snap bean, respectively.

	RGR (g/g/day)	NAR (mg/cm ² /day)	LAR (cm ² /g)	RLGR (cm ² /cm ² /day)	SLW (mg/cm ²)
<u>High light int.</u>					
Tomato	White	0.214	0.88	243.4	1.55
	Red	0.212	0.88	240.6	2.00
	Yellow	0.219	0.96	228.3	2.16
	Green	0.198	1.03	192.1	2.53
	Blue	0.202	1.11	182.4	2.91
	LSD ^z	0.010	0.12	26.5	0.29
<u>Low light int.</u>					
	White	0.151	0.47	321.7	1.26
	Red	0.146	0.49	298.3	1.59
	Yellow	0.161	0.53	304.3	1.35
	Green	0.145	0.45	323.0	1.42
	Blue	0.158	0.51	310.3	1.52
	LSD	0.011	NS ^y	NS	0.23
<u>High light int.</u>					
Snap bean	White	0.074	0.46	160.8	2.38
	Red	0.069	0.45	153.1	2.08
	Yellow	0.075	0.42	178.4	1.97
	Green	0.063	0.43	148.3	2.52
	Blue	0.060	0.38	158.0	2.75
	LSD	NS	NS	0.011	NS
<u>Low light int.</u>					
	White	0.089	0.31	288.5	1.52
	Red	0.090	0.39	229.9	2.15
	Yellow	0.089	0.26	342.3	1.83
	Green	0.085	0.26	330.4	1.33
	Blue	0.090	0.40	225.2	2.28
	LSD	0.008	0.11	92.7	0.011

z : See Table 2.1.3.

y : See Fig. 2.1.3.

Table 2.1.5. RGR, NAR, LAR, RLGR and SLW of lettuce and spinach plants as affected with light qualities under high or low light intensity. Calculations were carried out based on the data obtained during 14 and 30 days of experiments for lettuce and spinach, respectively.

	RGR (g/g/day)	NAR (mg/cm ² /day)	LAR (cm ² /g)	RLGR (cm ² /cm ² /day)	SLW (mg/cm ²)
<u>High light int.</u>					
Lettuce	White	0.276	0.258	1069.7	0.181
	Red	0.267	0.258	1034.9	0.171
	Yellow	0.253	0.226	1119.5	0.162
	Green	0.258	0.250	1032.0	0.161
	Blue ^z	0.252	0.261	965.5	0.147
	LSD ^z	0.008	0.031	12.1	0.14
<u>Low light int.</u>					
	White	0.155	0.235	659.6	0.188
	Red	0.143	0.211	677.7	0.178
	Yellow	0.134	0.175	765.7	0.181
	Green	0.137	0.206	665.0	0.172
	Blue ^y	0.140	0.227	616.7	0.167
	LSD ^y	0.008	0.021	5.2	0.12
<u>High light int.</u>					
Spinach	White	0.205	0.732	280.1	0.130
	Red	0.209	0.779	268.3	0.130
	Yellow	0.195	0.581	335.6	0.137
	Green	0.186	0.663	280.5	0.109
	Blue	0.199	0.690	287.0	0.126
	LSD	NS	0.072	6.7	0.020
<u>Low light int.</u>					
	White	0.154	0.370	416.2	0.072
	Red	0.149	0.338	440.8	0.075
	Yellow	0.123	0.225	546.7	0.072
	Green	0.112	0.209	535.9	0.057
	Blue	0.133	0.293	453.9	0.062
	LSD	0.025	0.074	5.2	NS ^y

z : See Table 2.1.3.

y : See Fig. 2.1.3.

第2.1.5表に示すように、レタス、ホウレンソウとともに、RGRは乾物重とほぼ同様の傾向を示し、強光下では白に比べて黄、緑、青が低くなった。弱光下では特に黄および緑が白よりも低い値を示した。

NARは、強光下の場合レタスでは黄が白よりも低かったものの、その他の処理区ではほとんど差がなかった。一方ホウレンソウでは、黄、緑のNARが白よりも5~20%低かった。弱光下では、レタスのNARは上記の強光下と同様の傾向を示し、黄が白よりも25%程度小さくなかった。ホウレンソウも、NARは強光下と同様に、黄、緑、青が白よりも低くなる傾向を示した。

LARは、レタスの場合、強光ならびに弱光条件ともに黄が白よりも大きくなつた一方、青では、いずれの光強度下においても10%程度白よりも小さくなつた。しかしホウレンソウでは、黄がその他の処理より大きい値を示したもの、青については白と同程度であった。

レタスのRLGRは、緑、青が白と比べて小さな値を示した。また、RLGRはホウレンソウでも同様な傾向を示した。

強光、弱光ともにレタスではSLWは青が白よりも大きく、白と比べて青では葉が厚いことを示した。同様にしてホウレンソウでは、赤、黄が白よりも薄葉となつた。

2.1.3 考 察

いずれの作物についても、生育が強光条件の特に緑で他より小さかったのは、処理開始3~6日後に始まつた葉焼け、葉脈間の萎縮等の葉面障害が原因の一つと考えられる。今回の実験の緑における葉面障害は、緑色光源に高い比率で含まれる紫外線によって発生した可能性が強い。紫外線が上記のような葉面障害を引き起こすことは以前から報告されている (Teramura, 1980)。弱光条件で緑の葉面障害の程度が軽くなつたのは、弱光条件の光強度を強光条件の半分の光合成有効放射となるように設定したために、障害要因と考えられる紫外線の絶対量が半減したためであろう。本試験とは別に、紫外線を除去するフィルターを光源下に設置したところ、緑において葉面障害の症状が観察されなかつたことからも、紫外線による影響は明らかである。

全体として生育は、白、赤で良好であり、緑、青で不良である傾向を示したが、生

長解析の結果、この光質による生育差には、光質がもたらす同化速度の変化と形態的要素である葉面積の変化が要因となっていることが示された。

Eskins (1992) は、シロイヌナズナについて、形態形成と光質の関係を調査した。その結果、光合成有効放射中に占める青の波長域の割合が多いほど葉面積は減少し、青色光がもたらす葉面積減少程度は、青色光の量に比例することを示した。本試験において、青の葉は葉面積が小さくなり、Eskins (1992) の結果と一致したが、葉の厚さの特徴について検討したところ青で厚くなる傾向があり、結果として青の葉は、強光条件において形成される陽葉的特徴を示したと見なせる。陽葉は、面積が小さく厚い葉であり、単位面積当たりの光合成速度が高いとされる。一般に陽葉の形成は青色光によって引き起こされていることが知られている（佐々木、1984）。陽葉は高い光合成能力を持つとされているが、今回、強光条件においていずれの作物とも単位葉面積あたりの同化速度（NAR）については、青が白と同じか、あるいはそれより高い値を示したことがそのことを裏付けている。反対に黄の葉は全体としてSLWが小さくなる傾向を示し、葉面積が比較的大きかった。葉を陰陽とする波長域は青と赤の波長域とされている（佐々木、1984）。黄については、赤、青いずれの波長域の光も少ないことから、陰葉的特徴をもった葉となった可能性が考えられる。

青では、NARが比較的大きい値となった一方で、LARが低くなる傾向を示した。

Bruggink (1986) および Knight and Mitchell (1987) の実験によると、トマト、キュウリ、レタス等では、弱光下ではNARが低下する代わりにLARが増大し、逆に強光下においてはLARが低下し、NARが増大するという。本実験における青でのLARの減少とNARの増加は、強光下と同じ反応を青が引き起こしたためと考えられる。LARは植物個体当たりの葉面積の広がりの指標となる。青においてLARが低かったと言うことは、青の下で生育させた植物の受光効率が低かった可能性を示唆している。その結果、青については、単位葉面積当たりの同化能力が高い反面、生育が白よりも劣ったものと考えられる。高辻ら (1995) は、赤と青の発光ダイオードによるレタスの栽培試験を行い、青の比率を高めた場合葉面積が低下し生育が不良になったことを報告した。本試験の結果は、これとよく一致する。一方、トマトならびにインゲンマメの場合、赤、黄はNARでは青よりも劣るものの、LARは比較的大きく、受光体勢が良かったために、比較的良好な生育を示したものと思われる。しかし、レタスならびにホウレンソウについては、特に黄で小さくなり、結果として生育が白よりも劣ったと思わ

れる。前述の様に、レタスならびにホウレンソウの場合、黄の葉はSLWが小さく葉面積は大きいという陰葉の特徴を示していた。陰葉は同化能力が低いとされており、黄のレタスならびにホウレンソウが生育不良になったのは葉の構造的変化による同化能力の低下が原因であると考えられる。一方、緑の場合、葉面積については青よりも大きい傾向を示す場合が多かったものの、強光下では特に純同化率が低く、このことが最終的に緑の生育不良につながったのであろう。緑の同化能力低下については、先に述べたような葉面障害を引き起こす紫外線の影響が考えられる。そこで、その後の試験で紫外線を除去するフィルター下で同様に光質の影響を調べたところ、葉面障害などの症状は改善したものの、緑では紫外線が照射された場合と同様に同化速度が低いことが示された。緑の波長域の光合成量子収率は低い(McCree, 1972)ことが、結局緑における同化速度の低下を招き、生育不良の要因となったことが推察された。

一連の実験の結果から、全作物とも白、赤の場合、十分な葉面積の確保と比較的高い同化速度が良好な生育をもたらしたことが示された。また、黄は、トマト・インゲンマメについては葉面積が赤と同程度であり、同化速度も比較的高いことから生育が良好であった。しかし、レタス・ホウレンソウでは同化速度が小さく生育不良となり、作物によって反応が異なった。緑では、同化能力が他の光源よりも低く生育不良となった一方、青では、葉面積は抑制されるが、特にトマト、レタスでは青が白と同程度の同化速度をもつことが判明した。このように、人工光源の光質は、作物の形態的特徴と同化能力にそれぞれ影響を及ぼした。工場的作物生産において発光効率の高い単色の人工光源を選ぶ場合、量的生育に主眼をおくのであれば、赤～黄の波長域を主体とした比較的単色光に近い光源を利用するのが望ましいと言える。しかし、第2.1.3図に示したように、これらの光源下ではホウレンソウについて葉の巻き込み現象が観察された。この現象はレタスでも同様に観察されており、青の光源下ではこの現象が全く見られないことが示された。赤の単色光下において特にこのような形態的異常が報告されている(渡辺ら, 1996)ことから、植物の栽培に特性が比較的単色光に近い赤～黄の光源を利用する場合は、形態的な異常を回避するために、青の光を混合するなどの工夫が必要であろう。

2-2 人工光源の光質が数種蔬菜の光合成に及ぼす影響

光は植物の生長に関係する最も重要な要素の一つである。光は植物の生長のためのエネルギー源であると同時に形態形成を調節するための信号でもある。トマトやレタスを白熱灯と蛍光ランプを組み合わせた光源下で生育させた場合、蛍光ランプ単独で生育させた場合よりも高い生育を示し、植物の生育が光の強さだけでなく光の質によっても大きく影響を受けていることが報告された (Helson, 1964; Knight and Mitchell, 1987)。また、Anderson (1985) は、光質の異なる12種類の蛍光ランプ下で、光強度をそろえてトマトを栽培した結果、可視光域の波長分布が生育に大きな影響を持つことを報告し、光の“質”が植物の生育に対する重要な要因であることを示した。

筆者は、第2章第1節において、異なる光質下で数種蔬菜を生育させた結果、400～500nmの波長域を含む緑や青の光源よりも600～700nmの波長域を主に含む黄や赤の光源か、または両者の混合光である白の下で生育が良いことを報告した。Roberto et al. (1992) は、赤色光／遠赤色光比率を低下させた光源下でインゲンマメを生育させた場合葉が薄くなり、結果として単位面積当たりの光合成能力が低下したことを報告している。また、Eskins (1992) は、シロイヌナズナの葉面積ならびに葉柄長が青色光の強度にあわせて、それぞれ小さくまた短くなることを示した。筆者もまた、単位葉面積当たりの純同化率 (NAR) は、青、緑が白よりも低下しない一方、両光源下で生育した植物体は葉面積が小さくなることを報告した (福田ら, 1993a, 1993b)。このように、光質によって生じた形態的な変化が、植物の生育に大きく影響している可能性が考えられる。

本節では、形態形成と光合成能力という観点から、光質の違いによって生じた生育差の要因について検討し、植物栽培用人工光源について考察した。

2.2.1 材料および方法

本実験には、レタス品種‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）およびトマト品種‘TVR-2’（サカタのタネ）を使用した。育苗は環境制御室内で行ったが、育苗時の環境条件は第2章第1節と同じとした。

レタスならびにトマトは、それぞれ本葉が7ならび5枚程度展開した段階で、白、赤、黄、緑、青の各光源が設置された小型環境制御室内の湛液水耕装置に定植し、15

日間栽培した。ただし、第2章第1節で指摘したように、各光源の光合成有効放射の外側の波長域である紫外線の影響を除かなければ、正確な光質の影響を評価することができないと考え、各光源と植物体との間にアクリルパネルを設置し、紫外線量を約1/10程度に抑制した。栽培時の光強度は、光合成有効光量子束（PPF）でレタスは250、トマトは $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした。その他の環境条件は、第1節と同じとした。

光合成速度と蒸散速度の計測：光合成速度と蒸散速度は、携帯型光合成蒸散測定装置（SPB-H2、島津）によって、栽培期間のほぼ中間である処理開始後7と処理終了時である15日目に測定した。なお光合成速度と蒸散速度の測定は、個体の最大葉について各光源下で行い、光強度はPPFで、レタスの場合0, 100, 200, 400, 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の5段階に、また、トマトでは0, 100, 200, 400, 600, 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の6段階に変化させ、各光強度での光合成速度と蒸散速度を計測し、光強度－光合成曲線を作成した。光合成速度曲線を作成する際に光強度を変更する場合、かならず30分以上植物体を順化させた。また、各光強度における光合成速度の測定は、4個体の植物体について行った。

クロロフィルa蛍光計測：処理開始後7および15日目の植物体について、最大葉のクロロフィル蛍光を計測した。測定は、携帯型クロロフィル蛍光計測器（PEA、HANSA-TECH）によって行った。レタスならびにトマトについて、最大葉を選択し、暗処理のためのクリップで、葉の葉脈を避けた部分を30分間暗処理した。暗処理終了後、赤色発光ダイオード（max=650nm、光強度=1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）による光の照射を30秒間行い、引き続き葉の表面から放射される蛍光を計測した。得られた蛍光の値については、最小蛍光収量（ F_0 ）、最大蛍光収量（ F_{MAX} ）として計算し、また変動蛍光収量（ F_v ）は、最大蛍光収量と最小蛍光収量の差として計算した。

生育調査：レタスは、実験開始時に20個体定植し、処理開始後5日おきに、また、トマトの場合は、15個体定植し、7, 15日目に植物体を5個体ずつ採取し、葉面積、葉数および茎長について調査した。採取したサンプルについては60°Cで48時間乾燥させたあと、乾物重を測定した。この実験の結果から、今井（1981）の方法に従って生長解析を行った。

2.2.2 結 果

生育：光質は、トマトとレタスの生育に大きく影響した（第2.2.1表）。トマトでは、

特に緑の地上部乾物重が小さく白より40%程度小さかった。地下部乾物重についても同様に緑で小さく、結果的に総乾物重も緑で小さくなかった。また、葉面積も緑で著しく小さくなり、白の60%程度でしかなかった。レタスの場合、緑と青で地上部乾物重が白より小さくなる傾向が示された。しかし、地下部乾物重は光質の影響をほとんど受けず、結果として総乾物重は緑、青において白の20%減にとどまった。また、葉面積は白、赤、黄が同程度であったが、緑ならびに青では葉面積が減少し、青では白よりも26%小さかった。

光合成速度：処理終了時の光合成速度は（第2.2.2表）、トマトの場合、明らかに緑が低く、白の8割程度であった。レタスでは、光合成速度は青で高くなつた一方、赤、黄、緑は白より低くなる傾向を示した。また、処理開始から処理終了時の純同化率（NAR）を計算したところその値は光合成速度と同様の傾向を示し、トマトでは緑が他の処理区よりも低くなり、レタスでは、赤、黄、緑で低下した。

各光源下における光合成-光強度反応曲線を第2.2.1、2図に示した。処理開始後7日目のトマトでは（第2.2.1図）、いずれの光強度においても赤、黄、緑、青の光合成速度が白よりも高くなつた。処理開始後15日日の光合成-光強度反応曲線は、処理開始後7日目とは異なつた。トマトは、白、赤、黄の光合成速度が同程度であったのに対して、いずれの光強度下でも緑の光合成速度が低くなつた。

処理開始後7日日のレタスの場合（第2.2.2図）、特に $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の強光下において、青の光合成速度が白よりも高くなる傾向を示した一方、赤、黄についてはいずれの光強度でもほとんど白と同程度であり、赤で若干白よりも高くなる傾向を示したのみにとどまつた。処理終了時の場合、 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度では青の光合成速度が白よりも大きくなつた一方、強光強度下では緑の光合成速度が白よりも低くなることが確認された。

クロロフィル蛍光：トマトの場合、処理開始後7日日の第6～7葉では F_0 、 F_v 、 F_v/F_{max} とともにほとんど処理間に差は見られなかつた（第2.2.3表）。また、第2～3葉では赤と黄の F_0 値が白よりも若干高くなる傾向を示したが、他の項目については白との間に有意差のある処理区は観察されなかつた。一方、処理開始後15日目には、第4～5葉では、緑において明らかに F_0 値が高くなり、 F_v 値が低かったことから、結果的に F_v/F_{max} 値が白よりも10%程度減少した。

レタスでは、処理開始後7ならび15日日の内葉では（第2.2.3表）、いずれの項目につ

Table 2.2.1 Effects of light quality on dry matter weight and leaf area of tomato and lettuce plants at 15th day from planting.

	Light source	Top DW (g/plant)	Root DW (g/plant)	Total DW (g/plant)	Leaf area (cm ² /plant)	
Tomato	White	8.77 bc ^z	0.99 b	9.76 bc	1617 b	
	Red	8.35 bc	1.04 b	9.38 bc	1546 b	
	Yellow	9.23 c	1.07 b	10.30 c	1575 b	
	Green	5.49 a	0.53 a	6.03 a	967 a	
	Blue	7.71 b	0.95 b	8.67 b	1492 b	
Lettuce	White	4.78 b	0.40 a	5.18 b	2337 ab	
	Red	4.49 ab	0.36 a	4.85 ab	2653 b	
	Yellow	4.35 ab	0.40 a	4.75 ab	2462 b	
	Green	3.96 a	0.33 a	4.29 a	2173 ab	
	Blue	3.93 a	0.38 a	4.31 a	1784 a	

z : Different letters in the same column indicate the significant difference at 5% level according to Duncan's multiple range test.

Table 2.2.2 Effects of light quality on the photosynthetic rate and NAR at 15th day from planting.

	Light source	Photosynthetic rate (CO ₂ μ mol · m ⁻² · s ⁻¹)	NAR (mg · cm ⁻² · day ⁻¹)
Tomato	White	y 10.48 b ^z	1.11 ab
	Red	9.55 ab	1.06 ab
	Yellow	10.43 b	1.18 b
	Green	8.43 a	0.93 a
	Blue	9.90 b	1.07 ab
Lettuce	White	7.03 ab	0.48 b
	Red	6.72 ab	0.41 a
	Yellow	5.58 a	0.40 a
	Green	5.80 a	0.42 a
	Blue	7.46 b	0.48 b

z : See Table 2.2.1.

y : Light intensity at photosynthesis and transpiration measurement : tomato; 400,
lettuce; 250 μ mol · m⁻² · s⁻¹

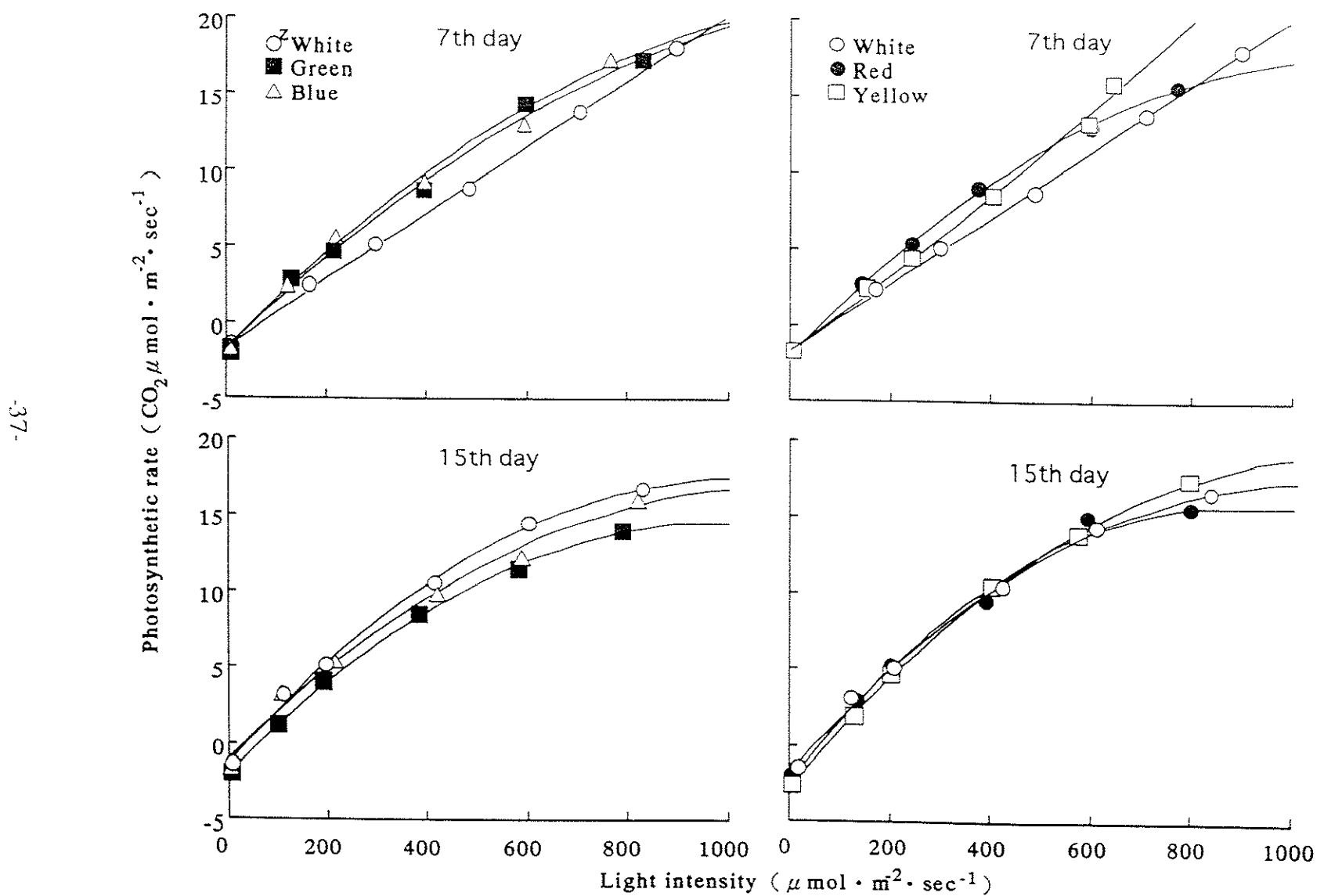


Fig. 2.2.1 Effects of light quality on the photosynthetic rate of tomato at 7th and 15th days from planting.
z : All values were shown as means of 4 replications.

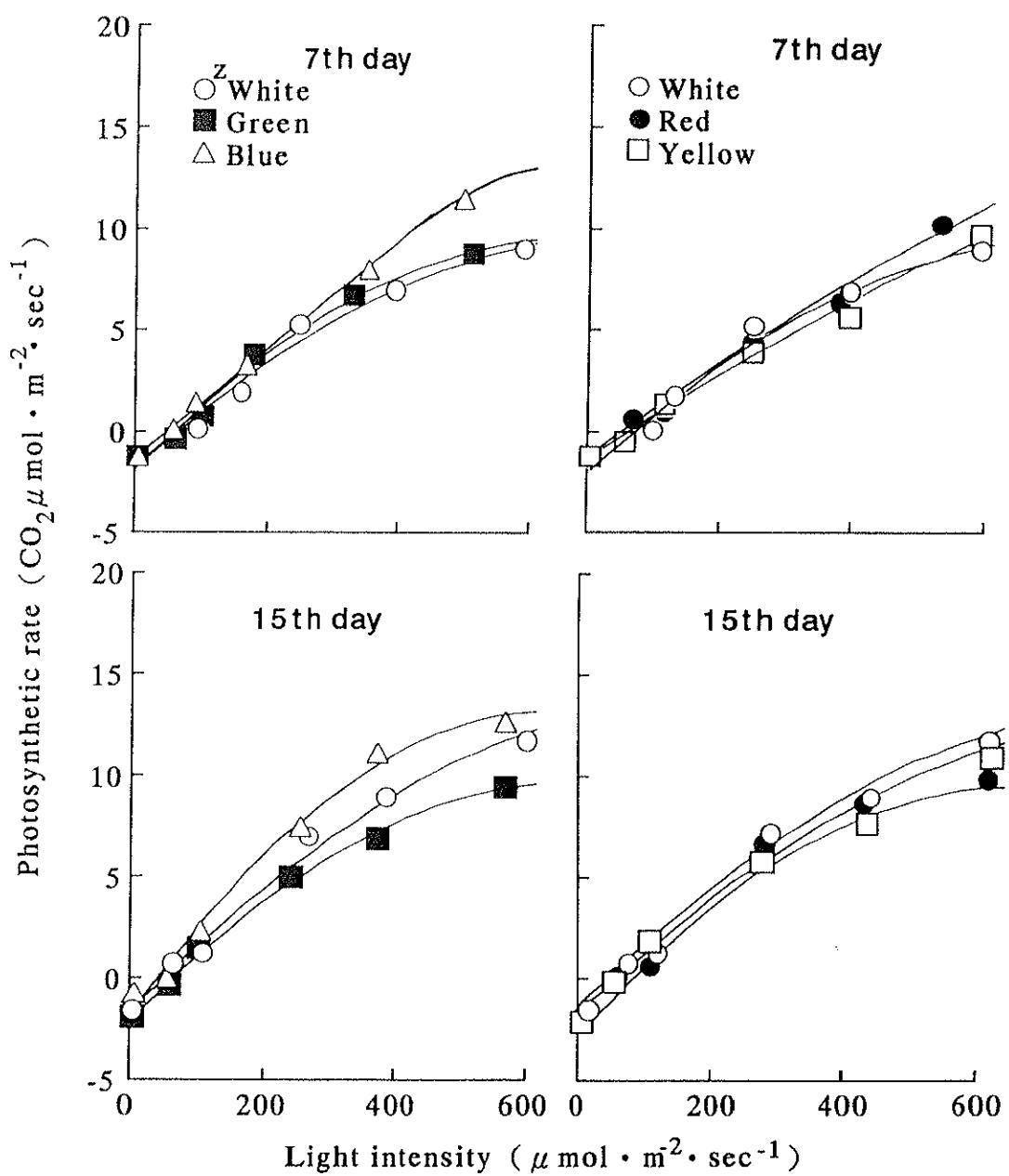


Fig. 2.2.2 Effects of light quality on the photosynthesis rate of lettuce at 7th and 15th days from planting.

z : All values were shown as means of 4 measurement.

Table 2.2.3 Effects of light quality on the chlorophyll a fluorescence intensity of tomato and lettuce at 7th and 15th day after planting.

Tomato	7th day			15th day			
		F0	Fv	Fv/Fmax	F0	Fv	Fv/Fmax
	y Younger	White 0.392 a ^z	1.724 a	0.813 a	0.392 a ^z	1.779 a	0.817 ab
	Red	0.402 a	1.813 a	0.817 a	0.440 b	1.711 a	0.794 a
	Yellow	0.379 a	2.188 a	0.836 a	0.383 a	1.680 a	0.813 ab
	Green	0.402 a	1.573 a	0.792 a	0.393 a	1.738 a	0.815 ab
	Blue	0.383 a	2.062 a	0.835 a	0.369 a	1.876 a	0.835 b
Older	White	0.363 a	1.663 a	0.821 ab	0.383 a	1.969 b	0.836 c
	Red	0.452 b	1.609 a	0.779 a	0.464 bc	1.657 a	0.779 ab
	Yellow	0.418 ab	1.648 a	0.796 ab	0.411 ab	1.740 a	0.808 bc
	Green	0.382 a	1.644 a	0.809 ab	0.497 c	1.631 a	0.765 a
	Blue	0.386 a	2.122 a	0.828 b	0.400 ab	1.768 a	0.814 bc
Lettuce	7th day			15th day			
		F0	Fv	Fv/Fmax	F0	Fv	Fv/Fmax
	Inner	White 0.347 ab ^z	1.761 a	0.834 a	0.349 a	1.841 a	0.840 a
		Red 0.368 ab	1.795 a	0.829 a	0.344 a	1.737 a	0.834 a
		Yellow 0.334 a	1.751 a	0.839 a	0.343 a	1.754 a	0.836 a
		Green 0.370 b	1.860 a	0.833 a	0.352 a	1.835 a	0.838 a
		Blue 0.351 ab	1.769 a	0.833 a	0.366 a	2.013 b	0.845 a
	Outer	White 0.335 a	1.871 a	0.847 c	0.357 ab	1.991 c	0.847 b
		Red 0.367 b	1.839 a	0.833 ab	0.378 ab	1.754 a	0.821 a
		Yellow 0.332 a	1.847 a	0.847 c	0.344 a	1.847 b	0.842 b
		Green 0.369 b	1.787 a	0.827 a	0.391 b	1.961 c	0.833 ab
		Blue 0.350 ab	1.861 a	0.841 bc	0.355 ab	1.937 bc	0.844 b

z : See Table 2.2.1.

y : Older : at 7th day ; 2~3rd leaf, at 15th day ; 4~5th leaf, Young : at 7th day ; 6~7th leaf, 15th day ; 9~10th leaf.

x : Outer: the largest leaf, Inner: half size leaf which was immature.

いても白との差がある処理区は見られなかった。一方、外葉の場合、赤、緑の F_0 値が大きくなる傾向を示し、 F_v/F_{max} 値もそれぞれ白に比べて低くなる傾向を示した。

2.2.3 考 察

トマトとレタスの生育は、5種類の光質によって異なり、全体として複数波長域の光の混合光である白と比較的長い波長を多く含んでいる赤、黄の生育が、短い波長をもつ緑、青より良好であった。この結果は、第2章第1節のトマトとレタスの結果と一致した。

光質の植物生育に対する影響は葉面積で顕著となり、赤、黄の葉面積が比較的大きくなる一方、緑および青では減少する傾向を示した。Eskins (1992) によると、シロイヌナズナの場合、葉面積ならびに葉柄長が青色光／赤色光の比率によって変化し、青色光の比率が高まるにつれて、それぞれ小さく短くなっている。Tibbitts et al. (1983) は、レタス、ホウレンソウ、カラシナおよび小麦を使用した実験で、メタルハライドランプ (MH) と高圧ナトリウムランプ (HPS) を組み合わせた光を照射して生育させた場合、HPS単独で生育させた場合よりも葉面積が小さくなることを報告している。Tibbitts et al. (1983) の試験では、MH+HPSではフィトクローム反応に関するフィトクローム光平衡値はHPSと同程度であり、青の波長域の量が異なっていた。以上のことから考えて、赤および黄の生育が比較的良好であったのは、この2つの光源が青色光に対する赤色光の比率が高く、結果的に受光器官である葉の面積が大きかったためと考えられる。一方、緑、青の場合、青の波長域の光量が多いことにより葉面積が小さくなり、受光量が減少したことが生育が不良になった原因の一つとして考えられる。また、データには示さなかったが、第2章第1節の結果と同様に、本試験においてもトマトならびにレタスとも、緑、青の葉の縦／横比が低く、比較的幅広の葉となった。両区の植物とも、特に縦方向への伸長が抑制されており、白に比べて30%程度短かった。Honecke et al. (1992) は、赤色LEDの光に青色蛍光灯の光を加えた場合、レタスの葉の伸長が抑制されることを報告した。横方向に広い葉は、光を相互遮蔽してしまうことから受光には不利であり、本実験において青の生育が不良であったことには、幅が広い葉の形状が関係したことも考えられる。一方、LEDを使った高辻ら (1995) の試験において、極端に青の少ない光環境下では、レタスの生育が不良になることも報告されている。高辻ら (1997) は、ほとんど赤色光だけの光環境下でレタスの葉が巻

き込む現象を報告しており、この形態的異常によって生育が不良になったとしている。よって、赤と青の波長域は、植物に適当なバランスがあると考えられる。

植物の生長速度を表す指数として相対成長率（RGR）があるが、これは、単位葉面積当たりの純同化率（NAR）と葉の広がり程度の指標である比葉面積（LAR）の積によって決まる（Vlahos et al., 1991）。この2つの指標は、光質によって変化する（Vlahos et al., 1991; Knight and Mitchell, 1987）。LARは、ほぼ葉面積に比例しており、先ほど述べたように光質の影響を受けていると考えられる。第2章第1節のトマト、インゲンマメ、レタスおよびホウレンソウで示したように、いずれの作物でも明らかに緑と青でLARは低下しており、その結果、個体当たりの葉の広がりが低下し植物体全体としての受光量の減少したことが緑、青における生育不良の原因であると考えられる。しかし、植物の生育は、葉面積や葉形だけで決定されるのではない。青の場合、NARは他の処理区と比べて低くはなく、むしろ赤、黄よりも高くなる傾向が示された。NARは光合成速度の実測値の傾向と一致することが考えられるが、本実験では、トマトならびにレタスとも、処理終了時の光合成速度実測値とNARがほぼ一致し、青の光合成速度が比較的高くなかった。また、いずれの光強度でも青の光合成速度が高くなる傾向を示したことからも青の場合、単位葉面積当たりの同化速度は比較的高かったと考えられる。光合成速度に関する植物の要素としては、葉の構造、クロロフィル含有量、蒸散速度、電子伝達系の量子収率、RuBPカルボキシラーゼ活性などが挙げられる。植物の蒸散速度は、青色光と赤色光によって増大することが知られている（Karlsson, 1986a; 1986b）。特に青色光の量が多い場合、蒸散速度は大きくなる。トマトおよびレタスの場合、青色光下で蒸散量が増大した（福田, 1993c）。蒸散速度の増加は気孔開度が大きくなることによって引き起こされるので、蒸散速度の増加とともに炭酸ガス交換効率も増加する。今回の実験で青が比較的高い光合成速度を示したのは、青色光による蒸散速度の増加が原因ではないだろうか。また、量子収率の指標となる F_v/F_{max} 値（Krause and Weis, 1984）は、青の場合白と同程度か、または白を上回る数値を示した。一方、緑は、蒸散速度では、青と同様に高い数値を示したもの、 F_v/F_{max} 値は白よりも比較的低い傾向を示し、単位葉面積当たりの光合成速度も低かった。緑色光区の葉は、クロロフィル蛍光 F_0 値が他の処理区よりも高い傾向があり、これが F_v/F_{max} 値が低下した原因であると考えられる。Krause and Weis (1984) によると、初期蛍光である F_0 値は、光電子伝達系のタンパク色素複合体から反応中心へのエネ

ルギー伝達の効率を示し、この値が高いほど効率が低いとされている。F₀値は、環境ストレスによって増加するとされている。赤と青の波長域をほとんど含まない緑の波長分布は、植物にとってストレス環境である可能性が示唆された。

緑の波長分布は、クロロフィルの光量子収量効率の低い波長域に集中している。加えて、同化能力自体の低下と葉面積減少による受光効率の低下が、緑の生育不良をもたらしていると思われる。

今回使用した光源については、以下のように植物の生育に対する影響を評価することができた。

- ・白色光源：葉の伸長や展開は比較的良好であり、光合成のための受光葉面積は大きい。また、単位葉面積当たりの蒸散速度、光合成速度は高く、生育は良好である。
- ・赤色光源・黄色光源：節間伸長は抑制気味であり、草姿は徒長的ではない。葉の伸長展開が良好である。しかし、作物によっては単位葉面積当たりの蒸散速度が低く、結果として光合成速度が白より若干低くなり、生育が白より劣る場合がある。
- ・緑色光源：葉の伸長展開が抑制されており、かつ光合成速度が低い。そのため、全処理区中生育がもっとも不良であった。
- ・青色光源：葉の伸長が抑制される傾向があり、受光面積が小さく、結果として生育が抑制されている。しかし、光合成速度は高い。

完全制御型植物工場において人工光源による植物生産を考えた場合、比較的波長の長い赤、黄を多く含む光源の方が生育が良好であることが示された。葉の展開伸長に関しては、赤、黄が良好であり、受光効率が良好であったことが生育が比較的良好であったことに結びついたのであろう。赤と黄の光源であれば、発光効率の悪い陽光ランプに変わる植物育成用光源として利用することが可能であると考えられる。緑については、光合成の効率が悪いことから、実用的植物栽培の光源から除いても問題ないと考えられる。したがって植物育成用人工光源としては、赤～黄（600～700nm）と葉の巻き込み現象などの形態形成異常を防ぐための青（400～450nm）の光が備わっていては、完全制御型植物工場の光源として十分な能力を發揮させることが可能であると考えられる。あるいは、この2種類の波長域を別個に照射する光源を2種類組み合わせても植物を生育させることができるはずである。土屋（1996）や渡辺ら（1996）は、半導体レーザや発光ダイオードの植物生産への利用を検討している。発光ダイオードは、赤色であれば近年単価も安く、かつ高輝度のものが開発されている。また、従来

では難しかった青色光の発光ダイオードも日亜化学工業によって開発されている（日経産業新聞1994年10月14日号日刊参照）。発光ダイオードは、発光効率が極めて高く、かつ熱放射が少ないことから、完全制御型植物工場に最も適した光源であるといえる。赤と青の2種類の発光ダイオードを組み合わせれば、植物工場に適した「光源」となる可能性がある。

太陽光併用型植物工場の場合、生産性を高めるための補光として人工光源を利用する場合は、その光源の光質が光合成促進に有効であることが重要である。光合成速度については、今回試験した高輝度放電灯であるメタルハライド系ランプの中では、白、青が良い。しかし、赤や演色性を改善した黄についても、十分な光合成を行わせることができる可能性はある。

まとめ

人工環境下での植物栽培において重要な環境要因である人工光源の光質が、数種蔬菜、トマト、インゲンマメ、レタスおよびホウレンソウの、生育ならびに光合成に及ぼす影響を、白、赤、黄、緑、青の5種類の光源を用いて検討した。その結果、人工光源の光質は、蔬菜の生育に大きく影響した。

1) トマト、インゲンマメともに、強光条件下において白、赤、黄の光源間では生育に大きな違いはなかったが、それに対して緑、青色光下では15~30%低かった。一方、強光および弱光下のレタスの生育は、青、黄、緑が白より20~30%小さかった。ホウレンソウは、強光下で赤の生育が優れ、緑は生育不良が目立った。また、弱光下では白の生育が最も優れ、緑が不良であった。

2) 各人工光源下における数種蔬菜の生長解析を行ったところ、白、赤の場合、十分な葉面積の確保と比較的高い同化速度が良好な生育をもたらしたことが示された。また、黄は、トマト・インゲンマメについては葉面積が赤と同程度であり、同化速度も比較的高いことから生育が良好であった。しかし、レタス・ホウレンソウでは黄の同化速度が小さく生育不良となり、作物によって光質に対する反応が異なった。緑では、同化能力が他の光源よりも低く生育不良となつた一方、青では、葉面積は抑制されるが、特にトマト、レタスでは青が白と同程度の同化速度をもつことが判明した。

3) 光合成速度は、レタスの場合赤、黄で若干白よりも低く、青で高くなる傾向を示した。トマトでは、白、赤、黄、青の光合成速度は同程度であったものの、緑で低下した。

4) クロロフィル蛍光は光質の影響を受け、緑の F_0 値が低下したことが示された。また、同時に、量子収率を示す F_v/F_{max} 値が緑で減少した

以上のように、生育に対する光質の影響は、強光条件では緑、青色光下における抑制効果として現れた。また、光合成に対する光質の影響は、緑において抑制効果として現れた。赤、黄は、光合成能力としては、白と同程度か、または若干劣ったものの、葉面積の増大による受光量増大によって生育を維持したものと思われる。完全制御型植物工場において、効率のよい人工光源を検討する場合は、赤~黄の波長域を主体とし、蒸散促進ならびに形態形成に必要な青の波長域を適度に混合した光源が適していると考えられる。