原 著 論 文

切り花リンドウの遠赤画像情報に基づく 低コスト生育レベル判定手法の実現可能性

庄野浩資^{*1)}・芹沢和洋²⁾・関 朝美³⁾・松嶋卯月¹⁾・
小出章二¹⁾・立澤文見¹⁾・武田純一¹⁾

1) 岩手大学農学部 〒020-8550 岩手県盛岡市上田3-18-8

2) NECネクサソリューションズ株式会社 〒108-8338 東京都港区三田1-4-28

3) 株式会社情報技研 〒320-0844 栃木県宇都宮市菊水町11-10

要旨

切り花リンドウは岩手県における重要な花卉作物であるが、商品価値を長く保つために、収穫後、その生育レベルを適切に把握し、その状況に応じた保蔵・輸送計画を立てることが望まれる。しかし現状では、生育レベルの非破壊・非接触的な判定手法は開発されていない。庄野ら〔庄野浩資・関朝美・松嶋卯月・小出章二・武田純一（2007）切り花リンドウ花卉の分光放射輝度の簡易測定による老花早期検出の可能性に関する検討，農業情報研究, 16(3): 181-187〕は、花冠の 720 nm 付近の遠赤光における分光反射情報に基づく若花と早期老花の判定の可能性を報告したが、そこでは破壊・接触的な測定方法が用いられ、また測定装置のコストも高いなど、同手法の実用化には課題があった。本研究では、まず、遠赤光の分光反射情報を低コストに測定する装置として、遠赤画像撮影装置を開発した。さらに、花冠の遠赤画像を非破壊・非接触的に撮影し、そこから求めた遠赤画像情報と生育レベル間の関連性を検討することで、同情報に基づく生育レベル判定の可能性を検討した。その結果、岩手県の有力品種であるエゾリンドウ系 2 品種において、同情報に基づいて若花と早期老花を高い正解率で判別可能であることを確認した。以上から、遠赤画像情報に基づくことで、切り花リンドウの生育レベルの低コストな非破壊・非接触的測定手法の実現は十分可能と考えられる。

キーワード

リンドウ, 遠赤光, 分光画像, 画像計測, 精密農法

はじめに

岩手県において、切り花リンドウは日本有数の生産量を誇る主力花卉作物である。特に、同県八幡平市安代町は全国的に著名な産地であり、その町名を冠した‘安代リンドウ’は多くの市場に出荷されている。また同町を中心とする産地では海外進出の意欲が旺盛であり、ニュージーランドなどの農家と業務提携の上、ここを冬期生産拠点とした主要な海外市場への周年出荷の実現を試行するなど、同県の切り花リンドウ産業のさらなる発展に期待が寄せられている。

市場拡大に伴い、生産地から消費地までの距離がさらに延びるのは避けがたく、収穫してから販売されるまでに一定の流通過程が必要となる。この間、切り花リンドウは箱詰めされ、冷温・高湿状態で保蔵されるが、呼吸による鮮度の劣化を完全に避けることは難しい（例えば、（財）日本花普及センター 2006）。特にリンドウの花冠は劣化が進むと茶褐色化し、いわゆる“老花”となって商品価値が損なわれる。このため、商品価値を長く保つには、まず収穫期を最適化し（庄野ら 2004, 庄野ら 2006）、さらに収穫した切り花に早期老花がどの程度含まれるかなど、その生育レベルの状況に応じた保蔵・輸送計画を立てる必要がある。しかし、早期老花の外見は若花とほとんど変わらず、その判定は目視では難しい。このため、今後の生産拡大に対応するには、リンドウ花の生育レベル、特に早期老花と若花

* Corresponding Author
E-mail: shono@iwate-u.ac.jp

を非接触・非破壊的に判定する効率的手法の開発が望まれる（庄野ら 2007, 2009）。

ここで特に、庄野ら（2007）は早期老花の花冠の分光反射強度が、700～900 nm、特に 720 nm 付近の“遠赤光”において若花より 1%以下水準で有意に低下する傾向を報告した。そこで、同分光情報に基づいて両者を効率的に判定する技術の開発に期待がもたれるが、そこで用いられた測定方法は破壊的かつ接触的な方法であった。上記の保蔵・流通の問題に対応するには、非破壊的かつ非接触的な測定方法の実現が必要であり、その可能性はまだ未検討である。また、実用上、同測定に必要な分光分析計が一般に高コストな点も大きな課題である。

以上の課題に対応するため、本研究ではまず低コストな機材を用い、花冠の遠赤光における画像（以下、遠赤画像）を撮影する装置を開発した。さらに、画像中の花冠の画素値を数値に集約して画像情報（以下、遠赤画像情報）とした。最後に、同情報と生育レベルとの関連性を検討して、それに基づく若花と早期老花の判別能力を評価した。

材料および方法

供試材料

切り花リンドウの主な用途は仏花であるため、特に夏の盆と秋の彼岸期を中心に需要が高まる。そこで本研究では、両期における岩手県を代表する品種として‘安代の夏’と‘安代の秋’を供試材料に選択した。前者は盆用として、ま

た後者は秋の彼岸用として栽培されている。これらはいずれもエゾリンドウ（*Gentiana triflora* var. *japonica*）系統の品種であり、その切り花の外観は類似している。すなわち、全長約 1 m の主茎上に複数段の花房を着生させ、各花房には「青紫色」を呈する蕾状の「個花」が複数個着生する。ここで、具体的な外観の特徴は庄野ら（2007, 2009）、あるいは吉池（1992）ならびに今西ら（1995）を参照されたい。

‘安代の夏’は 2008 年 8 月 7 日に、また‘安代の秋’は 2008 年 9 月 16 日に、それぞれ八幡平市花き研究開発センター内の圃場において収穫適期前後の主茎をランダムに選び、切り花として前者を約 10 本、後者を約 20 本採取した。各材料の全長は 1.2～1.5 m 程度であり、着生した花の段数は 7～8 程度であった。図 1 に供試材料（‘安代の秋’）採取時の生育状況を示す。サンプルは採取後すみやかに岩手大学農学部（岩手県盛岡市）内の実験室に移送した。その後、水切り処理を施して切り口を水に浸し、暗所で保存した。

研究全体の流れ

‘安代の夏’の実験は 2008 年 8 月 7 日から 8 月 12 日までの 6 日間、‘安代の秋’の実験は 2008 年 9 月 16 日から 20 日の 5 日間行った。両実験の手順は以下の通りである。まず、各切り花から個花をランダムに選び、それらを花柄の基部で切断して採取した。さらに、後述の方法で花冠の側面の遠赤画像を撮影した後、下述する方法で生育レベルを決定した。さらに後日、撮影した各遠赤画像から、後述の

図 1 八幡平市花き研究開発センター圃場における供試材料生育の状況（‘安代の秋’）

表 1 生育レベルの評価基準の概略

2段階評価	若 花		早期老花	
4段階評価	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
柱頭部の形状	不 割	不 割	Y 字形状	Y 字形状
子房の色	鮮緑色	鮮緑色	くすんだ 緑色	全体に 黒ずみ
花粉の成熟	未 熟	成 熟	飛散済	飛散済

方法で各花冠の遠赤画像情報を算出し、生育レベルとの関係や早期老花・若花の判別能力を検討した。

個花の内部観察による生育レベルの4段階評価方法

本研究では、庄野ら（2009）と同じ評価基準・方法に基づいて花冠の生育レベルを破壊的に決定した。基本的には、花冠を切開して開き、内部の生育状況を確認する。まず、めしべの成熟の進行度を子房柱頭部の形状から判定し、これに花粉の成熟・飛散状況、さらには子房の色を加味して、生育レベルを Level-0（若）から Level-3（老）までの4段階に評価した。以上の評価基準の概略を表1にまとめる。

Level-0 は青紫色に色付いた開花前の蕾期であり、Level-1 は花粉が飛散を始める開花期に相当する。Level-2 以降では、個花は受粉して徐々に劣化を始め、Level-3 に至る。これよりさらに劣化が進むと茶褐色化し、老花となる。尚、本研究における若花は、「Level-0 と Level-1」、また早期老花は「Level-2 と Level-3」にそれぞれ相当する。

遠赤画像撮影装置の概要

まず、撮影カメラとしてチップサイズ縦 4.92 mm 横 6 mm の CCD を撮像素子とする NTSC 信号方式の民生用モノクロビデオカメラ B05-3M（（株）ビクセン、埼玉）を選択した。本機種選択の理由は、遠赤光に十分な感度を有しながら、比較的低コストなためである。

さらに、同カメラに焦点距離 6 mm（35 mm 版フィルムカメラに換算して約 36 mm）のレンズ（（株）トキナー、東京）を装着し、F 値を 2.8 に設定した。さらに、同レンズの前に、720 nm を中心透過波長とする半値幅 5 nm の狭帯域バンドパスフィルター（朝日分光（株）、東京）を装着し、カメラの向きを真下に固定した。次に、カメラから約 200 mm 下に撮影台に固定した個花を置き、花冠の側面を撮影した。尚、撮影台は、個花を花軸の周りに自由に手動回転できる様に工夫されている。

光源には 40 W の白熱電球（交流光源）を 4 個用いた。同電球の発光スペクトルの実測データを図2に示す。これらを撮影台を取り囲む様に四方に配置し、さらに、斜め約 45 度上方から撮影台に光を投射させることで花冠表面に凹凸による影が顕著に生じない様に慎重に配慮した。この際、個花と各電球との距離は約 100 mm であり、個花の位置での水平面照度は約 5,000 lx であった。さらに、外光が入射

図2 光源に使用した白熱電球（40 W）の発光スペクトル

しない様に撮影装置全体を遮光布で覆った。本撮影装置の概要を図3に示す。

遠赤画像の撮影方法

まず最初に個花を撮影台に固定し、花軸を中心に 90 度間隔で手動回転させながらその状況をデジタルビデオレコーダー GV-D900（（株）ソニー、東京）で動画撮影した。さらに後日、これらの動画データから、パーソナルコンピュータ PowerMacintosh G5（（株）アップル、東京）上の動画編集ソフトウェア iMovie（（株）アップル、東京）を用いて、回転角が 0 度、90 度、180 度、270 度の 4 画像を静止画像として取得した。画像形式は、256 階調、縦 480 ドット横 640 ドットの白黒画像（非圧縮 TIFF 形式）である。尚、画像中の個花上での空間分解能は、1 ドットあたり約 0.26 mm であった。

ここで、周期的に明暗変動する交流光源を用いたため、動画データを静止画像として取得する際、画素値が同変動の影響を受ける可能性がある。本研究では、庄野ら（2009）と同様の方法でこの問題に対応した。すなわち、まず、同一の情景を写した動画の中で、常に背景領域が最も明るいフレームを静止画像とすることで、明暗変動の影響を極力抑えた。さらに、特定の背景領域内の画素値が画像間で異なる様に事後的な画像処理で調整し、同変動の影響を補正した。得られた遠赤画像の例（‘安代の秋’）を図4に示す。同図中、上段が遠赤画像である。また参考として、同図下段に同個花の可視画像を示す。

遠赤画像から遠赤画像情報への集約方法

次に、個花毎に 4 枚撮影した遠赤画像を、庄野ら（2009）と同様の方法で数値情報である遠赤画像情報に集約した。以下にその方法の概略を述べる。まず、上記パーソナルコンピュータ上の画像処理ソフト ImageJ（NIH、米国）を用

図3 遠赤画像撮影装置の概要（左：撮影機材の構成，右：光源の水平配置の状況）

い、画像中の花冠領域を楕円選択ツールで目視選択し、領域内の画素値の「平均値、最大値、最小値」を求めた。この作業は、角度の異なる4画像全てで行うため、同「平均値、最大値、最小値」は、それぞれ1個花当たり4画像分求められる。さらに、これら4画像分の同「平均値、最大値、最小値」を各項目毎に平均し、最終的に3項目の遠赤画像情報、すなわち、領域内の画素値の「平均値（4画像間平均）、最大値（4画像間平均）、最小値（4画像間平均）」に集約した。

以上の様に、3項目に集約した画像情報は、“花冠領域内の画素値の平均値（4画像間平均）、最大値（4画像間平均）、最小値（4画像間平均）”などと表記すべきであるが、冗長なため、以下ではそれぞれ、“遠赤画像情報（領域内平均値）、遠赤画像情報（領域内最大値）、遠赤画像情報（領域内最小値）”の様に、適宜略記する。このため、以下で記述する3項目の画像情報は、それぞれ4画像間の平均値であることを留意されたい。

尚、上記の様に、花冠を一回転して撮影した4画像間で平均をとる理由は、花冠表面の生育のむらや、部分的な傷などの影響を避け、花冠全体の生育状況を各画像情報に反映させるためであるが、現状ではその処理のために個花の切除や手作業を必要とする。将来の実用化時には、切除や手作業の必要がない効率的な撮影方法の構築が必要であるが、具体策に関しては後述する。

データの集計と統計解析

本研究における数値データの集計には、パーソナルコンピュータ PowerMacintoshG5 上で動作する表計算ソフトウェア Excel（マイクロソフト（株）、東京）、平均値の有

意差検定や判別分析には統計解析ソフトウェア SAS-JMP（SAS Institute Japan（株）、東京）を用いた。尚、平均値の有意差検定は、2群間の場合は Student の t 検定（対応なし）を、3群間以上の場合は Tukey-Kramer の HSD 検定をそれぞれ適用した。

結果および考察

遠赤画像情報と生育レベルとの関係

1) ‘安代の夏’

まず、遠赤画像情報の、2段階の生育レベル（若花と早期老花）間の平均値の有意差検定の結果を示す。この際、それぞれのデータ（個花）数は、若花が21、早期老花が27である。同平均値間には、3項目の遠赤画像情報全てにおいて0.01%以下水準の有意差があった（自由度46）。すなわち、領域内平均値においては、 t 値 = -6.45 , p 値 < 0.0001, また領域内最大値においては、 t 値 = -4.90 , p 値 < 0.0001, さらに領域内最小値においては、 t 値 = -6.86 , p 値 < 0.0001であった。以上は、同情報に基づく生育レベルの2段階評価が十分有望であることを伺わせる結果である。

次に、生育レベルを4段階とした場合の結果を図5に示す。同図は、横軸を生育レベル、縦軸を画素値とした場合の遠赤画像情報（領域内平均値、同最大値、同最小値）の生育レベル内平均値の推移である。また、表2（a）に各生育レベルのデータ数、ならびに遠赤画像情報の平均値と標準偏差を示す。さらに、表3に Tukey-Kramer の HSD 検定による、生育レベル内平均値の多重比較の結果を HSD 閾値行列として示す。同行列中の HSD 閾値は、観測された各平均値間の絶対差から HSD（最小有意差）を引いた値であり、

図4 花冠の遠赤画像の例（‘安代の秋’，上段：遠赤画像，下段：可視画像）

同値が正の生育レベル間が有意差有りと判定される ($q^* = 2.67, \alpha = 0.05$).

図5では、3項目とも生育レベルとの間の直線的関係が見て取れる。また特に、領域内最小値においては Level-2 と Level-3 間を除く他の生育レベル間において、5%以下水準の有意差が認められる。ここで、Level-0 と Level-1 間の有意差は開花期の判定に、さらに Level-1 と Level-2 間の有意差は受粉の有無、すなわち老花の開始期の判定に、それぞれ有用である。これは、さらに詳細な生育ステージの判定を実現する上で本情報が有用であることを示唆している。

2) ‘安代の秋’

まず、若花と早期老花の2段階の生育レベルにおける遠赤画像情報の平均値の有意差検定の結果を示す。この際、それぞれのデータ（個花）数は、若花が43、早期老花が39である。同平均値には‘安代の夏’と同様に、3項目全てにおいて0.01%以下水準の有意差があった（自由度80）。すなわち、領域内平均値においては、 t 値 = -9.82 , p 値 < 0.0001 , また領域内最大値においては、 t 値 = -10.4 , p 値 < 0.0001 , さらに領域内最小値においては、 t 値 = -9.15 , p 値 < 0.0001 であった。以上は本品種においても同情報に基づく生育レベルの2段階評価が十分有望であることを同わせる結果である。

次に、生育レベルを4段階とした場合の結果を図6に示す。また、表2(b)に各生育レベルのデータ数、ならびに遠赤画像情報の平均値と標準偏差を示す。さらに、表4にTukey-KramerのHSD検定による、生育レベル内平均値の多重比較の結果をHSD閾値行列として示す ($q^* = 2.63, \alpha = 0.05$).

図6では、3項目とも生育レベルとの間に‘安代の夏’の場合より明確な直線的関係が見て取れる。しかし特筆すべきは、3項目とも4段階の全生育レベル間において5%以下水準の有意差を示した点である。しかも、同図ならびに同表には示していないが、特に領域内平均値において、全生育レベル間において1%以下水準の有意差を示した。この結果は、少なくとも‘安代の秋’を対象とする場合、領域内平均値、同最小値、同最大値の中のいずれの遠赤画像情報も、より詳細な生育レベルの判定の実現に有用なことを示唆している。

シミュレーションによる若花・早期老花の判別能力の評価

遠赤画像情報を用いて若花・早期老花の2段階の生育レベルを判定した場合の、おおよその判定能力を評価するために、各品種毎に、目的変数を生育レベル（2段階）、説明変数を遠赤画像情報とした判別分析に基づくシミュレー

図 5 遠赤画像情報の 4 段階生育レベルにおける平均値（‘安代の夏’，異なる文字間で 5% 以下水準の有意差あり，誤差バーは標準偏差）

表 2 遠赤画像情報の 4 段階生育レベル毎の集計結果

(a) ‘安代の夏’

生育レベル		Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
データ数		4	17	18	9
領域内 平均値	平均値	133.79	116.05	94.09	85.18
	標準偏差	10.48	18.20	12.32	9.78
領域内 最大値	平均値	201.31	168.81	141.54	134.61
	標準偏差	16.48	27.77	20.75	24.49
領域内 最小値	平均値	88.63	69.85	50.36	44.11
	標準偏差	16.93	14.56	9.44	4.66

(b) ‘安代の秋’

生育レベル		Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
データ数		14	29	15	24
領域内 平均値	平均値	158.76	134.70	121.12	104.38
	標準偏差	12.90	9.68	12.45	9.47
領域内 最大値	平均値	203.86	191.08	174.11	154.56
	標準偏差	9.80	11.57	15.09	12.40
領域内 最小値	平均値	110.18	81.40	70.53	49.73
	標準偏差	15.31	9.38	11.25	9.86

表 3 遠赤画像情報の 4 段階生育レベルにおける HSD 閾値行列（‘安代の夏’， $q^* = 2.67$ ， $\alpha = 0.05$ ）

領域内平均値	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
Level-0	-26.96	-3.44	18.63	25.70
Level-1	-3.44	-13.08	9.07	15.15
Level-2	18.63	9.07	-12.71	-6.66
Level-3	25.70	15.15	-6.66	-17.97

領域内最大値	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
Level-0	-45.24	-3.05	24.40	28.25
Level-1	-3.05	-21.95	5.63	7.82
Level-2	24.40	5.63	-21.33	-19.19
Level-3	28.25	7.82	-19.19	-30.16

領域内最小値	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
Level-0	-21.93	1.54	21.12	25.88
Level-1	1.54	-10.64	9.00	12.96
Level-2	21.12	9.00	-10.34	-6.41
Level-3	25.88	12.96	-6.41	-14.62

図6 遠赤画像情報の4段階生育レベルにおける平均値（‘安代の秋’，異なる文字間で5%以下水準の有意差あり，誤差バーは標準偏差）

表4 遠赤画像情報の4段階生育レベルにおけるHSD 閾値行列（‘安代の秋’， $q^* = 2.63$ ， $\alpha = 0.05$ ）

領域内平均値	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
Level-0	-10.67	14.87	27.15	44.88
Level-1	14.87	-7.42	4.60	22.53
Level-2	27.15	4.60	-10.31	7.44
Level-3	44.88	22.53	7.44	-8.15

領域内最大値	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
Level-0	-12.16	2.30	17.79	38.47
Level-1	2.30	-8.45	6.74	27.64
Level-2	17.79	6.74	-11.75	8.96
Level-3	38.47	27.64	8.96	-9.29

領域内最小値	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3
Level-0	-10.96	19.34	28.88	50.70
Level-1	19.34	-7.62	1.65	23.67
Level-2	28.88	1.65	-10.59	11.25
Level-3	50.70	23.67	11.25	-8.37

シミュレーションを試みた。この際、説明変数として、3項目の遠赤画像情報の中から領域内平均値を採用した。この理由は、領域内平均値が他の2項目の遠赤画像情報と相関が高く、少なくとも2段階生育レベルの判定においては、遠赤画像情報の判別能力を代表し得ると判断したことによる。実際、

‘安代の夏’における領域内平均値と、同最大値ならびに同最小値間の相関係数は、それぞれ0.900と0.965と非常に高く、さらに‘安代の秋’では、それぞれ0.960と0.981とより高い値を示している。その一方、同最大値と同最小値間の相関係数は、‘安代の夏’で0.810、‘安代の秋’で0.911と若干低い傾向にあった。

さらに、判別分析の手法としては、既述の統計解析ソフトウェア SAS-JMP における“線形判別分析”，すなわち、各群共通の共分散行列を用いて計算した、各データと各群平均値間の Mahalanobis の距離に基づく判別方法を適用した。以下に、シミュレーションの具体的手順を示す。

- 1) 各品種毎に、全データを判別関数同定用データと検定用データにランダムに組み分ける。この際、各データの個数を、判別関数の精度を確保することを考慮してそれぞれ、7（同定）対3（検定）に設定する。
- 2) 判別関数（Mahalanobis の距離の計算式）を同定用データを用いて作成する。さらに同関数を用いて検定用データと各群平均値間の Mahalanobis の距離を計算し、生育レベルを判別する。最後に、実際の生育レベルとの比較から正解率を求める。
- 3) 上記手順を10回繰り返し、得られた正解率の平均値を求める。

シミュレーションの結果を図7に示す。2品種とも正解率の平均値は約85%以上であり、現時点においても本情報には十分高い判別能力が期待できる結果となった。

ここで、本研究の目的は若花と早期老花の2段階生育レベルの判定手法の実現にあるが、参考として生育レベルを4段階とした場合のシミュレーションを上記と同様の方法で予備的に行った（‘安代の秋’を対象）。その結果、正解率の平均値は60%程度に止まり、現時点では十分良好な判別能力は認められなかった。このため、4段階の生育レベルの判定手法の実現は今後の課題となるが、現状でも遠赤画像情報に基づく2段階生育レベルの判定が可能なが示唆された意味は大きいと考えられる。

遠赤画像情報による生育レベル判定手法の有用性と低コスト性

ここまでの結果から、本情報は上記2品種において若花と早期老花を90%弱の高い正解率で判定可能であることが示唆された。今回、岩手県を代表する2つの主力品種において、その有用性が認められたことは極めて重要であり、本手法の実用化を進める上で大きな推進力となり得る。また、本情報は4段階の生育レベルとの間に良好な直線的関係を示しており、今後、測定装置の高精度化などの改良で精度をさらに向上させれば、将来的には4段階の生育レベル判定の実現も十分可能と期待できる。

既述の様に庄野ら（2007）は、遠赤光における分光反射強度が若花・早期老花間で顕著な有意差を示すことを報告したが、今回の遠赤画像情報は、より低コストな測定装置を用いたにも関わらず、同等な有意差を示している。さらに、より詳細な4段階の生育レベル間でも直線的関係を示すなど、有用性がより向上した可能性もある。この原因は、庄野ら（2007）の測定方法が、花冠の一部を点的に測定する方法であったのに対し、今回は、画像を通じて花冠全体を2次元的に測定したため、その状況がより適切に把握できたことにあると考えられる。ここに、本研究で採用した画像計測の手法の利点が認められる。

今回開発した遠赤画像撮影装置の基幹となる機材は、ビデオカメラとバンドパスフィルターであり、その調達コストは約10万円程度（2006年当時）であった。この内、バンドパスフィルターは特注品のため約6万円と若干高価であったが、2012年現在では、ほぼ同等の既製品を半額以下で調達可能である。また今回は、動画を一旦デジタルビデオレコーダーに録画したため、同レコーダーに約20万円のコストが必要となったが、現在では、静止画像ならびに動画画像をUSBケーブル経由でパーソナルコンピュータに直接デジタル記録できる低コストなカメラが多数開発されており、同コストは省略できる。この様に、必要な機材は年々低コスト化が進んでおり、現在では、同等の撮影装置をパーソナルコンピュータを含めても約10万円程度で構築することが決して不可能でない状況にある。

以上から、遠赤画像情報に基づく低コスト生育レベル判定手法の実現可能性は十分高いと考えられる。

図7 若花・早期老花の判別能力のシミュレーション評価結果（各品種とも $n = 10$ ，誤差バーは標準偏差）

遠赤画像情報と生育レベル間の関係をもたらし要因

‘安代の夏’と‘安代の秋’において、本情報（および700～900 nmにおける分光反射強度）と生育レベル間の関係をもたらし要因はまだ未解明である。例えば、図4に見られる様に、花冠の表面には、開花期以降、凹凸が生じる。既述の様に、今回は複数光源を用いて照明態勢にも配慮したが、若干の陰影が生じるため、これが結果に影響した可能性も考えられる。しかし、花冠の凹凸はLevel-0からLevel-1の間に一気に生じるがその後はほとんど変化しない。この傾向は、本情報と生育レベルとの直線的な関係とは異なる。さらに、領域内最大値と領域内最小値の間には、既述の様に高い相関性がある。前者は、花冠上の明領域である凸部の画素値を、後者は暗領域の凹部の画素値を反映すると考えられるため、凹凸両部の画素値と生育レベルとの関係が互いに類似することは、本情報と生育レベルとの関係に花冠の凹凸が大きく影響しない可能性を示唆している。以上から、花冠の凹凸が本情報と生育レベルとの関係に本質的な影響を与えない可能性は高いと考えられるが、より厳密な結論を得るには、花冠表面の画素値の空間周波数や、画素値の分布状況の精査などの多角的な考察が必要であり、今後の課題である。

また、庄野ら（2007）は、花冠の表面形状の変化など、よりミクロな物理的要因を有力な候補に挙げている。実際の要因が、花冠の凹凸を含めた物理的なものであれば、花冠の色が異なる別品種でも、その組織構造が類似していれば本情報と生育レベルが同様の関係を示す可能性が高い。しかし、上記2品種と花冠の色が異なるピンク色のリンドウ‘ラプリーアシロ’を用いた予備的検討（データ未公開）では、両者には特段の関係性はなく、上記2品種の結果とは異なった。この結果は、物理的要因を否定する証左の1

つとなり得るが、当該品種の花冠の組織構造が他と異なる可能性もあるため、最終的には、組織学的な観察を含めた検討が必要である。

ここで、リンドウ花冠の色の違いは主要な含有色素であるアントシアニンの違いに由来し、エゾリンドウ系統の青紫色はデルフィニジン系であることが知られている（例えば、安田 1993）。このため、化学的要因の候補としては同色素が分解して生成される 2 次代謝物質の蓄積による当該波長域の吸光度の上昇（反射率の低下）などが考えられる。今後は、例えば、同系のアントシアニンを含有するが、花冠（花卉）表面の組織構造のみ異なる別種の花弁作物で上記 2 品種と同様の傾向を示すかどうかなどの間接的な検討、さらには、HPLC による原因物質の同定などの直接的な検討による要因の確定が望まれる。

今後の課題と展望

遠赤画像情報には、エゾリンドウ系統の 2 品種で生育レベルを判定する情報としての有用性が認められた。これは、同色かつ同系統の別品種においても有用となることを期待させるが、実際に有用となる品種の確認は今後の課題である。

また、現状では画像撮影やその後のデータ解析に手作業による部分が多い。当然ながら今後の本判定手法の実用化には、これらの部分を自動化する必要がある。現状の主要な手作業は、切除した個花の回転撮影であるが、当然ながら、実用化時には、個花を手動で回転させることはもちろん、破壊的な個花の切除は実施困難である。したがって実用化時には、個花を切除せずに茎に着生したまま、その側面をなるべく多くの角度から撮影する方法を考案する必要がある。例えば 1 つの案として、ベルトコンベアなどの台に寝かせた切り花を取り囲む様に複数のカメラを設置し、着生する個花を多角度から同時に撮影する方法も考えられる。この方法では花冠の反対側が撮影できないが、切り花の移動時に主茎をローラーで微速回転させるなどの工夫を加えればこの問題はある程度解消が可能である。

また、画素値の集計のための花冠領域の選択も手作業によるが、実用化時には、画像中の同領域を自動検出するアルゴリズムの開発が必要である。リンドウ花冠の色（青紫、ピンク、白など）と葉群の色（緑）の違いは顕著なため、可視画像を同時に撮影しておけば、色の違いに基づく同領域の自動検出は十分可能と考えられる。

ここで、庄野ら（2009）はリンドウ花冠の生育レベルとその紫外画像情報の間に有意な関係があることを報告している。このため、本研究の遠赤画像情報に加え、紫外画像情報、さらには今後報告されるであろう他の有用な情報を統合することで、生育レベルをより高精度に判定する手法の開発も可能と期待できる。さらに将来的には、画像計測の利点を生かし、上述の様にベルトコンベア上を移動する切り花全体の画像から生育状況を即時に判定するシステムの実現も十分視野に入ると考えられる。

摘要

本研究では、切り花リンドウの生育レベルの非破壊・非接触的な判定手法の低コストな実現を目指し、安価な機材による遠赤画像撮影装置を開発した。さらに、求めた遠赤画像情報の生育レベルの判別能力を検討したところ、岩手県の有力品種であるエゾリンドウ系 2 品種において、若花と早期老花を高い正解率で判別可能であるなど、高い有用性を確認した。この結果は、遠赤画像情報に基づく低コストな測定手法が十分実現可能であり、リンドウの生育レベルの非破壊・非接触的判定の実現ならびにその低コスト化に寄与可能なことを示唆するものである。

謝辞

本研究を行うにあたり、岩手県八幡平市花き研究開発センターの日影孝志氏、ならびに高橋亮氏には、供試材料の提供のみならず、数多くのご助言をいただいた。両氏には心より感謝の意を表する。また、岩手大学農学部農林環境科学科リサイクル生物生産工学講座環境制御工学研究室（現岩手大学農学部農学生命課程生物環境科学分野）の学生諸氏には多大なご協力をいただいた。ここにあわせて深く感謝する。

引用文献

- 今西英雄・大久保敬・大川 清・長村智司・武田恭明・小西国義・稲葉久仁雄・森源治郎・土井元章・五井正憲・加古舜治・田中豊秀・河瀬晃四郎（1995）リンドウ，「花卉園芸」，文永堂，東京，127-131。
- （財）日本花普及センター（2006）「切り花の品質保持マニュアル」，流通システム研究センター，東京，143 pp。
- 庄野浩資・西川朝也（2004）切り花リンドウの採花ステージ評価における画像情報の有効性に関する研究，農業情報研究，13(4): 317-330。
- 庄野浩資・峠 愛美（2006）切り花リンドウの採花ステージ評価における画像情報の有効性に関する研究—輪郭情報と色情報に基づく未熟蕾自動検出の可能性—，農業情報研究，15(1): 61-76。
- 庄野浩資・関 朝美・松嶋卯月・小出章二・武田純一（2007）切り花リンドウ花卉の分光放射輝度の簡易測定による老花早期検出の可能性に関する検討，農業情報研究，16(3): 181-187。
- 庄野浩資・関 朝美・山口香子・松嶋卯月・小出章二・武田純一（2009）切り花リンドウの生育ステージ判定における紫外線画像の有効性に関する検討，農業情報研究，18(3): 122-129。
- 安田 齊（1993）「花色の生理・生化学」，内田老鶴圃，東京，176-177。
- 吉池貞蔵（編）（1992）「育種と栽培・リンドウ」，誠文堂新光社，東京，177 pp。

受付日 2012年 6月28日
受理日 2012年10月18日
担当分野 工学分野

Inexpensive Method for Determining the Growth Stage of Cut Japanese Gentian Flowers from Far-red Images

Hiroshi Shono^{*1)}, Kazuhiro Serizawa²⁾, Asami Seki³⁾, Uzuki Matsushima¹⁾,
Shoji Koide¹⁾, Fumi Tatsuzawa¹⁾ and Jun-ichi Takeda¹⁾

1) Iwate University, Ueda 3-18-8, Morioka 020-8550, Japan

2) NEC Nexsolutions, Mita 1-4-28, Minato 108-8338, Japan

3) Jouhougiken, Kikusui 11-10, Utsunomiya 320-0844, Japan

Abstract

Japanese gentian (*Gentiana triflora* var. *japonica*) is one of the most important floriculture crops grown in Iwate Prefecture; it is generally grown for cut flowers. Because the flowers gradually deteriorate after harvest, along with the commercial value, the growth stage of harvested flowers could be essential information for scheduling storage and transport so as to maintain the commercial value for as long as possible. However, to date, no practical technique has been developed to discriminate the growth stages. By examining the corollas of the flowers destructively by spectroradiometer, we found that the spectral radiance of older samples was lower than that of younger samples at wavelengths between 700 and 900 nm. However, for practical application of this information, an inexpensive, nondestructive technique is needed. So we attempted to distinguish the growth stage by measuring the pixel values of the corollas in far-red (720 nm) images with a new, low-cost imaging system. The pixel values decreased gradually and significantly with senescence of the flowers. Furthermore, a test of the technique's ability to discriminate younger from older samples showed fairly good performance. We discuss the suitability of the method and the cost performance of the imaging system.

Keywords

Japanese gentian, far-red light, spectral image, image measurement, precision farming

* Corresponding Author
E-mail: shono@iwate-u.ac.jp