

平成 22 年 1 月 26 日現在

研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19780117  
研究課題名（和文） ハイパースペクトルセンサーを活用したサクラ類の  
活力度診断手法の開発  
研究課題名（英文） Development of a method to diagnose tree vigor of flowering cherries  
(*Cerasus* spp.) using a hyperspectral sensor  
研究代表者  
今西 純一 (IMANISHI JUNICHI)  
京都大学・大学院地球環境学堂・助教  
研究者番号：80378851

研究成果の概要：樹木の活力度診断において、葉内のクロロフィルの定量は不可欠である。本研究は、ヤマザクラとソメイヨシノの葉内クロロフィル濃度を推定するための最適な指数を開発することを主な目的とした。8 タイプの指数を使い、最適なハイパースペクトル指数を探索した結果、選択された指数は既存の指数よりも性能が高く、SPAD の約 2 倍よい精度を持っていた。また、新しく提案された差分・比一体型指数は、クロロフィル濃度推定に有用であった。

交付額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 2,300,000 | 0       | 2,300,000 |
| 2008 年度 | 500,000   | 150,000 | 650,000   |
| 総計      | 2,800,000 | 150,000 | 2,950,000 |

研究分野：森林科学

科研費の分科・細目：林学・森林工学

キーワード：リモートセンシング、緑化学、造園学、林学、樹木医学

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) サクラ類の活力度診断手法の開発の必要性

サクラ類は日本の春を印象づける、最も馴染み深い花木である。サクラ類は日本の街路樹の中でもイチョウに次いでよく植えられ、サクラ並木として整備され観光名所となっている場所も多い。しかし、管理不足等のため、多くの個体が生育不良となっている場所もある。このような状況を正確に把握し、適切に管理を行っていくために、樹木の活力度（衰退）を客観的に診断できる手法の開発は必須である。しかし、これまでサクラ類の活力度診断に関して十分な研究が行われてきたとは言えなかった。

## (2) 活力度診断手法の状況

植栽現場においては、樹木の外観等により活力度を経験的に判定されることが多い。そのため、調査者の主観が入りやすく個人差が生じやすいという問題があった。また、行政にとっても主観的判断基準しかない状況では、貴重な樹木の保全のための予算化を積極的に進めにくいという声もあった。

また、客観的な数値を用いた活力度の診断手法については、測定条件や樹種が限定されるため、実用化には至っていなかった。

サクラ類の活力度診断に関して、里村ら（2005）は、ヤマザクラの活力度診断指標開発の第1段階として、良好木と衰退木の間で様々な指標について測定を行い、2時期の葉緑素計値の変化率、葉面積等が活力度の有効な診断指標となる可能性を示している。久米ら（2006）は街区公園のソメイヨシノと目視

による活力度と葉緑素計値との間に有意な相関があったことを報告している。葉緑素（クロロフィル）に代表される葉の特性の差異は、サクラ類の活力度診断の有効な指標であることが予想された。

### (3) ハイパースペクトルセンシング技術の活用

数個の波長帯（バンド）に計測が限られていたマルチスペクトルセンサーに代わり、数百バンドを計測できる航空機・衛星搭載のハイパースペクトルセンサーが普及しつつある。ハイパースペクトルデータを用いれば、正規化差分植生指数（NDVI）等の従来の植生指数と比較し、高い精度で樹木の活力度を診断できると予想された。

### (4) 活力度の指標としてのクロロフィル濃度の測定

伝統的に、クロロフィル濃度は、クロロフィルを有機溶媒により抽出し、分光光度計で測定することによって、定量されてきた。しかしながら、この方法は、破壊的であり時間を要するという不利な点を持っている。より最近では、葉の分光特性に基づく新しい代替手法が開発され、非破壊で、迅速に、そして野外においてクロロフィル濃度を定量することを可能にしている。

SPAD-502 葉緑素計（ミノルタカメラ社）は、葉内クロロフィル濃度のレベルを、非破壊で測定するための、もっとも普及している器械である。SPAD 葉緑素計は多くの科学研究において有効に使われているが、いくつかの限界も知られている。

ハイパースペクトルセンサーの開発にとともに、クロロフィル濃度の定量のためのスペクトルの分析手法の開発がますます増えている。しかし、クロロフィルの情報を抽出するために、植生反射スペクトルに影響を与える他の要因も考慮に入れなければならない。葉の反射は、クロロフィル濃度とは無関係に、例えば、毛やワックスといった葉の表面の特徴や、葉の厚さの違いの影響を受ける。したがって、より正確な定量が必要な場合には、それぞれの対象種にたいしてスペクトルとクロロフィル濃度の間の関係が求められる必要がある。

野外において吸収スペクトルから葉内クロロフィル濃度を推定する研究は、極めて限られている。Richardson らは、放射の吸収を直接に測定することによってクロロフィル濃度を推定する測定器は、反射を測定する器械よりもよい精度で推定することが可能であるとの仮説を立てた。しかしながら、Richardson らの研究では、吸収スペクトルの性能は評価されておらず、透過型の器械と考えられる 2 つのハンディ葉緑素計 CCM-200

（Opti-Sciences 社）と SPAD-502 が評価されているだけである。したがって、吸収スペクトルの可能性についてさらに検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、反射スペクトルや吸収スペクトルを測定してヤマザクラとソメイヨシノの葉内クロロフィル濃度を推定するための最適な指数を探索すること、種に特化した最適なクロロフィル指数の性能を既存のクロロフィル指数や SPAD と比較して評価することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) サンプルの採取

本研究は、ヤマザクラ *Cerasus jamasakura* (Siebold ex Koidz.) H. Ohba var.

*jasasakura* (あるいは、*Prunus serrulata* Lindl. var. *spontanea* (Maxim.) E. H. Wilson や *Prunus jamasakura* Siebold ex Koidz. として知られる) と、ソメイヨシノ *Cerasus* × *yedoensis* ‘Somei-yoshino’ (あるいは、*Prunus* × *yedoensis* Matsum. cv. *Yedoensis* として知られる) を対象とした。

ヤマザクラ 96 枚、ソメイヨシノ 100 枚の葉のサンプルを、京都市の岡崎疎水、山科疎水、円山公園、哲学の道から採取した。サンプルは、事前に目視によって葉色が評価され、広範なクロロフィル濃度のレベルをカバーするように選定された。採取後、サンプルは、水分を保持するように直ちに処置され、冷暗所に保管された。

### (2) 分光測定とクロロフィル濃度の定量

採取後、数時間内に、実験室においてすべてのサンプルに次の処理を行った。まず、スポットサイズ直径 10 mm のプラントプローブとリーフクリップを接続した FieldSpec HandHeld 分光放射計 (Analytical Spectral Devices 社) によって、325~1,075 nm の波長の葉の反射および吸収スペクトルを測定した。リーフクリップの端部の標準白板と標準黒板を用いて、葉の反射スペクトルと透過スペクトルを測定し、それらから吸収スペクトルを算出した。

さらに、ハンディ葉緑素計 SPAD-502 を使って、葉のスペクトルを測定したのと同じ部位を測定した。

SPAD 測定の後、直ちに、各葉の上記の同じ部位から円形のサンプルを型で抜き取り、N, N'-ジメチルホルムアミド (DMF) によって 4°C で 1 晩の間、クロロフィルを抽出した。クロロフィルの吸光度は、分光光度計によって測定し、Porra ら (1989) の式を用いてクロロフィル濃度を定量した。

### (3) 種に特化した最適な指数の探索

以下の8タイプの指数の検討を行った。

- T1) 単独型
- T2) 差分型
- T3) 比型
- T4) 正規化差分型
- T5) 第3バンドを含む比型
- T6) 第3バンドを含む正規化差分型
- T7) 面積型
- T8) 差分・比一体型

T8は本研究で新しく提案された指数のタイプである。T8は、2つの基本的なタイプである、差分型と比型を組み合わせることによって、個々の葉の表面や構造の差異あるいは分光測定中の照射光の変化によって生ずるスペクトルへの加算的效果と乗算的效果の両方を除去することが期待される。

ヤマザクラおよびソメイヨシノの最適なクロロフィル指数を選択するために、8つのタイプの指数に対して、5 nm 間隔の波長（バンド）のすべての組み合わせを検討した。直線、2次多項式と指数関数を、指数値と実験室において定量されたクロロフィル濃度のデータセットにあてはめて、10重交差確認RMSE (cvRMSE) を計算した。続いて、cvRMSEが最小となる最適な指数とあてはめ関数の組み合わせを選択した。また、その交差確認 $R^2$  (cv $R^2$ ) を求めた。

選択された指数がクロロフィル濃度の変動を説明する機構を理解するために、指数を構成する要素のcv $R^2$ を分析した。クロロフィル指数のcv $R^2$ の80%以上のcv $R^2$ を単独でもつ要素を主要要素と定義し、80%未満のcv $R^2$ を単独でもつ要素を副次要素と定義した。

### (4) 既存のクロロフィル指数と SPAD の性能の評価

文献レビューから、全部で46の既存のクロロフィル指数がリストアップされた。すべての既存の指数は、反射スペクトルか、反射の微分スペクトルに基づいており、吸収スペクトルを利用した指数はなかった。既存の指数と SPAD の性能は、上記と同じ方法に従い10重交差確認RMSE (cvRMSE) と10重交差確認 $R^2$  (cv $R^2$ ) を計算して評価した。

## 4. 研究成果

本研究において開発されたハイパースペクトル指数は、ヤマザクラあるいはソメイヨシノの葉内クロロフィル濃度の推定において、既存のどの指数や SPAD よりも優れていた。選択された最適なクロロフィル指数のcv $R^2$ は、ヤマザクラで0.963~0.861、ソメイヨシノで0.903~0.774と高かった。cvRMSEからは、SPADの約2倍よい精度を持つことが確認された。

反射スペクトルを用いる指数においては、

黄や飽和していない赤の波長域（本研究においては570~645 nm）とレッドエッジ域（705~755 nm）の波長が、主要要素として選択されていた。また、吸収スペクトルを用いる指数においては、緑の波長域とレッドエッジ域が主要要素として選択されていた。したがって、これらの波長は、葉内クロロフィル濃度を推定するために特に重要であると考えられた。これは、反射スペクトルについての先行研究の結果と一致していた。

一方、紫の波長域（本研究においては400 nm）と青の波長域（455 nm）や近赤外域（770 nm 以上）は、これらの波長域ではクロロフィル濃度にもなうスペクトルの変化が不安定であったため、最適な指数では主要要素として選択されず、単独の使用は有効でなかった。しかしながら、近赤外域は、5つの反射指数が近赤外の波長によって著しく改善されたように、黄の波長域やレッドエッジ域との組み合わせにおいて有効であると考えられた。おそらく、近赤外域は、クロロフィルの吸収に直接関係しておらず、また、反射スペクトルにおいては葉における反射率が高く、紫や青の波長域に比べてノイズが少ないため、照射光の変化などの測定時の誤差を除去するのに有効であったのであろうと考えられる。

紫や青の波長は、3バンド以上を利用する指数において利用されており、葉の表面の個体差の影響を低減する補助的な機能があった可能性がある。例えば、445 nmは、可視全域にわたって反射率を高める傾向にある葉の表面の高い（鏡面）反射を補正するための指標として提案されている（Sims and Gamon, 2002）。

新しく提案されたタイプの指数である差分・比一体型指数（T8）は、最適なクロロフィル指数において、ヤマザクラの3バンド以上を利用可能な12ケース中の4ケースで、ソメイヨシノの同様の12ケース中の10ケースで選択されたように、有効であると考えられた。このタイプは、第3バンドの使用の点で新しい。すなわち、従来、第3バンドはT5やT6に見られるように、他の2バンドにおける望まれない影響を除去するためだけに使用されてきた。一方、T8は、差分タイプと比タイプを組み合わせ、第3バンドを独自の変数として用いている。T8は、その型から、スペクトルにたいする加算的影響と乗算的影響の両方を除去することが期待される。この新しい指数のタイプの汎用性については、さらに検討する必要があると考えられた。

クロロフィル濃度にもなうスペクトルの変化の特徴は、全体として、反射スペクトルと吸収スペクトルの間で基本的に類似していたが、ピークと谷はお互いに逆の関係であった。反射スペクトルを用いる指数と吸収

スペクトルを用いる指数の性能は、ヤマザクラとソメイヨシノの両方において、ほぼ同等であった。Richardson ら (2002) は、吸収率は反射率よりもクロロフィル濃度のよりよい推定が可能であるとの仮説を立てたが、本研究において、反射スペクトルを用いる指数と吸収スペクトルを用いる指数の性能の差は小さかった。

SPAD は、本研究において開発されたハイパースペクトル指数やほとんどの既存の指数よりも、性能がよくなかった。SPAD の誤差 (cvRMSE) は、本研究において最適な指数の約 2 倍大きかった。SPAD-502 は、日本においてイネの窒素の状態を診断するために開発されたので、SPAD-502 において選択されている波長は最適でなかった可能性がある。

以上のように、本研究では、ヤマザクラおよびソメイヨシノを対象とし、樹木の活力度診断に不可欠である葉のクロロフィル濃度を、野外において非破壊で高精度に推定するためのハイパースペクトル指数を開発した。その結果、ハイパースペクトル指数は、既存の指数や SPAD よりも性能が高く、SPAD の約 2 倍よい精度を持つことが確認された。また、新しく提案された指数のタイプである差分・比一体型指数は、クロロフィル濃度推定のために有用であることが示された。さらに、従来の仮説とは異なり、吸収スペクトルを用いる指数は、反射スペクトルを用いる指数と同等の結果を示すことが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Imanishi, J., Nakayama, A., Suzuki, Y., Imanishi, A., Ueda, N., Morimoto, Y. and Yoneda, M. , Nondestructive determination of leaf chlorophyll content in two flowering cherries using reflectance and absorptance spectra、Landscape and Ecological Engineering (Online First)、2010、査読有、掲載確定

[学会発表] (計 3 件)

- ① 今西純一、今西亜友美、宋泳根、上田佳史、森本幸裕、ハイパースペクトルセンサーによるソメイヨシノおよびヤマザクラの分光反射特性の計測、日本生態学会、福岡国際会議場、福岡、2008. 3. 17
- ② 宋泳根、今西純一、橋本啓史、萩原篤、守村敦郎、森本幸裕、ハイパースペクトルリモートセンシングによるサクラ類の活力度評価、ELR2008 (三学会合同大会)、福岡大学、福岡、2008. 9. 21
- ③ Song, Y.K., Imanishi, J., Hashimoto, H., Hagiwara, A., Morimura, A. and Morimoto, Y. , Assessing tree vigor

condition in *Prunus* species using hyperspectral remote sensing data、The 4th International Conference on Landscape and Ecological Engineering、中国文化大学、台北(台湾)、2008. 11. 23

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 植物の葉のクロロフィル濃度測定装置及び測定方法

発明者: 今西純一

権利者: 国立大学法人京都大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-185818

出願年月日: 2009 年 8 月 10 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今西 純一 (IMANISHI JUNICHI)

京都大学・大学院地球環境学堂・助教

研究者番号: 80378851