

## 論文内容の要旨

論文題目 時系列衛星データを用いた北東アジアにおける  
植物季節変動の評価手法に関する研究

Evaluation of phenological variations in northeastern  
Asia with time-series satellite data

氏名 大吉 慶

産業革命以降、人間活動による二酸化炭素の排出量は急激に増加し続け、大気中の二酸化炭素濃度は産業革命前の 220ppm から 360ppm へと約 30%増加している。地球の平均気温も 1981 年以降急上昇し、20 世紀中には  $0.6 \pm 0.2$  度上昇したとされている。そして、北半球の 20 世紀中の気温上昇は過去 1000 年のどの世紀よりも大きく、1990 年代は最も暖かい 10 年間であった可能性が大きいことが報告されている。さらに、2005 年には観測史上最高の全球地表面温度を記録した。

このように地球の気温上昇が観測されているが、人間が地球で生活していく上で問題となるのは、この気温上昇によりどのような現象が発生し、自然や社会にどのような影響を与えるかということである。地球温暖化の影響を早期に検出することは、温暖化が進行しつつあることを示す証拠となる。また、影響の場所や程度を特定することができれば、継続的・重点的な監視を続けていくため指針となることに加え、影響を軽減するための施策を講じるためにも重要である。

さらに、地球温暖化問題は個々の人間活動の総体として起きている現象であり、人類がこの問題を解決するには、行動を決定する個々の人間の環境に対する意識よる所が大きい。そのため、温暖化による影響の重大性を社会や市民に訴えていくことも、温暖化対策を推進していく上で重要である。

発芽や開花、開葉、紅葉・黄葉・落葉など季節特有の植物活動を意味する植物季節（フェノロジー）は、その地域の気候変化に敏感に反応し、暖かい年は開葉時期が早く、寒い年は開葉時期が遅くなるといったように植物活動を変化させる。植物季節は地球温暖化の影響を受けやすい指標であるため、植物季節は地球温暖化による影響を検知するための指標として用いることができる。また、植物は光合成により大気中の二酸化炭素を年間  $120 \times 10^{15} \text{gC}$  吸収しており、地球の炭素循環と密接に関わっているため、地球温暖化による植物季節への影響を捉えることは非常に重要である。

植物季節観測はこれまで地上で人間の目によって観測されてきたが、植物季節は地球規模の物質循環と深く関わっているため、広範囲を面的に観測することによって、はじめて物質循環を俯瞰的に理解することが可能となる。地球温暖化の影響を示す指標としても、広範囲を面的に観測することによって、環境変動に対する感度の高い地域とそうでない地域を特定することができ、脆弱な地域に対して重点的な観測を行うことで効率的な観測が可能となる。定点での地上観測による植物季節観測は、基本的に人間の目で観測されている。したがって、人的・コスト的な制約から広範囲を高密度で観測するのは不可能である、また、環境条件が厳しく人間が居住していないような地域の観測は不可能である。そこで、広域性、均質性、周期性に優れた衛星リモートセンシングのスペクトルデータから植物季節を観測することが期待されている。

本研究で対象とする北東アジアが含まれる北半球の中高緯度帯は、現在までの気温上昇率が高く、将来予測において今後の気温上昇も大きいことが予測されている。そのため、これらの地域の植物季節は地球温暖化の影響を最も強く受けていると考えられ、実際にどの程度影響を受けたのかを評価する技術を確立することは、これまでの影響を評価するとともに、継続的な観測をしていく上で欠かすことができない。しかしながら、北東アジアを対象として衛星リモートセンシングにより植物季節変動を観測した研究は存在しなく、地球温暖化に対してどのような場所が影響を受けやすいのかが評価されていない。

そこで、本研究では北東アジアを対象として気象衛星 NOAA に搭載された高時間分解能型センサである **Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)** を用いた植物季節の観測手法を開発し、植物季節変動の評価を行うことを目的とした。そして、1984年から2004年までの植物季節の変動傾向および気象要素（気温、降水量、被雲率）との関連性を明らかにした。

はじめに、AVHRRを用いた時系列解析で問題となるセンサ劣化やセンサ交代の補正を行い、またアジアに適した合成画像処理を行いデータセットの構築を行った。既存のデータセットは空間分解能が4-8 kmであり、地上観測値との検証が困難であったり、詳細な現象を捉えることができないという問題があったが、本研究では受信した生データから処理を行っているため、空間分解能が1 kmであり北東アジアに最適な前処理を行うことにより、これまでにない独自のデータセットを作成した。

次に、従来の合成画像処理で問題となる雲の残存と観測日間隔が不均等になるという問

題を、従来のアルゴリズムを統合化した新たな手法を開発することで解決した。また、雲が残存していたり観測日間隔が不均等であると、植物季節観測に大きく影響することを示した。統合化手法により、残存した雲の影響を除去するとともに観測日間隔を均等化した高品質な時系列 NDVI データセットの構築を可能とした。

そして、この時系列 NDVI データセットから春の開葉日と秋の落葉日を検出するアルゴリズムの開発を行った。衛星データによる植物季節観測では地上観測値による評価が限定的にしか行われてこなかったが、本研究では気象庁による地上で観測されたサクラの開花日、イチョウ・カエデの落葉日をそれぞれ、春の開葉日、秋の落葉日の検証データとすることで検出手法の評価を可能にした。従来のアルゴリズムおよび本研究で提案したアルゴリズムを評価し、最も高精度で検出できるアルゴリズムを検討したところ、開葉日に関しては従来手法よりも本研究で提案した平均値法が高精度で検出できることが確かめられた。検証を行った 1996 年から 2000 年までの 5 年間で、サクラの開花日と線形回帰した結果、決定係数は 0.60、回帰残差は約 11 日であった。

従来の手法で最も精度が高かった急上昇法では、決定係数は 0.44、回帰残差は約 13.6 日であることがら、提案手法の有効性を示すことができた。また、目視による検証においても、平均値法は南から北に向かって開葉していく様子を捉えることができていた。一方、秋の落葉日の検出に関しては、開葉日の検出アルゴリズムを落葉日の検出用に改良して落葉日の検出をしたが、地上観測値による検証の結果、落葉日を精度良く検出することはできなかった。これは、秋の落葉時期は春の開葉時期と異なり、NDVI の変化が緩やかであるため落葉日を検出することが困難であったと考えられる。

最後に、北東アジアにおける 1984 年から 2004 年までの植物季節の時系列変動の評価を行い、これまでにない詳細なスケールで開葉日の変動傾向の分布図および気象要素（気温、降水量、被雲率）に対する感度の空間分布図を作成した。落葉日に関しては時系列解析を行うのに十分な精度で検出することができなかったため、春の開葉日のみを対象とした。開葉日の変動傾向は、土地被覆により異なることが確かめられ、耕作地や草地では開葉日の有意な変動傾向が見られなかったのに対し、混合林や落葉広葉樹林では開葉日の早期化傾向が見られた。対象とした 21 年間で、土地被覆全体としては混合林で 12.2 日、落葉広葉樹林で 14.3 日開葉日が早期化する傾向が見られた。画素単位での解析の結果、混合林の中でも北緯 35 度以北の地域で早期化が顕著であった。気温上昇との感度解析の結果、混合林や落葉広葉樹林は、気温上昇に対して開葉日が早期化する傾向を示し、1 月から 5 月までの平均気温が 1 度上昇すると、混合林は 4.3 日、落葉広葉樹林は 4.2 日開葉日が早期化する傾向にあることが観測された。しかしながら、気温が高いにも関わらず開葉日がそれほど早くない年がいくつか観測された。そのような年は降水量が少ない、もしくは気温に対して相対的に降水量が少なく水分量が不足していたり、被雲率が低く日射量が多いために相対的に乾燥していることが気象データから確認されたため、気温は高くても乾燥によるストレスを受けて開葉日が早まらなかったと考えられる。このように本研究で開発した一

連の植物季節変動の評価手法により、開葉日の変動傾向を捉えると共に、気象要素に対する開葉日の応答特性を捉えることができた。

本研究で開発した植物季節観測手法を継続的に AVHRR データに適用していくことで、今後の植物季節変動も捉えていくことができる。そして、植物季節変動と気象データを解析することで、気候変動による気温や降水量などの変化が植物季節にどの程度影響を与えているかを評価することができる。また、現在運用中の Terra,Aqua/MODIS や、2009 年に打ち上げ予定の NPOESS/VIIRS、さらには日本により 2011 年に打ち上げ予定の GCOM-C/SGLI にも本手法は適用することができるため、本手法により継続的な植物季節観測を行うことが期待できる。