

9. 衛星データによる植物生産のモニタリング

A MONITORING OF PRIMARY PRODUCTION THROUGH SATELLITE DATA

多田 毅* ・ 沢本正樹*

Tsuyoshi TADA, Masaki Sawamoto

ABSTRACT; Analizing NDVI/iNDVI derived from NOAA AVHRR and NDVI observed on ground, the growth profile of paddy is observed over its growth cycle under cold-weather damage in 1993. Then good relationship between NDVI/iNDVI and paddy growth is confirmed. However, the crop of paddy has low relationship with iNDVI. Therefore, biomass production which can not be observed through iNDVI is regarded as a distribution of it for a spike. It is assumed that the distribution is propotional to the difference between estimated iNDVI of no crop paddy and actual one. Then the crop over the Tohoku district is estimated from iNDVI deficit.

KEYWORD; primary production, paddy area, NDVI, iNDVI

1 はじめに

地球規模の環境問題として議論される様々な現象に関わる重要な因子として、植物の活動を挙げる事ができる。しかし、その環境に対する影響力の大きさにもかかわらず、植物の活動と環境との複雑な相互作用を定量的に見積もる作業は容易ではない。様々な植物の生理学的な活動を地球上の物質循環・エネルギー循環と関連させて統一的に取り扱うために、純一次生産という指標が用いられる。純一次生産 (NPP, Net Primary Production) とは、緑色植物による有機物生産総量 (総一次生産) から、呼吸による自己消費量を減じた残りである。動物や人間が食べたり、利用したりできるのは、このNPPである。近年、NPPの分布を人工衛星を使って推定する試みが行われており、NDVI(the normalized difference vegetation index) と呼ばれる指標と、その時間積分値である iNDVI(the time integral of NDVI) が広く利用され、良好な結果が得られている。

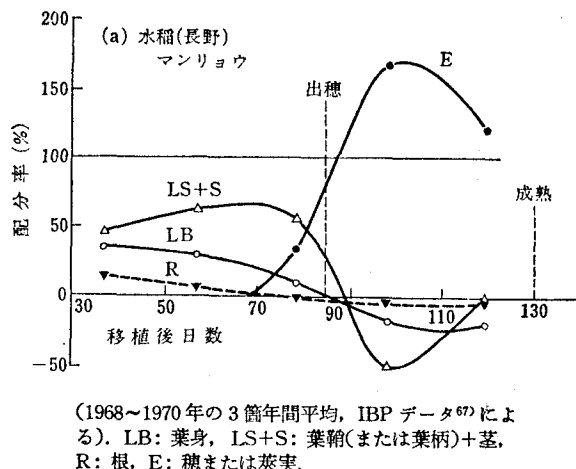


図 1-1 稲における生産の配分 (宮地, 1980)

*東北大学大学院工学研究科 Division of Engineering, Graduate Schools, Tohoku University

iNDVI と NPP の関係は、一般に成熟した森林や灌木においては比例に近い関係であることが知られているが、成長期にある若い植物や一年草、水稻などにおいてはそれほど単純ではない。まず、成長期にある植物は光合成産物を適当な形で配分して、新たな葉や根を作り、次の時期にはこの拡大された生産体制の下に再生産を行う。このとき、どの部分にどの程度配分されるかという問題が登場する。そこで、本研究では東北地方の水田域を対象として、極度の冷害であった1993年におけるNDVIと水稻の生育および収穫量との関係について検討を加える。比較対象とする平年値は1989～1991年の平均値である。

収穫量の予測や推定であれば、気象条件と生育状況の観察による推定方法が確立されている。本研究の目的は、穀物の収穫量を予測することではなく、植物生産とNDVIの関係の確認、および生産の配分の問題が衛星からのモニタリングに与える影響を検討することにある。

2 植生指標

2.1 NDVI

NDVIはNormalized Difference Vegetation Indexの略であり、植生指標と訳される。NDVIは人工衛星NOAAに搭載されたAVHRRセンサのChannel1とChannel2の輝度値より、次式によって計算される。

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Ch.2} - \text{Ch.1}}{\text{Ch.2} + \text{Ch.1}}$$

ここで、Ch.1は可視域(0.58～0.68 μm)の輝度、Ch.2は近赤外域(0.725～1.10 μm)の輝度である。AVHRRのCh.1の波長帯は可視光の赤色域に相当する。この波長帯の光は植物中のクロロフィルによって吸収される。そのため、この波長帯の反射率は低くなり、上空から観測される緑色植物のCh.1の輝度は小さくなる。それに対し、Ch.2の波長帯は近赤外域に相当する。この波長帯の光は、植物の葉の構造によって透過・散乱され、反射率が高くなる。そのため、上空から観測されるCh.2の輝度は大きくなる。その差が大きいほど、すなわちNDVIが大きいほど、葉の密度およびクロロフィルの密度が

高いと考えることができる。NDVIの値と葉の面積密度および光合成有効放射吸収量との相関関係が報告されており(Sellers, 1985, 1987), この値が大きいほど一画素の中での葉の密度、または各々の葉の中での葉緑素の密度が高いと考えられる。また、NDVIの季節変動特性を利用した地覆分類なども行われている(Tucker, 1985)。

人工衛星による観測と平行して、1993年度に仙台市郊外の水田において地上実測も行った。ポータブルフォトメーター(阿部設計製、2702型)を用いて測定した分光反射率からAVHRRと同じ波長帯のデータを用いて算定したNDVIと、その地点での稲の平均高さを図2-1に示す。また、東北全域の水田と森林におけるNDVIの季節変化を図2-2と図2-3に示す。

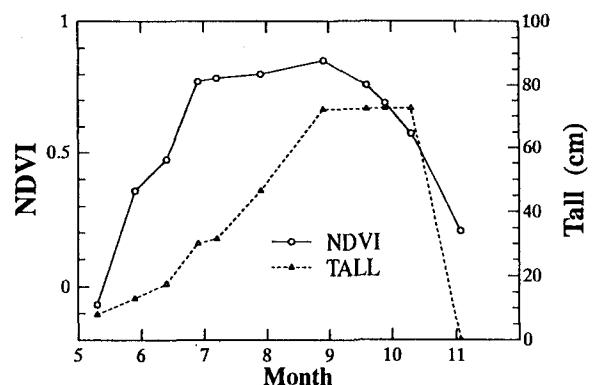


図 2-1 地上実測による水田域のNDVI

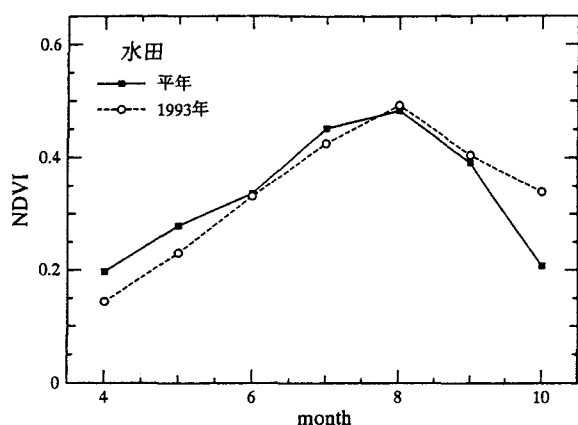


図 2-2 宮城県の水田域における NDVI

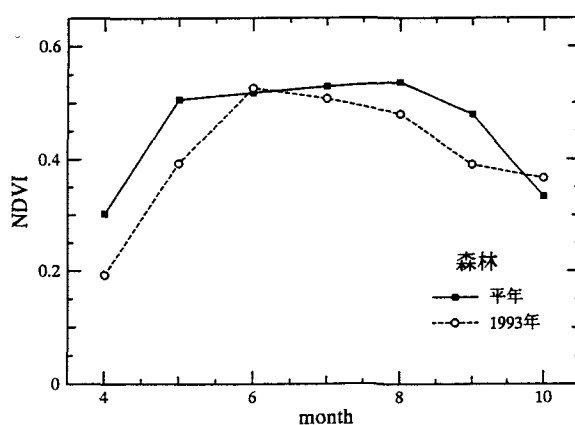


図 2-3 宮城県の森林における NDVI

NDVI はその性質上短期間で急激に変化するものではない。そのため、雲の影響等を取り除くために複数日にわたるデータを合成することが広く行われている。通常は 1 週間程度のデータを合成して週単位の代表値として扱われることが多いが、日本の場合、特に山岳地帯などは 1 週間以上にわたり雲に覆われ続けることも珍しくない。そこで本研究では 1 カ月間のデータを合成し、月単位の代表値として取り扱った。各画素毎に 1 カ月間を通じての最大 NDVI を計算し、その値をその地点での代表値としている。

2.2 iNDVI

iNDVI とは the time integral NDVI の略であり、NDVI をある一定期間積分することによって得られる指標であり、複数の NDVI データから次式によって表される。

$$iNDVI = \Sigma(NDVI_i \times d_i)$$

ここで、 $NDVI_i$ は i 番目の NDVI、 d_i は i 番目の NDVI に対応する観測日数である。すなわち、各データをその期間での代表値として、その NDVI に観測期間の日数を掛け合わせた値を積分している。NDVI と光合成によって吸収された放射エネルギーの間には正の相関があるため、積算 NDVI と生育期間中に吸収された積算放射量との間にも高い相関が予想される。そのため、植物による純一次生産量 (NPP) と iNDVI とを関連付ける研究が多く行われ、iNDVI と NPP とがほぼ比例関係にあることが確認されている。日本では、美濃らが iNDVI によって東日本全域にわたる地覆毎の NPP 分布推定を行っている (美濃, 1993)。東北全域の水田と森林における iNDVI の推移を図 2-5 と図 2-6 に示す。

3 1993 年の冷害下における NDVI と iNDVI の季節変化

3.1 1993 年度の冷害のタイプ

一般に、冷害による水稻生産量の減少の原因は、遅延型冷害 (生育の遅れによる障害) と障害型冷害 (花粉の異常等による障害)、さらに登熟期後半の天候不良による登熟不良やいもち病等などにわけられる。1993 年は、初期から低温・少照が続き全ての障害が多く発生したが、特に 7 月から 8 月にかけてオホーツク海高気圧に覆われ記録的な低温となり、障害不稔が激発し、作柄低下の最大の要因となった。

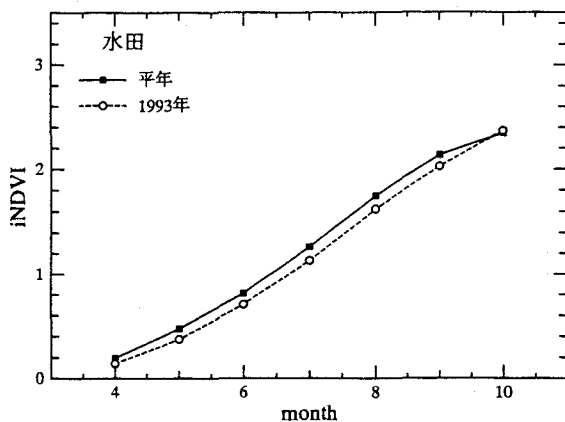


図 2-4 宮城県の水田域における iNDVI

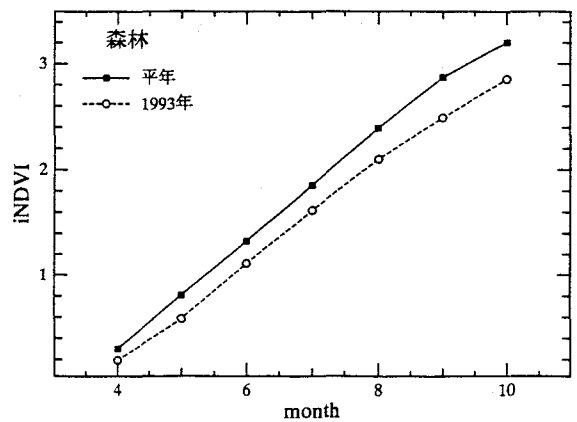


図 2-5 宮城県の森林における iNDVI

3.2 生育期

図 2-2～図 2-5 において生育期である 5 月から 8 月までを見ると、全体的に生育が遅れ気味であることがわかる(遅延型冷害)。しかし、記録的な収穫量の減少に比べると、この時点での NDVI の減少量は少ない。葉や茎の成長に対する冷害の影響はそれほど大きくないといえる。細心の管理下にある水稻よりもむしろ、森林の方が冷害の影響を強く受けていることがわかる。8 月までの時点での成育状況と NDVI の関係を表 3-1 に示す。

3.3 成熟期

10 月の時点では、NDVI および iNDVI と収穫量との関係は、8 月の時点よりもさらに不明瞭になっている(表 ??)。この表を見ると、冷害であった 1993 年においても、水田域における iNDVI の減少量は数パーセントである。むしろ、森林の方が iNDVI の減少が著しい。さらに、被害の大きかった地域ほど iNDVI の減少量が少ない。冷害時には、平年であれば穂を

表 3-1 1993 年 8 月の時点での成育状況

	青森	岩手	秋田	宮城	山形	福島	平均
iNDVI(水田)	91	94	86	92	84	83	89
作況指数	85	91	94	90	94	91	92

表 3-2 1993 年度 10 月の NDVI と iNDVI(対平年比(%))

	青森	岩手	秋田	宮城	山形	福島	平均
NDVI(森林)	103	98	99	110	105	99	101
NDVI(水田)	133	130	117	164	130	129	133
iNDVI(森林)	90	90	88	89	83	82	87
iNDVI(水田)	97	99	93	101	92	89	95
作況指数	28	30	83	37	79	61	56

つけ黄金色になるべき 9 月から 10 月にかけて、いわゆる『青立ち』の状態となり稲が緑の葉を付けたままであることが原因である。一般に iNDVI と純一次生産とは比例関係にあるため、稲による生産物は冷害下においても平年と変わらなかったといえる。障害型冷害の場合、出穂期に障害を受けてしまうとそれ以降気候が好転しても穂をつけることがないため、出穂期以降の生産は穂ではなく葉茎部に配分され、NDVI はむしろ平年よりも増加する。

4 iNDVI による収穫量の推定

出穂以降の生産量のうち、穂部に蓄積される部分が米としての収穫量となるといえる。そして、前章までの考察より、葉茎部に配分された生産量は NDVI/iNDVI に反映され、穂部に配分された生産量は反映されず、収穫量が多いほど iNDVI の増加量は少なくなると考えられる。そこで、出穂以降において iNDVI の増加量と葉茎部に蓄積された生産量とが比例関係にあると仮定し、次に示す方法で収穫量の推定を行った。推定方法の概念図を図 4-1 に、以下に示す計算によって得られた結果を表 4-1 に示す。

1. 全く出穂せずに生産量が全て葉茎に蓄積された状態を想定し、そのときの iNDVI を推定する。具体的には、10 月の NDVI を 9 月の NDVI に置き換えて iNDVI を計算したものを推定値とする。これは、9 月の時点での葉茎部への生産物の蓄積が 10 月の時点でも維持されていると想定したことになる。
2. 推定した iNDVI と実際の iNDVI との差が、穂に蓄積された生産量に相当する iNDVI であると考え（図 4-1）。
3. 平年時の iNDVI の差と平年時の作況指数とを基準とし、1993 年の iNDVI の差を作況指数に換算する。

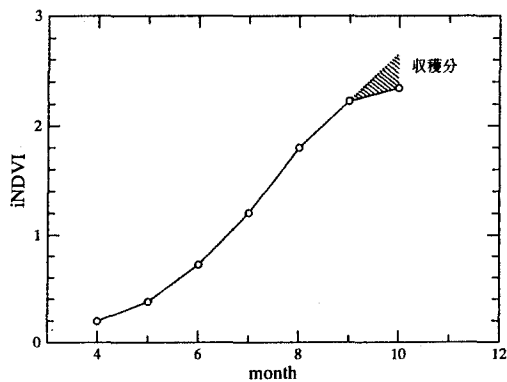


図 4-1 収穫量推定の概念図

表 4-1 1993 年度の収穫の推定値と作況指数

	青森	岩手	秋田	宮城	山形	福島	平均
推定値	64	58	94	34	59	11	55
作況指数	28	30	83	37	79	61	56

収穫量を推定する際、衛星データの空間解像度 (1km×1km) のまま、全ての地点毎に算定した後、国土数値情報を用いて水田域のみを抽出し、県毎に集計を行った。

東北全域の平均値、太平洋側の不作など、大まかな傾向は再現されているといえる。青森県・岩手県で過大に、福島県で過小に見積もられている。福島県は、1993 年のデータに雲が多く存在するために NDVI が低い値を示していることが目視で容易に観察できるため、精度の低下はそれに起因すると思われる。青森県と岩手県の誤差については、現在のところ原因は不明である。

現時点では、各地点毎の平年値との相対的な差の算定のみにとどまっているが、将来は実際の収穫高、および NPP との定量的な関係を算出する予定である。iNDVI と NPP との間の比例係数は、植物の種類などの生物学的要因と、その地域の気象条件などの気象的要因との影響によって決定される。そのため、定量化のためには品種毎、地域毎などのより細かな検証が必要となる。

5 まとめ

NDVI および iNDVI が NPP と良い相関を持つことが再確認された。また、これまでは穀物の収穫量と iNDVI との正の相関が多く報告されてきたが、収穫量推定の場合はむしろ iNDVI に現れない欠損分が収穫分であると考えの方が良い結果を与える場合があることが判明した。NDVI/iNDVI を現時点での生産力と考えるか、これまでの生産の蓄積と考えるか、植物の種類・性質によって慎重に判断する必要がある。

謝辞

本研究で用いている NOAA データは東北大学と東北電力との共同研究の一環として受信されたものである。

参考文献

宮地重遠・村田吉男 (1980) : 光合成と物質生産, 530pp., 理工学社

P.J.Sellers(1985) : Canopy reflectance. photosynthesis and transpiration, Int. J. Remote Sens., **6**, pp.1335–1372

P.J.Sellers(1987) : Canopy reflectance. photosynthesis and transpiration II. The role of biophysics in the linearity of there interdependence, Remote Sens. Envir., **21**, pp.143–183

C.J.Tucker, J.R.G.Townshend and T.E.Goff(1985) : African land-coverclassification using satellite data, SCIENCE, **227**, pp.369–375.

美濃憲・風間聡・沢本正樹 (1993) : iNDVI を用いた環境評価, 環境システム研究, **21**, pp.40–45

東北農政局 : 東北農業情勢報告