

農業・環境分野における 先端的画像情報利用

—ファイトイメージングからリモートセンシングまで—

東京大学 大学院
農学生命科学研究科 教授 大政 謙次 編著

社団法人 農業電化協会

第9章



植生機能のリモートセンシング

1. はじめに

植生とは、ある対象とする地域に生育している植物体の総称であり、陸上生態系の状態をおおまかに示すものである。植生をリモートセンシングの対象とする目的とは、その地域の生態系の持つ特性に関する情報を得ることにある。例えば、地域の植生の種類や分布の密度、成長の程度は、水、炭素、窒素などの物質の循環や炭素固定能力を大きく左右することが知られている。また地域に生育している植物種の詳細な情報を取得することは生態系の構成要素を明らかにすることであり、生物多様性保全のための基礎的な情報となる。ここでは、植生の密度を示す指数の説明をおこない、植物の種の推定に基づく生物多様性モニタリングの試みについて簡単に紹介する。

2. 植生の分光反射特性

光の波長ごとの反射率を分光反射率と呼ぶ。物体によって、それぞれ特徴的な分光反射率を持つため、この分光反射率を利用して、リモートセンシングデータにより、物体を識別することが可能となる。植生（植物）の場合、その分光反射特性は、1)可視域での反射が小さく、2)近赤外域で反射が大きいことである（図1）。

植物は光合成を行い、光の物理エネルギーを有機物の化学エネルギーに変換する。その際、すべての波長の光を使用するわ

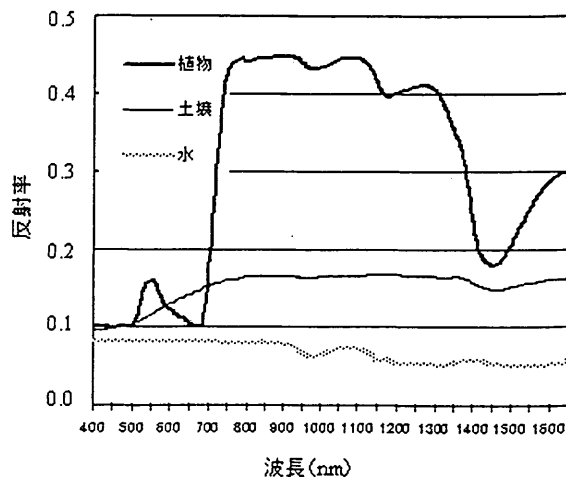


図1 植物・土壌・水の分光反射率の例

表1 代表的なセンサーの可視域と近赤外域バンドの情報

センサー バンド	NOAA- AVHRR	MODIS	Landsat ETM+	ALOS- AVNIR-2	Quickbird
可視域 青	550 ~ 680nm	459 ~ 479nm	450 ~ 520nm	420 ~ 500nm	450 ~ 520nm
緑		545 ~ 565nm	520 ~ 600nm	520 ~ 600nm	520 ~ 600nm
赤		620 ~ 670nm	630 ~ 690nm	610 ~ 690nm	630 ~ 690nm
近赤外域	725 ~ 1,100nm	841 ~ 876nm	760 ~ 900nm	760 ~ 890nm	760 ~ 890nm
空間解像度	1,100m	250m / 500m	30m	10m	2.5m
同一地点の データ取得 の周期	1日	1日	16日	46日	20日

けではなく、光合成に有効である400～700nmの波長（可視域）の光を吸収し使用する。特に主要な植物色素であるクロロフィルの吸収帯である青色光435nmと赤色光680nm付近の波長の光を吸収する。したがって、400～700nmの可視域において、植物からの反射は小さくなる一方、700～1300nm程度の近赤外域においては反射が相対的に大きくなる。植生に関する指数は、これらの可視域と近赤外域におけるバンドの値（デジタル値や反射率）の違いを利用している。例えば、NOAA-AVHRRのデータでは表1に示すとおり、可視域の550～680nmと近赤外域725～1,100nmの2つのデータを利用することになる。

またMODISやAVNIR-2センサーなど、最近打ち上げられた衛星のセンサーにおいても、同様に可視域と近赤外域バンドのデータが用意されており、多くの衛星データにおいて植生に関する指数は算出可能である。表1においてNOAA-AVHRR以外のセンサーでは可視域をさらに分光しているため、その場合は可視域のデータとして赤色光のデータを使うことが多い。

3. 代表的な植生指数

1960年代後半から開発されている植生指数について、代表的なものを紹介する。表2に比植生指数と正規化植生指数を示す。Simple Ratio Index, SR(比植生指数)は近

表2 代表的な植生指数

植生指数	計算式	文献
Simple Ratio Index (SR) 比植生指数	$SR = \frac{R_{NIR}}{R_{Red}}$	Jordan (1969), Rouse et al. (1973)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) 正規化植生指数	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$	Rouse et al (1973)

*表中の R_{Red} と R_{NIR} は、それぞれ可視域における赤色光のバンドの値（デジタル値や反射率）と近赤外域におけるバンドの値を示している。

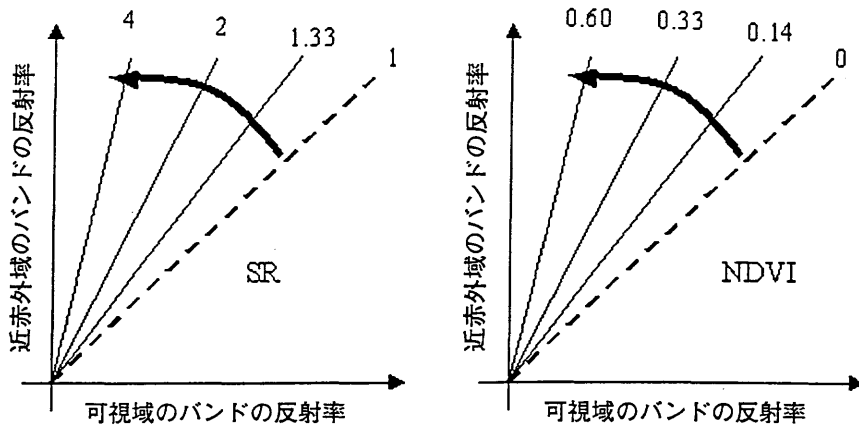


図2 可視域および近赤外域のバンドの反射率で示されるSRとNDVIの等値線

赤外域と可視域におけるバンドの値(デジタル値や反射率)を比で示したものである。また Normalized Difference Vegetation Index, NDVI (正規化植生指数)は近赤外域から可視域のバンドの値を差し引いた値を-1から+1までの値に正規化した指数である。可視域と近赤外域の反射率をそれぞれ横軸と縦軸に設定したグラフに、2つの指数について等値線を示すと図2のようになる。植物を対象とした場合、近赤外域のほうが可視域よりも反射率は大きいため、図中に点線で示している線(SR=1、NDVI=0)から、左上の範囲内のみを図示している。点線の場合は、可視域と近赤外域が同じ値であり、植物が存在しない状態を示すことになる。植生の密度が大きくなるにしたがって、これらの指数も大きくなり、点線から矢印の方向に変化していくことになる。

植生のみが必要でも、植生の密度が小さい場合、植生の背景(バックグラウンド)となる土壌の情報が入りこんでしまう。この場合、土壌の種類や土壌の湿り具合が変化すると植生の状態に変化がなくても、前述の比植生指数SRや正規化植生指数NDVIの値は変わってしまう。そこで、土壌の影響を小さくするために工夫した植生指数も開発されている。表3にいくつかの植生指数を示す。

植生指数における土壌の影響を考慮するためには、可視域と近赤外域における土壌の反射率の関連性を示す Soil line (土壌線)を知る必要がある。植物がなく、土壌がむきだしの状態(すなわち裸地)において、さまざまな土壌の可視域および近赤外域の反射率の関係は図3のように直線に近似できる。

土壌の特徴でおおまかに区分すると、乾燥しており、明るい色の土壌は可視域および近赤外域ともに値が大きいため、図の右上のあたりに分布し、反対に湿った状態や暗い色の土壌はグラフの左下のあたりに分布することが知られている。図中の土壌線は傾き β_1 、切片 β_2 として、可視域と近赤外域の反射率を関連づけている。実際は土

表3 土壌の影響を考慮した植生指数

植生指数	計算式	文献
Perpendicular Vegetation Index (PVI) 垂直植生指数	$PVI = \frac{1}{\sqrt{\beta_1^2 + 1}} (R_{NIR} - \beta_1 R_{Red} - \beta_2)$ 土壌線が $R_{NIR} = \beta_1 R_{Red} + \beta_2$ のとき	Richardson and Wiegand (1977) ; Baret and Guyot (1991)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) 土壌調整植生指数	$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red} + L} \times (1 + L)$ $L = 0 \sim 1.0$	Huete (1988)
Modified SAVI (MSAVI) 修正土壌調整植生指数	$MSAVI = \frac{2R_{NIR} + 1 - \sqrt{(2R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_{Red})}}{2}$	Qi et al. (1994)

*表中の R_{Red} と R_{NIR} は、それぞれ可視域における赤色光のバンドの反射率と近赤外域におけるバンドの反射率を示している。

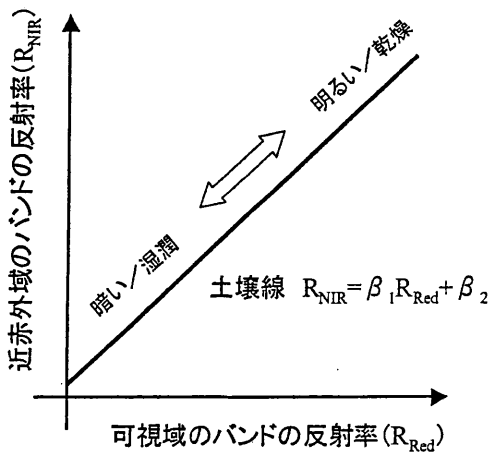


図3 可視域および近赤外域のバンドの反射率で示される土壌線

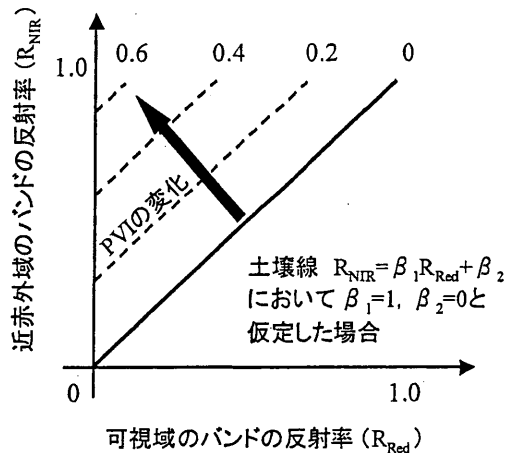


図4 可視域および近赤外域のバンドの反射率で示される PVI の等値線

壤の種類、乾燥・湿潤の程度、そして目の粗さ・細かさの程度、有機物の混ざり具合などの条件に影響を受けるため、これほど単純な関係ではない。

表3における Perpendicular Vegetation Index, PVI (垂直植生指数) は、この土壌線を基準にして算出される指数であり、土壌線への垂線の長さで示される。植生の密度が大きくなると、PVI の等値線は土壌線と垂直の方向に移動する (図4)。

Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI (土壌調整植生指数) は、NDVI (正規化植生指数) を修正し、土壌の影響を軽減した指数となっている。さまざまな土壌の条件下で植生の密度を大きくすると、植生の等値線は傾きが急になるとともに、切片 (縦軸との交点) も大きくなる。したがって NDVI (図2の右図) とは異なり、等値線は原点において交わらなくなる (図5の左図)。そこで、等値線が交わる点に原点を移動し、新しい原点にもとづいて植生指数を計算する。このとき新しい原点は土壌線と

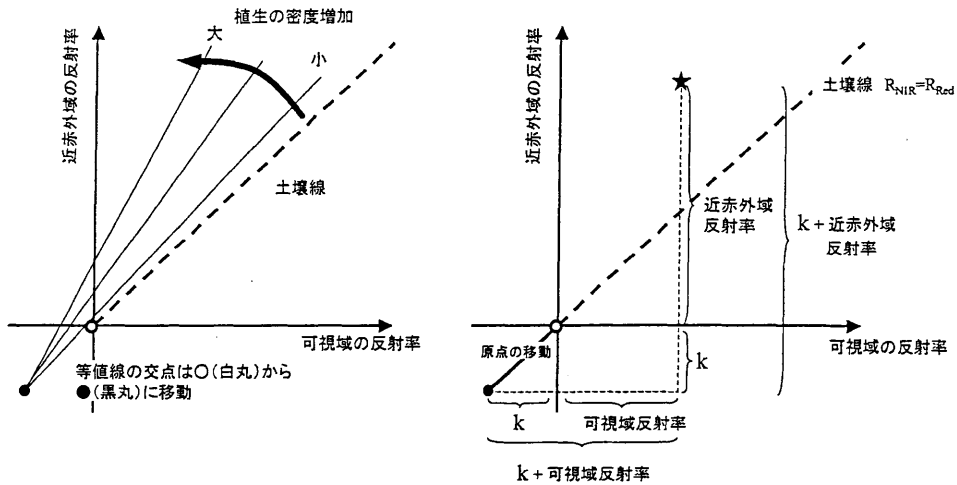


図5 SAVIの導出

交わる点とし、簡略化のため、土壤線の切片は0 ($\beta_2 = 0$)、傾きが1 ($\beta_1 = 1$) と仮定している。例えば、図5 (右図) の星印 (★) における反射率を持つときのSAVI算出を考える。原点を白い丸 (○) から黒い丸 (●) に移動することによって、可視域および近赤外域の反射率の値に、大きさ“k”分ずつ追加することになり、これらの値を、表2に示すNDVI式に代入する。最小値が-1、最大値+1になるように正規化するための項(1+L)を掛け合わせることで表3に示すSAVI式が得られる。表3における指数中のLと図5右図におけるkの関係は、 $L=2k$ である。Lの大きさは0~1.0の範囲であり、植生の密度と反比例の関係にあるとされるが、0.5が使われることが多い。Lが0のとき、SAVIの式はNAVIと同じものであり、仮にLを100程度に大きくした場合、等値線同士は平行に近くなることから、SAVIは前述のPVIと同じような植生指数となる。

Modified SAVI, MSAVI (修正土壤調整植生指数) は、土壤の影響を最小化するように、SAVIのL項を修正したものであり、Lの項を繰り返し計算で最適化することによって得られる。具体的には、まず前述のSAVIを計算し、そのSAVIから次のステップにおけるL項となる L_2 を求める(式I)。 L_2 を使って $MSAVI_2$ を求める(式II)。 n を大きくしながら、繰り返し、 $MSAVI_n$ と L_n を求める(式IIと式III)。

$$L_2 = 1 - SAVI \quad (式I)$$

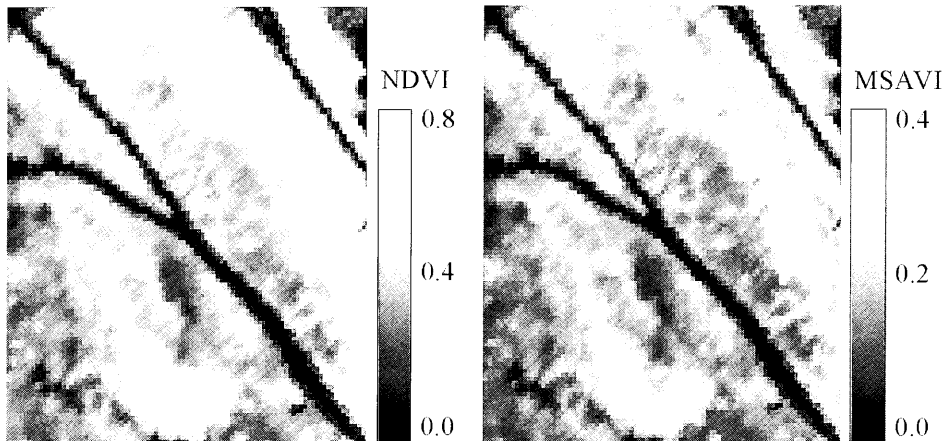
$$MSAVI_n = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red} + L_n} \times (1 + L_n) \quad (n \geq 2 \text{ のとき}) \quad (式II)$$

$$L_n = 1 - MSAVI_{n-1} \quad (n \geq 3 \text{ のとき}) \quad (式III)$$

n を十分に大きくすると、式IIIは $L_n = 1 - MSAVI_n$ と近似できるため、式IIに代入して以下のようなになる。

$$MSAVI_n = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red} + (1 - MSAVI_n)} \times (2 - MSAVI_n) \quad (\text{式IV})$$

式IVのMSAVI_nの2次式について解くと、表3に示すMSAVIを得る。図6は、植生と土壌が混ざって分布しているエリアにおいて、NDVI（左図）とMSAVI（右図）の画像を作成したものである。画像中心部の土壌が特に多く混ざる箇所においてMSAVIの値は相対的に小さくなっており、植生指数において土壌の影響が考慮されていることがわかる。



* 図中の黒い線（斜めの太い線）は道路であり、その他のエリアは植生と土壌が混ざって分布している。

図6 NDVIとMSAVIの画像例

可視域において反射率が低く、近赤外域において反射率が高い植物の分光反射特性を利用して、上記のような植生指数が開発されてきている。これらの利点は、使用するバンドの数が少ないため、衛星データのようなマルチバンドのリモートセンシングデータに適用でき、広域かつ高頻度に植生の状態をモニタリングが可能なことである。NDVIから得られる情報は植生の密度の大小に限定されるが、落葉樹の季節間のNDVI変化から、開葉や落葉などの植物季節（フェノロジー）の推定に利用されており、またLAI（Leaf Area Index, 葉面積指数）やFPAR（Fraction of Absorbed photosynthetically Active Radiation, 光合成有効放射吸収率）と関連づけ、生態系モデルの入力データとすることにより、グローバルレベルでの植物の純一次生産力の推定も試みられている。

4. 生物多様性モニタリング

生態系は生物多様性を保持することで、食料・木材・繊維などの「供給的サービス」や栄養循環・酸素の生成などの「維持的サービス」を人類に持続的に提供することが

できる。しかし、ここ数十年の間に農地開発や森林伐採などの土地被覆変化に起因する生物多様性の減少が報告されている。私たちが今後も持続的に生態系サービスを享受するには、生態系の状況をモニタリングし、生物多様性に関する情報を収集していくことが必要となる。

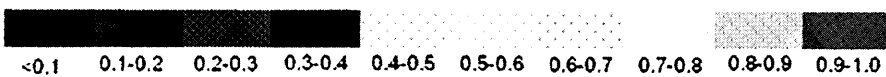
関東中央部にある渡良瀬遊水池は本州最大の面積を持つ湿地（約3,300ha）であり、エキサイゼリやマイヅルテンナンショウなど、49種の絶滅危惧植物が生育していることが知られている。生物多様性の保全のためには、絶滅危惧植物の分布状況を知る必要があり、今後の湿地の管理計画を考えていくうえでも重要な情報と位置づけられるが、現地調査によって湿地全域の情報を取得することは困難である。湿地には、丈の高いオギやヨシが優占して分布しており、その下層において丈の低い絶滅危惧植物が



(a) 渡良瀬遊水池（一部）の false color 合成画像 [青色585nm, 緑色657nm, 赤色847nm]、2004年5月21日取得

(b) オギの推定図

(c) ヨシの推定図



オギおよびヨシのエンドメンバーとの類似度

図7 渡良瀬遊水池におけるハイパースペクトルデータ画像と Matched Filtering によるオギとヨシの分布推定⁸⁾

分布している。オギやヨシの分布特性は土壌水分や日照などの環境条件と相互に関連して、下層の絶滅危惧植物の分布を規定しているため、リモートセンシングによるオギやヨシの分布推定が有用な手法と考えられる。図7はハイパースペクトルデータ（波長分解能が高いデータ）を使用して、Matched Filtering法によって、オギとヨシそれぞれのエンドメンバーとの類似度を図示したものである。エンドメンバーとは、あるピクセルにおいて構成要素（ここではオギもしくはヨシ）が単一の場合に得られるスペクトルの情報であり、図7の類似度は値が1.0に近いほど、オギもしくはヨシが各ピクセルにおいて優占していることを示す。オギとヨシはともにイネ科の植物であり、スペクトルの情報も似ている。したがって、マルチバンドの衛星データでは植物種の情報を抽出することが難しいが、航空機に搭載したハイパースペクトルセンサー（センサー名：AISA；波長域398～993nm；バンド幅約9nm；68バンド分）で得られた空間解像度1.5mのデータを使用することにより、オギおよびヨシの分布に関する情報が得られている。オギについては、図7に示す類似度と現地調査で観測した1mあたりの茎本数の密度との間に高い相関（ $r = 0.89$ ）が得られ、本数の密度の分布も推定できた。この例のとおり、最近では波長・空間分解能が高いリモートセンシングデータの利用が可能となり、これまでは分類が難しいと考えられていた植物の種の判別や河川敷における外来植物種の分布推定なども行われつつある。

5. おわりに

ここでは、陸上生態系の状態をおおまかに示す「植生」を対象として、植生指数および生物多様性モニタリングの例を簡単に紹介した。陸上生態系は生物群と非生物的環境の微妙なバランスのうえに成り立っており、温暖化などの地球規模での環境変動や農地開発などの地域的な環境変動の影響を受けやすい。例えば、衛星データによる1980年代以後の植生のモニタリングでは、北半球高緯度の広い範囲において温暖化に起因する「植物の生長期間の延伸」が報告されている。今後も生態系からのサービスを持続的に享受するためには、地球規模から地域にいたるまで、生態系の状況をモニタリングしていく必要があり、生態系の情報を示す「植生のモニタリング」の重要性は増している。近年の衛星センサーにおける空間分解能の向上や航空機搭載のハイパースペクトルセンサーの開発など、高機能のリモートセンシングデータの利用環境が整備されるなかで、それらデータの特性を活かした発展的な植生のモニタリングが可能になりつつある。

〈参考文献〉

- 1) Jordan, C. F. (1969) Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50, 663-666.

- 2) Rouse. J. W., R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering (1973) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
- 3) Richardson. A. J., and C. L. Wiegand (1977) Distinguishing vegetation from soil background information. Photogramm. Eng. Remote Sens., 43, 1541-1552.
- 4) Baret. F. and G. Guyot (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment, Remote Sens. Environ., 35, 161-173.
- 5) Huete. A. R. (1988) A soil adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ., 25, 295-309.
- 6) Qi. J., A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr and S. Sorooshian (1994) A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. Remote Sens. Environ., 48, 119-126.
- 7) Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC, 100pp.
(<http://www.millenniumassessment.org/proxy/document.354.aspx>)
- 8) Lu, S., S. Funakoshi, Y. Shimizu, J. Ishii, A. M. de Asis, M. Ajima, I. Washitani and K. Omasa (2006) Estimation of Plant Abundance and Distribution of *Miscanthus sacchariflorus* and *Phragmites australis* Using Matched Filtering of Hyperspectral Image. Eco-Engineering, 18, 65-70.
- 9) 清水庸・大政謙次 (2005) 環境情報と生態系モニタリング. 新農業気象・環境学 長野敏英・大政謙次 (編), 朝倉書店 32-38.
- 10) 清水庸・大政謙次 (2003) 陸上生態系のモデリングと陸上生態系への影響. 地球温暖化—世界の動向から対策技術まで— 大政謙次・原沢英夫/財団法人遺伝学普及会 (編), 遺伝別冊 17号, 88-94.
- 11) Myneni. R. B., C. D. Keeling, C. J., Tucker. G. Asrar and R. R. Nemani (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature, 386, 698-702.
- 12) 恒川篤史 (2005) 緑地環境のモニタリングと評価. 朝倉書店, 249pp.