

CSIS Discussion Paper #4

時系列曲線のロバストな分析手法
A Robust Method for Analyzing Trend Curves

増山 篤・岡部 篤行・貞広 幸雄・柴崎 亮介

Atsushi Masuyama, Atsuyuki Okabe, Yukio Sadahiro and Ryouzuke Shibasaki

1999年1月13日

The Department of Urban Engineering, School of Engineering,
University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
e-mail: masu@ua.t.u-tokyo.ac.jp

A Robust Method for Analyzing Trend Curves

Abstract

This paper develops a method for analyzing trend curves that is robust against errors and noises. First, we classify the local topological characteristics of a trend curve in three categories: a "peak", a "bottom" and a "slope". Second, we define "distinctiveness" of these topological categories. Third, we describe the characteristics of a trend curve using a configuration of these peaks and bottoms with the distinctiveness, and introduce the concept of "isomorphic" relations with respect to this configuration. We develop a method of classifying trend curves and define the similarity between two trend curves using the isomorphic relations. Finally, we apply the proposed method to the analysis of land cover change in the Persian Gulf region using trend curves of NDVI obtained from NOAA remotely sensed data over a year from 1982-1993.

Keywords: trend curve, remote sensing, robust

1. はじめに

近年、リモートセンシングをはじめとする測量・観測技術の進展に伴い、膨大な量の空間データを短い時間間隔で時系列的に取得することが可能となった。これにより、従来では考えられなかった空間データの時系列分析も可能となってきた。しかしながら、こうして取得されたデータは品質的に一定ではない。例えば、データ取得時点によって観測機器が異なるということが往々にしてある。また、同じ観測機器を利用したとしても、時間とともに、観測機器そのものが劣化し、測定精度が低下するということが十分ありえる。リモートセンシングを例にとると、観測を行う衛星の交替、それらに搭載されているセンサーの劣化といったことが考えられる。このような状況下においては、その絶対値は必ずしも信頼がおけず、したがって、これらを単純に比較するような分析方法による分析結果も信頼性に欠ける。

また、一般に、時系列データは時間方向に関する変動・攪乱を受けることがしばしばある。その理由のひとつとしては、そもそも観測が不規則に行われていたり、また、規則的に観測が行われていたとしても、ある時点のデータだけ欠落して

いるということが考えられる。また、周期性のある現象において、その周期が多少変化するということもあり得る。

以上のことを鑑み、この論文では、データの品質にばらつきがみられたり、前に述べたような変動・攪乱を受けている場合であっても、ある期間における連続量の時系列的变化 - 例えば、ある1年の植生量の推移 - を表す曲線（以下、時系列曲線と略す）から、データのばらつきや変動・攪乱に影響されない分析結果を得るためのロバストな手法を提案する。

この論文の構成は次の通りである。

まず、時系列曲線の局所的な性質について定義する。そして、この局所的な性質を利用して、二つの時系列曲線の大局的な性質に関する「同相」という概念を定義する。次に、この概念を用いた分析手法を考え、その手法の特徴について理論的に検討する。また、データのばらつきが顕著なデータとして先に例を挙げたりリモートセンシングデータを題材として、この論文で考えた手法を、実際の空間データに、どのように適用すればよいか、その例を示す。最後に、この論文の内容について要約する。

2. 曲線のトポロジー

時系列曲線 $f(t)$ を区間 $[0, T]$ で定義される連続かつ二階微分可能な関数とする（先ほどの植生量の変化を例にとれば，1 月～12 月が区間 $[0, T]$ に対応する）．このとき， $f(t)$ の局所的な性質をまず見ていこう．

$f(t)$ のある点 t における局所的な特性は，数学的に特異点でないか ($df(t)/dt \neq 0$) または特異点 ($df(t)/dt = 0$) かで分けられる．ここでは前者を（局所的に）スロープ，後者を（局所的に）フラットと呼ぶことにしよう．フラットは，さらに $d^2f(t)/dt^2 >, =, < 0$ で分けることができる．ここで，点 t を， $d^2f(t)/dt^2 < 0$ ならばピーク， $d^2f(t)/dt^2 > 0$ ならば，ボトムとよぶことにしよう．なお $f(t)$ は $d^2f(t)/dt^2 = 0$ とならないものと仮定する．なお，この仮定をおいたところで特に問題は生じない． t における $f(t)$ の特性をしめす記号として $C(f(t)) = S, F, P, B$ （右辺の記号は，それぞれスロープ，フラット，ピーク，ボトムを表す）を用いることにする．

時系列曲線の両端点については， $df(t)/dt = 0$ を満たさない場合についても，ピークまたはボトムを定義する． $df(0)/dt < 0$ のとき， $t = 0$ をピークとよぶことにし，逆向きの不等号が成立するときは，ボトムとよぶことにする．また， $df(T)/dt > 0$ のとき， $t = T$ をピークと言い，逆向きの不等号が成立するときは，ボトムとよぶことにする．

さて，ここで二つの時系列曲線 $f_1(t), f_2(t)$ を考えよう． $C(f_i(t)) = P, B$ となる位置の集合を $\{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in_i}\}$ ($t_{i1} < t_{i2} < \dots < t_{in_i}$) とする．また $f(t_{ij})$ を低い順に並べたとき，その順位を $R(f(t_{ij}))$ で表すことにする．これらに関し，以下の条件を考える．

$$n_1 = n_2 \tag{1}$$

$$C(f_1(t_{1j})) = C(f_2(t_{2j})) \quad \forall j \tag{2}$$

$$R(f_1(t_{1j})) = R(f_2(t_{2j})) \quad \forall j \tag{3}$$

ここで式(1)はピークまたはボトムとなる数が

同じであることを示している．式(2)は，式(1)のもとで，以下の事柄が成立することを表している．両端点以外に関しては，時系列曲線 $f_1(t)$ の左から j 番目のフラットがピーク(ボトム)であれば，時系列曲線 $f_2(t)$ の左から j 番目のフラットがピーク(ボトム)であることを示している．また，両端点に関しては， $f_1(t)$ の左(右)端点がピーク(ボトム)であれば， $f_2(t)$ の左(右)端点もピーク(ボトム)であることも示している．式(3)は，式(1),(2)のもとでは，時系列曲線 $f_1(t)$ の左から j 番目のピーク(ボトム)の高さの順位は，時系列曲線 $f_2(t)$ の左から j 番目のピーク(ボトム)の高さの順位と同じであることを示している．時系列曲線 $f_1(t), f_2(t)$ に関し，式(1)～(3)のいずれか，あるいは，すべてが満たされるとき時系列曲線 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ は質的に同一であると考えることができる．この論文では，このような場合“二つの時系列曲線は同相である”と呼ぶことにする．また，このとき，記号を用いて， $f_1(t) \approx f_2(t)$ と書くことにする．

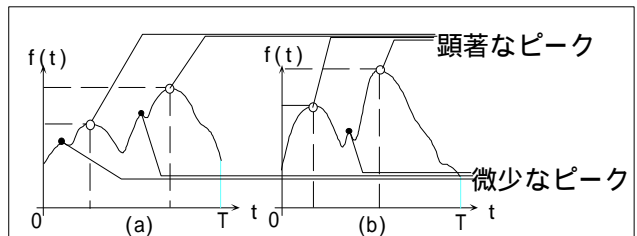


図1 同相の様相を呈する二つの時系列曲線

さて，ここで図 1 の二つの時系列曲線を見比べてみよう．あらゆるピークを考慮すれば，これらは式(1)を満たしていないから，同相ではない．しかし「顕著」なピークについてみると同相の様相を示していると言えよう．そこで「顕著」なピークとは何かを明確化してみることにする．

今， $C(f(t_i)) = P$ ($1 < i < n$) としよう．このとき定義から $C(f(t_{i-1})) = B$ ， $C(f(t_{i+1})) = B$ である（図 2 参照）．ここで，このピークの高さ $h(t_i)$ を

$$h(t_i) = f(t_i) - \max\{f(t_{i-1}), f(t_{i+1})\} \tag{4}$$

と定義する (Okabe, 1982; Okabe・Masuda, 1984)。

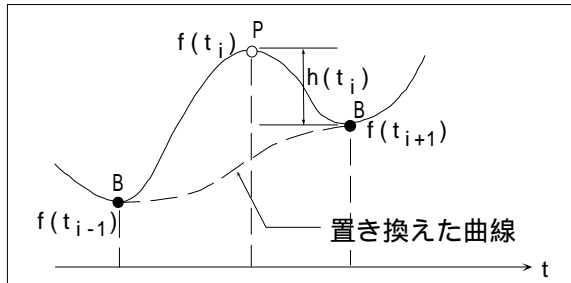


図2 ピーク高さの定義・微少ピークの削除法

また、曲線の両端点 t_1, t_n に関しては、次のように定義する。もし左端点 t_1 がピークならば、ピークの高さ $h(t_1)$ は

$$h(t_1) = f(t_1) - f(t_2) \quad (5)$$

とする。なお、定義より、 t_1 がピークならば $f(t_1) > f(t_2)$ であるから、このとき $h(t_1) > 0$ である。

右端点 t_n に関しては、もし t_n がピークならば、そのピークの高さ $h(t_n)$ は

$$h(t_n) = f(t_n) - f(t_{n-1}) \quad (6)$$

と定義する。なお、このとき、左端点の場合と同じ理由により、 $h(t_n) > 0$ である。

「顕著」なピークの性質を明らかにするため、顕著ではないピーク、すなわち「微少」なピークについて考える。ごく自然に考えれば、微少なピークは、式(4)あるいは式(5),(6)で定義されるピークの高さが極めて低いピークだと考えられる。この論文では、ある限界ピーク高 h^* を決め、それ以下の高さのものを微少なピークと見なすことにする。顕著なピークを考える上で微少なピークは不要であるから、もともとの時系列曲線 $f(t)$ から高さ h^* 未満の微少なピークを無視した時系列曲線 $f(t|h^*)$ を考えることにしよう。

時系列曲線 $f(t|h^*)$ は以下のようにして求め

られる。今、 $C(f(t_i)) = P$ とし、 $h(t_i) < h^*$ とする。また $f(t_{i-1}) < f(t_{i+1})$ とする。言うまでもなく $C(f(t_{i-1})) = B$, $C(f(t_{i+1})) = B$ である。ここでピーク t_i を削除するときは、 t_{i-1} と t_{i+1} の間の $f(t)$ を $f(t_{i-1})$ と $f(t_{i+1})$ を結ぶ単調増加な曲線で置き換える (図 2 参照)。逆に、 $f(t_{i-1}) > f(t_{i+1})$ ならば、単調減少な曲線で置き換える。この部分的な曲線の置き換えによって得られた曲線を $f(t|h^*)$ としてやればよい。なお、今後、このような曲線の置き換えを スムージング と呼ぶことにする。

図 1 で見たような顕著なピークとは、この $f(t|h^*)$ において十分大きな値の高さを持つピークとなっている。この論文では、 $f(t|h^*)$ において高さが h^* 以上のピークを顕著なピークと定義する。

二つの時系列曲線 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ に対しスムージングを施した $f_1(t|h^*)$ と $f_2(t|h^*)$ の顕著なピークに着目したとき、これらの曲線が同相ならば、二つの時系列曲線 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ は“限界ピーク高 h^* で同相である”と言い、また、 $f_1(t|h^*) \approx f_2(t|h^*)$ と書くことにする。図 1 の二つの時系列曲線が「顕著」なピークで見たとき、同相の様相を呈していたと述べたが、これは、二つの時系列曲線 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ が限界ピーク高 h^* で同相であるということに他ならない。

さて、この二つの時系列曲線の同相という性質だが、限界ピーク高以下のピークを削除するようにスムージングをかけることから、多少の観測誤差に対して安定しており、また、ピーク・ボトムは時系列曲線内の他の点との相対的な位置関係によって定義されることから、観測機器の劣化等に伴う見かけ上の観測値の変化に対しても安定している Eastman・Fulk(1993)において NOAA-9 の観測値に基づいて計算された NDVI (この指標については、第 4 節で詳しく説明される) は、見かけ上、年々上昇していくことがありえることが示されているが、この論文で提案した手法において、そのようなことを考慮する必要はない。また、多少のデータの欠落・観測時点のずれがあっ

たとしても、二つの時系列曲線が質的に同一かどうかを調べることができる。

では、次章からは、“限界ピーク高において同相”という概念を用いた分析手法を考えてみよう。

3. 時系列曲線の分析手法

3.1. 時系列曲線の階層的分類法

地域分析において、地区を時系列曲線で分類することが多くある。例えば、リモートセンシングの分野では、時系列曲線の分類と土地被覆は密接な関係を持っている。その具体的な仕組みは次の通りである。今、可視域および近赤外領域における地表からの電磁波の放射を観測することによって、植生量変化に関する年間時系列曲線が得られたとしよう。このとき、年間を通じて植生量が低ければ裸地・砂漠・都市部などの土地被覆状態が考えられ、植生量が季節的に変動するならば落葉樹林・耕地などが考えられる。このような場合、上で考えた概念を応用することによって微少な変動・攪乱に影響されない分類を行うことができる。では、その方法を具体的に考えていくことにしよう。

今、いくつかの時系列曲線が与えられているとする。これらの時系列曲線に対し、限界ピーク高 h^* を設定し、スムージングをかける。このとき、もし限界ピーク高が適切に設定されていれば、自然に顕著なピークだけが残される。後は、この限界ピーク高で同相な曲線は同一カテゴリー、そうでなければ違うカテゴリーとみて分類してやればよい。このとき、カテゴリー数は、スムージングの結果によって自動的に決まる。

ところが、ここで限界ピーク高をどのように設定するかということが問題となる。もし、極端に小さな限界ピーク高を設定すると、微少なピークが多く取り残され、そのためカテゴリー数も大きくなり、ほとんど分類とは言えない結果となるだろう。一方、極端に大きな限界ピーク高を設定すると、どの曲線もピーク数 0 となって、すべての曲線が同一カテゴリーに属することになり、や

はり分類とは言えない結果に終わる。ここでは、適切な限界ピーク高 h^* の条件について考えてみよう。

今、ある限界ピーク高 h^* を用いて、時系列曲線にスムージングをかけたとする。このとき、時系列曲線のピーク数は変化し、分類結果は影響を受ける。ここで、 h^* の前後において分類結果が大きく影響を受けるのは好ましくない。したがって、ピーク高さ h の確率密度関数を $p(h)$ とし、また h^* を含む微少な区間 $[h^* - \Delta, h^* + \Delta]$ (Δ は十分小さい正の実数とする) を考えたとき、

$$\int_{h^* - \Delta}^{h^* + \Delta} p(h) dh \quad (7)$$

が十分小さいことが望ましい。また、 h^* 以上のあらゆる限界ピーク高以上で分類結果が安定しているということも望ましい h^* の条件として考えられる。すなわち、

$$\int_{h^*}^{+\infty} p(h) dh \quad (8)$$

も十分小さいことが望ましい。この二つの条件だけを考えると h^* を十分大きな正の実数とすればよいことになる。ところが、一方で、限界ピーク高を大きくすればするほど、元の時系列曲線に関する情報は失われてゆくから、 h^* は小さな値を設定することが好ましい。明らかに、これら 3 つの条件を同時に満足する h^* は存在しない。したがって、 h^* は恣意的に決定せざるを得ない。ただし、確率密度関数 $p(h)$ の形状によっては、この 3 つの条件のいずれも適当に満たすスムージング高さ h^* を、視覚的に決めることができる。例えば、図 3 のように、この $p(h)$ が右に長く裾を引いていたとしよう。このとき、その裾の付け根付近の値が上 3 つの条件をほどよく満足し、 h^* として妥当である。

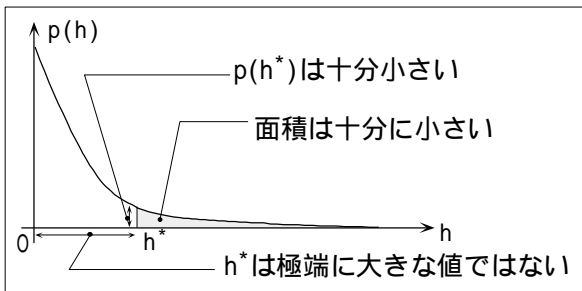


図3 スムージング高さの決定法

3.2. 時系列曲線の類似度

今、ある地点の時系列曲線 $f_1(t)$ が一年後に $f_2(t)$ となったとしよう。このとき、時系列曲線が「質的」にどのくらい変化したかを測りたい場合がしばしばある。前節で述べた方法を応用すると、一つの方法は限界ピーク高を決め、そのとき同相かどうかを見る方法が考えられる。この方法については上でも見たように、限界ピーク高を恣意的に決定せざるを得ない。また、この分析によって得られる結論は、“変化した”あるいは“変化しない”のどちらかであり、どの程度変化したかということとはわからない。ここでは、そのような恣意性の問題などを避け、なおかつ、質的变化を測ることができるような手法について考えてみよう。

ある一つの限界ピーク高を用いることで恣意性の問題が発生する訳だから、この問題を回避するには、いくつかの限界ピーク高を用いるという方法が考えられる。ここでは、限界ピーク高をゼロから連続的に大きくしていくという方法を考える。

まず、ある限界ピーク高 h^* における二つの時系列曲線の類似度を以下のように定義する。

$$d(f_1(t), f_2(t), h^*) = \begin{cases} 1, & \text{if } f_1(t|h^*) \approx f_2(t|h^*), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

ここで、適当な値 h_{\max} を設定すると、区間 $[0, h_{\max}]$ におけるピーク高さを考慮した二曲線 $f_1(t), f_2(t)$ の類似の程度、変化の度合いを表す指標 $s(f_1(t), f_2(t))$ を、以下のように、ごく自然

に定義することができる。

$$s(f_1(t), f_2(t)) = \frac{\int_0^{h_{\max}} d(f_1(t), f_2(t), h^*) dh^*}{\int_0^{h_{\max}} dh^*} \quad (10)$$

この指標に関しては、

$$0 \leq s(f_1(t), f_2(t)) \leq 1 \quad (11)$$

という不等式が明らかに成り立つが、1に近いほど二曲線は類似しており、変化の度合いが小さいと言える。また、この類似度の変動・攪乱に対する安定性を見てみると、縦方向に変動・攪乱を受けたとき、多少影響を受けるが、その影響は十分無視しうる。また、時間方向の変動・攪乱からは全く影響を受けない。ただし、著しく異なる時点にピークあるいはボトムに達する2つの時系列曲線があったとしても、それらを同一と判定する危険性がある。もちろん、そのような場合は、ピークやボトムの位置の類似性を評価する必要もある。ここでは、そうした分析にまで踏み込まないが、もし必要とあれば、リモートセンシングの分野においては、Samson(1993)で提案された曲線と時間軸が挟む領域の面積を使う手法などを用いることもできるということを付け加えておく。

Okabe(1982)においても、2つの時系列曲線の定性的な類似度が提案されており、これを用いることで変化の度合いを測ることができるが、それは次のようなものである。まず、時系列曲線をいくつかの短い時間間隔に分割し、その短い期間において、曲線がどのような状態（ピーク、谷、単調増加、単調減少、変化なし）かを調べる。次に、二つの時系列曲線がある短い期間において状態が同じならば、その期間において、この二つの曲線は類似しているとし、いくらかの値を与える。最後に、この値をすべて足しあわせる（積分することによって曲線全体の類似度を求めるというものである）。

本研究が提案した類似度は、Okabe(1982)で提案された類似度と比較して、時間方向の変動・攪乱に対して安定している。また、分析をすすめていく上で、ピークの高さが重要な意味をもつという場合に、適していると言えよう。

4. 適用例

このような時系列曲線の「同相」という概念を用いることによって 様々な分析が可能となる。ここでは、これまで提案してきた手法をリモートセンシングデータによる土地被覆モニタリングという具体的テーマへ応用してみることにしよう。

この研究では、NOAA-7,-9 および-11 に搭載されたセンサー(Advanced Very High Resolution Radiometer)による観測値をもとに作成された Pathfinder AVHRR Land Data Set の一部(1982年および1993年)を使用した。元データの図法はグード図法であるが、これを緯度・経度座標系に変換し、東経40度~50度、北緯27度~37度の地域を切り出して分析対象地域とした(図4)。この変換にともない、1ピクセルのサイズが約8km四方から0.1度四方となり、そのため、切り出し後の画像は、縦横100ピクセルからなる画像データとなる。

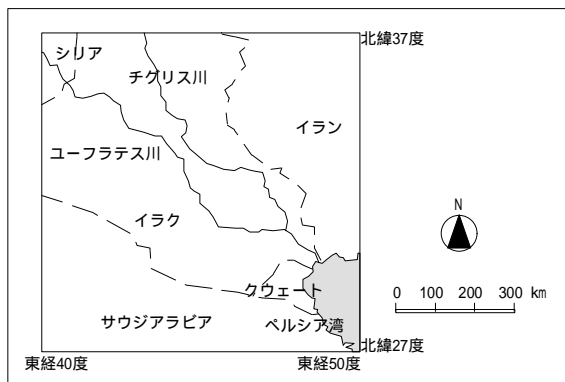


図4 分析対象地域

この各ピクセルにはNDVI(Normalized Difference Vegetation Index, 正規化植生指標)と呼ばれる植物の光合成活動と正の相関を持つ連続量(-1~+1の範囲の値をとる)が与えられているが、これを分析対象とした。また、元のデータセットにおいて、この値は一月に3回の割合で与えられているが、雲の影

響による不正確な観測値を排除するために、一ヶ月間におけるNDVIの最大値を各ピクセルに与えるように補正を行った。

さて、第2章において、時系列曲線は二階微分可能と仮定したが、NDVIは断続的に観測されているにすぎないため、この仮定は厳密には成り立たない。ただし、たとえ微分可能でなくとも、時間的に隣接する月の観測値を比較することでピークおよびボトムを定義することは可能であり、したがって、連続かつ二階微分可能な曲線に関して提案した分析手法をここでも適用するのに、何ら問題はない。

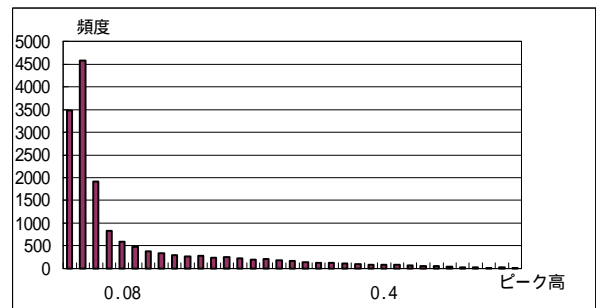


図5 1993年におけるピーク高の分布

まず、時系列曲線の分類を行うことにしよう。図5は1993年におけるスムージング前のNDVI季節変動曲線のピーク高さに関するヒストグラムである。このヒストグラムより、ピーク高さには右に長く裾を引くように分布しており、その付け根付近の値は0.08となっていることがわかる。3.1節でも述べたように、このような場合、 $h^* = 0.08$ が適切な限界ピーク高と考えられる。ここでは、ある二つの時系列曲線に関して、式(1),(2)が満たされるときに、これらは同相であると見なし、分類を行った。図6(a)はその結果である。これより、ユーフラテス川より北側、クウェート、サウジアラビアの一部に1ピークのNDVI季節変動曲線を持つピクセルが広がっていることがわかる。また、分析対象地域の中心部付近には、二峰性のNDVI季節変動曲線も見ることができる。また、分析対象地域の南側では、フラットなNDVI季節変動曲線が支配的である。

0.08が適切な限界ピーク高であると書いたが、他の限界ピーク高さを用いた結果も見てみよう。ただ

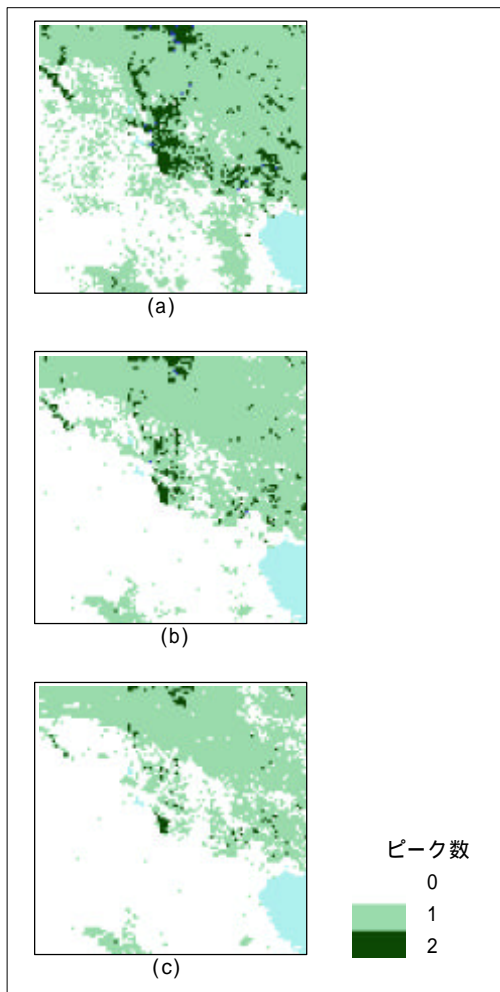


図6 同相の概念を利用した分類

し、0.08 より小さい値においてはヒストグラムの柱が高く、したがって雑音が多く残される。そこで、0.08 より少しだけ大きな値を用いることにしよう。図 6(b),(c)は、それぞれ限界ピーク高を 0.12, 0.16 とした分類結果である。すると、サウジアラビアの一部を除くこの地域の南側において、1 ピークの NDVI 季節変動曲線と見なされていたものが、今度はピーク 0 と判断されるようになる。また、限界ピーク高として 0.08 を用いた場合、2 ピークの NDVI 季節変動曲線に対応するピクセルが分析対象地域中心部でかなり広く分布していることがわかるが、0.12 以上となるとその傾向が読みとりにくい。したがって、一つの値だけを決め、それにより分類を行うならば、やはり 0.08 が適切な限界ピーク高だと言える。ただ、複数の限界ピーク高を用いることも全く無駄なことではなく、例えば、図 6 の 3 つの図より、この分析

対象地域内で、NDVI が特に大きく変動している領域などを知ることができる。

次に、経年変化を調べることにしよう。ある一年における NDVI 季節変動曲線は、各月の NDVI が張る 12 次元空間上の一点で表されるが、種々の変動、特に、時間方向の変動を考慮すると、マルチバンド画像のように二点間のユークリッド距離を用いて変化抽出を行う (Jensen, 1996) という訳にはいかない。しかし、この論文で提案した同相という概念を用いることで、変化を抽出することが可能となる。

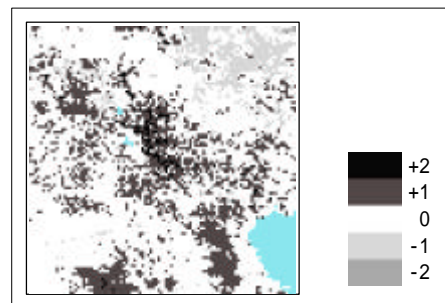


図7 ピーク数の変化

異なる二つの年の間に生じた変化を抽出する方法としては、次のようなものが考えられる。その方法とは、各ピクセルにおける二つの NDVI 季節変動曲線を比較し、もし、それらが同相であれば、変化なしと見なす、逆に、同相でなければ、変化があったと見なすというものである。図 7 は、限界ピーク高 $h^* = 0.08$ とし、この方法によって 1982 年から 1993 年における変化を抽出したものである。これより、分析対象地域の中央部、クウェート、サウジアラビアの一部において、NDVI 季節変動曲線のピーク数が増加していることがわかる。具体的には、ピーク数が 0 だったものから、ピーク数が 1 になっている。ここで、ピーク数 0 のフラットな NDVI 季節変動曲線曲線は、裸地・砂漠・都市部などに対応すると考えられ、一方、ピーク数 1 の NDVI 季節変動曲線は、耕地・落葉樹林などに対応すると考えられる。したがって、これらの地域においては、12 年間で、植生活動が活性化してきたことが想像される。一方、分析対象地域の北東部においては、NDVI 季節変動曲線のピークが失われている

こともわかる。つまり、ここでは、12年の間に植生活動が不活発になってきたことが想像される。

しかしながら、この方法では、どの程度変化したかという情報を得ることはできない。そこで、3.2節で述べた方法によって、変化を抽出することにした。図8は、 $h_{\max} = 0.4$ として変化抽出を行った結果である。この図においては、式(10)で表される類似度指標が低いピクセルほど、濃い色を用いて表現している。この図より、この分析対象地域においては、サウジアラビアの一部において、変化が激しかったことがわかる。

こうして、ピーク数変化分析手法を用いて、土地被覆変化のあった可能性の高いピクセルを抽出することによって、私たちは、さらに分析を進めるべき対象を知ることができる。例えば、抽出されたピクセルの偏在している領域があれば、その領域を観察したより空間解像度の高いリモートセンシング画像（LANDSAT等）を分析する必要がある、とわかる。

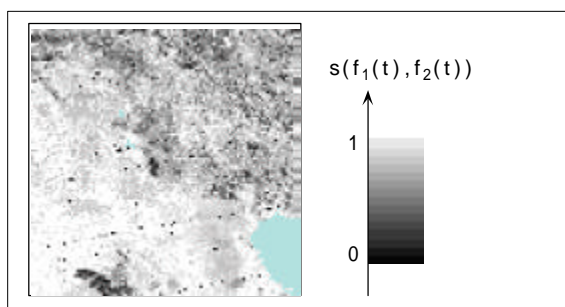


図8 類似度指標による変化領域の検出結果

5. まとめ

最後に、この論文の内容を簡単にまとめておこう。

まず、データの品質にばらつきが見られる状況下においては、データのばらつき、変動・攪乱に対して安定した性質を用いて分析する必要があることを述べた。次に、二つの時系列曲線に関する同相という概念を定義し、この概念を用いた、時系列曲線の分類手法および変化の程度を測定する手法を提案した。最後に、ペルシア湾岸地域の土地被覆状態を観察したリモートセンシングデータを題材として、これらの手法の具体的な適用法

を示した。

参考文献

- Eastman, J.R. and Fulk, M. (1993) Long Sequence Time Series Evaluation Using Standard Principal Components, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(6), 991-996.
- Jensen, J.R. (1996) *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, Second Edition*. New Jersey : Prentice Hall.
- Okabe, A. (1982) A qualitative method of trend curve analysis, *Environment and Planning A*, 14, 623-627.
- Okabe, A. and Masuda, S. (1984) Qualitative Analysis of Two-dimensional Urban Population Distributions in Japan, *Geographical Analysis*, 16(4), 301-312.
- Samson, S.A. (1993) Two Indices to Characterize Temporal Patterns in the Spectral Response of Vegetation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(4), 511-517