

## 論文

## 空中写真から生成した樹冠面標高図を用いたギャップ判別

松本 健\*・長谷川尚史\*\*・山中典和\*\*\*・酒井徹朗\*

## Discrimination canopy gaps on digital elevation models of canopy surface generated on aero photograph

Ken MATSUMOTO, Hisashi HASEGAWA, Norikazu YAMANAKA and Tetsuro SAKAI

本論文は、空中写真から計算機処理により自動生成した樹冠面標高図（C-DEM）を用い、地形の影響を各種フィルタ処理によって除去することにより、林冠ギャップの判別をおこなった。フィルタ処理は単純平滑化、メディアン、適応化平滑化、FFTハイパスフィルタの4種を用い、C-DEMの断面、平面の双方で各フィルタの特性を比較した。断面での比較では、FFTハイパスフィルタのみがギャップ・異なる開空状況の林道に反応していること、そして誤反応が少ないことがわかった。平面での比較では、フィルタ処理後に2値化した画像において検出されたギャップ・ノイズ比で示されるSNRを求めたところ、FFTハイパスフィルタは他のフィルタの5倍以上の値を示した。このことから、C-DEMから樹冠面の凹凸と地表面の凹凸を分離するのに、FFTを用いた周波数域フィルタを用いることが有効であり、そのデータは林冠ギャップ判別に利用可能であることがわかった。

キーワード：空中写真、林冠ギャップ、DEM、デジタルフィルタ、フーリエ変換

Canopy surface of natural forest without elevation data of the ground is investigated by using high density Digital Elevation Models (DEM). By using digital filter, the smaller clusters of unevenness on a DEM are distinguished tree crowns from terrain that has relatively larger clusters. From this model, in addition, canopy gaps are discriminated. The most useful filter, among other three filters, is found to be FFT high pass filter. Even with this method, however, noise that can be misidentified as canopy gaps is still excited. When FFT used, Signal Noise Ratio of true gap area to false gap area improves more than five times than the other filter used.

Key words : Aero photograph, Canopy gaps, Digital elevation models, Digital filter, Fourier transfer

## 1. はじめに

従来、森林調査において使用可能なりモートセンシング技術は光学センサを元とし、濃度値を解析するものが主であった。しかしながら近年の技術の多様化にともない、様々なデータが利用されており、数値標高図 (Digital elevation model) もその中の代表的なものである。また、空間解像度の高度化により、画像データからより小さな対象物の情報を得ることが可能となっている。それにともない、森林の解析において、従来の解像度では対象とすることができなかった事象への適応が進んでいる。

ところで、林冠ギャップの調査は従来手法よりも、調査者の主観を排除できる方法がとられるようになっていく (Hubell 1986)。この方法は調査対象森林を現地調査により、5mのメッシュ点ごとに樹高計測していき、

そのデータから任意の樹高以下の点をギャップと定義していくものであるが、大変労力がかかる作業となる。したがって、その客観的な特徴を生かすために、リモートセンシングによるデジタルデータを応用し、小労力で広範囲の調査が出来る手法を確立することは大変有効となる。

本研究の目的は、林冠ギャップという森林の幾何形状を自動判別することにより、天然林における樹冠面標高図解析の手法を確立することである。樹冠面標高図 (Digital elevation models of canopy surface: 以下C-DEM) はステレオペア写真からデジタルカラーオルソ写真を生成する際に必要なデータである。本研究で使ったC-DEMデータは、ステレオペア写真を自動ステレオマッチングアルゴリズムによって計算機で自動生成されたものである。

C-DEMとは、あるメッシュ間隔で森林の樹冠部分の

\* 京都大学大学院情報学研究所

\*\* 京都大学大学院農学研究科

\*\*\* 鳥取大学乾燥地研究センター

\* Graduate School of Informatics, Kyoto University

\*\* Graduate School of Agriculture, Kyoto University

\*\*\* Arid Land Research Center, Tottori University

標高値を持つデータである。このデータは森林の、特に凹凸形状の情報を多く持ったものである。しかし、その情報を元に森林に関する解析をおこなう際、生成されたままの状態では地形の凹凸情報も同時に含んでいることが問題となる。人工林においては林分が形成される以前の空中写真などから地表面の標高値をある程度の精度で推測することが可能であるが、天然林では地表面のデータを得ることが可能な空中写真の入手は難しく、また実際に現地測量によって地表面の標高値を計測することは空中写真の利便性を相殺してしまうため現実的ではない。

Nakashizuka et al. (1995) の研究は落葉時の写真から地表面の標高値を求め、2 時期の空中写真からギャップ調査を行っている。しかし、空中写真を複数回撮影することは費用負担が非常に大きく、また落葉した樹木の間から地表面の標高値データを作るとは、観察者の判読技術に負うところが大きく、労力もかかる作業である。したがって、客観性を保ち、広範囲のデータを解析するためには、一枚のC-DEMデータから地表面の凹凸と樹冠面の凹凸を分離する必要性が生ずる。

酒井ら (1997) の研究では、C-DEMデータに単純平滑化フィルタ処理を行うことによって高周波の凹凸を除去して得られた平滑面を地表面とみなし、平滑面と処理前の標高値との差分と、実測地による樹高平均との相関を分析している。また地形解析の分野では、地形の強調処理のために単純平滑化フィルタとメディアンフィルタ、2 種による処理をしたそれぞれの標高値と未処理の標高値の差による白黒濃淡画像を用いた研究が岩橋 (1992) によってなされている。本研究は上記 2 つの先行研究で用いられている単純平滑化・メディアンフィルタに加え、電気信号処理や画像処理の分野で用いられている適応化平滑化・高速フーリエ変換ハイパスフィルタを新たに適応し、高周波成分 (樹木) と低周波成分 (地形) に分離した後に高周波数成分を解析することによって、森林の形状として特徴的な林冠ギャップを判別し、C-DEMに対する周波数的解析手法の有用性を考察したものである。

## 2. 解析対象地域とデータ

本研究は京都府美山町の京都大学農学研究科附属演習林芦生演習林、上谷に設定されたモンドリ谷集水域を含む 600m × 400m、24ha の範囲を研究対象地として分析を行った。

モンドリ谷集水域は天然林の長期的継続調査地として 16ha の調査区が設定されている。調査区はコンパス測量によって一辺が 25m のサブプロットに分割されてい

る。調査地全体の種構成は多いものから順に、スギ、ブナ、ミズナラ、コハウチワカエデ、ミズメとなっており、地形別の樹種構成は尾根部にスギ、谷部に広葉樹となっている。当調査地は 1924 年に演習林が設定されてからは、伐採その他人為の影響はほとんど受けていないとされている (山中ら 1993)。

本研究の対象地を含む、上谷・下谷地区は 1996 年 10 月に 1/15,000 の空中写真が撮影されている。この空中写真を 1,200dpi でデジタルデータ化した画像からステレオマッチング法によって自動生成された 1.2m メッシュの C-DEM データを解析データとして用いた。Photo 1 に当該範囲のオルソフォトを示す。

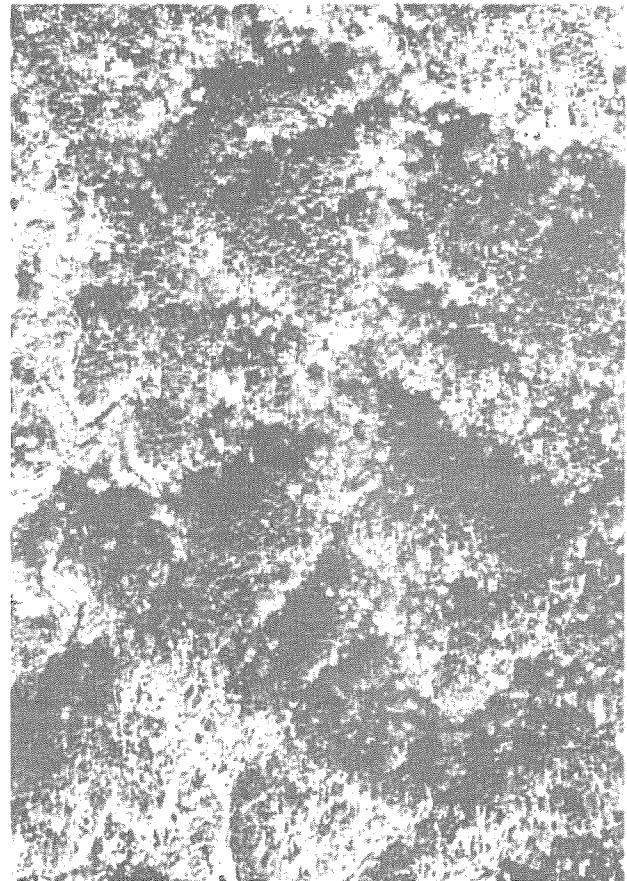


Photo 1. 解析対象地のオルソフォト  
The digital orthophoto of the study area

## 3. 解析手法

本研究で用いた C-DEM データは地形に関する高さの情報と、樹高の情報との双方の和が標高値として表されている。したがって、森林の形状把握をおこなうためには地形の情報を除去する意味で、C-DEM データに対して平滑化フィルタ処理を行い、その後に元のデータとの差を取ることによって高周波成分である樹木による凹凸情報を抽出することが可能となる。フィルタ処理と元デ

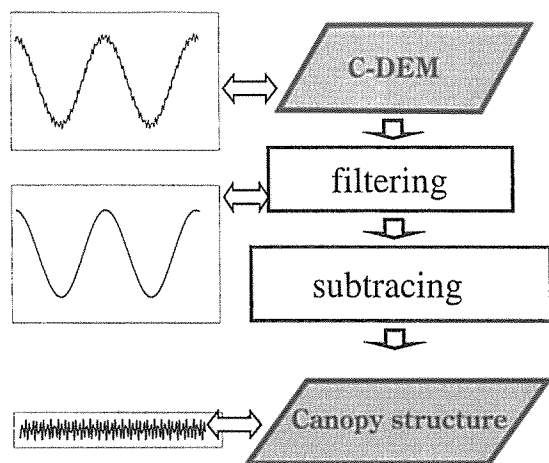


Fig. 1. フィルタ処理・差分処理手順の流れ図  
Flow chart of filtering and subtracting procedures

ータとの差分を取る手順の流れ図をFig. 1に示す。

使用した4種のフィルタのアルゴリズムと一般的特徴は以下のとおりである。

#### (1) 単純平滑化フィルタ

単純平滑化フィルタでは近傍 $N$ 点の標高値の平均値を求め、その値を平滑化後の値とする。ある点でのC-DEMのデータを $x(i)$ 、平滑化後の値を $y(i)$ とくと

$$y(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=i-m}^{i+m} x(i+j) \quad i=m+1, \dots, n-m$$

ただし、 $n = 2m + 1$

となる。

このフィルタでは樹木による凹凸情報の除去の程度は近傍点の数 $n$ に影響される。しかし、細かい凹凸に対する平滑化の効果は、地形による大きな凹凸に対しても同様の効果を及ぼし、これは歪みとなる。C-DEMに対して適応した場合は、歪みは尾根筋や谷筋で大きくなるために、そこでの森林の形状の把握が困難になるという問題を発生させる。そこで細かい凹凸の軽減効果と大きい凹凸に対する歪みとの排反関係を考慮し、軽減効果が高く、かつ歪みが少ない $n$ の値を適正に設定することが必要となる。

#### (2) メディアンフィルタ

単純平滑化フィルタでは平均値を平滑化後の値として採用しているが、メディアンフィルタでは、 $N$ 近傍の中央値（メディアン）を平滑化後の値として採用する。単純平滑化フィルタでは平滑域の異常値の影響を完全に除去しきれないという欠点があるが、メディアンフィルタでは中央値以外の値は平滑化後の値にはほとんど影響しないという特徴がある。

#### (3) 適応化平滑化フィルタ

上記のフィルタのうち、特に単純平滑化フィルタは、

ピーク値前後、すなわち尾根部や谷部で歪んだ波形を出力してしまうという欠点がある。ピーク付近で分散値が大きくなるこのような性質を逆に利用したのが適応化平滑化フィルタである。適応化平滑化フィルタは以下の通りである。

$$y(i) = \frac{\sigma_x^2(i) - \sigma_n^2}{\sigma_x^2(i)} \{x(i) - \bar{x}(i)\} + \bar{x}(i)$$

ただし  $\sigma_x^2$  : 近傍の点の分散値

$\sigma_n^2$  : 樹木による凹凸成分の分散値

樹木の凹凸単独での分散値はC-DEMでは不明であるために、本研究で用いた自作プログラムでは $\sigma_n^2$ はパラメータとして与えるようにした。すなわち、ピーク付近では $\sigma_x^2$ は $\sigma_n^2$ に比べて大きくなるため分散値による係数部分は1に近づき、平滑後の値 $y(i)$ は平滑前の値 $x(i)$ に近い値をとる。逆になだらかな変化をしている点では、平滑後の値 $y(i)$ は単純平滑値 $\bar{x}(i)$ に近い値をとる。結果としてピーク付近に歪みがでないフィルタ処理を行うことが可能となる。

#### (4) FFTローパスフィルタ

FFT（高速フーリエ変換）によるフィルタ処理は、空間軸に配置されたデータをFFTで周波数軸に変換し、そこでフィルタによる強調処理をおこない、再びIFFT（高速フーリエ逆変換）によって空間軸データに逆変換する、という一連の手続きによって行なわれる。周波数軸での強調処理には目的と設計デバイスによって様々なものが使われるが、今回はidealフィルタ（矩形波フィルタ）を用いた。このフィルタはある範囲の値に対しては1をかけ、その他の範囲の値には0をかけることによって強調処理を行なうものである。

### 4. 各フィルタの比較解析

#### 4.1. 断面標高データによるフィルタ比較

各フィルタの比較をおこなうために、断面による解析をおこなった。解析で用いた断面の位置をFig. 2に示す。いずれもモンドリ谷プロットを東西方向に横断する断面であり、断面1は二点で林道を通じたもの、断面2はギャップをほぼ長径方向に横断したものである。なお、このギャップの長径は1995年の現地調査では32.4mであった。また、FFTローパスフィルタに関しては、256段階に分割したスペクトルのうち、低周波域より7段階を通すものと8段階を通すものを用いた。

林道通過点を含む断面1と、ギャップの横断面を含む断面2と各フィルタ適応後の差の値によるグラフをFig.

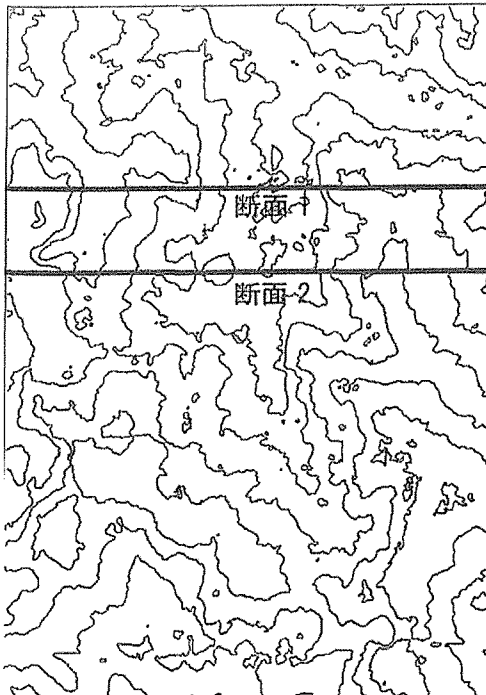


Fig. 2. 解析に用いた断面の位置(等高線: 15m)  
Selected two cross lines on the contour map (each contour line: 15m)

3, Fig. 4に示す。

断面1において,FFTローパスフィルタ以外では単純平滑化フィルタのみが反応し,右の林道は適応化平滑化フィルタのみが反応した。双方を検出可能であったのはFFTローパスフィルタのみであった。この違いは左の林道は断面形状がU字型,右の林道はV字型であるという形状の違いによると考えられる。したがって,FFTローパスフィルタは断面形状によることなく,検出が可能であるということが考えられる。

断面2においてギャップに対してはすべてのフィルタで検出可能であった。しかし,他の谷部分にもフィルタが反応してしまい,これを避けるために平滑時にとる近傍の値の数を大きくするとギャップは検出されなかった。それに対して,FFTローパスフィルタでは比較的ギャップのみに対して反応しているといえる。しかし,FFTローパスフィルタで他の対象物に反応せず,多くのギャップに反応するには,厳密な矩形フィルタの設定が要求されることが明らかになった。

#### 4.2. 平面データでのフィルタ比較

次に,平面のデータにおける解析をおこなった。FFTに関しては先に述べたとおり,ローパスフィルタ

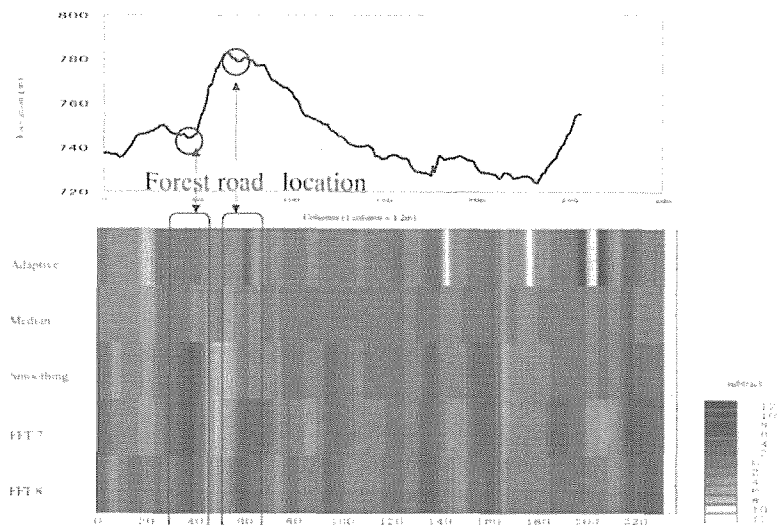


Fig. 3. 林道を二点で通過する断面1での各フィルタ処理の比較  
Comparison with each filter on line 1 crossing a forest road at two points

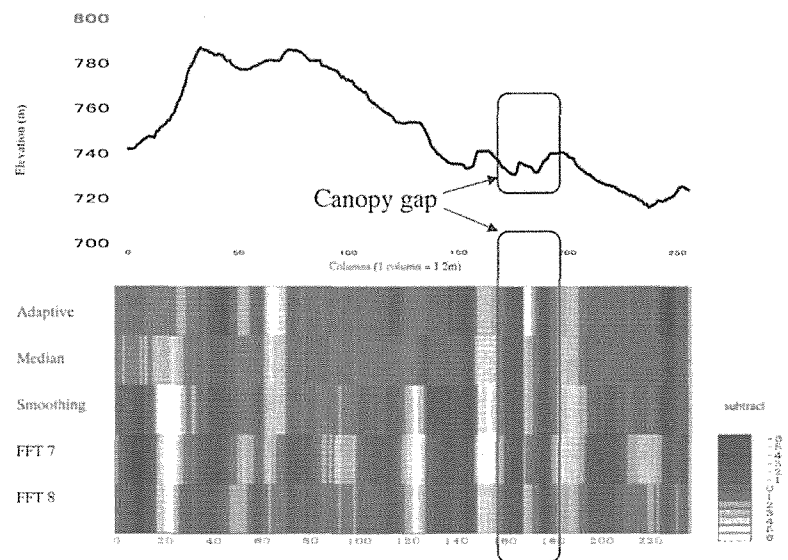


Fig. 4. 既知のギャップを通過する断面2での各フィルタ処理の比較  
Comparison with each filter on line 2 crossing a canopy gap

処理後に差分を求める手続きの代わりに,ハイパスフィルタ処理をおこなった。平面のデータ解析は単純平滑化,メディアンフィルタ,適応化平滑化の各フィルタはC++による自作プログラムを用い,FFTハイパスフィルタに関してはScion Image (Scion社)におけるマクロプログラムを用いた。このフィルタは,低周波数域からスペクトル全体の95%を通すフィルタである。この解析結果をFig. 5からFig. 8に示す。また,現地調査により既知のギャップの位置図をFig. 9に示す。

Fig.9中,斜線で塗りつぶしているギャップは,先の断面データの比較で取り上げたものである。Fig. 5の単

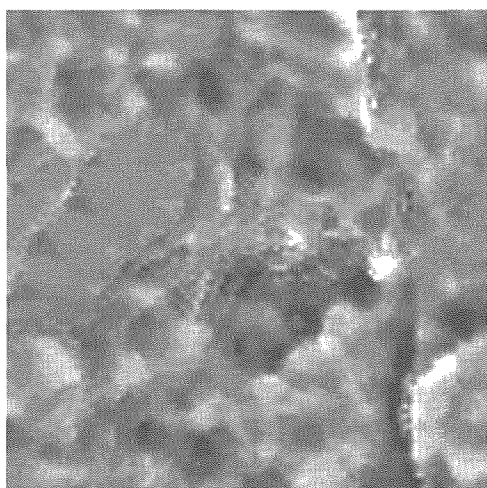


Fig. 5. 単純平滑化フィルタ処理後のC-DEMの  
グレースケール画像  
The grayscale image of C-DEM filtered out of  
smoothing filter

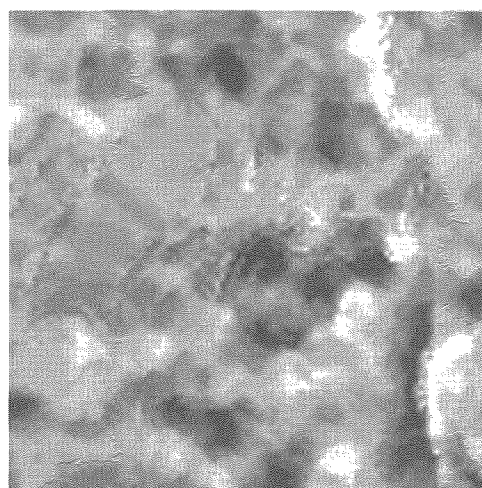


Fig. 6. メディアンフィルタ処理後のC-DEMの  
グレースケール画像  
The grayscale image of C-DEM filtered out of  
median filter

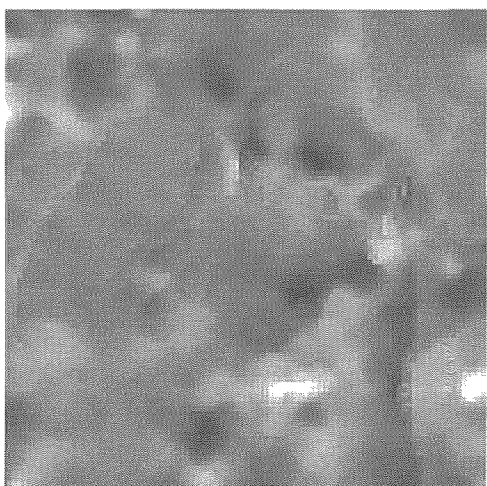


Fig. 7. 適応化平滑化フィルタによる処理後の  
C-DEMのグレースケール画像  
The grayscale image of C-DEM filtered out of  
Adaptive smoothing filter

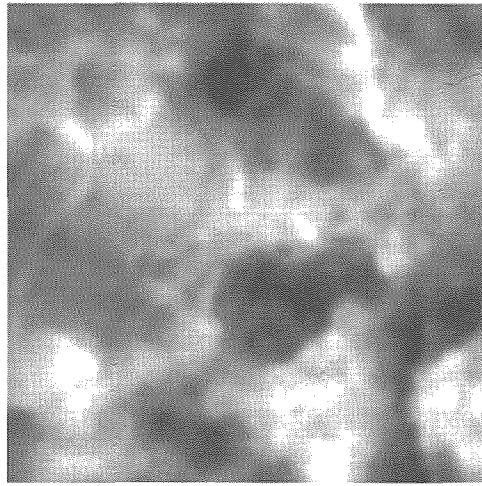


Fig. 8. FFTハイパスフィルタによる処理後の  
C-DEMのグレースケール画像  
The grayscale image of C-DEM filtered out of  
FFT high pass filter

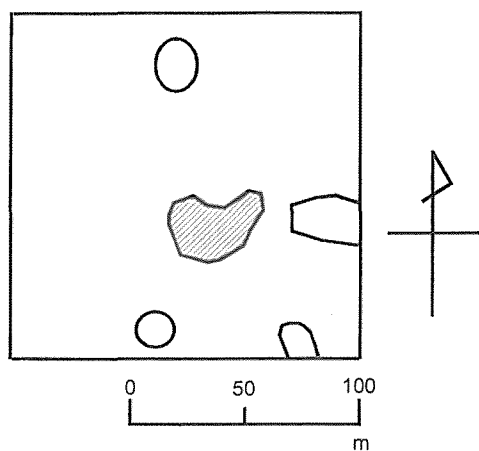


Fig. 9. 既知のギャップ位置図  
The location of gaps which already known

純平滑化フィルタとFig. 6のメディアンフィルタは、双方ともにこのギャップを濃く検出している。しかし、ギャップ以外の面でノイズ状に細かく濃い濃度値の部分が存在してしまっている。これは、この画像の示す範囲が全体的に谷部となっており、フィルタ処理の際の波形の歪みによって、差の値が全体的に大きくなってしまっていることによると考えられる。逆に、Fig. 7の適応化平滑化フィルタではノイズ状のものは弱く、全体的に薄い濃淡画像となっている。しかしながら、ピーク付近の値を保存するという性質を持っているために、ギャップに対してもフィルタ処理の際に形状が若干保存、差をとった値も小さくなるため、比較的薄く検出されてしまうことが明らかになった。

これに対し、FFTハイパスフィルタによるFig. 8は、

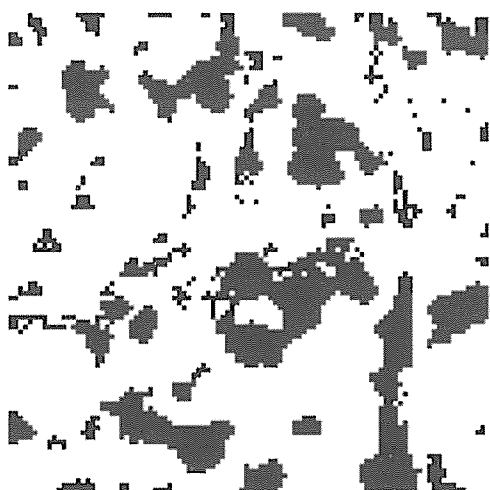


Fig. 10. Fig. 5を2値化した画像  
The binalized image of Fig. 5



Fig. 11. Fig. 6を2値化した画像  
The binalized image of Fig. 6



Fig. 12. Fig. 6を2値化した画像  
The binalized image of Fig. 7

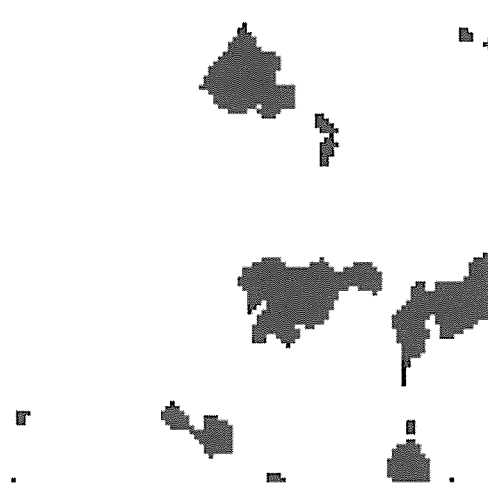


Fig. 13. Fig. 8を2値化した画像  
The binalized image of Fig. 8

ギャップの形状がはっきりと現れた。このことは他のフィルタが近傍の点を参照とした処理をしているのに対して、FFTハイパスフィルタが周波数という絶対的な指標を元に、対象領域全体に対して一括のフィルタ処理をおこなっているために、ギャップのエッジを丸めることがないためだと考えられる。したがって、ギャップの大きさや領域全体でのギャップ率などを測るためにはFFTハイパスフィルタがもっとも適したフィルタであるということがいえる。

#### 4.3. 各フィルタ処理後画像のSNR値比較

各フィルタ処理画像は、視覚的に優劣の差がでることが明らかになった。しかしながら、広範囲に散在するギャップ判別を正確におこなうためには客観的な判別アルゴリズムが必要となる。そこで、256階調のグレースケール画像であるFig. 5 - Fig. 8の二値化処理をおこなっ

た。閾値64で二値化した画像Fig. 10 - Fig. 13を一例として図示する。既知のギャップを表す画素を正規の信号、それ以外の画素をノイズとし、もとのフィルタ毎のそれぞれの画素数とSNR値（信号対ノイズ比）を示したものがTable 1である。FFTハイパスフィルタのSNR値は他の3フィルタのものと比較すると良い値を示しており、先に断面データで比較した結果が裏付けられた。また、視覚的に全体的に薄い画像となっている適応化平滑化フィルタに関しては、SNR値そのものは単純平滑化およびメディアンフィルタを上回る値となっているが、ギャップの検出面積は少ないものとなっている。この表からも、検出されたギャップ面積こそ若干少ないが、SNRの値で他のフィルタと大きく差をつけているFFTハイパスフィルタがもっともギャップの検出に適していることが明らかになった。

Table 1. 各フィルタ処理後に2値化処理した画像でギャップと判定された画素数及びSNR

Number of True value pixels of binalized image and SNR of canopy gaps

| Filter name   | Gaps<br>(pixel) | Noise<br>(pixel) | SNR      |
|---------------|-----------------|------------------|----------|
| Smoothing     | 630             | 1766             | 0.356738 |
| Median        | 717             | 1687             | 0.425015 |
| Adaptive      | 409             | 743              | 0.550471 |
| FFT high pass | 568             | 183              | 3.103825 |

## 5. おわりに

本研究により、FFTを用いたフィルタによって一枚のC-DEMデータから地表面の凹凸と樹冠面の凹凸を分離し、グレースケール画像を出力することによりギャップを判別することが可能であることが示された。しかしながら、解析対象域のギャップ数や個々のギャップの大きさなどを自動的に抽出するためには、フィルタ処理による前処理だけでは不十分であると考えられる。したがって、判別解析法などの画像中の小領域内での特性に応じた方法を用いて二値化することなどが考えられる。

近年リモートセンシング分野で注目を集めている技術にレーザープロファイリングがある。この技術により、現在、国土地理院により整備されているものより、さらに高解像度を持つDEMの利用が進むと思われる。密集した森林では地面の標高値を測量するファーストパルス利用可能性が低いと考えられているために、今回用いたC-DEMのように、樹冠面の標高値のみがわかり、地表面の標高値はわからないという局面は今後ますます増えてくるものと考えられる。これに対応するためにも、今後もC-DEMデータの解析手法の確立に取り組みたいと考える。

## 謝 辞

最後に、本研究で用いた実測林冠ギャップデータの使用に関して、元京都大学農学部森林生物学分野の川那辺三郎博士、元京都大学農学部森林生態学分野の高谷加寿子氏の御好意をいただいた。また、樹冠面標高図は京都大学大学院農学研究科附属演習林の所蔵データである。ここに記して謝意を表させていただく。

## 引用文献

- 1) 岩橋純子 (1992) デジタルフィルタを用いた数値地形モデルの地形解析. 情報地質 **3**, 1. 31-37
- 2) 酒井徹朗・長谷川尚史 (1997) 航空写真による森林調査の新しい試み. 森林航測 **183**, 1-6
- 3) Stephen, P. H. and Robin, B. F. (1986) Canopy gaps and the dynamics of a neotropical forest. Plant ecology **77**-81 (Black well Scientific Publ. Oxford)
- 4) Nakashizuka, T., Katsuki, T. and Tanaka, H. (1995) Forest canopy structure analyzed by using aerial photographs. Ecological Research **10**, 13-18
- 5) 山中典和・松本淳・大島有子・川那辺三郎 (1993) 京都大学演習林モンドリ谷集水域の林分構造. 京都大学演習林報告 **65**, 63-76