

DMSP夜間可視画像における画素単位の観測値分布を考慮した 都市光強度推定手法の提案

Estimation of City Light Distribution Considering the Pixel-based Distribution of Digital Number Observed in DMSP Night-time Visible Imagery

高島正典¹, 林 春男²

Masasuke TAKASHIMA¹ and Haruo HAYASHI²

¹ 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, University of Tokyo.

² 京都大学防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

Night-time city light distribution observed by DMSP satellites has been focused on as a promising approach to monitor the global human activities. Since its intensity of night-time city light is larger than the upper gain limitation of DMSP visible band sensor, an urbanized area is easily saturated. This makes it difficult to estimate basic information required in disaster risk assessment such as distribution of population and social infrastructures in an urbanized area. In this paper, new method to estimate original DN which can be observed if the sensor has infinite width of gain considering the distribution of observed DN was proposed. It was clarified that city light distribution developed by new method successfully reflects unduration of light intensity and population in urbanized area.

Key Words : disaster damage assessment, DMSP night-time imagery, population

1. はじめに

現在実施されている開発途上国の防災力向上のための取り組みにおいては、当該国の自助努力だけでなく、国連などの国際機関が中心となった支援が大きな役割を担っていることが多い。そのような国際的な災害低減の努力が効果的なものになるためには、世界全体の災害リスクを見渡し、どの都市、地域から支援を進めていくべきかの戦略を合理的に構築する必要があり、グローバルな視点からのリスク評価が要求される。しかし、特に開発途上国においては、災害リスク評価に不可欠な人口・社会ストックの空間分布といった基礎データの入手は困難であり、リスク評価自体がままならないことが多い。

このような問題に対し、高島・林(2001¹⁾,2002²⁾は、それらリスク評価に必要な基礎データのモニタリング手法として、米国の軍事気象衛星DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)が日々捉える夜間可視画像を利用する手法を提案してきた。DMSP夜間可視画像を用いた都市光抽出や、抽出された都市光分布と人口、GDP、電力消費量の分析に関しては、Welch(1980)³⁾、中山(1993)⁴⁾、Elvidge et al.(1997)⁵⁾、Konami et al.(1998)⁶⁾、Elvidge et al.(1999)⁷⁾、Nakayama and Elvidge(1999)⁸⁾、Dobson et al.(2000)⁹⁾が行ってきている。中でも、Elvidge et al.(1999)では、都市光の飽和を避けるため通常の観測時とは異なる特別なゲイン設定を米空軍に依頼し、得られた画像を依頼したゲイン設定にもとづき補正して、Radiance Calibrated City Light (以下RCCL)と呼ばれる都市光強度の絶対値の分布を作成している。しかし、RCCLの作成においては、手作業で雲やノイズの除去を

行い、通常の観測時とは異なる特殊なゲイン設定の下で得られた画像を用いているため、通常の観測において日々得られる画像データを利用できない、作成に時間がかかるといった問題があった。そこで、高島・林(2001)は、測定論にもとづき、通常の観測で得られる大量の観測画像の平均値をとることで、通常観測時におけるゲインの周期的変動や、雲やノイズの影響を除去し、短時間で都市光強度の相対値の分布を抽出する手法と、その手法により得られる都市光分布を用いて、人口・建物棟数を3次メッシュ単位で推定する手法を提案した。DMSP夜間可視画像は、毎日地球上の任意の地点の画像を得られるという長所を持つが、1つ1つの画像は、雲、ノイズ、センサへの太陽光の入射等の影響を強く受けており、少数の画像から確度の高い都市光強度分布を得ることは極めて困難である。高島・林(2001)の提案は、そのような画像に対して、特別なゲイン設定を行わずとも、また手動によるクリーニングを行わずとも、日々得られる大量の画像を活用することで、都市光分布を抽出することができ、それを人口・建物棟数の推定に利用できるという可能性を示したものである。しかし、高島・林(2001)の手法(以下「旧手法」)では、光の強度が強い地域において、人口を過小評価するという問題があった。これは、主に大都市域の光強度が可視領域センサの感知域の上限を超え飽和しているために、光の強度の違いの情報が失われていることに起因している。

そこで、本論文では、特に大都市域内における都市光強度推定の精度の向上をめざし、ある期間における画素ごとのDN値の分布形状が、当該画素のDN値の中央値に対して、安定していることを利用して、飽和画素において

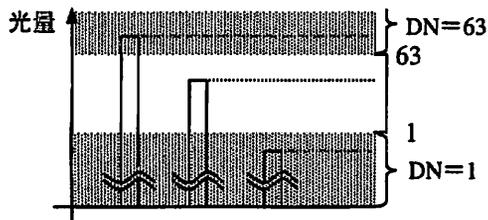


図1 可視領域センサのゲインのしくみ

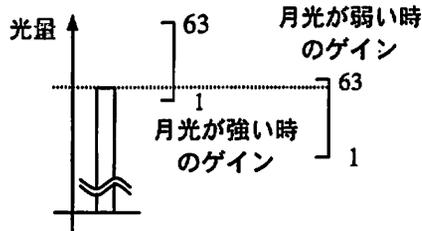


図2 可視領域センサの月齢・月の高度変化に伴うゲイン調整のしくみ

可視領域センサの感知域の上限が無かった場合に実現していたであろう仮想の中央値を推定する手法を提案する。加えて、旧手法によって得られた都市光分布および前出のRCCLとの比較を行うため、RCCLの作成に使われた画像と同じ時期（1996年）に観測された画像を用いて、旧手法および本研究で提案する手法（以下「新手法」）にもとづいた都市光画像を作成し、新手法にもとづく都市光分布が、旧手法によって得られた都市光分布と比べて、大都市域内の光の強度の違いをより鮮明に反映していることを示す。さらに、平成7年国勢調査メッシュ統計¹⁰⁾との比較により、新手法にもとづく都市光分布の方が、旧手法にもとづくものに比べ、大都市域内の人口推定に有利であることを示す。

2. 観測値分布を考慮した都市光強度推定手法

(1) DMSP夜間可視画像の特性

DMSP衛星および夜間可視画像の特性全般については、Elvidge et al.(1997), Elvidge et al. (1999)において詳細に解説されているため、ここでは、特にDMSP夜間可視画像の観測値に影響をおよぼすゲイン設定の特性について述べる。図1に示すように、DMSP衛星の可視領域センサは、光の強度の違いを識別できるある所定の範囲（ゲイン）を持ち、そのゲイン内の光の強度に対して、1から63のDN(Digital Number)を与えて記録する。ゲインを超えた強い光は63として、ゲインに満たない弱い光はすべて1として記録される^{補註(1)}。可視領域センサの本来の目的は、月光を反射する雲を捉えることである。月齢、月の高度の変化に伴い変化する月明かりの強さのもとで、一定した雲の像を得るため、月齢、月の高度変化に伴う周期的・自動的なゲイン調節が行われている。これにより、図2に示すように、仮に都市光が変化していなくても、見かけ上都市光が変化するように見える。

(2) ある期間におけるDMSP夜間可視画像の観測値の分布

高島・林(2001)が示すように、DMSP夜間可視画像に捉えられる観測値は、その画素における本来の光強度と、周期的あるいは不規則な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分の和で表現されるものとする。また仮に、ゲインの幅が無限大で、観測値が飽和することがないものとする。この場合、ある期間の任意の画素における観測

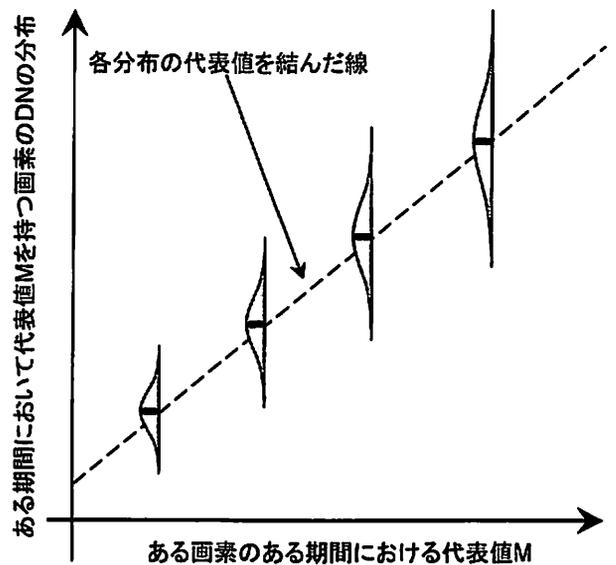


図3 ゲインの幅が無限大の場合に、ある期間において代表値Mを持つ画素のDN値の分布

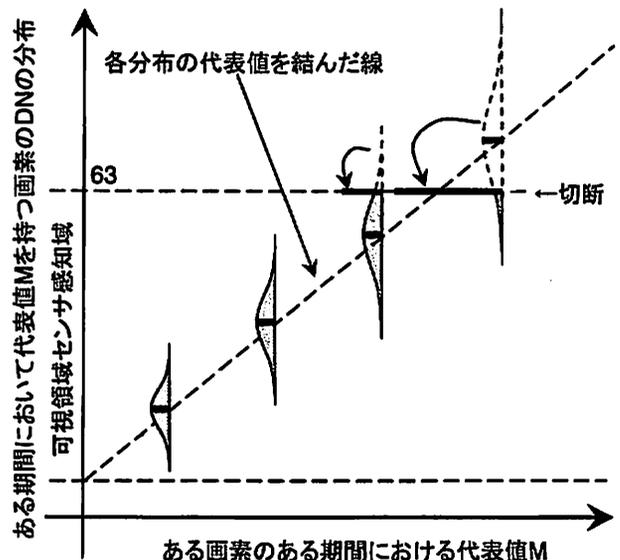


図4 所定のゲインの幅がある場合に、ある期間において代表値Mを持つ画素のDN値の分布

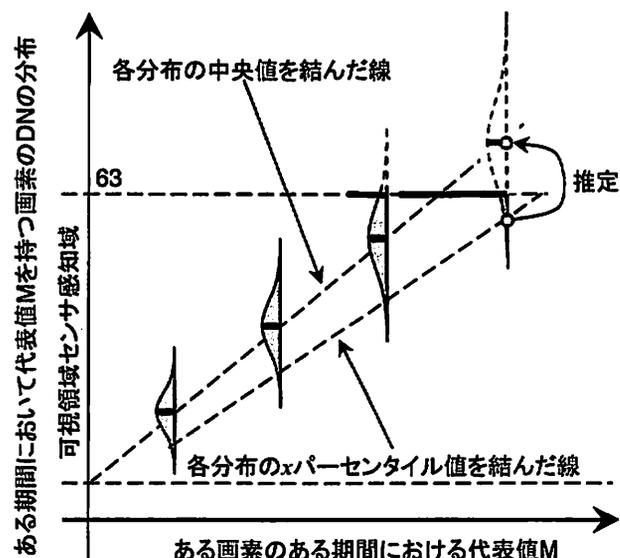


図5 分位数系測度を用いたゲイン範囲外のDN値分布形状の推定手法の概要

値は、その画素における代表的なDN値の周りに分布するものと考えられる。この様子を図示したのが、図3である。次に、ある限られたゲインのもとでの観測値の分布について考察する。ゲインを超えた光強度に対しては、1もしくは63が与えられるため、DN値の分布は、ゲインの端で切断された形状となることが考えられる。この様子を図4に示す。このようなゲインの制約のため、主に大都市域の光強度が可視領域センサの感知域の上限を超え飽和している領域内で、光の強度の違いの情報が失われてしまうこととなる。

また、旧手法では、ある画素における代表的なDN値として平均値を用いているが、DMSP夜間可視画像のようにゲインの制約によりDN値の分布が切断されている場合には、ゲインの制約の元でのDN値の中心傾向すら適切に反映しない。たとえば、ある画素におけるある期間のDN値の分布の中心がゲインの上限付近に見られる場合、平均値などのモーメント系の測度を採用する限りは、ゲイン内におさまった光強度のDN値に引きずられ、DN値の代表値は過小に評価されることとなる。このことも、旧手法にもとづく都市光分布で光強度の強い領域における情報が失われる要因となっている。

(3)分位数系測度を用いたゲイン範囲外のDN値分布形状の推定

(2)で考察したように、DMSP衛星可視領域センサのゲインの上限の存在と、ゲインの上限があるにも関わらず各画素のDN値分布の代表値として、平均値を用いたことが、光強度の強い領域において光強度の違いの情報が失われる原因となっている。ここで、再び図3,4に着目すると、仮にDN値の分布の中心がゲインの上限を超えていたとしても、その分布のゲイン内の部分の形状は観測データから知ることができる。もし、この分布の形状が、その分布の代表値の大きさに対し安定的に変化するのであれば、ゲイン内に収まっているDN分布の裾野の形状から、分布の中心の位置を推定できるはずである。

そこで、本論文では、DN値の分布の代表値として、中央値を採用すると共に、ゲイン内に収まっているDN値の分布形状を、分位数系の測度であるパーセンタイル値（以下pt値）を用いて表現し、見かけのDN値の分布の中央値がゲインの上限に等しい画素について、ゲイン内で観測されるDN値分布のxpt値から中央値を推定することを提案する。この手法の概要を図5に示す。

(4)各画素の中央値に対するDN値分布の安定性の確認

(3)で提案する手法を用いるためには、各画素の中央値に対してDN値の分布の形状の変化が安定的でなければならない。そこで、日本周辺領域（北緯20～46度、東経122～152度）について、1996年1年間におけるDMSP夜間可視画像の日平均画像を作成し^{補註(2)}、ある中央値をもつ画素におけるDN値の分布形の安定性を確認した。図6に1996年1年間の中央値が10,20,30,40,50,60となった画素における各DN値の出現確率を示す。中央値が大きくなるにつれて、分散は大きくなるものの、出現するDN値の分布形は安定していることがわかる。また、中央値が大きくなるにつれ、図4に示したようなDN値の分布のゲイン上限による切断が、目立ってくるのがわかる^{補註(3)}。次に、図7に各画素における1996年1年間のDN値の中央値と5,10,25,50,75,90,95pt値との関係を示す。分布の裾野に近い5,10及び90,95pt値の動きは不安定だが、25,75pt値に関しては中央値に対してほぼ線形的に変化していることがわかる。以上の結果から、中央値が見かけ上飽和している画素においても、本来の中央値と25pt値

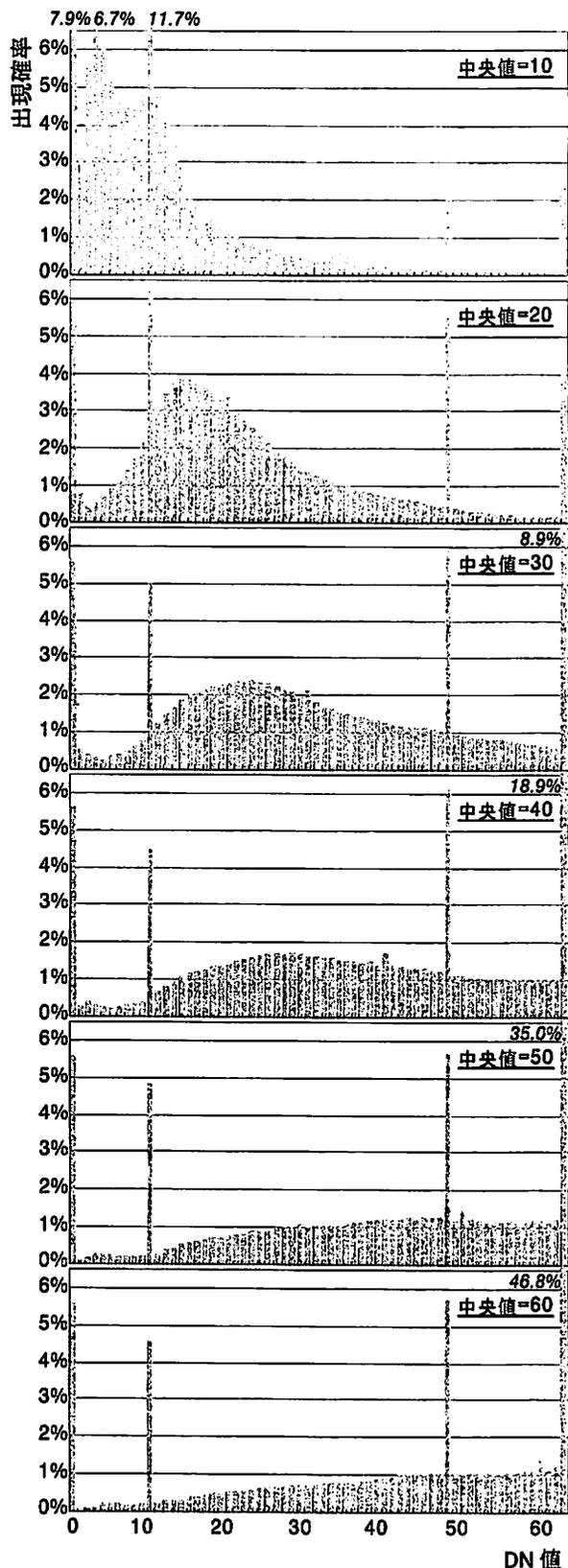


図6 1996年1年間の中央値が10,20,30,40,50,60となる画素における各DN値の出現確率分布

の間には線形的な関係があることが伺える。そこで、この関係を利用して、25pt値から中央値を推定する式を定式化した。図8に25pt値と中央値の関係を示す。両者の関係を線形と仮定し、回帰係数を最小二乗法で求めたところ、式[1]が得られた。

$$M_o = 1.471DN_{25} - 1.854 \quad (r^2=0.993) \quad [1]$$

M_o : DN値分布の中央値 (ゲイン幅が無大とした場合の本来のDN値分布の中央値)
 DN_{25} : DN値分布の25pt値

見かけ上の中央値が飽和している画素について、その画素におけるの25pt値を式[1]に代入することで、当該画素

の本来の中央値を外挿的に推定することができることになる。いうまでもなく、25pt値も飽和する画素については、式[1]を適用できない。また中央値と25pt値の関係式は、都市光分布を推定する対象期間、地域毎に作成する必要がある。

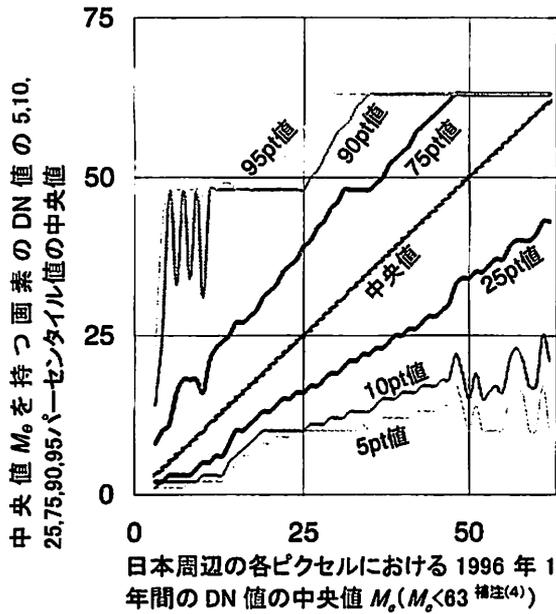


図 7 1996 年 1 年間に於いて中央値 M を持つ画素の DN 値分布の 5,10,25,75,90,95pt 値の中央値

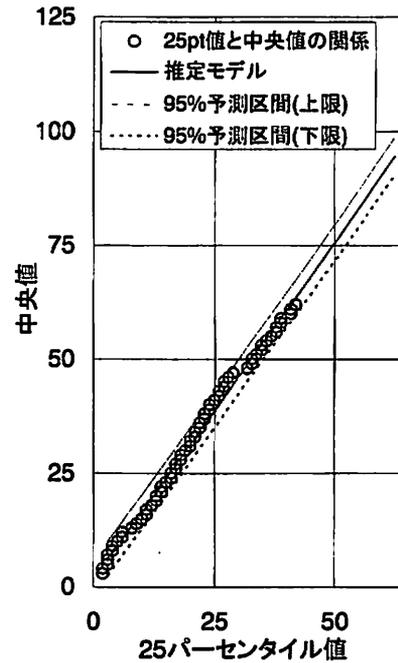


図 8 1996 年 1 年間に於ける 25pt 値と中央値の関係と中央値が飽和している画素の本来の中央値の推定モデル

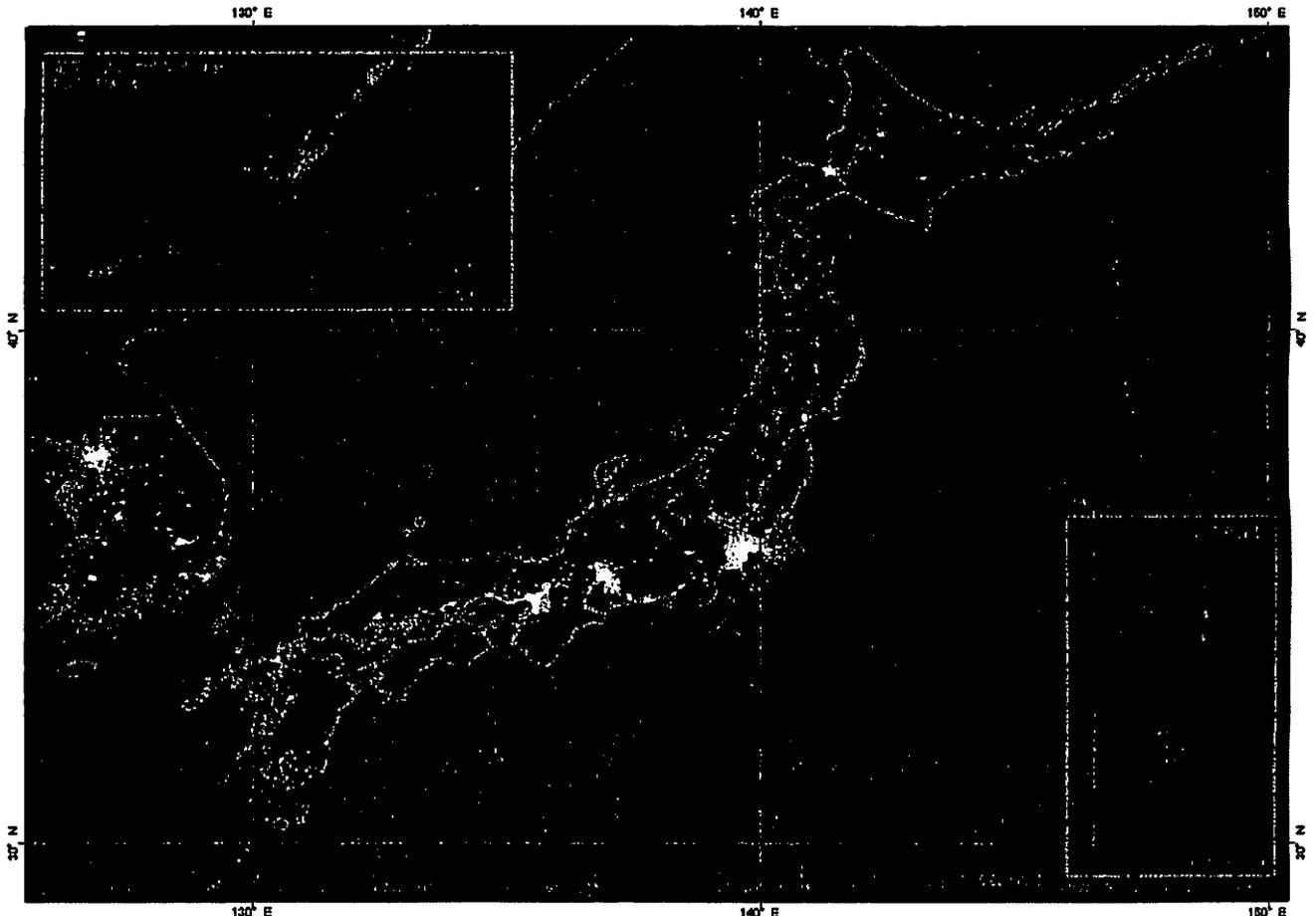


図 9 新手法を用いて推定した 1996 年における日本周辺の都市光分布

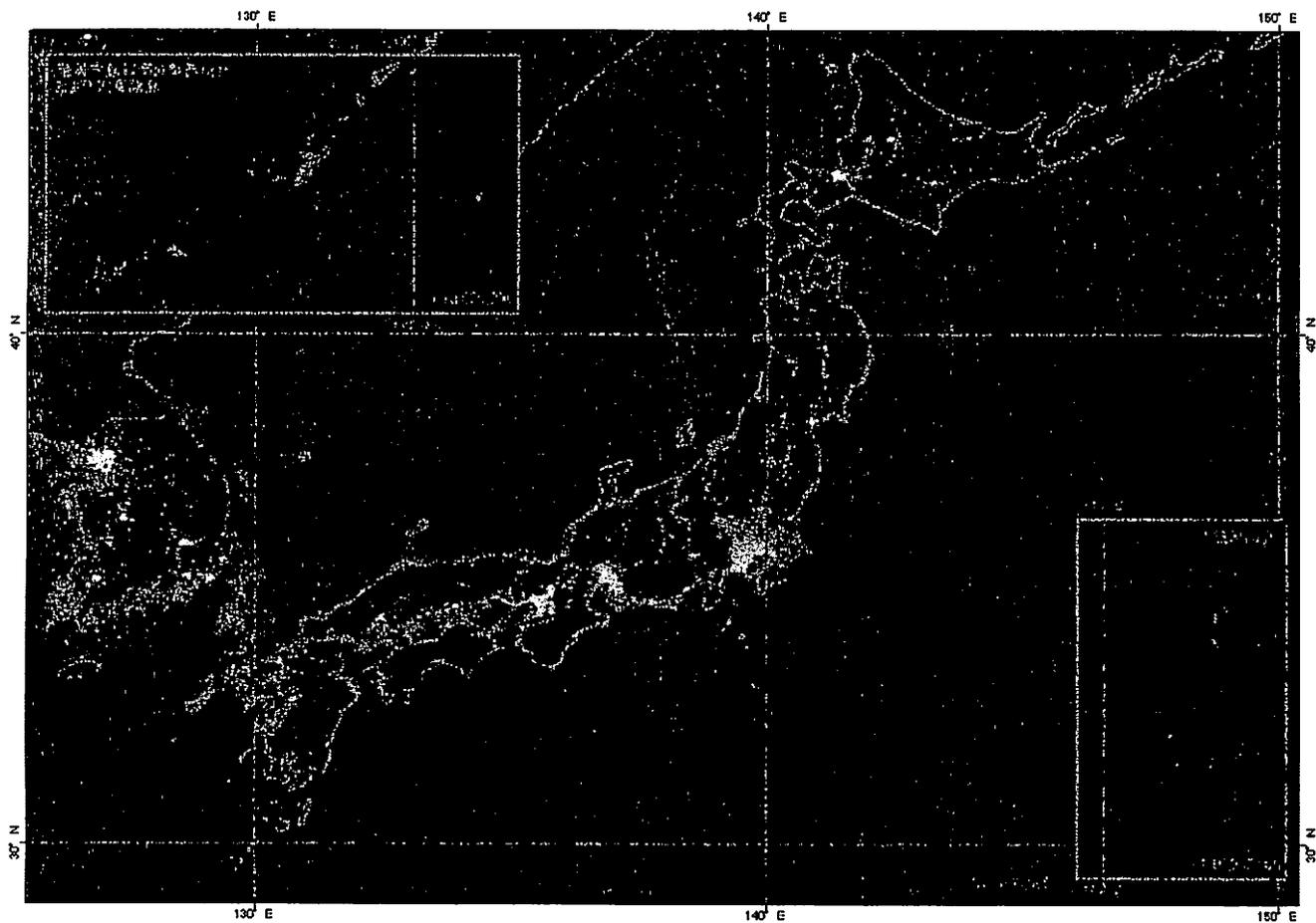


図 10 旧手法を用いて推定した 1996 年における日本周辺の都市光分布

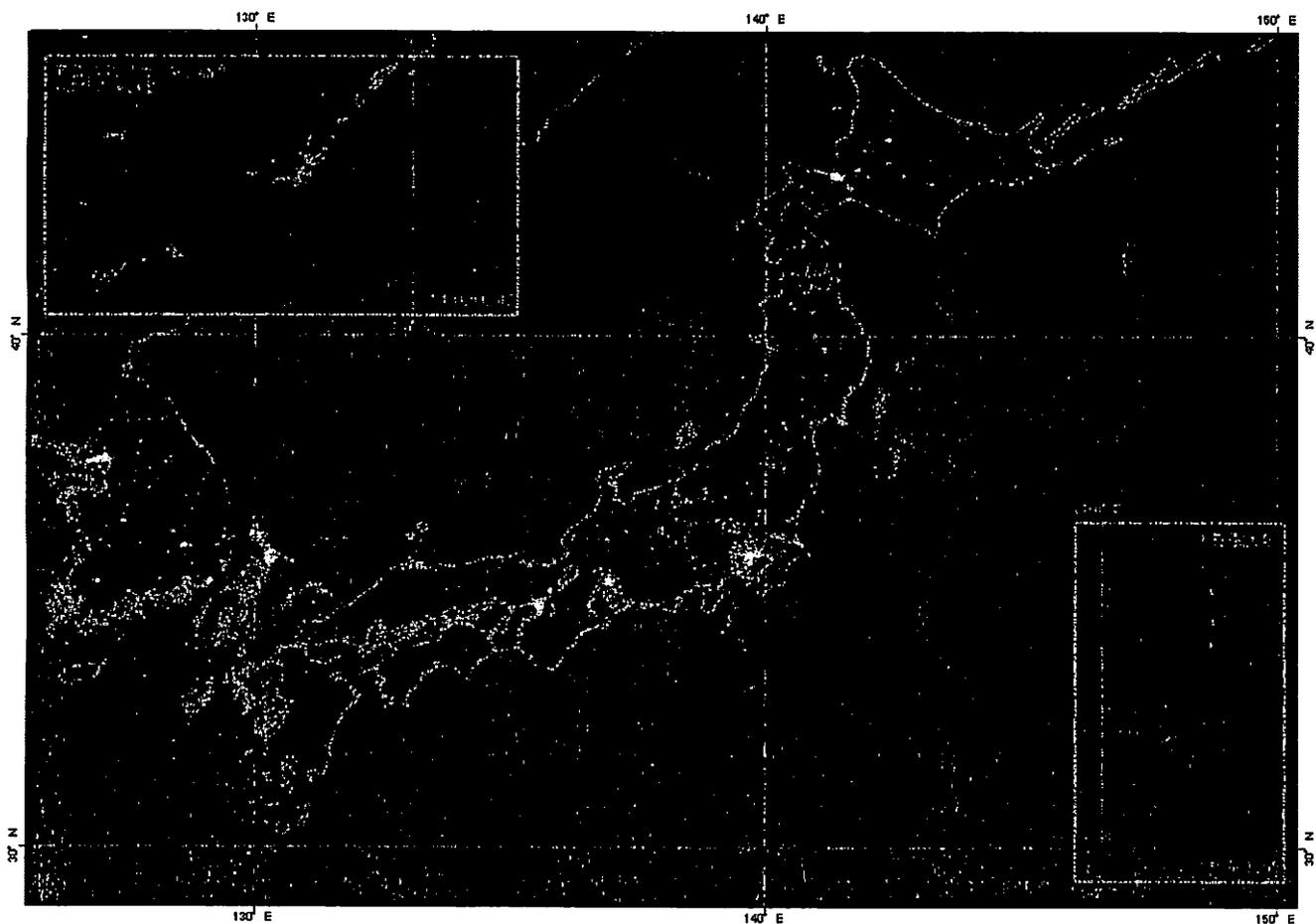


図 11 Elvidge et al. (1999)が作成した RCCL における日本周辺の都市光分布

3. 新手法および既存の手法にもとづく都市光分布の比較

旧手法にもとづく都市光分布および RCCL との比較により、新手法によって大都市域の都市光強度の違いがどの程度鮮明になるかを検証した。図 9 には、新手法を用いて本来の中央値を求めた場合の都市光分布、図 10 には、旧手法にもとづき各画素の DN 値を平均値で代表させた場合の都市光分布を示す^{補註(5)}。なお、図 9,10 は、同じグレースケールで表示されている。両者を比較すると、旧手法にもとづく都市光分布で飽和してしまっている領域において、新手法にもとづく都市光分布では都市光強度の違いが鮮明になっていることがわかる。図 11 には、図 9,10 と同じ領域における RCCL を示す。RCCL は都市光の飽和を避けるための特別なゲイン設定の下で観測された画像を用いて作成された都市光強度の絶対値の分布である。明らかに旧手法よりも新手法の方が RCCL に近い都市光分布をもたらしている。

図 12-14 は図 9-11 における関東地方を拡大し、市町村庁所在地点を重ね合わせたものである。各市区町村庁所在地点は、当該自治体の 1995 年時の人口規模に比例した半径の円で表現されている。旧手法にもとづく都市光分布では、大きな都市光の塊の中に、大小様々な人口規模の自治体が存在するように見える。一方、新手法にもとづく都市光分布では、関東平野の中でも特に人口規模の大きい自治体が集中している中心部と、都市光強度のピークが一致している。

図 15,16 は、新・旧手法にもとづく都市光分布と RCCL との関係を散布図で示したものである。旧手法で

は RCCL の値域の 1/3 の都市光強度で完全に飽和しているのに対し、新手法では RCCL の値域の 2/3 の都市光強度まで飽和を起さず線形性を保持しており、また飽和している画素数の割合も旧手法に比べはるかに少ない。以上のことから、新手法の方が、本来の大都市域内の都市光強度の違いをより忠実に反映できることが確かめられた。

4. 新手法にもとづく都市光分布と平成 7 年国勢調査メッシュ人口との関係

新手法によって大都市域内における都市光強度の違いをより忠実に反映できることが確認されたが、このことが人口推定においてどの程度貢献するかを、平成 7 年度国勢調査と 1995 年 1 年間の画像を用いて新・旧両手法に基づいて作成された都市光分布との比較により検証した。図 17,18 に、新・旧手法にもとづく都市光分布と平成 7 年国勢調査メッシュ人口との関係を示す。図 17,18 において、人口と都市光分布の比較は 3 次メッシュ単位で行われている。都市光分布の画素の大きさは、30arcsec であるため、メッシュ人口との比較が可能なように、3 次メッシュにリサンプリングした。図 17,18 について、人口と都市光分布との関係として、1 次関数、2 次関数、指数関数、べき乗関数を仮定し最小 2 乗法によって回帰係数を求めた結果以下のような結果が得られた。

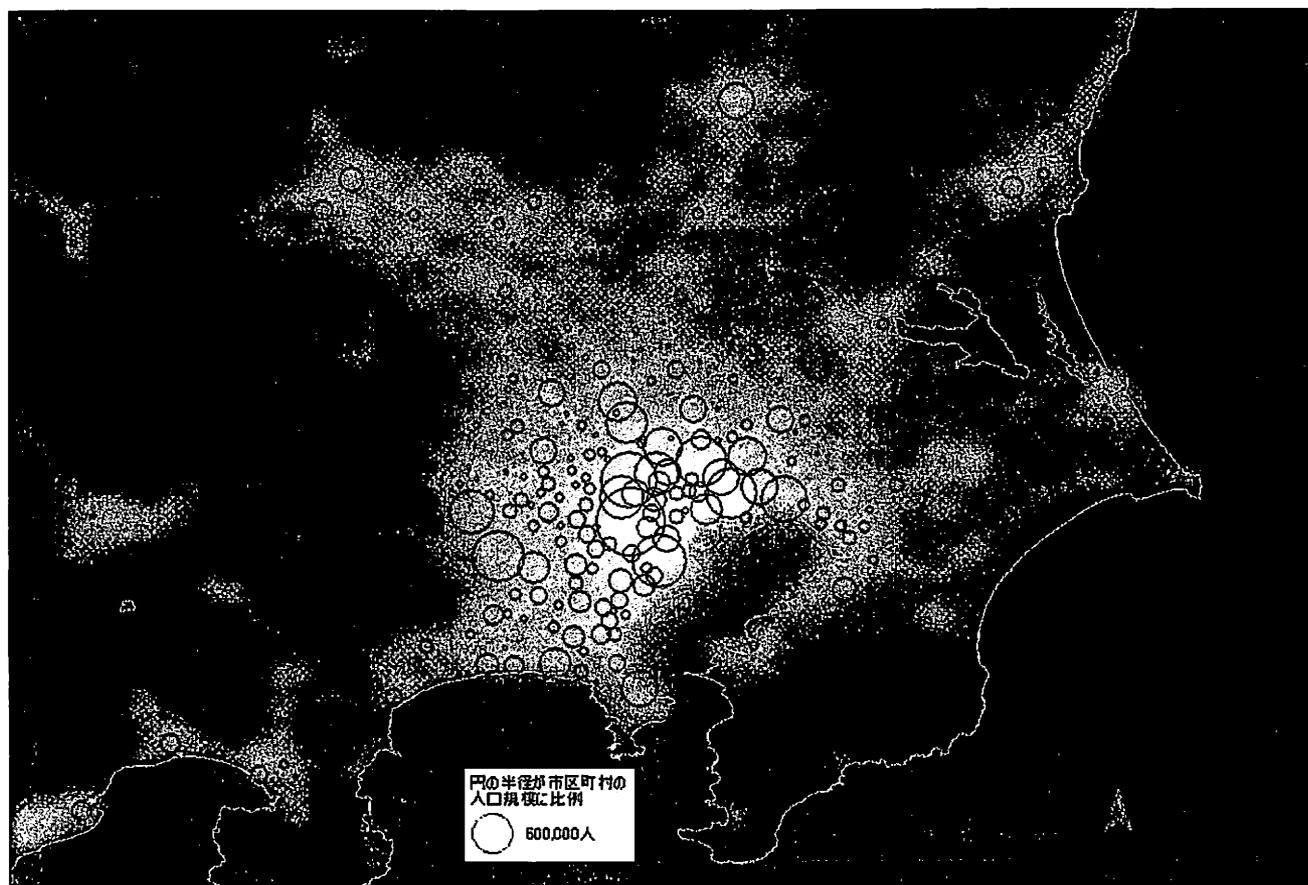


図 12 新手法を用いて推定した 1996 年における関東地方の都市光分布

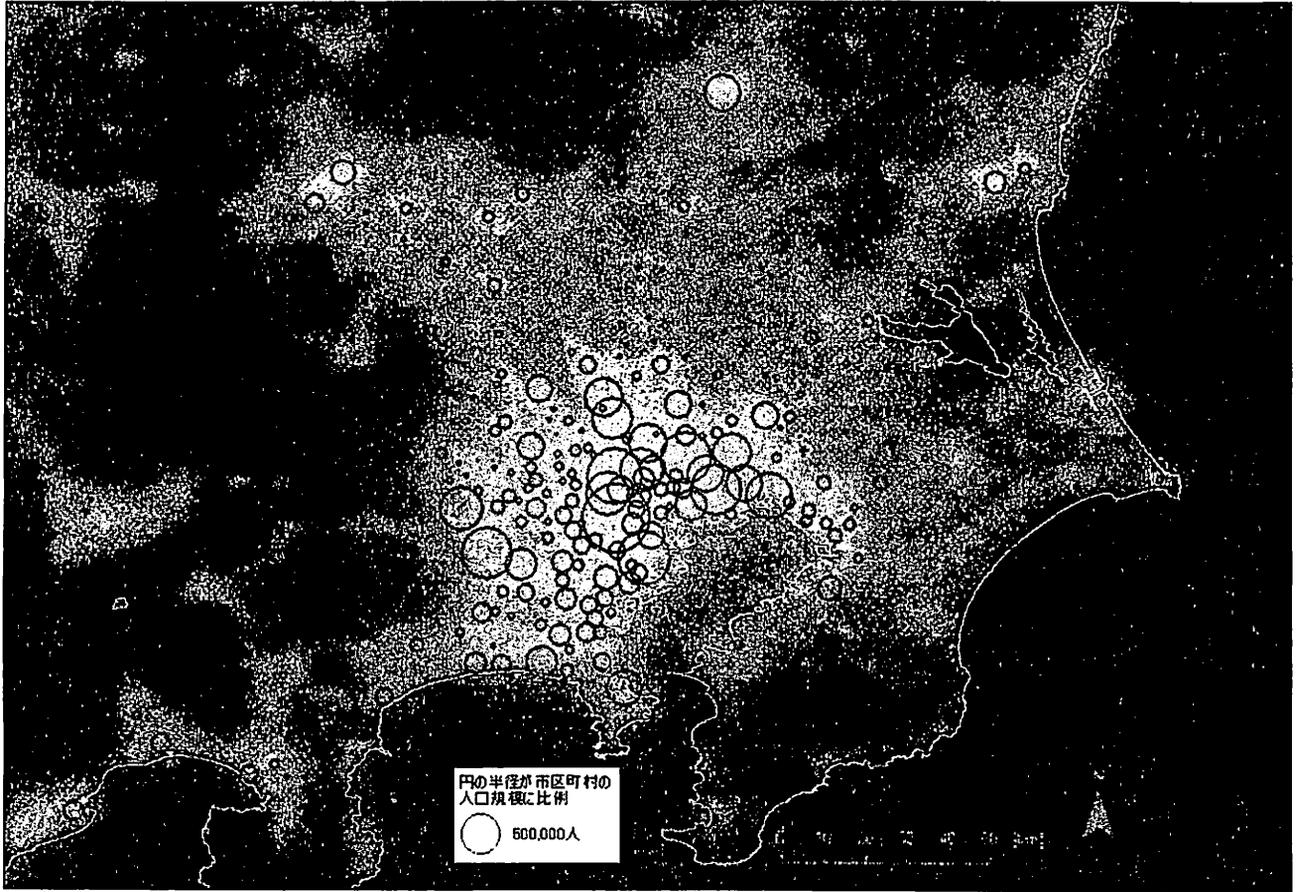


図 13 旧手法を用いて推定した 1996 年における関東地方の都市光分布

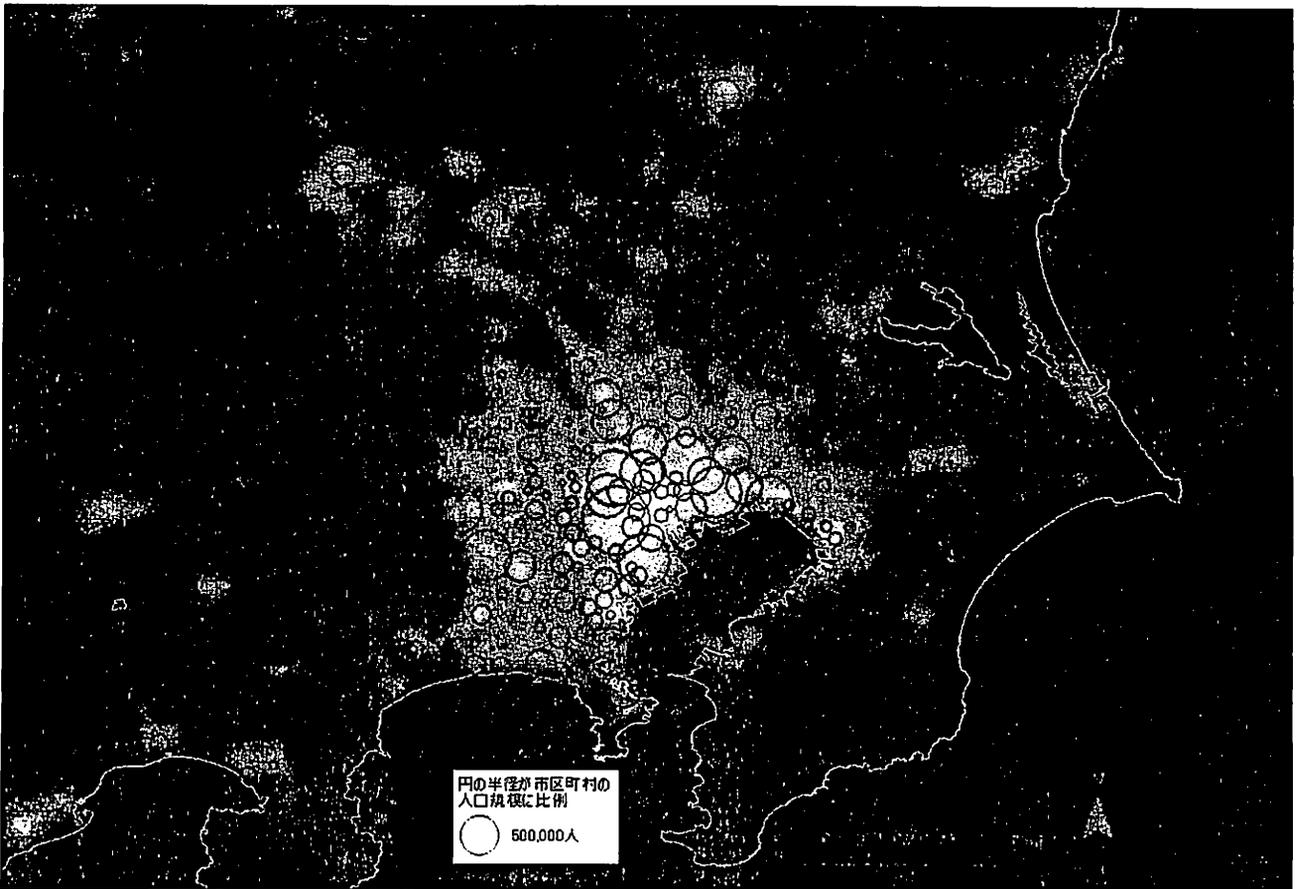


図 14 Elvidge et al. (1999)が作成した RCCL における関東地方の都市光分布

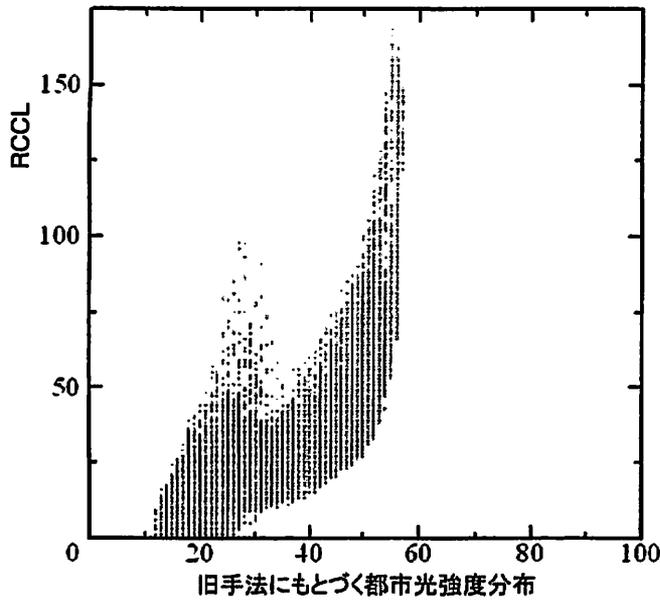


図 15 旧手法にもとづく都市光分布とRCCLとの関係

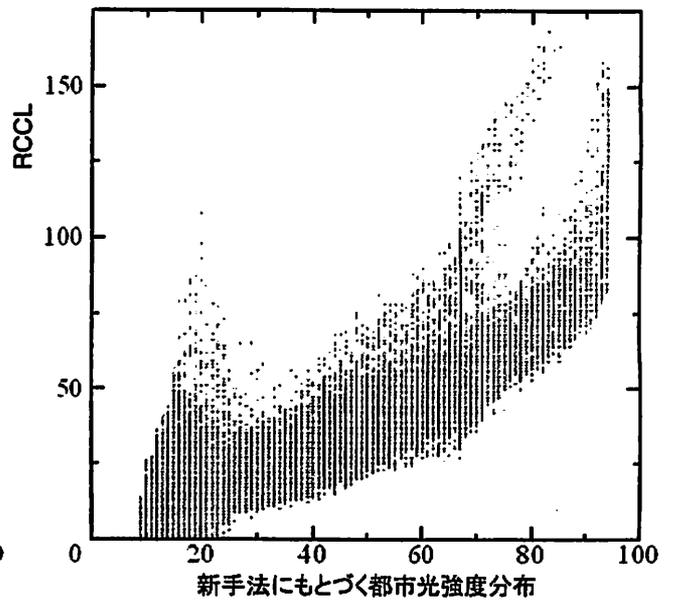


図 16 新手法にもとづく都市光分布とRCCLとの関係

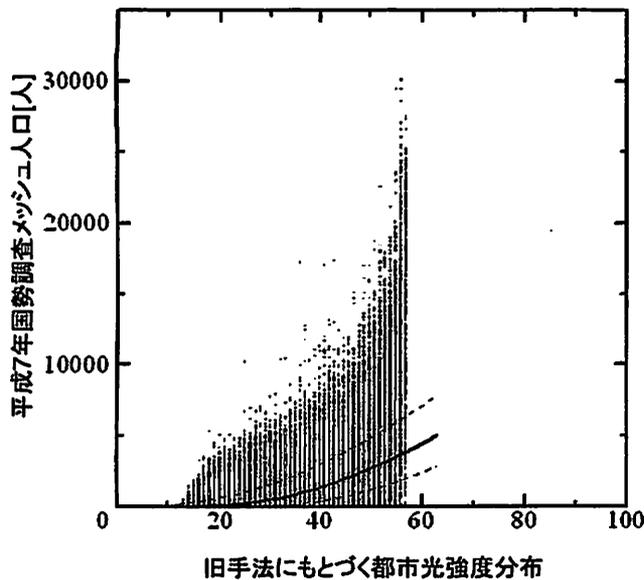


図 17 旧手法にもとづく1995年の都市光分布と平成7年国勢調査メッシュ人口との関係

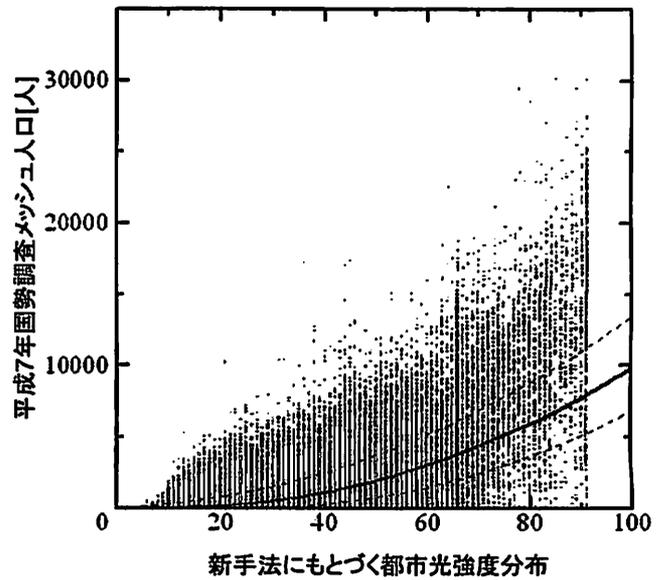


図 18 新手法にもとづく1995年の都市光分布と平成7年国勢調査メッシュ人口との関係

・旧手法にもとづく都市光分布と人口との関係

1次関数モデル

$$Pop = 104.124 DN - 1805.872 \quad (DN \geq 18) \\ (r = .634, r^2 = .402, s_e = 1037.778) \quad [2]$$

2次関数モデル

$$Pop^{0.5} = 1.486 DN - 22.556 \quad (DN \geq 10) \\ (r = .749, r^2 = .560, s_e = 10.761) \quad [3]$$

指数関数モデル

$$\log(Pop + 1) = 0.207 DN - 2.159 \quad (DN \geq 11) \\ (r^2 = .613, r^2 = .376, s_e = 2.176) \quad [4]$$

べき乗関数モデル

$$\log(Pop + 1) = 5.588 \log(DN) - 14.489 \quad (DN \geq 3) \\ (r = .619, r^2 = .383, s_e = 2.165) \quad [5]$$

・新手法にもとづく都市光分布と人口との関係

1次関数モデル

$$Pop = 81.539 DN - 1049.191 \quad (DN \geq 13) \\ (r = .702, r^2 = .492, s_e = 956.623) \quad [6]$$

2次関数モデル

$$Pop^{0.5} = 1.096 DN - 10.623 \quad (DN \geq 10) \\ (r = .780, r^2 = .608, s_e = 10.157) \quad [7]$$

指数関数モデル

$$\log(Pop + 1) = 0.145 DN - 0.336 \quad (DN \geq 3) \\ (r^2 = .606, r^2 = .367, s_e = 2.192) \quad [8]$$

べき乗関数モデル

$$\log(Pop + 1) = 3.882 \log(DN) - 8.384 \quad (DN \geq 3) \\ (r = .634, r^2 = .401, s_e = 2.132) \quad [9]$$

ここで Pop :平成7年国勢調査メッシュ人口,
 DN :都市光強度, r :相関係数,
 r^2 :決定係数, s_e :推定の標準誤差,
なお, データ数 $N=386,158$

両者とも2次関数を仮定した場合の r^2 値がもっとも大きいことがわかった. 図17,18には, この2次関数モデルおよび95%信頼区間に対応する曲線もあわせて示した. 2つのモデルの r^2 値を比較すると, 新手法にもとづく都市光分布を用いた方が r^2 値が大きい. しかし, より重要な点は, これらのモデルによって, 都市光分布から人口を推定しようとした場合, 旧手法にもとづく都市光分布を用いた場合には, DN 値が50以上の領域において, 極端に過小評価をしてしまうメッシュが生じることである. 一方, 新手法を用いた場合には, より広い範囲の光強度の違いを識別できているため, 人口の極端な過小・過大評価が生じなくなっている. よって, 本論文で提案する手法にもとづく都市光分布の方が, 人口等, 災害リスク評価に必要な基礎データの推定を行う上で有利であるといえる.

5. 結論

本研究では, DMSP夜間可視画像時系列データの画素単位の観測値分布が, 各画素の中央値に対し安定的であることを利用して, DMSP可視領域センサの感知域の上限を超える強い光源を有する大都市域内の都市光強度の中央値を, その画素の25pt値から推定する手法を提案した. この手法によって得られる画像は, 特に大都市域内の都市光強度の違いをより鮮明に示しており, 人口分布の推定により適していることが明らかになった.

今回提案した手法の利点は, ある画素のある期間における見かけ上の中央値が飽和していても, その画素の DN 値の分布形状から, ゲインの外側に想定される本来の中央値を推定できる点である. 従来は, 観測値の飽和を避けるために, 米国空軍に依頼し, 特別なゲイン設定を要請する必要があった. 本研究で提案する手法は, 通常観測時に得られる画像から本来の DN 値の分布の代表値を得られるという点で意味が大きい.

著者らは, 小檜山ら(2001)¹¹⁾のDMSP夜間可視画像を用いた早期被害推定手法との組合せにより, 最終的には, 都市光分布時系列データを用いて, 災害発生前においては, 人口・建物棟数と言った災害リスク評価に必要なデータを推定し, 災害発生直後においては, 早期の被災地把握を行い, 災害復旧・復興期においては, その進捗状況をモニタリングする, グローバルに適用可能な災害情報収集支援システムの構築を目指している. 今回は, 1年分の画像をもとに各画素における DN 値の分布を求めたが, 仮に30日分の画像から, 各画素における DN 値の安定した分布が得られれば, 当該期間における見かけの中央値が飽和していたとしても, その25pt値から本来の中央値を推定することが可能となる. 30日分のデータセットを, 1日ずつずらしながら, 移動平均ならぬ「移動25pt値」を計算していくことにより, 観測値が飽和しがちな画素においても, 本来の中央値の時間変化を追うことが可能となる. このような技術は, 都市光強度の時間変化から, 都市部の災害の復興プロセスを追跡する上で不可欠である. そのような応用を可能にするには, 今後,

各画素の DN 値の安定した分布を得るのに何日分の画像が必要となるかを明らかにする必要がある.

謝辞

本研究遂行にあたり利用したDMSP/OLS Level 1データは, NOAA-NGDCより提供され, MAFFIN-SIDaBから配布されたものを利用した. また, DMSP/OLS Level 1データのジオロケーションには, 米国商務省海洋大気局地球物理データセンターから提供していただいたプログラムを利用させていただいた. ここに謝意を表す. また本研究の一部は, 科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))課題番号14380203および, 科学研究費補助金(特別研究員奨励費)受付番号10287によるものである.

補注

(1) $DN=0$ はデータが欠損していることを意味する.

(2)日によっては, 日本周辺領域全体を覆うのに十分な観測データが得られておらず, 一部領域のデータが欠落している日平均画像もあった. それでも, 日本周辺領域の各画素について, 1996年1年間の366日中の90%以上に相当する330~350日分のデータを得ることができた.

(3)本論文では, 都市光強度が強い場合の飽和に関してのみ分析の対象とし, 都市光強度が弱い場合の飽和に関しては議論の対象としていない. これは, 都市光強度が強い場合の飽和に比べ, 都市光強度が弱い場合の飽和の規模がはるかに小さいからである. 1996年1年間の中央値が1または2となった画素は存在せず, 中央値が3となった画素においても, $DN=1$ が出現した確率は, 12.1%である. それに比べ, 中央値が63となった画素において $DN=63$ が出現する確率は62.6%である.

(4)中央値 $M_c=63$ となる画素は, 真の中央値を推定する対象となる画素であるため, 図7内では表示していない.

(5)図9-11においては, 沖ノ島島, 硫黄島, 南鳥島を割愛した.

参考文献

- 1)高島正典, 林春男:地震被害ポテンシャル推定のためのDMSP夜間可視画像を用いた都市光分布の測定論モデル作成手法の提案—人口推定への適用—, 地域安全学会論文集, No.3, pp.101-108, 11, 2001.
- 2)高島正典, 林春男:DMSP夜間可視画像を用いた広域都市圏の同定と地震被害ポテンシャルの推定, 地域安全学会論文集, No4, pp.151-158, 11, 2002.
- 3)Welch, R:Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns From Satellite Data, Remote Sensing of Environment, Vol.9, pp.1-9, 1980
- 4)中山裕則 他:DMSP 全球夜間映像の作成と夜の光分布に関する地理学的考察, 日本リモートセンシング学会誌, Vol13, No.4, pp.1-14, 1993
- 5)Elvidge, C.D. et al.: Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption, International Journal of Remote Sensing, Vol.18, No.6, pp.1373-1379, 1997
- 6)Konami, T. et al.: Using nighttime DMSP/OLS images of Citylights

to Estimate District-level Population Distribution in Developing Countries, Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing, pp.Q21_1-6, 11, 1998

7)Elvidge, C.D. et al: Radiance Calibration of DMSP-OLS Low-Light Imaging Data of Human Settlement, Remote Sensing and Environment, Vol. 68, pp.77-88, 1999

8)Nakayama, M. and Elvidge, C.D.: Applying Newly Developed Calibrated Radiance DMSP/OLS Data for Estimation of Population, Proceedings of the 20 th Asian Conference on Remote Sensing, Vol.1, pp.289-293, 11, 1999.

9)Dobson, J E. et al.: LandScan: A Global Population Databases for Estimating Populations at Risk, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.66, No.7, pp.849-857, 7, 2000.

10) 総務庁,平成 7年国勢調査(その 1 及びその 2)地域メッシュ統計

11)小楢山雅之 他:DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システム (EDES) の時系列画像法を用いた推定精度の向上, 地域安全学会論文集, No.3, pp. 173-180, 11, 2001.

(原稿受付 2004. 5. 21)