

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—

Measurement Model of City Light Distribution for the Estimation of Earthquake Damage Potential using DMSP/OLS night-time imagery — Application for Population Estimation —

高島 正典¹, 林 春男²

Masasuke TAKASHIMA¹ and Haruo HAYASHI²

¹ 京都大学大学院 情報学研究科

Graduate School of Informatics, Kyoto University

² 京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

In this paper, we propose a method to estimate the distribution of Human Activity as the Earthquake Damage Potential using DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/ Optical Linescan System) night-time imagery which capture city lights reflecting extent of human activity, incidentally. Since original task of DMSP satellites is to monitor cloud distribution clearly, intensity and location of city light captured in night-time imagery are affected by various factors such as gain control along moon phase, clouds, lightening and noises. We propose a method to extract stable city light statistically using time-series data of night-time imagery and examine how the extracted city lights correspond to distribution of population as one of the damage potentials.

Key Words : DMSP/OLS, Earthquake Damage Assessment, Human Activity, Damage Potential

1. 研究の背景と目的

(1) 被害ポテンシャル推定手法の必要性

自然災害は、人間の営みと地震などの自然外力の重なり合いによって発生すると考えられる¹⁾²⁾。すなわち、災害発生前においては、人間の営みの存在自体が、潜在的な被害発生源 (Damage Potential : 被害ポテンシャル) であるといえる。被害推定・想定結果が妥当であるためには、自然外力と被害ポテンシャルを共に正確に把握する必要がある。しかし、従来の被害想定・推定手法の開発においては、自然外力をいかに詳細・正確に予測・把握するかに重点が置かれており、被害ポテンシャルのあり様を、詳細・正確に予測・把握するための方法論については、未発達である。例えば、地震外力については、JRのUrEDAS、東京ガスのSIGNAL、防災科学技術研究所のK-net/KiK-net、兵庫県フェニックス防災システム、横浜市リアルタイム地震防災システムなど、観測網を通じて、準リアルタイムに、地震外力の分布を推定し、また、さらに地震外力の情報を元に、建物被害、人的被害を推定する種々のシステムが存在する。しかし、その地震が発生したときに、被害ポテンシャルがどのような空間的分布を持っているのかを知るには、結局のところ、一定のタイムラグをかかえ、また、ある程度の時空間的広がりを集計単位とした社会・経済統計データに頼らざ

るを得ない。長谷川・翠川(1997)³⁾、長谷川・翠川(1999)⁴⁾による地域メッシュ統計を利用した構造・建築年代別建物棟数推定手法は、被害ポテンシャル分布推定の先駆的研究であるが、推定に用いる国勢調査及び事業所統計のメッシュ統計自体が、5年に一度、2年のタイムラグで更新・公表されている。よって、被害想定を行う場合最小で2年前、最大7年前のデータをもとに想定を行うことになる。Table 1は、社会・経済統計およびDMSP夜間可視画像の集計単位と更新頻度、公表までのタイムラグの関係を示したものである。一般に、社会・経済統計の集計単位と更新頻度、タイムラグとはトレードオフの関係にある。どれだけ自然外力の推定が精度良く行われていても、被害ポテンシャルについては集計単位の解像度が細かければデータの新鮮さを、またデータが新しければ、被害ポテンシャルの解像度の細かさをあきらめざるを得ない。よって、妥当な被害想定・推定結果を得るためには、被害ポテンシャルの現状をどれだけ高解像度かつ高頻度で把握するかが重要な課題である。

近年では、発展途上国においても、地震災害に対する被害想定が行われるようになってきている。1990年から10年間、国連が行ってきたRADIUSプロジェクトでは、近年、成長が著しい発展途上国の諸都市の地震災害リスクの軽減を目的として、バンドン(インドネシア)、ティファナ(メキシコ)等、世界の9つの都市における地震被害想定を行っている。しかし、自国の現状を把握する社

Table 1 社会・経済統計および DMSP 夜間可視画像の集計単位と更新頻度、公表までのタイムラグの関係

社会・経済統計	集計単位	更新頻度	タイムラグ
各都道府県・市区町村の統計年鑑・月報等	都道府県・市区町村	1ヶ月～2年	1ヶ月～2年
商業統計産業編(都道府県表)	都道府県	1年	1年
工業統計表(都道府県別表)	都道府県	1年	1年
商業統計産業編(市区町村表)	市区町村単位	1年	1年
工業統計表(市区町村表)	市区町村単位	1年	2年
商業統計メッシュ統計	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	3年	2年
工業統計メッシュ統計	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	2年または3年	3年
国勢調査メッシュ統計	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	5年	2年
事業所・企業統計調査	第3次地域メッシュ(約1kmメッシュ)	5年	2年
DMSP	約0.9kmメッシュ	1日	数時間～24時間

会・経済統計を整備できる国は、一部の先進国に限られており、被害想定をおこなう上で、いかにして正確で詳細な被害ポテンシャルの情報を集めるかが、発展途上国にとっても大きな課題となっている。

(2) DMSP 夜間可視画像を用いた被害ポテンシャルの推定

本研究では、被害想定に供する被害ポテンシャル情報のモニタリングを目的として、米国の軍事気象衛星 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) が日々捉える地表面夜間可視画像を利用して、被害ポテンシャルを推定することを考える。DMSP 夜間可視画像の本来の目的は、米軍へ気象情報を提供するため、夜間月光に照らされる雲の分布を捕捉することである。Croft(1978)⁹⁾は、この夜間可視画像に、都市の灯り、焼畑の炎、イカ釣り漁船の誘魚灯といった、人間の営み(Human Activity)を源とする光が映っていることを指摘し、人間の営みの分布を捉える手段の一つとして、DMSP 夜間可視画像の利用可能性を示唆した。その後、Welch(1980)⁹⁾、中山他(1993)⁷⁾、Elvidge et al.(1997)⁹⁾、Konami et al.(1998)⁹⁾、Elvidge et al.(1999)¹⁰⁾、Nakayama and Elvidge(1999)¹¹⁾らが、DMSP 夜間可視画像からの都市光の抽出を試みるとともに、抽出された都市光分布と人口、GDP、電力消費量との関係を分析し、それらの間に強い相関関係があることを明らかにしている。Table1の最下段にDMSP衛星の観測頻度、観測解像度を示すが、DMSP 夜間可視画像から抽出される都市光とこれらの社会・経済統計の間に有意な関係があるのであれば、従来にない高頻度かつ高解像度でグローバルに地域の社会・経済情報を得ることが期待でき、社会・経済統計の整備の遅れている地域にも被害想定を機会をもたらすことにつながる。

(3) DMSP 夜間可視画像からの都市光の抽出

しかし、DMSP衛星は夜間月光に照らされる雲の分布を鮮明に捉えるのに必要十分な設計しかなされておらず、都市光を正確に補足するために必要な観測条件の統制はされていない。その結果個々の画像中で、都市光と考えられる光源は、異なる観測条件のもとで得られたものであり、必ずしも真の都市光強度を捉えたものではない。この問題に対し既存の都市光抽出手法では、数多くの観測値の中から良好な観測状況のもとで得られたと考えられる観測値を選定し、その観測値の中から定常的に存在する光源を都市光として推定している。しかし、真の都市光強度の分布データは現時点では存在しないため、どの観測値が良好な観測状況下で得られたものかを検証することは不可能であり、「良好な観測状況下での観測値

の選定」自体が1つの推定作業となってしまう。その結果、「都市光推定に用いるべきと推定された観測値を用いて都市光を推定する」という冗長な推定プロセスとなっている。さらには、妥当性が検証できない選定手法によって、都市光推定値をかたよらせる危険もはらんでいる。

(4) 本研究の目的

本研究では、まず(3)に指摘した問題に対して、測定論に基づき、観測値を選定することなく、むしろ大量の観測値を用いることで、観測条件の違いをキャンセルアウトし、真の都市光分布に迫るアプローチを提案する。さらに提案したアプローチによって作成される都市光分布モデルを用いたグローバルな地震被害ポテンシャルの推定可能性の検証の第一歩として、各種メッシュデータが整備されている日本を対象として、推定された都市光分布と死傷者数、避難者・り災者数の推定に不可欠な人口との関係を第3次地域メッシュ単位で検証する。

2. DMSP 夜間可視画像とは

(1) DMSP 衛星の概要

DMSP 夜間可視画像は本来、米空軍への気象情報の提供のため、全地球の雲の分布を把握することを目的としている。そのため、センサーやセンサーを搭載するプラットフォームの設計もそれに即したものになっている。現在は、F-12, 13, 14, 15と名付けられた4つのプラットフォームが観測を行っている。F-12, 14, 15は夜と昼、F-13は朝と夕方に中緯度地帯を観測している。F12, 14は夜9時、F15は夜10時に中緯度地帯を観測する。各プラットフォームは高度約850kmの極軌道上を1周102分の速さで運動しており、1日2回同一地点の観測が可能となっている。OLSは近赤外から可視領域(VNIR band: 0.5~0.9 μ m)と、熱赤外領域(TIR band: 10~13 μ m)の2つの電磁波領域を捉えることが出来る。走査の幅Swath(刈り幅)は約3000kmである。観測に際し、観測画像の1ピクセルの空間的な大きさGSD(Ground Sample Distance)として、0.55km(Fine)メッシュと2.7km(Smooth)メッシュの2つを選択することができる。通常は、2.7kmモードで観測される。走査は、衛星軌道に対し、直角方向に行われる。DMSPが捉えてきたデータは米国商務省海洋大気局地球物理データセンター(NOAA/National Geophysical Data Center)において、1972年から20年間分はフィルムで、それ以降はデジタルデータで保管されている。

(2) 夜間可視画像の特徴

VNIR 画像のうち夜間撮影されたものが、本論文中でいう夜間可視画像である。夜間月光に照らされる雲の姿を捕捉するため、PMT(Photo-Multiplier Tube: 光電子倍增管)が搭載され、夜間の撮影に用いられる。これにより、より小さな放射強度(最低 10^{-9} watts/cm²/sr/μm まで)をも捕捉することが可能である。

VNIR センサーはあらゆる強さの光を捕捉できるわけではない。Fig.1に示めされるように、設定されたゲインに収まる光の強度に対し 0~63 の整数値(以後 DN; Digital Number とする)が与えられ、ゲインよりも大きな光の強度には 63、ゲインよりも小さな光の強度には 0 が与えられる。VNIR センサーの本来の目的は、月光を反射する雲の分布を捉えることである。月齢に伴って月光の強さは変化するので、新月期においても雲の像を常に鮮明に捉えるために、Fig.2に示すような月齢に伴う自動的なゲインの調節が行われる。そのため、新月期には、都市中心部などで光の観測値が DN=63 に飽和してしまう傾向がある。また、ある地点の恒常的な光源を、ゲインの異なる 2 時点において撮影すれば、異なる DN 値で記録されることになる。ゲイン設定の変更は米空軍のみおこなうことができる。

3. 測定論に基づく都市光抽出手法の提案

(1) 都市光観測データとしての DMSP 夜間可視画像

夜間可視画像を用いて、夜の地球の全球モデルを作ろうとする試みは、フィルムデータの時代から行われてき

た。最初は、単純なフィルムのモザイクであったが、Elvidge らは、デジタルデータを活用して、1997年に都市光の出現頻度分布を示す“Stable Light(World at Night)”, 1999年に都市光の物理的な強さ(放射強度)の分布“Radiance Calibrated City Light(以下 RCCL)”を作成した(Fig.3)。

ここで、問題となるのが都市光の抽出方法である。DMSP 夜間可視画像には地表面上に存在するさまざまな光源をさまざまな観測条件のもとで捕捉している。捕捉

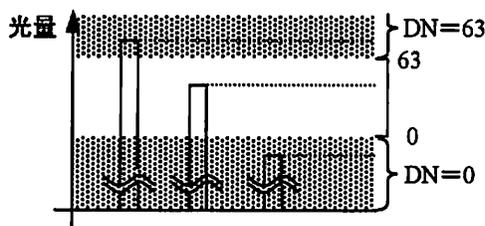


Fig.1 VNIR センサーのゲインのしくみ

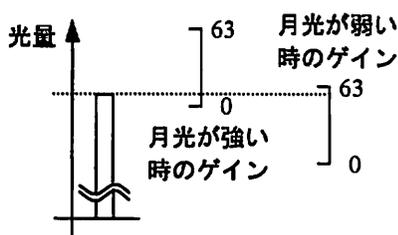


Fig.2 VNIR センサーの月齢に伴うゲイン調整



Fig.3 Elvidge(1999)らが作成した Radiance Calibrated City Light における日本周辺の画像(1996年3月及び、1997年1,2月の画像から作成)



Fig.4 2000年の日本周辺の都市光分布の測定論モデル(2000年1年間の観測画像から作成)

される光源としては都市光、焼畑、森林火災、誘魚灯、雷といったそれ自体が光を放っている直接光源と、月光を反射する雲、水面のさざなみ、地面といったそれ自体は光を放射せず、別の光源の光を反射している間接光源がある。1枚のVNIR画像の中で都市光と他の光源を弁別することは非常に難しい。

一方、観測条件の変動要因は大きく技術的要因と自然・気象要因にわけることができる。

技術的要因とは、DMSP衛星のセンサーの機能、軌道といった観測機構に起因する観測条件の変動要因である。まず、2(2)でも述べたように、月齢や月の高度に合わせて、ゲインが調節されるため、見かけ上都市光が増減したように見える場合が考えられる。また、ゲイン設定が高くなると、拾われるノイズも増えるため、小規模の都市と紛らわしい光源が増える。また、衛星は地表面を進行方向と直交方向に走査するため、衛星直下から離れるほど、有効瞬間視野(EIFOV: Effective Instantaneous Field of View)が大きくなる。よって、仮に光源が均等に分布している場合、衛星直下から離れた観測点ほど1ピクセルに含まれる光源の数も多くなる。太陽と衛星の位置関係によって、太陽光が衛星の機体の一部に反射してセンサーに入射し、きわめて強い光が観測されるグレアという現象も発生する。また、何らかの要因で、1本以上の走査線のデータが欠落することもある。その他衛星の姿勢・軌道の揺らぎも光の観測強度・位置に影響を与える。

大気・気象要因とは、大気や気象に起因する観測条件の変動要因である。衛星の直下と走査線の両端では、光が

透過してくる大気厚が異なるので、大気によって光が散乱・吸収される程度も異なる。また、厚い雲は観測されるはずの都市光を遮ってしまう。一方薄い雲は、都市光を散乱させ、都市光を減衰させると共に、都市の大きさを見かけ上大きく見せてしまう。都市光の雲による散乱を走査線の両端付近で捉えた場合には、見かけ上、衛星直下から遠方側に都市が動いたように見える。

このように、DMSP画像は都市光を含むさまざまな光源をさまざまな観測条件下で捕捉しており、その中からどのように真の都市光強度を推定するかが問題となる。

(2) 既存の都市光分布モデルとその問題点

この問題に対し、ElvidgeらによるRCCLの作成は、まず米国空軍に依頼し一定期間ゲインの調節を固定して観測を行い、得られた画像からグレア・欠損した走査線のデータ・雲・ノイズと考えられるものを除去し、除去後の画像の平均値をとるという工程で行われている。しかし、真の直接光源の分布がない限り、除去した雲・ノイズが本当に、雲・ノイズであったのかは検証できない。その意味で、Elvidgeらの手法は、検証できない雲・ノイズの除去手法を用いて都市光推定に利用すべき観測値を推定し、選択された観測値を用いて、都市光を推定するという冗長な推定プロセスとなっているといえる。また、妥当性を検証できない手法に基づいて都市光推定に用いる観測値を選定しているため、得られた都市光推定値はバイアスがかかっている恐れがある。その他、ゲインが固定されていない過去の資源を活かせないといった問題もある。

(3) 都市光分布の測定論的モデル

そこで、筆者は、測定論の考え方にに基づき、長期間にさまざまな観測条件下で撮影された大量の画像をもちいることで、観測条件の違いをキャンセルアウトし、かつ安定した光源、すなわち都市光に迫ることを考えた。池田(1971)¹²⁾では測定値 X を、真の特性値 (真値) T と測定誤差 E の和として、次式のように定義している。

$$X = T + E \quad [1]$$

ここで、 E は偶然誤差であり、ある一つの対象を繰り返し測定した場合、 E の平均は 0 となる。よって、ある一つの対象を繰り返し測定して得られた測定値の平均 μ_X は真値の平均 μ_T に等しくなる。

$$\mu_X = \mu_T \quad [2]$$

さて、3(1)で述べた観測条件の変動要因は、その変動特性から大きく 1)周期変動要因と 2)不規則変動要因の 2つに分けられる。技術的要因のほとんどは、衛星の軌道¹³⁾、月・太陽の動き、走査動作、といった周期的に変化するものによって規定されているため周期変動要因として考えることができる。また、ノイズや走査線の欠落は全くランダムに現れるものであるため、不規則変動要因として考えられる。自然・気象要因は、気象にまつわる要因であるため、大域的には周期変動をすると考えられる。ただ、局所的に、ある地点を、どの程度の厚さの雲が覆うか、あるいはどの地点で雷が発生するかはランダムな事象と考えられる。よって、自然・気象要因は、周期変動と不規則変動が複合したものとして考えられる。このように光源の観測条件に影響を与える要因のほとんどは、周期変動か不規則変動をするものと考えられる。よって、DMSP 画像に捉えられる光の観測値は、1)都市光のような安定した光源、2)月光を反射する雪などの周期的に現れる光源、3)月光を反射する雲、水面のさざなみ、漁船団、焼畑、雷といった不規則に現れる光源、4)周期的な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分、5)不規則な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分の和として下記のようにあらわされる。

$$X_{k,t} = T_{k,t} + L_{C,k,t} + L_{R,k,t} + C_{k,t} + R_{k,t} \quad [3]$$

$X_{k,t}$: 時点 t , 地点 k の観測値

$T_{k,t}$: 定常的に存在する光源

$L_{C,k,t}$: 周期的にあらわれる光源

$L_{R,k,t}$: 不規則にあらわれる光源

$C_{k,t}$: 周期的な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分

$R_{k,t}$: 不規則な観測条件の変化に伴う観測値の変動成分

ここで、 $L_{R,k,t}$, $R_{k,t}$ は(1)式における偶然誤差に相当する。また、 $L_{C,k,t}$, $C_{k,t}$ についても 1 変動周期分の変動の平均は 0 となる。よって、同じ地点の観測値を周期変動の周期の倍数分重ね合わせ平均をとることで、 $L_{R,k,t}$, $R_{k,t}$, $L_{C,k,t}$, $C_{k,t}$ はキャンセルアウトされ、[1]式同様、観測値の平均値を定常的に存在する光源(都市光)の平均値とみなせるようになる。

本論文では以上のような手法で推定された都市光分布を、測定論モデルと呼ぶことにする。

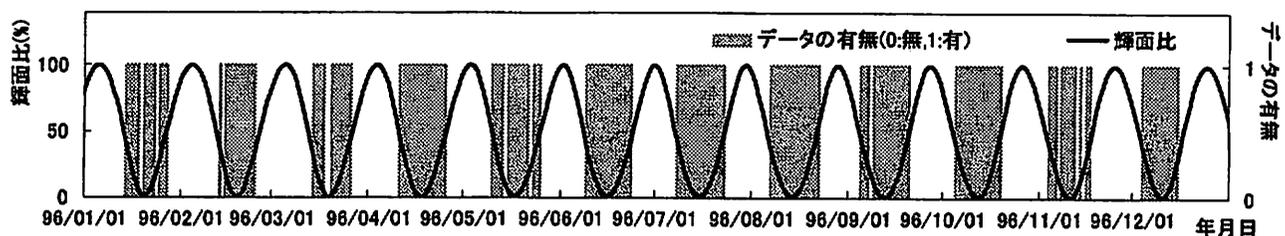


Fig.6 SIDA Bにおける1996年のF12が観測した夜間可視画像の整備状況と月の輝面比との関係

(4) Japan at Night 2000

Fig.4はこのような測定論モデルの考え方にに基づき、F14 が観測した 2000 年の 1 年間の観測画像を重ね合わせて作成した日本の夜の都市光分布モデル (Japan at Night 2000) である。測定論モデルでは特に雲やノイズの除去を行っていないが、RCCL と同様に鮮明な都市光分布が得られている。周期変動成分の変動周期は、月・太陽の運動、DMSP 衛星の運動に規定されるものであるため、1 年間の画像の平均をとることにより、周期変動成分もキャンセルアウトできる。Fig.5に、2000 年における 1 月～n 月までの観測画像の平均画像と 1 月～n-1 月までの観測画像の平均画像の差分の標準偏差を示す。利用する観測画像を増やすことにより、画像が安定してくることがわかる。

4. 測定論モデルと RCCL の比較

本研究で提案する測定論モデルと Elvidge らの提案する RCCL とを比較する。Elvidge et al.(1999)の RCCL は、F12 によって撮影された 1996 年 3 月及び、1997 年 1, 2 月の夜間可視画像をもとに作成されている¹⁴⁾。そこで、比較のために測定論モデルも F12 によって観測された 1996 年のデータをもとに作成した。データは農林水産省農学情報支援システム (AGROPEDIA; http://rms1.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/menu_ja.html) / 農林水産衛星画像データベースシステム (SIDaB) にデータベース化されている DMSP 夜間可視画像データを用いた。ただし、SIDaB には 1998 年以前の夜間可視画像は一部しか整備されていない。1996 年の場合 SIDaB にデータが存在するのは、365 日中 162 日分のデータであったため、その全データを用いた。Fig.6は SIDaB における 1996 年に F12 が撮影した夜間可視画像の整備状況と月の輝面比 (満月を 1.0, 新月を 0.0 とした時の月の輝いている部分の割合) の関係を示したものである。Fig.7 より利用したデータは、新月期に一致していることがわかる。新月期

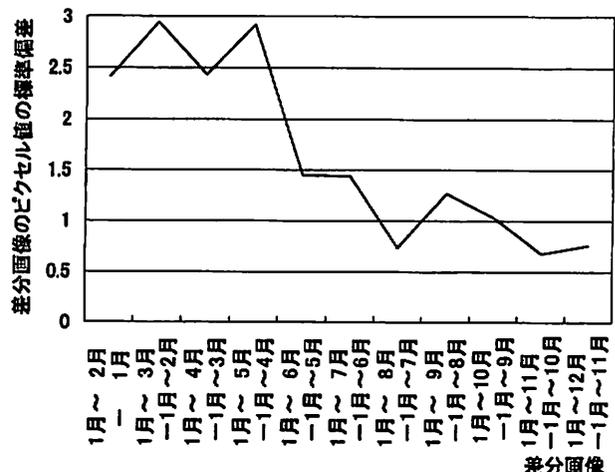


Fig.5 2000 年における 1 月～n 月までの観測画像の平均画像と 1 月～n-1 月までの観測画像の平均画像の差分画像の標準偏差



Fig.7 1996年の日本周辺の都市光分布の測定論モデル

は、ゲインが最大になっているため、特に大都市の中心部の観測値が飽和してしまっている可能性が高いことに注意する必要がある。

Fig.7に1996年の画像を用いた都市光分布の測定論モデルを示す。ここでもJapan at Night 2000同様、鮮明な都市光分布が得られている。Fig.8は測定論モデルとRCCLにおける都市光の強さの関係を示したものである。両者はほぼ単調増加の関係にあり、RCCLと測定論モデルの都市光の強弱関係はおおよそ一致していると考えられる。

5. 都市光分布と人口分布との対応の検証

損害保険料率算定会(1998)¹³⁾によれば、47都道府県12政令指定都市中、37都道府県8政令市の地震被害想定で死傷者数が、32都道府県7政令市で避難者数・り災者数が推定されている。これら死傷者数、避難者・り災者数の推定において、当該地域の人口の情報は必要不可欠と考えられる。そこで、本研究で提案する都市光分布の測定論モデルとRCCLが、被害ポテンシャルを推定する上でどの程度の能力を持つかを検証するため、日本全国を対象に第3次標準地域メッシュ単位で人口と都市光強度との関係を分析した。人口データとしては、1996年直近の平成7年国勢調査結果¹⁴⁾を用いた。第3次標準地域メッシュの大きさは、30"×45"、測定論モデルに基づく都

市光分布、RCCLの1ピクセルの大きさは、30"×30"と異なるが、ここでは、都市光モデルの方を3次メッシュにリサンプリングし^{補註3)}、人口との照合を行った。3次メッシュにリサンプリングすることで同じく3次メッシュで管理されている国勢調査、事業所統計、工業統計、商業統計といった大規模かつ解像度の高い社会統計データとの関係の検証が容易となる。また、地震外力を推定する際には表層地質・地形による地震動の増幅率の違いを考慮する必要があるが、国土数値情報の3次メッシュ単位の地形・地質情報を利用することが可能となる。

Fig.9、Fig.10はそれぞれ測定論モデルに基づく1996年の都市光分布およびRCCLと人口との関係を示したものである。データの分布状況を明らかにするため、各都市光強度における人口分布の5%値、25%値、中央値(50%値)、75%値、95%値のそれぞれを結んだ曲線で分布を代表させた。人口データは国勢調査に基づくものであるので、今回の照合は、居住地ベースでの人口分布と光の分布を比較していることになる。2つの画像のピクセル値は異なる範囲の値をとりうるので各画像のピクセル値の最大値、最小値を用いて標準化してある^{補註4)}。測定論モデルにもとづく都市光分布、RCCL共に光が強くなるほど人口のばらつきが大きくなっている。都市の中心部には住宅だけでなく、商業・業務用地、工業用地も集中しており、それらが夜間まで活動していることから考えても、人が住んでいないにも関わらず光が強いということは自然な結果といえる。

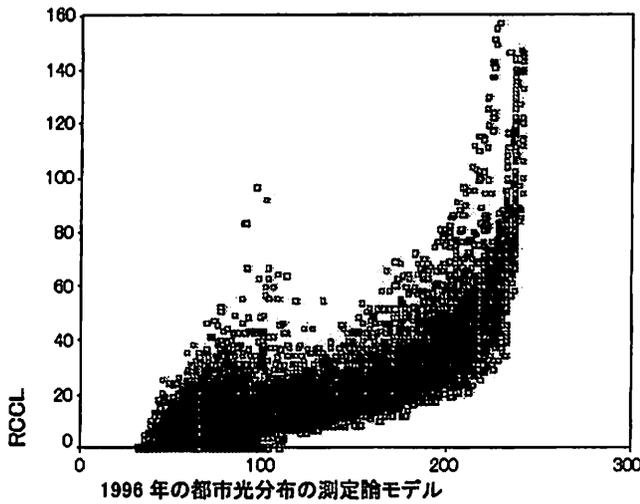


Fig.8 1996年の日本周辺の都市光分布の測定論モデルとRCCLにおける都市光の強さの関係

1996年の都市光分布の測定論モデルとRCCLでは、人口分布との間の関係が大きく異なる。この違いが1996年の都市光分布の測定論モデルの作成に用いた観測画像が新月期に偏っていることによるものか、あるいは都市光分布モデルの作成手法の違いによるものかを検証するため、SIDaB内に1年にわたって整っている2000年の観測画像を用いて2000年の都市光分布の測定論モデルを作成し、平成7年の人口分布との比較を行った。2000年の測定論モデルと人口との関係を示したものがFig.11である。2000年の測定論モデルと人口との関係は、1996年の測定論モデルと人口との関係に似ている。このことから1996年の都市光分布の測定論モデルとRCCLの間の人口分布との関係の違いは、都市光分布モデルの作成手法の違いによるものと考えられる。

標準化されたピクセル値で0.0~0.9の範囲では、ピクセル値に対する人口のばらつきが測定論モデルの方が小さい。標準化されたピクセル値が0.9以上の範囲では、RCCLの方が人口のばらつきが小さくなるものの、RCCLのように作成にあたり、米軍の協力を必要とせず、任意の期間の都市光分布の作成が可能であり、手法がシンプルであることも考え合わせると、人口を継続的に推定することを考えた場合には、測定論モデルの方が、優れていると考えられる。都市光が強くなるほど、人口のばらつきは大きくなる傾向があるが、各%値点の回帰曲線を得ることにより、ある光の強さが確認できた場合に、そこに存在しうる最大人口を確率的に表現することはできる。モデルとして累乗関数を仮定し、各%値点の回帰曲線を推定した結果次のような結果が得られた。

- 95%値点: $POP_{95} = 0.1552 \cdot DN^{2.1429} + 1.0$ ($r^2=0.97$) [4-a]
 - 75%値点: $POP_{75} = 0.9172 \cdot DN^{2.586} + 1.0$ ($r^2=0.92$) [4-b]
 - 中央値点: $POP_{50} = 0.0006 \cdot DN^{2.8331} + 1.0$ ($r^2=0.80$) [4-c]
 - 25%値点: $POP_{25} = 0.0005 \cdot DN^{2.4711} + 1.0$ ($r^2=0.56$) [4-d]
 - 5%値点: $POP_5 = 0.2978 \cdot DN^{0.2978} + 1.0$ ($r^2=0.06$) [4-e]
- DN: 測定論モデルに基づく都市光強度
 POP_x: 各DNにおけるx%値点の人口

これらの式を用いることにより、ある光の強さが確認される3次メッシュの最大人口を確率的に推定できる。

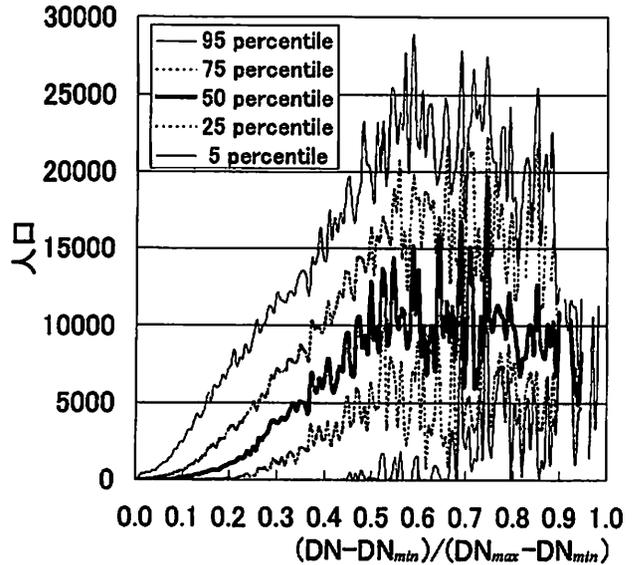


Fig.9 日本全体を対象とした3次メッシュ単位でのRCCLと居住人口との関係

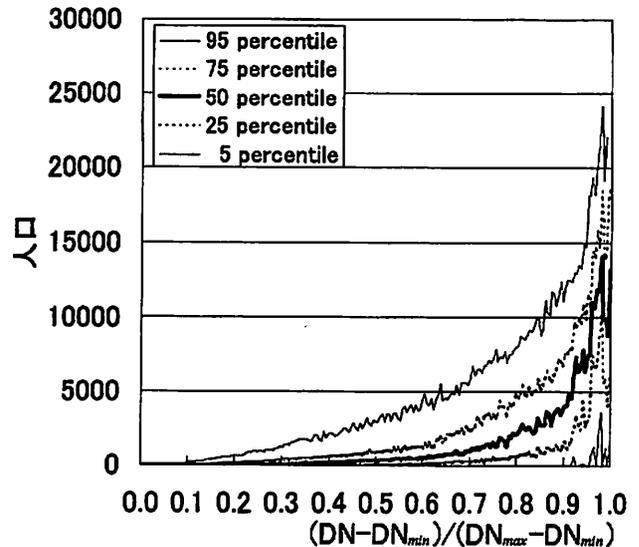


Fig.10 日本全体を対象とした3次メッシュ単位での1996年の都市光分布の測定論モデルと居住人口との関係

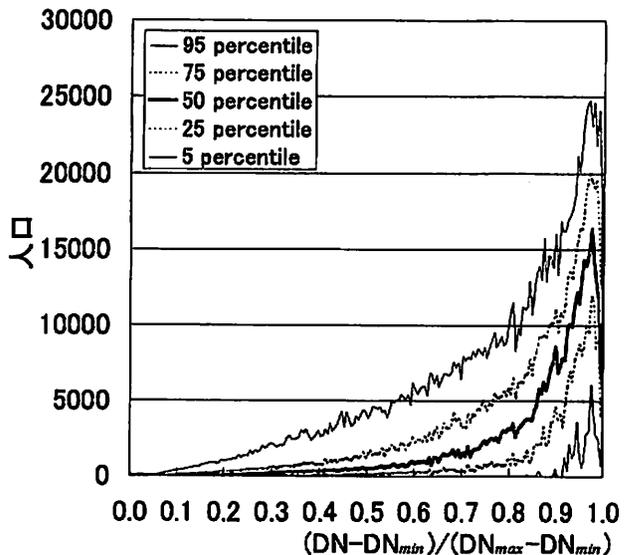


Fig.11 日本全体を対象とした3次メッシュ単位での2000年の都市光分布の測定論モデルと居住人口との関係

6. 今後の課題

本論文では、既存の DMSP 夜間可視画像からの都市光抽出手法の課題を整理するとともに、測定論に基づく都市光抽出手法（測定論モデル）を提案した。さらに測定論モデルに基づく都市光分布と RCCL の居住人口との対応関係を 3 次メッシュ単位で検証した。都市光の強度には、居住人口だけでなく、事業所数、土地利用構成といった、都市のさまざまな属性が関連しているものと考えられる。今後は、事業所統計、工業統計、商業統計、10m メッシュ土地利用といった居住人口以外のメッシュ統計との対応関係を検証し、ある都市光強度がどのような都市の構造を意味するのか分析を進めていく必要がある。

謝辞

本研究遂行にあたっては農林水産省農学情報支援システム(AGROPEDIA)農林水産衛星画像データベースシステム(SIDaB)の DMSP/OLSL Level 1 データを利用させていただいた。また、DMSP/OLSL 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^{補注(5)}を利用させていただいた。ここに謝意を表す。

補注

(1)ただし、地球上のある地点が常に衛星直下で観測される、あるいは常に走査線端部で観測されるということはない。たとえば、DMSP 衛星が地表面上のある地点 P を夜間のある時点 t において衛星直下で観測したとする。DMSP 衛星は太陽同期極軌道を 102 分で 1 周、24 時間で 14.118 周するので、地球がちょうど 1 回自転した時には DMSP 衛星は地点 P の直上に存在せず、地点 P は少なくとも時点 t から数えて 14 周目の走査線の西側か 15 周目の走査線の東側のいずれかで観測される。このように、地球の自転周期が DMSP 衛星の軌道周期の倍数となっていないため、地表面上のある地点から見ると DMSP 衛星の軌道は東西方向に日ごとにずれていく。すなわち、地表面上のある地点に対する衛星からの視野角も周期的に変化することになる。

(2)RCCL は、1996 年 3 月 19~24 日、1997 年 1 月 6~14 日、同年 2 月 3 日~12 日の計 25 日分のデータから作成された。

(3)第 3 次標準地域メッシュと都市光分布の測定論モデルおよび RCCL のグリッドの位置関係を Fig.12 に示す。図中太線が 3 次メッシュ、細線が都市光分布のグリッドを表す。3 次メッシュ A の光強度 DN_A は都市光分布グリッド 1, 2, 3, 4 の光強度 DN_1, DN_2, DN_3, DN_4 を用いて次式のように計算した。

$$DN_A = 0.25 \cdot DN_1 + 0.5 \cdot DN_2 + 0.25 \cdot DN_3 + 0.5 \cdot DN_4 \quad [5]$$

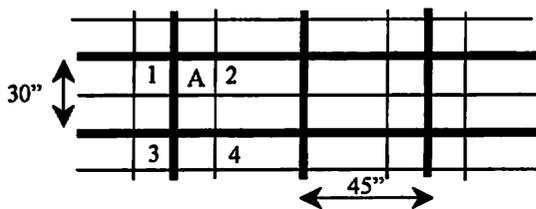


Fig.12 第 3 次標準地域メッシュと都市光分布のグリッドの位置関係

(4)RCCL の各ピクセルの値は下式によって物理的な光の強度（放射輝度）に変換が可能な値である。

$$R = DN^{1.5} \times 10^{-10} \text{ (watts/cm}^2\text{/sr/}\mu\text{m)} \quad [6]$$

R:放射輝度, DN:RCCL のピクセル値

一方我々の提案する測定論モデルの各ピクセルの値は、さまざまな観測条件下で撮影された画像の平均値であるため、光の強

度の相対値となっている。よって 2 つの画像においてピクセル値が等しくとも、物理的な光の強度が等しいとは限らない。また、2 つの画像でピクセル値の取りうる値の範囲も異なる。Fig.9, 10, 11 中のグラフの横軸には、各画像のピクセル値を下式によって 0.0~1.0 に標準化した値を用いた。

$$S = (DN - DN_{\min}) / (DN_{\max} - DN_{\min}) \quad [7]$$

S:標準化された値, DN:各画像のピクセル値, DN_{\max} :各画像のピクセル値の最大値, DN_{\min} :各画像のピクセル値の最小値

(5)NOAA/NGDC では、DMSP/OLS 画像を衛星軌道・高度、センサーの角度、海表面モデルと地表面標高データから測地情報を計算し、1 ピクセル 30 秒角(約 0.9km×約 0.9km)のメッシュに最近隣内挿法によってリサンプリングし、データ提供を行っている。本研究では、この NGDC のジオロケーション・プログラムを提供していただき、SIDaB から提供していただいた DMSP/OLS Level1 データのジオロケーションに利用している。NGDC のアルゴリズムによるジオロケーションの精度は、F12 によって観測された画像で、±1 ピクセル、F14 の場合で、数ピクセルであることが報告されている(Elvidge et al. (1995)¹⁵⁾、小倉山他 (2001)¹⁶⁾。

参考文献

¹⁾Piers Blaikie et al.: At Risk, Natural Hazards, People's vulnerability, and disasters, pp.23, Routledge,1994.

²⁾太田裕:強震動情報と地震防災,地震,pp.113-136,第 47 巻,1994.

³⁾長谷川浩一・翠川三郎:地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測-その 1 建築年代別の木造建築物棟数の推定-,日本建築学会構造系論文集,No.494,pp.75-80,1997.

⁴⁾長谷川浩一・翠川三郎:地域メッシュ統計を利用した広域での非木造建築物群の震害予測,日本建築学会構造系論文集,No.521,pp.41-47,1999.

⁵⁾Croft, T: Nighttime Images of the Earth from Space, Scientific American, Vol. 239, No.1, pp.68-79,1978.

⁶⁾Welch, R:Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns From Satellite Data, Remote Sensing of Environment, Vol.9, pp.1-9, 1980.

⁷⁾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.

⁸⁾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

⁹⁾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.

¹⁰⁾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.

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

¹²⁾池田夫:行動科学の方法, pp.134-137,東京大学出版会,1971.

¹³⁾損害保険料率算定会:地震被害想定資料集,地震保険調査報告 28, pp.4-51-52, 1998.

¹⁴⁾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.

¹⁵⁾Elvidge, C. D et al.: Algorithm for the Retrieval of Fire Pixels from DMSP Operational Linescan System Data, Biomass Burning and Global Change - Remote Sensing, Modeling and Inventory Development, and Biomass Burning in Africa-, Vol. 1, pp.74-85, MIT Press, 1995.

¹⁶⁾小倉山雅之 他:DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた早期被災地推定システムの開発, EDM Technical Report No.10, 理化学研究所地震防災フロンティア研究センター, 2001.

(原稿受付 2001/6/11)