

DMSP/OLSによる「街の灯り」のセンサス

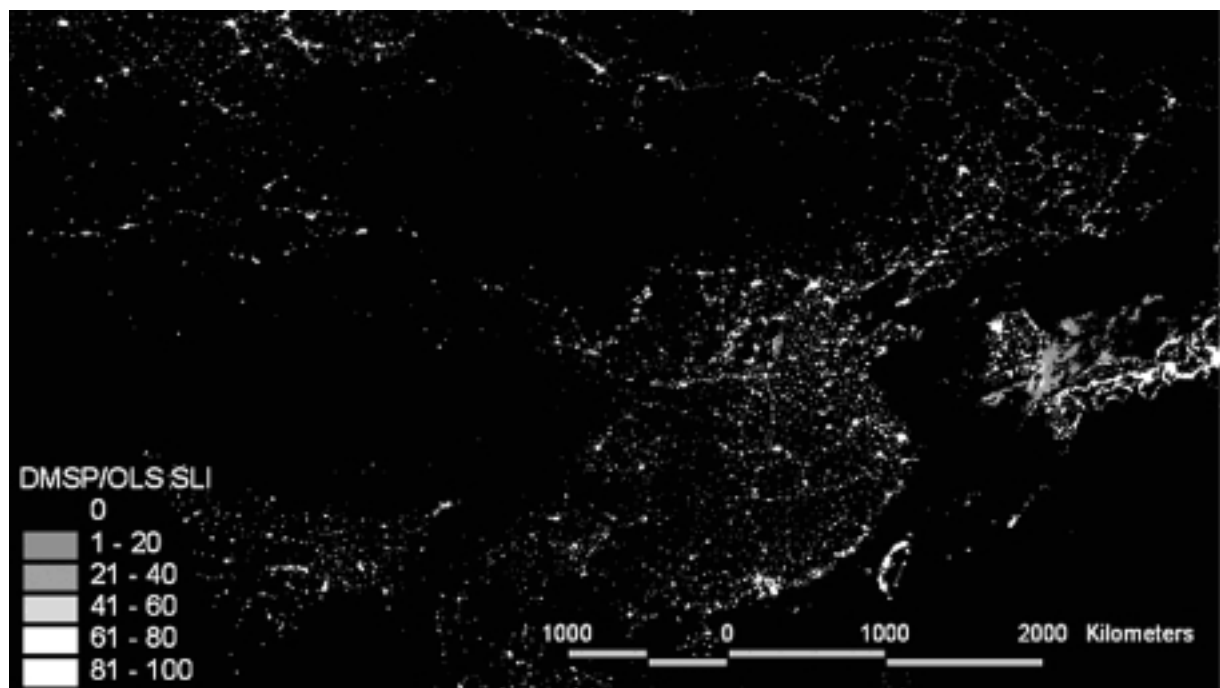
夜間地上光画像による人間活動強度の推定をめぐって

中 谷 友 樹

はじめに

DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) はアメリカ合衆国国防省によって推進されている、衛星による地表面付近の環境モニタリング事業である。DMSP衛星の多くには複数のセンサが搭載されているが、その中でもOLS (Operational Linescan System) は、夜間の地上光が観測できるユニークな光学センサである。OLSによって得られる夜間の可視 - 近赤外画像には、月光や雷光を反射する雲、都市や工業地帯の照明、ガス田の炎、漁火、山火事など地表面付近の様々な光が鮮やかに映し出される¹⁾。とくに安定した光を指標化することで、都市域の拡大²⁾、人口分布面の推計³⁾、エネルギー消費量・GDPの推計⁴⁾など、人口・経済指標の推定が試みられてきた。第1図は、地上光の安定度を示す代表的な合成画像DMSP/OLS Stable Light Image (SLI) の東アジア地域の画像である。

本稿の目的は、DMSP/OLS夜間地上光画像データに基づく「街の灯り」から人口・経済指標を推定・モニタリングするアプローチの展望にある。今日では、LANDSATのような地球資源探査衛星によって、高解像度な土地被覆の分類を行い、人間活動の面的な展開を把握できるようになった。しかし、多バンドの画像に基づいた土地被覆分類による土地利用域推定のアプローチと異なり、夜



第1図 東アジア地域のDMSP/OLS Stable Light Image (1994 - 1995年)

間地上光画像データは、光の強度を表わす1バンドの画像によって、人間活動の面的広がり・強度を推定できる。その意味で、夜間地上光画像は、地表面上の人為的な活動強度を把握する、より単純で直接的なアプローチを導くことができる。以下、本稿ではDMSP/OLSの基本的な性能を解説するとともに、夜間地上光画像を利用した人口・経済指標の推計に関するモデル化の方法論とその応用について整理する。

・ DMSP/OLSの基本性能

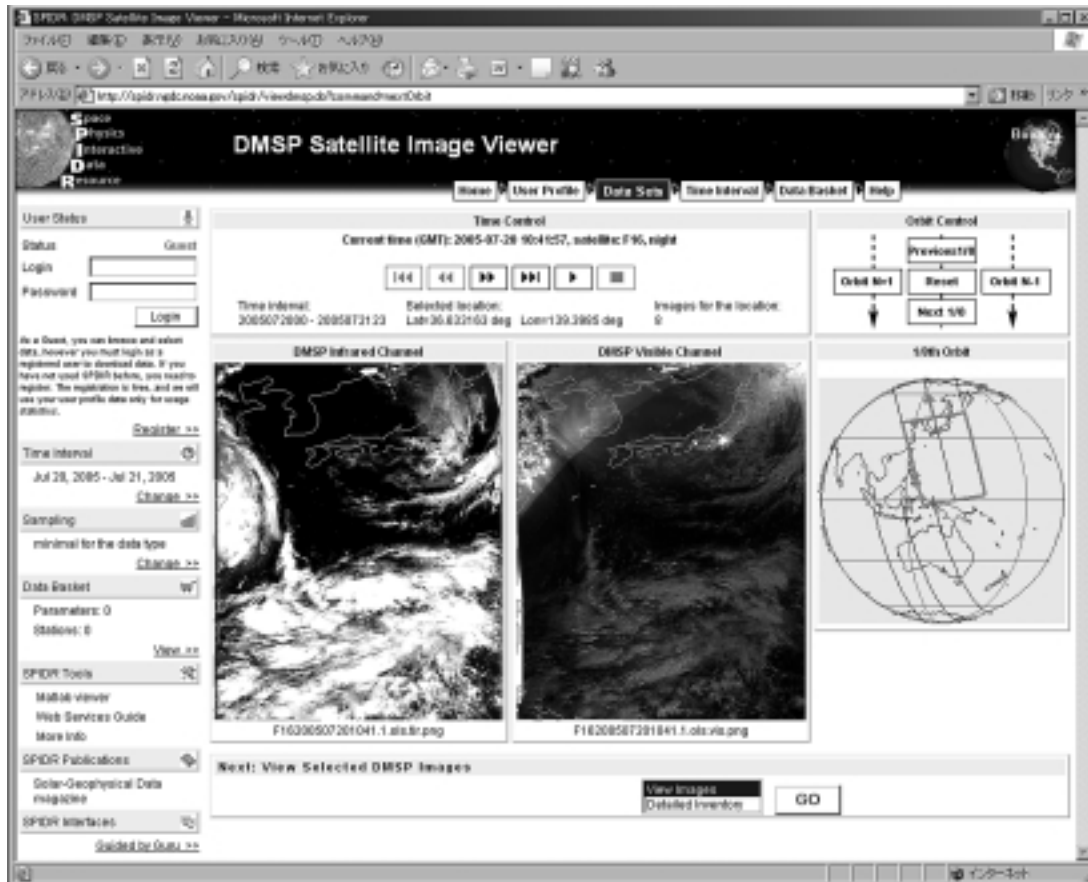
DMSPは、米国国防省および米国空軍気象部によって運営されており、当初DAPP(Data Acquisition and Processing Program)として知られていた⁵⁾。この衛星事業は1965年の7月に開始され、1972年12月からNOAAを通じた民間利用が可能となった。光学センサOLSは1976年から運用されている。DMSP衛星は、およそ830kmの高度を飛行し、観測幅はおよそ3000km、6時間ごとに観測範囲は全球におよび、同一地点について1日2回(日中および夜間)の観測が可能である。現在までに16機のDMSP衛星が打ち上げられ、2005年10月の時点ではF13からF16の4機が稼働している。

OLSは本来、空軍を中心とする軍事活動の支援を目的とした、雲の分布および雲頂温度の観測を意図したセンサであり、波長0.4~1.10 μm の可視近赤外と10.5~12.6 μm の熱赤外の電磁波を感知する8インチの望遠鏡に加え、夜間観測用の0.47~0.95 μm の可視近赤外の電磁波を感知するPMT(photo multiplier tube)を備えている。PMTは月あかりに反射する雲の観測が行えるよう、極めて弱い光(10^{-9} Watts cm^{-2} sr^{-1} μm^{-1})の補足が可能ないように製作された、極めて高感度な光学センサである。この特性によって、OLS-PMTは、夜間の地上に存在する様々な光を観測できることになる。たとえ観測する波長帯が同じ可視および可視近赤外であっても、LANDSATなど代表的な地球資源探査衛星の光学センサでは、感度が弱いために十分な夜間の地上光を観測できない。Sullivan III⁶⁾によれば、LANDSATではニューヨーク市の灯りも観測できないという。Elvidge et al.⁷⁾はLANDSAT TMなど他の衛星センサとの感度の比較を行っている。

OLSの地上分解能には二つのモードがあり、昼間では局地観測用のfine resolution(0.6km)と、広範囲観測用のsmoothed resolution(2.8km)が利用可能だが、夜間のPMTの観測ではsmoothed resolutionと同等の2.8km解像度に限定される。なお、これらDMSP/OLSの性能については、主としてKramer⁸⁾による整理によった。

・ DMSP/OLS画像

DMSP/OLSの観測記録は現在、米商務省が管轄するNOAAのNGDC(National Geophysical Data Center)によって管理・配布されている。初期のDMSPデータは、白黒16階調の写真フィルムとして保管されていたため、幾何補正等の操作に不便であり、複数の画像を合成する作業は極めて時間のかかるものであった。Welch⁹⁾は、電子プラニメーターによる計測、中山ほか¹⁰⁾は、A-D(アナログ-デジタル)変換によって、データを電子化した上で分析を行っている。1992年の中盤以降は、



第2図 SPIDRによるDMSP/OLS画像の例

日本付近の夜間画像であり、左は熱赤外、右は可視近赤外の画像である。可視近赤外画像には都市部の灯りが映っている。

電子化されたデータを受信・配信できるようになり、またGISの発達に伴う今日のデータ処理環境の充実により、分析環境は飛躍的に改善している。現在では、電子的に記録されているDMSPの取得画像データは、NGDCの作成したSPIDR（Space Physics Interactive Data Resource¹⁾）と呼ばれるオンラインのシステムによって、検索・閲覧・ダウンロードが可能である（第2図）。

DMSP/OLSによって観測される光の強度は、画像の各ピクセルについて0から63のレンジをもつ64階級の整数値（1バイト整数）で記録される。しかし、この記録されるDN値と実際の光の明るさとの関係は一定ではない。OLSの本来の目的である雲の観測のために、主として月齢に関連したシーンの明るさに応じて、感度を衛星側で自動調整しているためである。これによって、主に月明かりの反射によって観測される雲は、月明かりの状態によらず連続的に追跡可能となる。しかし、人為的な地上光のように、外光に基づいた反射によらない地上光の場合、同じ強さの光が存在していても、観測日によって記録される光強度が異なることになる。また、一時点の画像は、一時的な光源の存在や雲による一時的な光の遮蔽などの影響を受けやすく、人間の活動と密接に関係する恒常的な光を必ずしも示さない。

これらの問題を受けて、1997年以降、複数の観測記録から得られる光の恒常性を反映した画像データが相次いで製作・公開されるようになった。代表的なものは、Elvidge et al.¹²⁾、Imhoff et al.¹³⁾によって提案・作成された光の観測頻度データSLIであり、1994年から1995年にかけての画像に

に基づいている。データはピクセルごとに、雲に遮蔽されず観測されたシーン数の中で、ある閾値以上の光の観測頻度を、パーセンテージ値である0 - 100の整数値で記録したものである。さらに、一時的な光源（野火や焼畑など）に対処するために、観測頻度が10%程度以下のデータを除くことが多い。

SLI画像の作成のために夜間地上光の観測頻度を集計するにあたっては、月齢が半月より暗い場合に限定したシーンを利用しているが、感度の統一については厳密にはコントロールされていない。また、観測頻度では、光の強度が反映されにくいいため、観測された光強度を調整した新しい光強度データである放射輝度更正画像（Radiance calibrated image）が1部作成されている¹⁴⁾。これは1996 - 7年において、NGDCが空軍に依頼した結果なされた特別な措置として1時的にDMSP/OLS-PMTの感度調整を止め、実験的な観測データを収集した成果に基づいており、恒常的に作成できるものではない。F12衛星の感度調整を飛行前に確認した資料を用いて、感度調整の仕組みはおおよそ分かるものの、シーンの明るさに応じて自動調整を行う現在のOLSの仕組みでは、放射輝度の更正は難しい。厳密な夜間地上光の明るさの把握には、次世代の夜間光観測センサの登場を待たねばならないだろう。

これらのDMSP/OLSに基づいた夜間地上光の合成画像は、NGDCのDMSPのウェブページ¹⁵⁾からダウンロード可能である。なお、SLIのような合成画像の作成には、複雑な行程を要する¹⁶⁾ため、複数年次で比較可能なデータを作成することは容易ではない。近年、NGDCは新しい成果物として、1992 - 93年および2000年のSLI画像を、データ作成方法を統一し、比較可能な画像データとして公開した点は注目に値しよう。なお、これらの合成画像は、全球DEMであるUSGS GTOPO30と同じ30秒メッシュの形式で配布されている。

・アロメトリック成長モデル

衛星画像による人間活動の把握、とくに人口・経済指標の推計研究は、Tobler¹⁷⁾によるナイル・デルタの集落規模推計の研究に遡ることができる。Toblerは、ジェミニ衛星から撮影された写真画像（G5 Ri 44）から集落面積を抽出し、集落規模との関係をモデル化した。その関係式は、それ以前から集落規模と集落面積の関係を表すモデルとして提案されてきたアロメトリック成長モデル¹⁸⁾であり、次のように示すことができる。

$$r = aP^b \quad (1)$$

ここで、 r は集落面積と対応した円の半径であり、 P は集落人口、 a および b はパラメータである。この関係式は、世界各地の地形図と各種統計から、広くよく適合すること（決定係数 R^2 は0.87以上）が確認されており、Toblerの研究は、衛星画像によって集落面積を確認できれば、集落人口分布のモニタリングが可能であることを、初めて示したことになる。なお、アロメトリックな規則性は、本来、体の大きさと代謝量の関係といった生物に関する形態的規則性について指摘されてきたものである¹⁹⁾。さらに今日では、いわゆるべき級数則 power-law として、ジップZipfの法則で知られる順位規模則や、ネットワークの接続リンク数の集中度合いなど、自然・社会科学全般で広く類似した規模の規則性が指摘されている²⁰⁾。

人口推計においては、従属変数と独立変数の関係が逆転すること、また円の半径よりは集落/都市面積がより直接観測される指標であることから、この式(1)は次のように修正して、適用されることが多い。

$$P = a A^b \quad (2)$$

ここで、 A は観測される集落面積、通常は市街地/建築物密集地 built-up area の面積である。

このアロメトリック成長モデル、すなわちべき乗モデルは、両対数化により、

$$\log P = \log a + b \log A \quad (3)$$

と容易に線形化できるため、パラメーターの推計は容易である。しばしば、以下のような対数化しない単純な線形回帰モデル

$$P = a + b A \quad (4)$$

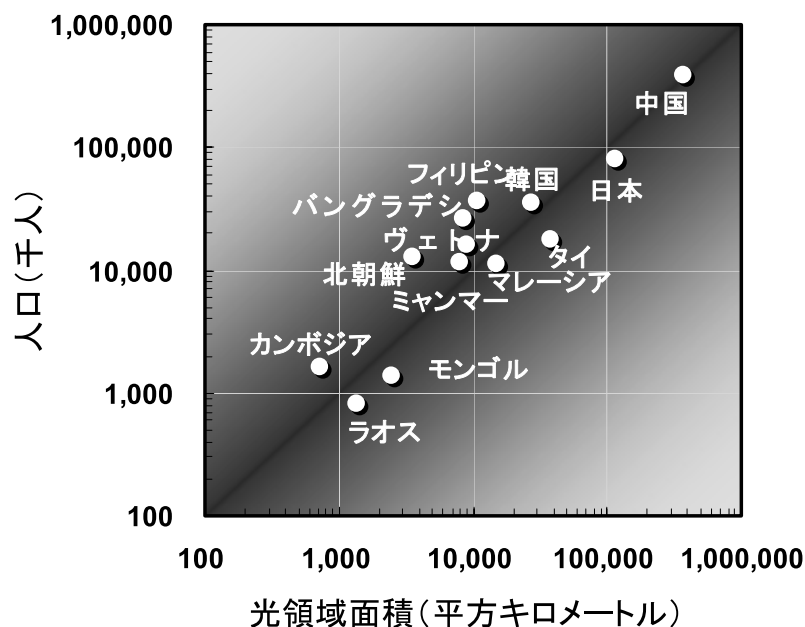
と比較しながら運用される。

・夜間地上光画像とアロメトリック成長モデル

大衆向けの科学雑誌である Scientific American (日本では日経サイエンスで知られる) 誌上に掲載された Croft の記事「宇宙からみた地球の夜の画像 Nighttime Images of the Earth from Space」²¹⁾ は、DMSP/OLSによる夜間画像の有用性を広く訴えるものだった。Croft は、各種の社会・経済指標値と夜間地上光との定量的な相関関係を論じることはしなかったが、アメリカ合衆国の人口分布図(ドット密度によるもの)と夜間地上光の分布図を並べ、両者に著しい対応関係が認められることを示している。

DMSP/OLSによる光量と社会経済指標のモデル化に関する最初の事例は、Welchによって成された²²⁾。そこでは、集落・都市面積の代わりに、市街地内の光ドームが定義され、その体積と都市人口および電力消費量の相関関係が調べられた。ただし、光ドーム体積とは、都市市街地内の各グリッドでの光強度を合計したものである。アメリカ合衆国内の35都市についての、両対数化した散布図から、高い相関関係を得ている。ここでの相関分析は、アロメトリック成長モデルによる分析と対応するものであり、式(4)において、都市・集落面積 A を、都市内部の光強度総量によって置き換えても、強い相関関係が得られることを示したことになる。なお、利用された画像は1時点の画像(フィルム)を手作業にて解析したものであった(アメリカ合衆国東部および西部それぞれ1枚ずつの画像を利用している)。

Welchによるこの一連の研究は、対象が35都市と限定されていたが、中山・田中²³⁾と中山ほか²⁴⁾は、世界各地の諸都市について、光面積を横軸にとり、人口・電力消費量のそれぞれを縦軸にプロットした散布図を描いている。中山によるこれらの一連の作業では、集落の光面積を問題としていることから、Toblerらによる古典的なアロメトリック成長モデルにより近い指標を問題としていることになる。結果として、過去の研究と同様、高い相関関係が散布図に描き出されているが計量的な指標は算出されていない。



第3図 アジア諸国における光領域面積とGDPのアロメトリックな相関関係

しかし、先に述べたように、各地点を一時点の画像で把握すると、一時的な光源が多数補足されてしまい、これらを都市・集落の光とは区別して把握する必要がある。事実、Croftや中山らが作成したデータには、多数の焼畑等、集落分布とは無関係な地上光が存在している。そのため、都市・集落の範囲が急速に変化する場合、また都市・集落の範囲が明確に定義できないような場合には、地上光と社会指標のモデル化に困難が発生する。

この問題に対して、前述のようにElvidgeやImhoffらは、光観測頻度画像SLIを利用した多くの分析結果を報告してきた²⁵⁾。このアプローチでは、安定して観測される光領域を、光の観測頻度に基づいて特定することになる。彼らは、安定した光の領域面積（観測頻度10%以上の領域面積）は、国別の人口、GDP、電力消費量と高い相関関係を示すことを確認している。ここでのモデル化は、再びアロメトリック成長モデルと同型であり²⁶⁾、決定係数は人口が従属変数の場合に0.85、GDPおよび電力消費量（GWH）の場合にそれぞれ0.97、0.96と極めて高い。従来、アロメトリック成長モデルは、分析単位を都市・集落としていたが、このモデルは、国ないし地域のような複数の都市・集落を合成した集計的分析単位においても、有効であることが分かる。1例として、アジア諸国を対象とした光領域面積と都市人口との相関関係を示した散布図（両対数）を第3図に示しておく。

他方、Sutton et al.²⁷⁾は、アメリカ合衆国を対象として、光観測頻度および観測シーン中の最大光強度の二つ光指標を利用した光-人口分布関係の分析を行っている。結果として、光のピクセル単位での相関関係は著しく低い（通常の線形回帰モデルで決定係数0.26）のに対し、飽和したピクセルの連続帯を集計し、回帰モデルを適用した場合には、線形回帰モデルで決定係数0.84、アロメトリック成長モデルで0.93との関係式を得ている。この結果から、光と人口・経済指標との明確な関係は、都市と対応するような集計的単位で初めて得られるものであることが分かる。

しかし、光観測頻度データでは、都市域で観測頻度が100%に飽和してしまうため、都市内部の構造が明らかにならない。そのため、Elvidge et al.²⁸⁾による放射輝度修正画像Radiance Calibrated Imageがもたらす光の強度面（明るさ面）は、より人口密度面などと直接的な関係が高いものと期待

される。Lo²⁹⁾はこの光強度分布データを利用した上で、中国の主要な都市域を対象とした社会経済指標の推計モデルを評価した。Loは、Welchによる先行研究³⁰⁾と類似した光強度のドームをGISによって計測し、光ドーム体積を独立変数としたアロメトリック成長モデルにより、非農業人口（中国ではほぼ都市人口とみなせる）、市街化面積、GDP、電力消費量との関係を論じた。その結果、決定係数は0.51から0.63という比較的高い予測精度を報告している。市街地面積と非農業人口の精度が若干高く、電力消費量がもっとも予測精度が低いものであった。単純な人口との回帰は行われていない。このLoによる結果は、アメリカ合衆国における成果と比較すると精度が低いように思われるかもしれないが、分析単位の違いや統計の信頼性の問題もあり、簡単には比較できない。

・推定の空間的スケール

上述のように、従来アロメトリック成長モデルの有効性は明らかに分析対象とするスケールに依存している。モデルと空間スケールのよりシステムティックな比較としては、Lo³¹⁾の中国における別の研究事例が参考になる。Loは、光強度の平均値、光ドーム体積、光領域面積と各種社会指標との関係を、線形モデルおよびアロメトリック成長モデルを利用して、様々なスケールで検討した。省別のスケールでは、多くの指標で高い相関関係が確認できるものの、県別および都市（市城）別のスケールでは、指標の予測精度が低下した。他方、一貫して高い予測精度が期待できるものは、非農業人口すなわち都市人口の分布であった（決定係数0.5以上）。この場合の説明変数としては、光ドーム体積ないし光面積が有効であり、これは、単純な光強度（この場合、光平均値）ではなく、光の広がる領域が社会指標の推計に有効であることを示唆している。

ところで、Elvidge et al.による国際比較³²⁾において、中国は人口に比して光の領域が少ないことが示されている。光の分布領域と人口の関係は経済の発展段階に応じて異なっており、第3世界では、夜間の光が観測されない領域でも数多くの居住者が存在しているものと考えられる。事実、中谷³³⁾は、中国の県単位の分析において、人口密度と光観測頻度平均値（1994 - 5年版SLI平均値）が高い相関関係を示すのは、人口密度が1000人 / km²以上の県に限定されることを確認した。人口希薄な領域では、そもそも当該の画像では光が存在せず、SLIと人口分布との相関関係を確認しえないためである。だが、中国では1990年のセンサスの結果において、人口密度が1000人 / km²以下の県は全体の94%にも達している。

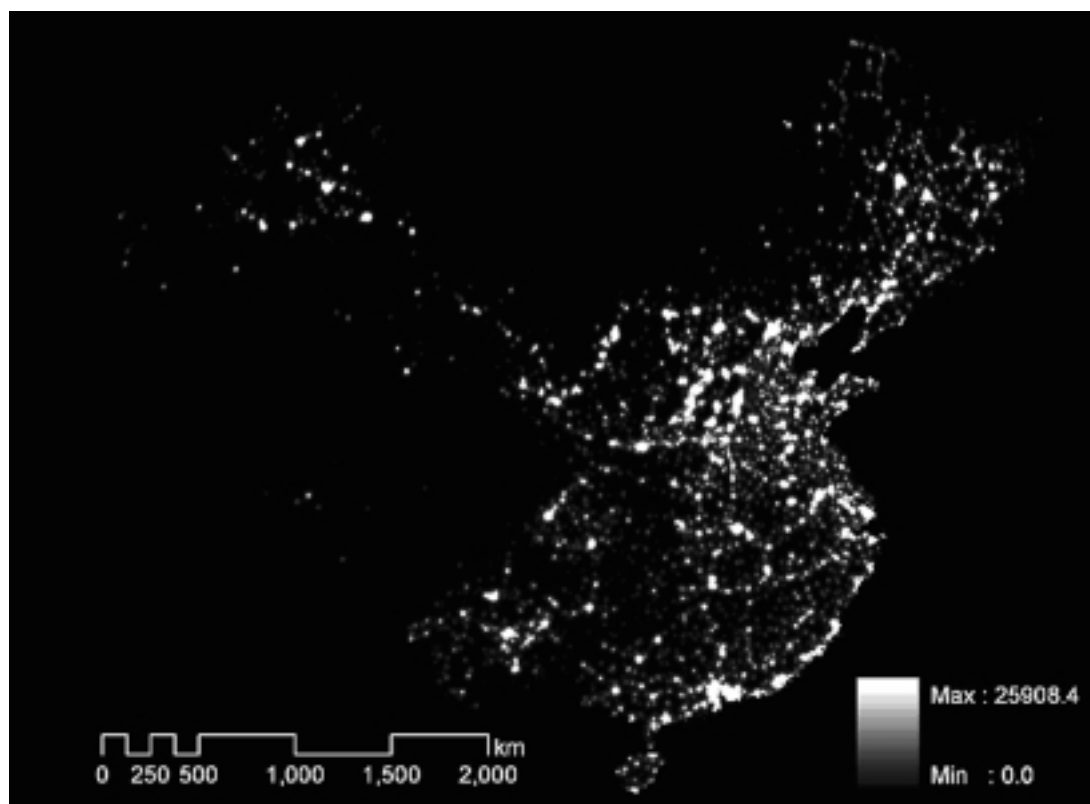
この問題に対して、中谷³³⁾は光領域からのアクセシビリティ（ポテンシャル面）を作成し、これを独立変数としてモデルに加えることを提案した（第4図）。

$$SP_i = \sum_j SLI_j \exp(-d_{ij}) \quad (5)$$

ただし、 SP_i は30秒メッシュ*i*の光ポテンシャル、 SLI_j は30秒メッシュ*j*のSLI値（観測頻度）、 d_{ij} は30秒メッシュ*i*と*j*間の距離、 α はパラメーターである。これを利用して、次のようなアロメトリック成長モデルを修正したモデルを定式化した。

$$D_i = \beta_0 + \beta_1 SLI_i^2 + \beta_3 SP_i^4 \quad (6)$$

ここで、 D_i は30秒メッシュ*i*の人口密度である。このモデルは、人口分布は、光が存在している領



第4図 中国における光への近接性（ポテンシャル）面

域との空間的近接性（アクセシビリティ）によって変動すると仮定しているが、同時に、従来のピクセル単位での人口予測（例えば Sutton et al. の線形モデル³⁴⁾）では光の連続性が考慮されない問題も改善しようとするものである。結果として、距離逓減パラメーターを半減距離 5 km とする値に設定し、人口密度が 1000 人 / km² 以下のカウンティでの予測精度を大きく改善した（決定係数は 0.7）。ただし、あくまでも県を単位とするマクロなモデルとして提案されているものであり、より詳細なスケールでの有効性は明らかでない。

以上を要約すると、夜間の安定した地上光に基づいたモデルの推定精度およびパラメーターは、分析単位の空間スケールに基づいて変動する。分析単位が大きければ、人口、GDP、エネルギー消費量、都市人口は互いに密接な関係があるため、どのように空間的に集計しても高い相関関係が期待できる。他方、分析単位が小さい場合には、連続する光領域と密接に対応するものは市街地の広がりであり、市街地外の人口分布および社会経済指標を把握するには、光ポテンシャルのような間接的な方法を必要とする点に注意せねばならない。

・地理的精度と地理的変動

Loらの成果によれば、DMSP/OLSによって観測される安定した夜間地上光は、市街化領域とほぼ対応し、これに基づいたアロメトリック成長モデルにより、都市人口やエネルギー消費量を推定できるように思える。しかし、夜間地上光画像は市街地の実際の広がりをどの程度の精度で補足できているのだろうか。

Imhoff et al.³⁵⁾は光観測頻度画像SLIにおいて、およそ90%以上の頻度で光が観測される領域が、センサスによって特定されたアメリカ合衆国の都市域とよく対応すると報告している。ただし、この値自体は、複数の都市で得られた閾値の平均値である。また、あくまでもセンサスとの対応による検討であり、より小規模な集落は無視されることになる。他方、Henderson et al.³⁶⁾は、LANDSAT TMを画像分類することで特定した市街地分布と、光観測頻度画像を比較した。異なる経済水準の都市を比較する目的で、サン・フランシスコ、北京、ラサが分析の対象とされ、市街地を特定する最適な閾値はそれぞれ、92%、97%、88%であった。ただし全体として、光のある領域は実際の市街地の範囲を過大に評価する傾向があった。

さらにSmall et al.³⁷⁾は、より多くの都市を対象とし、LANDSAT ETM+ と現在利用可能な複数の光観測頻度画像の比較を行った。結果として、最適な閾値の大半は90%以上の領域であったが、都市によって変動している点が強調された。一見すると90%以上の領域は狭いレンジのようだが、都市化に伴う変動がもっとも活発にみられるのがこのレンジであり、大縮尺の分析では閾値の値をわずかに変更するだけで、推定される市街地が大きく変わってしまう。また、たとえ100%の閾値、すなわち100%の光観測頻度しかない領域を都市域の推定域としても、それがLandsat ETM+ の分類から得られた市街地よりも広い場合さえも存在する。このような‘blooming’と呼ばれる光の過大な広がりには、OLS-PMTの地上分解能の低さ、光の波及（光源から光が拡散してセンサに光が補足される範囲は光源範囲よりも広くなる）、幾何補正等における位置の計測上の誤差、によるものと考えられる。

ところで、スケールばかりでなく、地域的な相関の違い（アロメトリック成長モデルのパラメータに生じる地理的な変動）も検討すべき重要な点である。中山・田中³⁸⁾は、都市別にみた光領域面積と人口・電力消費量との相関関係に、国別の違いがあることを、散布図を用いて示している。全体的な傾向として、経済水準の発達した国家では、光面積あたりの人口が少ない。また、Tobler³⁹⁾はジェミニ衛星による集落規模を推計した際に、その時点での既存の研究を整理しているが、Sutton et al.⁴⁰⁾が指摘するように、べき級数のパラメータである式(1)の b の値は各種事例で比較的共通しているものの、定数項であるパラメータ a の値には、大きな地理的変動が認められる。中山・田中の結果も定量的数字は示されていないが、彼らの論文に掲載されている散布図を読む限り、同様な傾向を認めることができる。

近年、Sutton et al.⁴¹⁾はこの問題について、世界中の1383都市について、アロメトリック成長モデルによる人口予測推計モデルの比較を行った。説明変数は都市域と対応すると考えられる連続した光領域の面積であり、被説明変数が都市域の公的な統計に基づいた人口である。都市域と判断する光領域を特定するために、原則として一人当たりGDPが低い（\$1000以下）場合には、観測頻度40%以上を、それ以外の国家では80%以上を、閾値として用いている。ただし、状況に応じて40%、80%、90%のいずれかの値を例外的に利用している場合もある。

このSutton et al.による研究では、一人あたりのGDPの水準に基づいて低所得国、中所得国、高所得国に分けて、アロメトリック成長モデルを適用することで、全体を一括して単独のモデルを適用した場合よりも、適合度が大きく改善された。やはり、定数項にあたるパラメータの変動が大きく、低所得国ほど大きかった。すなわち、同じサイズの小さな都市においては、低所得国ほど都市人口密度が高いことになる。所得水準の向上に伴って、交通機関が発達するほど、より拡散した市街地形態をとりやすいことを反映しているものと思われる。他方、変動はより僅かではあるが、べき級数のパラメータは高所得国ほど大きかった。すなわち、高所得国ほど、都市の市街化面積が

増すにつれて、人口はより急速に増加する傾向があり、これは大規模な都市での高密度住宅の建設の多さと対応しているものと思われる。

・夜間光画像による推計モデルの応用

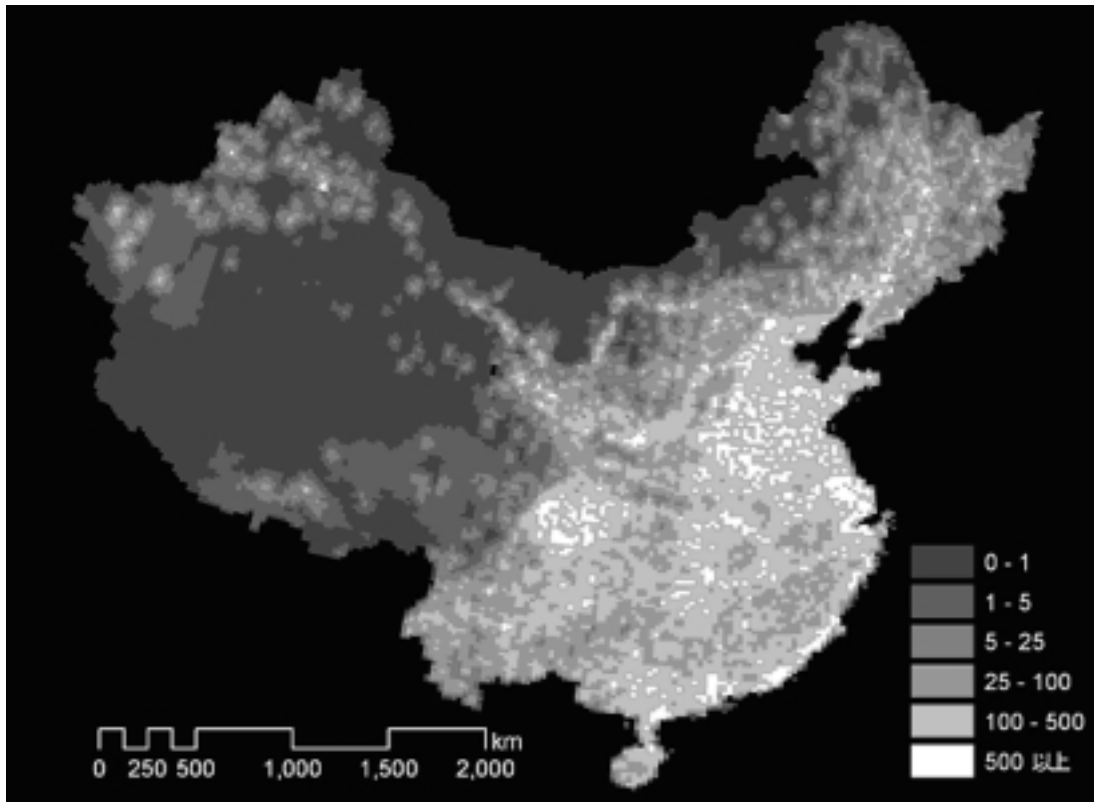
アロメトリック成長モデルで記述される、夜間の光量データと人口・経済指標との高い相関関係から、DMSP/OLSによって定期的な人間活動強度のモニタリングが模索されてきた。とくに、シームレスに地球全体をカバーできる夜間光画像によって、任意の時間、空間領域について、人口・経済指標の推計が可能となれば、それはとりわけ、途上国のように信頼できる地域統計が得られない場合や、統計調査機関が長い場合（例えば、英国や米国、ブラジルなど多くの国家で人口センサスは10年間隔）に、有用と考えられる⁴²⁾。また変わった試みとして、Small et al.⁴³⁾は都市形態の比較を各国の都市に関する光観測頻度画像を用いて検討しており、都市が大規模化するほど、形態の複雑さ（非コンパクトさ）が増すことを明らかにしている。

こうした人間活動の宇宙からの観測‘Census from Heaven’⁴³⁾は、比較的粗い空間スケールである国別を単位とすれば、安定光領域を独立変数とするアロメトリック成長モデルによって比較的精度よく記述される。Sutton et al.⁴³⁾の成果によれば、都市別の推計モデルを国家単位で集計した場合には、人口の推計誤差は8%以下であった。Doll et al.⁴⁴⁾は、こうした関係式を利用して経緯度1度×1度のグリッド単位に安定光領域を計算し、対応するGDPおよびCO₂排出量のグローバルマップを作成している。ただし、比較する統計の精度や、市街地範囲の特定をめぐる閾値設定、利用する合成画像の作成方法によって、分析結果は変動してしまう⁴⁵⁾ため、モデルの精度評価は難しい。

他方、DMSP/OLSによる夜間地上光画像は、既知の国家・地域統計に、より詳細な空間的精度をもたせるために利用することも可能である。人口分布の把握について、中谷⁴⁶⁾は中国における地域人口統計のグリッド化（人口分布面への面補間）にDMSP/OLS SLI画像を利用している。Tobler⁴⁷⁾のデータ・スムージング手法と同様に、既知の統計単位での人口の総計を制約条件としながら、統計単位内の人口分布を、DMSP/OLSによる推計モデルの推計値に基づいて配分する。これによって、中国の県別の人口統計を、20kmグリッド単位のデータへと変換している（第5図）。同様に、Openshaw and Turner⁴⁸⁾はニューラルネットを利用して、DMSP/OLSを用いた面補間による地域統計データの小空間単位への変換をはかっている。

これらの成果を活かして、様々なスケールにおけるDMSP/OLSの夜間光画像を用いた都市化や経済発展・経済危機などのモニタリングが期待される。しかし、観測頻度を利用した合成画像の作成には時間がかかり、作成方法を統一させなければ、比較も困難である。現時点でNGDCより公開されている光観測頻度画像は1992 - 3と2000年時点の2枚のみである。アジア地域に限っては、一ノ瀬らによって1992 - 3、1996、1998の3時点の合成画像が作成され、アジア経済危機の影響などが検討されている⁴⁹⁾。

ところで、夜間地上光画像によって把握される人間の活動領域・強度は、様々な時間スケールで変動する。近年では地震などの災害を受けた範囲を特定するために、DMSP/OLS画像を利用した例が複数報告されている。この場合、連続する数日の画像から、光強度の変化をピクセル単位で測定し、光強度が有意に低下した領域を被災地として特定することになる。高島・林⁵⁰⁾は、トルコ・



第5図 DMSP/OLSを用いてグリッド推定された中国の人口分布面
 (20kmメッシュ別千人単位人口, 1990年)

マルメラ地震(1999年)および阪神淡路大震災(1995年)のそれぞれについて、光強度の低下と被災指標との関係を分析している。阪神淡路大震災については、死者数、全壊家屋数などの統計資料との関係付けが行われており、関係の有意性が示された。とくに、負傷者、半壊以下の建物といった指標との関係が強く、物理的な被災よりも、人間活動の低下による変化がより明瞭に反映されることが示唆されている。したがって、光ドームないし光領域の変化を測定することで、アロメトリック成長モデルによるエネルギー消費量の短期的変化も測定できる可能性がある。SLIなど安定光のデータによる事前の市街化領域の把握も、(とくに途上国での適用では)分析とする市街化領域の把握に有用であろう。さらに、Kohiyama et al.⁵¹⁾は、光強度の低下を判断する統計的検定手段を2種類提案し、迅速な被災地評価システムの可能性を論じている。

短期的なDMSP/OLS画像の利用にあたっては、雲による遮蔽の問題が大きくなる。雲の影響を完全に取り除くことは難しいが、それでも夜間の観測は、日中に観測する場合よりも雲による観測の影響を受けにくいと考えられている⁵²⁾。なぜなら、夜間では大気対流活動の低下に伴い積雲の発生量が低下するからである。十分に雲のない画像が得られる可能性は、日中で27%、夜間で45%という報告もある⁵³⁾。したがって、LANDSATなどより高解像度な衛星と比較すると、観測周期も短いこともあり、有効な画像をえる可能性は高いものと期待できる。また、グローバルな光観測頻度画像SLIの作成は難しくとも、特定の地域に着目すれば、短期間のうちに光観測頻度画像などの合成画像を簡易的に作成する余地も生まれる。

短期的なモニタリングの有用性を高める別の要素は、データ供給の迅速さであり、かつては画像の撮影からデータの配信まで72時間を必要としたものの、これが3時間にまで短縮されている⁵⁴⁾。さ

らに、幾何補正やノイズ除去の自動化、光観測頻度の自動的な蓄積など、夜間地上光を用いた判断を迅速に行う自動化システムの開発が望まれる。

．おわりに

以上、本稿では、DMSP/OLS画像による夜間地上光データと、これに基づいた人口・経済指標など人間活動の強度推定に関して、これまで提案されてきたアプローチを整理した。安定光の領域ないし光ドーム体積を独立変数とするアロメトリック成長モデルは、様々な空間スケールにおいて、その有用性が論じられてきた。その結果、DMSP/OLSによる夜間地上光は、都市的な活動領域とその強度に密接に関連していることが明らかとされてきた。これらの成果は、今後、短期的・長期的な都市的活動のモニタリングに貢献するものと期待できる。

ただし、得られた関係式のパラメータおよびその予測精度は、分析した地理的領域および空間（時間）スケールに大きく依存している点に留意せねばならない。今後は、(1) 雲やセンサ感度など観測時の状況変化を効率よく処理し、定期的なデータ作成を容易なものとする技術的改善とともに、(2) データ作成や分析スケール等、各種の分析条件と予測モデルとの関係についての系統的な整理をより精緻につめていく必要がある。

付記

本稿は、平成12～13年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(1)）研究成果報告書『夜間光衛星画像データDMSPによるアジアの地域別経済活動強度推定』（一ノ瀬俊明代表）の第2章のために起草した原稿に加筆修正を行ったものである。本研究の遂行にあたっては、当該科学研究費補助金（研究課題番号12650537）を使用した。研究代表者の一ノ瀬俊明（国立環境研究所）、共同研究者の松村寛一郎（関西学院大学）、中野泰臣（前東京大学）の各先生方に感謝致します。

注

- 1) Croft, T. A.: Nighttime Images of the Earth from Space, *Scientific American* 239, 1978, pp. 86 - 98. 中谷友樹: 夜の灯りは何を映すか, (日本測量協会編『サーベイ・ハイテク100選』, 日本測量協会, 2000, 所収), 182 - 183頁。
- 2) Imhoff, M. L., Lawrence, W. T., Stutzer, D. C. and Elvidge, C. D.: A Technique for Using Composite DMSP/OLS "City lights" Satellite Data to Map Urban Area, *Remote Sensing Environment* 61, 1997, pp. 361 - 370.
- 3) Nakaya, T.: A Grid-surface Projection of Urban and Rural Population in China, 1990 - 2050, in Otsubo, K. ed.: *Study on the Processes and Impact of Land-use Change in China -Final Report of the LU/GEC Second Phase (1998 - 2000)* -, Centre for Global Environmental Research, 2002, pp. 89 - 98.
- 4) Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Kihn, E. A., Kroehl, H. W. and Davis, E. R.: Mapping City Lights with Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63, 1997, pp. 727 - 734.
- 5) Brandli, H. W.: Night Eye in the Sky, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44, 1978, pp. 503 - 505.
- 6) Sullivan III, W. T.: A 10 km Resolution Image of the Entire Night-time Earth Based on Cloud-free Satellite Photographs in the 400 - 1100 nm Band, *International of Remote Sensing* 10, 1989, pp. 1 - 5.
- 7) 前掲4)

- 8) Kramer, H. J.: A.19 DMSP and A.19.1 DMSP data availability: visible and infrared imagery, in *Observation of the Earth and its Environment: Survey of Missions and Sensors*, Springer-Verlag, 1994, pp. 61 - 67.
- 9) Welch, R.: Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns from Satellite Data, *Remote Sensing of Environment* 9, 1980, pp. 1 - 9.
- 10) 中山裕則・田中總太郎・菅雄三「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 13, 1993, 1 ~ 14頁。
- 11) <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>
- 12) Elvidge, C. D., Baugh, K., Hobson, V. R.: Kihn, E. A., Kroehl, H. W., Davis, E. R. and Cocero, D.: Satellite Inventory of Human Settlements Using Nocturnal Radiation Emissions: A Contribution for the Global Toolchest, *Global Change Biology*, 3, 1997, pp. 387 - 395. および前掲4)
- 13) Imhoff, M. L., Lawrence, W. T., Elvidge, C. D., Paul, T., Levine, E., Privalsky, M. V. and Brown, V.: Using Nighttime DMSP/OLS Images of City Lights Estimate the Impact of Urban Land Use on Soil Resources in the United States, *Remote Sensing Environment* 59, 1997, pp. 105 - 117. および前掲2)
- 14) Elvidge, C. D. Baugh, K. E., Dietz, J. B., Bland, T., Sutton, P. C., and Kroehl, H. W.: Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements, *Remote Sensing Environment* 68, 1999, pp. 77 - 88.
- 15) <http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>
- 16) 一ノ瀬俊明編『夜間光衛星画像データDMSPによるアジアの地域別経済活動強度推定』平成12~13年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(1))研究成果報告書(一ノ瀬俊明代表), 国立環境研究所, 2004。
- 17) Tobler, W.: Satellite Confirmation of Settlement Size Coefficients, *Area* 1, 1969, pp. 31-34.
- 18) Nordbeck, S.: The Law of Allometric Growth, *Michigan Inter-University Community of Mathematical Geographers, Paper 7*, University Microfilms in OP 33067, 1965(筆者未見).
Stewart, J. and Warntz, W.: Physics of Population Distribution, *Journal of Regional Science* 1, 1958, pp. 99 - 123.
- 19) 本川達雄『ゾウの時間 ネズミの時間 サイズの生物学』, 中央公論, 1992。
- 20) 増田直紀・今野紀雄『複雑ネットワークの科学』, 産業図書, 2005。
- 21) 前掲1)。
- 22) Welch, R.: Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns from Satellite Data, *Remote Sensing of Environment* 9, 1980, pp. 1 - 9. Welch, R. and Zupko, S.: Urbanized Area Energy Utilization Patterns from DMSP Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 46, 1980, pp. 201 - 207.
- 23) 中山裕則・田中總太郎「宇宙からみた夜の光分布にみる世界の経済傾向」, 地理 28 No. 8, 1983, 94 ~ 103頁。
- 24) 前掲10)
- 25) 前掲12), 13) など。
- 26) Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Kihn, E. A., Kroehl, H. W., Davis, E. R. and Davis, C.W.: Relation between Satellite Observed Visible-near Infrared Emissions, Population, Economic Activity and Electronic Power Consumption, *International Journal of Remote Sensing* 18, 1997, pp. 1373 - 1379.
- 27) Sutton, P. Roberts, D. Elvidge, C. and Meij, H.: A Comparison of Nighttime Satellite Imagery and Population Density for the Continental United States, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63, 1997, pp. 1303 - 1313.
- 28) 前掲14)
- 29) Lo, C.P.: Urban Indicators of China from Radiance-Calibrated Digital DMSP-OLS Nighttime Images, *Annals of the Association of American Geographers* 92, 2002, pp. 225 - 240.
- 30) 前掲22)
- 31) Lo, C. P.: Modeling the Population of China Using DMSP Operational Linescan System Nighttime

- Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67, 2001, pp. 1037 - 1047.
- 32) 前掲26)
- 33) 中谷友樹「DMSP/OLS Stable Night Light Image による中国人口分布推定モデルと人口グリッド補間」, (大坪国順編『LU/GEC プロジェクト報告書 V』, 国立環境研究所, 1999, 所収), 13 ~ 23 頁, および前掲3)
- 34) 前掲27)
- 35) 前掲13)
- 36) Henderson, M., Yeh, E. T., Gong, P., Elvidge, C. and Baugh, K.: Validation of Urban Boundaries Derived from Global Night-time Satellite Imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 24, 2003, pp. 595 - 609.
- 37) Small, C., Pozzi, F. and Elvidge, C. D.: Spatial Analysis of Global Urban Extent from DMSP-OLS Night Lights, *Remote Sensing of Environment* 96, 2005, pp. 277 - 291.
- 38) 前掲23)
- 39) 前掲17)
- 40) 前掲27)
- 41) Sutton, R., Roberts, D., Elvidge, C. and Baugh, K.: Census from Heaven: an Estimate of the Global Human Population Using Night-time Satellite Imagery, *International Journal of Remote Sensing* 22, 2001, pp. 3061 - 3076.
- 42) Amaral, S., Camara, G., Miguel, A., Monteiro V., Quintanilha, J.A. and Elvidge, C.D.: Estimating Population and Energy Consumption in Brazilian Amazonia Using DMSP Night-time Satellite Data, *Computers, Environment and Urban Systems* 29, 2005, pp. 179 - 195.
- 43) 前掲41)
- 44) Doll, C. N. H., Muller, Jan-Peter and Elvidge, C. D.: Night-time Imagery as a Tool for Global Mapping of Socio-economic Parameters and Greenhouse Gas Emissions, *Ambio* 29, 2000, pp. 157 - 162.
- 45) 前掲37)
- 46) 前掲33)
- 47) Tobler, W.: Smooth Pycnophylactic Interpolation for Geographical Regions, *Journal of American Statistical Association* 74, 1979, pp. 519 - 536.
- 48) Openshaw, S. and Tuner, A.: Predicting the Impact of Global Climatic Change on Land Use in Europe, *Paper presented at the International Conference on Modelling Geographical and Environmental Systems with Geographical Information Systems (GIS) Keynote Speech*, 1998.
- 49) 前掲16)
- 50) 高島正典・林晴男「DMSP/OLS 夜間可視画像を用いた被災地推定の妥当性の検証 トルコ・マルマラ地震(1999)及び阪神・淡路大震災(1995)への適用」, 地域安全学会論文集2, 1995, 10 頁。
- 51) Kohiyama, M., Hayashi, H., Maki, N., Higashida, M., Kroehl, H. W., Elvidge, C. D., and Hobson, V. R. Early Damaged Area Estimation System Using DMSP-OLS Night-Time Imagery, *International Journal of Remote Sensing* 25, 2004, pp. 2015 - 2036.
- 52) Foster, J. L.: Night-time Observations of Snow Using Visible Imagery, *International Journal of Remote Sensing* 4, 1983, pp. 785 - 791.
- 53) Wiesnet, D., McGinnis, D.F., Matson, M. and Pritchard, J.A.: *Evaluation of HCMM Satellite Data for Estuarine Tidal Circulation Patterns and Thermal Inertia Soil Moisture Measurements*, NOAA, National Earth Satellite Service. Prepared for Goddard Space Flight Center. Final Report, 1981. (筆者未見)
- 54) Elvidge, C. D., Nelson, I., Hobson, V. R., Safran, J. and Baugh, K. E.: Detection of fires at night using DMSP-OLS data, in Ahern, F.J., Goldammer, J. G., Justice, C.O. eds.: *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a coordinated International Effort*, SPB Academic Publishing, 2001, pp. 125 - 144.

(本学文学部助教授)

**'Census of City Lights' Using DMSP/OLS: Estimation of the Intensities of Human Activities
Based on Satellite Images of Nocturnal Lights on the Earth**

**by
Tomoki NAKAYA**

Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System (DMSP/OLS) has a high-sensitivity visible and near infrared (VNIR) sensor that captures nocturnal light distributions on the earth surface. Since stable nocturnal lights observations that mainly indicate 'city lights' are highly correlated with demographic and socio-economic indicators, such as population, GDP and CO₂ emission, the observation and monitoring of human activities on earth from the sky using nocturnal images of DMSP/OLS has been expected. We review various approaches to model the intensities of human activities using the image datasets with a special interest in allometric growth models as well as basic information on sensors and composite images of DMSP/OLS.