

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-

Validation of Damaged Area Estimation using DMSP/OLS night-time imagery
- applications for Marmara earthquake in Turkey (1999) and
Hanshin-Awaji earthquake in Japan(1995) -

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, the validity of the method to estimate damaged area using DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/ Optical Linescan System)night-time imagery developed by our research group(Hayashi et al, 2000). OLS mounted on the DMSP satellites captures city lights distribution reflecting extent of human activity. The area shows significant decrease of light intensity after the earthquake compared with before the event is estimated as impacted area in the DMSP method. We compared the actual damage with estimated damaged area of Marmara earthquake in Turkey (1999) and of Hanshin-Awaji earthquake (1995) based on the DMSP method. As a result, it is clarified the DMSP method can detect various kinds of damages rather than only severe housing damages.

Key Words : DMSP/OLS, Damaged Area Estimation, Field Survey, Human Activity, Marmara earthquake (1999), Hashin-Awaji earthquake(1995)

1. 本論文の背景・目的

(1) 人間の営みと DMSP/OLS 夜間可視画像

人間の営みが存在する場所でのみ、自然災害が発生することはいうまでもない。その意味で、人々の営みが空間的にどのように分布しているのかを常時把握しておくことは、災害発生前に被害想定を行う上でも、災害発生後の迅速な被害の把握においても、必要不可欠である。Croft(1978)¹⁾は、米国の軍事気象衛星 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)に搭載された OLS(Optical Line Scansystem)が捉える夜間可視画像に、都市の灯り、油田の炎、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)²⁾、中山(1993)³⁾、Elvidge(1997)⁴⁾、Konami(1998)⁵⁾、Elvidge(1999)⁶⁾、Nakayama(1999)⁷⁾らが、DMSP 衛星が捕らえる光の分布と人口、GDP、電力消費量との関係を定量的に分析し、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。

(2) DMSP/OLS 夜間可視画像の被災地推定への応用

ここでは、大規模な地震災害が発生し、その影響が広域にわたることが予想される場合を想定する。被災地内外からよせられる人的・物的資源が適切に被災地内に配

分されるためには、被災地域の詳細がすばやく把握され、人的・物的資源を有する各防災関連組織に伝達される必要がある。そのような情報のニーズがある一方、通信設備が破壊され、それぞれの現場で発生している事態に対処しなければならぬ被災地から、系統だった被害情報が発信されることは期待しにくい。よって、能動的に情報収集をし、被害の詳細に迫っていく活動が必要となるが、そのような情報収集自体が人的・物的資源を要する活動であり、まず空間的に被災地がどこまで広がっているのか、その全貌を捉えることが、効率的に人的・物的資源を運用し、被災地各地の被災状況の詳細に迫る前提となる。特に、被災直後に被災地を把握する手段に乏しい発展途上国にとって、被害の全貌を短期間で把握することは大きな課題である (Hayashi et al. 2000)⁸⁾。

もし、自然災害の前後で、DMSP 衛星の捉える光量が大きく減少、あるいは増加した場合、その変化は、自然災害がもたらす、人間の営みへのなんらかの影響を反映していると考えられる。つまり、そのような変化を見せた地域は被災地である可能性が高く、より詳細な情報収集を要する地域であると考えられる。我々の研究グループでは、このような考えかたに基づき、自然災害前後の夜間可視画像を用いて、各ピクセルごとに光量の差をとり、その差の分布を正規分布と仮定して、有意水準 $\alpha = 0.5\%$ で有意な光量の減少を見せたピクセルを推定被災地とする手法を提案した。さらに、その手法を用いてトル

コ・マルマラ地震(1999年, 8月)および台湾集集地震(1999年, 9月)における被災地を推定した(Hayashi et al. 2000)⁸⁾。その結果, おおむね, 主要な被災都市を捕捉することに成功した。DMSP衛星は, 地球上の同一地点を毎日夜間に2回走査するため, この手法を用いることによって, 地震発生後24時間以内に, 被害の全貌を捉え, Webを介して世界に発信することが可能となる。

(3) 夜間可視画像を用いた被災地推定手法の検証

この夜間可視画像を用いた手法がどの程度の精度をもっているのかは, 定量的に評価されていない。また, 光量が減少する理由としては, 建物・施設の倒壊, 停電, 人々の避難による使用電灯の減少, 各種産業活動の停止・縮小, と様々なものが考えられるが, この手法が, どのような被災形態を捕捉しうるのかも明らかになっていない。そこで, 本論文では, このDMSP/OLS夜間可視画像を用いた推定手法の推定精度と, この推定手法が捉え得る被災形態を, トルコ・マルマラ地震(1999)および阪神・淡路大震災(1995)を事例として検証する。

2. 被災地推定手法の概要

(1) DMSP衛星画像の特徴

DMSP衛星は, 波長が $0.5\sim 0.9\mu\text{m}$ の可視・近赤外(VNIR)を捉えるセンサーと, 波長が $10\sim 13\mu\text{m}$ の熱赤外(TIR)を捉えるセンサーの2つで観測を行っている。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。1ピクセルの大きさは約 $0.9\text{km}\times 0.9\text{km}$ 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してしまうので, 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ゲインの調節が行われる。よって, 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, 異なる値で記録されることになる。ゲイン操作は米空軍内で行われて

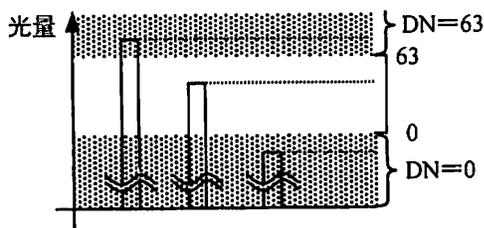


Fig.1 VNIRセンサーのゲインのしくみ

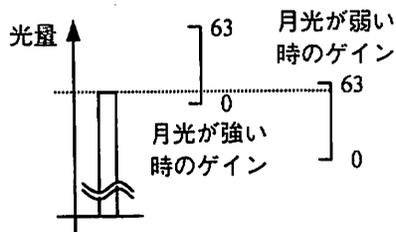


Fig.2 VNIRセンサーの月齢に伴うゲイン調整

おり, 詳細は不明である。

(2) 被災地推定手法

被災地推定の基本的な考え方は, 地震発生前後の夜間可視画像を比較し, 有意な光量の減少を見せたピクセルを被災地とするというものである。具体的には, 2時点におけるピクセル毎のDNの差が正規分布すると仮定し, DNの差を標準化して, 有意水準 α で有意なDNの減少を見せるピクセルを被災地とする。震源周辺地域の夜間

$$\alpha \geq \int_{Z_{ij}}^{\infty} N(1,0)dz \quad [1]$$

$$Z_{ij} = \frac{\Delta DN_{ij} - \mu}{\sigma}$$

$$\Delta DN_{ij} = DN_{ij,before} - DN_{ij,after}$$

可視画像の*i*行*j*列目のピクセルが被災地と判定される条件は式[1]のように定式化できる。

$N(1,0)$: 標準正規分布関数, μ : ΔDN_{ij} の平均値,

σ : ΔDN_{ij} の標準偏差, $DN_{ij,before}$, $DN_{ij,after}$: 震源周辺地域の地震発生前後の夜間可視画像の*i*行*j*列目のピクセルのDN

3. トルコ・マルマラ地震(1999)における被災地の推定とその検証

(1) 検証方法

トルコ・マルマラ地震を事例とする検証プロセスは, 1)トルコでの現地被害調査と2)推定結果との照合という2段階からなる。

a) 現地被害調査

トルコでの現地調査は, 1999年10月27日~29日および10月31日に行った。調査経路は, 主要な被災都市(Sakarya(Adapazari), Degilmendere, Golcuk, Kocael(Izmit), Yalova, Bursa, Eshhisir)を結ぶよう設定された。被害調査は, 調査経路上をバスで移動しながら, 目視で確認できる被害の緯度経度を携帯GPSで記録するという形で行った。また, Sakarya, Degilmendere, Golcukでは, バスを降りて市街地内を徒歩で回り, 被害の緯度経度を記録した。Table1に, 現地調査のスケジュールを示す。また, Fig.3に, 夜間可視画像を用いた手法に基づく推定被災地(Hayashi et al. 2000⁸⁾)と, 現地調査経路を示す。なお, 被災地推定には, 地震発生当日(1999年8月17日)と前日(8月16日)の夜間可視画像が用いられたが, 両日とも推定対象領域にほとんど雲がないことが確認されている(Hayashi et al. 2000⁸⁾)。

10月27日は, イスタンブール市郊外のAvcilar, ZeytinburnuおよびMerter方面の調査をおこなった。被害を受けた建物を取り壊した跡地が観察されたが, Hayashi et al. (2000)⁸⁾では, この地域は, 大都市イスタンブール市周辺の都市域で, 地震発生当日前日とも, ゲインに対して都市の光が強すぎて飽和しているため, 被災地推定の対象となっていない。よって, 観察された被害が推定結果に捕捉されているかは検証できなかった。

10月28日には, イスタンブールを發して, Izmit湾の北岸を東に向かい, Sapanca湖の南岸を通って, Sakaryaに至る経路を辿り, Sakaryaではバスを降りて, 徒歩による調査も行った。その後, Sakaryaの南部にある日本政府

Table 1 現地調査スケジュール

Data	Surveyed Area/ Cities
Oct. 27, 1999	Suburban area of Istanbul (Avcılar, Zeytinburnu, Merter)
Oct. 28, 1999	North coast of Izmit Bay, Sothern part of Sapanca Lake, Sakarya(Adapazari)
Oct. 29, 1999	Izmit Bay area, Degilmendere, Golcuk, Kocaeli(Izmit)
Oct. 30, 1999	---
Oct. 31, 1999	Yalova, Bursa, Eskisehir

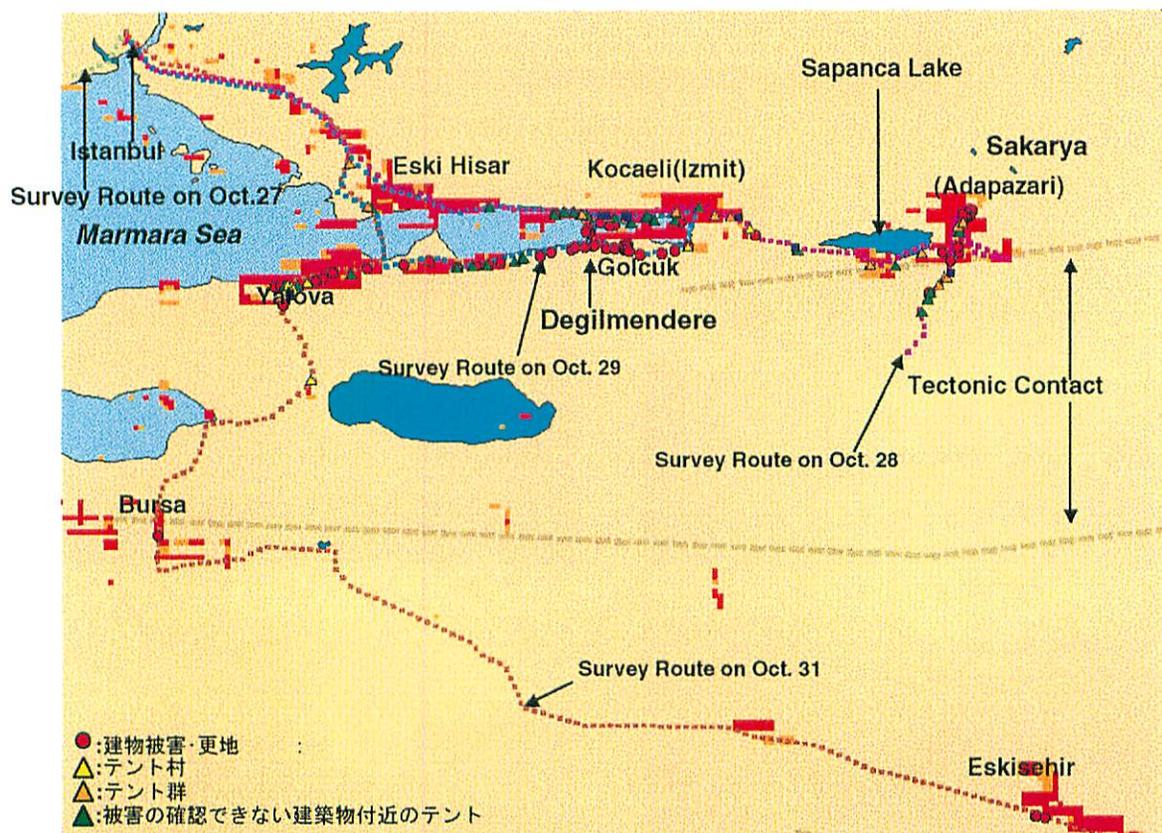


Fig. 3 推定被災地 (Hayashi et al., 2000 より) と、現地調査経路、および観察された被災指標の分布

の支援による仮設住宅建設現場の視察も行った。Izmit 湾北岸や、Sakarya から南に下る経路においては、目視で被害が確認できない建物の周りにもテントが確認された。また、Sakarya の市街地では、多くの建物被害、取り壊された建物、大規模なテント村が観察された。推定では、Sakarya の西部が被災地として判定されている。

10月29日は、Eski Hisar からフェリーで Izmit 湾を渡り、Izmit 湾を半時計回り方向に回る経路で調査を行った。Izmit 湾南岸では、建物被害、崩れたミナレット(モスクの尖塔)、目視で被害が確認できない建物付近のテントが観察された。Degilmendere, Golcuk では、Izmit 湾に面する一部の区域が、水面下に没しているのが観察された。マルマラ地震で最も大きな被害を受けたとされる Golcuk では、多数の低中層建築物の被害、大きな地割れ、広範囲に広がる取り壊し跡地、大規模なテント村が観察された。推定では Golcuk の北側の海面が被災地と判定されている。Izmit 湾北岸では、地震で炎上した Tupuras 精油所を視察し、燃えた石油タンクと、焼け落ちた煙突を観察できた。

現地調査最終日の10月31日には、再び Izmit 湾を渡り、Yalova, Bursa, Eskisehir を迎る経路で調査を行った。Yalova では、多くの建物が取り壊された跡、テント村が観察された。また、大きな道路に面した空き地や建物の合間などに、いくつもの小規模なテントの集団が観察された。Yalova は推定においても正確に被災地として判定されている。Bursa, Eskisehir では、建物被害および取り壊しの跡がわずかながら観察された。推定では、Bursa は良好に判定されているものの、Eskisehir は、その北東に隣接する地域が被災地として推定されている。

b) 記録対象物の選定

現地調査を行う中で、著者らは、次の5つの被害、すなわち 1)建物被害、2)更地、3)テント村、4)テント群、5)目視で被害が確認できない建物の周りがあるテント、に着目した。1)建物被害は、文字通り、壁が崩れている、あるいは傾いている等、被害を受けていることが外見上明らかな建築物を示す。また、2)更地は取り壊し後の瓦礫だけが残っている場所を示す。これら 1)、2)が確認できれば、その地域の被災程度が重篤であることがわかる。

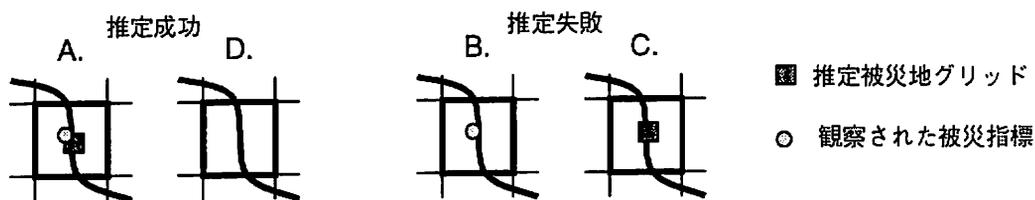


Fig. 6 照合の結果生じ得る4種類のメッシュ

c) 推定結果との照合

現地調査で観察された被災指標の分布と、被災地推定結果との照合は、以下のように進められた。まず、被災地推定対象エリアをメッシュに区切り、調査経路上のメッシュについて、観察された被災指標および被災地として推定されたグリッドが含まれるかどうかを判定した。この時、各メッシュは以下の4つの内のどれかに分類される(Fig. 6)。

- A. 被災指標も推定被災地グリッドも共に含むメッシュ
 - B. 被災指標は含むが、推定被災地グリッドは含まないメッシュ
 - C. 推定被災地グリッドは含むが、被災指標は含まないメッシュ
 - D. 被災指標も、推定被災地グリッドも含まないメッシュ
- メッシュ A, D では推定は成功したと判断でき、メッシュ B, C では推定は失敗したと判断できる。

この照合の際、どのような被災形態が、被災地として推定されたのかを明らかにするため、1)建物被害および更地のみの被災指標グループと、2)テントを含む全被災指標グループを考え、それぞれの被災指標グループと推定被災地グリッドとの照合をおこなった。また、推定精度を明らかにするため、照合に用いられるメッシュの大きさを、0.9km×0.9km, 1.8km×1.8km, 3.6km×3.6km, 7.2km×7.2km and 14.4km×14.4kmと変えての照合もおこなった。

次に各照合において、各メッシュの数を数え、そのデータをもとに、推定結果が有意であるか、すなわちメッシュ A, D の観測数が有意に大きく、メッシュ B, C の観測数が有意に少ないかどうかを χ^2 検定あるいはフィッシャーの直接法により検証した^{補註(1)}。さらに、各照合結果における相対四分点相関係数(相対 ϕ 係数)^{補註(2)}を求めた。相対 ϕ 係数は、2通りの値しかとらない2変数の間の相関の強さを表す指標で、メッシュ A, D の割合が多いほど、すなわち推定が成功と判定される割合が多いほど1に近い値を取る。よって、各照合における相対 ϕ 係数を比べることで、もっとも推定が成功と判定される割合の多い照合の条件を明らかにすることができる。

(2) 検証結果

a) 推定手法の有意性の検証

各照合におけるメッシュ A, B, C, D の観測数、期待値および χ^2 値、相対 ϕ 係数を Table.2 に示す。検定の結果^{補註(1)}、どの被災指標グループ、あるいはどのメッシュサイズの照合においても、推定が有意であることが支持された。 $(\chi^2=3.81(\alpha=0.05))$

b) 推定結果の特徴

Fig. 7 は、被災指標グループ及び、メッシュの大きさと相対 ϕ 係数の間の関係を示したものである。Fig. 7 から、次の2つのことが明らかになった。

一つは、どちらの被災指標グループとの照合においても、メッシュの大きさが7.2km×7.2kmの時、最も、相対

ϕ 係数が大きい、すなわち、7.2km×7.2kmメッシュでの推定成功の割合が最も大きいということである。よって、夜間可視画像を用いた推定手法を用いる場合、その推定結果に対し、最大7.2kmのずれをみこむ必要がある。

二つ目には、1)建物被害および更地のみの被災指標グループとの照合における相対 ϕ 係数と、2)テントを含む全被災指標グループとの照合における相対 ϕ 係数を比較すると、どのメッシュの大きさにおいても、2)テントを含む全被災指標グループとの照合における相対 ϕ 係数の方が大きい。このことは、夜間可視画像を用いた推定手法が、建物被害の生じるような被災程度の重篤な地域だけでなく、より広い範囲の被災地を捉えていることを示している。

4. 阪神・淡路大震災(1995)における被災地の推定とその検証

(1) 検証のねらい

阪神・淡路大震災(1995年1月17日午前5時46分発生)における被災地推定の検証のねらいは、以下の3点である。

a) 被害形態の追加と面的な検証

マルマラ地震における被災地推定の検証では、5種類の被害を取り上げたが、他にも様々な被災形態があり得る。中でも停電は、光量の減少に直接反映されるであろう被災形態の一つである。また、マルマラ地震の検証では、被災地推定対象領域全体を面的に調査することはできなかった。そこで、次の5種類の市区町村単位での被害分布、1)死者、2)負傷者、3)全壊建物、4)半壊以下の被害を受けた建物、5)停電(1月17日午前8時00分の時点で停電していた地域を含む市区町村の分布)との照合を行った。

b) 雲の影響の検証

マルマラ地震の発生日及び翌日は、推定対象領域をほとんど雲が覆っていなかった(Hayashi et al.2000⁹⁾)。推定に用いる地震発生前の夜間可視画像において、雲が推定対象領域を覆っている場合、本来捕捉されるべき都市の光が隠され、雲の下の被災地を推定できない可能性がある。また、推定対象領域が、地震発生前は晴れていて、地震発当日曇った場合、被災地でない部分が被災地として推定される可能性がある。

阪神・淡路大震災の発生日及び前日は、被災地周辺に雲が存在する。よって、発生日と前日の夜間可視画像を用いた被災地推定の検証結果とマルマラ地震の推定被災地の検証結果を比較することで、雲の影響を検証することができる。

c) 大都市域への応用可能性の検証

マルマラ地震の被災地推定では、大都市イスタンブール市周辺の都市域が、地震発当日前日共に、ゲインに

Table 2 各照合におけるメッシュ A.B.C.D. の観測数, 期待値および χ^2 値, 相対 ϕ 係数

		現地調査の結果										
		建物被害/更地グループ					全被災指標グループ					
		観察された	観察されなかった	計	χ^2 -値	相対 ϕ	観察された	観察されなかった	計	χ^2 -値	相対 ϕ	
夜間可視画像を用いた被災地推定結果	0.9km × 0.9km	推定された	17 (8.96)	182 (190.05)	199	9.07	0.042	37 (15.75)	162 (183.25)	199	37.30	0.116
		推定されなかった	37 (45.05)	967 (955.96)	1001			58 (79.25)	943 (921.75)	1001		
		計	54	1146	1200			95	1105	1200		
	1.8km × 1.8km	推定された	20 (7.26)	90 (102.74)	110	29.07	0.124	38 (12.05)	72 (70.27)	110	76.32	0.264
		推定されなかった	21 (33.74)	490 (477.26)	511			30 (55.95)	481 (455.05)	511		
		計	41	580	621			68	553	621		
	3.6km × 3.6km	推定された	24 (11.59)	67 (79.41)	91	23.45	0.156	42 (20.73)	49 (70.27)	91	43.57	0.303
		推定されなかった	9 (21.41)	159 (146.59)	168			17 (38.27)	151 (129.73)	168		
		計	33	226	259			59	200	259		
	7.2km × 7.2km	推定された	16 (4.92)	21 (32.08)	37	38.88	0.345	22 (6.73)	15 (30.27)	37	57.17	0.505
		推定されなかった	3 (14.08)	103 (91.92)	106			4 (19.27)	102 (86.73)	106		
		計	19	124	143			26	117	143		
	14.4km × 14.4km	推定された	11 (4.84)	12 (18.16)	23	16.63	0.339	14 (6.05)	9 (16.95)	23	23.74	0.469
		推定されなかった	1 (7.16)	33 (26.84)	34			1 (8.95)	33 (25.05)	34		
		計	12	45	57			15	42	57		

対して都市の光が強すぎて飽和していることを理由に、被災地推定の対象からはずされている (Hayashi et al.(2000)⁸⁾). 大都市域では、光が飽和している可能性が高いと考えられる。そのような地域では、地震のインパクトにより光の強さが減少していても、減少後の光の強さがゲインよりも大きいために、その減少が捕捉できない恐れがある。よって、夜間可視画像を用いた被災地推定手法が、平常時に光が飽和している大都市域の被災地を捕捉できるか、検証しておく必要がある。阪神・淡路大震災の場合には、大都市域が被災地となっており、被災前1月16日の夜間可視画像では、阪神地域が飽和してしまっている。そこで、阪神・淡路大震災を事例に大都市域への応用可能性の検証を行う。

(2) 推定結果

Fig. 8, 9 はそれぞれ地震発生前の夜間可視画像(現地時間1月16日20時7分撮影)と、地震発生後の夜間可視画像(現地時間1月17日21時47分撮影)である。この2つの画像を用いて被災地推定が行われた。また、Fig. 10,

相対 ϕ 係数

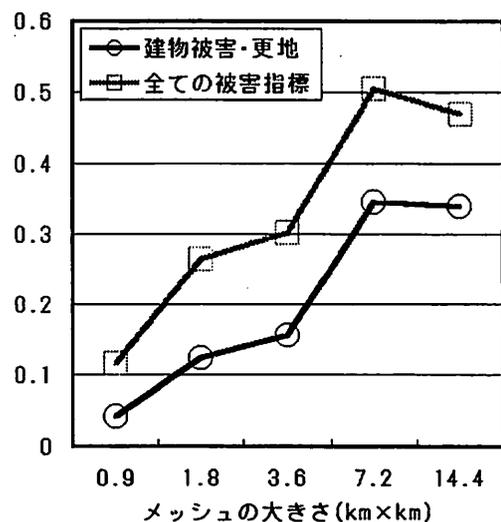


Fig.7 被災指標グループ及び、メッシュの大きさと相対 ϕ 係数の関係

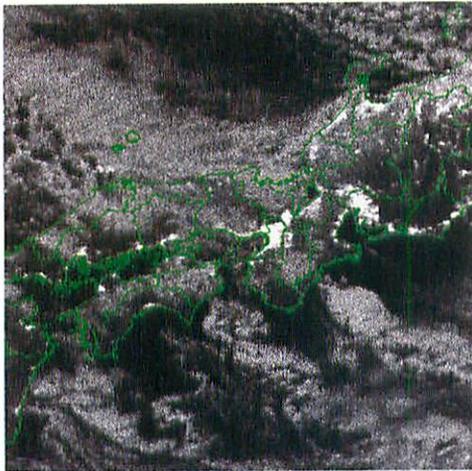


Fig. 8 地震発生前の夜間可視画像(現地時間 1月16日20時7分撮影)

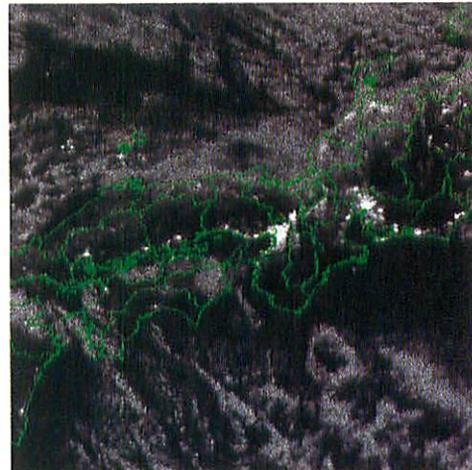


Fig. 9 地震発生後の夜間可視画像(現地時間 1月17日21時47分撮影)

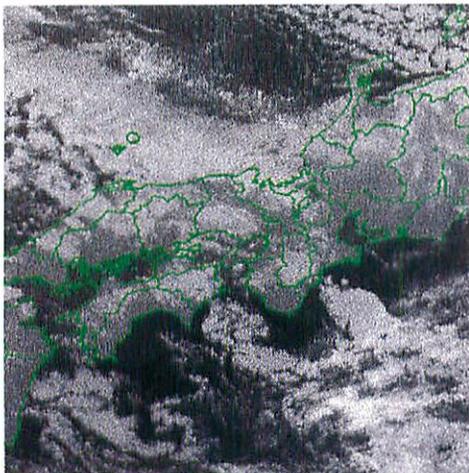


Fig. 10 地震発生前のTIRセンサー(現地時間 1月16日20時7分撮影)

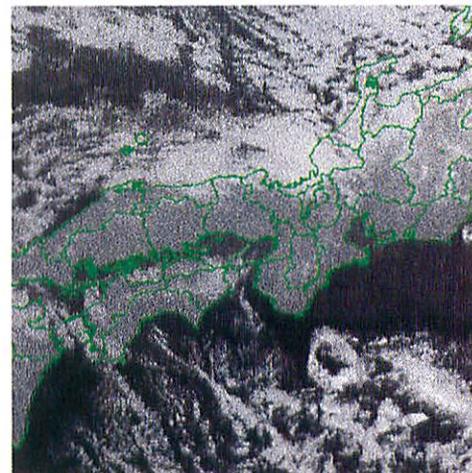


Fig. 11 地震発生後のTIRセンサー画像(現地時間 1月17日21時47分撮影)

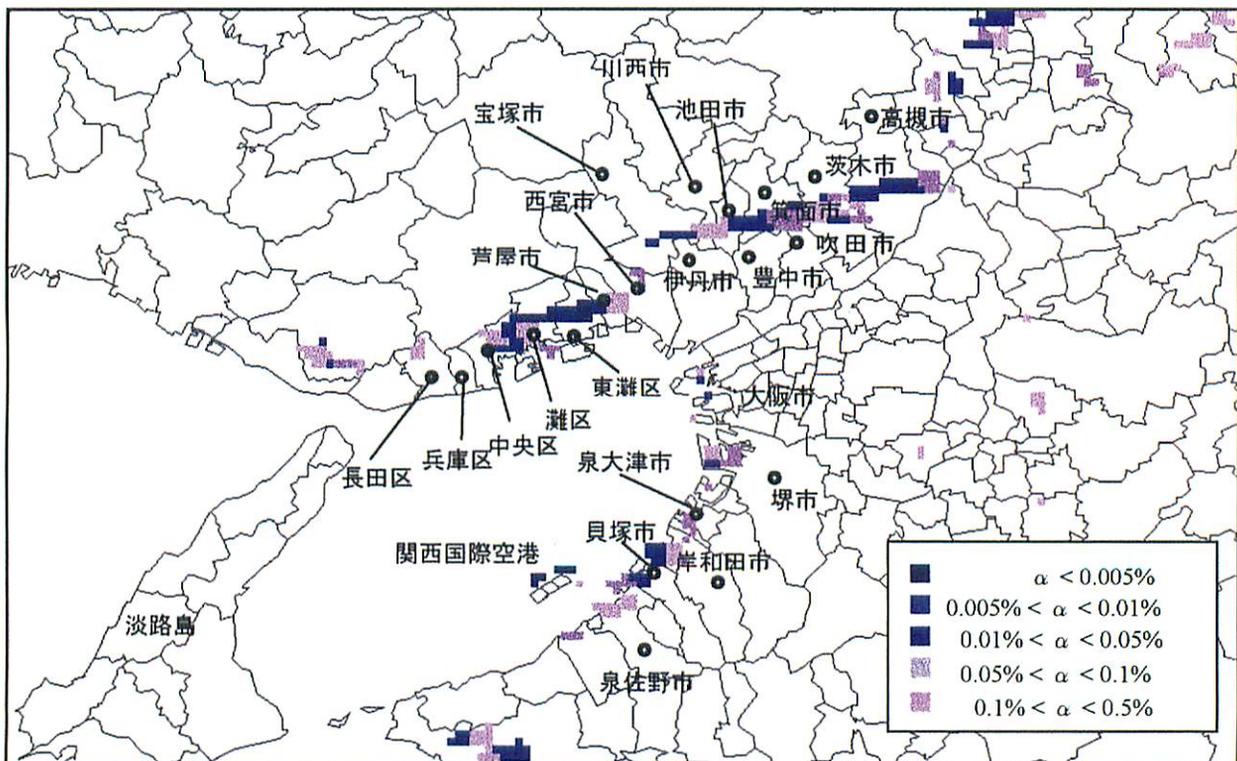


Fig. 12 阪神/淡路大震災における夜間可視画像に基づく推定被災地

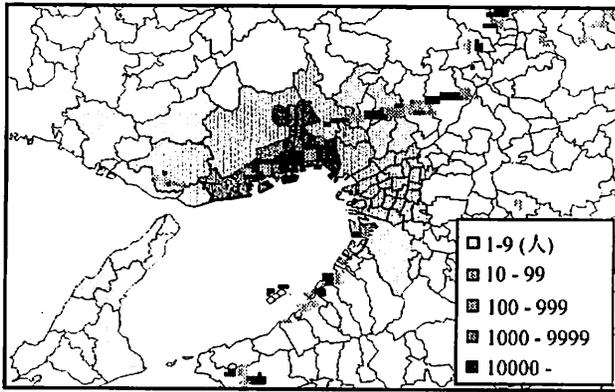


Fig. 13 死者の分布との比較

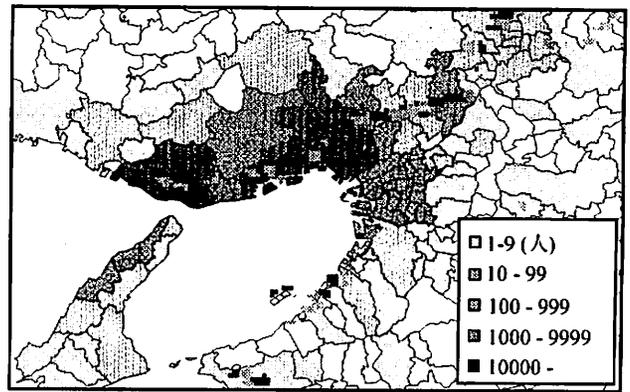


Fig. 14 負傷者の分布との比較

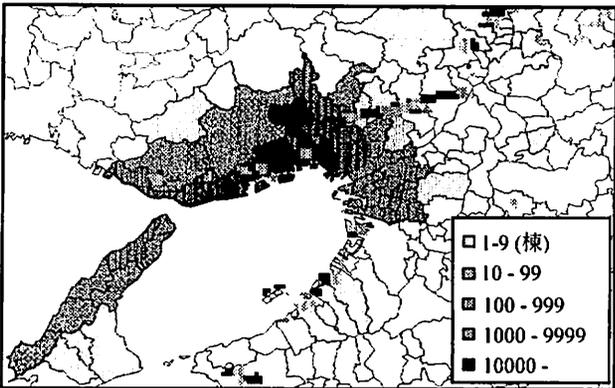


Fig. 15 全壊建物の分布との比較

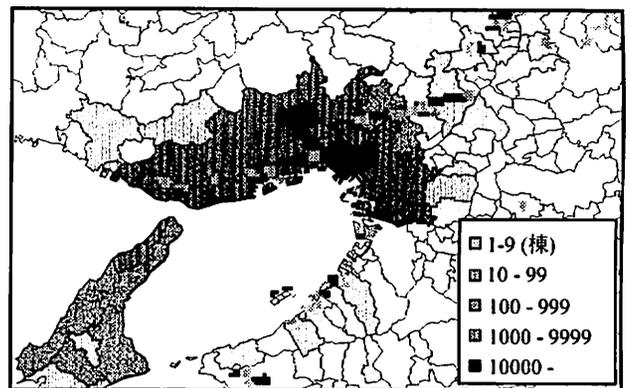


Fig. 16 半壊以下の建物の分布との比較

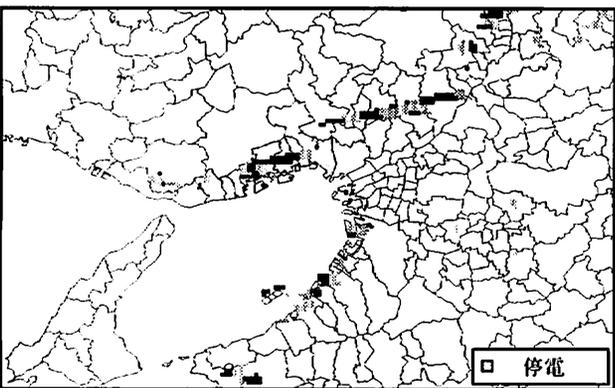


Fig. 17 停電の分布との比較

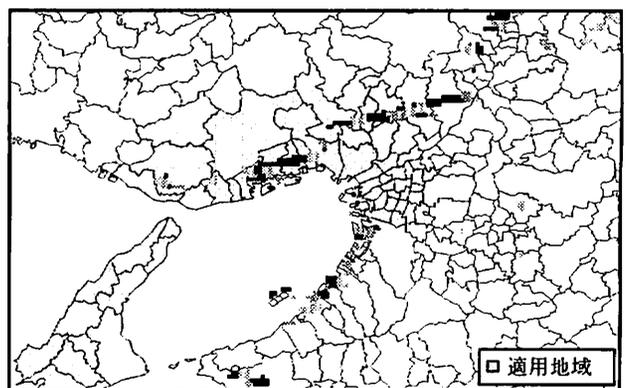


Fig. 18 災害救助法が適用された地域との比較

11 は、推定に用いた夜間可視画像と同じ領域の TIR センサー画像を示したものである。TIR センサー画像は地表面や雲の表面の温度を捉えている。Fig.10, 11 中、雲など温度の低い物体ほど白く映っている。地震発生前日当日共、対象領域を雲が覆っていることが分かる。これらの画像に映っているのは震源を中心とした南北約 900km、東西約 900km の領域である。

Fig.12 は、推定結果を示したものである。対象領域のうち、震源周辺を拡大して示してある。1(2)でも述べたように、マルマラ地震の被災地推定では、被災地として認定する光量の減少の有意水準 α を片側 0.5% 以上に設定したが、ここでは、 $\alpha=0.5\%$ 、 0.1% 、 0.05% 、 0.01% 、 0.005% の五段階で被災地と推定されるピクセルを図示している。また、Fig. 13, 14, 15, 16, 17 は、被災地推定結果と、5 種類の被害分布を重ね合わせたものである。

また参考までに Fig. 18 には被災地推定結果と災害救助法を適用された市区町村を重ね合わせたものを示した。

(3) 検証結果

a) 推定手法の有意性の検証

5 種類の被害毎に阪神・淡路大震災の被災地推定結果との照合を行った。照合は次のように行った。まず、推定対象領域にある 1629 の市区町村について、その市区町村で実際に被害が生じていたか、また、推定被災地グリッドを含んでいるかを調べた。各市区町村は、その市区町村で実際に被害が生じていたか、また、推定被災地グリッドを含んでいるかによって、次の 4 種類に分類できる。

A. 実被害も推定被災地グリッドも共に含む市区町村

B.実被害は含むが、推定被災地グリッドは含まない市区町村

C.推定被災地グリッドは含むが、実被害は含まない市区町村

D.実被害も、推定被災地グリッドも含まない市区町村
次に A, B, C, D に該当する市区町村数を数え、推定結果が有意であるか、すなわち市区町村 A, D の観測数が有意に大きく、市区町村 B, C の観測数が有意に小さいかどうかを χ^2 検定あるいはフィッシャーの直接法により検定した^{補注(1)}。被害種類毎における市区町村 A, B, C, D の観測数、期待値および χ^2 値、相対 ϕ 係数を Table. 3 に示す。検定の結果、どの被害の照合においても、推定が有意であることが支持された。

b) 検証結果の考察

Fig. 19 は、各被害との照合における相対 ϕ 係数を示したものである。推定結果とその検証から次の3つのことが明らかになった。

1 つ目は、照合の条件が異なるため単純に比較することはできないが、マルマラ地震の事例の照合における ϕ 係数と比較して、どの被害との照合においても、相対 ϕ 係数が低いということである。この原因としては、マルマラ地震の場合と異なり、被災地周辺が雲に覆われていたことが原因と考えられる。Fig. 12 中、淡路島の被害が全く捕捉されていないのも、被災前に雲に覆われていることが理由として考えられる。

2 つ目は、人的被害分布、建物被害分布との照合結果における相対 ϕ 係数を比較すると、死者の発生分布及び全壊建物の分布との照合における相対 ϕ 係数より、負傷者の発生分布及び半壊以下の建物被害の分布との照合における相対 ϕ 係数の方が大きいことである。この結果は、夜間可視画像を用いた被災地推定手法は、死者の発生あるいは建物の全壊といった大きなインパクトだけでなく、負傷者の発生、半壊以下の建物被害といった比較的小さなインパクトも捕捉する傾向があることを支持している。

3 つ目は、停電や全壊建物との照合における相対 ϕ 係数より、負傷者、半壊以下の建物との照合における相対 ϕ 係数の方が高いことである。この結果は、停電や建物の全壊といった物理的な電力供給の途絶だけでなく、電力を消費する人間の営みの停滞も光の減少に反映されていることを支持している。

4 つ目は、光の飽和していた阪神地域において被災地推定が成功していることである。これは、夜間可視画像を用いた被災地推定手法が大都市部の被災地推定に適用可能であることを支持する結果である。

5. 結語

トルコ・マルマラ地震(1999)および阪神・淡路大震災(1995)での検証を通して、夜間可視画像を用いた被災地推定手法に基づく推定結果が有意であることが明らかになった。また、大都市部においてもこの推定手法が適用可能であることが支持された。その一方で、雲によって推定精度が著しく落ち得ることも定量的に明らかになった。雲の影響をどのように取り除くかは今後の大きな課題である。

また、他の建物被害や死者の発生といった重篤な被災形態だけでなく、比較的被災程度の軽い地域を含めた、広い範囲の被災地を捕捉する傾向があることが明らか

Table 3 各照合における市区町村 A, B, C, D の観測数, 期待値および χ^2 値, 相対 ϕ 係数

		推定被災地			χ^2 値	相対 ϕ
		含む	含まない	計		
死者	あり	23 (6.62)	5 (21.38)	28	54.04	0.043
	なし	362 (378.38)	1239 (1222.62)	1601		
	計	385	1244	1629		
負傷者	あり	67 (27.18)	48 (87.82)	115	82.20	0.111
	なし	318 (357.82)	1196 (1156.18)	1514		
	計	385	1244	1629		
全壊建物	あり	32 (12.05)	19 (38.95)	51	44.62	0.053
	なし	353 (372.95)	1225 (1205.05)	1578		
	計	385	1244	1629		
半壊以下の建物	あり	38 (14.18)	22 (45.82)	60	54.40	0.064
	なし	347 (370.82)	1222 (1198.18)	1569		
	計	385	1244	1629		
停電	あり	8 (1.891)	0 (6.109)	8	25.98	0.016
	なし	377 (383.11)	1244 (1237.89)	1621		
	計	385	1244	1629		

相対 ϕ 係数

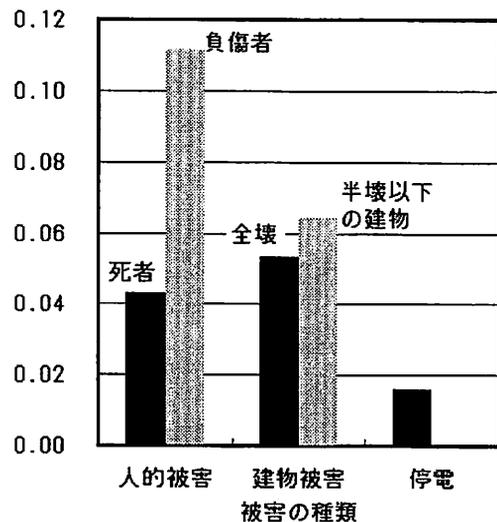


Fig. 19 各被害との照合における相対 ϕ 係数

なった。このことは、物理的なエネルギーの途絶だけが、夜間可視画像に反映されるわけではなく、人々の営みの停滞に伴うエネルギー消費量の低下も、夜間可視画像に反映されていることを示唆している。今後、自然災害による人々の営みの停滞を捕捉するものとして DMSP/OLS 夜間可視画像の利用価値は高いと考えられる。

謝辞

本研究遂行にあたり、DMSP/OLS 夜間可視画像を提供して下さった米国商務省海洋大気庁地球物理データセンター(NOAA/NGDC)に感謝の意を表するものである。また、被災地推定プログラムは木村広行氏(京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻ライフライン工学口座地震工学分野所属)が開発したものを使わせていただいた。ここに謝意を表す。

補注(1)

もし夜間可視画像を用いた推定手法が全くでたために被災地推定を行っていたとする。その場合、メッシュ A の数と B の数の比は、推定被災地を含むメッシュの総数と含まないメッシュの総数の比に近くなると考えられる。また、メッシュ C の数と D の数の比も同様である。このような考え方に基づいて、推定手法がでたためであった場合のメッシュ A, B, C, D の数の期待値を計算することができる。メッシュ A, D の数が有意に大きいかを検定するとは、メッシュ A, D の観測数が期待値より有意に大きく、メッシュ B, C の観測数が期待値より有意に小さいかを検定することを意味する。 χ^2 値は、観測値と期待値がどれくらい離れているかを表す指標であり、 χ^2 検定では、 χ^2 値が χ^2 分布に近似的に従うと考慮して検定を行う。しかし、5 未満の期待値がある場合には、 χ^2 値の χ^2 分布への近似が良くないため、 χ^2 検定を適用するのは望ましくない。その場合に変わりに用いられるのが、フィッシャーの直接法である。フィッシャーの直接法では、周辺度数を観測された値に固定した場合に、メッシュ A, B, C, D の観測値のとり得るパターンの確率を全て計算し、実際に観測されたパターンが得られる確率と、そのパターンよりも、メッシュ A, D が大きく、C, D が小さいパターンが得られる確率の和が有意水準より大きいかどうかで検定を行う。マルマラ地震、及び阪神・淡路大震災の被災地推定の検証においては、A, B, C, D の期待値が 5 未満となるものがあつたため、 χ^2 検定とフィッシャーの直接法の 2 つを使い分ける必要があつた⁹⁾。

補注(2)

四分点相関係数 (ϕ 係数) とは、共に 2 通りの値しかとらない 2 変数の間の相関の強さを表す指標である。Table 4 のような 2×2 のクロス表を想定すれば、 ϕ 係数は、式[2]で計算される。

$$\phi = \frac{N_{11} \cdot N_{22} - N_{12} \cdot N_{21}}{\sqrt{N_{1\cdot} \cdot N_{2\cdot} \cdot N_{\cdot 1} \cdot N_{\cdot 2}}} \quad [2]$$

ここで、ある周辺度数 $N_{\cdot 1}$, $N_{\cdot 2}$, $N_{1\cdot}$, $N_{2\cdot}$ をもつクロス表がとり得る ϕ 係数のとり得る最大値 ϕ_{\max} は周辺度数 $N_{\cdot 1}$, $N_{\cdot 2}$, $N_{1\cdot}$, $N_{2\cdot}$ によって式[3]のように表される。

$$\begin{aligned} \phi_{\max} &= \frac{N_{11} \cdot N_{22} - 0 \cdot N_{21}}{\sqrt{N_{1\cdot} \cdot N_{2\cdot} \cdot N_{\cdot 1} \cdot N_{\cdot 2}}} \\ &= \frac{N_{\cdot 1} \cdot N_{\cdot 2} - 0}{\sqrt{N_{1\cdot} \cdot N_{2\cdot} \cdot N_{\cdot 1} \cdot N_{\cdot 2}}} \\ &= \sqrt{\frac{N_{\cdot 1} \cdot N_{\cdot 2}}{N_{1\cdot} \cdot N_{2\cdot}}} \quad [3] \end{aligned}$$

(ただし、 $N_{1\cdot} \leq N_{\cdot 1}$ とする。)

このように、 ϕ_{\max} はクロス表の周辺度数によって変化するので、周辺度数の異なる 2 つのクロス表の間で、 ϕ 係数の大きさを単純に比較することはできない。そこで、 ϕ 係数を ϕ_{\max} で割った相対 ϕ 係数を 2 変数の関連性の測度とすることで、周辺度数の異なる 2 つのクロス表間で関連性の強さの比較が可能となる¹⁰⁾。

Table. 4

		変数 Y		
		Y ₁	Y ₂	計
変数 X	X ₁	N ₁₁	N ₁₂	N _{1.}
	X ₂	N ₂₁	N ₂₂	N _{2.}
	計	N _{.1}	N _{.2}	N

参考文献

- 1) Croft, T: Nighttime Images of the Earth from Space, Scientific American, Vol. 239, No.1, pp.68-79, 1978
- 2) Welch, R: Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns From Satellite Data, Remote Sensing of Environment, Vol.9, pp.1-9, 1980
- 3) 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, Vol.13, No.4, pp.1-14, 1993
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) Hayashi, H. et al.: International Collaboration for the Early Damaged Area Estimation System Using DMSP/OLS Nighttime Images, Proceedings of IEEE2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol.VI, pp.2697-2699, 2000
- 9) 森敏昭, 吉田寿夫: 心理学のためのデータ解析テクニカルブック, 北大路書房, pp.181-189, 1990.
- 10) 池田央: 社会科学・行動科学のための数学入門 2-統計的方法 I 基礎, 新曜社, pp.146-149, 1976.

(原稿受付 2000.6.21)