標高の時系列変化に基づく人為的な土砂移動量の推計に関する研究 ―大阪府岬町におけるケーススタディー

黒岩　史[1]・奥岡　桂次郎[2]・杉本　賢二[3]・谷川　寛樹[4]

[1]学生会員　名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8603　名古屋市千種区不老町D2-1）
E-mail：kuroiwa.fumi@c.mbox.nagoya-u.ac.jp
[2]学生会員 名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8603　名古屋市千種区不老町D2-1）
E-mail：okuoka.keijiro@g.mbox.nagoya-u.ac.jp
[3]正会員 名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8603　名古屋市千種区不老町D2-1）
E-mail：k.sugimoto@urban.env.nagoya-u.ac.jp
[4]正会員 名古屋大学大学院教授　環境学研究科（〒464-8603　名古屋市千種区不老町D2-1）
E-mail： tanikawa@nagoya-u.jp

本研究では，時系列のDEM（デジタル標高モデル）を用いて，その標高変化から土砂移動量を推計する手法の有効性を検証するために，大阪府岬町の土砂採取地におけるケーススタディを行った．土砂採取前のDEMには数値地図250mメッシュ，数値地図50mメッシュ，基盤数値情報10mメッシュを用い，また，土砂採取後のDEMには基盤数値情報5mメッシュ，ASTER GDEMを用いて，土砂採取前後の体積差分をGIS（地理情報システム）を使って推計した．その結果，土砂採取量の公表値は約7000万㎥であるのに対し，土砂採取後の5mメッシュと採取前の10m，50m，250mメッシュの土砂体積の差分は，それぞれ約4831万㎥，約4666万㎥，約4183万㎥という推計値となった．

Key Words : *DEM, GIS, soil and stone, hidden material flow, elevation change*

1．はじめに

日本の経済社会における天然資源等の総物質投入量は一年間に約18億tとされているが，そのうち約7.3億t（40%）が国内資源である[1]．更に，国内資源の内訳を見ると，岩石や砂利，石灰石といった非鉱物資源が約87%を占めており，膨大な量が社会に投入されている非鉱物資源は重要な国内資源であるといえる．しかし，これらの総物質投入量には，隠れたフロー（HMF : Hidden Material Flow）が含まれておらず，「環境・循環型社会・生物多様性白書」[2]においても問題視されている．

隠れたフローとは，人間活動によって直接使用する資源以外に付随的に採取・掘削されるかまたは廃棄物として排出されながらも，経済財として扱われないために，経済活動に表れず見えにくい物質フローをいう．環境省総合環境政策局によって推計された，日本における隠れたフロー量の推計および内訳[3]を**表－１**に示す．国内外を合計すると，総物質投入量の約2倍の隠れたフローが発生していると推計されている．また，その内訳を見ると，捨石・不用鉱物や建設工事に伴う掘削といった土砂資源の隠れたフローが多いことが目立つ．このような人間活動による土砂の移動や攪拌は大規模な範囲で引き起こされることが多いため，自然環境に膨大な影響を与えており[4]，将来の土砂資源の損失も懸念される．そのため，隠れたフローも含めた土砂がこれまでにどれだけ攪拌または喪失されたかを把握するために，土砂の移動量を広域的・長期的に推計し，人間活動の表層への影響を定量化することが重要であるといえる．

土砂の移動に関する既往研究として，産業連関表に基づいた土石資源物質フローの検討[5]などの研究が行われているが，地理的条件や隠れたフローまでを含めた土砂資源の動態に関する研究は少ない．また，人間活動の表層への影響の評価に関する研究として，建築の分野などでは，標高の変化から切土・盛土分布を把握する研究[6][7]

表−１　日本における「隠れたフロー」の内訳

(単位：億t)

国内の隠れたフロー量	捨石・不用鉱物量（覆土量を含む）	0.34
	建設工事に伴う掘削量	5.95
	土壌浸食量	0.07
国外の隠れたフロー量	捨石・不用鉱物量（覆土量を含む）	28.16
	土壌浸食量	1.42
	間接伐採量	0.59
	肉生産時の飼料投入量	0.10
合計		36.63

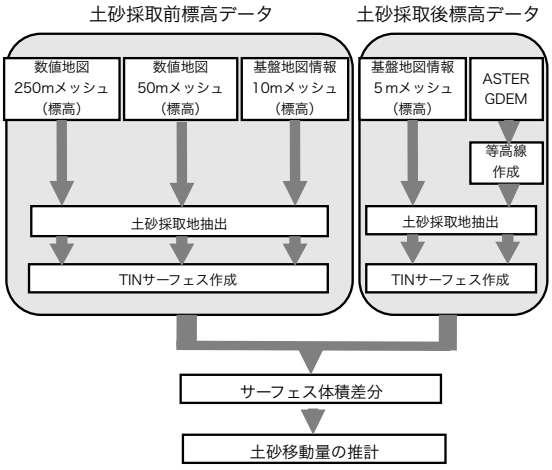
などが行われているが，限られた狭い範囲における例が多い．

一方，広い範囲における人間活動の表層への影響を評価する情報として，地理情報システム（Geographic information system：GIS）の普及に伴って，デジタル標高データ（Digital Elevation Model:DEM）の整備が進められ，利用可能になっている．日本国内のDEMは，1/25000地形図をデジタル化したものだけでなく，航空レーザ測量や航空写真から作成された高精度なDEM情報の整備と公開が国土地理院によって急速に進められている．更に，2009年には経済産業省と米国航空宇宙局から解像度約30mのASTER GDEMが無償で公開されるなど，全球を網羅したDEMの整備も進んでいる．

以上に述べた，土砂の隠れたフローを把握することの困難性と，広域なDEMの普及をふまえ，本研究では，土砂の移動に伴って標高が変化することに着目した．人間活動による表層への影響を評価するために，GISを用いて，地理的条件や隠れたフローも考慮した土砂移動量および攪拌量を標高の経年変化から推計する手法を提案する．国内外で整備が進んでいるDEMを使用することで土砂移動量および攪拌量を把握できれば，統計に現れず把握が困難であった土砂の隠れたフローを把握するための，汎用性が高い手法になると考えられる．本研究は，その有効性を検討するために，大阪府岬町の土砂採取地におけるケーススタディを行うことを目的とする．

２．研究手法

本研究の手順を**図−1**に示す．まず，土砂採取前と土砂採取後の標高データを用意し，各データから土砂採取地を抽出する．その後，標高データからTIN（Triangulated Irregular Network:不規則三角形網）サーフェスを作成して



図−1　本研究の手順

表−２　本研究で使用した標高データ

		作成期間	データソース	データカバー域	測量／撮影年	刊行年	高さ精度
土砂採取前標高データ	**数値地図 250mメッシュ（標高）**	国土地理院	1/25000地形図	日本全国	1972~1999	2002	7.2m
	数値地図 50mメッシュ（標高）	国土地理院	1/25000地形図	日本全国	1972~1999	2001	7.2m
	基盤地図情報 10mメッシュ（標高）	国土地理院	1/25000地形図	日本全国	1972~1999	2009	5.0m
土砂採取後標高データ	**基盤地図情報 5mメッシュ（標高）**	国土地理院	航空レーザー測量	日本国土の約45%	2005~2009	2010~	0.3m
	ASTER GDEM	経済産業省／米国航空宇宙局	ASTER (地球観測衛星)	N83°～S83°	2000~継続中	2009	7~14m

データの立体化を行った上で，土砂採取前後のそれぞれの標高データの体積を行い，土砂採取前後の体積の差分計算をして土砂移動量の推計を行う．

⑴ 本研究で使用した標高データ

本研究で使用した標高データを**表-2**に示す．

数値地図250mメッシュ（標高），数値地図50mメッシュ（標高），基盤地図情報10mメッシュ（標高）はいずれも1972年から1999年に刊行された複数の2万5千分1地形図に描かれている等高線を元データとして作成された国土地理院刊行の数値標高モデルデータであり，日本全国をカバーしている．250mメッシュでは，二次メッシュを経度方向及び緯度方向にそれぞれ40等分して得られる各区画の中心点の標高値が記録されており，標高点間隔は実距離で約250mとなっている．同様に，50mメッシュでは200等分，10mメッシュでは1000等分して得られる各区画の中心点の標高値が記録されており，標高点間隔の実距離はそれぞれ，約50m，約10mとなっている．高さ精度は，数値地図250mメッシュおよび50mメッシュが平均二乗誤差で7.2m以内，基盤地図情報10mメッシュが標準偏差で5m以内となっている．

基盤地図情報5mメッシュ（標高）は，航空レーザ測量を基にしたデータが国土地理院によって整備されている．航空レーザ測量とは，航空機に搭載したレーザスキャナから地上にレーザ光を照射し，地上から反射するレーザ光との時間差より得られる地上までの距離と，GPS測量機，IMU（慣性計測装置）から得られる航空機の位置情報より，地上の標高や地形の形状を調べる測量方法であり，作成されたデータの高さ精度は±15cmとされている．

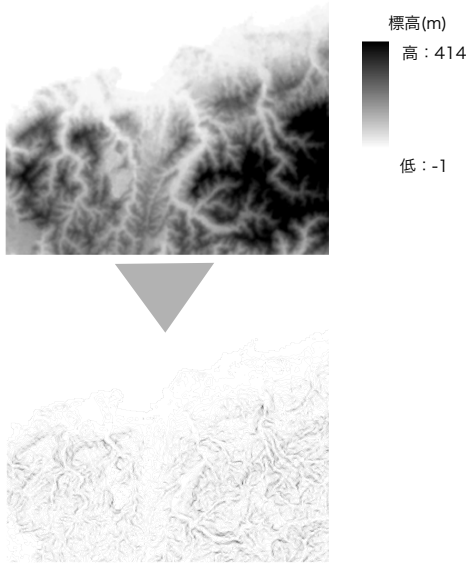


図-2 ASTER GDEMからの等高線作成

ASTER GDEMは経済産業省と米国航空宇宙局が共同運用している衛星搭載型地球観測光学センサASTERにより取得した衛星画像データから作成され，北緯83度から南緯83度の地球の全陸域を約22600タイルでカバーしている．解像度は約30mであり，高さ方向の誤差は標準偏差で7m~14mとされている．

⑵ 等高線作成

ASTER GDEMは，GeoTIFF形式で整備されている．本研究では，GeoTIFF形式の標高データから，GISを用いて10m間隔の等高線を作成した後，土砂採取地を抽出した．GeoTIFF形式の元データおよび等高線作成後のASTER GDEMを**図-2**に示す．

⑶ TINサーフェスの作成

土砂採取前後の標高データから，TINサーフェスを作成した．TINは地理空間を，重なり合わない連続する三角形に分割するベクタデータで，サーフェス形状の一表現方法である．GISではドローネ三角形分割によって頂点のセットを三角形に結ぶことにより構成され，頂点は一連のエッジに接続され，三角形ネットワークを形成している．

TIN サーフェスでは，三角形の頂点をサーフェス上に不規則に配置されるため，サーフェスの変化が激しいエリアや詳細を調べたいエリアでは TIN を高解像度に，変化が少ないエリアでは TIN を低解像度に設定することも可能であり，標高変化を捉えるのに適しているといえる．

⑷ 土砂移動量の推計

土砂移動量の推計は，土砂移動前後の標高データから作成したTINサーフェスを基に，以下の式を用いてサーフェスの体積差分を計算することで行った．

$$MF(soil,sand)=\sum_{i}\left(V_{0,i}-V_{1,i}\right) \qquad (1)$$

ここで，$MF_{(soil,sand)}$：対象地域における土砂移動量，$V_{0,i}$：地点iにおける土砂採取前の体積，$V_{0,i}$：地点iにおける土砂採取後の体積とする．

図-3　ケーススタディ対象地
（出典：電子国土基本図　オルソ画像）

図-4　ケーススタディ対象地（2012年7月27日撮影）

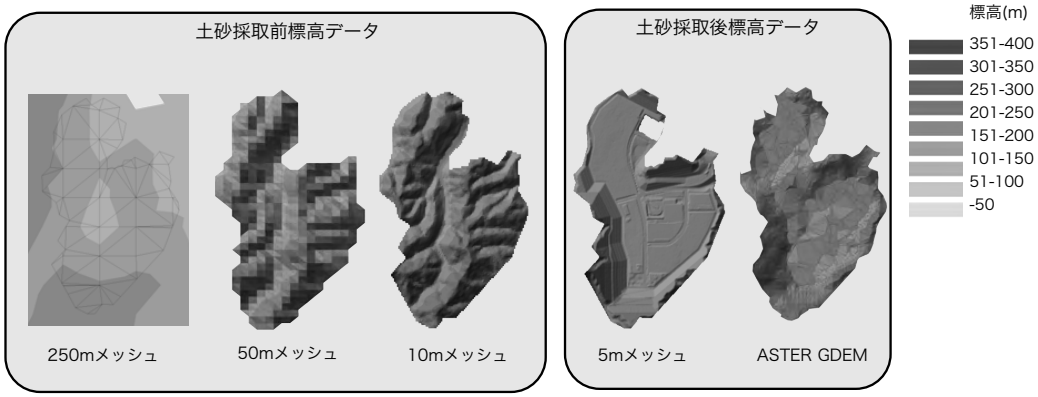


図-5　標高データからのTINサーフェス作成

3．ケーススタディ対象地

本研究では，人間活動によって標高変化を伴った土砂の移動が行われ，土砂の採取期間，採取量が公表されている地域である，大阪府泉南郡岬町多奈川地区の関西国際空港二期事業に伴う土砂採取・供給工事の跡地をケーススタディ対象地とした．図-3に，電子国土基本図から引用したケーススタディ対象地のオルソ画像を示す．岬町多奈川地区では，2000年3月から2005年5月にかけて関西国際空港二期事業の埋立用土砂が採取・搬出され，土砂採取地面積は128ha，採取土量は約7000万㎥と公表されている[9]．また，土砂採取地域の跡地は，多目的公園が整備される予定となっており，2005年から整備が開始され，現在も進行中である．（図-4）

4．土砂移動量推計結果

(1) TIN サーフェス作成結果

TIN 作成結果を図-5および表-3に示す．土砂採取前の対象地内平均標高は，250mメッシュでは120.4m，50mメッシュでは125.6m，10mメッシュでは126.57mと，データによって最高で6.17mの差が生じた．一方，土砂採取後の平均標高は，5mメッシュでは85.31m，ASTER GDEMでは84.83mであり，その差は0.48mとなった．各データの高さ精度は，5mメッシュが0.3m，ASTER GDEMが7m~14mとされているが，本研究の対象地においてはその精度にほぼ差はなかったと考えられる．

(2) 体積差分による土砂移動量推計結果

(1)式によって推計された，土砂採取前と土砂採取後の

表-3　TINサーフェス作成結果

	250mメッシュ	50mメッシュ	10mメッシュ	5mメッシュ	ASTER GDEM
三角形頂点数	140	436	9154	35905	2927
三角形数	154	783	17704	70466	5695
平均標高	120.4	125.6	126.57	85.31	84.83
標準偏差	28.63	33.13	32.98	28.15	28.65

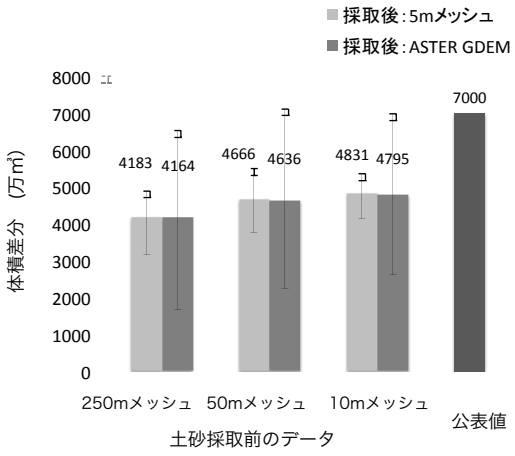


図-6　体積差分結果

表-4　体積差分結果　（単位：万㎥）

	5mメッシュ		ASTER GDEM	
	GISによる体積差分結果	誤差範囲	GISによる体積差分結果	誤差範囲
250mメッシュ	4183	3172～4897	4164	1650～6526
50mメッシュ	4666	3770～5495	4636	2249～7124
10mメッシュ	4831	4135～5354	4795	2614～6984

体積差分結果を**図-6**および**表-4**に示す．土砂採取後のデータとして5mメッシュを用いた場合とASTER GDEMを用いた場合では結果に大きな差は見られず，土砂採取前のメッシュが細かくなるにつれ，体積差分が大きい値になるという結果になった．しかし，5mメッシュの高さ精度が0.3m，ASTER GDEMの高さ精度が7m~14mであることを考慮すると，体積結果としてとりうる誤差範囲は大きく異なると考えられる．

⑶　土砂採取後の体積増減地分布

土砂採取地内における体積増減地の分布を，**図-7**に示す．250mメッシュを用いた場合，体積増減地の境界線は

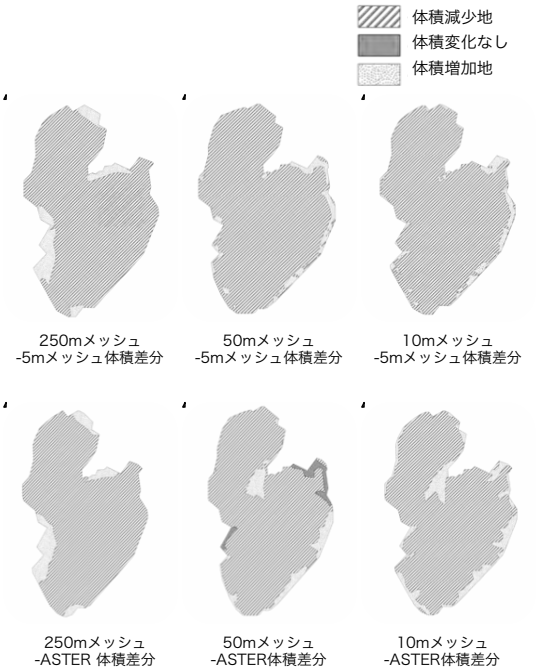


図-7　土砂採取地の体積増減地の分布

粗く，50m，10mと使用したメッシュが細かくなるに伴って，細かい体積増減地の分布が見られる．また，土砂採取後の標高データとして5mメッシュを用いた場合とASTER GDEMを用いた場合の体積増減地分布を比較すると，特に土砂採取前の標高データとして10mメッシュを使用した場合に，ASTER GDEMとの差分結果の体積増減地の分布が細かく見られる．**表-2**および**表-3**に示した通り，5mメッシュとASTER GDEMでは，解像度，TIN作成結果共に大きく異なる．ASTER GDEMは標高点間隔が約30mであり，対象地内標高点も，5mメッシュと比較して12分の1以下である．しかし，ASTER GDEMではGeoTIFF形式の標高データから10m間隔の等高線を作成した後，TINサーフェスを作成したため，**図-5**に示した通り，三角形の頂点がサーフェス上に不規則に配置され，サーフェスの変化が激しいエリアではTINサーフェスによる細かい表現が可能になったと考えられる．

５．おわりに

本研究では，土砂の移動に伴って標高が変化することに着目し，GISを用いて，隠れたフローも考慮した土砂移動量を標高の経年変化から推計する手法を提案した．その有効性を検討するために，大阪府岬町の土砂採取地でのケーススタディを行った．

今回のケーススタディでは，標高変化からの推計値が公表値よりも小さな値となった．その原因として，①公表値の土砂量の測定方法が正確にはわからないこと，②ケーススタディ対象地では土砂採取事業が終了した直後から跡地の整備が進められていたため，土砂採取後にも標高が上昇する変化が発生し，標高変化からの推計値が小さな値となった可能性があること，などが考えられる．

本手法の特徴は，DEMからGISを用いて土砂移動の動態を把握しようとすることで，地理的条件や隠れたフローも考慮した広範囲な推計が期待できることである．大規模な土砂の移動は，人為的なものだけでなく，土砂崩れなどの自然現象も多いが，人為的な土砂の移動と自然現象による土砂の移動は，地理的条件が異なることが多い．地理的条件を考慮できることを活かし，統計に現れない人為的な土砂移動である隠れたフローと自然現象を区別する方法を確立すれば，広域的かつ画一的に隠れたフローを推計する方法として有効であると考えられる．

今後の課題として，推計手法の精度をより詳細に判断することが挙げられる．統計に現れない隠れたフローを把握するためには，推計の誤差範囲を正確に把握することが必須であると考えられる．

謝辞：本研究は，環境省環境総合研究推進費(S-6-4, E1105)の助成を受けて行われたものである．ここに感謝の意を表します．

参考文献

1) 環境省，日本の物質フロー2006
2) 環境省，各分野の施策等に関する報告第三章循環型社会の形成，H23年版環境・循環型社会・生物多様性白書，pp. 213，2011
3) 環境省総合環境政策局編，平成21年度環境統計集
4) 橋本加代子：大阪湾周辺地域における土砂採取地跡利用とその要因に関する研究，都市計画報告集No.1，pp62-65，2003
5) 坂本光二，中村裕文，島岡隆行，長谷川良二，大迫政浩：循環型・低炭素型社会に向けた土石系資源循環のフロー制御に関する研究，　土木学会論文集G(環境)，Vol.67，No.6，ppII_235-242，2011
6) 高橋広人，福和伸夫，鈴木康弘，梅津正倫，飛田潤：地形改変の進んだ丘陵地における強震動予測のための表層地盤モデルの構築−名古屋大学東山キャンパスを例として−，日本建築学会構造系論文集，618，pp33-39，2007
7) 谷川寛樹，井村秀文：都市建設にともなう総物質必要量の定量化と評価に関する研究−住宅地整備のケーススタディ−，土木学会論文集，671，pp35-48，2001
8) 大阪府HP　岬町多奈川地区多目的公園計画に係る土砂採取事業：//www.pref.osaka.jp/kankyohozen/assess/tanagawa.html

（2012.7.18 受付）

STUDY ON THE ESTIMATION OF ANTHROPOGENIC DISTURBANCE OF SOIL AND STONE USING THE TIME SERIES ELEVATION DATA –CASE STUDY IN MISAKI-CHO, OSAKA PREFECTURE-

Fumi KUROIWA, Keijiro OKUOKA, Kenji SUGIMOTO and Hiroki TANIKAWA

In this study we suggest a way to estimate anthropogenic disturbance of soil and sand based on time series elevation change. In order to study the effectiveness of this method, we conducted a case study focusing on Misaki-cho, Osaka Prefecture where a large scale extraction of soil and sand has occured. The disturbed volume of soil and sand was calculated using time series DEM (Digital Elevation Model) on GIS (Geographic Information System).We used National Land Numerical Information 250m mesh, 50m mesh and 10m mesh as the pre-extraction DEM, and National Land Numerical Information 5m mesh and ASTER GDEM as the post-extraction DEM. According to the published value, the extraction volume was 70 millions cubic meters. However, our estimations of the volume difference between 250m mesh and 5m mesh, 50m mesh and 5m mesh, and 10m mesh and 5m mesh mesh were found to be 41.83 millions cubic meters, 46.66 millions cubic meters, 48.31 millions cubic meters, respectively.