

パラオ共和国バベルダオブ島における土地資源利用効率の検討 Efficiency of Land Resource Use in Babeldaob Island, Republic of Palau

乃田啓吾*・飯田晶子**・渡部哲史**・大澤和敏***・沖一雄*

*東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

**東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

***宇都宮大学農学部 (〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350)

NODA Keigo*, IIDA Akiko**, WTANABE Satoshi**, OSAWA Kazutoshi***, OKI Kazuo*

*Institute of Industrial Science, the University of Tokyo (4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505)

**Graduate School of Engineering, the University of Tokyo (7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656)

***Faculty of Agriculture, Utsunomiya University (350 Mine-machi, Utsunomiya, Tochigi, 113-8656)

Abstract

The impacts of climate and socioeconomic change in the future are important factors to consider when discussing the issues of sustainable development in the Pacific Islands. The tourism industry is the key driving force behind the economic growth in island region and it is promoted by the environmental attractions. In this study, the relationship between the historical change of land use and sediment yield in Babeldaob Island in Palau was estimated by applying Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and assessed in terms of the sufficiency of land resource use. As a result, the annual sediment yield in three time slices, which represent self-sufficient (1921), resource development (1947) and environment conservation (2006) periods, were 2.6ton ha⁻¹ yr⁻¹, 8.1ton ha⁻¹ yr⁻¹ and 5.8ton ha⁻¹ yr⁻¹ respectively. Annual sediment yield per capita (SRc) as an indicator for the sufficiency of land resource use simply decreased in these three time slices as 0.41ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹(1921), 0.30ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹(1947年), and 0.29ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹ (2006). Furthermore, SRc with land resource use by tourist came down to 0.27ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹ and it gave a quantitative explanation for the promotion of tourism decreased the dependence on the local resources and environmental load.

Key words: Land use/cover, Sediment runoff, SWAT, Efficiency of land resource use and Sustainable tourism.

要 旨

本研究では、観光の振興による経済発展を実現し、先進的な自然保護施策を実施しているパラオ共和国バベルダオブ島に SWAT を適用し、長期の土地利用変化による土砂流出量の変化を推計し、土地資源利用効率の観点から考察した。その結果、年平均土砂流出量は、土地資源の利用形態により、自給自足時代には 2.6ton ha⁻¹ yr⁻¹ (1921 年)、資源開発時代には 8.1ton ha⁻¹ yr⁻¹ (1947 年)、自然保護時代では 5.8ton ha⁻¹ yr⁻¹ (2006 年)と推移した。また、土地資源利用効率の指標として一人当たり土砂流出量を算出したところ、自給自足時代には 0.41ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹(1921 年)、資源開発時代では 0.30ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹ (1947 年)、自然保護時代では 0.29ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹ (2006 年)と単調に減少した。さらにこの指標では、観光者による資源利用も明示的に評価可能であり、観光産業の振興が、土地資源利用効率の向上にも寄与していることを示唆している。

キーワード: 土地利用/被覆, 土砂流出, SWAT, 土地資源利用効率, 持続可能な観光

1. はじめに

太平洋島嶼国においては、利用可能な資源が希少であり、生活に必要な物資を外部に依存しているため、他地域と比較して、将来の気候変動と社会経済変化の影響は深刻である(Peling and Uitto, 2001; Encontre, 1999)。また、観光産業が経済成長の基幹産業であり、多くの観光客が美しい自然環境を目当てに訪れているが、その観光資源は気候および社会変化に対して脆弱である(Jiang et al., 2009)。1990 年

代以降の開発パラダイムと同様に、観光分野においても、環境、経済、地域社会の調和を目指す持続可能な観光(Sustainable tourism)の重要性が国際的に認識され(UNEP, 2014), その実現に向けては、ケープタウン宣言において、観光に携わる全ての人(政府・観光従事者・観光者)が、観光地の自然環境と地域文化に対して責任ある行動をとるべきである、とする責任ある観光(Responsible tourism)が提唱されている(International Conference on Responsible Tourism in Destinations [ICRTD], 2002). 本研究で対象とするパラオ共和国は、観光の振興による経済発展を実現しつつ、自然保護に関する制度・政策において先進的な取り組みを実施しており(飯田・武, 2015), 持続可能な観光について考究する上で重要である。

一般に地形が急峻で年間降雨量の多い太平洋島嶼国において、人間活動による過剰な土地資源の利用は、陸域における土壌侵食および海域への土砂および栄養塩類の流出を加速させ、物質循環や生態系の持続性を低下させる。現在、太平洋地域のサンゴ礁の50%が危機に瀕しており、その半分は陸域から流入した環境負荷の影響を受けている(Burke et al., 2011). 特に、陸域から流入した土砂や栄養塩類は、サンゴ礁生態系の多様性喪失の誘因であり(Fabricius, 2005), 観光資源としての価値を著しく低下させる。パラオ共和国を対象とした研究では、Golbuuら(2011a; 2011b)が、バベルダオブ島の4流域を対象に現地観測を実施し、陸域の人間活動による土地開発が海域への土砂流出量を増加させていることを示した。また、ガルブク(Ngermeduu)川河口部において、海水中の浮遊土砂濃度とサンゴの生態に関する調査を実施し、陸域から海域に流出した土砂によりサンゴの個体数や多様性に悪影響があることを示した。工藤ら(2013; 2014)は、ガリキル(Ngerikiil)川流域内の造成地を含む小流域を対象に、現地観測および数値シミュレーションを実施し、土地開発過程において裸地状態とする期間に大量の土砂が流出することを定量的に示した。従来の研究では、現在の森林開墾や短期的な土地造成がもたらす土砂流出による環境負荷量の算出が主であり、長期的な土地資源利用の変化による影響に関しては、得られるデータの制約から研究事例が極めて少ない。しかしながら、将来の気候および社会変化への適応策を考えるにあたっては、当該地域が過去に経験した土地資源利用の変化による環境負荷の実態を踏まえる視点が重要である。

そこで本研究では、パラオ共和国バベルダオブ島を対象に、土地資源利用形態の異なる3時期における土砂流出による環境負荷の比較を目的とした。そして、太平洋島嶼国における持続性を構築する上で考究すべき点について、土地資源利用による環境負荷の観点から考察した。

2. 研究方法

2.1 研究対象地

パラオ共和国バベルダオブ島を研究対象地とした(Fig.1)。パラオ共和国は568の島々より構成され、バベルダオブ島は其中で面積が最大の島であり、その面積365km²は国土の約80%に相当する。島の中央部に南北方向の分水嶺が存在し、主要な河川流域は島の東または西側に位置する湾へと流れ込む高島である。気候は熱帯性気候に属し、一年を通じて温暖で、年平均気温は28℃である。年平均降水量は3,800mmであり、12月から4月の乾季と5月から11月の雨季に分けられる。現在のパラオ共和国全体の人口は19,907人(2005年)、国民一人当たりGDPは9,954US\$(2009年)であり、主な産業は国土資源を活用した観光関連産業である。

パラオ共和国で面積が最大のバベルダオブ(Babeldaob)島の資源利用形態に着目すると、20世紀初頭までの漁労・採集と粗放的な農業による自給自足の時代から、20世紀前半における日本委任統治下の農業・鉱業振興による資源開発の時代を経て、現在の観光振興を支える自然保護の時代へと、長期的に変遷してきた(飯田, 2012)。

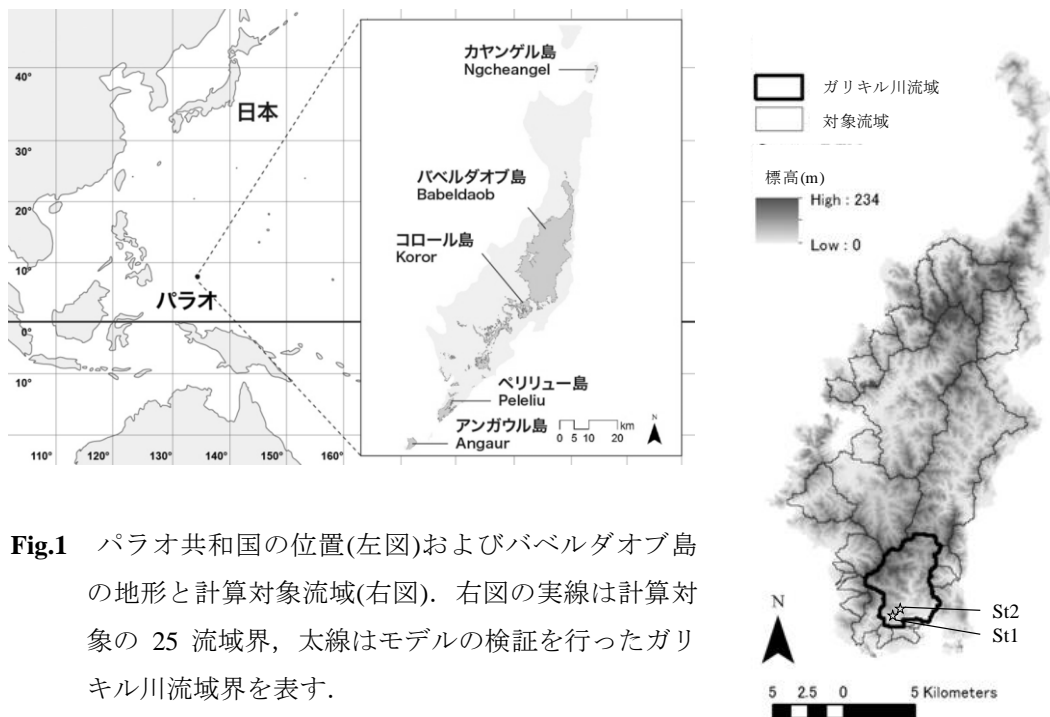


Fig.1 パラオ共和国の位置(左図)およびバベルダオブ島の地形と計算対象流域(右図). 右図の実線は計算対象の 25 流域界, 太線はモデルの検証を行ったガリキル川流域界を表す.

2.2 SWAT の概要

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT)は水文過程を考慮した水・物質動態解析モデルである(Neitsch et al., 2009). SWAT を用いた土砂流出解析の流れを **Fig.2** に示した. SWAT は, 土地利用や営農管理といった人間活動が水や土砂, 栄養塩類等の流域スケールの物質動態に与える影響を明示的に評価可能なモデルである. 基本的に日単位の解析を想定したサブモデルより構成されているため, 降雨イベント単位の洪水や物質動態の追跡には適用が難しいが, 本研究で対象とするような長期間の解析には適している.

近年では東南アジアなど利用可能なデータの少ない開発途上国の流域への適用が進んでいるが(例えば, Memarian et al., 2014; Nguyen et al., 2014), パラオ共和国を含む太平洋島嶼国での適用例はない. なお, 本研究では, ArcSWAT ver. 2012.10_1.13 を用いた.

SWAT における水文過程は, 陸面モデルと河道モデルから構成される. 対象流域を複数のサブ流域に分割し, それぞれのサブ流域から河道への水および土砂の流出量を計算する. それぞれのサブ流域における水収支および物質動態は, 土地利用, 土壌, 地形条件(勾配)が共通する Hydrologic Response Units (HRU)に集約して計算する.

各 HRU における土砂生産量は, Universal Soil Loss equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978)を改良した Modified USLE (MUSLE) (Williams, 1975)を用いて推計する. MUSLE では, USLE において降雨量と降雨強度から構成される降雨流出係数を流出量とピーク流量からなる関数で置換しており, 圃場スケールより大きなスケールへの適用が可能である. SWAT で適用する MUSLE を式(1)に示す.

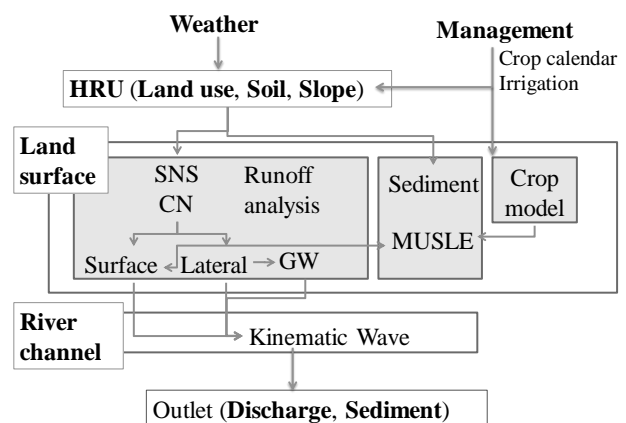


Fig.2 SWAT の土砂流出解析の流れ

$$sed=11.8 \cdot (q_{peak} \cdot Q_{surf} \cdot area_{hru})^{0.56} K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot GFRC \quad (1)$$

ここで、 sed は土砂生産量(ton day^{-1})、 Q_{surf} は日流出量($\text{mm ha}^{-1} \text{day}^{-1}$)、 q_{peak} はピーク流出量($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、 $area_{hru}$ はHRU面積(ha)、 K_{USLE} はUSLEの土壌係数($0.013 \text{ton m}^2 \text{hr} (\text{m}^3 \text{ton cm})^{-1}$)、 C_{USLE} はUSLEの営農管理係数、 P_{USLE} はUSLEの侵食対策係数、 LS_{USLE} はUSLEの地形係数、 $CFRG$ は礫係数である。

その他の水文過程の詳細については、SWAT theoretical documentation を参照のこと (Neitsch et al., 2009)。

2.3 計算条件

土地利用は飯田(2012)の作成した1921年、1947年および2006年の土地利用データを使用した。それぞれの年代における土地利用の面積割合を Fig.3 に示す。なお、アグロフォレストリーとは、樹間を利用した農林業一般を指すが、ここでは集落周辺部の森林樹間における粗放的農業を表す。Fig.3の土地利用分類の中で、自然植生によって形成される森林とマングローブを森林へ、それ以外の人間活動が関与する土地利用分類はその他へ、集計して土地利用図を作成し、Fig.4 に示した。前述の土地資源利用形態に照らすと、1921年はパラオ人による「自給自足」、1947年は日本人による「資源開発」直後、2006年は観光振興を支える「自然保護」の時代にそれぞれ対応する。20世紀初頭の自給自足の時代、住民は狩猟や採集、粗放的な農業により生計を構築していた。1914年から1945年の日本統治時代においては、資源開発による産業、特に、鉱業および農業が発展し、森林の荒地化や農地への開墾が進展した。1921年と1947年の土地利用を比較すると、森林とアグロフォレストリーの面積がそれぞれ 50km^2 、 10km^2 減少し、草地在 60km^2 増加した。なお、本研究では、入手可能なデータの制約から、日本統治時代が終了し2年が経過した1947年の土地利用データを適用したため、1945年以前には農地や採掘地として利用され、その後管理放棄された面積は草地に含まれている。その後半世紀を経て、現在ではエコツーリズムの制度化による自然保護が推進されている。1947年と2006年の土地利用を比較すると、森林とアグロフォレストリーの面積はそれぞれ 24km^2 、 11km^2 増加した。また、全面積に占める割合は小さいが、畑地や都市が現れた。本研究で用いた土地利用データと SWAT における土地被覆/利用データとの対応を Table 1 に示す。

地形データは空間解像度 10m の DEM (United States Geological Survey [USGS], 1983) を使用した。土壌データは Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture [NRCS, USDA] の土壌図(2011)を使用した。気象データは、全球再解析デー

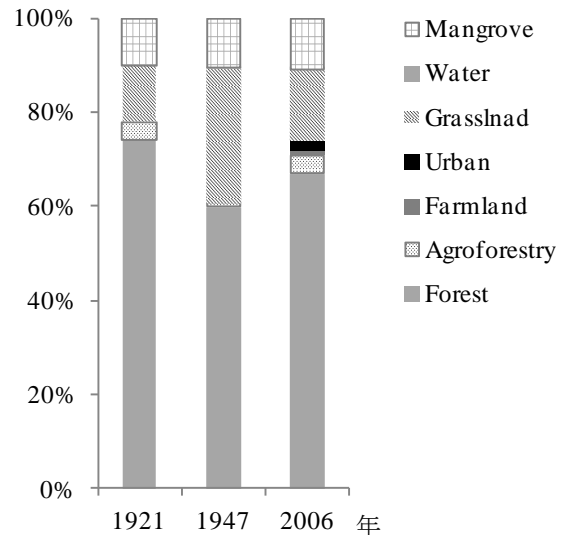


Fig.3 1921年、1947年及び2006年における土地利用の面積割合

Table 1 本研究の土地利用データと SWAT における土地被覆/利用データとの対応

Land use category	SWAT code	Description
Mangrove	WETF	Wetlands-forested
Water	WATR	Water
Grassland	PAST	Pasture
Urban	URBN	Residential
Farmland	AGRR	Agricultural
		Land-Row Crops
Agroforestry	FRST	Forest-mixed
Forest	FRSE	Forest-evergreen

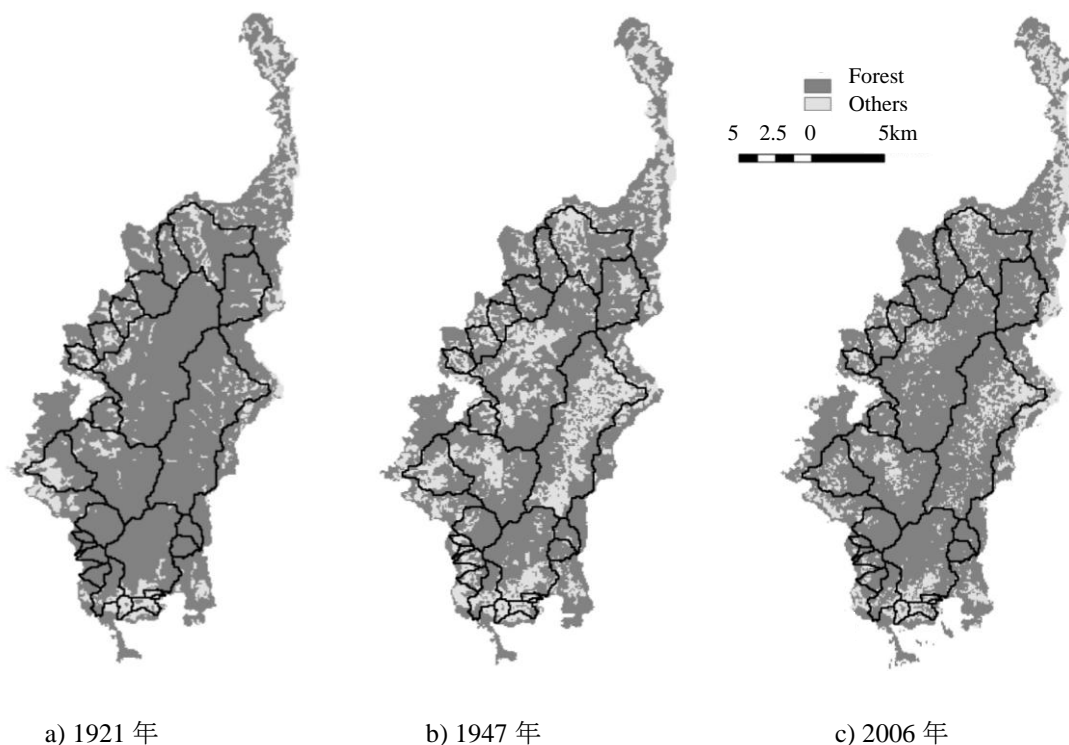


Fig.4 バベルダオブ島の1921年、1947年および2006年における土地利用図。実線は計算対象の25流域界を示す。

タである第三期土壌水分プロジェクト(Global Soil Wetness Project Phase 3 [GSWP3], 2014)の値を採用した。使用する際には、渡部ら(2010)の手法を基に、月単位変動の気候値をバベルダオブ島に隣接するコロール(Koror)島における地上観測値と再解析データの間で比較し、両者の平均と分散が一致するよう補正した。

バベルダオブ島の25流域群を対象に、1921年、1947年および2006年の土地利用における年平均土砂流出量を推計した。計算対象とした25流域面積の合計は約238km²であり、バベルダオブ島面積の65%に相当する。計算対象とした流域群は、バベルダオブ島における集水面積の大きいものから順に選択し、さらに土地利用変化の顕著な流域については、集水面積の大小に関わらず対象に含めた。25流域群の流域界をFig.1に実線で示す。それぞれの推計では、10年間の助走期間を設け、当該年を中心とする10年間(例えば2006年の土地利用図であれば2001年から2010年)の気象データを用いた。

計算対象25流域の中で、南東に位置するガリキル川流域(Fig.1の太線)のSt1およびSt2での観測データ(工藤ら, 2014)を用いて、モデルの計算結果を検証した。なお、St1の集水域における土地利用は、森林49%、草地51%であるのに対し、St2の集水域における土地利用は、森林38%、草地60%に加え、開発中の造成地が2%含まれていた。バベルダオブ島の水文観測の報告例は極めて少なく、利用可能な水文データの制約から、年平均流量および年間土砂流出量を使用した。2011年および2012年の2年間の観測値と、2006年の土地利用における10年分のSWAT出力値について比較し、検証した。なお、検証には、観測値のデータ数が極めて少ないことを考慮し、ノンパラメトリックな統計学的検定であるマン・ホイットニーのU検定(Man and Whitney, 1947)を実施した。なお、本研究では、キャリブレーションを実施せず、モデルパラメータにはSWATのデフォルト値を用いた。

2.4 土地資源利用効率

Walling (2006)は、世界のさまざまな河川の長期データに基づいて人間活動が土砂流出量に与える影響を明らかにした研究の中で、発展途上国における土砂流出量増加の駆動力の有用な代替指標として人口増加を挙げている。すなわち、人口増加の進行に伴って、食料生産のための土地開発、換金作物栽培のような土地の商業的利用、さらには鉱山開発、建築物や社会基盤の構築等の自然資源の収奪的利用という土地資源利用形態の変遷が生じ、土砂流出量の増加がもたらされると指摘している。

発展途上国における土砂流出量の増加率と人口増加率の関係の一次近似は以下の式で表される。

$$\frac{dS}{S} = a \frac{dP}{P} \quad (2)$$

ここで、 S は年間土砂流出量($\text{ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)、 P は人口(capita)、 a は人口増加率に対する年間土砂流出量の増加率の割合で、正の値である。自然資源の利用形態の変化による a の長期的変化についての一般化された知見はないが、例えば、東南アジアの発展途上国における20世紀の森林開発による a は1.6であったと報告されている(Abernethy, 1990)。また、Walling (2006)に挙げられたいくつかのケーススタディでは、人口増加に伴う土地資源利用形態の変化により、 a の値は段階的に増加すると考えられる。(2)式を解いて、 S は以下の式で与えられる

$$S = b \times P^a \quad (3)$$

ここで、 b は正の定数である。次に、(3)式の両辺を人口 P で除し、一人当たり土砂流出量 $s(\text{ton capita}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1})$ を求めた。

$$s = \frac{S}{P} = b \times P^{a-1} \quad (4)$$

一人当たり土砂流出量 s は、人口 P に対して、 $a > 1$ では単調増加、 $a < 1$ では単調減少する。陸域から海域への土砂流出は、人間活動の影響のない自然状態においても発生する現象である。したがって、 $P \rightarrow 0$ のとき、 $s \rightarrow +\infty$ であり、 $a < 1$ となる。その一方で、人口増加に伴う土地資源利用形態の変化により a の値は段階的に増加し、 $a > 1$ となると一人当たり土砂流出量 s は単調増加に転ずる。以上の議論を踏まえ、本研究では、一人当たり土砂流出量を土地資源利用効率の指標と定義する。

一人当たり土砂流出量の算出には、1921年、1947年、2006年における平均年間土砂流出量および人口を用いた。平均年間土砂流出量は、計算対象の25流域からの土砂流出量の総和を面積の総和で除することにより求めた。人口には、データの利用可能性と社会背景を考慮し、パラオ共和国在住の人口である6,361人(1920年)、27,289人(1939年)、19,907人(2005年)を採用した(飯田, 2012)。特に、1920年および1939年の人口は、パラオ人に加え、日本人とその他の外国人を含む。これらのデータは、より正確には、その時点で土地資源を利用した人数と解釈できるため、以下では P を土地資源利用による受益者と表現する。

責任ある観光を掲げたケープタウン宣言では、自然環境に対する責任として、観光者の活動が自然環境に与える影響の適切な評価と資源の持続的利用が挙げられている(ICRTD, 2002)。そこで、2006年に関しては、受益者として観光者を考慮した値も算出した。観光者数は76,180人(2005年)とし、平均滞在期間1週間と仮定し、人口1,465人に相当するとして扱った。

3. 結果および考察

3.1 SWAT 計算結果の検証

ガリキル川流域における2011年および2012年の観測値と、2006年の土地利用における10年間の

SWAT 計算値の平均値, 最小値および最大値を **Table 2** に示す. マン・ホイットニーの U 検定の結果, St1 の年平均流量, 年間土砂流出量, St2 の年平均流量の p 値は, それぞれ 0.86, 0.96, 0.98 であり, 観測値と SWAT 出力値の間に有意差は認められなかった. 一方, St2 の年間土砂流出量については, p 値 8.7×10^{-6} であり, 有意水準 1% で SWAT 出力値が観測値よりも有意に小さいことが示された. 工藤ら(2014)によると, 観測を実施した 2011 年から 2012 年の 2 年間に渡って, St2 の集水域には造成中の開発地 2.7ha が裸地状態で管理されおり, 局所的に大量の土砂流出が発生した. このような開発過程における土砂流出が海域生態系へ与える影響は甚大である(Fabricius, 2005). ただし本研究では, 長期間の土地利用変遷を対象とするため, このような一時的な状況における環境負荷については扱わないものとする.

3.2 土砂流出量の空間分布

Fig.5 に 1921 年, 1947 年および 2006 年の土地利用における年平均土砂流出量を示す. それぞれの平均値は, $2.6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (1921 年), $8.1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (1947 年), $5.8 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (2006 年)であった. 土地資源利用形態の変遷と比較すると, 自給自足(1921 年)から資源開発(1947 年)の時代の間では, 土砂流出量が平均 $5.5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 増加した. 特に, 島の内陸側に向かって土砂流出量が増加した地域が広がった. これらの地域は, 日本委任統治時代に設置された農業の開拓村とボーキサイトの採掘地が主であり(Iida et al., in press.), もともと森林, あるいは草地であった土地を開墾した結果であると言える. ただし, 前述の土地利用データ制約を考慮すると, 1945 年以前の日本統治時代においては, さらに多くの土砂流出が生じていたものと推察される. その後, 農地として開墾された土地の大部分は放置され, 森林・原野化し, 1994 年の独立以降は, 国と州が協働した自然保護の取組みが全国レベルで進められた(飯田・武, 2015). そのため, 資源開発(1947 年)から自然保護(2006 年)の時代にかけては, 土砂流出量が平均 $2.3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 減少した. 殊に, 開墾されずに残った森林の偏縁部から森林回復が進行したため(Endress and China, 2001), 島の内陸部から沿岸部にかけて, 土砂流出量が減少した地域が見られた. しかし, 島北部のボーキサイト採掘場跡地や近年宅地開発が著しい南部においては, 土砂流出量の多い状態が継続または悪化した.

3.3 一人当たり土砂流出量

1921 年, 1947 年および 2006 年における主な受益者, 受益者数および一人当たり土砂流出量を **Table 3** に示す. 自給自足時代の 1921 年が $0.41 \text{ ton capita}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であるのに対し, 資源開発時代の 1947 年では $0.30 \text{ ton capita}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ へ減少した. さらに, 2006 年の自然保護時代では, $0.29 \text{ ton capita}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ へ減少した.

Table 2 観測値と SWAT 計算値の年平均流量および年間土砂流出量の比較

	観測地点 St1				観測地点 St2			
	観測値*		SWAT 計算値		観測値*		SWAT 計算値	
	2011 年	2012 年	平均	最大-最小	2011 年	2012 年	平均	最大-最小
年平均流量(m^3/s)	0.06	0.03	0.05	0.07-0.03	0.09	0.05	0.09	0.13-0.05
年間土砂流出量(t/yr)	207	86	201	291-96	1,700	1,511	191	282-93

*工藤ら(2014)の観測値を換算

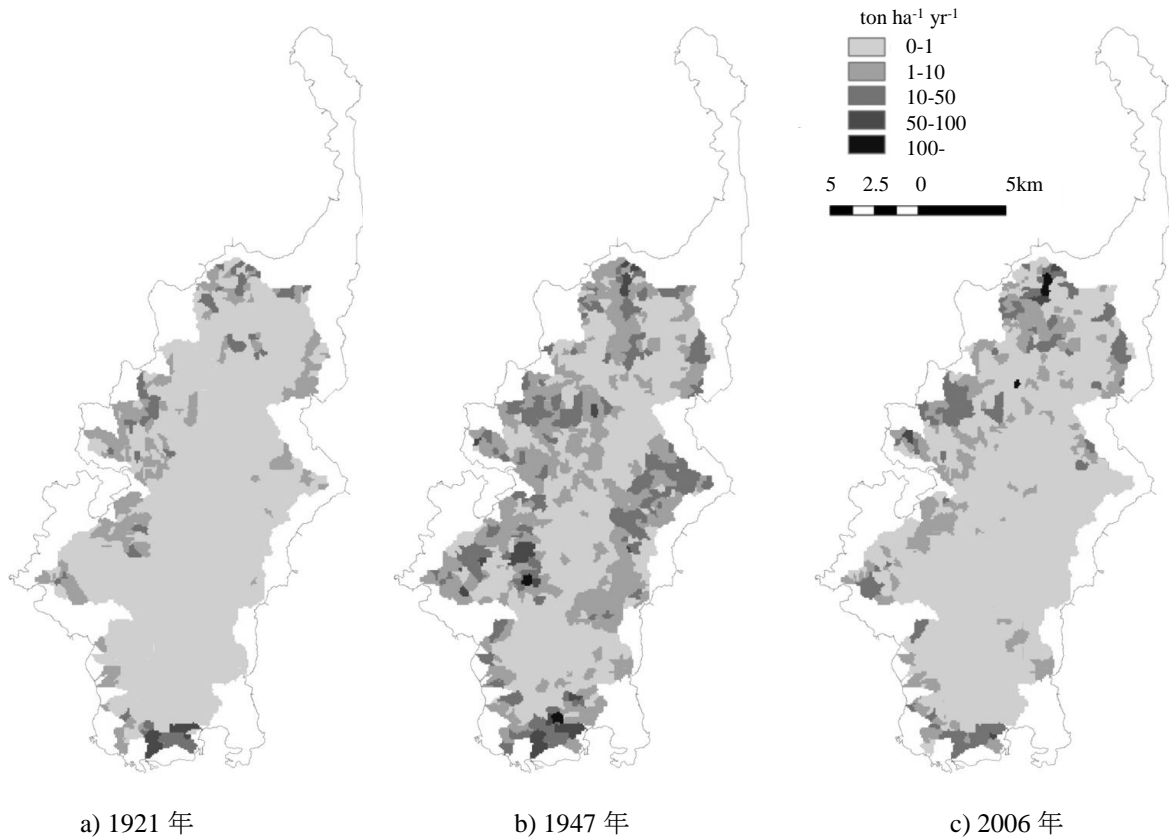


Fig.5 バベルダオブ島における土砂流出量の空間分布の長期変化

Table 3 土地資源利用形態ごとの主な受益者, 受益者数および一人当たり土砂流出量

土地資源利用形態	自給自足	資源開発	自然保護	
主な受益者	パラオ人	パラオ人 日本人	パラオ人	パラオ人 観光者
受益者数(人)	6,361	27,289	19,907	21,372
一人当たり土砂流出量 (ton ha ⁻¹ capita ⁻¹ yr ⁻¹)	0.41	0.30	0.29	0.27

本研究で対象としたバベルダオブ島では、1921年、1947年、2006年の3時期に限られるものの、一人当たり土砂流出量は単調に減少しており、環境負荷から見た土地資源の利用効率については単調に向上したと考えられる。ただし、前述の土地利用データの制約を考慮すると、日本委任統治下の一人当たり土砂流出量は、1947年の値よりも大きかったことが推察される。

観光産業による土地資源利用を含めた一人当たり土砂流出量は、2006年の0.29ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹から0.27ton capita⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹へとさらに減少する。この結果は、パラオ共和国の経済を支える観光産業の振興が、経済活動のみならず土地資源利用効率の向上にも寄与していることを示唆している。ただし、現在の観光産業においては、観光客の消費する食料はその大部分を輸入依存しているということ、すなわち、国外の食料生産地の環境に負荷を与えている可能性があるということに留意する必要がある。

4. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では、パラオ共和国バベルダオブ島に SWAT を適用し、長期の土地利用変化による土砂流出量の変化を推計し、土地資源利用効率の観点から考察した。その結果、年平均土砂流出量は、土地資源の利用形態により、自給自足時代には $2.6\text{ton ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ (1921 年)、資源開発時代には $8.1\text{ton ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ (1947 年)、現在の自然保護時代では $5.8\text{ton ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ (2006 年)と推移した。特に近年は観光振興と自然保護の推進により、土砂流出量が減少したことを示した。また、土地資源利用効率の指標として一人当たり土砂流出量を算出したところ、自給自足時代には $0.41\text{ton capita}^{-1}\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ (1921 年)あるのに対し、資源開発時代では $0.30\text{ton capita}^{-1}\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ (1947 年)、現在の自然保護時代では $0.29\text{ton capita}^{-1}\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ (2006 年)と減少した。なお、資源開発時代の土砂流出量の結果については、土地利用データの制約から過小評価している点を考慮する必要がある。さらに、観光産業による土地資源利用を考慮すると、一人当たり土砂流出量は、 $0.27\text{ton capita}^{-1}\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ とさらに減少する。この結果は、パラオ共和国の経済を支える観光産業の振興が、経済活動のみならず土地資源利用効率の向上にも寄与していることを示唆している。

本研究においては、島内の土地資源利用による環境負荷という側面のみ注目したが、観光産業および地域社会の消費活動の島外の資源への依存は、島外における環境負荷の増加を意味する。島内および島外の資源利用における環境負荷のトレードオフの存在は定性的には自明であり、明示的に扱うことが必要である。さらに、持続可能な観光の構築に向けては、物質循環に着目した環境負荷のみならず、観光客の満足感や地域住民の生活の質といった社会文化的な要素についても考慮すべきである。

謝辞：本研究は、環境省の環境研究総合推進費(4RF-1401)のもと実施された。

引用文献

- Abernethy, C. (1990): The use of river and reservoir sediment data for the study of regional soil erosion rates and trends, Paper Presented at the International Conservation, Dehradun, India, October, 1990.
- Burke, L., K. Reytar, M. Spalding and A. Perry (2011): Reefs at Risk Revisited, World Resources Institute, Washington, DC, USA.
- Encontre, P. (1999): The vulnerability and resilience of small island developing states in the context of globalization, Natural Resources Forum, 23, pp.261-270.
- Endress, B. A. and China, J. D. (2001): Landscape Patterns of Tropical Forest Recovery in the Republic of Palau. BIOTROPICA, 33(4), pp.555-565.
- Fabricius, K. E. (2005): Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis, Marine Pollution Bulletin, 50, pp.125-146.
- Golbuu, Y., Wolanski, E., Harrison, P., Richmond, R. H., Victor, S., and Fabricius, K. E. (2011a): Effects of Land-Use Change on Characteristics and Dynamics of Watershed Discharges in Babeldaob, Palau, Micronesia, J. Marine Biology.
- Golbuu, Y., van Woesik, R., Richmond, R. H., Harrison, P., Fabricius, K. E. (2011): River discharge reduces reef coral diversity in Palau, Marine Pollution Bulletin, 62, pp.824-831.
- GSWP3 (2014): EXP1, downloaded from <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GSWP3/exp1.html> (Accessed 9/14/2015).
- Iida, A., et al. (2015): Industrial developments and its impacts at Micronesia Islands under the Japanese administration: Case study at the Babeldaob Island, Republic of Palau. Journal of Pan Japan, Special Issue, in press.
- 飯田晶子(2012): 熱帯島嶼パラオ共和国における流域圏を基礎とするランドスケープ・プランニングに関する研究, 東京, 東京大学, 博士(工学)学位論文, pp.63-70.
- 飯田晶子, 武正憲 (2015): パラオ共和国における自然保護性政策の展開に見る観光資源の保全と利用, ランドスケープ研究, 78(5), pp.783-786.
- ICRTD (2002), The Cape Town Declaration, Cape Town.
- Jiang, M., DeLacy, T. and Noakes, S.(2009): Tourism, the Millennium Development Goals and Climate Change in the

South Pacific Islands. Centre for Tourism and Services Research, Melbourne, Australia.

- 工藤将志, 大澤和敏, 菅和利, 佐藤航太郎, 池田駿介(2013): パラオ共和国ガリキル川流域での土地開発に伴う土砂流出の現地観測および解析, 土木学会論文集 B1(水工学), 69(4), I_937-I_942.
- 工藤将志, 大澤和敏, 松井宏之, 菅和利, 池田駿介(2014): パラオ共和国での造成地を含む小流域における土砂流出の現地観測および GeoWEPP の適用, 土木学会論文集 B1(水工学), 70(4), I_943-I_948.
- Memarian Hadi, Siva K. Balasundram, Karim C. Abbaspour, Jamal B. Talib, Christopher Teh Boon Sung and Alias Mohd Sood (2014): SWAT-based hydrological modeling of tropical land-use scenarios, Hydrological Sciences Journal, 59(10), pp.1808-1829.
- Mann, H. B. and Whitney, D. R. (1947): On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. The Annals of Mathematical Statistics, 18(1), pp.50-60. doi:10.1214/aoms/1177730491.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2009): Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation version 2009, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, USA.
- Nguyen, K. D. and Suetsugi, T. (2014): The responses of hydrological processes and sediment yield to land-use and climate change in the Be River Catchment, Vietnam, Hydrological Process, 28, pp.640-652.
- Peling, M. and Uitto, J. I. (2001): Small island developing states: natural disaster vulnerability and global change, Environmental Hazards, 3, pp.49-62.
- UNEP (2014): Concept note –Development of the global programme on sustainable tourism, 10YFP Board.
- USDA (2011): Soil Survey of the Islands of Palau, Republic of Palau, USDA NRCS.
- USGS (1983): National Elevation Dataset 10 Meter, downloaded from <https://gdg.sc.egov.usda.gov/GDGOrder.aspx>. (Accessed 11/13/2008).
- Walling, D.E. (2006): Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers, Geomorphology, 79, pp.192-216. doi:10.1016/j.geomorph.2006.06.019.
- 渡部哲史, 沖大幹, 鼎信次郎 (2010): 気候変動下での全球水資源量評価に向けた気候モデル出力値補正手法の開発と検証, 水工学論文集, 54 巻, pp259-264.
- Williams, J. R. (1975): Sediment Routing for Agricultural Watershed,. the Water Resources Bulletin, 11, 5, pp. 965-974.
- Wischmeier, W. H and Smith, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses, In Agriculture Handbook; Agricultural Research Service, Washington, DC, USA, 537, 58.