# 将来の土地利用変化が洪水氾濫域に及ぼす影響の評価: ミャンマー・バゴー川流域におけるケーススタディ

米原 慎\*・川崎昭如\*\*・竹内 渉\*\*\*

# Impact of Future Land Use Change on Flood Inundation Area: Case study in the Bago River basin, Myanmar

Shin Yonehara, Akiyuki Kawasaki & Wataru Takeuchi

**Abstract:** Flood management is one of the most urgent problems in Southeast Asia. In this research, land use projection by GIS and statistical model, rainfall-runoff model and hydraulic model were integrated to analyze the impact of future urbanization and deforestation on flood vulnerability in a local scale. Based on land use scenarios, flood simulation was conducted. The results show that urbanization, deforestation and development of croplands will actually increase peak discharge during flood while reforestation will reduce it. Furthermore, the difference between the worst and best scenarios was estimated as 3.68km<sup>2</sup> in inundated area and approximately 0.5m in flood depth in the study area. This result shows maximum difference in uncertain future. This integrated scheme would support land development plan or policy from the viewpoint of disaster risk reduction.

**Keywords:** 土地利用モデル (Land use model), 水文モデル (Hydrological model), システム ダイナミクス (System dynamics)

# 1. はじめに

# 1.1.背景

2015年3月の第3回防災世界会議において採択さ れた仙台防災枠組では、自然災害が持続可能な開発 を阻害することが指摘された.特に、開発途上国に おいては今後、気候変動などの要因が水害をはじめ とする災害リスクをさらに増大させ、その国の発展 を阻害し貧困をより助長する可能性がある.災害に よる被害を軽減していくには、社会・経済開発のあ らゆる面で防災の視点を導入する『防災の主流化』 という基本認識を共有することが必要とされている (国際協力機構, 2015; Aitsi-Selmi et al., 2016).

特に,開発途上国においては気候変動のみならず 急速な経済発展に伴う土地改変が水害リスクに大き な影響を与えると考えられる.すなわち,森林伐採 や宅地造成などが進行すると,地表に到達した雨水 が河川へと速やかに流出するようになり,河川流量 が増大する (Bosch & Hewlett, 1982). さらに,都 市化の進展により土地の高度利用が進めば,都市部 における浸水被害ポテンシャルは増大する (国土交 通省,2005). このような,流域の都市化や人為活 動の変化が,水循環に与える影響を定量的に評価す る試みは,今後著しい経済発展が予想される東南ア ジアの発展途上国においては,地球温暖化の影響評 価とともに重要である (呉ほか,2014).

# 1.2. 目的

本研究では,将来的な水害リスクの増大が予想さ れる東南アジアの開発途上国において,防災を考慮 に入れた土地利用計画の策定に資する情報を提供す ることを目的とする.そのために,リモートセンシ ングによる土地利用データとGISをもとにした土地

 \* 非会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻(The University of Tokyo) 〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 E-mail: yonehara@hydra.t.u-tokyo.ac.jp
 \*\* 正会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻(The University of Tokyo)
 \*\*\* 非合員 東京大学大学院工学系研究所(The University of Tokyo)

\*\*\* 非会員 東京大学生産技術研究所 (The University of Tokyo)

利用モデルの構築と洪水氾濫シミュレーションを行い,土地利用変化が洪水氾濫域に及ぼす影響を定量的に評価する.対象地域として,毎年深刻な洪水が発生し,今後も経済発展が予想されるミャンマーのバゴー川流域を選定した.

## 1.3. 既往研究との関係

土地利用変化が洪水に与える影響を評価したも のとしてAli et al. (2011), Chen et al. (2009), Lin et al. (2009), McColl & Agget (2007) などによる研究 がある.これらは,土地利用モデルと降雨流出モデ ルを用いて土地利用変化が洪水ハイドログラフに与 える影響を評価した.しかし,いずれも降雨流出解 析までに留まっており,空間的な氾濫域解析までは 行っていない.

土地利用モデルは都市や交通の分野で多くの研究 がなされており、都市経済学に立脚したものや交通 モデルと統合されたものがある.本研究において は、データの乏しい開発途上国でも適用可能なもの であることを重視して、川崎・高松 (2013) や Dang & Kawasaki (2016)が用いた、過去の土地利用変化 傾向からロジスティック回帰モデルを構築する手法 を用いた.

本研究は、土地利用モデルの構築に加えて、降雨 流出解析および氾濫域の解析まで実施した点におい て新規性を有する.

# 2. 対象地域

本研究ではミャンマー南部を流れマルタバン湾に 注ぐバゴー川の流域を対象地域とする(図1).熱帯 モンスーン地域に属するバゴー川流域は,ほぼ毎年 洪水が発生する洪水常襲地域である.またその頻度 と規模は年々深刻になっている傾向が見られ(Htut et al., 2014),近年では2011年の洪水が過去47年間 で最悪と報告されている(田平・川崎, 2014).

春山・ライン (2011) らは, バゴー川流域におけ る 1990 年から 2000 年までの土地利用変化を分析し, 河川上流地域において閉鎖林の 20% が疎林・灌木林, 草地,水面に転換し,南部の下流では主に農地に変 化したと報告した.バゴー川上流の森林地域は古く



図1 バゴー川流域の位置

から良質な木材の産地として知られていたが,1990 年代に進んだ農業開発プロジェクトにより森林減少 が進行している.

一方, バゴーは交通の要衝として重要である.現 在, アジア開発銀行による東西経済回廊, わが国の 円借款によるヤンゴン一マンダレー間鉄道, ハンタ ワディ国際空港などのプロジェクトが計画されてお り, いずれもバゴーを経由する.さらに, 日本が主 導で開発するティラワ経済特別区 (SEZ) もバゴー 川下流域に位置しており.わが国の企業も多数進出 し始めている.バゴーは最大都市ヤンゴンからのア クセス性も優れていることから, 大きな開発ポテン シャルを有するといえる.

以上の背景から,バゴー川流域では人口増加や大 規模な開発に伴い土地利用変化が生じることが予想 され,洪水リスクがさらに増大すると考えられる. その影響を定量的に評価することは,今後の治水計 画,土地利用計画,防災計画などを策定する際に有 要である.

## 3. 手法

## 3.1. 概要

手法の全体像を図2に示した.本研究の手法は大 きく,土地利用モデルの構築と洪水氾濫シミュレー ションに二分される.

土地利用モデルの構築にあたっては,空間的な分 析である【適地分析】と非空間的な分析である【土 地利用別面積変化量】を分離して考えた.【適地分析】 では,ある土地利用が増加する際の空間的な配置を 分析する.具体的には,過去のトレンドからロジス



図2 本研究の全体像

ティック回帰モデルを構築し、新たな土地利用が生 じる「変化確率」を地点ごとに分析した. さらに、【土 地利用別面積変化量】についてはシステムダイナミ クスを用いて計算した. すなわち,各土地利用分類 が流域内で占める面積を初期変数として,任意の予 測年度までの面積変化量を計算した. このとき,現 状の市街化動向や政策を踏まえて、1年当たりの都 市増加率、農地増加率、森林増加率、森林減少率と いった4つのパラメータを定義し、これを動かすこ とで異なるシナリオを表現した. 最終的には【土地 利用別面積変化量】の結果を【適地分析】に従って 空間的に割り当てることにより、将来予測図を作成 した.

さらに,得られた土地利用予測図を入力条件として,降雨流出解析と氾濫解析を行い,シナリオの比 較検討を行った.

3.2. 使用したデータおよびソフトウェア

本研究に使用したデータは表1の通りである.土 地利用データは,Oo et al. (2012)がMODIS (中分 解能撮像分光放射計)により得られた観測データか ら土地被覆を自動生成し,現地調査により精度を検 証したものである.土地被覆分類は全球を17項目 に分類するIGBP (International Geosphere-Biosphere Programme)に基づいており,2002年から2015年に わたって年毎に作成した.

また,本研究では米国Esri社のGIS ソフトウェア ArcGIS 10.3 for Desktopと統計ソフトウェアRに加 えて,以下のソフトウェアを使用した.

米国 isee system, inc. 社の STELLA を, システムダ

表1 使用した入力データの一覧

データ	データソース	解像度
雨量	緬国運輸省気象水文局	1日・2箇所
流量	緬国運輸省気象水文局	1日・2箇所
土地利用	MODIS より作成(Oo et al., 2012)	500m
土壤	国連食糧農業機関(FAO)	10km
DEM	米国地質調査所(USGS)	500m
道路	オープンストリートマップ	ベクター

イナミクスシミュレーションに用いた.システムダ イナミクス(以下,SD)とは1956年にマサチューセッ ツ工科大学のJ.Forresterにより開発されたシミュ レーション手法である.SDではフロー,ストック, コンバータといった要素の因果関係を数式で記述す ることにより,視覚的に数値シミュレーションモデ ルを生成できる.特色としては,要素間の関係を把 握しやすく,個々の理解している問題現象や因果関 係をダイレクトにモデル化できる点である.その 特徴から,実験や広域的な俯瞰が困難であるビジネ ス・政策といった社会システムのシミュレーション モデルの作成に適する.

さらに、洪水氾濫シミュレーションにはHEC-HMSおよびHEC-RASを使用した. HEC-HMS は降 雨一流出過程を計算し、HEC-RAS は一次元の水理 解析を行うモデルである(川崎ほか、2007). いず れも米国陸軍工兵隊水文工学センターが開発してお り、オープンソースで利用可能である.

## 3.3. 土地利用モデルの構築

3.3.1. トレンド分析

本研究で使用した土地利用データは17種類に分類されていたが、流出モデルの入力データに必要な 土地利用区分として、5種類に集約した(表2および図3). さらに、2002年から2012年までの二ヵ年 において、変化前と変化後の土地利用ごとに分類し、 面積を集計した(表3). 例えば、表3において2002 年から2012年の間に【森林】から【草地】に転じた 土地は888km<sup>2</sup>という意味である.

2002年から2012年までの変化の内訳としては【森林】から【草地】の888km<sup>2</sup>、【草地】から【農地】の 378km<sup>2</sup>が大きな割合を占めており、森林が伐採さ れ, 農地が拡大したといえる. 【都市】 には増減の傾向が見られなかった. 【水面】 はバゴー川流域に存在するいくつかのダムやため池を反映している.

	衣 2 上地村用力短00月心衣
集約後	- データの分類(IGPD による 17 頂日)
の分類	元/ クの分類(1001 による 17 項目)
牛芋	Closed Shrublands; Open Shrublands; Woody
早地	Savannas; Savannas; Grasslands
森林	Evergreen Needleleaf Forest; Evergreen Broadleaf
	Forest; Deciduous Broadleaf Forest; Mixed Forests
曲고노	Croplands; Cropland/Natural Vegetation Mosaic;
辰地	Barren or Sparsely Vegetated
都市	Urban and Built-Up
水面	Water; Permanent Wetlands

表 2 土地利用分類の対応表



図3 再分類後の土地利用データ

表3 2002 年から 2012 年までの土地利用別面積変化量 [km<sup>2</sup>]

		2012 年					
		草地	森林	農地	都市	水面	計
	草地	194	107	378	0	8	687
2002 年	森林	888	847	47	0	8	1,790
	農地	47	23	1,774	0	5	1,848
	都市	0	0	0	27	0	27
	水面	3	5	13	0	15	37
	計	1,132	982	2,212	27	36	4,389

以上を踏まえて5つの土地利用カテゴリー間の将 来の土地利用変化をモデル化した(図4). すなわち 2002年から2012年のうちで顕著であった【森林】→ 【草地】,【草地】→【農地】といった変化に加えて, 将来的な市街地増加を考慮して【農地】→【都市】を 加えた. ここで,既存の市街地の周縁部のほとんど が【農地】であるので,【農地】→【都市】と限定して も差し支えないとした. さらに,植林を意味する【草 地】→【森林】も考慮した.【水面】は将来的にも不 変であると仮定した.

森林伐採が進行すると,森林の有していた土壌の 保持力が損なわれ,雨水により土壌が浸食される. この現象はバゴー川流域でも起こっており,Hlaing et al. (2008)は同流域の土壌流出量を算定した.土 壌浸食により生産力の高い土壌が失われれば,図4 のモデルで考慮した森林回復が困難になると考えら れるが,本研究では森林伐採が進行しても土壌の状 態は変化しないと仮定した.



3.3.2. 適地分析

はじめに、【森林】→【草地】、【草地】→【農地】に ついて統計的手法による適地分析を行った. 2002 年と2012年の間でこれらの変化が起こった土地を 可視化すると図5の通りである. この要因をロジス ティック回帰分析によって明らかにする. ここで、 目的変数は変化が起こったか否かとし、変化が生じ たセルを1,生じなかったセルを0とした. 説明変 数としては、利用可能なデータが限られていること を踏まえ、GIS上で算出可能な地理的変数を用いた. 具体的には、川崎・高松 (2013)がデータの乏しい メコン川流域を対象に土地利用モデルを構築した際 に使用したものを参考にし、【標高】、【傾斜】、【道路 までの距離】、【河川までの距離】、【既存農地までの 距離】、【既存草地までの距離】を候補とした.さらに、



図5 土地利用変化が生じたセルの分布



図7 土地利用別面積変化 SD モデル

AIC (赤池情報量基準) が最も小さくなるよう変数 の取捨選択を行い、以下の式を得た。

 $logit (P_{森林→ 草地}) = -0.16 - 4.5 * 10^{-2} * slope + 2.6 * 10^{-5}$  $* dis_{road} - 1.9 * 10^{-4} * dis_{GR}$ 

```
logit (P<sub>草地→農地</sub>) = 3.1 - 4.0 * 10<sup>-2</sup> * elevation - 1.5 * 10<sup>-4</sup> * dis<sub>road</sub> - 7.6 * 10<sup>-4</sup> * dis<sub>AG</sub>
```

```
ただし,
```

```
slope: 勾配(無次元数)
```

elevation:標高[m]

disroad:道路までの距離[m]

disGR:既存草地までの距離[m]

```
disAG:既存農地までの距離[m]
```

である.この式をArcMapの[ラスタ演算]に組み 込み適地マップを生成した(図6左および中).ここ では,値が大きなセルにおいて土地利用変化が起こ る確率が高いことを意味する.

続いて、【農地】→【都市】の適地分析を行う.過 去のトレンドが見られないため、統計的手法は適用 不可能であるので、国際協力機構(2013)が実施し たヤンゴンにおける将来の土地利用予測で用いられ ている手法と同様に、既存の道路や市街地への近接



図6 草地, 農地および都市の適地マップ



図8 現地調査による土地利用状況

性と傾斜の大小を考慮した分析を行った. ここでは 一般道路,幹線道路,中心部,サブ中心部の4要素 について,その要素までの距離に基づいて10段階 からなる近接性を定義した.一般道路については 0.5kmごと,幹線道路については1kmごと,バゴー 中心部については2kmごと,サブ中心部については 1kmごとに区切り,1から10のランク付けをした. 傾斜については1より大きい値をもつ場所を市街地 に不適,1以下を適地であると仮定した.最終的には, これらを重ね合わせ,最終的な適地マップを作成し た(図6右).

最後に、【草地】→【森林】については、特に植林 政策による影響を大きく受けると考えられるが、こ こでは簡易的に下流から【森林】を増加させるパター ンを想定した、すなわち、下流に位置する市街地か らの距離が近い地点から増加させた。

### 3.3.3. 土地利用別面積変化量

各土地利用が占める面積の数量的変化を算出

するために, 図4の土地利用変化モデルをもとに STELLA上でSDモデルを構築した(図7). ここで, 各土地利用が占める面積をストック,相互の変化量 をフロー,各種パラメータをコンバータとした. こ こで,図7中の赤い矢印は,ここの要素の相互関係 を示している.例えば,フロー【Δ草地】は1年あ たりの【森林】から【草地】への面積変化量を示し,【草 地】の面積と草地増加率との積で計算される.

このSDモデルでは森林増加率,草地増加率,農 地増加率,都市増加率の4つの入力パラメータを自 由に設定することで,任意の予測年度における各々 の土地利用分類の面積変化量を計算する.

3.3.4. 土地利用予測図の作成

3.3.2の適地分析と3.3.3で計算された土地 利用別面積変化量の両方の結果を踏まえ,将来の 土地利用予測図を作成した.その処理はいくつか の過程を含むため,ArcGISモデルビルダー(Model Builder)機能を用いて処理の自動化を行った.作成 したツールにより,適地マップおよび土地利用変化 量を入力パラメータとして,任意の年度における土 地利用予測図を出力することができる.

3.3.5. 現地調査による土地利用モデルの検証

構築した土地利用モデルを簡易的に検証するため、2016年3月に流域内の様々な地点で実際の土地利用種別を観測し、2016年を対象としたシミュレーション結果と比較した(図8).各地点における観測結果と、その点が含まれるメッシュにおけるシミュレーション結果を比較したところ、149地点の観測地点のうち64%において土地利用種別が一致していた(表4).

続いて、土地利用種別ごとにモデルの妥当性を評価した.【都市】については観測点の約半数で一致しており、ある程度の妥当性が示された.すなわち、シミュレーション結果よりも実際の都市域の方が多い結果となった.これは、都市化が進行している地域においても畑や森林が点在していて、衛星データでは都市として現れていないことが要因として考えられる.【農地】はほとんどの地点で一致しており、

表 4	観測結果とシミュレーション結果の比較
	単位:地点数

		シミュレーション						
		草地	森林	農地	都市	水面	計	
	草地	5	6	12	0	0	23	
観測	森林	5	0	8	0	0	13	
	農地	0	0	71	2	0	73	
	都市	0	0	20	18	0	38	
	水面	0	0	1	0	1	2	
	計	10	6	112	20	1	149	



図9 2042年における土地利用予測図



高い妥当性が示された. バゴー川下流域はすでにほ ぼ農地化しており, 灌漑が発達していることから今 後農地が増大する余地は少ないと考えられる.【森 林】および【草地】の一致率は低く留まった. しか しながら,現地農民による焼畑農業や,伐採した材 木を運ぶトラックなどが見られ,森林減少が実際に 起こっていることがわかった.

以上の現地調査により土地利用モデルを検証した ところ,都市および農地については精度良く予測で きている一方,森林および農地に関しては十分では ないことが分かった.今後も土地利用変化を観測す ることで,モデルの改善につながる可能性がある. 流域の全域をくまなく踏査するのが困難であるこ と,目視での判断は狭い領域に限られることを考え ると,今後も衛星画像による分析は有用である.

3.4. 洪水氾濫シミュレーション

HEC-HMSおよびHEC-RASの解析に用いた流出 モデルデータはZin et al. (2015) が作成したものに 修正を加え使用した.

HEC-HMSでは流出過程を解析するのに様々な手 法を選択できるが、本研究ではSCS curve number法、 SCS unit hydrograph法、Recession法、Lag法を用い た. 複数の土地利用シナリオは、土地利用と土壌 タイプに基づいて計算されるパラメータCN (Curve Number)を変化させることによりシミュレーション に反映させた. CNは流域に降った雨がいかほど土 中に浸透するかを表すパラメータである.雨量デー タはバゴーおよびザウントゥ堰の2地点のデータを ティーセン分割により面的に補間した.また、モデ ルの各パラメータのキャリブレーションは、2010 年の降雨イベントを対象とした.さらに、土地利 用状況がほぼ変化していないとみなせる2009年、 2011年の降雨イベントで妥当性を検証した.

続いて、HEC-RASにより、バゴー川中流のザウ ントゥ堰から下流のタワ地区までの約50kmの区間 を対象として非定常流解析を行った.境界条件は HEC-HMSによる解析結果のハイドログラフを設定 した.

## 4. 結果と考察

#### 4.1. シミュレーション概要

以下の条件で洪水氾濫シミュレーションを行っ た.降雨は近年で最も深刻であった2011年8月と同 様のものを想定した.まず,表5のようにパラメー タを設定したシナリオのもとでシミュレーションを 行った.シナリオ2においては過去の変化傾向と同 じ値を仮定した.さらに,対象地域における土地利 用変化の最大限の幅を調べるため,シナリオ1とシ ナリオ3の間には大きな幅を仮定して設定した.そ こで,シナリオ1ではシナリオ2の約2倍の速さで変 化が進むと仮定し,一方シナリオ3ではあらゆる開 発を抑制したケースを考えた.続いて,モデルで考 慮した4種類の土地利用変化がそれぞれ独立に生じ るケースを想定し,パラメータの感度分析を行った.

4.2. 結果

まず,3つのシナリオ(大規模開発,中規模開発, 積極的植林)のもとでの2042年時点での土地利用予 測図は図9の通りである.さらに,図10はピーク流 量変化,図11は浸水深変化の空間分布,表6は浸 水面積と平均浸水深の変化を示す.

続いて、4つのパラメータを独立に動かし、各パ ラメータがとりうる限界値を設定してシミュレー ションを行った際のピーク流量の変化は図12の通 りである。

表5 設定したシナリオとパラメータ

	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3	
	大規模開発	中規模開発	積極的植林	
都市増加率	15%	7%	0%	
農地増加率	1%	0%	0%	
森林減少率	10%	5%	0%	
森林増加率	0%	0%	2.5%	

表6 シナリオ別の浸水面積と平均浸水深

	珀仆	将来シナリオ			
	玩扒	1	2	3	
浸水面積[km²]	52.2	54.3	53.4	50.6	
平均浸水深[m]	3.78	3.54	3.96	4.08	



#### 4.3.考察

最も被害が増大するシナリオ1と最も軽減される シナリオ3を比較すると、浸水面積にして3.68km<sup>2</sup>, 平均浸水深にして約0.5mの差が生じた.浸水深の 変化を空間的に見ると概ね一様に生じることが分 かった.市の中心部では氾濫域に大きな変化は見ら れないが、市街から離れた上流側で氾濫域が変化す る地点がやや見られる.以上の結果から、バゴーに おける洪水被害を軽減する方策について考える.

パラメータの感度分析の結果より,特に森林の増 減が洪水に与える影響の幅が大きく,上流の山間部 の森林を維持することが木材資源として重要である のみならず,洪水のリスクの増大を防ぐことにも寄 与することが示された.薪材としての利用や農地の 開発と折り合いをつけ,持続的な森林管理をしてい くことが必要である.一方で,森林の維持・回復に よる洪水の軽減効果のみに注目すると,2011年に 起こったような大規模な洪水に対しては決して十分 でないことも示された.それゆえ,森林保全を洪水 対策の一つの手法として捉え,ダム・堤防などのハー ド面のインフラ整備,早期警報システムや土地利用 規制といったソフト面の方策と組み合わせて実施す る必要がある.

どのようにしても深刻な浸水がおこると予想され る箇所に対しては、あらかじめ土地利用規制を行う のが被害を軽減する手法として有効である.この際、 既存の建物の移転費用や、地価の下落の可能性につ いて考慮される必要がある.

あるいは効率的な避難所、避難ルートの整備を行

うことも有効であると考えられる.図13に示すように、バゴー川には左岸のみに堤防があり、浸水が起こるのは主に右岸である.また、市内でバゴー川に架かる橋は2つしかなく、右岸の住民が左岸に避難する際にこれがボトルネックとなる可能性が高い.それゆえ、右岸側の高台に誘導させるといった方策が有効であると考えられる.



図13 バゴー市における洪水対策の提案

#### 5. おわりに

本研究では、衛星リモートセンシングによるデー タをベースとした土地利用モデルを構築し、複数の 土地利用シナリオのもとで降雨流出解析、一次元水 理解析を行い土地利用変化が洪水氾濫域に及ぼす影 響を定量的に評価した.今後、経済発展に伴う大規 模な開発のもとで増大する可能性のある水害リスク を評価したことで、諸計画の策定に資する情報を提 供できたといえる.また、本研究で用いた衛星画像 と統計モデルにより土地利用モデルを構築する手法 は、データに乏しい他地域でも適用できる.

土地利用モデルを構築するにあたって,地理的な 変数のみで回帰モデルを構築するに留まったが,人 口分布や所得,地価といった社会経済データが利用 可能であれば精度が改善できる可能性がある.また, 将来のシナリオに関しては簡易なものを想定した が,GDPの推移などの裏づけを組み込むことがで きれば改善されうる.さらに,洪水氾濫シミュレー ションに用いた準分布型流出モデルでは,流域を比 較的大きな集水域に分割して扱うためセル単位の土 地利用は反映されない. それゆえ, グリッドベース の分布型流出モデルであれば, 土地利用変化をより 詳細に考慮できると考えられる.

本研究では洪水の外力の変化を評価するに留まっ たが,洪水による人的・経済損失を評価することが 今後の課題である.この際は,高床式住居が多く, 住民がある程度洪水に適応した生活を営んでいるな どといった地域特性をよく考慮したリスク算定手法 を考える必要がある.

# 謝辞

現地調査ではヤンゴン工科大学 Win Win Zin 教授 を始め,多くの学生の方々にご支援いただきました. 心より感謝の意を表します.

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構(JST) および独立行政法人国際協力機構(JICA)が共同実 施する地球規模課題対応国際科学技術協力プログラ ム(SATREPS)事業の支援を受けて実施しました。

### 参考文献

- 川崎昭如・高松正嗣(2013)水資源政策支援のための土地利用の将来予測ツールの開発:メコン川 3S 支流域での水需要予測のケーススタディ、「GIS – 理論と応用」, 21(1), 65-76.
- 川崎昭如・吉田聡・佐土原聡(2007) 水資源GISア プリケーションArc Hydroの概説と米国における 事例紹介,「GIS – 理論と応用」, **15**(1), 29-37.
- 呉修一・Farid, M.・福谷陽・Muhari, A.・Bricker, J. D.・ 有働恵子・真野明 (2014) インドネシア・ジャカ ルタ洪水を引き起こす様々な社会問題と 2013 年 1月洪水の特徴.「土木学会論文集G (環境)」, **70** (5), 211-217.
- 国際協力機構 (2013)『ミャンマー国ヤンゴン都市圏 開発プログラム形成準備調査ファイナルレポー ト』. < http://open\_jicareport.jica.go.jp/618/618/618\_104\_ 12122503.html>
- 国際協力機構 (2015) JICA の防災協力 防災の主流化 に向けて – 災害に強い社会を作る – . < http://www. jica.go.jp/activities/issues/disaster/>

- 国土交通省(2005)都市における浸水対策の新たな 展開. < http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/04/040722 /02.pdf>
- 田平由希子・川崎昭如(2014)2011年ミャンマー国 バゴー川洪水における地方防災体制に関する分 析:住民への情報伝達と行政の支援体制に着目し て,「地域安全学会論文集」,23,1-8.
- 春山成子・ケイトエライン(2011) ミャンマーの森 林管理の問題点とバゴ川流域の土地利用変化. 『災害軽減と土地利用』(春山成子編),古今書院, 175-190.
- Aitsi-Selmi, A., Murray, V., Wannous, C., Dickinson, C., Johnston, D., Kawasaki, A., Stevance, A.-S., Yeung, T., et al. (2016) Reflections on a science and technology agenda for 21st century disaster risk reduction. Based on the scientific content of the 2016 UNISDR Science and Technology Conference on the Implementation of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7(1), 1-29.
- Ali, M., Khan, S. J., Aslam, I., & Khan, Z. (2011)
  Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad,
  Pakistan. Landscape and Urban Planning, 102 (4), 271–279.
- Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, **55**(1), 3-23.
- Chen, Y., Xu, Y., & Yin, Y. (2009) Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoxi basin, China. *Quaternary International*, 208 (1-2), 121–128.
- Dang, A. N., & Kawasaki, A. (2007) Integrating biophysical and socio-economic factors for land-use and land-cover change projection in agricultural economic regions. *Ecological Modelling*, **344C**, 39–37.
- Hlaing, K.T., Haruyama, S., & Aye M. M. (2008)Using GIS-based distributed soil loss modeling and morphometric analysis to prioritize watershed for soil

conservation in Bago river basin of Lower Myanmar, *Frontiers of Earth Science in China*, **2**(4), 465-478.

- Htut A. Y., Shrestha S., Nitivattananon, V., & Kawasaki,
  A. (2014) forecasting climate change scenarios in the
  Bago river basin, Myanmar. *Journal of Earth Science*& *Climatic Change*, 5(9).
- Lin, Y. P., Verburg, P. H., Chang, C. R., Chen, H. Y., & Chen, M. H. (2009) Developing and comparing optimal and empirical land-use models for the development of an urbanized watershed forest in Taiwan. *Landscape* and Urban Planning, **92** (3-4), 242–254.
- McColl, C., & Aggett, G. (2007) Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved landuse decision support. *Journal of Environmental Management*, 84(4), 494-512.

- Oo, K.S., Takeuchi, W., & An, V. N. (2012) Elimination of yearly validation from MODIS global land cover product. 第21回生研フォーラム「広域の環境・災 害リスク情報の収集と利用」, 2012年3月12日.
- Zin, W.W., Kawasaki, A., & Shelly, W. (2015) River flood inundation mapping in the Bago river basin, Myanmar. *Hydrological Research Letters*, 9(4), 97-102.
- (2016年8月4日原稿受理,2017年1月19日採用決定, 2017年4月21日デジタルライブラリ掲載)