第9章 流出解析及び水資源への気候変動影響評価

9.1 流出モデル

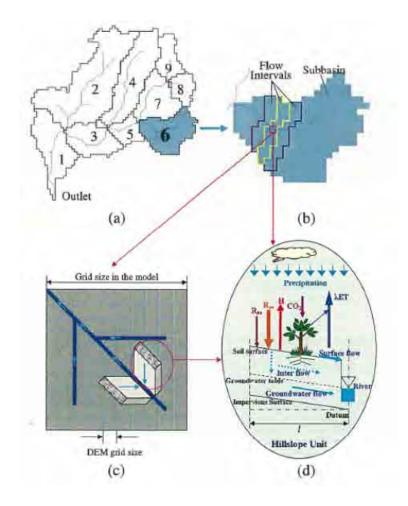
本調査では流出解析モデルとして2種類の物理的流出モデルを用いた。WEB-DHM及びSHERモデルである。水文的状況に対する気候変動の影響評価を行うのに用いる流出モデルは、降雨や気温の変化が河川流況、地下水位変動、蒸発散量の変化などに与える影響を物理的な基礎式に基づいて評価できることが必要である。

WEB-DHM は非常に詳細のエネルギー収支式を組み込んだ物理的水文解析モデルであり、ラグナ湖流域を除く他の河川流域に適用した。ラグナ湖流域は非常に平坦な地形であり、複数の水系が湖に流れ込む形状である。このため、WEB-DHM のモデルデータを作成する地形解析が困難であることから SHER モデルを適用することとした。SHER モデルも WEB-DHM と同様に物理的基礎式に基づいて表層土壌での水分伝達特性を解析できるモデルであるが、WEB-DHM のような詳細の陸面過程は解いておらず、外部境界条件として可能蒸発散量を与えるモデルとなっている。SHER モデルは、水文学的特性を考慮しながら手作業でブロック分割を行うため、ラグナ湖流域のような非常にフラットな地形でもモデル設定が可能である。

9.1.1 WEB-DHM

陸面過程を表現する SiB2 モデルとグリッドベースの分布型流出モデルである Geomorphology-based Hydrological Model (GBHM)を結合させたのが WEB-DHM である。SiB2 は、大気陸面間の水、エネルギー収支、炭素収支を表現できる陸面過程モデルである。GBHM は、斜面上および表層土壌内水分量を仮想河道に横流入する斜面に分配し、斜面及び河道の流下過程を追跡するモデルである。

モデル構造のイメージ図を図9.1に示している。



出典:東京大学

図 9.1 WEB-DHM の概要

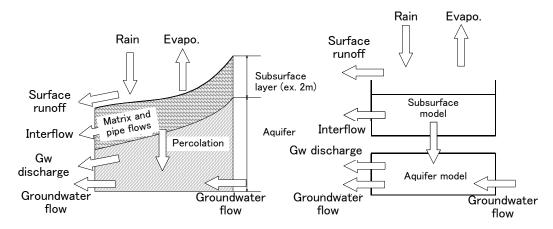
(a) 河川形態に基づいた分割流域の作成, (b) 流出点からの距離による flow interval という分割流域内の区分, (c) モデルグリッドデータから仮想河道への斜面モデルへの差分化(d) 大気と陸面の水分及び熱エネルギーフラックスの移動モデル

9.1.2 SHER モデル

潮位変動により海水との交換を生じるラグナ湖の状況をシミュレーションすることは、非常に困難である。水資源への気候変動の影響評価という観点から見れば、1年間に流域からラグナ湖に流入する水量を評価することが、一つの評価段階として十分に水資源計画に用いることができると考える。すなわち、1日2回生じる潮の干満での海水の流入、混合、湖から海に向けた流出などのやり取りはあるものの、1年間を通じて捉えれば、流域から湖へ流入した水は全て湖から海に流出するはずである。当然、湖面からの蒸発や湖底から地下水への涵養もあり得るが、ラグナ湖流域の水資源評価として流域からの流入量を評価することが第1段階として重要である。

ラグナ湖の流出解析に用いた SHER モデルは、Similar Elements of Hydrological Response から 名付けられたものであり、虫明東京大学名誉教授および現国際連合大学のヘーラト教授らに よって開発されたモデルである。SHER モデルはグリッドベースのモデルではなく、斜面要素型モデルに分類され、物理的な水文過程基礎式に基づいている。一つの SHER モデルのブロック内のパラメータは分布することなく、ひとつの値を持つ。そのため、水文学的過程が一様と見なせるように配慮しながらブロック分割を行うことがモデルの精度を確保し、パラ

メータの意味合いを確保するために重要となる。SHER モデルは WEB-DHM のようなエネルギー収支解析の機能は持っていない。蒸発散量は、表層土壌内の水分量を追跡し、外部境界条件として可能蒸発散能を与えることで表層土壌の水分保持能力を考慮して算出しており、気候変動影響評価に必要な機能を有している。



出典: JICA 調査団

図 9.2 SHER モデルの概要

9.2 流出モデルの入力データの作成

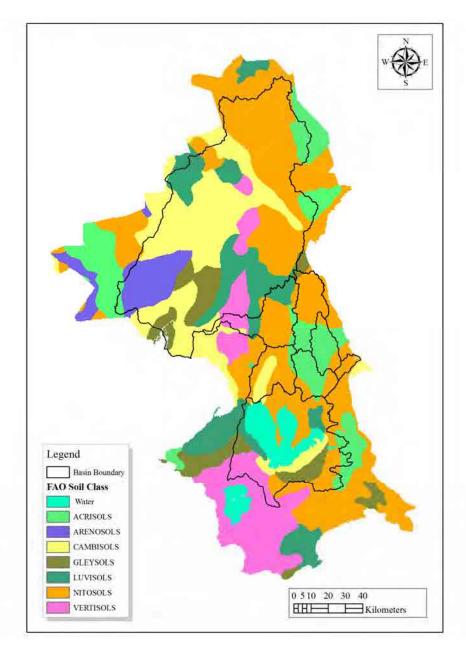
9.2.1 土壌パラメータ

WEB-DHM では、FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) の土壌分類に基づいて計算を行う。現地で収集した土壌分類は USDA 1975 (世界的な土壌分類の基準の一つ)に基づいていたため、FAO の分類に再分類した。再分類にあたっては、現地収集の土壌分布図と FAO の土壌分布図とを重ねあわせ、表 9.1 に示すような対応表を作成した。土壌パラメータは土壌分類ごとの土壌特性に対応させて設定した。

USDA 1975; Local soil classification	Soil Class (FAO)	FAO number
Lake,Laguna de Bay,Taal Lake	Water	0
Tropudults w/Tropudalfs Tropepts & Oxisols	NITOSOLS	4413
MOUNTAIN SOILS W/ENTISOLS, INCEPTISOLS,	ACRISOLS	4465
ULTISOLS AND ALFISOLS W/THERMIC HYPERTHERMIC		
AND ISOHYPERTHERMIC TEMPERATURE REGIMES		
ENTROPEPTS W/DYSTROPEPTS	CAMBISOLS	4478
TROPAQUEPTS W/HYDRAQUENTS	GLEYSOLS	4503
TROPUDALFS W/TROPEPTS	GLEYSOLS	4504
PELLUSTERTS W/UDALFS, UDORTHENTS AND	LUVISOLS	4537
TROPEPTS; TROPAQUEPTS W/ENTROPEPTS		
Contested_Area	NITOSOLS	4546
TROPOPSAMMENTS W/TROPORTHENTS	ARENOSOLS	4564
CHROMUSTERTS W/UDALFS, UDORTHENTS AND	VERTISOLS	4582
TROPEPTS		
EUTRANDEPTS W/EUTROPEPTS	VERTISOLS	4589

表 9.1 FAO と USDA1975 の土壌分類の対応表

出典: JICA 調査団 (DENR 及び FAO のデータに基づく)



出典: JICA 調査団 (DENR 及び FAO のデータに基づく)

図 9.3 土壌分布図 (現地収集データを FAO の分類に再分類したもの)

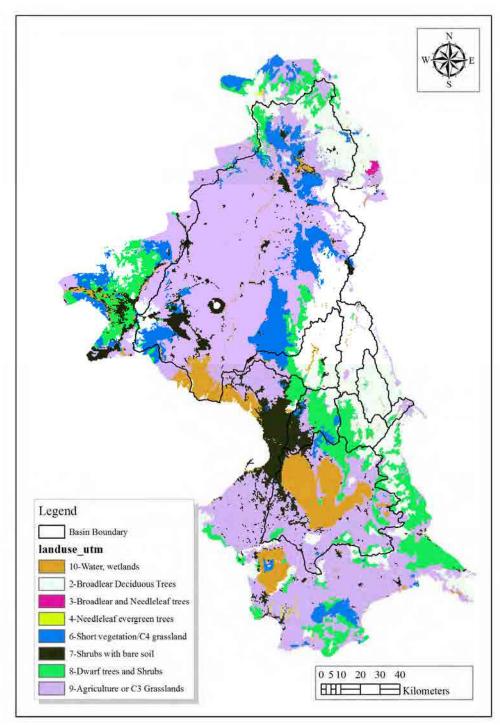
9.2.2 植生パラメータ

WEB-DHM では SiB2 の植生分類に基づいた計算を行う。現地で収集した植生分布図を WEB-DHM へ入力可能なデータとするため、SiB2 の植生分類に再分類した。再分類にあたっては、現地の植生分類の意味から表 11.2 に示すような対応表を作成した。植生パラメータは 植生分類ごとの特性に対応させて設定した。

表 9.2 現地収集データと SiB2 の植生分類の対応表

Local Land Use Classification	SiB2 Reclassification
	1-Broadleaf Evergreen Trees
Closed Forest, Broadleaved	2-Broadleaf Deciduous Trees
Open Forest, Broadleaved	
Mangrove forest	
Open forest mixed	3-Broadleaf and Needleleaf trees
Closed forest mixed	
Closed forest coniferous	4-Needleleaf evergreen trees
Bamboo Formation	
	5-Needleleaf deciduous trees
Natural, grassland	6-Short vegetation/C4 grassland
Built up area	7-Shrubs with bare soil
Natural, Barren land	
Woodland, fallow	
Wood land, shrubs	8-Dwarf trees and Shrubs
Cultivated, annual crop	9-Agriculture or C3 Grasslands
Wooded land, wooded grassland	
Cultivated perennial crop	
Fishpond	10-Water, wetlands
Inland Water	

出典: JICA 調査団 (DENR のデータに基づく)



出典: JICA調査団 (DENR のデータに基づく)

図 9.4 植生分布図 (現地収集データを SiB2 の分類に再分類したもの)

9.2.3 LAI 及び FPAR

葉面積指数 (LAI) は林冠の構造特性を代表する指標であり、単位面積あたりの葉で覆われた林冠面積を表す。LAI は無単位の指標であり、一般的に 0 (裸地) から 6 程度 (密林) までの値を取る。光合成有効放射吸収率(FPAR)は、太陽からの有効放射に対する植物が光合成のために吸収する放射(波長 400~700mm)の割合を示す。このように、LAI と FPAR は林冠の構造を表現する指標であり、SiB2 におけるエネルギーと質量の交換速度に影響する。

これらのデータは、NASA(アメリカ航空宇宙局)が提供している衛星データ(MODIS 及び AVHRR)から取得した。

9.2.4 気象境界条件データ

(1) 降雨

観測日雨量データの時間的ダウンスケーリング:

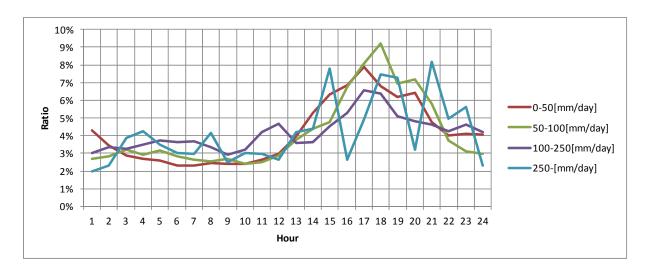
本調査で収集した降雨観測データは日雨量データである。流出モデルでは、時間雨量であるほうが降雨の表面流出と地下浸透との振り分けを計算するうえで望ましい。熱帯地域では、一日の中で決まったようにスコールが発生するような日周期が顕著に見られる。このような日周期で生じる降雨は総量としては少ないが、日雨量データを単純に24分割して時間雨量として与えるよりは、日周期を考慮して与えるほうが推定として良い結果を得られる。したがい、パンパンガ川流域で得られた時間雨量データから降雨の日周期曲線を作成した。日周期曲線作成に用いた観測所一覧を表9.3に示している。パンパンガ川流域で収集された時間雨量データ期間は1973年8月から2005年12月であり、これらを全て統計処理して日周期曲線作成した。

表 9.3 降雨の日周期曲線作成のために用いたパンパンガ川流域 の降雨観測所一覧

Station Name	Latitude	Longitude
MUÑOZ	15°44'44.4"N	120°56'34.2"E
SAPANG BUHO	15°35'40"N	121°04'00.5"E
MAYAPYAP	15°31'00"N	120°57'15.1"E
GABALDON	15°29'55"N	121°20'21.2"E
ZARAGOSA	15°26'39.4"N	120°45'01.9"E
PAPAYA	15°21'47.8"N	121°03'55.2"E
SAN ISIDRO	15°18'49.7"N	120°54'03.2"E
ARAYAT	15°10'05.5"N	120°46'55.6"E
CANDABA	15°06'57.8"N	120°51'09.3"E
SIBUL SPRING	15°10'04.8"N	121°03'32.5"E
SASMOAN	14°56'16.7"N	120°37'17.9"E
SULIPAN	14°56'26.8"N	120°45'34"E
IPO DAM	14°52'31.1"N	121°08'44.8"E
SAN RAFAEL	14°58'53.8"N	120°55'38"E

出典: JICA 調査団 (PAGASA のデータに基づく)

作成された降雨の日周期曲線は、降雨規模に応じて 0-50 mm/day, 50-100 mm/day, 100-250 mm/day, 250 mm/day 以上とクラス分けして作成した。結果を図 9.5 に示している。

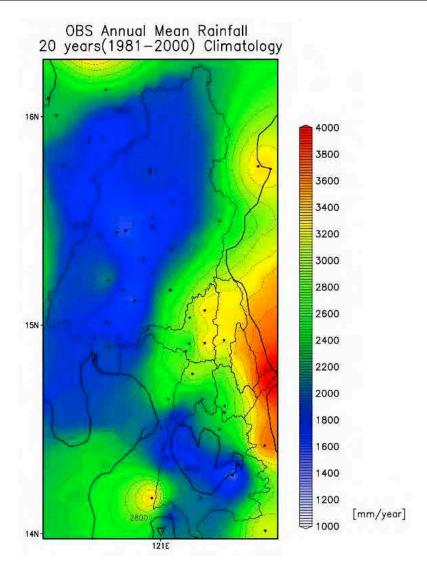


出典: JICA調査団 (PAGASA のデータに基づく)

図 9.5 降雨の日内周期曲線の作成結果

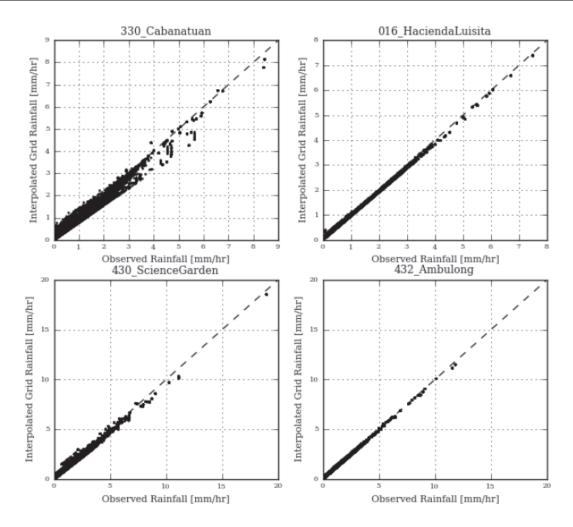
降雨の空間的ダウンスケーリング:

WEB-DHM はグリッドに基づいた分布型流出モデルであり、モデルは降雨の空間的分布を流出現象に反映することができる。地上観測所での観測雨量データより、空間内挿でグリッド雨量データを作成した。空間内挿手法には逆距離荷重内挿補間(IDW)を用いた。距離の逆数の指数には2を適用した。作成されたグリッド雨量で算出された1981年から2000年の平均年間降雨量分布を図9.6に示している。観測所地点での観測データと同地点におけるグリッドデータを比較したものを図9.7に示している。ZaragozaおよびMunosの雨量データは、この観測データとグリッドデータの比較の結果、他の観測データとの整合性が取れないことより検討対象から除外した。



出典: JICA 調査団 (PAGASA のデータに基づく)

図 9.6 グリッド雨量データによる平均年間雨量 (1981-2000)



出典: JICA調査団 (PAGASAのデータに基づく)

図 9.7 観測所での観測雨量データと同地点グリッドデータの比較による内挿補間データ 及び観測データ精度確認例

(2) 地表気温

地表気温データの時間的内挿:

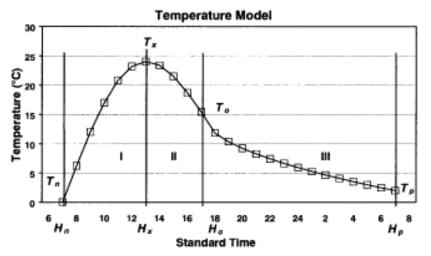
気温データの日内変化は太陽によって支配されている。気温データについては日最高気温及び最低気温を収集した。日最高気温と日最低気温を用いての時間気温データへのダウンスケーリングには、Carla Cesaraccio (2001) による TM モデルを用いた。

TM モデルによる気温データの時間的ダウンスケーリングの手順を以下に示す。

- 1) 一日の気温が変化する領域を3つの領域に分ける。すなわち、日の出時刻(Hn)から日最大気温となる時刻(Hx)、Hx から日の入り時刻(H0)までの期間、H0 から翌日の日の出(Hp)までの期間。
- 2) TM モデルは、日中の気温変化に 2 つのサイン曲線を当てはめ、夜間の気温減少には平方根関数を用いる。
- 3) Hn (日の出時刻) と H0 (日の入り時刻) は、検討対象地点の緯度と正月からの経過日数 によって算出できる。

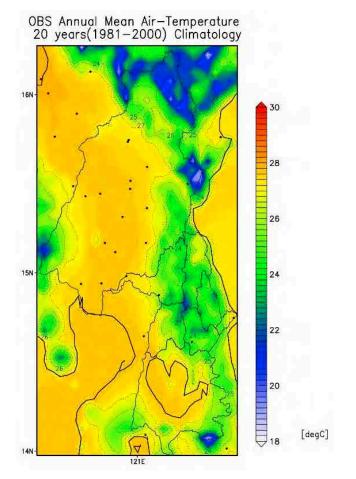
4) 日最大気温を与える時刻は日の入りの 4 時間前(Hx = H0 - 4)とする。 作成された年間平均の地表面気温分を図 9.9 に示す。

出典: Carla Cesaraccio (2012)



出典: Carla Cesaraccio (2001)

図 9.8 TM モデルによる気温の時間変化作成



出典: JICA 調査団 (PAGASA のデータに基づく)

図 9.9 地上気温グリッドデータの年間平均気温分布 (1981-2000)

(3) 他の気象データ

降水量・気温以外でWEB-DHMの外部強制力として必要となる気象データを表9.4に示した。

地表への太陽放射パラメータである、下向き長波放射、下向き短波放射、雲比率は、Yang et al. 2006^1 , Yang et al. 2001^2 and Todd and Claude 1998^3 の手法に基づき、現地で収集した観測データである日照時間、地表面気温、相対湿度から評価した。

地表面気圧、地表面風速、湿度は、気象庁・(財)電力中央研究所による JRA-25 長期再解析プロジェクト及び、気象庁による JCDAS 長期再解析プロジェクトにより提供されたものを利用した。

	~ - ~ , . , .	
Name Unit		Data source
Relative humidity	[%]	observed station data
Cloud fraction	[%]	estimated based on observed data: sunshine
		duration, air temperature and relative humidity
Long wave radiation	$[W/m^2]$	"
Short wave radiation	$[W/m^2]$	"
Pressure	[Pa]	JRA25 dataset
wind speed	[m/s]	"
Specific humidity	[%]	"

表 9.4 WEB-DHM 境界条件として必要となるその他の気象データ

出典: JICA 調査団

9.3 流出モデルの構築

「水収支解析等」業務の対象流域は、(1)パッシグ・マリキナ川流域、(2)ウミライ川流域、(3) アゴス川流域、(4)ラグナ川流域である。WEB-DHM はパッシグ・マリキナ川流域、ウミライ川流域、アゴス川流域に適用した。ラグナ湖流域については、湖水とマニラ湾の海水がパッシグ川を通じてやり取りする汽水域であるなど水文過程が複雑なため、湖内の評価は行わず、湖までの斜面流域について流出モデルを用いて評価することとする。

表層土壌の水分伝達特性のモデル化が水文流出過程のモデリングのキーポイントであり、ここを物理的基礎式に基づいたモデリングを行うことで、飽和流出過程や中間流出を適切に評価することができるようになる。

対象流域での適切なパラメータを見積もるため、観測所と比較するキャリブレーションが必要である。キャリブレーションに用いる流量観測所を以下の視点で選定した。(1)河道上での位置、(2)データ存在率(欠測が多くないこと)、(3)データの精度がある程度以上期待できること。

ウミライ川流域とアゴス川流域では流量観測データが少ないことから、これら二つの流域については、隣接するアンガット川流域で同定されたパラメータを参照して流況を推定した。アンガット川流域の流出解析は、並行して実施されている「気候変動影響評価及び流出解析」業務にて東京大学が実施したものである。

¹ Yang, K., Koike, T., and Ye, B. (2006) Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. Agricultural and Forest Meteorology, 137:43-55.

² Yang, K., Koike, T., and Ye, B. (2006). Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. Agricultural and Forest Meteorology, 137:43-55

³ Todd M. Crawford and Claude E. Duchon. An improved Parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation, Journal of applied meteorology, Volume 38: 474-480, 1998

ウミライ川流域とアゴス川流域について、十分な実測データに基づくキャリブレーションを 実施できないことは検討の過程として残念ではあるが、物理的な根拠を十分に持った WEB-DHM で隣接する区域で同定されたパラメータを用いての流出解析であるため、考えられる推定手法の中では最もよい推定と考えることができる。

9.3.1 パッシグ・マリキナ川流域

(1) 対象流域

パッシグ・マリキナ川はマニラ首都圏に流れ込む河川であり、ラグナ湖とマニラ湾とをマンガハン放水路とナピンダン水路でつないでいる。マンガハン放水路は人工水路であり、雨季の洪水流出をラグナ湖に流出されることを目的に建設された。

流出モデルでのモデル化対象区域を図 9.10 に図示する。パッシグ・マリキナ川流域の流域面積は約 520 km²である。マンガハン放水路とナピンダン水路は非常に平坦な箇所に位置しており、このような平坦すぎる地形や分流点を流出モデルでは取り扱うことができないため、WEB-DHM でのモデル化対象区域には含めていない。流出解析の重要な目的は、水資源供給としての河川流況を評価することであり、想定される河川取水地点は図 9.10 に示したモデル化対象区域に全て含まれている。

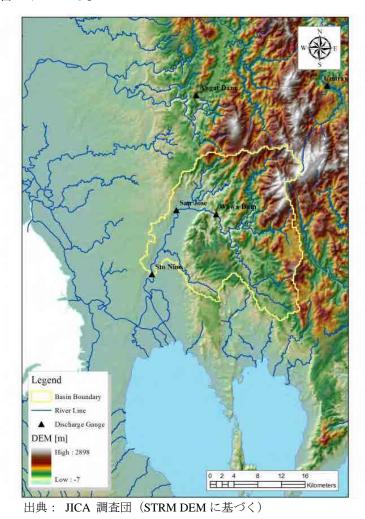


図 9.10 パッシグ・マリキナ川流域のモデル化対象区域

(2) 地形処理

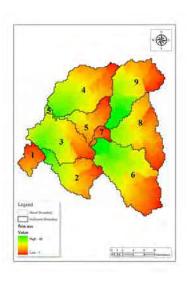
スペースシャトルによる地形データ(SRTM)を DEM として対象エリアの地形モデル化に活用した。オリジナルの SRTM データの空間解像度はおよそ 90 m であり、グリッドは緯度経度空間で定義されている。

流出モデルに DEM を適用するために、まず平面直交座標系に投影する必要があり、ここでは ユニバーサル横メルカトル図法のゾーン 51 (北) に投影した。投影作業にて $250\,\mathrm{m}$ グリッド にリサンプリングした。図 9.11 にはリサンプリングし投影された DEM データを表示している。

次に、Pfafstetter 分割を用いて流域を小流域に分割した。さらにこの分割流域内の斜面は、それぞれの流末からの距離に基づいた flow interval により、細かく分割されている。分割流域及 flow interval による分割結果についても図 9.11 に示している。







a) Digital Elevation Model

b) Slope Angle

c) Sub-Basins

出典: JICA 調査団 (STRM DEM に基づく)

図 9.11 パッシグ・マリキナ川流域の WEB-DHM 構築のための地形処理

(3) 土地利用及び土壌パラメータ

パッシグ・マリキナ川流域は、5つの土地利用と3つの土壌タイプで覆われている。表9.5 で示したように、SiB2モデル用に再分類した土地利用と植生分布は、およそ半分が潅木類(47%)である。土壌タイプで支配的なものは、FAOの分類で言えば、粘土ロームのNITOSOLS (73%)である。

表 9.5 パッシグ・マリキナ川流域の土地利用被覆状況

Land use types using Sib2 reclassification	Coverage [%]
Dwarf trees and Shrubs	47.0
Broadleaf Deciduous Trees	15.2
Agriculture or C3 Grasslands	14.1
Shrubs with bare soil	12.5
Short vegetation/C4 grassland	11.2

出典: JICA 調査団 (DENR データに基づく)

	Coverage [%]								
Soil No	Soil Class	Sand %	Silt %	Clay%	Туре				
4413	NITOSOLS	44.78	22.92	32.30	Clay Loam	73.1			
4478	CAMBISOLS	40.93	25.51	22.55	Clay Loam	17.5			
4465	ACRISOLS	48.52	21.77	29.72	Sandy Clay	9.4			
					Loam				

表 9.6 パッシグ・マリキナ川の土壌分類

出典: JICA 調査団 (DENR 及び FAO データに基づく)

(4) モデルパラメータ

パッシグ・マリキナ川流域では、観測流量データと流出計算結果を比較することでキャリブレーションを実施した。相対誤差 (RE) とナッシュサトクリフ指数 (NS) を用いてモデルの再現性を指標化した。それぞれの指標の算出は、下式による。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (Q_{oi} - Q_{si})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (Q_{oi} - \overline{Q}_{o})^{2}}$$

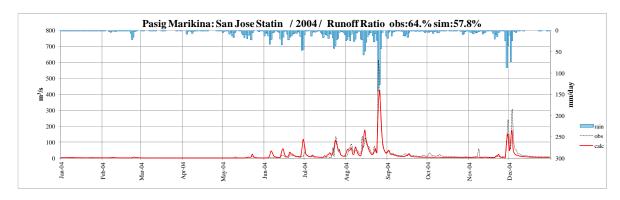
$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{N} |Q_{si} - Q_{oi}|}{\sum_{i=1}^{N} Q_{oi}}$$

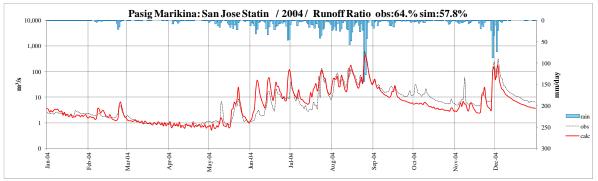
ここに、 Q_o 観測流量; Q_s 計算流量; \overline{Q}_o 観測流量の平均値; N 比較する流量サンプル数.

2004年のハイドログラフを対象にキャリブレーションを実施した。正確な時間雨量データが入手できないため、洪水ピーク流量を合わせることは困難である。モデルキャリブレーションは、低水の流況の再現性を確保することを目的に実施した。図 9.12 に示すように、St. Jose 地点で NS 指数 0.79、RE 44.47 という非常に良い精度の再現性を持つモデルとすることができた。

キャリブレーションしたパラメータの有効性の検証を1999年から2006年について実施した。図9.13と9.14に有効性検証結果を示している。流量観測値との相関の適合性を評価する決定係数(R2)は0.73となり、観測値と十分な整合性が確保できている。計算値と観測値が乖離している箇所は観測値の精度が低いものと考えられることから、本調査で構築されたWEB-DHMによるパッシグ・マリキナ川流域の流出モデルは、十分な再現性を有していると考えてよい。

最終的に設定された流出モデルのパラメータを表 9.6 から表 9.8 に示す。

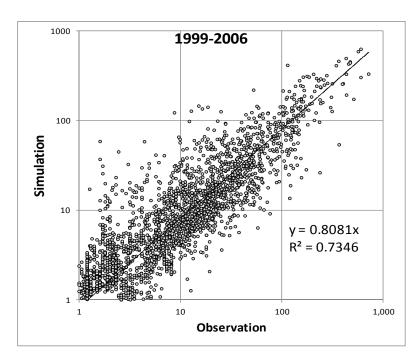




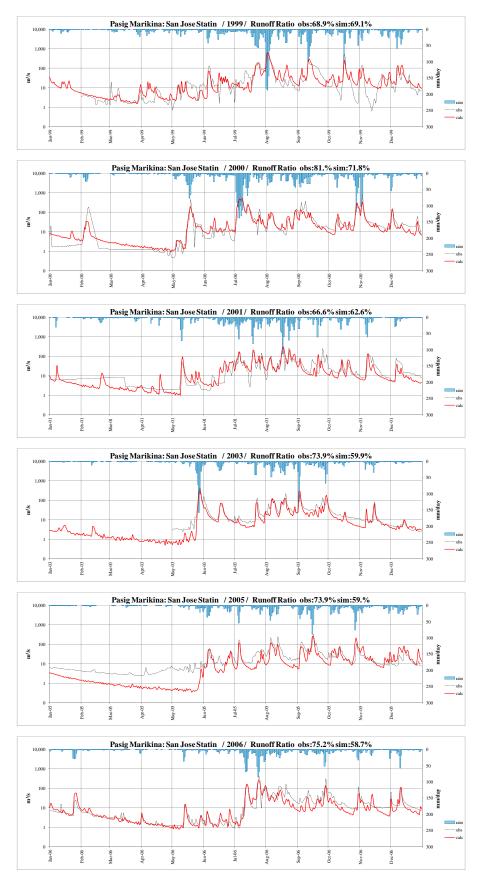
注: 図中の赤線が計算結果、黒い破線が観測結果、グラフ上部の青いバーチャートは降雨データであり、グリッド雨量データから流域平均値を算出したもの)

出典: JICA 調査団

図 9.12 San Jose 地点でのキャリブレーション結果 (図 a は縦軸が通常の軸、b は対数軸)



出典: JICA 調査団図 9.13 計算値と観測流量の相関プロット図(1999 年から 2006 年の San Jose の データについて)



出典: JICA 調査団

図 9.14 1999 年から 2006 年に対する同定されたパラメータの有効性検証計算結果

表 9.7 パッシグ・マリキナ川流域で同定された植生パラメータ

SiB2 Reclassification	coverage [%]	SSTmax [mm]		soil-anis radiatio	Rooting depth [m]	
		SiB2	calibrate SiB2 * 1	SiB2	calibrate SiB2 * 5	
2-Broadleaf Deciduous Trees	15.17	10	10	10	50	1.5
8-Dwarf trees and Shrubs	46.99	5	5	4	20	1
9-Agriculture or C3 Grasslands	14.13	5	5	3	15	1
7-Shrubs with bare soil	12.49	5	5	1	5	1
6-Short vegetation/C4 grassland	11.22	5	5	3	15	1

出典: JICA 調査団

表 9.8 パッシグ・マリキナ川流域で同定された表層土壌パラメータ

Cla	assification	coverage		Soil water parameters										
soil code	Soil Class (FAO)	[%]	theta_s	theta_r	alpha	n	ks 1		ks 1		ks2	k	sg	GWcs
							Itao	calibrate fao * 10	ks1 * 0.1	fao	calibrate fao * 100			
4413	NITOSOLS	73.1	0.438	0.069	0.021	1.484	13.843	138.428	1.384	0.692	69.214	0.15		
4478	CAMBISOLS	17.5	0.447	0.076	0.015	1.467	8.972	89.724	0.897	0.449	44.862	0.15		
4465	ACRISOLS	9.4	0.464	0.072	0.021	1.494	24.473	244.728	2.447	1.224	122.364	0.15		

出典: JICA 調査団

表 9.9 パッシグ・マリキナ川の河道に関する同定パラメータ

sub_basin ID	width_min	width_max	height_mi n	height_ma x	roughness _min	roughness _max	roughness _n
					calibrate	calibrate	caliblate
900	10	50	2	2	0.5	0.5	0.05
800	10	50	2	2	0.5	0.5	0.05
700	50	50	3	4	0.5	0.5	0.05
600	10	50	3	3	0.5	0.5	0.05
500	20	50	3	4	0.5	0.5	0.05
400	10	50	3	3	0.5	0.5	0.05
300	50	80	3	4	0.5	0.5	0.05
200	10	50	3	3	0.5	0.5	0.05
100	80	100	3	4.5	0.5	0.5	0.05

出典: JICA 調査団

9.3.2 ウミライ川流域

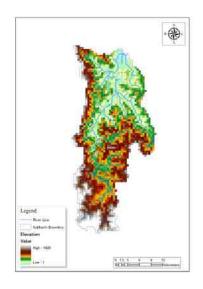
(1) 対象流域

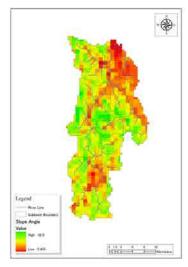
ウミライ川は、ルソン島東部を北に向かって流れ、フィリピン海に注ぎ込む河川である。流 出解析で考慮した流域面積は 628 km² である。ウミライ川流出の一部はウミライーアンガット導水トンネルにより、アンガット貯水湖に分流されている。流出解析ではこのような人工的な水理構造物を考慮しない自然流況を算出し、後の水収支解析で取水を考慮することとした。

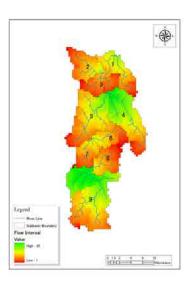
(2) 地形処理

ウミライ川流域について、パッシグ・マリキナ川流域で説明したのと同様の手法で分割流域を作成した。図 9.15 の a には、SRTM DEM データによる地表高分布が示されている。最高地

点は 1428 m で海岸地点は海抜 0 m となっている。地表高分布から算出された勾配は図の b、分割流域の状況を c に示している。







a) Digital Elevation Model

b) Slope Angle

c) Sub-basins

出典: JICA 調査団 (STRM DEM に基づく)

図 9.15 ウミライ川流域での WEB-DHM のモデル化のための地形処理

(3) 土地利用と表層土壌

ウミライ川流域は、5種類の土地利用タイプと5種類の表層土壌で覆われている。表 9.9 では、ウミライ川流域に関連する植生分類(SiB2の分類)を示すが、ほとんど全域である 95.7%が 広葉樹で占められている。FAO による土壌分類基準での NITOSOLS が流域の 67.3%を占め、29.4%が ACRISOLS となっている。これらは粘土ローム質や砂質粘土ロームである。

表 9.10 ウミライ川流域の土地利用被覆状況

Land use using Sib2 reclassification	Coverage [%]
Broadleaf Deciduous Trees	95.7
Agriculture or C3 Grasslands	3.7
Dwarf trees and Shrubs	0.5
Shrubs with bare soil	0.04
Short vegetation/C4 grassland	0.04

出典: JICA 調査団 (DENR データに基づく)

表 9.11 ウミライ川流域の表層土壌分布

	Coverage [%]					
Soil No	Soil Class	Sand %	Silt %	Clay%	Type	
4413	NITOSOLS	44.78	22.92	32.30	Clay Loam	36.9
4546	N ITOSOLS	37.61	24.33	38.06	Clay Loam	30.4
4465	ACRISOLS	48.52	21.77	29.72	Sandy Clay	29.4
					Loam	
4504	GLEYSOLS	44.05	22.92	33.02	Clay Loam	3.0
4537	LUVISOLS	46.47	23.01	30.52	Sandy Clay	0.3
					Loam	

出典: JICA 調査団 (DENR 及び FAO データに基づく)

(4) モデルパラメータ

ウミライ川流域では、キャリブレーションに用いることができる流量観測データがない。したがって、東京大学により並行実施された調査で同定されたアンガット川で用いられたパラメータを適用してモデル化した。適用されたパラメータについて、表 9.11 から表 9.13 に示している。

表 9.12 ウミライ川流域での植生パラメータ

SiB2 Reclassification	coverage [%]	SSTma	ax [mm]	s o il-an is radiatio	Rooting depth [m]	
		SiB2	calibrate SiB2 * 3	SiB2	calibrate SiB2 * 5	
2-Broadleaf Deciduous Trees	95.74	10	30	10	50	1.5
9-Agriculture or C3 Grasslands	3.69	5	15	3	15	1
8-Dwarf trees and Shrubs	0.49	5	15	4	20	1
6-Short vegetation/C4 grassland	0.04	5	15	3	15	1
7-Shrubs with bare soil	0.04	5	15	1	5	1

出典: JICA 調査団

表 9.13 ウミライ川流域での土壌パラメータ

Cla	assification	coverage		Soil water parameters										
soil code	Soil Class (FAO)	[%]	theta_s	theta_r	alpha	n	1	ks 1		ks 1		k	sg	GWcs
							fao	calibrate fao * 1	ks 1 * 0.1	fao	calibrate fao * 10			
4413	NITOSOLS	36.9	0.438	0.069	0.021	1.484	13.843	13.843	1.384	0.692	6.921	0.15		
4546	NITOSOLS	30.4	0.478	0.080	0.018	1.435	20.646	20.646	2.065	1.032	10.323	0.15		
4465	ACRISOLS	29.4	0.464	0.072	0.021	1.494	24.473	24.473	2.447	1.224	12.236	0.15		
4504	GLEYSOLS	3.0	0.449	0.079	0.015	1.450	8.811	8.811	0.881	0.441	4.405	0.15		
4537	LUVISOLS	0.3	0.432	0.070	0.018	1.486	11.355	11.355	1.135	0.568	5.678	0.15		

出典: JICA 調査団

Table 9.14 ウミライ川流域での河道パラメータ

sub_basin	width min	width_max	height_mi	height_ma	roughness	roughness	roughness
ID	width_niii	widtii_iiiax	n	X	_min	_max	_n
					calibrate	calibrate	caliblate
900	10	50	2	2	0.25	0.25	0.045
800	10	50	2	2	0.25	0.25	0.045
700	20	50	3	4	0.25	0.25	0.045
600	10	50	3	3	0.25	0.25	0.045
500	50	50	3	4	0.25	0.25	0.045
400	10	50	3	3	0.25	0.25	0.045
300	50	80	3	4	0.25	0.25	0.045
200	10	50	3	3	0.25	0.25	0.045
100	80	120	3	4.5	0.25	0.25	0.045

出典: JICA 調査団

9.3.3 アゴス川流域

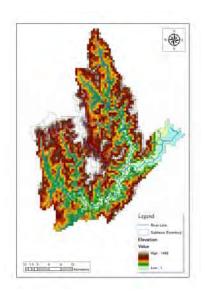
(1) 対象流域

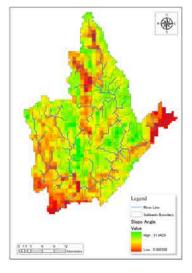
アゴス川流域はカリワ川とカナン川流域からなっている。カリワ川流域は、アゴス川全体の中での南西部に位置し、カナン川流域は北西に位置している。カリワ川とカナン川の合流後、

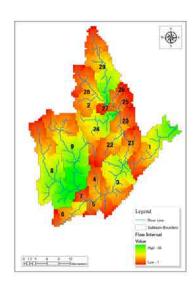
アゴス川となり、東方へ流下してフィリピン海へと注ぎこむ。モデル化した流域面積は 950 km^2 である。

(2) 地形処理

パッシグ・マリキナ川流域について述べたのと同様に、アゴス川流域の地形処理を行った。 SRTM DEM によるアゴス川流域の地表高分布を図 9.16 の a に示している。最高標高は 1489 m であり、一方、最低標高は下流端の海抜 $0 \, \mathrm{m}$ である。







a) Digital Elevation Model

b) Slope Angle

c) Sub-basins

出典: JICA 調査団 (STRM DEM に基づく)

図 9.16 アゴス川流域での WEB-DHM のモデル化のための地形処理

(3) 土地利用と表層土壌

アゴス川流域は、4種類の土地利用タイプ、2種類の表層土壌タイプで覆われている。表 9.15 に示したように、SiB2 での植生分類でみれば、75.3%が広葉樹となっている。FAO の土壌タイプ分類に従えば、流域の 64.9%が ACRISOLS で 35.1%が NITOSOLS となっており、大部分が粘土ロームと砂質粘土ロームである。

表 9.15 アゴス川流域の土地被覆状況

Land use using Sib2 reclassification	Coverage [%]
Broadleaf Deciduous Trees	75.3
Dwarf trees and Shrubs	22.3
Agriculture or C3 Grasslands	2.2
Short vegetation/C4 grassland	0.2

出典: JICA 調査団 (DENR データに基づく)

表 9.16 アゴス川流域の表層土壌分布状況

	Coverage [%]								
Soil No	Soil Class	Sand %	Silt %	Clay%	Type				
4465	ACRISOLS	48.52	21.77	29.72	Sandy Clay	64.9			
					Loam				
4413	NITOSOLS	44.05	22.92	33.02	Clay Loam	35.1			

出典: JICA 調査団 (DENR 及び FAO データに基づく)

(3) モデルパラメータ

アゴス川流域でもモデルキャリブレーションに利用できる流量観測データが少ない。そのため、東京大学によって同定された近隣のアンガット川流域でのパラメータを準用することとした。アゴス川流域に用いたパラメーター覧を表 9.17 から表 9.19 に示す。

表 9.17 アゴス川流域の植生パラメータ

SiB2 Reclassification	coverage [%]	SSTma	ıx [mm]	s o il-an is radiatio	Rooting depth [m]	
		LSiB2	calibrate SiB2 * 3	SiB2	calibrate SiB2 * 5	
2-Broadleaf Deciduous Trees	75.26	10	30	10	50	1.5
8-Dwarf trees and Shrubs	22.30	5	15	4	20	1
9-Agriculture or C3 Grasslands	2.21	5	15	3	15	1
6-Short vegetation/C4 grassland	0.24	5	15	3	15	1

出典: JICA 調査団

表 9.18 アゴス川流域の表層土壌パラメータ

Cla	assification	coverage		Soil water parameters								
soil code	Soil Class (FAO)	[%]	theta_s	theta_r	alpha	n	ks 1		ks2	k	sg	GWcs
							lfao	calibrate fao * 1	ks 1 * 0.1	fao	calibrate fao * 10	
4465	ACRISOLS	64.9	0.464	0.072	0.021	1.494	24.473	24.473	2.447	1.224	12.236	0.15
4413	NITOSOLS	35.1	0.438	0.069	0.021	1.484	13.843	13.843	1.384	0.692	6.921	0.15

出典: JICA 調査団

表 9.19 アゴス川流域の河道パラメータ

sub_basin	width min	width_max	height_mi	height_ma	roughness	roughness	roughness	
ID	_		n	X	_min	_max	_n	
					calibrate	calibrate	caliblate	
900	10	50	2	2	0.25	0.25	0.045	
800	10	50	2	2	0.25	0.25	0.045	
700	50	50	3	4	0.25	0.25	0.045	
600	10	50	3	3	0.25	0.25	0.045	
500	50	50	3	4	0.25	0.25	0.045	
400	10	50	3	3	0.25	0.25	0.045	
300	50	80	3	4	0.25	0.25	0.045	
290	10	40	2	3	0.25	0.25	0.045	
280	10	40	2	3	0.25	0.25	0.045	
270	50	50	3	3	0.25	0.25	0.045	
260	10	40	2	3	0.25	0.25	0.045	
250	10	40	2	3	0.25	0.25	0.045	
240	10	40	2	3	0.25	0.25	0.045	
230	40	50	3	4	0.25	0.25	0.045	
220	10	40	2	3	0.25	0.25	0.045	
210	50	80	3	4	0.25	0.25	0.045	
100	80	120	3	4.5	0.25	0.25	0.045	

出典: JICA 調査団

9.3.4 ラグナ湖流域

(1) 対象流域

ラグナ湖は、ルソン島の中心部に位置する非常に浅い淡水湖である。湖面面積は 911 $\,\mathrm{km}^2$ に もなる。ラグナ湖の平均水深はおよそ 2.8 $\,\mathrm{m}$ である。

ラグナ湖での流出解析の目的は、湖に流れ込む流域からの流出量を評価することである。多くの河川流域がラグナ湖を取り囲んでおり、その多くは平坦な地形である。このような流域をモデル化できる SHER モデルを適用した。

(2) SHER ブロックへの分割

SHER ブロックは流出域と涵養域に分けられる。涵養域はそこに到達した降雨の大部分が帯水層の涵養に費やされる区域である。一方、流出域は周辺からの帯水層の流入が集まることで河川水位よりも地下水位が高くなり、河川に流量を供給する区域である。丘陵地帯や山岳地帯は涵養域が基本的に分布し、川沿いの沖積地系は流出域と見なせる。

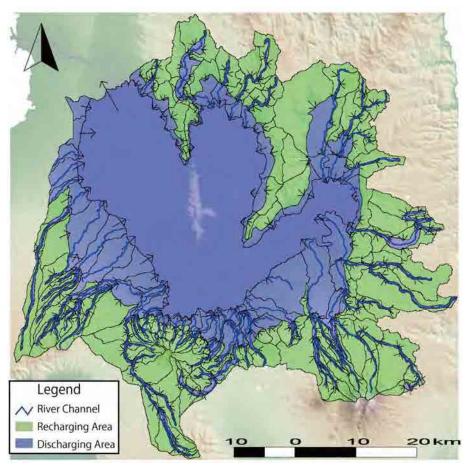
流出域、涵養域の区分は地形と衛星写真により行った。分割されたラグナ湖周辺流域の SHER ブロック数は 345 となった。分割状況を図 9.17 に示している。

(3) 土地利用と不浸透面積

土地利用状況は、土壌パラメータの設定において重要な上方となる。DENR による土地利用分類結果を SHER モデルで考慮する表層土壌の状況を勘案した土地利用分類に読み替えた。例えば、森林地域と畑地区域は、水文学的見地での表層土上の特性としてみれば、土壌内の空隙率が高く保持されており、最も透水性が高くなる土地利用状況として同類と見なせる。一方、水田とマングローブが繁茂するような粘土性の土壌は、やはり透水性が低い粘土質の区域として同類として見なせる。SHER モデルのための表層土壌分類を行った結果を図 9.18に示す。

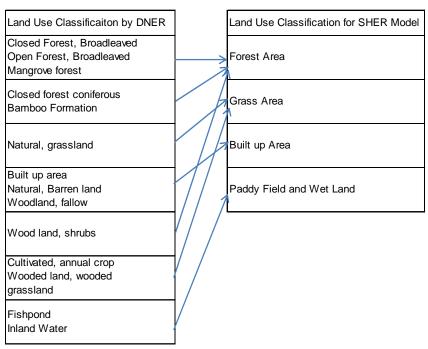
不浸透区域はここに到達した雨水が下方に浸透することができず、表面流出として即座に硫化してしまうような、水文流出過程上、特異な振る舞いをするエリアであり、適切に不浸透区域の面積率を与えることが流出解析上重要となる。DENRの土地利用分布データの"Buildup"区域を Google Earth を用いて簡易に複数地点で計測し、この土地利用分類された区域の 0.7 が不浸透面積とした。

分類された土地利用面積率について図の9.19に示している。



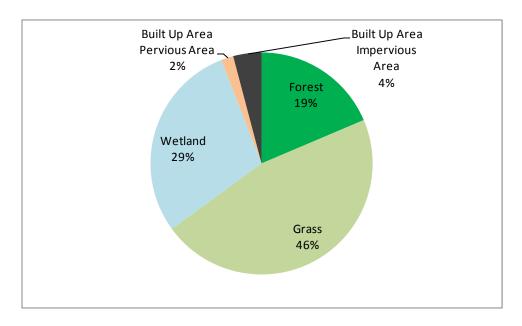
出典: JICA 調査団

図.9.17 ラグナ湖流域の SHER ブロック分割



出典: JICA 調査団

図 9.18 DENR 土地利用分類の SHER モデル用土地利用分類への再分類



出典:JICA 調査団

図 9.19 ラグナ湖流域の土地利用及び不浸透面積の占有率

(4) 表層土壌

SHER モデルによるモデリングでは、表層土壌の飽和透水係数を適切に設定することが最も 重要となる。表層土壌の物理的な水文伝達特性をモデルに反映することで、降雨の表面流出 や地下浸透の量を適切に表現できるようになる。

土地利用と土壌分布を GIS 上で重ねあわせたところ、その組み合わせパターンは 31 タイプと なった。その 31 タイプは、基本的に 6 つの土壌タイプで構成されている。整理された表層土 壌タイプを表 9.20 に示す。

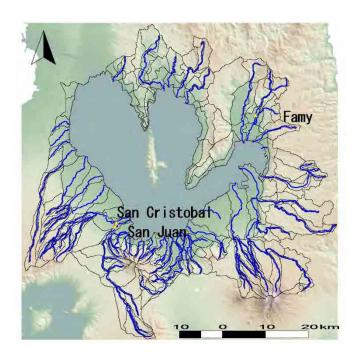
(5) キャリブレーションのための河川流量観測データ

ラグナ湖周辺流域については河川流量観測所が3地点存在する。Mayor、San Cristobal 及びSan Juan である。しかし、San Cristobal での観測記録はハイドログラフが不自然な形状を示すことから、キャリブレーションに利用することができない。流量観測所地点を図9.20に示した。

表 9.20 SHER モデルのためのラグナ湖周辺流域の表層土壌タイプ分類結果

No	Soil Name
1	ForestNITOSOLS_RechargingArea
2	ForestACRISOLS_RechargingArea
	ForestCAMBISOLS_RechargingArea
4	ForestGLEYSOLS_RechargingArea
5	ForestLUVISOLS_RechargingArea
	ForestVERTISOLS_RechargingArea
	Glass NITOSOLS_Recharging Area
8	Glass ACRISOLS_Recharging Area
9	Glass CAMBISOLS_Recharging Area
10	Glass GLEYSOLS_Recharging Area
11	Glass LUVISOLS_Recharging Area
12	Glass VERTISOLS_Recharging Area
13	CLAY
	BuiltUp_NITOSOLS
15	BuiltUp_ACRISOLS
16	BuiltUp_CAMBISOLS
	BuiltUp_GLEYSOLS
	BuiltUp_LUVISOLS
19	BuiltUp_VERTISOLS
	ForestNITOSOLS_DischargingArea
	ForestACRISOLS_DischargingArea
22	ForestCAMBISOLS_DischargingArea
23	ForestGLEYSOLS_DischargingArea
24	ForestLUVISOLS_DischargingArea
	ForestVERTISOLS_DischargingArea
26	GlassNITOSOLS_DischargingArea
	Glass ACRISOLS_Discharging Area
	Glass CAMBISOLS_Discharging Area
	Glass GLEYSOLS_Discharging Area
	GlassLUVISOLS_DischargingArea
31	Glass VERTISOLS_Discharging Area

出典:JICA 調査団



出典:JICA 調査団

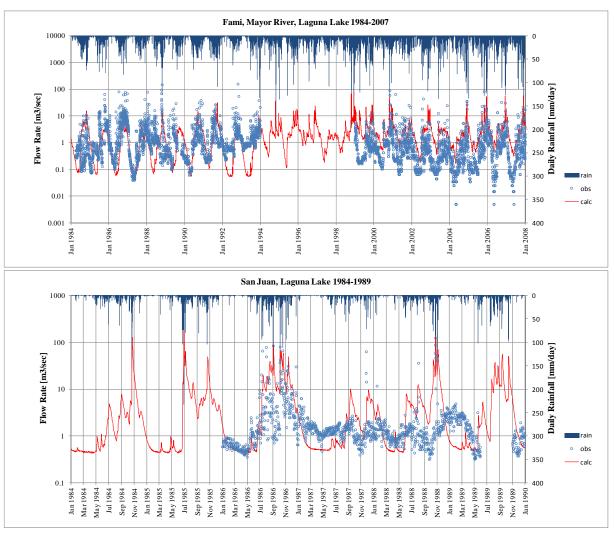
図 9.20 ラグナ湖流域の河川流量観測所位置図

(6) Model Parameters

現況でのグリッド雨量及び可能蒸発散能データを境界条件として流出解析を実施した。ただし、モデルは自然流況を対象にモデル化しており、人工構造物による取排水を考慮していない。観測流量データと計算流量データを比較することで、モデルパラメータのキャリブレーションを行った。表層土上の飽和透水係数と帯水層の透水係数が主な SHER モデルでのキャリブレーション対象のパラメータである。キャリブレーション結果の観測値と計算値の比較状況を図 9.21 に示す。また、同定されたパラメータを表 9.21 に示す。

同定された表層土上の透水係数は、一般的な粘土ローム質として常識的なものとなっている。 観測所と比較できた流域はラグナ湖流域の中でわずか 2 箇所にすぎないが、物理的に水文流 出過程をモデル化しており、表層土上の物理的なパラメータで構成されるモデルであるため、 計測されていない流域についても、このパラメータを適用することが可能と考える。

同様に将来の流況の評価においても、ここで作成されたモデルを適用してバイアス補正された GCM の出力結果を入力することでアセスメントが可能となる。



出典: JICA 調査団

図 9.21 ラグナ湖流域のキャリブレーション