1km 解像度陸面モデルによる河川流量の検証

藪 優太郎¹・芳村 圭²・Hyungjun KIM³・新田 友子⁴・鳩野 美佐子⁵・
石塚 悠太⁶・向田 清峻⁷・可知 美佐子⁸・沖 大幹⁹

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

E-mail:yabu@rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 准教授 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

³正会員 特任准教授 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

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

⁵学生会員 博士課程 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

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

⁷非会員 国土交通省 九州地方整備局 立野ダム工事事務所(〒861-8019 熊本県熊本市下南部1-4-73)

⁸正会員 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター 主任開発員
(〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1)

⁹正会員 教授 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

高精度な河川流量予測システムの構築を目指して日本域における1km解像度陸面モデルを構築し、水平空間解像度および土壌分類データの変更が河川流量の表現にどの程度影響を与えるか検証した。検証期間は2014, 2015年の2年間とし、検証対象領域は国内6河川を選定した。構築した陸面モデルは陸面物理過程モデルMATSIROと動的河道モデルCaMa-Floodの2つからなる。陸面物理過程モデルに与える土壌分類をより詳細なソースデータから作成することで河川のピーク流量および低水流量の表現がより観測値に近づき2期間・6領域における12の実験のうち9実験にて対観測流量比率が1-14%向上し、かつRMSEはすべての実験で減少した。また、モデル水平空間解像度の向上により12実験中10の実験でRMSEの減少が確認された。

Key Words : flood, river discharge forecast, land surface models, river routing models

1. はじめに

2015年9月の関東東北豪雨や2016年台風10号によりもたらされた甚大な洪水被害を引き合いに出すまでもなく、我が国において洪水被害対策が喫緊の課題であることは論をまたない。また、国際河川等での洪水発生事案を鑑みれば(Bakker, 2007)¹⁾洪水被害にさらされているのは必ずしも我が国だけでなく、洪水は世界全体レベルで解決すべき問題であり、確度の高い洪水予測の実現は地球全体の急務である。

全球域を対象とする洪水予測システムの既往事例の1つには、欧州委員会とヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)が共同開発したGlobal Flood Awareness System(GloFAS)がある(Alfieri et al., 2013)²⁾。これは、ECMWFが運用するアンサンブル予測システム(Miller et al., 2010)³⁾が陸面モデルを用いて計算した予測流出量を、水文モデルLisflood(van der Knijff et al., 2010)⁴⁾に与える事で向こう15日

間の洪水発生を予測するシステムであり、1日2回、時間解像度を1日、空間解像度を約32km(予報11-15日目は65km)として運用を実施している。このような構成のシステムは、数値気象予報データを用いる事で観測値をモデルで追跡・外挿する場合に比べ予報時間を延長できる(Alfieri et al., 2013)²⁾ほか、物理過程を考慮する事で洪水予測に重要な流域の乾湿状態といった初期条件を再現できる(渋谷ら, 2014)⁵⁾などのメリットがある。

一方で、先述のGloFASは最も解像度の高い予報期間においても約32kmの空間解像度にとどまり、将来に向けて全球域での空間解像度を100mの精度まで向上させることに一定の意義があると認められている(Wood et al., 2011)⁶⁾なかではまだまだ改善の余地があると言える。

そこで本研究では、将来的に数値物理モデルによるリアルタイムでの超高解像度・全球域河川流量予測を提供することを念頭に、まずは島国という独立した陸面を持つ日本域を対象として陸面モデルを構築し、連続した気

象データが取得可能な過去の期間を対象としてモデルを実行することで河川流量再現の精度検証を実施した。

なお、ここで述べる陸面モデルとは気象データを受け取り流出量や蒸発散量などを出力する陸面物理過程モデル、そして陸面物理過程モデルから出力された流出量を入力として河川流量や水位を出力する動的河道モデルを総合した呼称とする。

日本国内では特定流域を対象として精緻な予測に取り組んでいる事例が既に存在する(立川ら, 2009)⁹⁾、本研究では特定流域に対応するためのチューニングなどを行わず、日本全域を同一の物理式で解いている点が大きく異なる。当然、本研究で用いる物理式は対象が全球域に拡大される場合にもシームレスに対応可能でありその点に大きな意義がある。

なお、物理式に立脚した日本域全体における既存の陸面モデルとしては Today's Japan⁹⁾が存在する。本研究で構築した陸面モデルは Today's Japan をベンチマークとして各所を更新することによる改良を目指しており、具体的にはモデルの水平空間解像度を Today's Japan の 10km 格子から 1km 格子に向上し、さらに土壌分類、土地被覆、葉面積指数といった地表面データの更新を実施した。また、Today's Japan では陸面物理過程モデルとして Iso-MATSIRO⁹⁾を、動的河道モデルとして J-TRIP (Japan Total Runoff Integrating Pathways)¹⁰⁾を利用したのに対し、今回構築した陸面モデルでは陸面物理過程モデルとして MATSIRO¹¹⁾を、動的河道モデルとして CaMa-Flood¹²⁾を採用したことも異なる点である。

対象期間は 2014 年、2015 年の 2 年間とし、検証対象領域は国土交通省水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp>)から対象期間中の観測水位データが取得可能である石狩大橋・狐禅寺・小千谷・栗橋・淀・瀬ノ下の 6 観測所及びその上流域とした。

本稿では 2 章で利用したモデルやデータに関して説明し、3 章で結果を、4 章で考察を、そして 5 章でまとめを述べることとする。

2. 手法

本研究では連続した降雨データが得られる 2014 年、2015 年を対象期間とし、モデル水平空間解像度と境界条件データの 2 点を変更することで陸面モデルの精度がどのように変化するかを検証した。

(1) モデル

陸面モデルを構成する陸面物理過程モデル MATSIRO および動的河道モデル CaMa-Flood について説明する。

a) 陸面物理過程モデル MATSIRO

陸面物理過程モデルは、雨が降り、その雨が地表・地中・植物や人間活動による影響を経て海洋や大気に還っていくまでの一連の水の流れおよびそれに関連する熱輸送を表現するモデルである。より高い精度で河川流量を表現するにあたり、動的河道モデルの前段階にあたる陸面物理過程モデルの精度は非常に重要である。

本研究では植物動態が組み込まれた分布型流出モデルである陸面物理過程モデル MATSIRO を採用する。陸面物理過程モデル MATSIRO は地表面および植生、6 層の土壌と最大 3 層の積雪層により構成され、鉛直次元における熱・水輸送を計算するモデルであり水平方向の熱・水輸送は考慮されていない。

b) 動的河道モデル CaMa-Flood

動的河道モデル CaMa-Flood の特徴の 1 つは、氾濫原などを考慮している点である。洪水時には氾濫原の存在が水位上昇を抑制していることから、氾濫原の考慮は非常に重要である。なお、動的河道モデル CaMa-Flood では河道から溢れた水が氾濫原に溢れるように設計されており、計算タイムステップの最初に河道と氾濫原の水位が等しくなるよう調整がなされる。

動的河道モデル CaMa-Flood では各グリッドにおける河道貯水量、氾濫原貯水量、流量、水深、氾濫面積が算出されるが、モデルの予報変数は河道および氾濫原の貯水量を合計した総貯水量のみであり、それ以外の変数は全て総貯水量を元に診断的に計算される関係となっている。動的河道モデル CaMa-Flood における河道抽出では、FLOW method¹³⁾と呼ばれる表面流向データおよびデジタル標高モデルを利用した手法が用いられており、解像度変更が簡易である。

(2) データ

ここでは陸面物理過程モデル MATSIRO の実行で利用する地表面データおよび入力気象データと、動的河道モデル CaMa-Flood から出力された河川流量の検証に利用するデータについて説明する。

a) 地表面データ

陸面物理過程モデル MATSIRO では土壌分類、土地被覆、葉面積指数などの地表面データを境界条件として与えている。これら 3 種類の地表面データをモデルの高解像度化に合わせるのは当然のこととして、さらに使用するデータソースも変更することでより詳細な境界条件を与え、陸面物理過程モデルの高精度化を図った。土地被覆分類に関しては、既往の日本域陸面モデルである Today's Japan では国土交通省が提供する国土数値情報を元に 0.1° 空間解像度で作成されたデータ¹⁴⁾を利用していたが、本研究ではモデルの全球規模への拡大を念頭に、

図-1 土地被覆データ（左：変更前，右：変更後）

図-2 土壌分類データ（左：変更前，右：変更後）

図-3 葉面積指数（左：変更前，右：変更後）

ISCGM2により全球規模で提供されているGLCNMO (Global Land Cover by National Mapping Organization)¹⁵⁾という土地被覆レイヤーを利用する。

GLCNMOはTerra/Aqua衛星(NASA)に搭載されているMODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)¹⁶⁾による観測結果を元にFAO (Food and Agriculture Organization of the UN)が整備した土地被覆分類体系(LCCS)を適用して土地被覆を20個のカテゴリに分類し、地球全体の土地被覆の状態を表現したラスター形式の地理空間情報であり、これを陸面物理過程モデルMATSIROで利用可能な12の分類（表-1）に再分類して利用している。Today's Japanで用いられた土地被覆分類からの変化は図-1に示す通りである。

土壌分類データに関しては、FAO他によって提供されているHarmonized World Soil Database¹⁷⁾（以降、HWSDと称する）を利用した。Today's Japanで用いられた土地被覆分類からの変化は図-2に、分類の内容は表-2に示す通りである。

HWSDは全球での土壌に関する様々なデータを格納しているデータベースである。HWSDから取得できる土壌

表-1 土地被覆の内容

ID	名称	ID	名称
1	氷河	7	草原
2	常緑広葉樹林	8,12	裸地
3	落葉広葉樹林	9	ツンドラ
4	混交林	10	畑地
5	針葉樹林	11	砂漠
6	高緯度落葉樹林		

表-2 土壌分類の内容

ID	名称	ID	名称
1	Sand	7	Sandy Clay Loam
2	Loamy Sand	8	Clay Loam
3	Sandy Loam	9	Silty Clay Loam
4	Loam	10	Sandy Clay
5	Silt Loam	11	Silty Clay
6	Silt	12	Clay

分類はUSDA (US Department of Agriculture)による分類に準拠しており、土壌において砂、粘土、ロームがそれぞれどれだけの割合で含まれるかによって13の土壌タイプが定められているており、このうち3種類が日本域の土壌として適用される。これにより、既往のToday's Japanでは日本域全体が単一の土壌で表されていたところをより詳細に表現した。

葉面積指数に関しては Yuan¹⁸⁾により整備された1タイムステップ8日間、水平空間解像度30秒角のMODIS LAI (Leaf Area Index)を月単位で時間変化させて与えている。葉面積指数の変化は図-3に示すとおりである。

b) 入力気象データ

本研究では、降水量データとして気象庁1kmメッシュ全国合成レーダーエコー強度（以下、RDRと称する）GPV (Grid Point Value)を利用する。

RDRは、気象庁が日本全国に保有する20台の気象レーダーで観測したエコーを降水強度に換算した値を10分間隔で配信しているものである。

RDRの特徴として、配信元の気象庁によって前240時間のアメダス雨量とレーダーデータの比較による補正処理および観測時間ごとにその10分前からの前1時間におけるアメダス雨量とレーダーデータの比較による補正処理が実施されており、精度向上が図られていることがあげられる。RDRを採用した狙いは、精度の高い入力気象データを利用することでモデル水平空間解像度や地表面データといった他の要素の変更によりモデル出力が観測結果に対してどの程度近づくか、あるいは遠ざかるかを明瞭にすることである。なお、降水量以外の入力気象データに関しては5kmメッシュの気象庁メソスケール数値予報モデル（以下、MSMと称する）GPVを利用した。

c) 検証用データ

表-3 観測所諸元

観測所名	水系	集水面積 (km ²)	河口距離 (km)
石狩大橋	石狩川	12,697	26.6
狐禅寺	北上川	7,065	77.9
小千谷	信濃川	9,719	45.2
栗橋	利根川	8,588	130.4
淀	宇治川	4,354	38.9
瀬ノ下	筑後川	2,295	25.5

モデル出力による河川流量の検証を実施するためには比較対象となる観測結果が必要である。本研究では水文水質データベース（国土交通省）に格納されている観測水位データを元に作成した流量曲線を検証用データとして利用した。なお、検証期間は2014年、2015年とし、対象領域は表-3に示すとおり石狩大橋・狐禅寺・小千谷・栗橋・淀・瀬ノ下の6観測所及びその上流域とした。

3. 結果

本研究で構築した陸面モデルでは土壌分類・土地被覆・葉面積指数といった地表面データおよび水平空間解像度を改良し、既存システムと比較検証した。各実験設定は表-4に示すとおりである。地表面データの中でも特に土壌分類データの変更が河川流量の出力に対して大きな影響を持つことがわかったため土壌分類データの変更

あり・なしに関して対象実験を実施した。また、水平空間解像度に関しては1km×1kmと10km×10kmにて対照実験を実施した。実験の命名規則はCTL1が1km×1km水平空間解像度、CTL10が10km×10kmを表しており、NEWは変更後土壌、OLDが変更前土壌を表している。

各実験における陸面モデルの出力結果は動的河道モデル部分と陸面物理過程モデル部分に分けて、表-5から表-8に示す。CTL1 NEW（表-5）とCTL1 OLD（表-6）の流量再現を比較してみると、2014年の石狩大橋、狐禅寺、小千谷、瀬ノ下および2015年の石狩大橋、狐禅寺、小千谷、淀、瀬ノ下で流量の対観測比率が1%から14%向上したことがわかる。また、RMSE (Root Mean Square Error) はすべての期間・領域で改善していることがわかる。

同様の傾向はCTL10_NEW（表-7）とCTL10_OLD（表-8）での実験結果を比較してもみてとれる。なお、表中のRMSEは3時間ごとのモデル出力と観測値の差1年分を二乗平均したものの平方根であり、数値が小さいほどモデルと観測値の乖離が小さいことを示す。

また、モデル水平空間解像度の向上による出力変化を調べるべくCTL1_NEW（表-5）とCTL10_NEW（表-7）を比較すると、対観測流量比率はほとんど変化がみられないものの、RMSEは2014年の石狩大橋、2015年の栗橋を除くすべての期間、領域で数値の減少がみられ、減少幅は最大で瀬ノ下（2015年）の2.9%であった。

表-4 実験設定

実験名	解像度	土壌分類	土地利用	葉面積指数	降水量	他気象値	実験期間	出力ステップ	領域
CTL1_NEW	1km	HWSD	GLCNMO	MODIS LAI	RDR	MSM	2014年1月～ 2015年12月	3時間ごと	日本域 N:24-46 E:123-148
CTL1_OLD		Y07							
CTL10_NEW	10km	HWSD							
CTL10_OLD		Y07							

表-5 陸面モデル出力結果 (CTL1_NEW)

河道モデル出力結果(空間解像度1km、新土壌)

陸面過程モデル水収支結果(空間解像度1km、新土壌)

	新土壌	流量(MCM/yr)			RMSE (t/s)	降水量 (mm/yr)	蒸発量 (mm/yr)	流出量 (mm/yr)	土壌水分 変化 (mm/yr)	積雪変化 (mm/yr)	残差(mm/yr)	
		観測値	モデル	比率							年間差分	比率
2014	石狩大橋	15353	10119	66%	531	1353.1	552.6	795.5	24.9	-88.3	68.4	5.1%
	狐禅寺	10434	7085	68%	219	1578	517.4	1048.2	-7.6	-6.9	26.9	1.7%
	小千谷	15170	14901	98%	261	2094.7	438.5	1535.3	7.2	90.7	23.0	1.1%
	栗橋	8793	11706	133%	291	1841.8	491.8	1312.8	-2.7	21.5	18.4	1.0%
	淀	5401	6153	114%	132	2018	455.6	1571.3	-15.1	0.7	5.5	0.3%
	瀬ノ下	2927	3491	119%	67	1932	478.5	1487.2	-35.1	0.1	1.3	0.1%
2015	石狩大橋	13659	11318	83%	487	1362.2	377.5	879.9	26.1	87.2	-8.5	-0.6%
	狐禅寺	9907	6779	68%	300	1448.2	429.6	998.1	7.6	5.1	7.8	0.5%
	小千谷	16840	16171	96%	261	1967.5	392.9	1658.7	-7.2	-92.9	16.0	0.8%
	栗橋	8592	11846	138%	322	1765	443.6	1326.8	2.7	-21.7	13.6	0.8%
	淀	7351	7646	104%	123	2387.5	478.5	1900.1	15.1	-0.7	-5.5	-0.2%
	瀬ノ下	3634	3837	106%	196	2142.6	464.7	1642.4	35.1	-0.4	0.8	0.0%

※MCM=10⁶ m³

表-6 陸面モデル出力結果 (CTL1_OLD)

河道モデル出力結果(空間解像度1km、旧土壌)

陸面過程モデル水収支結果(空間解像度1km、旧土壌)

2014

2015

旧土壌	流量(MCM/yr)			RMSE (t/s)
流域	観測値	モデル	比率	
石狩大橋	15353	9843	64%	662
狐禅寺	10434	6160	59%	461
小千谷	15170	13504	89%	524
栗橋	8793	10396	118%	620
淀	5401	5447	101%	247
瀬ノ下	2927	3079	105%	196
石狩大橋	13659	11174	82%	523
狐禅寺	9907	6235	63%	456
小千谷	16840	14920	89%	589
栗橋	8592	10698	125%	671
淀	7351	7017	95%	255
瀬ノ下	3634	3577	98%	220

※MCM=10⁶m³

降水量 (mm/yr)	蒸発量 (mm/yr)	流出量 (mm/yr)	土壌水分 変化 (mm/yr)	積雪変化 (mm/yr)	残差(mm/yr)	
					年間差分	比率
1353.1	591.1	767.3	15.5	-87.9	67.1	5.0%
1578	624.4	910.3	21.7	-6.3	27.9	1.8%
2094.7	586.8	1392.6	3	88.5	23.8	1.1%
1841.8	639.9	1165.8	-4.2	21.6	18.7	1.0%
2018	580.2	1428.5	3	0.6	5.7	0.3%
1932	621.1	1312.8	-3.6	0.1	1.6	0.1%
1362.2	393.4	868.7	21.5	86.8	-8.2	-0.6%
1448.2	508.8	944.9	18.3	4.4	-28.2	-1.9%
1967.5	515.7	1530.6	2.5	-90.7	9.4	0.5%
1765	570.4	1198.1	-4.6	-21.8	22.9	1.3%
2387.5	594.4	1801.6	3	-0.5	-11.0	-0.5%
2142.6	605.9	1532.6	-3.6	-0.4	8.1	0.4%

表-7 陸面モデル出力結果 (CTL10_NEW)

河道モデル出力結果(空間解像度10km、新土壌)

陸面過程モデル水収支結果(空間解像度10km、新土壌)

2014

2015

新土壌	流量(MCM/yr)			RMSE (t/s)
流域	観測値	モデル	比率	
石狩大橋	15353	10288	67%	521
狐禅寺	10434	7509	72%	295
小千谷	15170	14833	98%	286
栗橋	8793	11565	132%	253
淀	5401	5697	105%	178
瀬ノ下	2927	3966	135%	95
石狩大橋	13659	11490	84%	497
狐禅寺	9907	7528	76%	345
小千谷	16840	16183	96%	274
栗橋	8592	11707	136%	262
淀	7351	7051	96%	166
瀬ノ下	3634	4372	120%	95

※MCM=10⁶m³

降水量 (mm/yr)	蒸発量 (mm/yr)	流出量 (mm/yr)	土壌水分 変化 (mm/yr)	積雪変化 (mm/yr)	残差(mm/yr)	
					年間差分	比率
1349.4	535.3	782.1	51.5	-87.9	68.4	5.1%
1566.4	524	1027.4	-3.7	-8.1	26.8	1.7%
2026.8	436.6	1474.3	9	85.7	21.2	1.0%
1900.9	535.4	1330	-2.3	23.9	13.9	0.7%
1948	445.9	1507	-11.4	0.95	5.5	0.3%
1899	481.4	1445.3	-29.3	0	1.6	0.1%
1353.9	368.1	859.9	45.9	86.7	-6.7	-0.5%
1439	435.3	984.7	19.9	6.4	-7.3	-0.5%
1908.8	389.2	1608.5	-9	-87.8	7.9	0.4%
1812.5	481.8	1346.3	2.3	-24.1	6.2	0.3%
2324.1	471	1847.4	11.4	-0.9	-4.8	-0.2%
2145.6	464.5	1651.3	29.3	-0.2	0.7	0.0%

表-8 陸面モデル出力結果 (CTL10_OLD)

河道モデル出力結果(空間解像度10km、旧土壌)

陸面過程モデル水収支結果(空間解像度10km、旧土壌)

2014

2015

旧土壌	流量(MCM/yr)			RMSE (t/s)
流域	観測値	モデル	比率	
石狩大橋	15353	9614	63%	525
狐禅寺	10434	6484	62%	508
小千谷	15170	13755	91%	619
栗橋	8793	10494	119%	471
淀	5401	5251	97%	284
瀬ノ下	2927	3566	122%	198
石狩大橋	13659	11142	82%	504
狐禅寺	9907	6705	68%	507
小千谷	16840	15164	90%	686
栗橋	8592	10790	126%	493
淀	7351	6663	91%	290
瀬ノ下	3634	4118	113%	210

※MCM=10⁶m³

降水量 (mm/yr)	蒸発量 (mm/yr)	流出量 (mm/yr)	土壌水分 変化 (mm/yr)	積雪変化 (mm/yr)	残差(mm/yr)	
					年間差分	比率
1349.4	556.7	731.9	79.9	-87.7	68.6	5.1%
1566.4	601.4	879.8	65.1	-7.6	27.7	1.8%
2026.8	552.4	1366.2	1	85.4	21.8	1.1%
1900.9	657.6	1205	-0.3	24	14.6	0.8%
1948	544.2	1394.3	3.1	0.6	5.8	0.3%
1899	593	1306.5	-2.1	-0.3	1.9	0.1%
1353.9	376.9	835.8	61.3	86.6	-6.7	-0.5%
1439	491.2	911.4	36.9	6	-6.5	-0.5%
1908.8	483.6	1506	-1	-87.4	7.6	0.4%
1812.5	585.6	1239.6	4.9	-24.2	6.6	0.4%
2324.1	560.1	1772.3	-3.1	-0.6	-4.6	-0.2%
2145.6	571.1	1571.8	2.1	-0.3	0.9	0.0%

4. 考察

(1) 地表面データの変更による出力の変化

土壌分類データの変更による結果の変化を考察する。CTL1_NEWとCTL1_OLD, CTL10_NEWとCTL10_OLDのように土壌分類データあり・なしの時系列流量データを比較すると、土壌分類データ変更後はピーク流量、低水流量の両方がより観測値に近づいており、これにより対観測流量比率およびRMSEが改善していると考えられる。

そこで土壌による河川流量への影響を可視化するため、図-4にCTL1_OLDにおける陸面物理過程モデルMATSIROによる土壌水分当量の変化（上段）、流出量（中段水色）、基底流出量（中断青色）および動的河川モデルCaMa-Floodによる河川流量を示す。なお、上段水色線はRDR降水量を、下段黒線は観測河川流量を示している。また同様に図-5にはCTL1_NEWの各出力を示している。

図-4 土壌分類変更前の土壌水分量・流出量・流量（小千谷，2015年9月）

図-5 土壌分類変更後の土壌水分量・流出量・流量（小千谷，2015年9月）

表-9 各土壌タイプの透水係数

Soil type	透水係数(m/s)
2:Loamy Sand	1.75×10^{-5}
4:Loam	0.236×10^{-5}
5:Silt Loam	0.11×10^{-5}
7:Sandy Clay Loam	0.631×10^{-5}

図-6および図-7の河川流量（下段青線）と観測流量（下段黒線）を比較してみると、CTL1_OLDではピークが過大に出る一方で低水流量が過小であり観測流量と一致していないことがわかる。一方で、CTL1_NEWはピークが小さくなると同時に基底流量が十分に出ており、モデル出力が観測流量に近づいていることがみてとれる。

この理由として、Y07の土壌分類データを使った場合大雨時に降雨が土壌に十分に浸透せず流出したため大雨時のピークが過大になったが、土壌分類データをHWSOに変更したことで降雨が十分に土壌に吸収されたためピークが穏やかになったこと、さらに土壌に浸透した降水がその後時間をかけて基底流出として流れ出したことで低水時の河川流量を維持したことが考えられる。

なお、陸面物理過程モデルMATSIROでは各土壌分類の透水係数をClapp and Hornberger (1978)¹⁹⁾に従い与えており、その値は表-9のとおりである。土壌分類データ変更前は日本全域が7:Sandy Clay Loamに占められていたが、土壌分類変更後は石狩大橋領域を除く5検証領域で2:Loamy Sandが支配的になっており、即ち目が粗く透水係数が高い土壌が与えられたため、これにより土壌水分の吸収、流出が機敏になった可能性が考えられる。

(2) 高解像度化による出力の変化

次に、モデル水平空間解像度の変更による出力結果の変化を考察する。ここでは代表して淀および狐禅寺における河川流量比較を図-6および図-7に示す。いずれの図でも赤線がCTL10_NEW、青線がCTL1_NEWの出力、黒線が観測流量を示している。水平空間解像度の高解像度化によりピーク流量が観測値に近づいている様子が見てとれる。

解像度向上により対観測流量比率は大きく変化しなかったもののRMSEが向上した。これにはピーク流量の表現向上が寄与している可能性が考えられる。

ピーク流量の表現に関してはモデル内での豪雨の表現が大きく影響していると考え、高解像度変化による降水量表現の変化を調べるため日降水量対数ヒストグラムを作成した。図-8および図-9には代表して淀、狐禅寺における2014年8月の日降水量対数ヒストグラムを示す。

図-6 水平空間解像度変更前後の比較（淀，2014年8月）

図-7 水平空間解像度変更前後の比較（狐禅寺 2014年8月）

図-8 日降水量対数ヒストグラム（淀，2014年8月）

図-9 日降水量対数ヒストグラム（狐禅寺，2014年8月）

なお、横軸が降水量（mm/h），縦軸が度数であり1mm/h以下の降水は表示していない。

図-8および図-9から、CTL1_NEWでは降水量30mm/日を超えるような大雨が出現している一方でCTL10_NEWでは大雨が見逃されていることがわかる。これは、低解像度では空間内挿により広い範囲の降水量を平均した値が各格子点に与えられるため局所的な大雨が平準化されてしまっているためと考えられる。一方で高解像度のモデル内では局所的な大雨が表現されており、これがピーク流量の向上につながった可能性が考えられる。なお、解像度変更では単純な空間内挿を実施しているのみなので、年間降水量の差はほとんど存在しない。

5. おわりに

本研究では、将来的にリアルタイムでの高精度な流量予測システムを構築することを念頭に、連続した気象データが手に入る過去の期間を対象として陸面モデルの変更と検証を実施した。変更を実施したのは陸面物理過程モデルMATSIROに与える地表面データおよび陸面モデルの水平空間解像度である。

地表面データの変更では特に土壌分類データの変更が河川流量の出力結果に大きく作用しており、土壌水分量が降水量に対して機敏に変化することで河川流量の表現が改善されることがわかった。また、水平空間解像度の高解像度化は局所的な大雨をよく表現し、かつ河川のピーク流量表現を改善していることがわかった。

今後はインターフェースを含むリアルタイム運用に向けた仕組みの構築や、決定論的手法の面からの改善アプローチだけでなく観測値のアンサンブルデータ同化を利用した確率論的な側面からの改善を実施していくことが必要であると考えます。

謝辞：まずは、本研究に助成をいただいた2016年度宇宙航空研究開発機構委託研究「日本域陸面水文学モデルシステムの開発検討（代表芳村圭；JX-PSPC-420591）」に感謝申し上げます。また、MSM-GPVデータを利用させていただいた生駒栄司東京大学特任准教授および観測水位データを取得させていただいた国土交通省に対しても深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Bakker, M. H. N. : Transboundary river floods: vulnerability of continents, international river basins and countries. Ph.D Dissertation, Oregon State University, 2007.
- 2) Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., & Pappenberger, F. : GloFAS - global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp.1161–1175, 2013.
- 3) Miller, M., Buizza, R., Haseler, J., Hortal, M., Janssen, P., and Untch, A.: Increased resolution in the ECMWF deterministic and ensemble prediction systems, ECMWF Newsletter, 124, pp.10–16, 2010.
- 4) van der Knijff, J. M., Younis, J., and de Roo, A. P. J.: LISFLOOD: A GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 24, pp.189–212, 2010.
- 5) 洪尾欣弘, 生駒栄司, Oliver C. SAAVEDRA V., Lei WANG, Petra KOUDELOVA, 喜連川優, 小池俊雄：リアルタイムアンサンブル洪水予測実用化システムの開発, 水工学論文集, 第 58 巻, pp.397-402, 2014.
- 6) Wood, E. F., Roundy, J. K., Troy, T. J., Van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F., Blyth, E., ... & Gochis, D. : Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resources Research*, 47(5), 2011.
- 7) 立川康人, 滝野昌平, 市川温, 椎葉充晴：地球温暖化が最上川・吉野川流域の河川流況に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第 53 巻, 2009.
- 8) 芳村圭, 岡澤毅, キムヒュンジュン, 瀬戸心太, 小岩祐樹, 沖大幹, 鼎信次郎：気象庁メソ予報モデルGPVを用いた日本域河川流量予測システムの構築と検証, 水工学論文集, 第51巻, 2007.
- 9) Yoshimura, K., S. Miyazaki, S. Kanae, and T. Oki : Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes, *Glob. Planet. Change*, 51, pp.90-107, 2006.
- 10) 岡澤毅：0.1度グリッド河道網を用いた日本域河川流量予測システムの開発, 東京大学修士論文, 2005.
- 11) Takata, Kumiko, Seita Emori, and Tsutomu Watanabe : Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Global and planetary Change* 38.1, pp.209-222, 2003.
- 12) Yamazaki, Dai, Shinjiro Kanae, Hyungjun Kim, Taikan Oki: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research* 47.4, 2011.
- 13) Yamazaki, D., T. Oki, and S. Kanae: Deriving a global river network map and its sub-grid topographic characteristics from a fine-resolution flow direction map, *Hydrology and Earth System Sciences* 13.11, 2009..
- 14) 児玉健：広域窒素負荷の統合的推定手法, 東京大学修士論文, 2007.
- 15) Tateishi, R., Hoan, N. T., Kobayashi, T., Alsaadeh, B., Tana, G., & Phong, D. X.: Production of global land cover data-GLCNMO2008, *Journal of Geography and Geology* 6.3, 2014.
- 16) Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., ... & Lucht, W. : The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36.4, pp.1228-1249, 1998.
- 17) Nachtergaele, F. O., van Velthuizen, H., Verelst, L., Batjes, N. H., Dijkshoorn, J. A., van Engelen, V. W. P., ... & Prieler, S. : Harmonized World Soil Database (HWSD), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2009.
- 18) YUAN, Hua, et al. : Reprocessing the MODIS Leaf Area Index products for land surface and climate modelling, *Remote Sensing of Environment*, 2011.
- 19) Clapp, Roger B., and George M. Homberger. : Empirical equations for some soil hydraulic properties., *Water resources research* 14.4, 1978. (2017.4.7 受付)

VALIDATION OF RIVER DISCHARGE FROM A TERRESTRIAL MODEL WITH 1KM RESOLUTION OVER JAPAN

Yutaro YABU, Kei YOSHIMURA, Hyungjun KIM, Tomoko NITTA, Misako HATONO, Ki-
yotaka MUKAIDA, Misako KACHI and Taikan OKI

1km-resolution terrestrial model over Japan is developed to build a high quality river discharge forecasting system. Effects of model resolution and soil type dataset are investigated by a sensitivity experiment concerning resolution and soil type dataset. The experiment period is 2 years of 2014, 2015 and analysis is conducted for 6 river basins in Japan. The terrestrial model consists of MATSIRO, a land surface model and CaMa-Flood, a river routing model. Peak discharge and low discharge representation are improved by using a more detailed soil type dataset. In 9 of 12 experiments, ratios of model discharge to observation are improved by 1-14% and in all experiments, RMSE are decreased. Also, using high resolution experiment settings showed lower RMSE in 10 of 12 experiments.