

2017年度 修士論文

分布型流出モデルを用いた
石狩川流域における洪水の再現性の分析
— 2010年8月線状降水帯と2011年9月暖湿移流の事例 —

**Analysis on reproducibility of flood simulation for
the Ishikari River using a distributed-parameter runoff model**

環境気象学研究室

21631007 野澤 千菜美

指導教員 馬場賢治

酪農学園大学大学院 酪農学研究科 酪農学専攻 修士課程

要旨

近年，地球温暖化の影響により気温や海水温の上昇が報告されており，それに伴った降水特性の変化や極端降水の増加が起こる可能性があるとの多くの研究で指摘されている．高解像度全球大気モデルを用いて予測される将来気候下（2075–2100 年）では，豪雨発生頻度の増加や年最大降水量が 1.2 倍から 2.0 倍になると示唆されている．これに伴い，従来北海道に大雨をもたらしていた停滞前線や台風による降水だけでなく，局所的に短時間に激しい雨をもたらす線状降水帯に関しても災害の危険性が高まっていると考えられる．

石狩川における計画高水流量は主に昭和 56 年（1981 年）に発生した 56 水害の既往最大流量を基に計画されている．そのため，温暖化による年最大流出量の増大は考慮されていない．これまで国内河川の計画や洪水の危険度判定には，過去の洪水に基づき流出量を計算するタンクモデルが主に用いられてきていた．近年，物理過程を考慮した分布型流出モデルが開発され，より実際の流出過程に近く，洪水流を詳細に追跡可能となってきた．しかしながらこれらのモデルの適応は 5000 km^2 以下の流域で多く， 5000 km^2 以上の流域面積における適応事例は少ない．そのため本研究では，国内最大級の流域面積を持つ石狩川流域において物理過程を考慮した分布型流出モデルを用いてモデルの適応可能性とその留意点を明確にし，降水の時空間分布や簡易温暖化実験による降水量の増加，降水位置の変化が流出特性に与える影響を明らかにすることを目的とした．

石狩川流域は北海道中央部に位置し，その源を石狩岳に発し，層雲峡を流下，上川盆地を通り石狩平野を抜け，多数の支流を合流し，石狩湾から日本海へ抜ける幹線流路延長 268 km ，流域面積 $14,330 \text{ km}^2$ と北海道の 17 % の面積を占める一級河川である．流域には札幌市や旭川市といった道内主要都市を含む 18 市 28 町 2 村があり，北海道全体の 50 % を超える約 312 万人の人口が集中している．本研究では石狩川流域を対象とし， 1 km 格子，1 時間間隔のレーダー・アメダス解析雨量を入力降雨とし，土地勾配データには HydroSHEDS の 30 秒間隔土地勾配データを用いて，京都大学水文・水資源研究室で開発されたキネマティックウェーブモデルに基づく分布型流出モデル「1K-DHM-event」により流出計算を行った．流出計算に用いたパラメータは SCE-UA 法により算出した．観測流量は水文水質データベースで公開されている流出量データを用いた．モデルの精度評価には，Nash-Sutcliffe 係数（以下，NS 係数），総流量比，ピーク流量比を用いた．流出計算は，2010 年から 2014 年に発生した $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える洪水のうち，線状降水帯により局地的に激しい降水があった 2010 年 8 月 20 日から 31 日（事例 1）と秋雨前線への暖湿移流により広範囲で降水があった 2011 年 8 月 30 日から 9 月 12 日（事例 2）で行った．

事例 1 では，石狩川本流の特に下流，中流域では流量のピーク時刻に最大 24 時間の遅れが生じ，上流域では大きな遅れは発生しなかった．上流域におけるピーク比は 1.5 倍以上と高くなった．その要因として流出モデル 1K-DHM-event の流出計算では，土層内の不飽和域が飽和に達し，土層高を超える水深を持った時点で表面流が発生する構造となっているが，実際に発生する短時間に局所的に激しく降るような降雨では，土層の浸透量よりも多く降水があると表面流出が発生するという仮想条件と現実の降雨と流出の応答の差が石狩川中流，下流域と上流域におけるピーク発生時刻の差になったと考えられる．その改善策として，激しい雨が観測された範囲をネスティングし，土層間の水の交換や表面流を詳細に計算させることにより高い精度で再現が可能と考えられる．また，簡易温暖化実験により激しい降水のあった石狩川の上流域では計画高水流量を超える $6668 \text{ m}^3/\text{s}$ となり，支流の空知川や夕張川では計画高水流量に迫る $3580 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ のピーク流量となった．そのため線状降水帯では局所的に流出量が増加し，それに伴い石狩川の上流域や支流に洪水氾濫が発生する危険性が示唆された．

事例 2 では、秋雨前線への暖湿移流のように広範囲に断続的な降水がある場合、特に整合性が高く、NS 係数は 0.92、総流量比は 99.9 %、ピーク比は 1.14 となった。簡易温暖化実験において将来、年最大降水量が 1.5 倍として計算を行なうと石狩川では現状の計画高水流量を超える流出量となった。降水域を南に 30 km 移動した場合、石狩川中流、上流域と空知川を中心に強い雨が降り、石狩川中流、下流域では高い流量を約 2 日間保っていた。本流と支流が流出するまでの時間差により、石狩川中流、下流域では高い流量を約 2 日間保っていた。ピーク流量とその継続時間は洗掘や浸透等の影響により河川堤防を脆弱にする可能性がある。

本研究では、石狩川流域では物理過程を考慮した分布型流出モデルが適応可能であることがわかった。だが、線状降水帯のように局所的に激しい降水がある場合、流出モデルの土地勾配における空間解像度に注意が必要だと考えられる。また、将来温暖化による豪雨頻度や一雨降水量が増加した時、現状の計画高水流量では石狩川本流、支流ともに洪水氾濫の危険性が高まると示唆された。今後、温暖化による降水量の増加、局所的に発生する短時間強雨による洪水の予防や減災のため、現段階からダムや堤防等の社会基盤や迅速な避難情報の提供といった幅広い対策が求められる。

Abstract

Along with global warming, it is reported that the frequency of extreme precipitation in Hokkaido and northern Japan tends to increase. Especially in Hokkaido, the occurrence frequency of heavy rain exceeding 100 mm in a few hours is increasing. In the future climate prediction using the high resolution climate model for the last part of the 21st century, it is suggested that the frequency of heavy rainfall occurrence and the annual maximum precipitation in Hokkaido will increase. The change of the rainfall characteristic such as extreme rainfall increase suggests the necessity to introduce a new high resolution runoff model corresponding to the spatial resolution of rainfall observation for flood control of Ishikari River: a river with the largest catchment area in Hokkaido.

We performed runoff simulation for Ishikari River using one of the distributed rainfall-runoff models called “ 1K-DHM-event ” that was developed by Kyoto University group. The resolutions of the model used are 30 seconds (about 1 km) in spatial and 1 hour in temporal. We used hourly precipitation analysis data called radar – AMeDAS precipitation (which is provided by Japan Meteorological Agency) with spatial resolution of 1 km as the present climate, and the land gradient data named HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives). We simulated two flood events: from August 20 to 31, 2010 (CASE 1) and from August 30 to September 12, 2011 (CASE 2). The former is a line-shaped precipitation system with heavy rainfall (over 30 mm/hr), and the latter is an autumnal front system associated with heavy rainfall to the wide portion of Hokkaido, especially in the upper Ishikari River basin. We calculated outflows for the two cases using five different calculation methods.

As the most matching calculation results with the observation flow rate, the Nash–Sutcliffe coefficients were 0.25 and 0.92, Peak flow rates were 1.02 and 1.14, and Total flow rates were 87.6 % and 99.9 % for CASE 1 and CASE 2 respectively at the point of Ishikari Ohashi, near the mouth of the river. Using these parameters, we carried out virtual experiments of rainfall twice as much as CASE 1 and 1.5 times the CASE 2. In the simulation of the rainfall two times the CASE 1, the calculated outflow was $8172 \text{ m}^3/\text{s}$ at Ishikari Ohashi point and $6668 \text{ m}^3/\text{s}$ at Ino point (in the upstream part of the river). The outflow at Ino exceeds design–flood discharge. In the simulation of the rainfall 1.5 times the CASE 2, the calculated outflow was $14463 \text{ m}^3/\text{s}$ at Ishikari Ohashi point, and $7544 \text{ m}^3/\text{s}$ at Ino point. at both points, it exceeds design–flood discharge. From these 1 experiments, it is clarified that the distributed rainfall – runoff model based on the physics has a high potential to reproduce flood events in Ishikari River. The results obtained in this study showed that the change of future river flows associated with climate change would increase flood risks.

目次

1	はじめに	1
1.1	地球温暖化による降水特性の変化と河川への影響	1
1.2	石狩川流域における過去の出水	2
1.3	流出計算に用いられる水文モデル	2
1.4	目的	4
2	方法	5
2.1	研究対象地域	5
2.2	流量観測と流域内の大規模ダム	6
2.3	研究事例	9
2.4	気象場の確認に用いたデータ	10
2.4.1	メソ数値モデル (MSM)	10
2.5	分布型流出モデル	12
2.5.1	土地勾配データ	12
2.5.2	入力降雨データ	12
2.5.3	分布型流出モデル 1K-DHM-event	12
2.5.4	流出計算結果の評価方法	17
2.5.5	SCE-UA 法	17
3	結果	18
3.1	事例 1 : 2010 年 8 月 20 日 ~ 31 日	18
3.1.1	事例 1 の降水要因と分布	18
3.1.2	流出実験	27
3.1.3	事例 1 における降水量の変更実験	42
3.2	事例 2 : 2011 年 8 月 30 日 ~ 9 月 12 日	58
3.2.1	事例 2 の降水要因と分布	58
3.2.2	流出実験	68
3.2.3	事例 2 における降水量の変更実験	83
4	考察	99
4.1	石狩川流域における分布型流出モデルの適応可能性	99
4.2	地球温暖化と石狩川の河川流況	100
5	総括	102

図目次

1	Map of Hokkaido showing location of study area adjacent to the Ishikari River and a contour map	8
2	The schema of soil layer	13
3	Diagram of hydrological comparison between the real flows and layers and the model parameters.	15
4	The partitioned basin map of the Ishikari River for Model3	16

5	Surface weather chart at 1800 UTC 23 August 2010 (JMA)	19
6	Equivalent potential temperature (K) at 1000 hPa, wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido.	20
7	Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 1000 hPa and wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido.	21
8	Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 925 hPa and wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido.	22
9	Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 850 hPa and wind speed (m/s) and direction on 23 August 2010 in Hokkaido.	23
10	Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 700 hPa and wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido.	24
11	Time-Height cross section of temperature (K) on 23 August 2010.	25
12	The total amount of precipitation at 1800-2300UTC on 23 August 2010.	26
13	Flow experiment from 21 to 30 August 2010 at Ishikari-Ohashi (observed point3)	29
14	Flow experiment CASE1 at Iwamizawa-Ohashi (observation point4)	31
15	Flow experiment CASE1 at Tsukigata (observation point5)	32
16	Flow experiment CASE1 at Naie-Ohashi (observation point6)	33
17	Flow experiment CASE1 at Moseushi-Hashi (observation point8)	34
18	Flow experiment CASE1 at Ino (observation point9)	35
19	Flow experiment CASE1 in Chitose river (observation point1)	36
20	Flow experiment CASE1 in Yubari river (observation point2)	37
21	Flow experiment CASE1 in Sorachi river (observation point7)	38
22	Flow experiment CASE1 in Uryu river (observation point10)	39
23	Flow experiment CASE1 in Uryu river (observation point11)	40
24	In the case of 1.5 times total amount of precipitation (mm) from 1800 to 2300 UTC on 23 August 2010 (CASE 2010-M1).	43
25	In the case of 2.0 times total amount of precipitation (mm) from 1800 to 2300 UTC on 23 August 2010 (CASE 2010-M2).	44
26	The total amount of precipitation CASE 2010-S3 moved rainband to 15km the south at 1800-2300UTC on 23 August 2010.	44
27	The total amount of precipitation CASE 2010-S4 moved rainband to 30km the south at 1800-2300UTC on 23 August 2010.	45
28	The total amount of precipitation CASE 2010-MS5 multiplied by 1.5 and moved rainband to 30km the south at 1800-2300UTC on 23 August 2010.	45
29	Time series of flow experiment at Ishikari-Ohashi based on virtual precipitation from 20 to 31 August 2010. The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Ishikari-Ohashi (observed point3)	46
30	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Iwamizawa-Ohashi (observed point4)	47
31	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Tsukigata (observed point5).	48
32	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Naie-Ohashi (observed point6)	49

33	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Moseushi–Hashi (observed point8)	50
34	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Ino (observed point9)	51
35	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Chitose river (observed point1)	52
36	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Yubari river (observed point2)	53
37	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Sorachi river (observed point7)	54
38	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Uryu river (observed point10)	55
39	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE1 in Uryu river (observed point11)	56
40	Surface weather chart at September 2011 (JMA)	59
41	Equivalent potential temperature (K) and wind speed (m/s) and direction at 1000 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.	60
42	Equivalent potential temperature (K) and wind speed (m/s) and direction at 850 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.	61
43	Equivalent potential temperature (K) at 700 hPa and wind speed (m/s) and direction at 700 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.	62
44	Equivalent potential temperature (K) and wind speed (m/s) and direction at 500 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.	63
45	Water vapor mixing ratio, and wind speed (m/s) and direction at 1000 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.	64
46	Water vapor mixing ratio, and wind speed (m/s) and direction at 850 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.	65
47	Water vapor mixing, ratio and wind speed (m/s) and direction at 700 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.	66
48	The total amount of precipitation.	67
49	Flow experiment from 31 August to 10 September 2011 at Ishikari–Ohashi (observed point3)	70
50	Flow experiment CASE2 at Iwamizawa-Ohashi (observation point4)	72
51	Flow experiment CASE2 at Tsukigata (observation point5)	73
52	Flow experiment CASE2 at Naie-Ohashi (observation point6)	74
53	Flow experiment CASE2 at Moseushi-Hashi (observation point8)	75
54	Flow experiment CASE2 at Ino (observation point9)	76
55	Flow experiment CASE2 in Chitose river (observation point1)	77
56	Flow experiment CASE2 in Yubari river (observation point2)	78
57	Flow experiment CASE2 in Sorachi river (observation point7)	79
58	Flow experiment CASE2 in Uryu river (observation point10)	80
59	Flow experiment CASE2 in Uryu river (observation point11)	81
60	In the case of 1.2 times total amount of precipitation (mm) by 1.2 from 30 August to 4 September 2011 (CASE 2011-M1).	84

61	In the case of 1.2 times total amount of precipitation (mm) from 5 to 12 September 2011 (CASE 2011-M2).	85
62	In the case of 1.5 times total amount of precipitation (mm) from 30 August to 4 September 2011 (CASE 2011-M3).	85
63	In the case of 1.5 times total amount of precipitation (mm) from 5 to 12 September 2011 (CASE 2011-S4).	86
64	The total amount of precipitation CASE 2011-MS5 when moved rainband to 30km the south at 30 August - 4 September 2011.	86
65	The total amount of precipitation when multiplied by 1.2 and moved rainband to 30km the south 30 August - 4 September 2011.	87
66	Time series of flow experiment at Ishikari–Ohashi (observed point3) based on virtual precipitation from 31 August to 10 September 2011	87
67	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 the same term in Iwamizawa–Ohashi (observed point4)	88
68	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Tsukigata (observed point5)	89
69	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Naie–Ohashi (observed point6)	90
70	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Moseushi–Hashi (observed point8)	91
71	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Ino (observed point9)	92
72	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Chitose river (observed point1)	93
73	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Yubari river (observed point2)	94
74	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Sorachi river (observed point7)	95
75	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Uryu river (observed point10)	96
76	The results of flow experiment using changed precipitation at CASE2 in Uryu river (observed point11)	97

表 目 次

1	Ishikari River flood events in the past	3
2	Details of tributaries of the Ishikari river	5
3	The details of observation and dam points data of the Ishikari River	7
4	Feature of flood events at the Ishikari River from 2010 to 2014	9
5	Specifications of Meso-Scale Model (MSM) data	10
6	Detail the particulars of model parameters.	14
7	Usage models of this research and its setting	15
8	The partitioned Ishikari river basin	16

9	Parameters of the flow each experiments at CASE1	28
10	Flow experiment comparision at Ishikari ohashi (observation point3) at CASE1.	30
11	Flow experiment comparision at Iwamizawa-Ohashi (observation point4) at CASE1 . . .	31
12	Flow experiment comparision at Tsukigata (observation point5) at CASE1	32
13	Flow experiment comparision at Naie-Ohashi(observation point6) at CASE1	33
14	Flow experiment comparision at the upper stream of the Ishikari River at Moseushi-Hashi (observation point8) at CASE1	34
15	Flow experiment comparision at the upper stream of the Ishikari River at Ino (observation point9) at CASE1	35
16	Flow experiment comparision in Chitose river (observation point1) at CASE1	36
17	Flow experiment comparision in Yubari river (observation point2) at CASE1	37
18	Flow experiment comparision in Sorachi river (observation point7) at CASE1	38
19	Flow experiment comparision in Uryu river (observation point10) at CASE1	39
20	Flow experiment comparision in Uryu river (observation point11) at CASE1	40
21	Comparison of peak flow times of observation and each models, at each points of the Ishikari River at 2010	41
22	The outline of changed precipitation experiment at 2010	43
23	Comparison of peak flow of Model 3-1 and each experiments, at each points of the Ishikari river at 2010.	57
24	Parameters of the flow each experiments at CASE2	69
25	Flow experiment comparision at Ishikari-Ohashi(observation point 3) at CASE2	71
26	Flow experiment comparision at Iwamizawa-Ohashi (observation point4) at CASE2 . . .	72
27	Flow experiment comparision at Tsukigata (observation point5) at CASE2	73
28	Flow experiment comparision at Naie-Ohashi(observation point6) at CASE2	74
29	Flow experiment comparision at the upper stream of the Ishikari River at Moseushi-Hashi (observation point8) at CASE2	75
30	Flow experiment comparision at the upper stream of the Ishikari River at Ino (observation point9) at CASE2	76
31	Flow experiment comparision in Chitose river (observation point1) at CASE2	77
32	Flow experiment comparision in Yubari river (observation point2) at CASE2	78
33	Flow experiment comparision in Sorachi river (observation point7) at CASE2	79
34	Flow experiment comparision in Uryu river (observation point10) at CASE2	80
35	Flow experiment comparision in Uryu river (observation point11) at CASE2	81
36	Comparison of peak flow times of observation and each models, at each points of the Ishikari River at 2011	82
37	The outline of changed precipitation experiment at 2011	84
38	Comparison of peak flow of Model 3-1 and each experiments, at each points of the Ishikari river at 2011.	98

1 はじめに

1.1 地球温暖化による降水特性の変化と河川への影響

近年、地球温暖化の影響により気温や海水温の上昇が報告されており、それに伴った降水特性の変化が起こる可能性がある多くの研究で指摘されている（IPCC 2014；気象庁 2017）。IPCC（気候変動に関する政府間パネル；Intergovernmental Panel on Climate Change）により 2013 年に発表された第 5 次評価報告書によると、地球温暖化には疑う余地がなく、その要因は人為的影響である可能性が極めて高い（95%以上の可能性）と述べられている。また、観測事実として北半球中緯度の陸域平均降水量は 1901 年以降増加しており、今後、中緯度湿潤地域では今世紀末（21 世紀末）までに年平均降水量が増加するとともに、極端降水がより頻繁に強く発生する可能性が非常に高いと報告されている。日本国内では、1898 年から 2017 年に AMeDAS により観測された年降水量において 1898 年の統計開始以降、年毎の変動が大きくなっていると述べられている（気象庁 2018）。将来気候（2075 年–2099 年）において高解像度全球大気モデル（MRI-AGCM3.2S）を用いて予測された 100 年降水確率日降水量は全国的に 15%以上の増加傾向にあるとともに、特に北海道や北日本で増加傾向が見られた（川宮ほか 2013；立川ほか 2015）。岡田ほか（2013）は、MRI-AGCM3.2S の計算結果を用いて降雨イベントの将来変化とその統計的性質に関して DAD（Depth Area Duration）解析を行った結果、将来、日本全域において 20 mm/hr–40 mm/hr の降雨で継続時間の増加が見られ、降雨強度は主に継続時間が 30 時間以下の比較的短い降雨イベントにおいて全ての月で増加傾向であった。特に北海道における近年の豪雨傾向として、一雨降水量が 100 mm を超える大雨発生頻度は増加傾向にあると考えられている（菊地ほか 2009；中津川ほか 2004）。また、2014 年 9 月に北海道で初めて大雨特別警報が発令された支笏湖周辺で 70 mm/hr の激しい降水をもたらした線状降水帯のように、短時間に局所的に降る雨についても災害をもたらす危険性が高いと推察される。温暖化実験から北海道では、MRI-AGCM3.2S の出力結果に基づいた統計的手法による解析において、夏季の 7 月、8 月において豪雨発生頻度が増加する傾向が顕著であると考えられている（岡田ほか 2013）が、一方で力学的ダウンスケーリング手法を用いて 10 km メッシュで北海道の将来気候を予測した場合、境界条件に使用した大気海洋モデルによって降水量の増加傾向に違いが見られており（Inatsu *et.al* 2015）、気候予測、降水量予測には未だ不確定な要素が多いと考えられる。上述の先行研究によると年最大降水量の増加割合は 1.2 倍から 2.0 倍と考えられている。また、従来北海道に大雨をもたらしていた停滞前線や台風による降水だけでなく、局所的に短時間に激しい雨をもたらす線状降水帯についても災害危険性が増加していると推察される。

温暖化の影響により示唆されている降水特性の変化は、豪雨時に洪水災害や土砂災害の発生へ大きな影響を与える。そこで気候変動が洪水災害リスクに与える影響に関して、多くの研究が行われてきた。例えば、Milly *et.al*（2002）において 200,000 km² 以上の大流域において大洪水の発生頻度は 21 世紀後半に向けて増加すると予測された。また Hirabayashi *et.al*（2013, 2016）では、洪水リスクについて 2100 年までの全球予測が行われ、主にヨーロッパでは洪水リスクが減少するが、アジアやアフリカでリスクが増加すると示されている。立川ら（2011）では、日本全域において河川流量の将来予測を行った場合、洪水や渇水の発生、水資源の変化は一樣ではなく、大きな地域性が見られていた。そのうち北海道石狩川では、年最大時間流量が大きくなる傾向があり、また融雪時期の変化により 4 月に洪水ピーク流量が増加する可能性が高いと述べられている。年最大流量の増加は、滝野（2010）でも指摘されている。国内の他河川、例えば木曽川では 10 年確率洪水の規模は増すとともに、夏季の渇水期において渇水リスクも増加すると述べられ（井本 2008）、吉野川では洪水リスクと渇水リスクがともに増加すると示されている（佐藤 2009）。このように

石狩川流域では、降水イベントによる流出量の温暖化予測を行った文献はあるが、主に石狩川下流域における流出量の予測であり、上流域や中流域、各支流の流出量やその特性に関して詳細に調べた研究は見当たらない。

1.2 石狩川流域における過去の出水

過去 120 年間に石狩川流域で発生した洪水とその概要について Table.1 に示した。対雁は石狩大橋において流量観測が開始される以前に流量観測が行われた地点であり、氾濫戻し流量は観測地点上流において氾濫が発生した場合に低下した流出量を推定し、観測流量に対し加算した値である。石狩川流域では、明治 31 (1898) 年 9 月の大洪水を契機として同年 10 月に北海道治水調査会が設置され、明治 37 (1904) 年 7 月の大洪水を基準とした明治 42 年の治水計画により第 1 期北海道拓殖計画において計画的な治水事業が開始された (河川局 2004a)。その後昭和 56 (1981) 年 8 月上旬に発生した 56 水害により工事実施計画が改定され、治水事業が進められ、現在へと至っている (河川局 2004d)。平成 13 (2001) 年 9 月の洪水では、昭和 50 (1975) 年に発生した洪水と同程度の降水であったが、治水効果により被害面積が大きく抑えられた。平成 16 (2004) 年に発表された河川整備基本方針では、災害の発生の防止または軽減、河川の適切な利用及び流水の正常な機能の維持、河川環境の整備と保全を目的とし、概ね 30 年間を対象期間としている。これに伴い再開事業及び継続事業として河道掘削や夕張シューパロダムや新桂沢ダムといった既存ダムの再開発、千歳川や石狩川中流域における遊水地の新規設置を行なっている。

平成 28 年 8 月に発生した大雨激甚災害では、台風 7 号、11 号、9 号及び台風 10 号の暖湿移流による大雨のため、石狩川や十勝川、常呂川の広い範囲で被害を及ぼした。このうち石狩川流域では、本川上流深川市納内町、旭川市神居古潭で約 1.2 km^2 の浸水、6 戸の家屋被害をもたらした。空知川では約 1.3 km^2 の浸水と 189 戸の被害があった。平成以降、被害家屋が 1000 戸を超える大氾濫は発生していないが、先述の大雨激甚災害や温暖化による降水特性の変化から、河川計画の見直しが考えられている (石狩川流域委員会 2017)。

1.3 流出計算に用いられる水文モデル

水文モデルとは、陸域において水の流れを再現し、長期間に渡る水循環の変化や短期間に発生する豪雨等の降水イベントによる洪水流量を推定し、流域における河川計画等の作成に利用されている。水文モデルには様々な種類があり、その水文モデルが持つ再現時間、空間、計算過程による特性を目的に合わせ用いられている。この特性の違いから浸透過程、斜面流出過程、蒸発散過程、河道内の流れといったモデルが再現する現象は異なる。例えば再現時間の違いでは、数ヶ月から数年に渡る長期間の水循環を再現し、水資源利用に関しシミュレーションを行なう長期流出モデルの場合、重要となる水文過程は蒸発散であり、土地利用や気温、日射量の情報がモデルに必要となる。だが、1 時間以下の細かい単位で降水イベントによる洪水流出を再現する短期流出モデルの場合、流域内における浸透や斜面流出、河道内の流れが重要な要素となる。空間構造の違いでは、ある地点より上流に当たる流域を一つの単位として計算を行なう集中型モデルと地表面に降り注いだ雨水が空間内でどのように移動するかという時空間分布をグリッド分割等により再現する分布型モデルを分類している。分布型モデルは流域内の水文量の時空間分布をグリッド毎や三角形に斜面を仮想的に再現し、流域内の水文量の時空間分布を再現可能である。斜面流出

Table 1 Ishikari River flood events in the past. This table is summarized from the reports of basic policy for river improvement at Ishikari river basin and river schema and Ishikari river improvement review (Uryu river and Sorachi river) by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

洪水発生年月	気象要因	代表地点雨量 (mm/3day)	石狩大橋地点 流量 (m^3/s)	被害等
明治 31 年 9 月 (1898 年)	台風	札幌 158 旭川 163	不明	被害家屋 18,600 戸 氾濫面積 1,500 km^2
明治 37 年 7 月 (1904 年)	台風 前線	札幌 177 旭川 152	対雁 氾濫戻し流量 8,300	被害家屋 16,000 戸 氾濫面積 1,300 km^2
大正 11 年 8 月 (1922 年)	台風	札幌 66 旭川 105	不明	被害家屋 9,200 戸 氾濫面積 不明
昭和 7 年 8 月 ~ 9 月 (1932 年)	低気圧 停滞前線	札幌 78 旭川 103	対雁 氾濫戻し流量 8,300	被害家屋 18,100 戸 氾濫面積 1,400 km^2
昭和 36 年 7 月 (1961 年)	低気圧 前線	札幌 140 旭川 95 夕張 216	4,515 氾濫戻し流量 6,800	被害家屋 41,200 戸 氾濫面積 661 km^2
昭和 37 年 8 月 (1962 年)	台風 前線	札幌 203 旭川 95 富良野 170	4,410 氾濫戻し流量 8,300	被害家屋 18,100 戸 氾濫面積 523 km^2
昭和 50 年 8 月 (1975 年)	台風 前線	札幌 175 旭川 193 夕張 164	7,533 氾濫戻し流量 8,620	被害家屋 20,600 戸 氾濫面積 292 km^2
昭和 56 年 8 月上旬 (1981 年)	低気圧 前線 台風	札幌 294 旭川 296 岩見沢 406	11,330 氾濫戻し流量 12,080	被害家屋 22,500 戸 氾濫面積 614 km^2
昭和 56 年 8 月下旬 (1981 年)	前線 台風	札幌 229 岩見沢 124	4,332	被害家屋 12,200 戸 氾濫面積 57 km^2
昭和 63 年 8 月 (1988 年)	停滞前線	札幌 66 旭川 119 石狩沼田 425	5,759	被害家屋 2,000 戸 氾濫面積 65 km^2
平成 13 年 9 月 (2001 年)	秋雨前線 台風	札幌 153 旭川 169 岩見沢 151	6,598	被害家屋 70 戸 氾濫面積 38 km^2
平成 23 年 9 月 (2011 年)	低気圧 停滞前線	札幌 126 石狩沼田 215	5,654	被害家屋 8 戸 氾濫面積 1 km^2
平成 26 年 8 月 (2014 年)	台風 停滞前線	札幌 48 石狩沼田 168	3,417	被害家屋 32 戸 氾濫面積 3 km^2

や河道流出の過程の再現方法の差異から流出モデルは、降雨流出の応答関係から構成される応答モデル、降雨流出の概念的な関係式から構成される概念モデル、および物理的な法則に基づいた式から求められる物理モデルと区分できる。応答モデルは主に単位図法という過去の降雨・洪水の観測データを用いて単位時間当たりの降水強度から流出強度を求め、単位図に乘じ、それらを足しあわせたものである（椎葉ほか 2010；兵庫県 2005）。これは、物理的な過程を計算しておらず流量観測データのない流域では精度が期待できない。また流域特性の変化や河川構造物による影響をモデル内に導入できないという欠点がある。概念モデルにはタンクモデルや貯留関数法がある。タンクモデルは表面流や中間流、地下水流出を直列に並べた複数のタンク群を流域に見立て、流出を再現するモデルである。このタンクには、一般的に側面に複数の流出孔と下面に一つの流出孔を設定し、その孔から水のやり取りを行なっている。過去の出水特性から流出孔を適切に設定した場合、洪水をよく再現できる（例えば、端野ほか 1991）が、そのタンクに用いられるパラメータと流域内の流出特性は関係が明瞭でないと考えられている（池淵ほか 2006；椎葉ほか 2010）。また、物理モデルの代表にキネマティックウェーブモデルがあり、地表面流と中間流を表現する連続式と一般的に用いられるマンニングの平均流速公式を用いた数値解析により流出量を求められる（池淵ほか 2006；椎葉ほか 2010；兵庫県 2005）。物理モデルでは、水理的に雨水を追跡できるが、比較的計算処理量が大きくなる。

これまで国内河川の計画や長期水循環の推定、豪雨災害時の流出再現や予測では、集中型モデルや概念モデルが多く利用されてきた（阿部ほか 1998；中津川 2003；田村 2006）。そして近年、降水の詳細な観測や土地利用情報、地形情報の詳細なデータが各種観測技術の向上や蓄積された知見を流出モデルへ導入が可能となり、かつ計算機の性能向上により、分布型モデルや物理モデルを利用した流出計算が行われている（小林ほか 2006）。その多くは流域面積が約 200 km^2 から 8200 km^2 と石狩川流域と比較すると 2 分の 1 程度のサイズである。また、近年増加傾向にある線状降水帯のように短時間に局所的に激しい降水がある場合、局所的な洪水氾濫の危険性を予測するため、流出モデルによる流出解析が求められている（谷岡 1998；木村 2011；秋山 2013）。そのため、今後、実際の降雨流出で発生する過程を現実に近い物理的な過程と土地情報データを用いて再現可能な物理過程を考慮した分布型流出モデルの知見を増やし、その発展・開発を行なう必要がある。

1.4 目的

北海道内最大の流域面積を有する石狩川流域では、既往最大級の洪水を基に昭和 42 年から計画的な治水事業が数度の変更とともに行われてきた。近年、北海道の一雨降水量は増加傾向にある。また将来、地球温暖化の影響により、北海道における夏季降水量は年最大降水量が 1.2 倍から最大 2 倍程度の増加が懸念されている。そのため、今後の河川整備では温暖化時の降水の時空間分布を考慮し、豪雨及び洪水に備えなければならない。

そこで本研究では、流域面積の大きな石狩川流域において、物理過程を考慮した分布型流出モデルの適応可能性とその留意点を明らかにする。また、先行研究で予測される降水量の増加傾向を元に増加させた降水量を過去の洪水に入力、流出量を想定し石狩川流域における洪水特性を解析するとともに、降水位置を変更し、降水の空間分布が流出に与える影響を考察することを目的とした。

2 方法

2.1 研究対象地域

石狩川流域は北海道中央部に位置し、その源を石狩岳に発し、層雲峡を流下、上川盆地を通り石狩平野を抜け、その間に雨竜川や空知川、幾春別川、夕張川、千歳川、豊平川等、多数の支流を合流し、石狩湾から日本海へ抜ける幹線流路延長 268 km、流域面積 14,330 km² と北海道の 17% の面積を占める一級河川である (Fig.1)。流域には札幌市や旭川市といった道内主要都市を含む 18 市 28 町 2 村があり、北海道全体の 50 % を超える約 312 万人の人口が集中している。その土地は、道内の都市化が進んだ地域から農業地帯、森林地帯を含み、山地が約 80 %、水田や畑地等の農地が約 17 %、市街地が約 3 % である。地形は大きく「天塩山地」、「東部火山地域」、「夕張山地」、「中央凹地」、「石狩勇払低地」の 5 つに区分される (北海道開発局 2004d)。天塩山地は主に礫岩や砂岩、泥岩、凝灰岩、火成岩、火山岩から形成され、東部火山地域である大雪山系や石狩岳は火成岩や火山岩、火山噴出物が分布し、夕張山地は火成岩や火山岩、礫岩、砂岩、泥岩から成り、上川盆地を含む中央凹地は、凝灰岩や砂礫等で構成され、石狩勇払低地は泥炭や粘土からなる低湿地帯を構成しており、脆弱な地盤を有している。ここで、石狩川流域を夕張川以南を下流域、空知川より北を上流域、上流域と下流域に挟まれる幾春別川や空知川を含んだ流域を中流域と区分する。以上より、石狩川上流域の源流部は火山噴出物を多く含む地質が広がっており、その下流には砂礫のような氾濫堆積物が分布し、森林や農地として利用されている。特に雨竜川では森林の占める割合が大きい。中流域は主に森林や農地として利用され、その地質は砂礫や粘土からなる。下流域は広い水田地域や農地と市街地が広がっており、上流域と中流域と比較して森林の割合が小さく、その地質は泥炭や粘土、砂礫が主であるが、千歳川や豊平川上流域には一部火山噴出物を多く含む。

石狩川流域にある支流の概要および 1982 年の石狩川水系工事実施基本計画 (昭和 57 年 3 月 25 日改訂) において決定した基本高水流量、計画高水流量を Table.2 に示した。基本高水流量とは、ダム等の洪水調整施設で洪水調整が行われていない状態での河川流量であり、計画高水流量は基本高水流量から洪水調整流量を差し引いた流量である。

Table 2 Details of tributaries of the Ishikari river. This table is based on basic policy for improvement at the Ishikari River basin.

河川名	基準地点	幹線流路延長 <i>km</i>	流域面積 <i>km²</i>	基本高水流量 <i>m³/s</i>	計画高水流量 <i>m³/s</i>
石狩川	伊納	-	-	7,500	6,000
	石狩大橋	-	-	18,000	14,000
豊平川	雁来	72.5	902	3,100	2,000
千歳川	裏の沢	108	1,244	-	1,100
夕張川	清幌橋	136	1,417	3,400	2,400
幾春別川	西川向	59	343	1,500	1,000
空知川	赤平	194.5	2,618	6,200	4,200
雨竜川	雨竜橋	177	1,722	3,200	2,700

2.2 流量観測と流域内の大規模ダム

本研究で用いた観測流量の観測地点と流域内にある規模の大きな多目的ダムを Fig.1 と Table.3 に示した．観測流量は国土交通省水管理・国土保全局が所管する観測所公開データ(<http://www1.river.go.jp/>)を利用している．観測流量は，各地点で水位標もしくは水位計で観測された水位を元に流速計等で観測された流量から算出された水位流量曲線式（非公開）により求められる．

Table 3 The details of observation and dam points data of the Ishikari River. This table is based on Water Information System, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (<http://www1.river.go.jp/>).

points	number	longitude	latitude	point name	river name	distance / strage ¹
Observation points	1	141.57750	43.020010	裏の沢	千歳川	15.00 km
	2	141.68695	43.089165	清幌橋	夕張川	9.80km
	3	141.54222	43.122222	石狩大橋	石狩川	26.00km
	4	141.66583	43.220833	岩見沢大橋	石狩川	44.50km
	5	141.69055	43.332222	月形	石狩川	58.00 km
	6	141.83943	43.432503	奈井江大橋	石狩川	76.80km
	7	141.91110	43.548332	空知大橋	空知川	2.75km
	8	141.91333	43.684444	妹背牛橋	石狩川	113.50km
	9	142.15111	44.013054	伊納	石狩川	148.00km
	10	142.27556	43.764168	雨竜橋	雨竜川	6.00km
	11	141.98166	43.677223	幌加内	雨竜川	73.00km
Dam points	1	141.447669	42.845641	漁川ダム	千歳川	15,300,000m ³
	2	141.146577	42.915657	豊平峡ダム	豊平川	47,100,000m ³
	3	141.157490	42.984895	定山渓ダム	豊平川	82,300,000m ³
	4	142.100273	43.023516	夕張シューパロダム	夕張川	427,000,000m ³
	5	142.442906	43.129506	金山ダム	空知川	150,450,000m ³
	6	142.002416	43.239515	桂沢ダム ¹	幾春別川	92,700,000m ³
	7	141.562914	43.317657	当別ダム	当別川	74,500,000m ³
	8	142.288022	43.443838	滝里ダム	空知川	108,000,000m ³
	9	142.626808	43.625641	忠別ダム	忠別川	93,000,000m ³
	10	143.037149	43.676239	大雪ダム	石狩川	66,000,000m ³

¹ distance from estuary or confluence / total reservoir storage

² it will increase after redevelopment 147,300,000m³

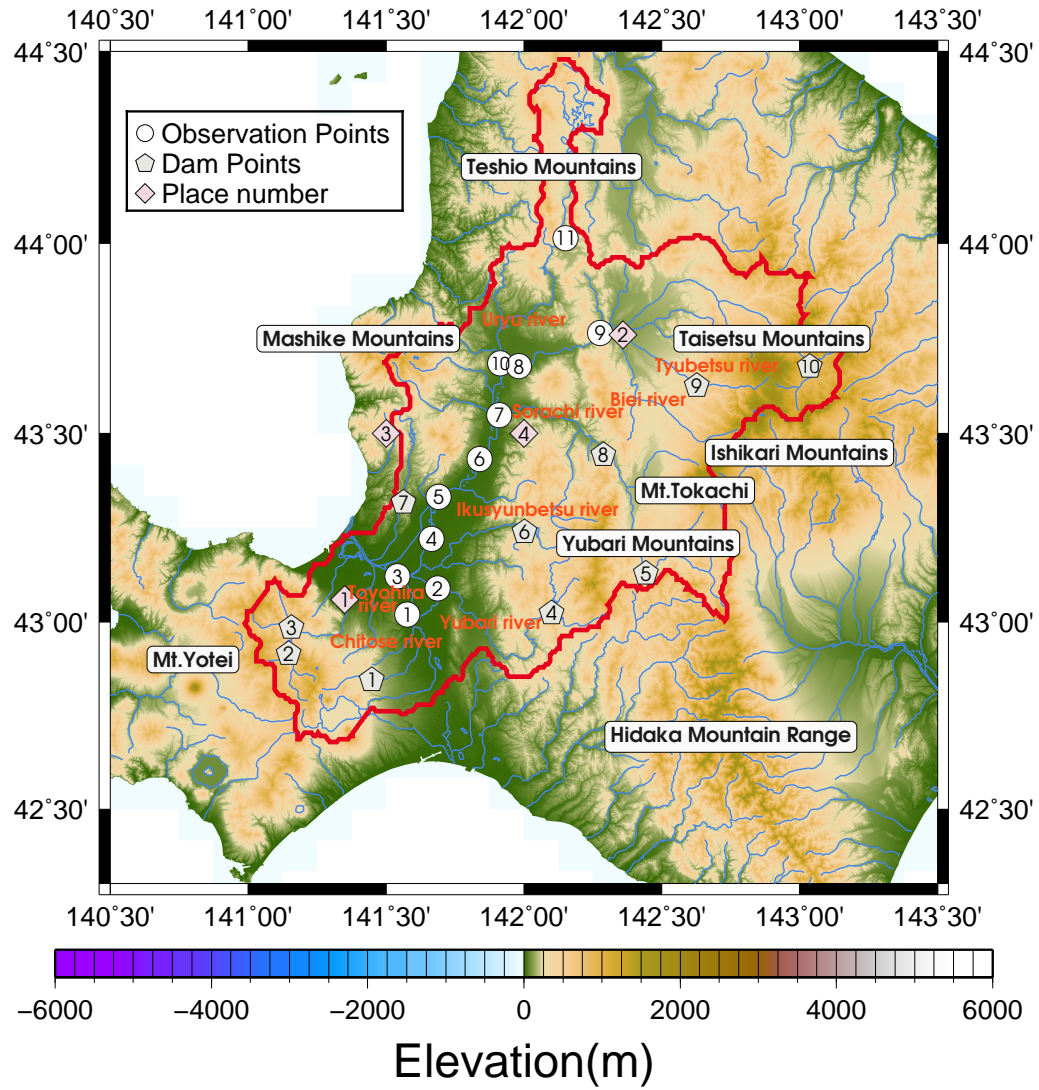


Fig. 1 Map of Hokkaido showing location of study area adjacent to the Ishikari River and a contour map. A circle of numbers area shown that observation points of the Ishikari River, and a pentagon of numbers are shown dam points (refer to Table 3). A square of numbers are shown that name of city, Sapporo(1), Asahikawa(2), Atsuta ward of Ishikari(3), and Utashinai(4). And red line shows watershed of the Ishikari River. This map is based on Digital Map 50 m Grid Elevation by Geospatial Information Authority of Japan (refer to Table 3).

2.3 研究事例

2010 年から 2014 年の 5 年間に於ける夏季（7 月，8 月，9 月）の石狩大橋地点に於ける観測流量を比較し，観測流量が $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ を超え，洪水前後に大きな流量の変化がない洪水事例を抽出した（Fig.4）．この内，洪水ピークの増加過程，低減過程が比較的短い期間で発生している 2010 年 8 月 20 日から 31 日（以下，事例 1）と 5 年間で最大の流量である 2011 年 8 月 30 日から 9 月 12 日（以下，事例 2）を対象とし，流出計算を行った．事例 1 は線状降水帯による降水であり，事例 2 は秋雨前線への暖湿移流による降水の事例である．降水要因の詳細については後述する（3.1，3.2）．

Table 4 Feature of flood events at the Ishikari River from 2010 to 2014.

日時	ピーク流量 (m^3/s)	ピーク前後 の流量変化	増加過程 の状態	低減過程 の状態
2010 年 7 月 30 日 09UTC	2723.41	有り	急	緩やか
2010 年 8 月 12 日 16UTC	2504.76	有り	緩やか	急
2010 年 8 月 24 日 12UTC	2977.88	無し	急	急
2011 年 7 月 15 日 07UTC	3146.25	無し	急	緩やか
2011 年 8 月 17 日 14UTC	2516.42	無し	緩やか	急
2011 年 9 月 4 日 08UTC	5653.69	有り	急	比較的緩やか
2012 年 9 月 12 日 10UTC	3730.96	無し	緩やか	急
2013 年 9 月 17 日 06UTC	2873.89	無し	緩やか	緩やか
2014 年 8 月 6 日 06UTC	3414.32	有り	急	緩やか

2.4 気象場の確認に用いたデータ

気象場は、気象庁地上天気図及びメソ数値モデル (MSM) を用いた。また、降水量は気象庁レーダー・アメダス解析雨量の1時間雨量を使用した。

2.4.1 メソ数値モデル (MSM)

メソ数値モデル (Meso-Scale Model : MSM) とは気象モデルであり、気象庁が提供する GPV (Grid Point Value) データの一つである。MSM は防災気象情報や航空気象情報の提供を目的とし、日本周辺の北緯 22.4 度から 47.6 度、東経 120 度から 150 度の範囲で数値予報が行われている。そのデータの詳細は Table.5 に示した。

Table 5 Specifications of Meso-Scale Model (MSM) data. This table is based on Japan Meteorological Agency (<http://www.jma.go.jp/jma/kisyou/nowhiterp/1-3-1.html>) and RISH Data Server, Kyoto University (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/>).

項目	面	詳細
空間分解能	地上	0.0625 度×0.05 度 (格子数 481×505)
	気圧面	0.125 度×0.1 度 (格子数 241×253)
初期時刻 (36 時間予報)	地上	00,06,12,18UTC : 1 時間毎
	気圧面	00,06,12,18UTC : 3 時間毎
初期時刻 (15 時間予報)	地上	03,09,15,21UTC : 1 時間毎
	気圧面	03,09,15,21UTC : 3 時間毎
物理量	地上	海面更正気圧, 地上気圧, 東西風, 南北風, 気温, 相対湿度, 時間降水量, 雲量
	気圧面	16 層...高度, 東西風, 南北風, 気温, 上昇流 (1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100hPa) 12 層...相対湿度 (1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300hPa)

Table.5 のデータを用いて、以下に示した Eq.1 から Eq.7 を利用し、温位 θ 、相当温位 θ_e 、飽和水蒸気圧 e_s 、水蒸気圧 e 、飽和水蒸気混合比 q_s 、水蒸気混合比 q 、及び比湿 s を求めた。

温位 (potential temperature : θ)

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{0.286} \quad (1)$$

T : 気温, P : 気圧, P_0 : 標準気圧 (1000hPa)

飽和水蒸気圧 (saturation vapor pressure : e_s)

$$\ln \frac{e_s(T)}{6.11} = \left(\frac{L}{R_v} \right) \left(\frac{T - 273.2}{273.2 \cdot T} \right) \quad (2)$$

e_s : 飽和水蒸気圧, T : 気温, L : 水蒸気潜熱, R_v : 水蒸気の気体定数

水蒸気圧 (vapor pressure : e)

$$e = \frac{rh}{100 \times e_s} \quad (3)$$

rh : 相対湿度, e_s : 飽和水蒸気圧

飽和水蒸気混合比 (saturation water vapor mixing ratio : qs)

$$qs = \frac{0.622 \cdot e_s}{P - e_s} \quad (4)$$

P : 気圧, e_s : 飽和水蒸気圧

水蒸気混合比 (water vapor mixing ratio : q)

$$q = \frac{0.622 \cdot e}{P - e} \quad (5)$$

P : 気圧, e : 水蒸気圧

相当温位 (equivalent potential temperature : θ_e)

$$\theta_e = \theta \left(1 + \frac{L}{C_p} \frac{q}{T_s} \right) T_e \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}} \approx T \left(1 + \frac{L}{C_p} \frac{q}{T} \right) \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}} = \frac{1}{C_p} (T C_p + L q) \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (6)$$

C_p : 比熱容量, T : 気温, P : 気圧, P_0 : 標準気圧 (1000hPa), q : 水蒸気混合比, L : 水蒸気潜熱, R : 気体定数, θ : 温位, T_s : 地表面気温

比湿 (specific humidity : s)

$$s = \frac{0.622 \cdot e_s}{P - 0.378 \cdot e_s} \quad (7)$$

e_s : 飽和水蒸気圧, P : 気圧

2.5 分布型流出モデル

2.5.1 土地勾配データ

土地勾配データには HydroSHEDS (<https://hydrosheds.cr.usgs.gov/>) で提供されている 30 秒間隔 (約 1km) のデータを使用し、これを 1K-DHM/FRM 用地形データ作成プログラムである hydroshed2topo を用いて流出計算用地形データを作成した。HydroSHEDS とは、Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales の略称であり、アメリカ地質調査所 (United States Geological Survey : USGS) が公開している全球規模の水文学的データセットである (<https://hydrosheds.cr.usgs.gov/>)。これは、スペースシャトル立体地形データ (Shuttle Radar Topography Mission : SRTM) と呼ばれる NASA のスペースシャトルに積み込まれたレーダーにより作成された全球規模の地形に加え、河道網、流域界、各グリッドの流出方向等をデータに含んでいる。

2.5.2 入力降雨データ

流出計算に用いた入力降雨には、空間分解能 1km、時間分解能 1 時間のレーダー・アメダス解析雨量 (以下、解析雨量) を使用した。解析雨量は、気象庁で行われている全国 20 箇所に設置されているレーダーによる降水観測値と、約 1,300 箇所設置されているアメダス雨量計による観測値を合成した雨量データである。レーダー観測では、電波 (マイクロ波) を大気中に発射し、雨粒に散乱・反射され戻ってきた電波を観測し、雨の強さや位置を測定する面的な降水量の推定を行っている。一方、アメダス雨量計では、雨量計による正確な雨量を観測できるが、雨量計のある点での値となる。そこでレーダーによる観測値をアメダス雨量計による観測値で補正することでより正確な雨量データとして利用できる。

2.5.3 分布型流出モデル 1K-DHM-event

流出計算には京都大学水文・水資源研究室で開発された分布型流出モデル「1K-DHM-event」を用いた。このモデルでは、下記に示すキネマティックウェーブ理論を基にした地表面流・中間流を考慮した流量流積関係式が導入されており、定常流から洪水流まで流出量を連続的に表現することができる。

立川ら (2004) で提案された流量流積関係式について、その土層構造 (Fig.2) と式の関係を示した。土層を重力水が発生する大空隙部分と毛管水の流れの場であるマトリックス部分からなるとし、土層厚を D 、体積含水率を θ 、不飽和透水係数を β 、重力水を除いた大空隙を除いたマトリックス部の飽和体積含水率を θ_m と示す。毛管水が支配的な体積含水率の範囲を $0 \leq \theta \leq \theta_m$ とし、マトリックス部の最大水分率を水深 $d_m (= D\theta_m)$ で表した。 θ_a を空隙率、 $\theta_a - \theta_m$ を有効空隙率とし、重力水が支配的な体積含水率の範囲を $\theta_m \leq \theta \leq \theta_a$ とした。 $d_a = D\theta_a$ とし、 θ に対する水深を h とし、 $h = D\theta$ とおく。以上をまとめると、

$$0 \leq h \leq d_m \quad (0 \leq \theta \leq \theta_m) \quad \text{不飽和状態}$$

$$d_m \leq h \leq d_a \quad (\theta_m \leq \theta \leq \theta_a) \quad \text{飽和状態 (中間流)}$$

$$d_a \leq h \quad (\theta_a \leq \theta)$$

飽和状態 (表面流)

となる .

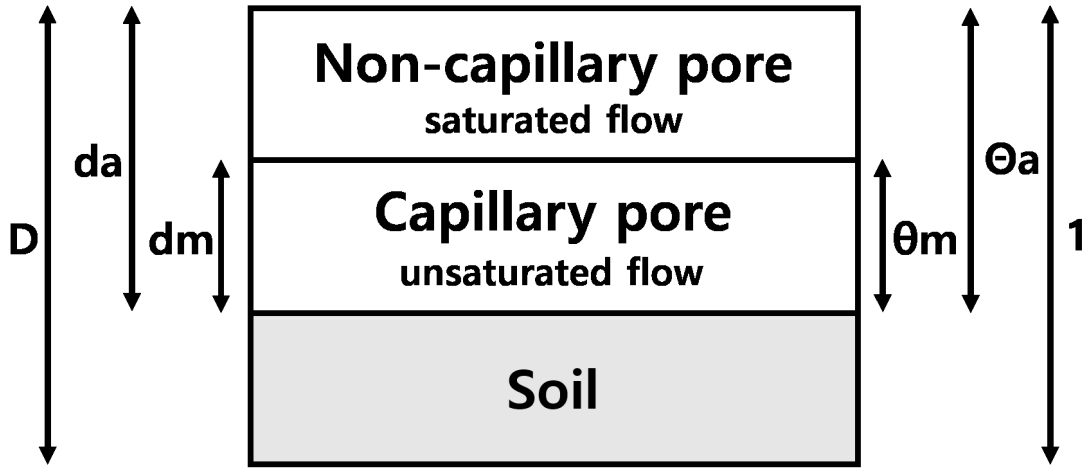


Fig. 2 The schema of soil layer. It modified Tachikawa(2004).

次に, それぞれの状態を流量流積関係式で示す (Eq.8) . V_m はマトリックス部における平均流速, K_m はマトリックス部における飽和透水係数, β は θ の現象に伴う k の現象の大きさを示すパラメータ, $k = k_m S_e^\beta$ は不飽和時の透水係数, i は斜面勾配, n は粗度係数を示す .

$v_m = k_m i$, $v_a = k_a i$, $\alpha = \frac{\sqrt{i}}{n}$ とおくと, 単位幅流量と水深の関係は,

$$q(h) = \begin{cases} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta, & 0 \leq h < d_m \\ v_m d_m + v_a (h - d_m), & d_m \leq h < d_a \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + \alpha (h - d_a)^m, & d_a \leq h \end{cases} \quad (8)$$

と表され, この時の伝搬速度は,

$$\frac{\partial q}{\partial h} = \begin{cases} \beta v_m \frac{h}{d_m}^{\beta-1}, & 0 \leq h < d_m \\ v_a, & d_m \leq h < d_a \\ m\alpha (h - d_a)^{m-1} + v_a, & d_a \leq h \end{cases} \quad (9)$$

となる . Eq.8 と Eq.9 と連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} = r(t) \quad (10)$$

を組み合わせる雨水を追跡する . 伝搬速度を

$$c = \frac{\partial q}{\partial h} \quad (11)$$

として, 連続式を

$$\frac{\partial h}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = cr(t) \quad (12)$$

と変形することで，差分解法により流出量 q を求められる．上記の土地勾配データと入力降雨データを利用し，そこに土層や透水係数等のパラメータを入力し，流出計算を行った．このモデルで使用するパラメータを Table.6 に示した．

Table 6 Detail the particulars of model parameters.

item name	details	range of values
θ	体積含水率	$0.5 < \theta \leq 1.0$
Ns	マンニングの粗度係数：土壌 (m/s)	$0.01 < Ns \leq 1.0$
Nr	マンニングの粗度係数：河川 (m/s)	$0.02 < Nr \leq 0.05$
da	帯水層の不飽和領域と飽和領域の土層厚 (m)	$0.0 < Da \leq 2.0$
dm	帯水層の飽和領域の土層厚 (m)	$0.0 < Dm \leq 1.0$
β	不飽和透水係数	$2.0 < \beta \leq 18.0$
Ka	透水係数 (m/s)	$0.0001 < Ka \leq 0.01$
$initialROF$	モデル内の初期流出高 (mm/hr)	$0.01 < initialROF \leq 0.10$

Table 6 で示したモデルに用いるパラメータと実際に発生する水文現象についてその関係性を Fig.3 に表した．まず実際に発生する水文現象では，地表面に降った雨は地面へと浸透し，透水層内の不飽和領域に貯留され，その一部が中間流出として流出する．この時，透水層が飽和した場合や浸透量以上の降水があった場合，表面流出が発生する．この水文現象をモデル内でパラメータを用いて再現すると，降水は地面へ透水係数 $Ka(m/s)$ と β に従い浸透し，体積含水率 θ で層内の貯水量を決定する．また， $da(m)$ で表現される透水層は，雨水の貯留とともに飽和域 $dm(m)$ が増加し， $da = Dm$ となった時点で表面流出が発生する．表面流出の流出速度を $Ns(m/s)$ ，河道内の流下速度を $Nr(m/s)$ として表現している．

本研究では，1K-DHM-event を用いて以下の 5 種類の流出計算 (Table 7) を行いパラメータを算出した．また Model 3 では，流域を 11 分割 (Fig.4) したうち流量観測地点を考慮し，G, I, J を統合した石狩川上流エリア，E, H からなる石狩川中流エリア，B, F を結合した石狩川下流エリア，雨竜川エリア，空知川エリア，夕張川エリア，千歳川エリアの全 7 流域 (Table 8) についてそれぞれパラメータを求め，流出計算を行った．その内 NS 係数が最も高かったパラメータを用いて降水量増加・変化実験を行った．

パラメータが再現する現象 流出モデル内のパラメータ

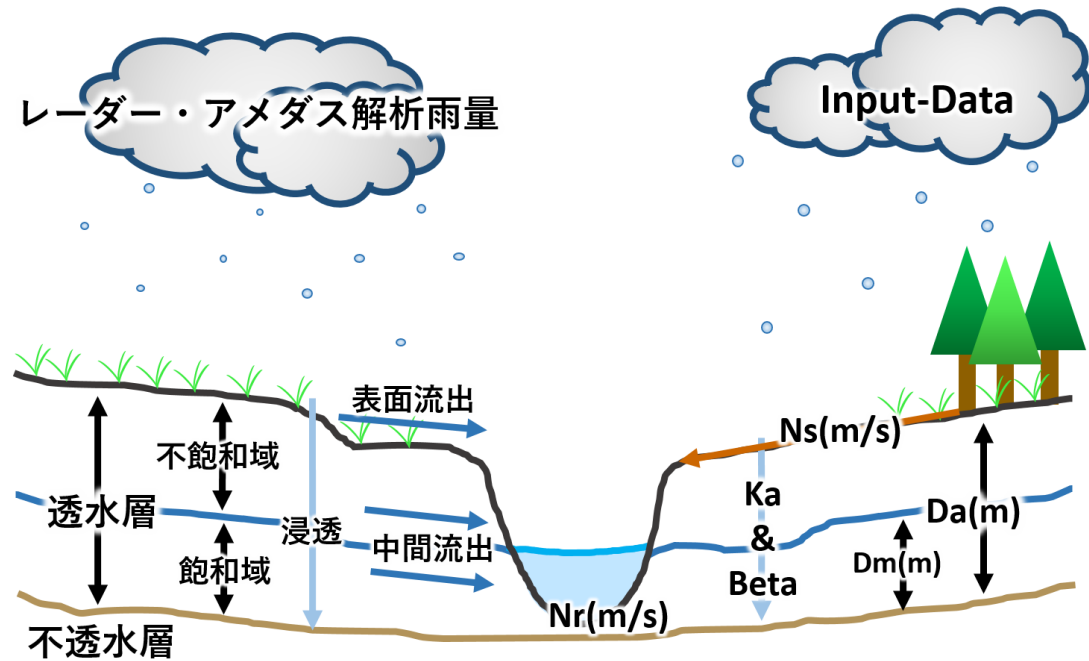


Fig. 3 Diagram of hydrological comparison between the real flows and layers and the model parameters. $Ka(m/s)$ is hydraulic conductivity, β is exponent constant of unsaturated hydraulic conductivity, θ is volume water content, $Da(m)$ is depth of capillary and non-caillary soil layers, $Dm(m)$ is depth of capillary soil layers, $Ns(m/s)$ is Manning's roughness coefficient for slope, and $Nr(m/s)$ is Manning's roughness coefficient for river.

Table 7 Usage models of this reserch and its setting. It was set in each method.

item name	usage model	model setting
Model 1-1	1K-DHM ver1.35	Point3 のピークに着目し Point3 の 1 点で主観的にパラメータを設定した
Model 2-1	1K-DHM ver2.20	SCE-UA 法を用いて Point3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 9 , 10 , 11 の地点流量データを用いて Point3 の石狩大橋 1 点でパラメータ設定を行った
Model 2-2	1K-DHM ver2.20	SCE-UA 法を用いて Point3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 9 , 10 , 11 の地点流量データをその地点が持つ流域で割った値を用いて Point3 の石狩大橋 1 点でパラメータ設定を行った
Model 3-1	1K-DHM ver2.50	流域を 7 分割し , 全地点の観測流量を用いてパラメータ設定を行った
Model 3-2	1K-DHM ver2.50	流域を 7 分割し , 全地点の観測流量を用いてその地点が持つ流域で割った値を用いてパラメータ設定を行った

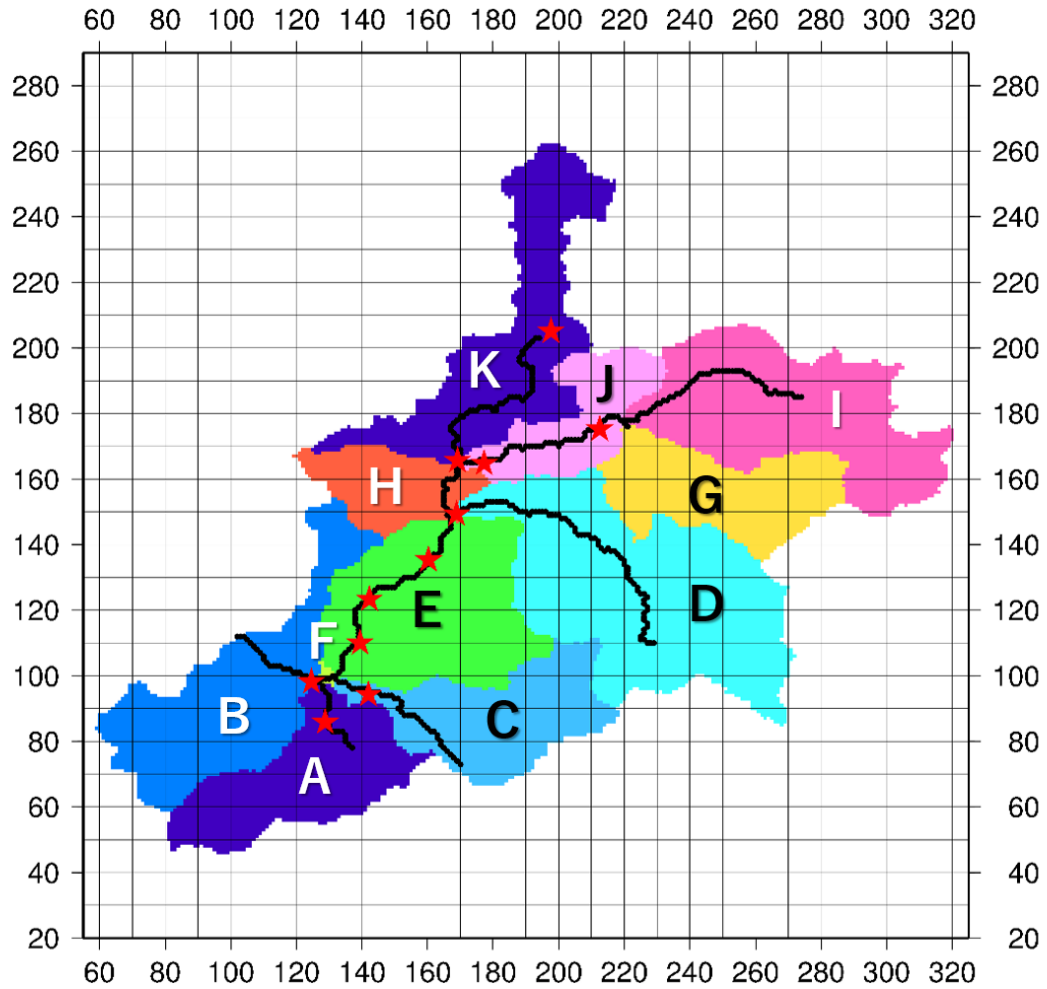


Fig. 4 The partitioned basin map of the Ishikari River for Model3 (See the Table 8). It was divided to aggregation degree over 1200. Area G, I and J are the upper stream of Ishikari River, Area E and H are the middle stream of Ishikari River, Area B and F are the downstream of Ishikari River. Area K is the Uryu River, Area D is the Sorachi River, Area C is the Yubari River, Area A is the Chitose River.

Table 8 The partitioned Ishikari river basin (See the Fig.4).

Area name	Area symbols
石狩川上流	G , I , J
石狩川中流	E , H
石狩川下流	B , F
雨竜川	K
空知川	D
夕張川	C
千歳川	A

2.5.4 流出計算結果の評価方法

1K-DHM-event で計算された流出量を NS 係数 (Eq.13) と総流量比 (Eq.15) ピーク流量比 (Eq.16) を用いて評価を行った。NS 指標は Nash and Sutcliffe (1970) により提唱された指標であり、多くの水文モデルで精度評価に用いられている。値の範囲は、1 以下であり、1 に近いほど精度が良いとされ、0 以上で再現性があり、0 未満で再現性がないと考えられている。また、Ragab *et al.* (2001) では、0.7 以上で再現性が高いとしているとともに、国内の流出モデル (松原ら 2015) においても同様に 0.7 以上で再現性が高いと考えられている。

NS 指標 (Nash-Sutcliffe coefficient : NS)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_o(i) - q_c(i))^2}{\sum_{i=1}^N (q_o(i) - q_{av})^2} \quad (13)$$

$$q_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_o(i) \quad (14)$$

N : 計算時間数, $q_o(i)$: i 時の実測流量, $q_c(i)$: i 時の計算流量, $q_{av}(i)$: 実測流量の平均値

総流量比 (Total flow rate : TFr)

$$TFr = \frac{\sum_{i=1}^N q_c(i)}{\sum_{i=1}^N q_o(i)} \quad (15)$$

ピーク流量比 (Peak flow rate : Pr)

$$Pr = \frac{q_{c,peak}}{q_{o,peak}} \quad (16)$$

$q_{o,peak}$: 観測流量のピーク時流量, $q_{c,peak}$: 計算流量のピーク時流量

2.5.5 SCE-UA 法

SCE-UA 法 (Shuffled Complex Evolution method at the University of Arizona) は Duan *et al.* (1992; 1994) により開発されたシンプレックス法、遺伝的アルゴリズム (GA) に類似した競争進化、集団混合の概念を組み合わせた流出モデルパラメータの最適化手法である。SCE-UA 法は Model 2 及び Model 3 のパラメータ設定に用いた。

3 結果

3.1 事例 1：2010 年 8 月 20 日～31 日

3.1.1 事例 1 の降水要因と分布

8 月 23 日 18UTC の地上天気図 (Fig.5) によると、ロシア沿海州付近に東北東へ進む 1006 hPa の低気圧があった。道北付近に位置し、東へ進む 1006 hPa の低気圧の中心から南西へ朝鮮半島付近まで寒冷前線がのび、そこから停滞前線が華中まで達していた。また、低気圧中心から南東へ温暖前線がのびていた。千島の東にある 1006 hPa の低気圧が北東へ進み、日本のはるか東には中心気圧 1018 hPa の高気圧がほとんど停滞していた。8 月 23 日 12UTC から 23 日 21UTC にかけて北海道付近では、西から下層 1000 hPa に 335 K 以上の高相当温位を持った空気塊が石狩平野へ流入していた。また、道央付近において同時刻に 1000 hPa で風が収束していた。下層 1000 hPa から中層 700 hPa において風が暖気側から寒気側に吹いており、暖気が移流していた (Fig.6)。石狩市厚田区付近と歌志内市における相当温位の鉛直断面図では、石狩市厚田区付近 (place point 3; Fig.1) では 23 日 9UTC から 21UTC にかけて、歌志内市 (place point 3; Fig.1) では 23 日 9UTC から 24 日 00UTC にかけて 1000 hPa から 800 hPa に大雨の 337.5 K 以上の高相当温位の空気塊が存在した (Fig.11)。1000 hPa、925 hPa、850 hPa の水蒸気混合比は 0.012–0.020 kg/kg であったが、700 hPa では 0.010 kg/kg 以下と下層と比べ乾燥していた。札幌で観測されたラジオゾンデデータでは、ショワルターの安定指数 (SSI) は -0.86 と負の値であり、かつ大気の鉛直断面図の相当温位が下層において高かった。そのため、8 月 23 日では吉崎・加藤 (2007) で述べられている下層に高い相当温位を持つ風収束場があり、中層から上層に低い相当温位を持つ空気が流入し、対流不安定な場の維持される環境場が積乱雲が発生し続けた要因であると考えられる。つまり、寒冷前線南側の湿潤暖域内で大気下層における風収束場において次々と発生した積乱雲が、925 hPa から 700 hPa の中層で確認された西寄りの風に流され、降水域を東方向に引き伸ばしたと考えられる。事例 1 では、8 月 23 日 16UTC から 20UTC の約 5 時間、石狩川中流、上流域を中心に線状降水帯により 12 時間累積雨量が 100 mm を超える激しい雨が降った (Fig.12)。特に石狩川上流域の忠別川や美瑛川において 12 時間累積雨量が 150 mm を超えた。

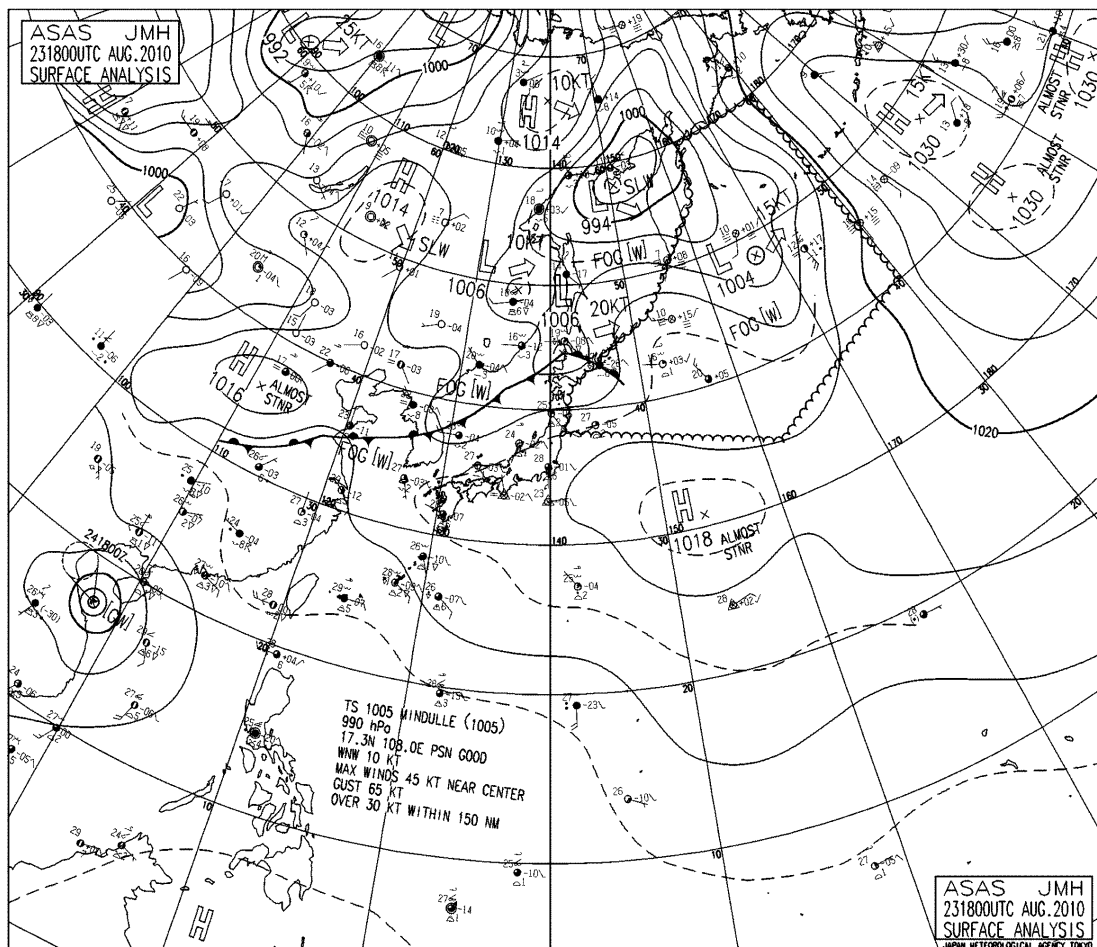


Fig. 5 Surface weather chart at 1800 UTC 23 August 2010 (JMA) .

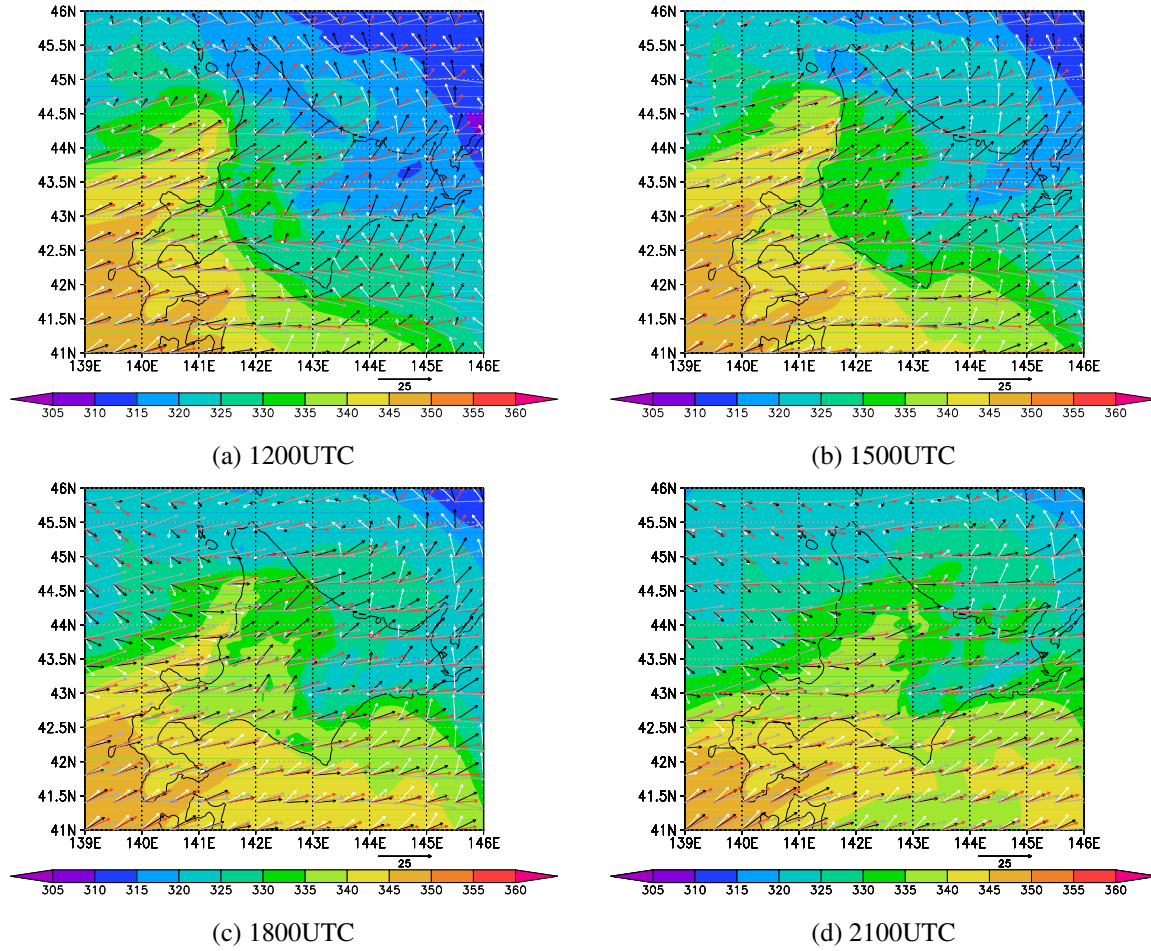


Fig. 6 Equivalent potential temperature (K) at 1000 hPa and wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido. These color arrows show show wind flow at each geopotential height levels for 1000 hPa in white, 925 hPa in black, 850 hPa in red, 700 hPa in gray.

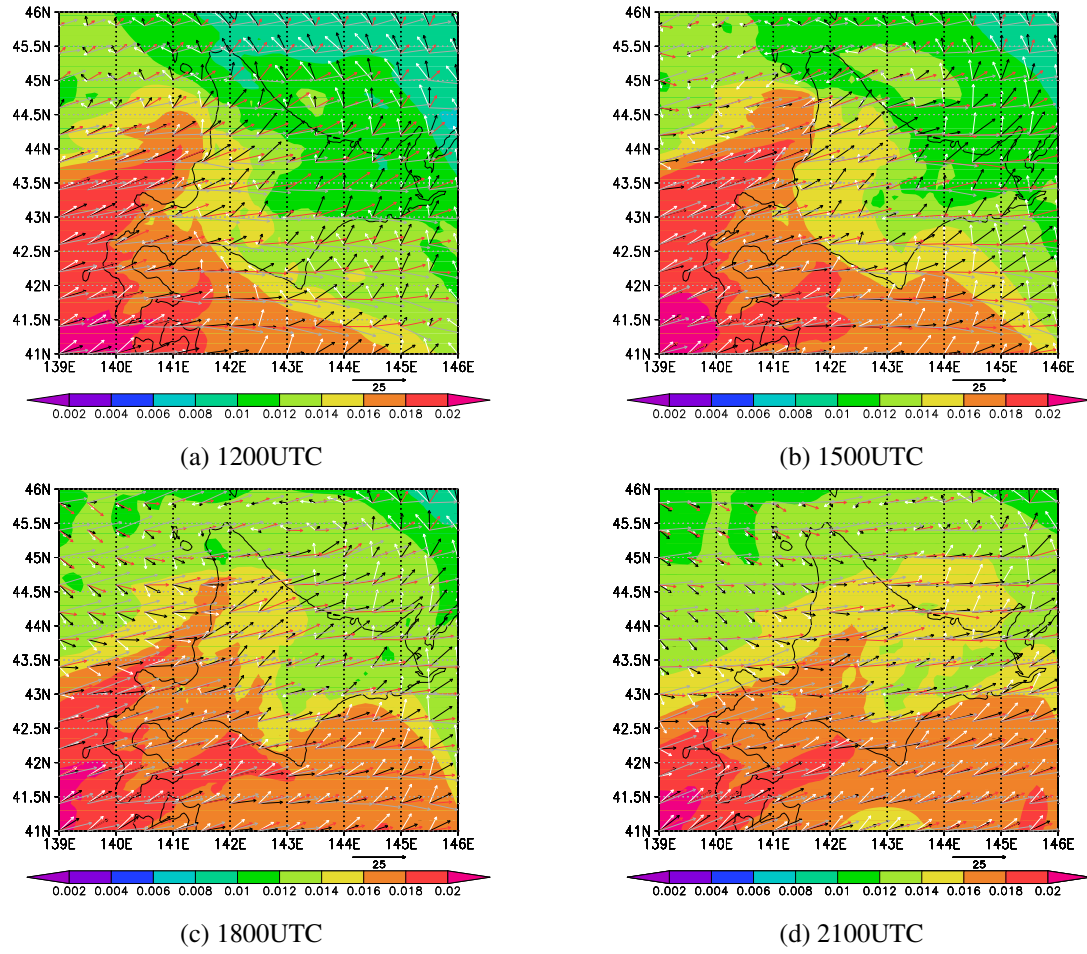


Fig. 7 Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 1000 hPa and wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido same as Fig.6.

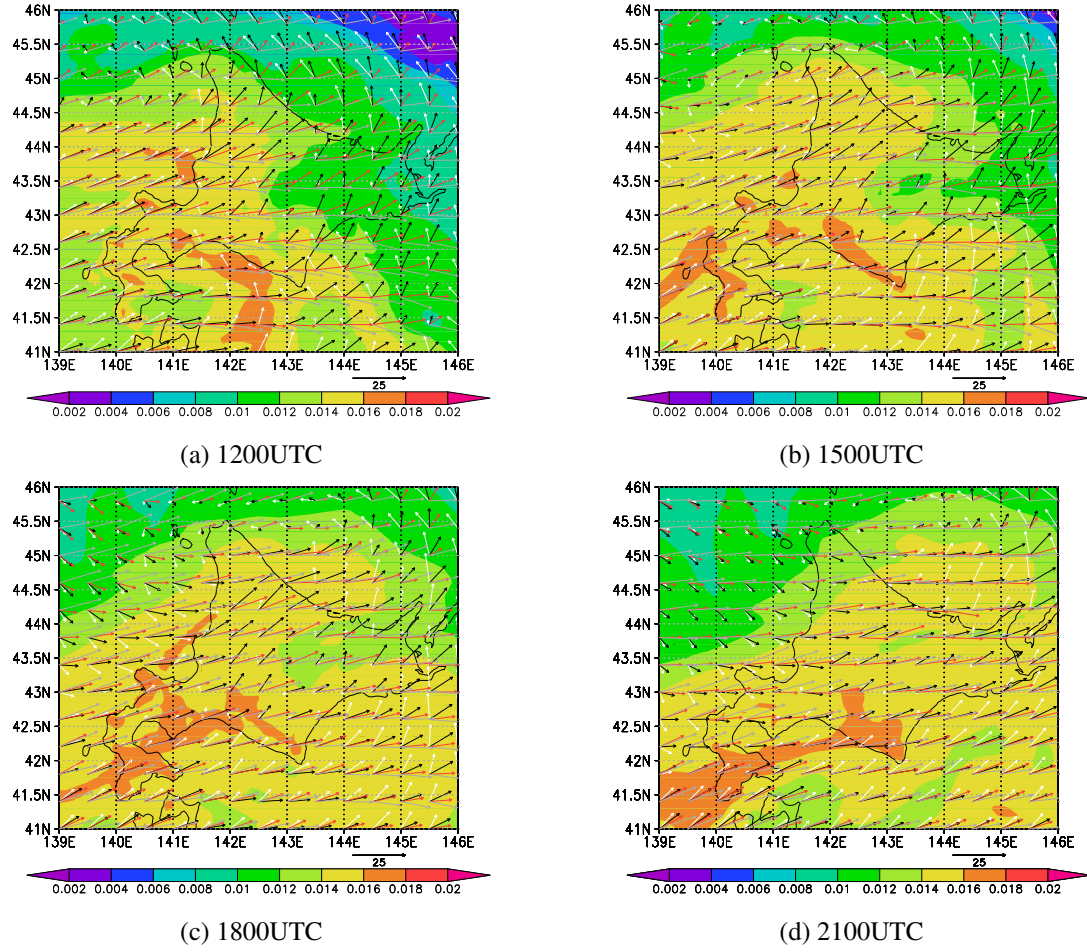


Fig. 8 Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 925 hPa and wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido same as Fig.6.

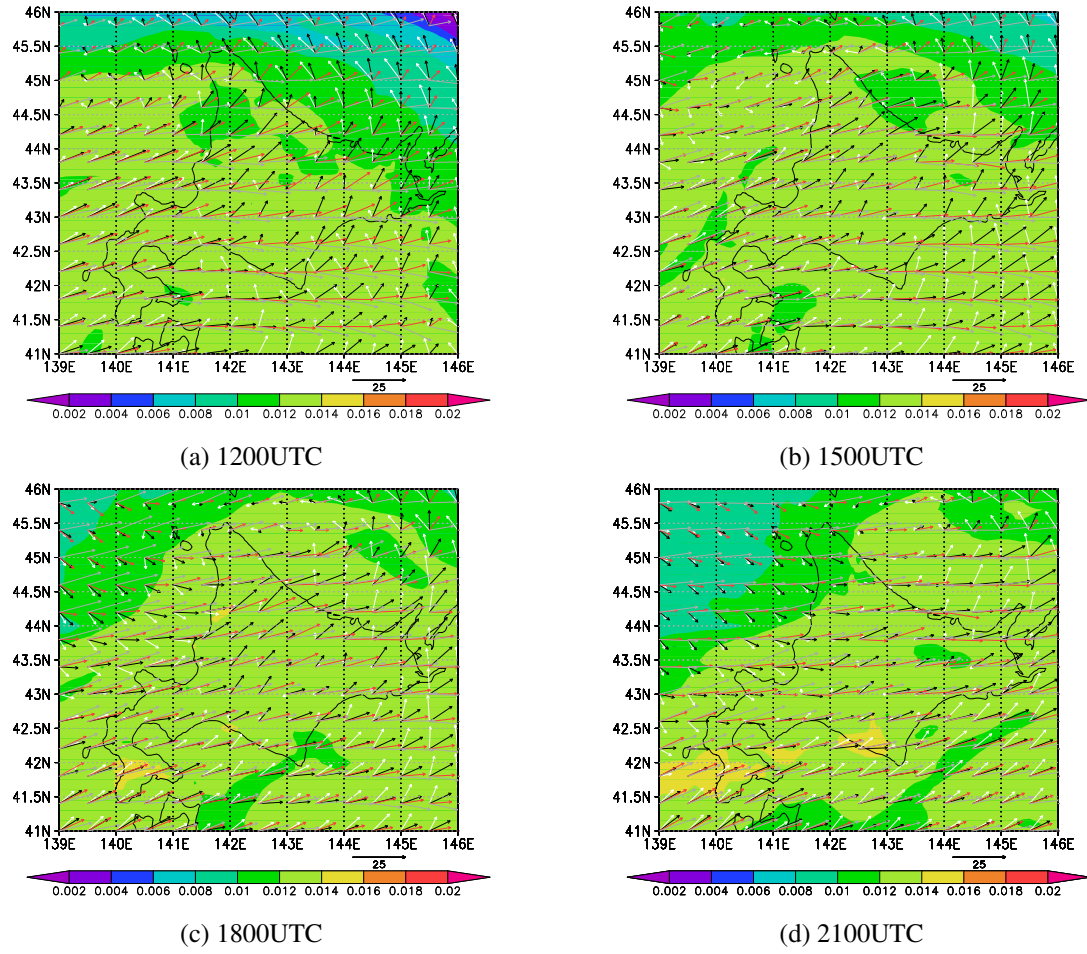


Fig. 9 Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 850 hPa and wind speed (m/s) and direction on 23 August 2010 in Hokkaido same as Fig.6.

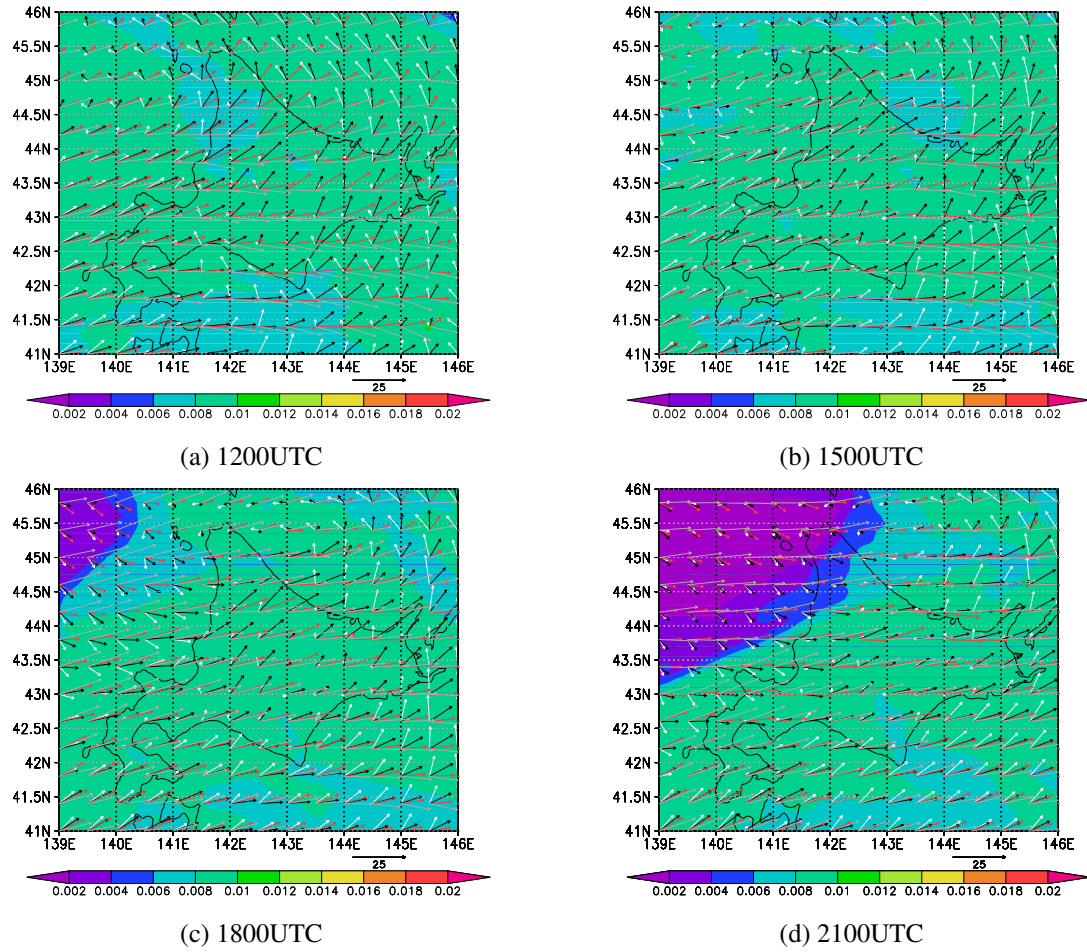
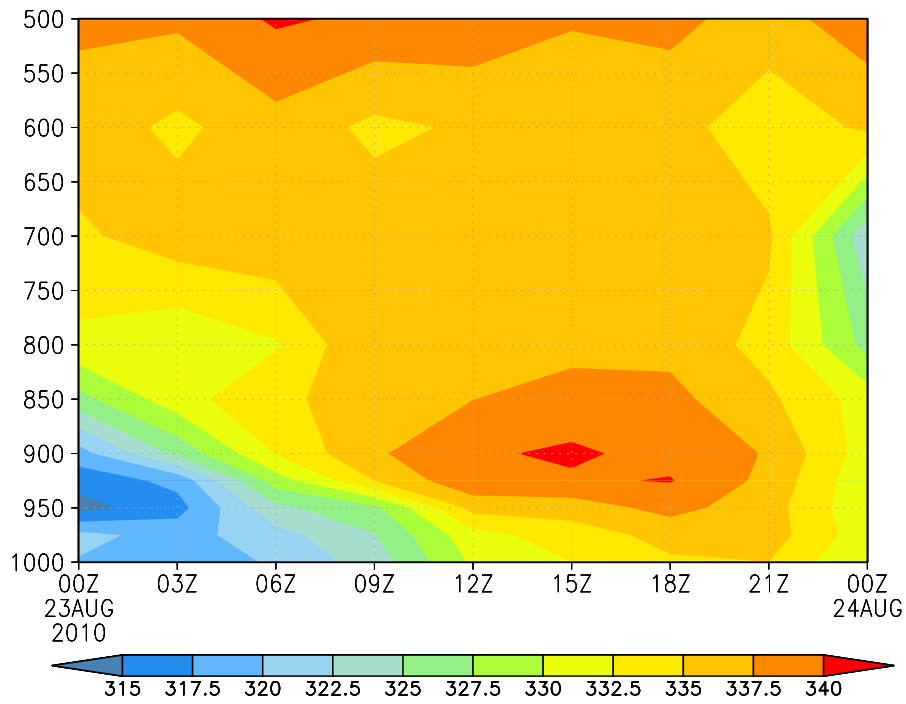
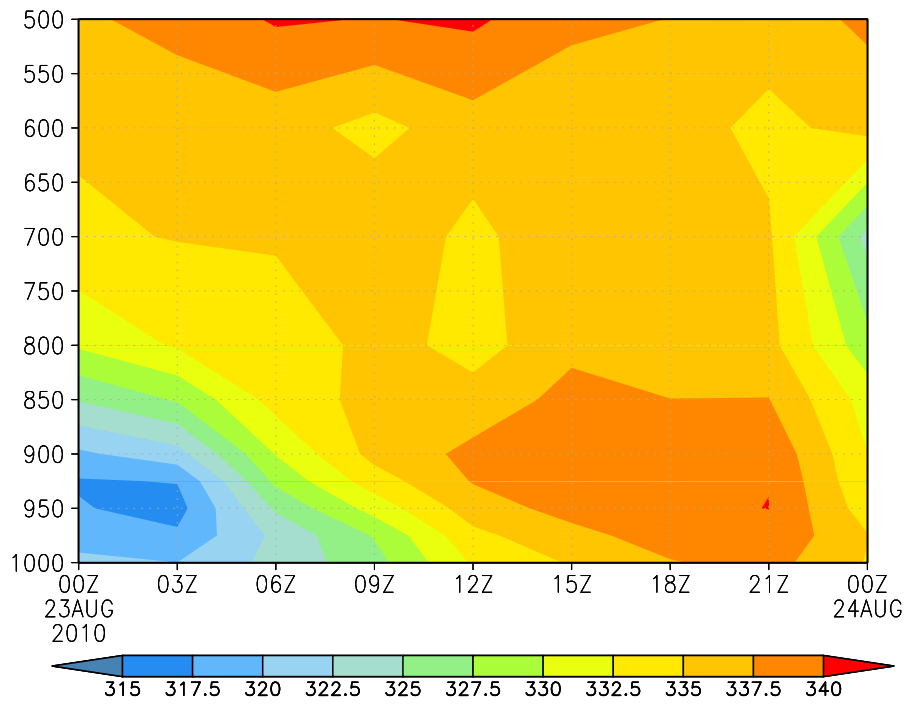


Fig. 10 Water vapor mixing ratio (kg/kg) at 1000 hPa and wind speed (m/s) and direction at 1000, 925, 850, 700 hPa on 23 August 2010 in Hokkaido same as Fig.6.



(a) Atsuta word, Ishikari city (E141.5 °, N43.5 °)



(b) Utashinai city (E142.0 °, N43.5 °)

Fig. 11 Time-Height cross section of temperature (K) on 23 August 2010.

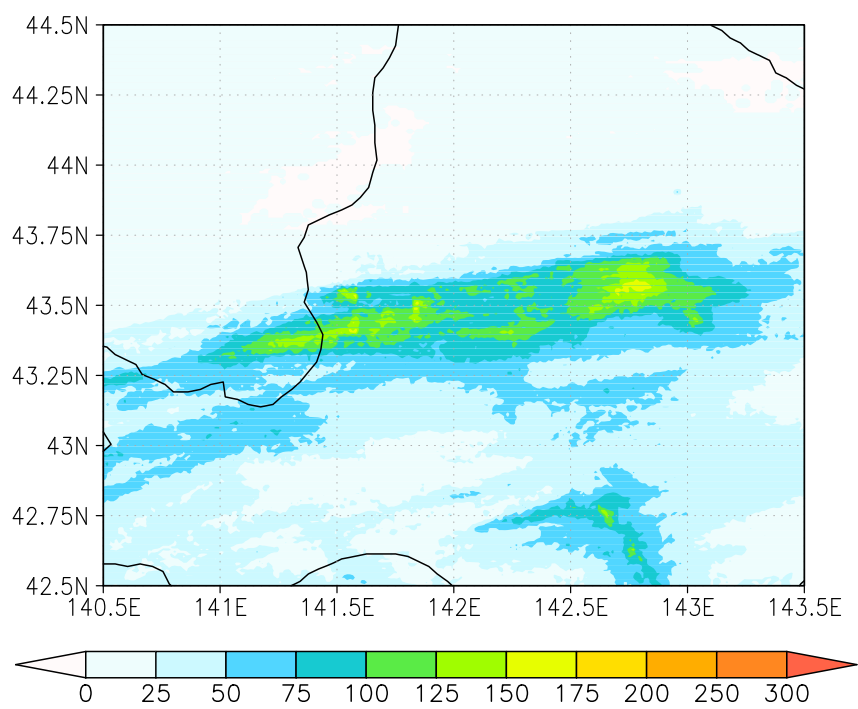


Fig. 12 The total amount of precipitation at 1800-2300UTC on 23 August 2010.

3.1.2 流出実験

流出計算に用いたパラメータを Table 9 に示した．流域分割を行った Model 3-1 において石狩川上流域である area G, I, J では，他地点と比較して不飽和透水係数である β ，透水層の飽和領域である D_m の値が小さく，透水係数である Ka は大きい値を示した．8 地点の観測流量データを用いて石狩大橋地点においてパラメータ推定を行った Model 2-1 では Ka の値が小さく， Da と D_m の差異が小さい．

石狩川流域において流出計算を行った結果を Fig.13 から Fig.23 に図示した．石狩大橋地点 (Fig.13) では，Model 1-1 で主観的にピークに着目したパラメータを用いて流出計算を行なうと，ピーク比は 1.03 と観測流量とほぼ同程度の値となったが，流出量の立ち上がりが遅れ，またピーク後に流出量の低減が遅く，総流量が観測流量に比べ約 40 % 高い値となった (Table 10)．また，この時の NS 係数は -0.7525 と整合性がない結果となった．そのため，Model 2 及び Model 3 の流出計算では主観的なパラメータ決定を行わず，SCE-UA 法を用いることとした．SCE-UA 法を用いた結果として，流出量を流域内 8 地点の観測流量を使用し，石狩大橋 1 地点のみパラメータを設定した Model 2-1，Model 2-2 では石狩大橋地点において NS 係数は 0.2494 と 0.1460 となった．point1 から 11 の観測流量を使用した Model 3-1，Model 3-2 では -1.00 を下回り，整合性はなかった．

石狩川中流域と上流域にある観測地点について観測流量と計算流量を比較した．まずピーク比では，Model 2 と Model 3 では，Model 2 において観測流量の 1.05 倍から 1.8 倍程度大きく，Model 3 では 0.5 倍から 0.85 倍程度小さかった (Fig.14-18, Table 11-15)．だが，総流量比ではそれぞれの計算方法で約 1 % から 30 % の差異が見られたが，各モデルに大きな差は見られなかった．NS 係数は全ての本川にある地点で整合性が高い結果は見られなかった．そのうち，Model 2-1 では妹背牛橋地点を除く計 5 地点で整合性があった．Model 2-2 では岩見沢大橋地点と伊納地点で整合性が見られた．Model 3 においては岩見沢大橋地点と妹背牛地点において整合性があったが，0 に近く低い値となった．

石狩川下流域と中流域では，計算流量において観測流量のピーク値が観測された時刻より遅れが生じていた (Table 21)．その遅れは石狩大橋地点で最も大きく，21 時間から 24 時間だった．また，岩見沢大橋地点，月形地点，奈井江大橋地点と上流へ向かう地点でピーク値発生時間の遅れは小さくなった．逆に上流域にある妹背牛橋地点では，ピーク値発生時間は観測された時刻より 3 時間から 8 時間は早かった．妹背牛橋地点より約 35 km 上流の伊納地点ではピーク発生時刻は Model 2 では観測流量と計算流量が一致したが，Model 3 では 12 時間程度の遅れが生じていた．支流で唯一，流出量が定常状態より約 20 倍と著しく増加した空知川では，Model 2-1 において NS 係数が 0.13，総流量比が 108.0 %，ピーク比が 1.13 % であった．Model 2-2，Model 3-1，Model 3-2 では NS 係数が 0 を下回り，総流量比が約 130 % と増加した．

降水による大きな流出量の変化がなかった千歳川，夕張川，雨竜川では Model 3-1 の総流量比において観測流量との差異が 5 % 以下であった (Fig.19-23, Table 16-20)．また，Model 2 では総流量比が約 10 % から 75 % 大きく，流出量を過大に計算する傾向があった．

以上から，降水量を変化させた流出実験には Model 2-1 のパラメータを使用し，計算を行った．

Table 9 Parameters of the flow each experiments. For each table items, θ is volume water content, Beta is exponent constant of unsaturated hydraulic conductivity, Da is depth of capillary and non-capillary soil layers (m), Dm is depth of capillary soil layers (m), Ka is hydraulic conductivity (m/s), Nr is Manning's roughness coefficient for river (m/s), Ns is Manning's roughness coefficient for slope, initialROF is initial runoff height for kinematic wave model (mm/hr).

model	point or area	θ	β	Da	Dm	Ka	Nr	Ns	initial ROF
Model 2-1	point3	0.9012	12.98	0.4777	0.4220	0.003478	0.03745	0.9924	0.04950
Model 2-2	point3	0.8277	13.13	0.5138	0.4672	0.008223	0.04146	0.9840	0.9850
Model 3-1	area A	0.6500	13.09	1.5857	0.6164	0.00994	0.03151	0.1907	0.09564
	area B	0.6500	13.22	0.6115	0.4256	0.00344	0.02013	0.3502	0.03682
	area C	0.6500	17.05	1.3246	0.4570	0.00987	0.04281	0.2712	0.08549
	area D	0.6500	9.955	0.3937	0.3392	0.00730	0.04401	0.6389	0.09605
	area E	0.6500	13.13	1.3358	0.3945	0.00998	0.02141	0.3108	0.05621
	area F	0.6500	13.22	0.6115	0.4256	0.00344	0.02013	0.3502	0.03682
	area G	0.6500	8.986	0.4364	0.0200	0.00994	0.02301	0.2633	0.06956
	area H	0.6500	13.13	1.3358	0.3945	0.00998	0.02141	0.3108	0.05621
	area I	0.6500	8.986	0.4364	0.0200	0.00994	0.02301	0.2633	0.06956
	area J	0.6500	8.986	0.4364	0.0200	0.00994	0.02301	0.2633	0.06956
	area K	0.6500	11.41	0.4615	0.4333	0.00490	0.04750	0.9922	0.03371
Model 3-2	area A	0.6500	13.06	1.5718	0.5856	0.00899	0.02815	0.2006	0.09522
	area B	0.6500	15.63	0.5179	0.4796	0.00152	0.02016	0.0015	0.06746
	area C	0.6500	12.58	0.8277	0.3132	0.00996	0.04558	0.2474	0.07606
	area D	0.6500	10.18	0.3434	0.2749	0.00658	0.04364	0.6484	0.08927
	area E	0.6500	15.52	0.8203	0.1943	0.00996	0.02120	0.2676	0.03765
	area F	0.6500	15.63	0.5179	0.4796	0.00152	0.02016	0.0015	0.06746
	area G	0.6500	11.56	0.4625	0.0366	0.00996	0.02482	0.1060	0.03492
	area H	0.6500	15.52	0.8203	0.1943	0.00996	0.02120	0.2676	0.03765
	area I	0.6500	11.56	0.4625	0.0366	0.00996	0.02482	0.1060	0.03492
	area J	0.6500	11.56	0.4625	0.0366	0.00996	0.02482	0.1060	0.03492
	area K	0.6500	15.05	0.6413	0.6146	0.00071	0.04750	0.8985	0.01384

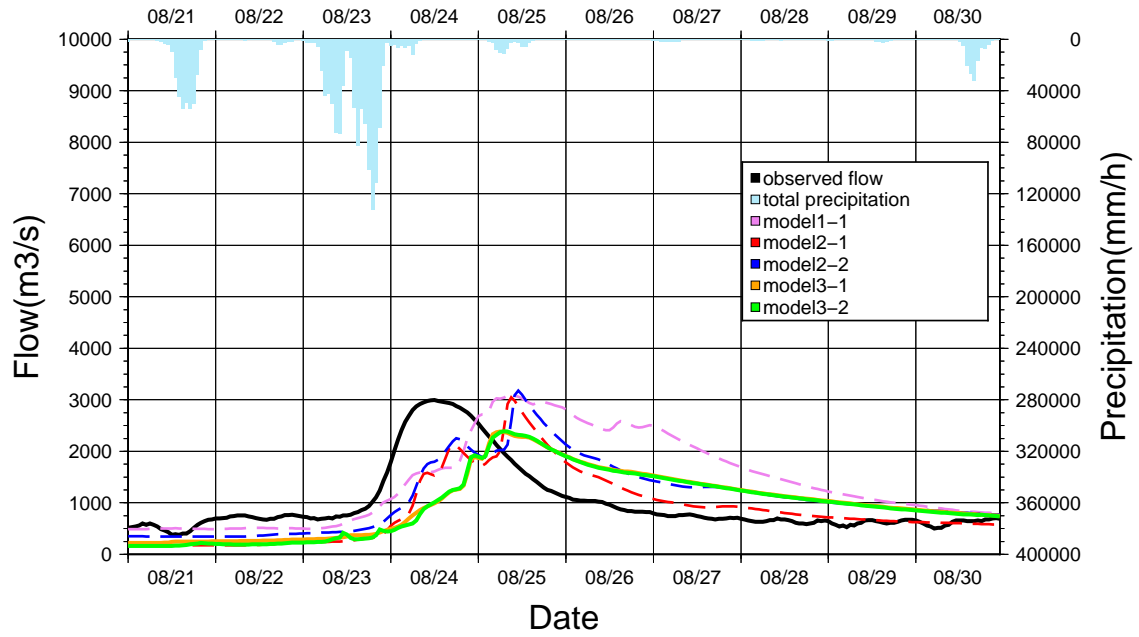


Fig. 13 Flow experiment from 21 to 30 August 2010 at Ishikari-Ohashi (observed point3). The light blue bars denote total hourly rainfall amount of drainage basin. These color thick lines show outflow at each experiments for observation flow in black, Model 3-1 in orange, Model 3-2 in green. These dashed color lines denote outflow at each experiments for Model 1-1 in pink, Model 2-1 in red, Model 2-2 in blue.

Table 10 Flow experiment comparison at Ishikari ohashi (observation point3). For each of table items ave. is the average value of outflow (m^3/s), max is the maximum value (m^3/s), min. is minimum value (m^3/s), NS is the Nash-Sutcliffe coefficient calculated by observed flow and calculated flow, total flow is the total sum from August 21 to 30, Tfr is the ratio of total observed flow and total calculated flow, and Pr is the peak ratio of the observed flow and calculated flow.

Point3	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	978.10	2997.88	379.37	-	258218	-	-
Model 1-1	1366.66	3088.79	487.01	-0.75	360798	139.7	1.03
Model 2-1	856.89	3049.30	174.86	0.25	226219	87.6	1.02
Model 2-2	1086.21	3176.78	342.89	0.15	286759	111.1	1.06
Model 3-1	974.61	2381.28	221.74	≤ -1.00	257298	111.1	0.794
Model 3-2	952.17	2392.07	164.41	≤ -1.00	251372	97.3	0.798

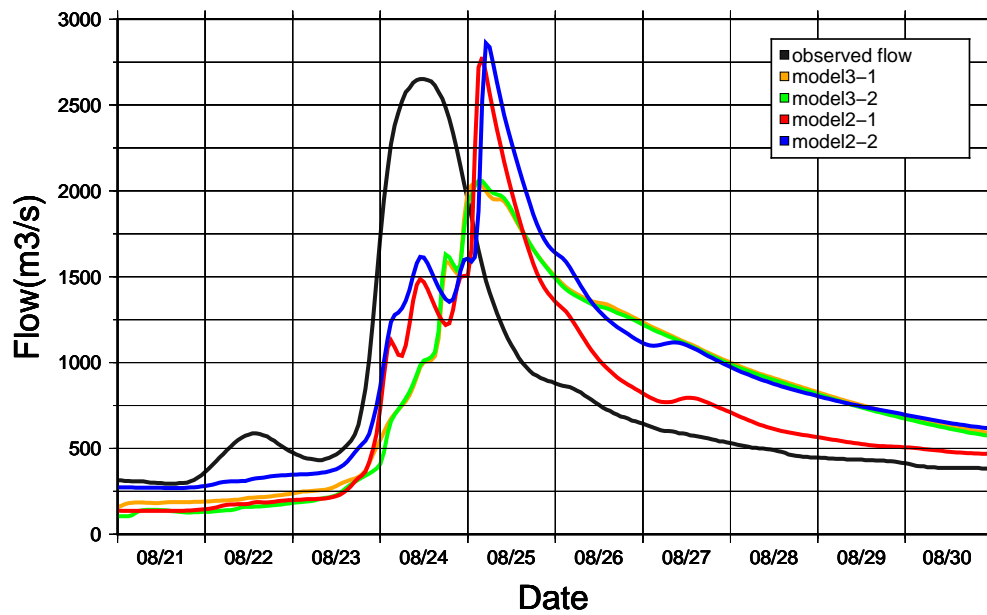


Fig. 14 Flow experiment at same term at Iwamizawa-Ohashi (observation point4). These color thick lines show outflow at each experiments for observation flow in black, Model 2-1 in red, Model 2-2 in blue, Model 3-1 in orange, Model 3-2 in green.

Table 11 Flow experiment comparison at Iwamizawa-Ohashi (observation point4) same as Table 10.

Point4	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	737.18	2652.28	295.31	-	194616	-	-
Model 2-1	706.56	2778.30	136.83	0.35	186532	95.8	1.05
Model 2-2	894.88	2860.94	270.05	0.20	236250	121.4	1.08
Model 3-1	812.27	2046.84	159.36	0.06	214440	110.2	0.772
Model 3-2	790.34	2059.47	104.88	0.05	208651	107.2	0.776

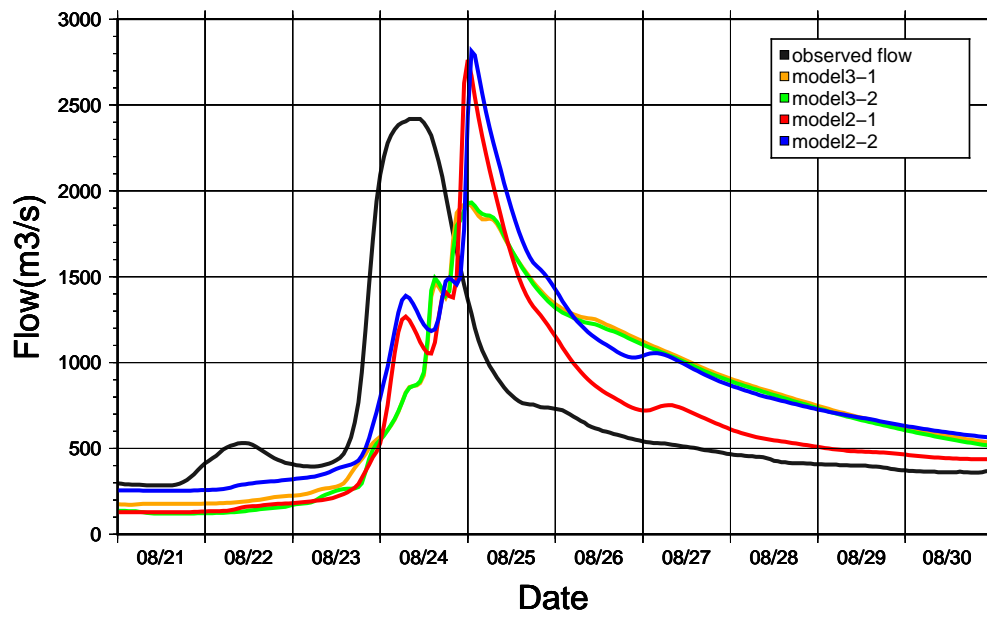


Fig. 15 Flow experiment at same term at Tsukigata (observation point5) same as Fig.14.

Table 12 Flow experiment comparison at Tsukigata (observation point5) same as Table 10.

Point5	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	645.40	2763.39	128.25	-	172964	-	-
Model 2-1	645.40	2763.39	128.25	0.12	170396	98.5	1.14
Model 2-2	821.21	2816.11	253.36	-0.07	216799	125.3	1.16
Model 3-1	757.32	1925.64	172.59	-0.11	199933	115.6	0.796
Model 3-2	732.76	1933.13	120.44	-0.11	193448	111.8	0.799

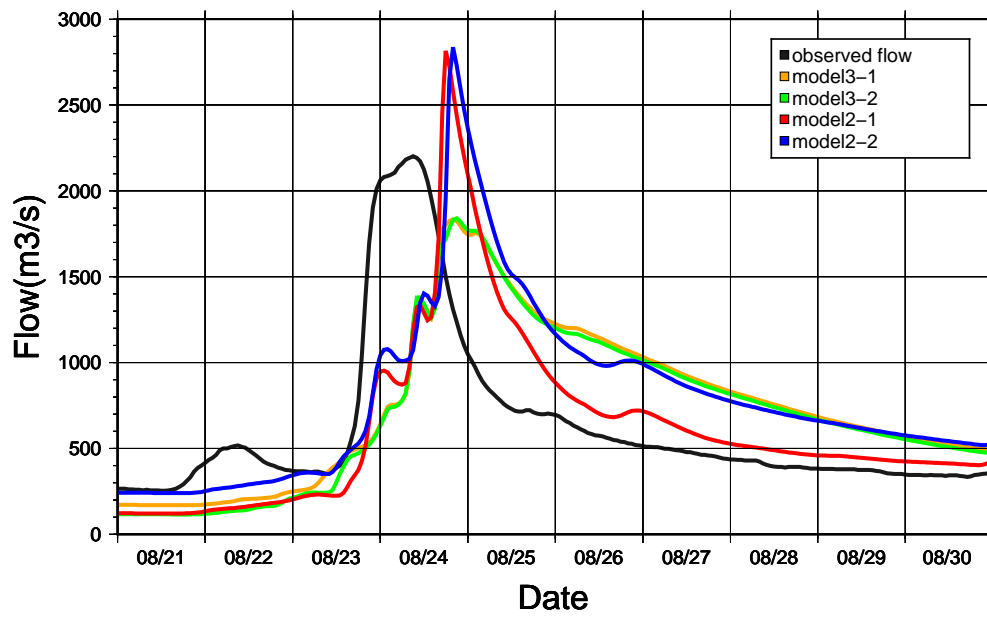


Fig. 16 Flow experiment at same term at Naie-Ohashi (observation point6) same as Fig.14.

Table 13 Flow experiment comparison at Naie-Ohashi(observation point6) same as Table 10.

Point6	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	599.38	2201.54	253.14	-	158238	-	-
Model 2-1	605.90	2815.93	121.36	0.20	159958	101.1	1.28
Model 2-2	771.60	2836.24	239.49	-0.09	203702	128.7	1.29
Model 3-1	726.21	1833.70	169.94	-0.05	191719	121.2	0.833
Model 3-2	700.88	1840.60	115.60	-0.04	185032	116.9	0.836

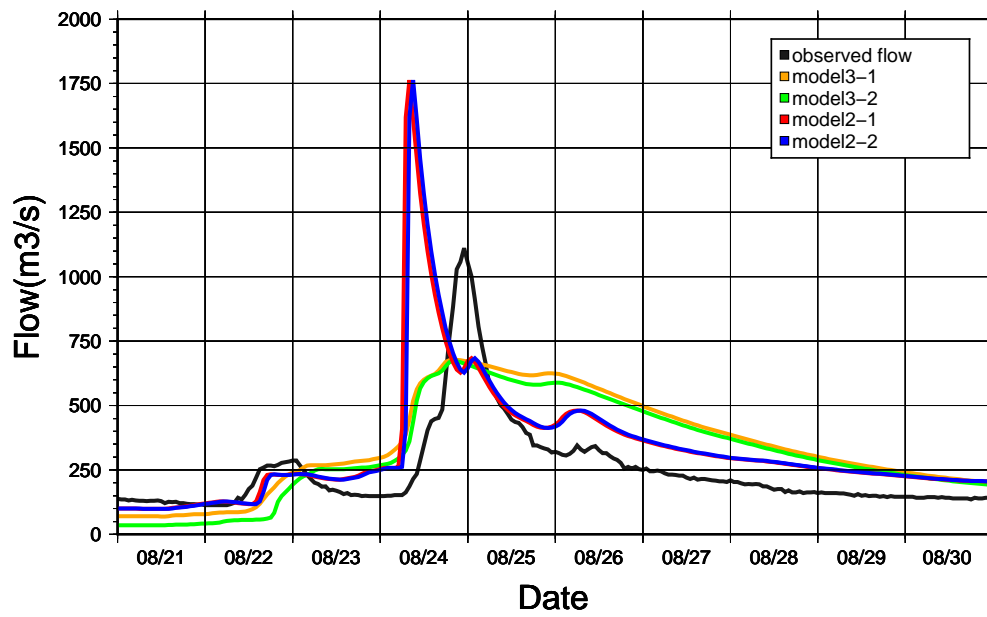


Fig. 17 Flow experiment at same term in the upper stream of the Ishikari River at Moseushi-Hashi (observation point8) same as Fig.14.

Table 14 Flow experiment comparison at the upper stream of the Ishikari River at Moseushi-Hashi (observation point8) same as Table 10.

Point8	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	236.39	1110.55	113.74	-	62407	-	-
Model 2-1	319.31	1764.10	98.41	-0.76	84299	135.1	1.59
Model 2-2	318.92	1764.10	98.41	-0.67	84194	134.9	1.59
Model 3-1	332.77	677.56	69.59	0.11	87851	140.8	0.610
Model 3-2	309.20	673.09	35.50	0.21	81629	130.8	0.606

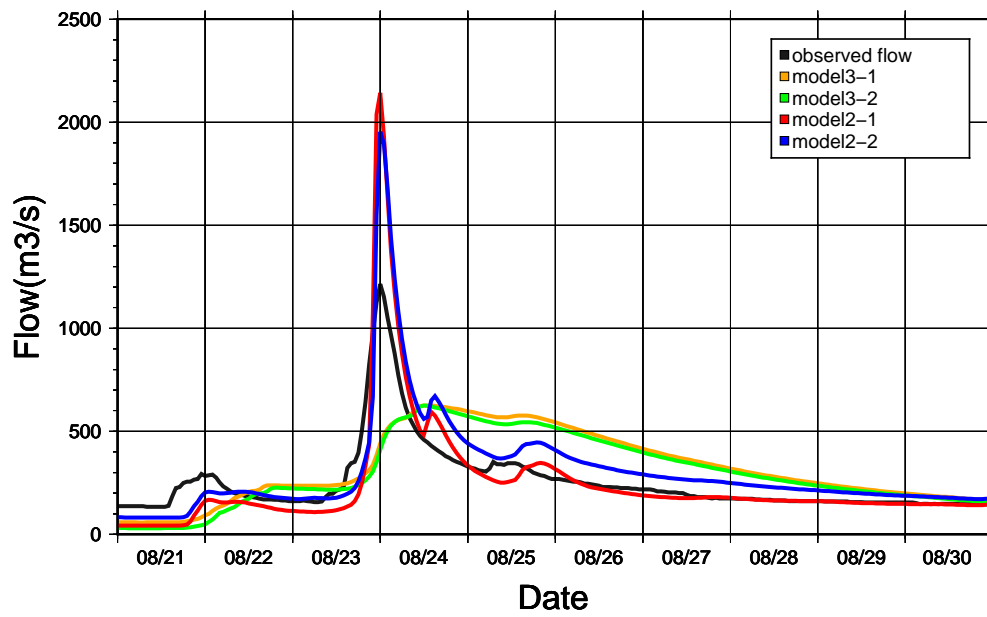


Fig. 18 Flow experiment at same term in the upper stream of the Ishikari River at Ino (observation point9) same as Fig.14.

Table 15 Flow experiment comparision at the upper stream of the Ishikari River at Ino (observation point9) same as Table 10.

Point9	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	243.76	1213.98	134.28	-	64352	-	-
Model 2-1	236.27	2142.17	42.06	0.44	62375	96.9	1.76
Model 2-2	294.09	1953.06	80.87	0.46	77639	120.6	1.61
Model 3-1	305.61	625.45	57.79	-0.10	80680	125.4	0.515
Model 3-2	287.62	625.15	29.91	-0.06	75932	118.0	0.515

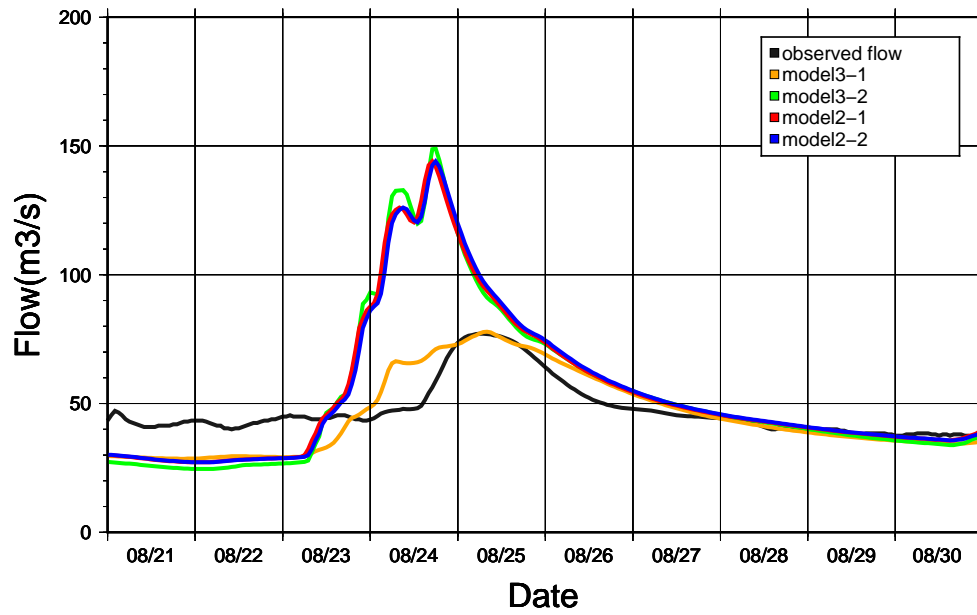


Fig. 19 Flow experiment at same term in Chitose river (observation point1) same as Fig.14.

Table 16 Flow experiment comparison in Chitose river (observation point1) same as Table 10.

Point1	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	46.70	77.16	36.11	-	12328	-	-
Model 2-1	56.78	144.02	27.21	≤ -1.00	14462	117.3	1.87
Model 2-2	54.63	144.02	27.21	≤ -1.00	14421	117.0	1.87
Model 3-1	45.04	77.91	28.58	0.37	11891	96.5	1.01
Model 3-2	54.02	149.06	24.58	≤ -1.00	14260	115.7	1.932

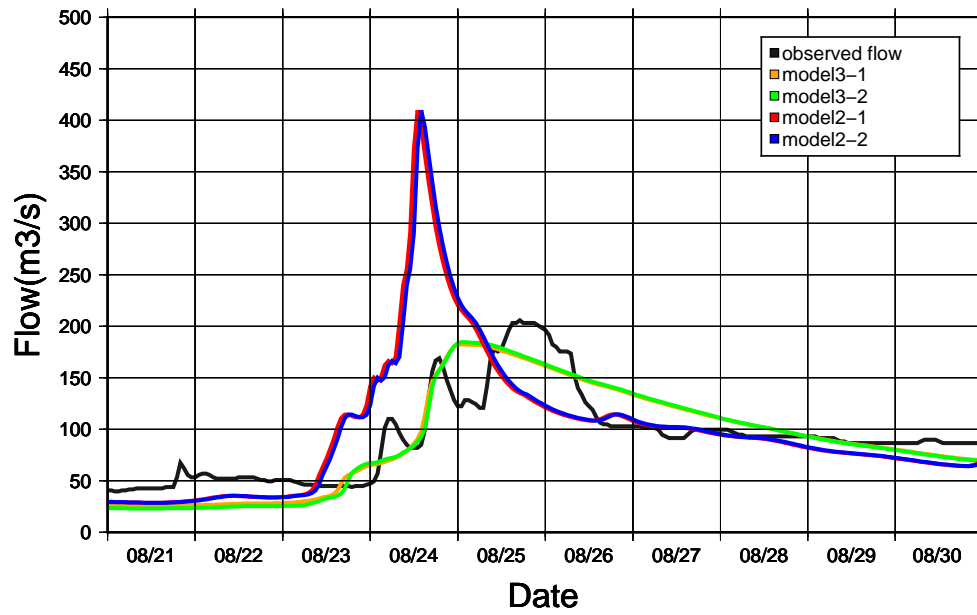


Fig. 20 Flow experiment at same term in Yubari river (observation point2) same as Fig.14.

Table 17 Flow experiment comparison in Yubari river (observation point2) same as Table 10.

Point2	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	90.73	205.74	39.58	-	23953	-	-
Model 2-1	97.64	409.62	28.62	≤ -1.00	25776	107.6	1.99
Model 2-2	97.46	409.62	28.62	-0.91	25729	107.4	1.99
Model 3-1	88.86	182.30	25.92	0.71	23460	97.9	0.886
Model 3-2	88.29	184.71	23.10	0.68	23307	97.3	0.898

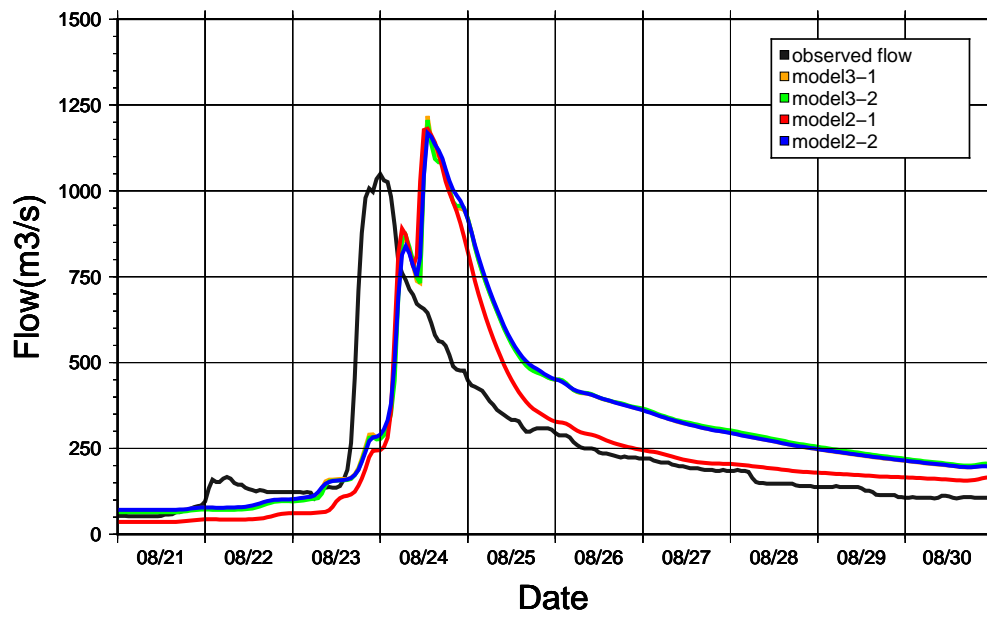


Fig. 21 Flow experiment at same term in Sorachi river (observation point7) same as Fig.14.

Table 18 Flow experiment comparison in Soraachi river (observation point7) same as Table 10.

Point7	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	230.57	1048.94	52.29	-	60869	-	-
Model 2-1	249.05	1181.48	36.00	0.13	65749	108.0	1.13
Model 2-2	308.57	1168.87	71.10	-0.04	81462	133.8	1.11
Model 3-1	307.32	1218.15	69.29	-0.02	81132	133.3	1.16
Model 3-2	307.97	1206.28	64.45	-0.04	81304	133.6	1.15

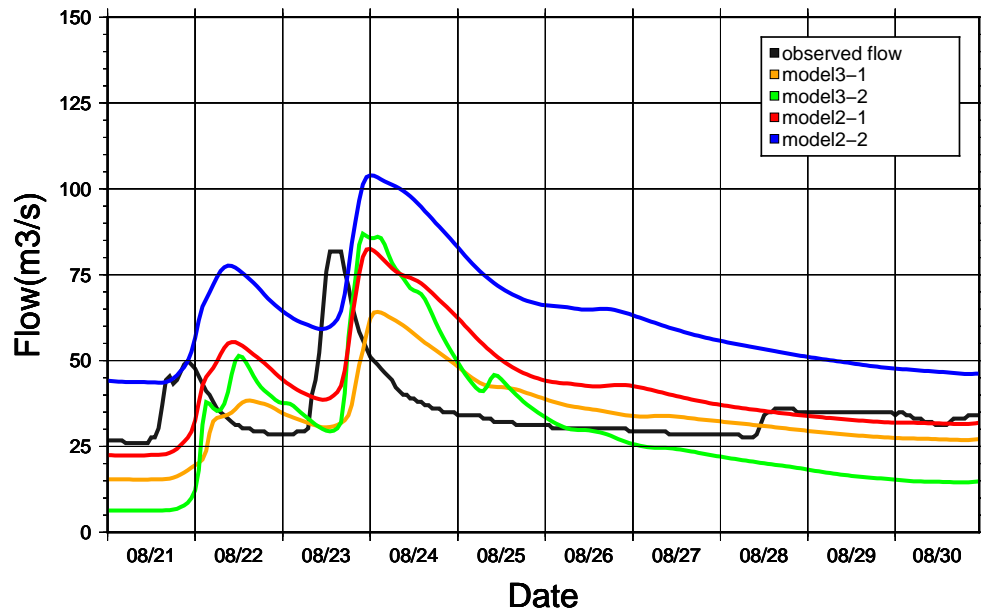


Fig. 22 Flow experiment at same term in Uryu river (observation point10) same as Fig.14.

Table 19 Flow experiment comparison in Uryu river (observation point10) same as Table 10.

Point10	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	35.20	81.74	25.97	-	9294	-	-
Model 2-1	42.67	82.53	22.35	≤ -1.00	11266	121.2	1.01
Model 2-2	61.86	103.98	43.58	≤ -1.00	16331	175.7	1.27
Model 3-1	33.99	64.22	15.38	-0.85	8972	96.5	0.786
Model 3-2	30.57	86.95	6.35	≤ -1.00	8070	86.8	1.06

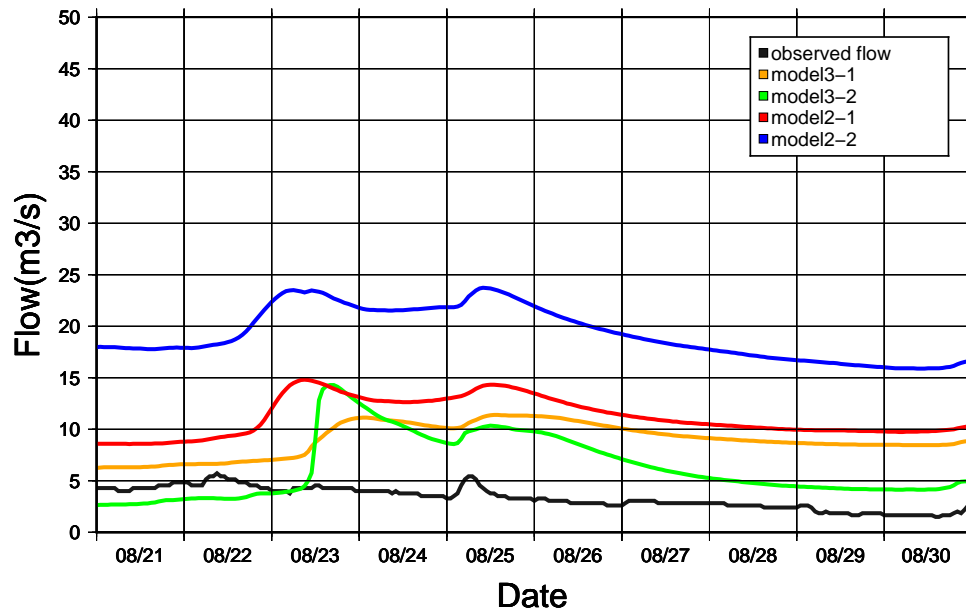


Fig. 23 Flow experiment at same term in Uryu river (observation point11) same as Fig.14.

Table 20 Flow experiment comparison in Uryu river (observation point11) same as Table 10.

Point11	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	3.21	5.73	1.51	-	847	-	-
Model 2-1	11.20	14.81	8.58	≤ -1.00	2958	349.1	2.58
Model 2-2	19.14	23.73	15.90	≤ -1.00	5054	596.5	4.14
Model 3-1	9.02	11.39	6.27	≤ -1.00	2390	282.1	1.99
Model 3-2	6.32	14.29	2.64	≤ -1.00	1669	197.0	2.49

Table 21 Comparison of peak flow times of observation and each models, at each points of the Ishikari River at 2010.

point name	observation	Model 2-1	Model 2-2	Model 3-1	Model 3-2
point3	8/24 12UTC	8/25 09UTC	8/25 12UTC	8/25 06UTC	8/25 08UTC
point4	8/24 11UTC	8/25 04UTC	8/25 05UTC	8/25 03UTC	8/25 03UTC
point5	8/24 08UTC	8/25 00UTC	8/25 01UTC	8/25 00UTC	8/25 01UTC
point6	8/24 09UTC	8/24 18UTC	8/24 20UTC	8/24 20UTC	8/24 21UTC
point8	8/24 23UTC	8/24 08UTC	8/24 09UTC	8/24 20UTC	8/24 20UTC
point9	8/24 00UTC	8/24 00UTC	8/24 00UTC	8/24 13UTC	8/24 12UTC
point1	8/25 06UTC	8/24 08UTC	8/24 18UTC	8/25 08UTC	8/24 18UTC
point2	8/25 15UTC	8/24 13UTC	8/24 14UTC	8/25 01UTC	8/25 02UTC
point7	8/24 00UTC	8/24 13UTC	8/24 13UTC	8/24 13UTC	8/24 13UTC
point10	8/23 13UTC	8/24 00UTC	8/24 00UTC	8/24 02UTC	8/23 23UTC
point11	8/25 06UTC	8/23 09UTC	8/23 13UTC	8/25 13UTC	8/23 16UTC

3.1.3 事例 1 における降水量の変更実験

事例 1 における再現実験結果から、NS 係数が最も高くなっていた model 2-1 で用いたパラメータを利用し、降水量及び降水空間分布を Table 22 に従い変化させた流出計算実験を行った。CASE 2010-M1 では線状降水帯のあった 8 月 23 日 12UTC から 23UTC の 12 時間降水量を 1.5 倍した結果、150 mm を超える範囲が拡大した (Fig.24)。CASE 2010-M2 では 12 時間降水量を 2.0 倍とし、降水量が 200 mm を超える範囲が石狩川上流域に広く分布していた (Fig.25)。また、降水量を南へ 15km 移動させた場合、空知川上流域と美瑛川上流域に降水域が広がっており (Fig.26)、南へ 30 km 移動させると空知川と夕張川に降水帯が位置していた (Fig.27)。CASE 2010-MS1 では南へ 30km 移動させ、降水量を 1.5 倍した場合、空知川と夕張川では 150 mm/12hr を超える激しい雨が降った仮想的な環境となった (Fig.28)。

最も下流の石狩大橋地点では、CASE 2010-M1 ではピーク流量が $5309.67 \text{ m}^3/\text{s}$ と流量は約 1.7 倍となり、CASE 2010-M2 では $8172.25 \text{ m}^3/\text{s}$ と 2.7 倍となり、降水量を増倍させると流出量は降水量の倍率より大きく増加した (Fig.29)。また、CASE2010-S3 ではピーク流量は $2377.59 \text{ m}^3/\text{s}$ と減少し、南へ 30 km 移動すると $2582.04 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。南へ 15 km 移動 CASE 2010-S3 と 30 km 移動した CASE2010-S4 では、流量に約 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の差異が見られ、CASE 2010-S4 では流出量のピークが早く検出された。CASE 2010-S3 と CASE 2010-S4 から線状降水帯を南へ移動するとピーク流量は減少したが、石狩大橋地点で観測されるピークは 2 つに分割されると判明した。降水帯を南へ 30 km 移動し、1.5 倍した CASE 2010-MS5 では、降水量変化実験の中で最もピークが早期に検出された。また、CASE 2010-S4 と比較すると降水量は 1.6 倍となっており、併せて、約 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量ピークが 1 日の時間差で 2 回発生していた。

石狩川中流域では CASE 2010-S3、CASE 2010-S4、CASE 2010-MS4 において、石狩大橋地点で確認された分割された 2 つのピークは岩見沢大橋地点を除き、確認されなかった (Fig.30–32)。岩見沢大橋地点では、1 つ目のピークが 2 つ目のピークに比べ、60 %程度となっていた。

線状降水帯による激しい雨のあった石狩川上流域は、妹背牛橋地点の観測流量が $1764.10 \text{ m}^3/\text{s}$ となり (Fig.33)、伊納地点では $2142.17 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig.34) であった。CASE2010-M1 では各地点で $3547.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4319.30 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、どちらも計算流量は観測流量の約 2.0 倍となった。CASE 2010-M2 では $5691.36 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6668.23 \text{ m}^3/\text{s}$ となっており、計算流量は観測流量の 3.2 倍、3.1 倍となった。石狩川上流域においても降水量の倍率以上に流出量が増加していた。

支流では、雨竜川および千歳川では線状降水帯による流出量の増加は観測流量と計算流量ともに見られなかった (Fig.35, Fig.38, Fig.39)。空知川では、位置を変更しない場合では主に下流で降水があり、その位置を南下させた場合、中流、上流域を中心に強い降水が見られた。そのため、CASE 2010-M1 では流出量が $2177.63 \text{ m}^3/\text{s}$ と観測流量と比べ 1.8 倍、CASE 2010-M2 では $3524.89 \text{ m}^3/\text{s}$ と 3.0 倍、CASE 2010-S3 では $1691.12 \text{ m}^3/\text{s}$ と 1.4 倍、CASE 2010-S4 では $1910.32 \text{ m}^3/\text{s}$ と 1.6 倍、CASE 2010-MS5 では $3580.02 \text{ m}^3/\text{s}$ と 3.0 倍となった (Fig.37)。夕張川では、南に 30km 移動させた場合に流出量が増加した (Fig.36)。CASE 2010-S4 では $1092.84 \text{ m}^3/\text{s}$ と観測流量と比較して 2.7 倍、CASE 2010-MS5 では $2000.53 \text{ m}^3/\text{s}$ と 4.9 倍となった。

Table 22 The outline of changed precipitation experiment at 2010

item name	setting
CASE 2010-M1	8月23日12時UTCから23時UTCの降水量を1.5倍
CACE 2010-M2	同期間の降水量を2.0倍
CASE 2010-S3	同期間の降水を南に15km移動
CASE 2010-S4	同期間の降水を南に30km移動
CASE 2010-MS5	同期間の降水を南に30km移動し、降水量を1.5倍

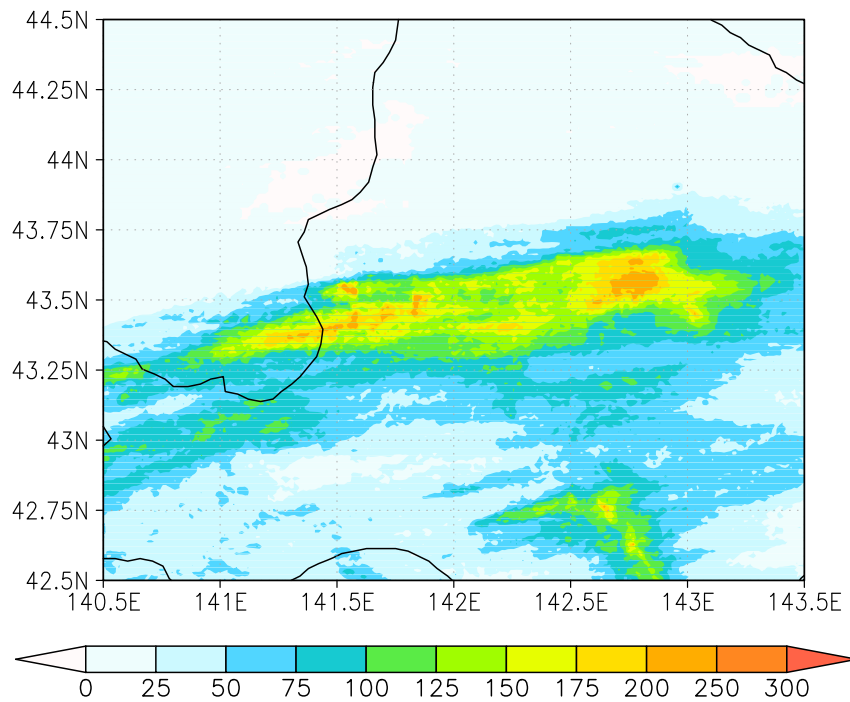


Fig. 24 In the case of 1.5 times total amount of precipitation (mm) from 1800 to 2300 UTC on 23 August 2010 (CASE 2010-M1).

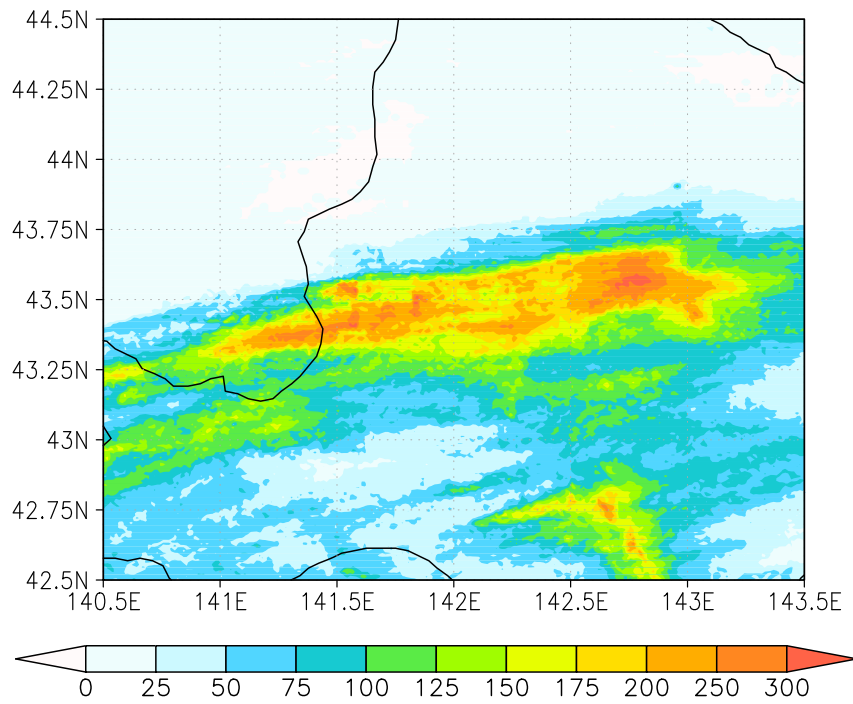


Fig. 25 In the case of 2.0 times total amount of precipitation (mm) from 1800 to 2300 UTC on 23 August 2010 (CASE 2010-M2).

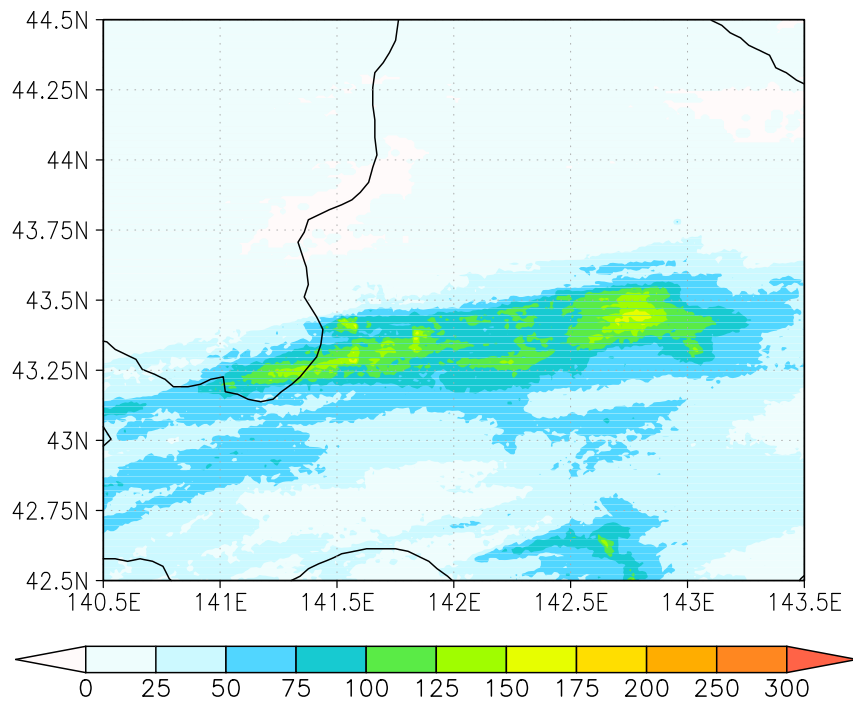


Fig. 26 The total amount of precipitation CASE 2010-S3 moved rainband to 15km the south at 1800-2300UTC on 23 August 2010.

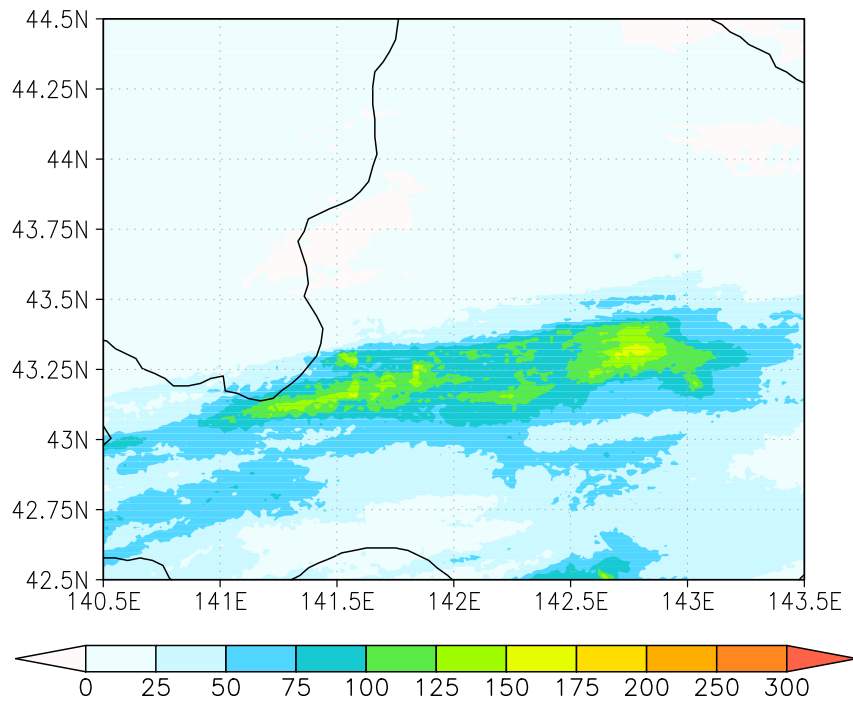


Fig. 27 The total amount of precipitation CASE 2010-S4 moved rainband to 30km the south at 1800-2300UTC on 23 August 2010.

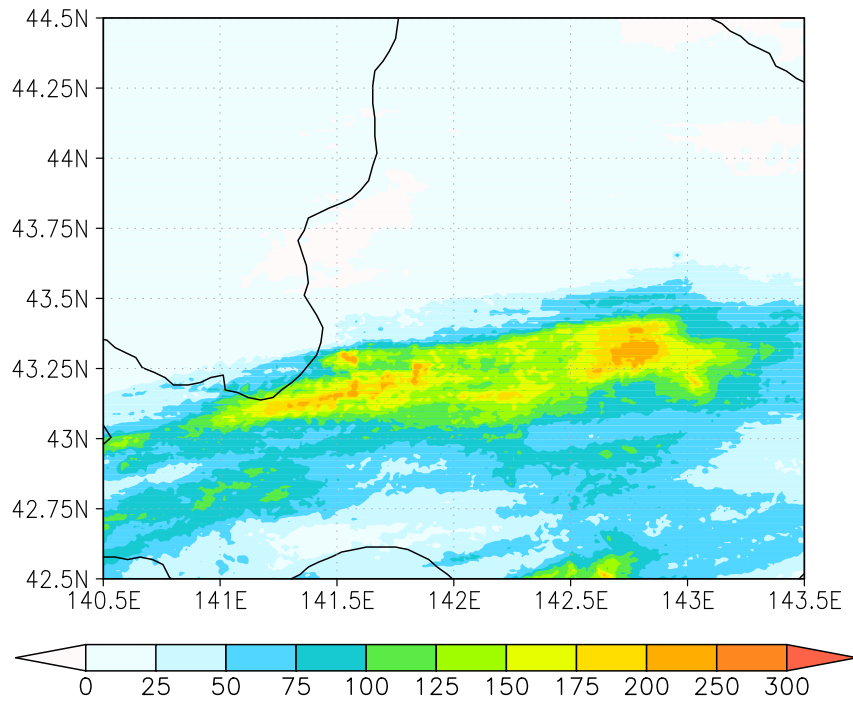


Fig. 28 The total amount of precipitation CASE 2010-MS5 multiplied by 1.5 and moved rainband to 30km the south at 1800-2300UTC on 23 August 2010.

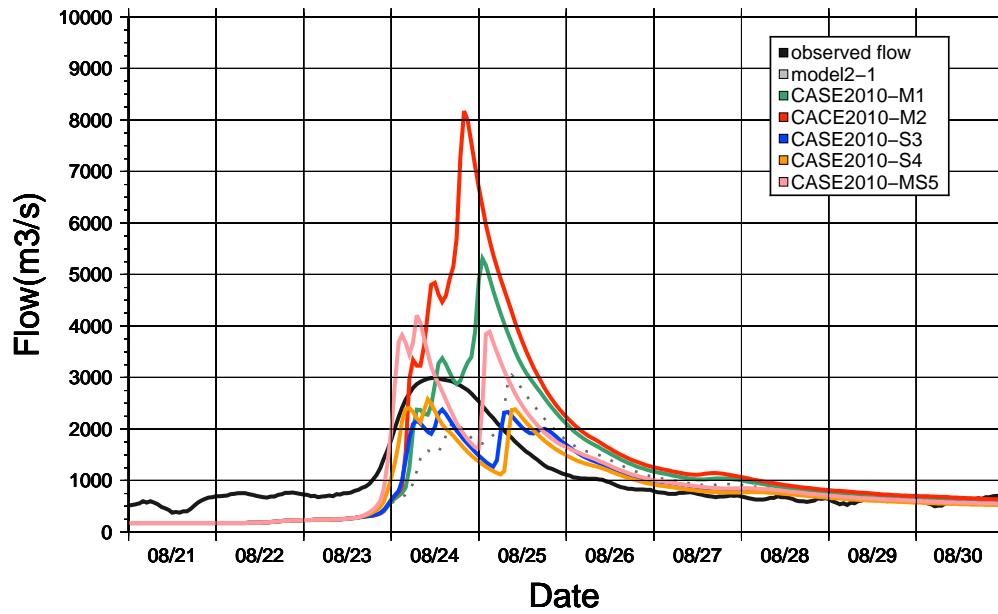


Fig. 29 The results of flow experiment using changed precipitation from 20 to 31 August 2010 in Ishikari–Ohashi (observed point3). Dashed lines denote outflow at model 2-1. These color thick lines show outflow at each experiments for observation flow in black, CASE 2010-M1 in green, CASE 2010-M2 in red, CASE 2010-S3 in blue, CASE 2010-S4 in orange, CASE 2010-MS5 in pink.

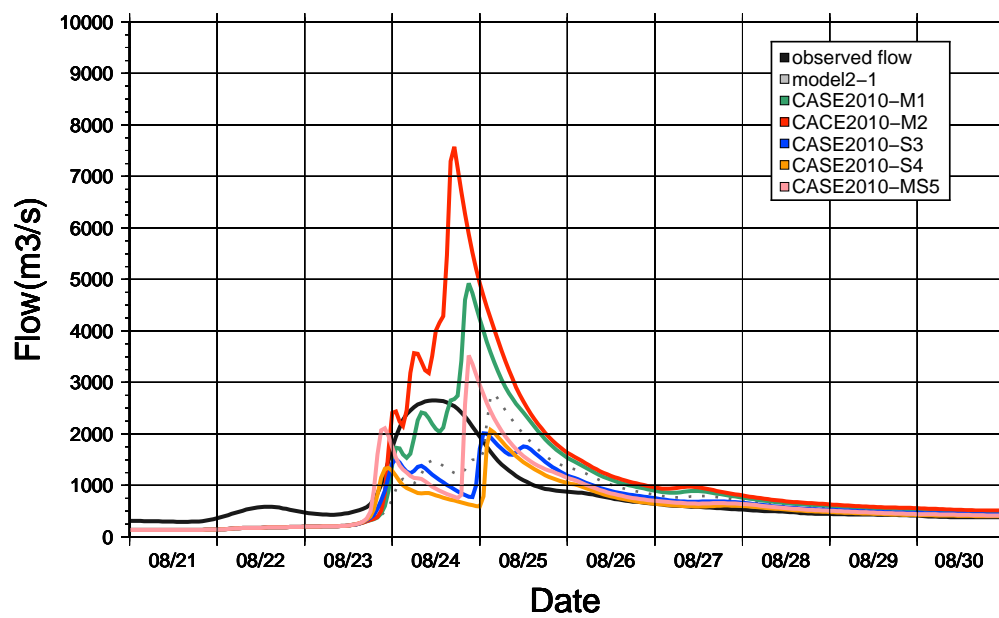


Fig. 30 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in Iwamizawa–Ohashi (observed point4) same as Fig.29.

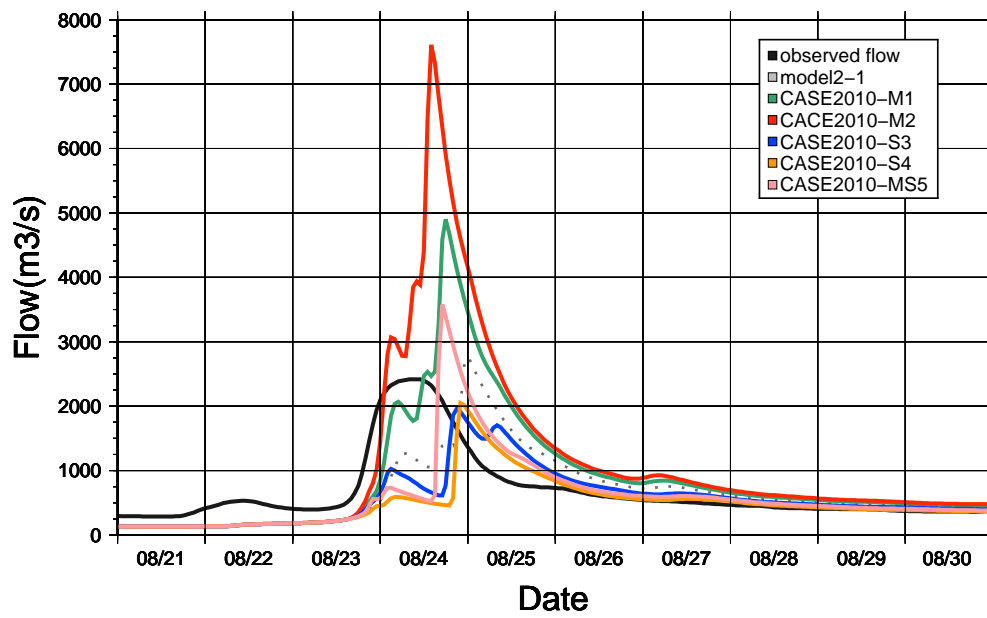


Fig. 31 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in Tsukigata (observed point5) same as Fig.29.

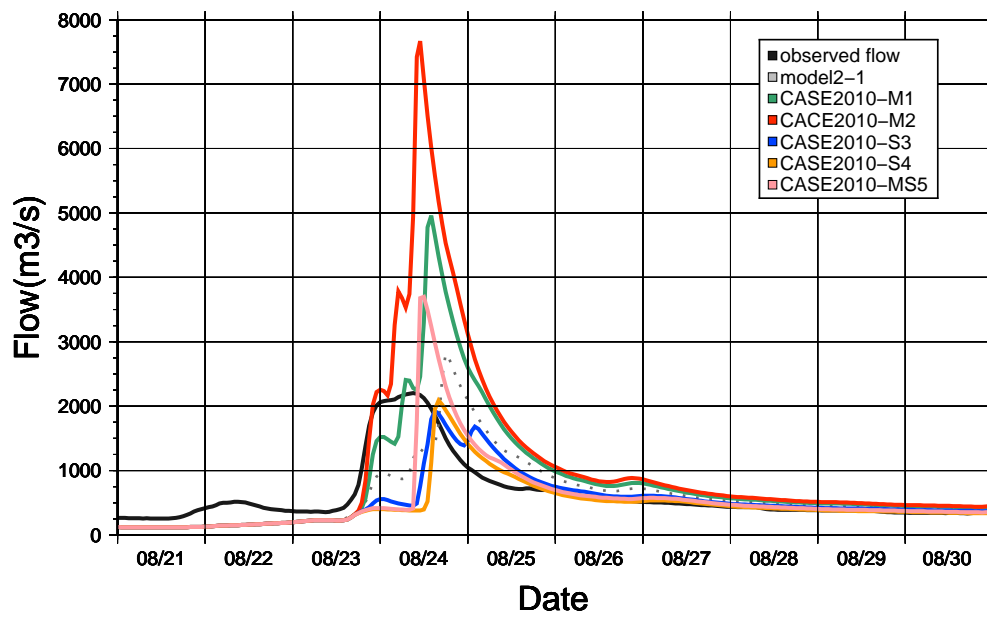


Fig. 32 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in Naie–Ohashi (observed point6) same as Fig.29.

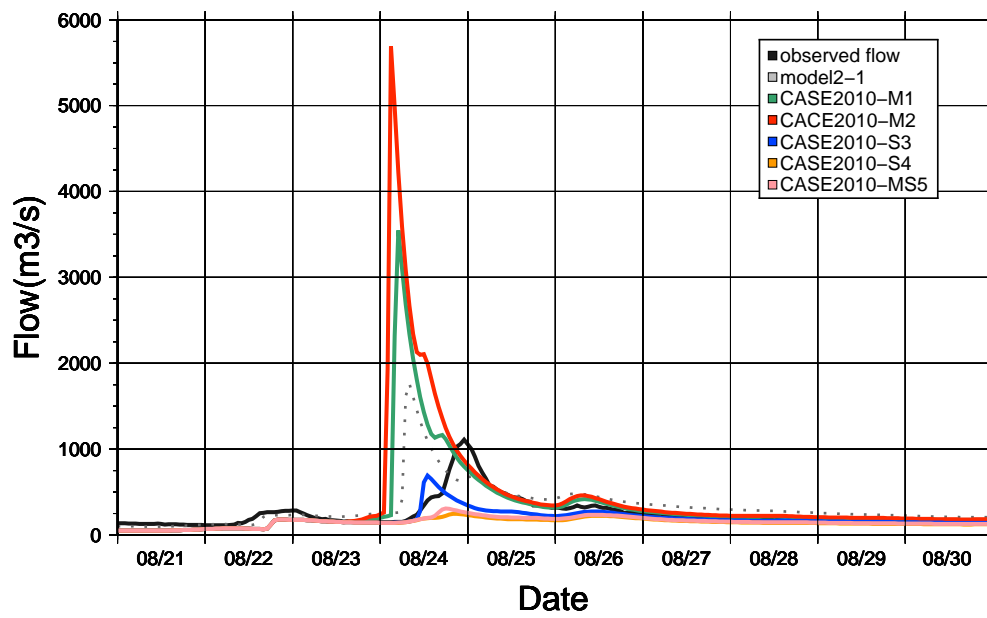


Fig. 33 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in the upper stream of Ishikari river at Moseushi-Hashi (observed point8) same as Fig.29.

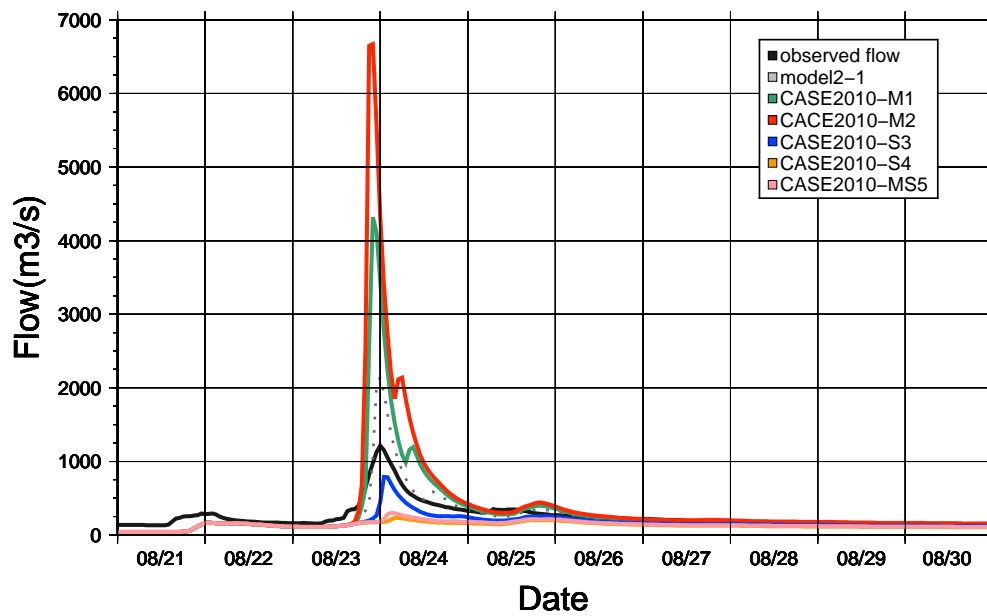


Fig. 34 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in the upper stream of Ishikari river at Ino (observed point9) same as Fig.29.

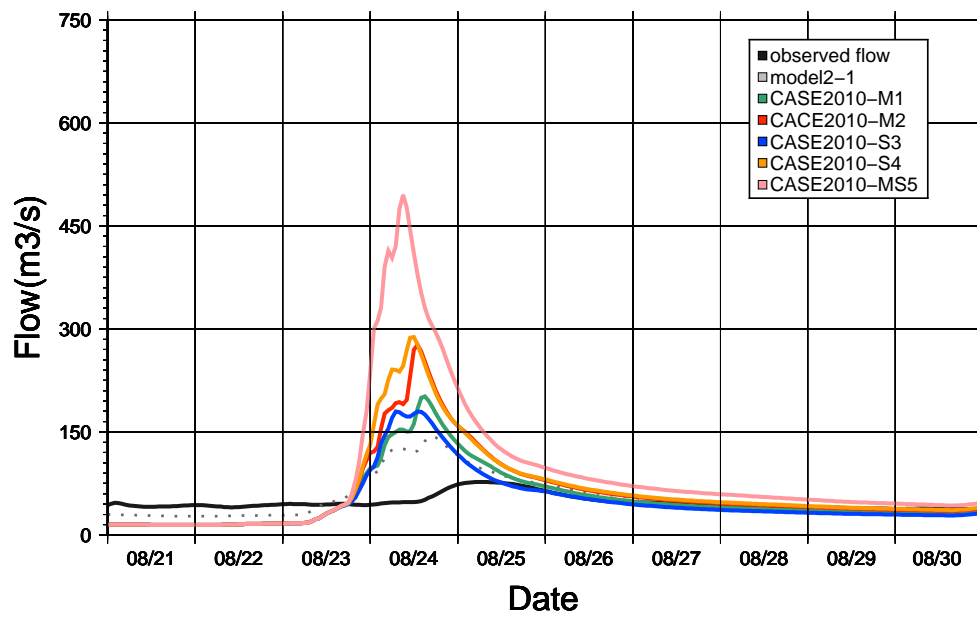


Fig. 35 The results of flow experiment using changed precipitation in Chitose river (observed point1) same as Fig.29.

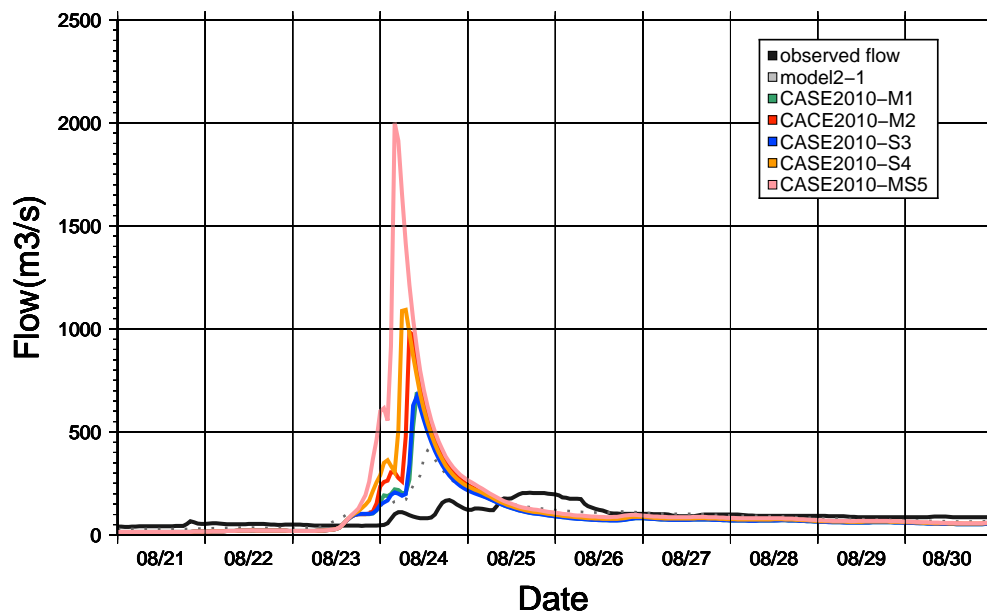


Fig. 36 The results of flow experiment using changed precipitation in Yubari river (observed point2) same as Fig.29.

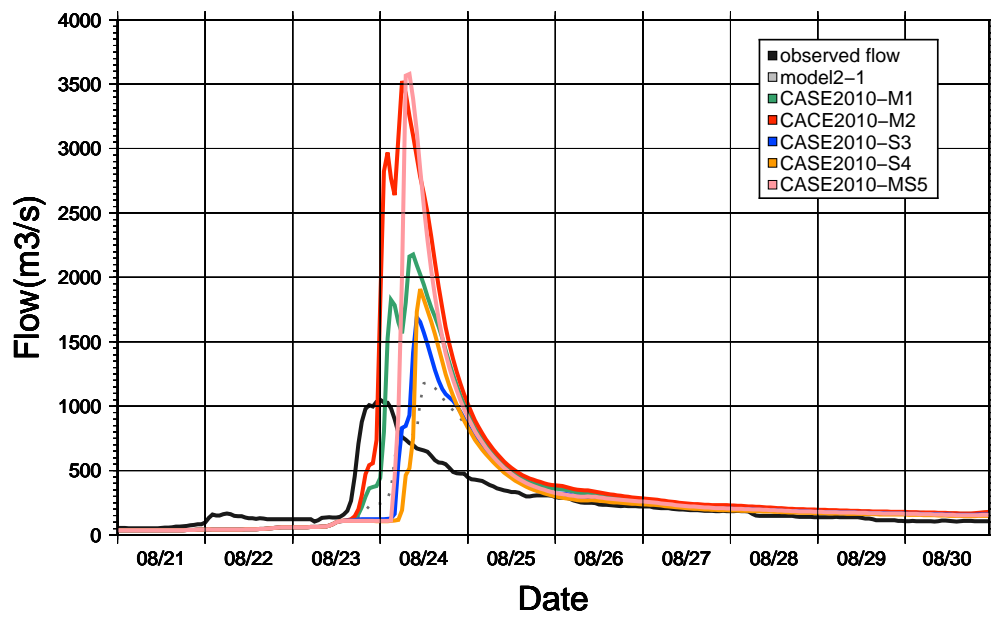


Fig. 37 The results of flow experiment using changed precipitation in Sorachi river (observed point7) same as Fig.29.

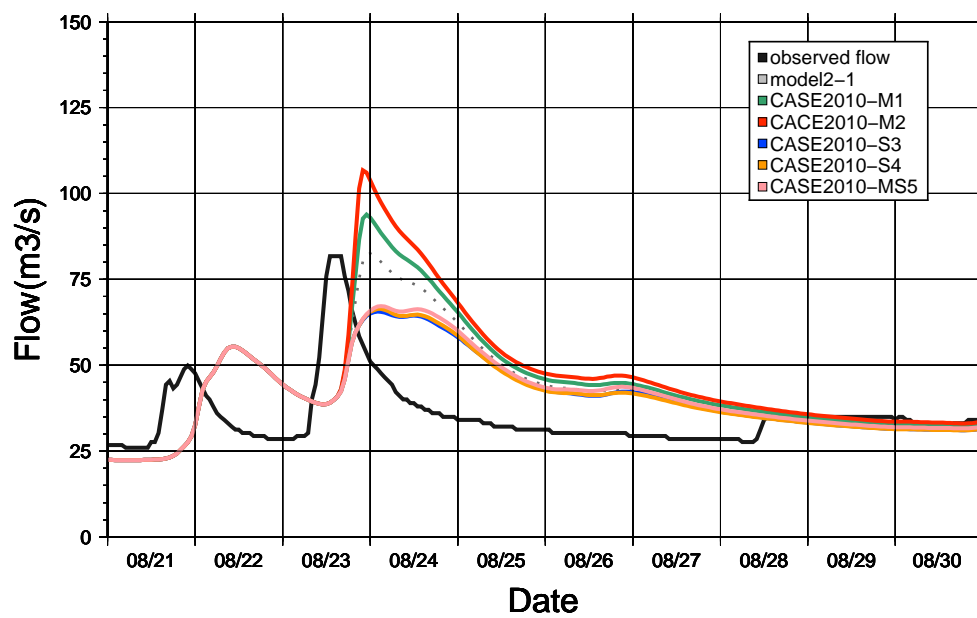


Fig. 38 The results of flow experiment using changed precipitation in Uryu river (observed point10) same as Fig.29.

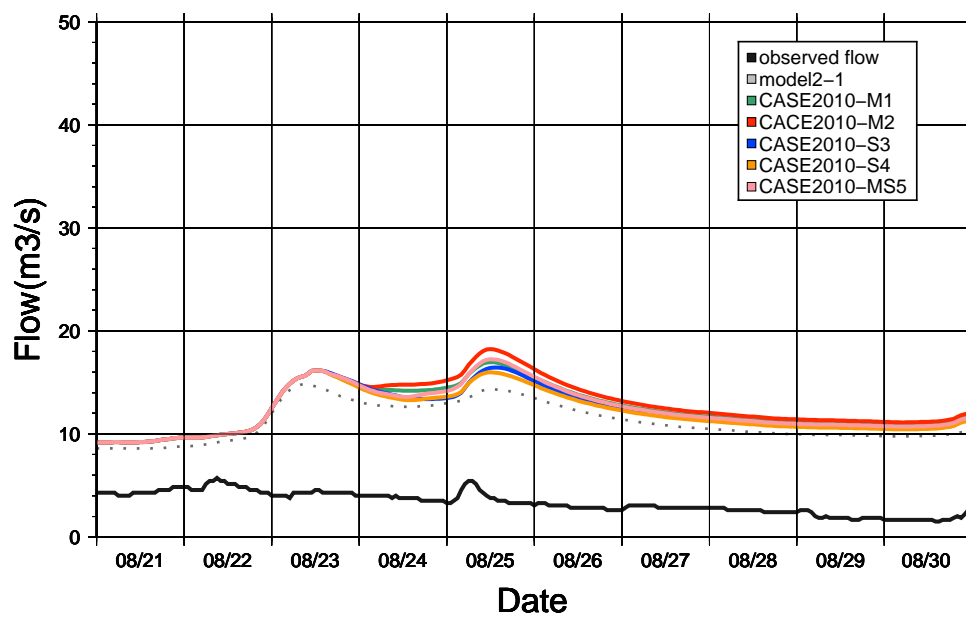


Fig. 39 The results of flow experiment using changed precipitation in Uryu river (observed point11) same as Fig.29.

Table 23 Comparison of peak flow of Model 3-1 and each experiments, at each points of the Ishikari river at 2010.

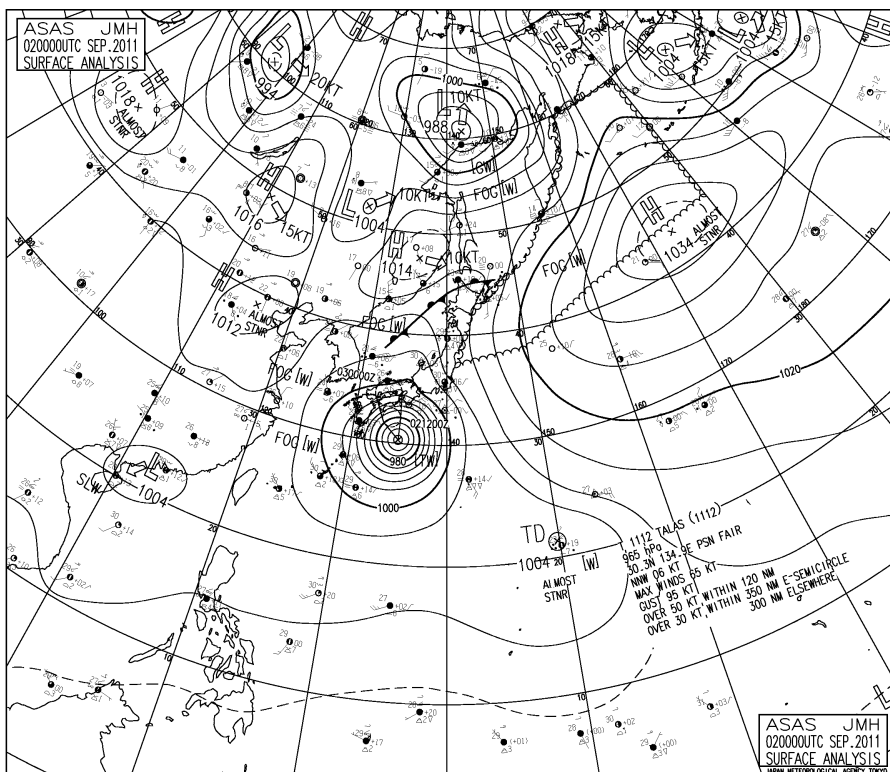
point name	model2-1	CASE2010-M1	CASE2010-M2	CASE2010-S3	CASE2010-S4	CASE2010-MS5
point3	3049.30	5309.67	8172.25	2377.59	2582.04	4209.01
point4	2778.30	4923.77	7574.78	2015.40	2078.97	3524.68
point5	2763.39	4903.56	7614.28	1956.73	2048.09	3577.68
point6	2815.93	4961.44	7671.67	1926.27	2087.53	3757.85
point8	1764.10	3547.98	5691.36	692.83	246.07	307.20
point9	2142.17	4319.30	6668.23	788.42	232.57	302.17
point1	144.02	201.67	277.15	179.78	288.03	495.14
point2	409.62	692.31	985.38	671.83	1092.84	2000.53
point7	1181.48	2177.63	3524.89	1691.12	1910.32	3580.02
point10	82.53	93.91	106.78	65.62	66.40	67.23
point11	14.81	16.97	18.23	16.45	16.15	17.25

3.2 事例 2：2011 年 8 月 30 日～9 月 12 日

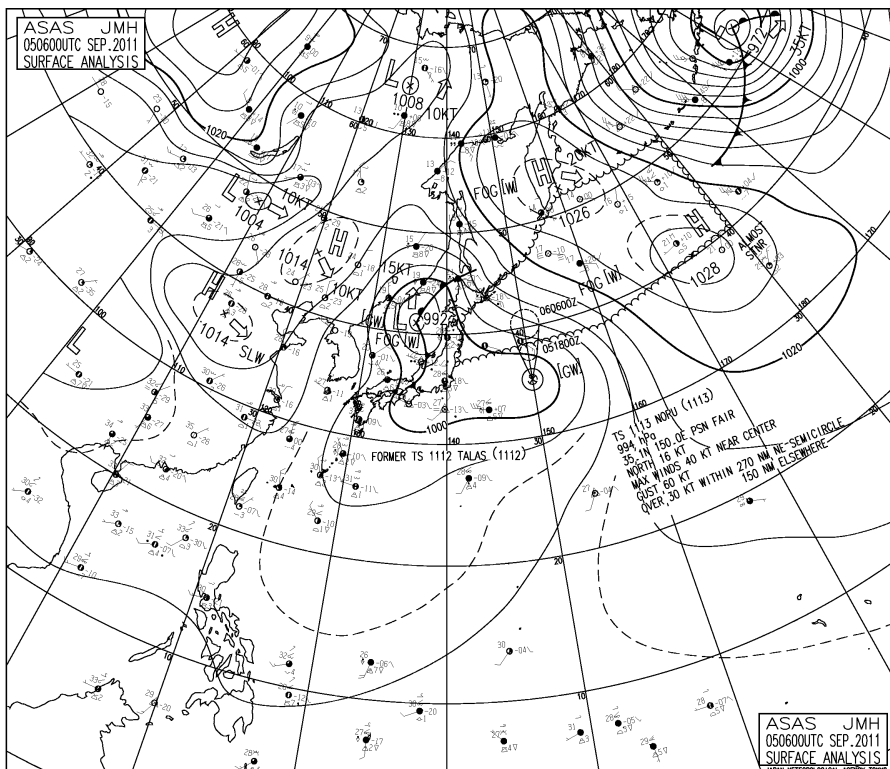
3.2.1 事例 2 の降水要因と分布

9 月 2 日 00UTC の地上天気図によると、北海道付近には道北付近から日本海に向けて停滞前線があった。ロシア沿海州付近に中心を持つ 1014 hPa の高気圧が東進し、日本のはるか東に中心を持つ 1064 hPa の高気圧が停滞、台風 12 号が四国の南から北上していた。9 月 2 日から 5 日まで北海道付近に秋雨前線が停滞し、前線に向かって四国沖から日本海へと抜けた台風 12 号とアリューシャンの南に位置する 1034 hPa の高気圧縁部から 1000 hPa では 335 K 以上の高い相当温位を持った暖かく湿った空気が継続的に合流していた (Fig.40a, Fig.41a ; Fig.41b, Fig.41c)。台風 12 号から北海道へ流入した空気塊は 850 hPa から 500 hPa の大気中層において高い相当温位と水蒸気混合比を持っていた (Fig.42, Fig.43, Fig.44, Fig.46, Fig.47)。9 月 2 日 12UTC における SSI は -1.49 であり、その前後の観測においては負の値ではないが 0 に近い値であり、大気は不安定な状態であった。そのため、北海道全域において雨雲が発生、発達し、石狩川流域では上流域、中流域を中心として 8 月 30 日から 9 月 4 日にかけて累積で 150 mm を超える降水があった (Fig.48a)。また、この大雨により道内では 1 時間降水量が観測史上 1 位を更新した地点が 3 地点、3 時間降水量では 4 地点、24 時間降水量では 9 地点、72 時間降水量では 11 地点あった。

9 月 5 日 12UTC のにおける SSI は -0.70 であり、またその前後の時刻では +3 程度となり、大気は不安定な状態が続いていたと考えられる。9 月 5 日から 7 日にかけて台風 12 号から変わった 972 hPa の温帯低気圧と日本の東を北上してきた台風 13 号による 330K 以上の相当温位を持つ暖湿な空気が北海道付近で合流し、石狩川下流域を中心に強い降水をもたらした (Fig.40b, Fig.41d)。石狩川流域では主に下流域において 9 月 5 日から 12 日にかけて累積で 75 mm を超える降水があった (Fig.48b)。



(a) 0000 UTC 2 September 2011.



(b) 0600 UTC 5 September 2011.

Fig. 40 Surface weather chart at September 2011 (JMA) .

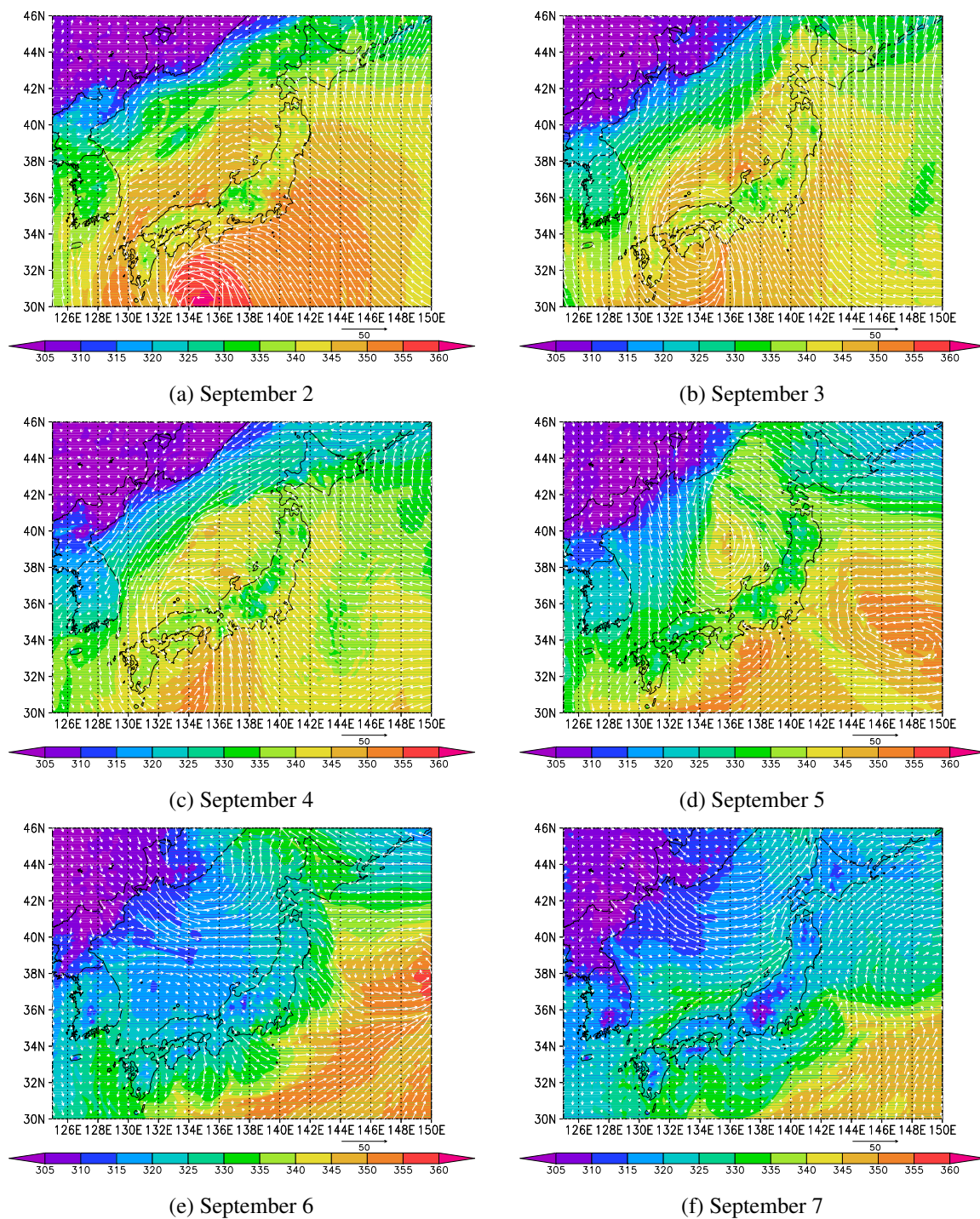


Fig. 41 Equivalent potential temperature (K) and wind speed (m/s) and direction at 1000 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.

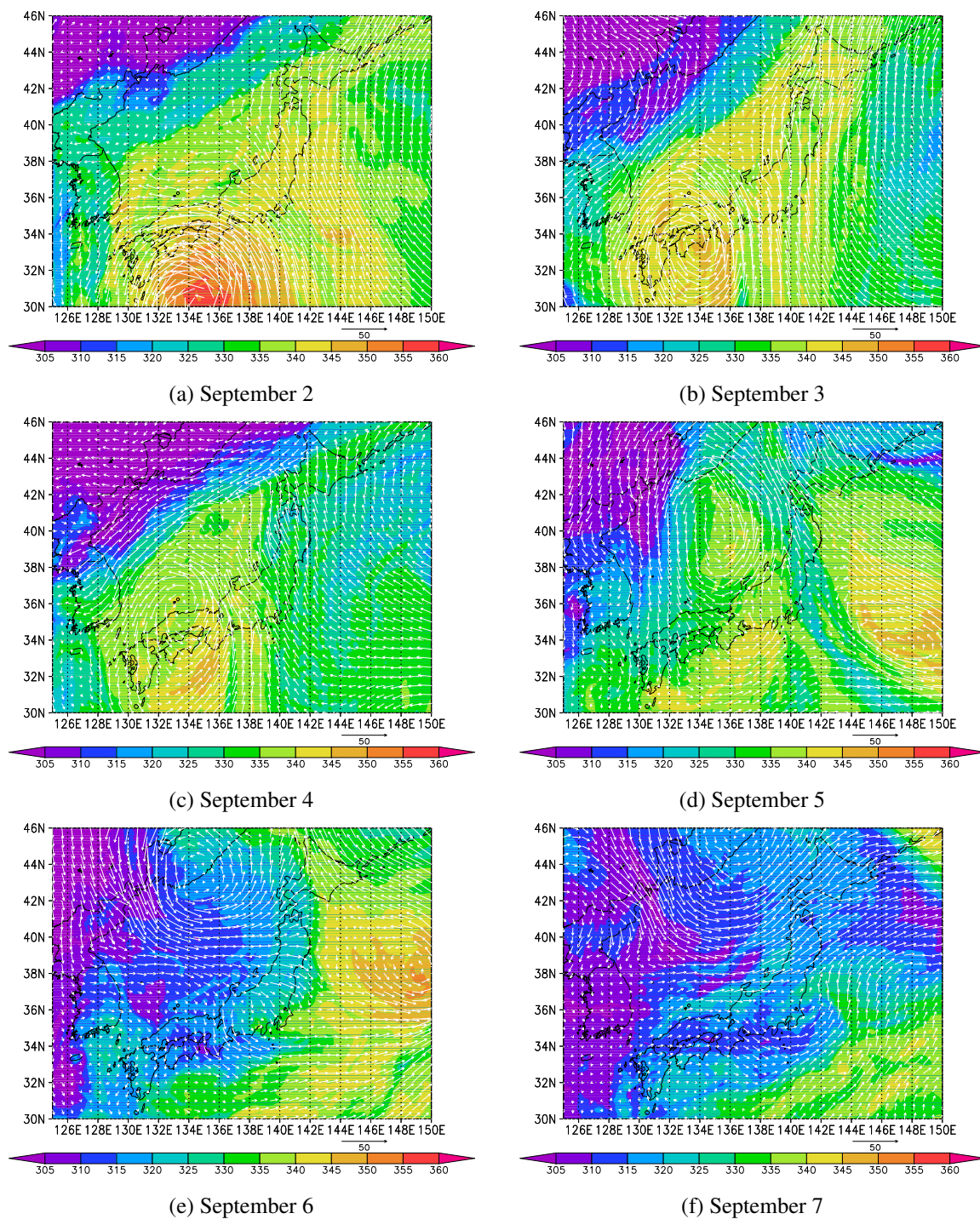


Fig. 42 Equivalent potential temperature (K) and wind speed (m/s) and direction at 850 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.

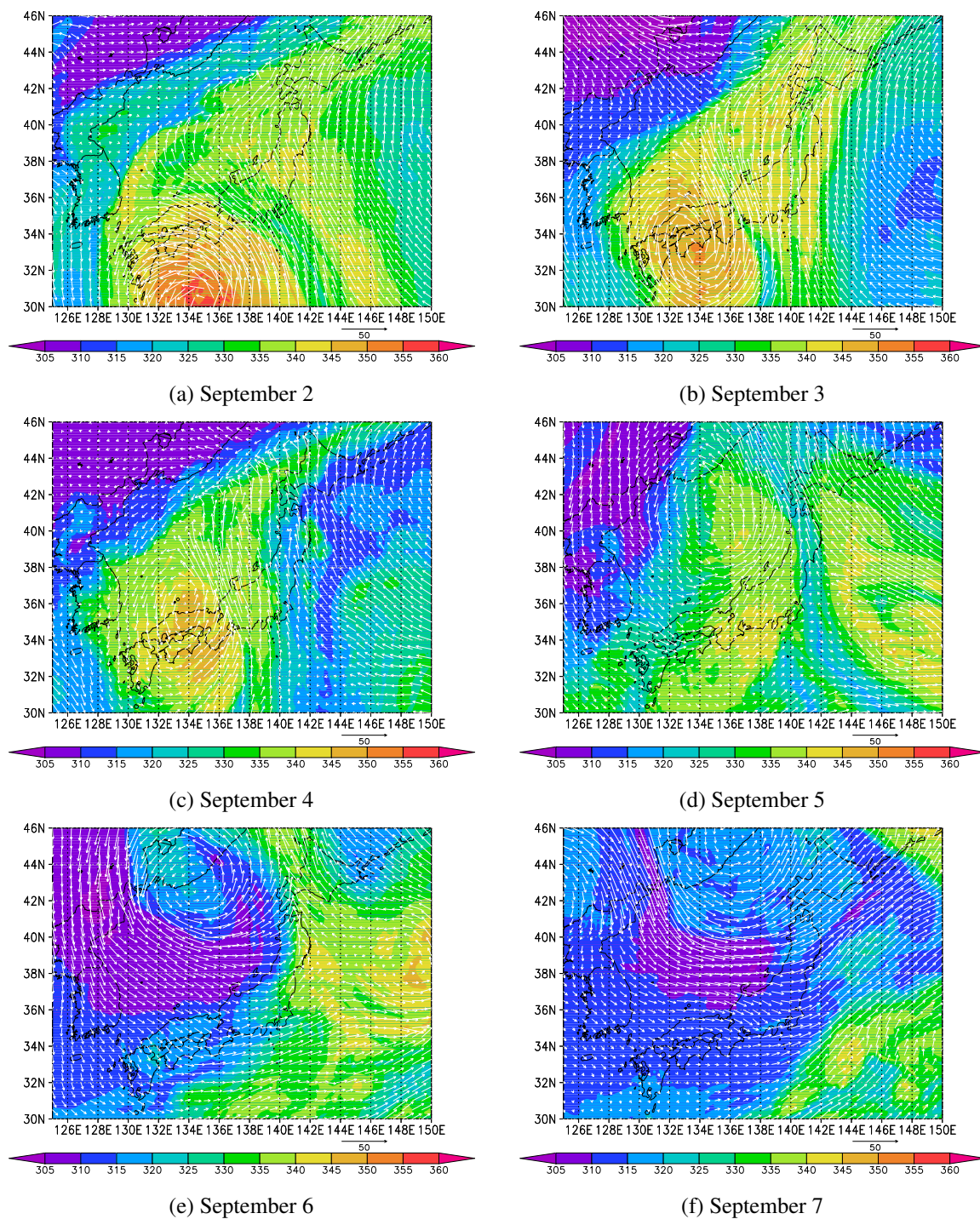


Fig. 43 Equivalent potential temperature (K) at 700 hPa and wind speed (m/s) and direction at 700 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.

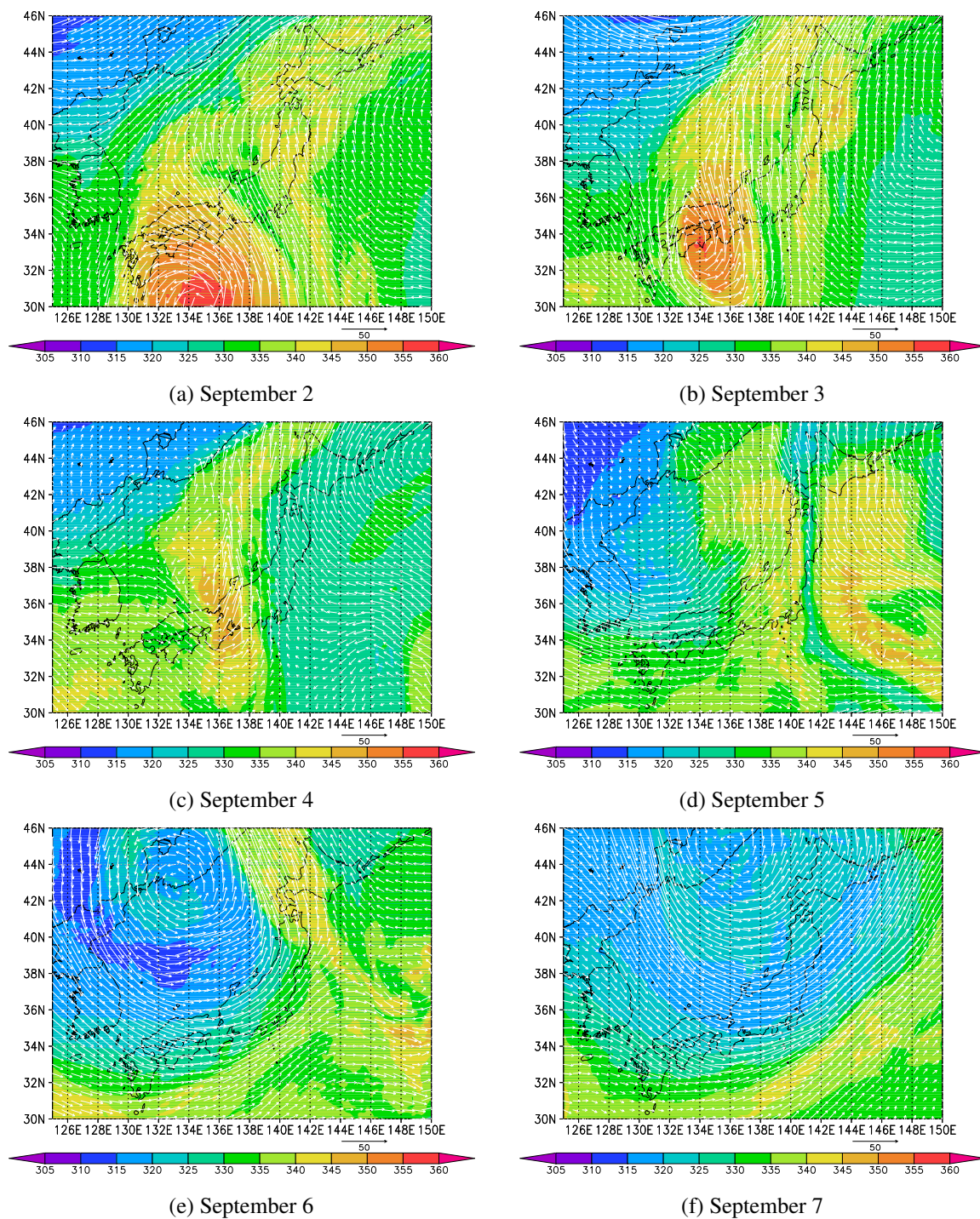


Fig. 44 Equivalent potential temperature (K) and wind speed (m/s) and direction at 500 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.

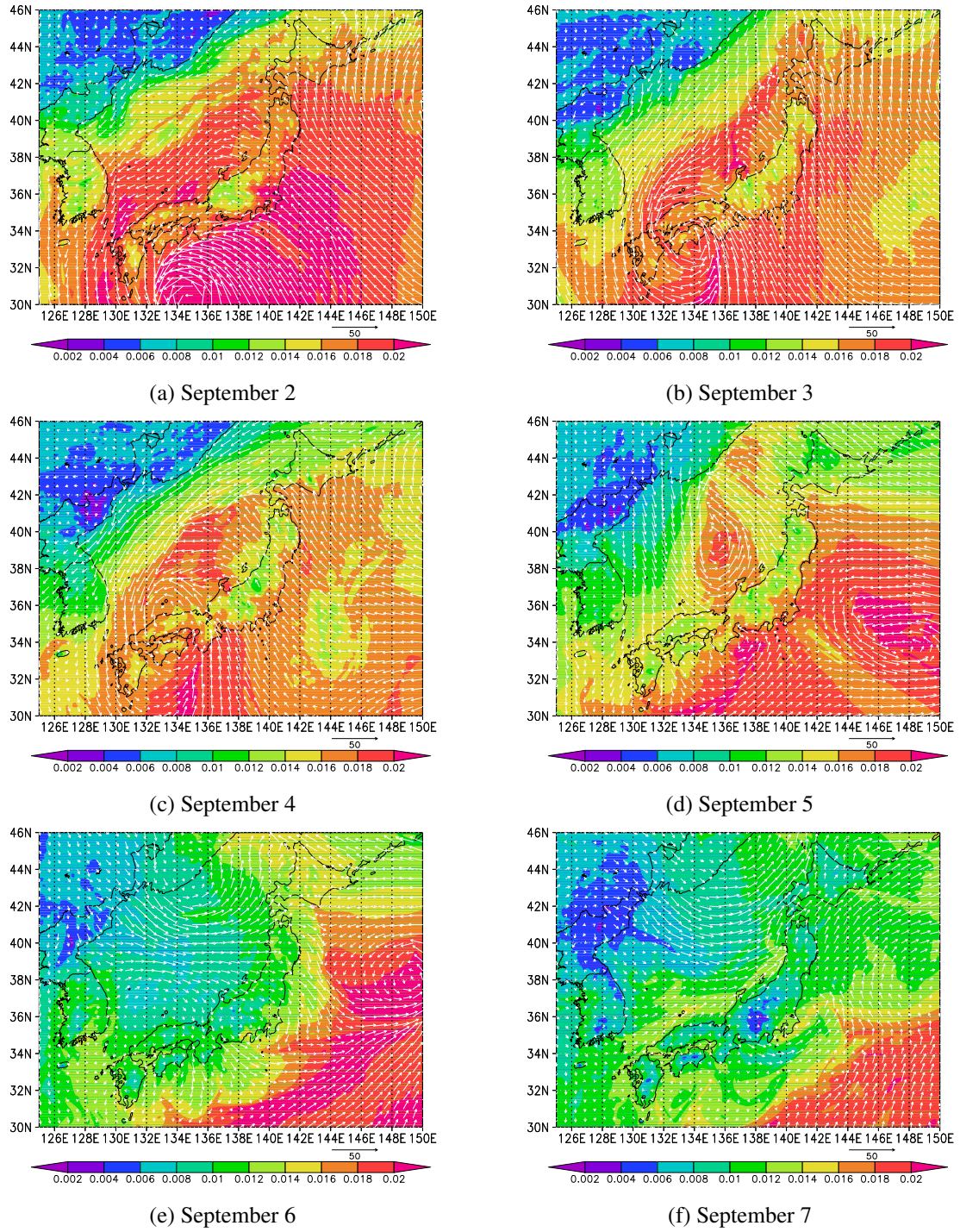


Fig. 45 Water vapor mixing ratio, and wind speed (m/s) and direction at 1000 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.

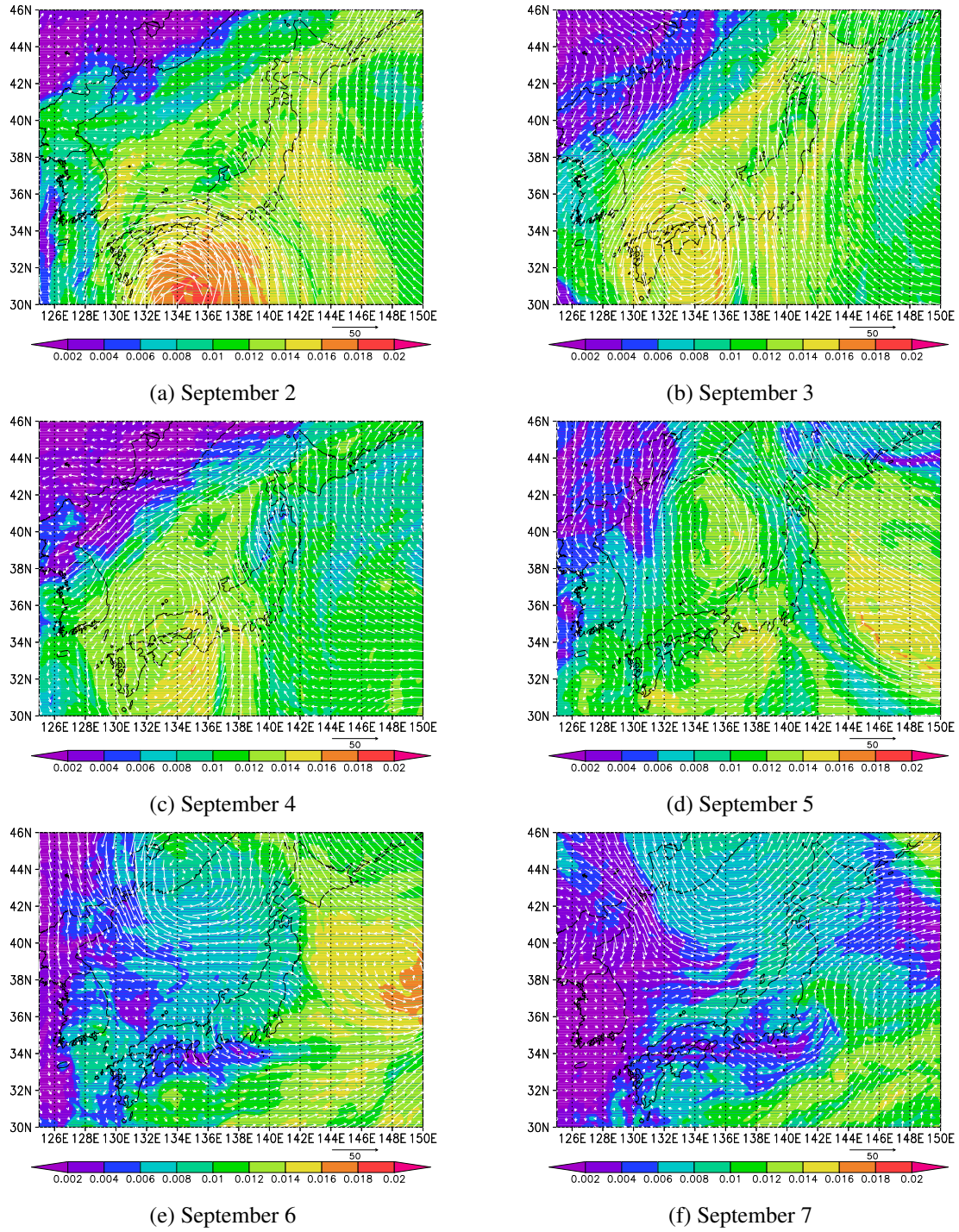


Fig. 46 Water vapor mixing ratio, and wind speed (m/s) and direction at 850 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.

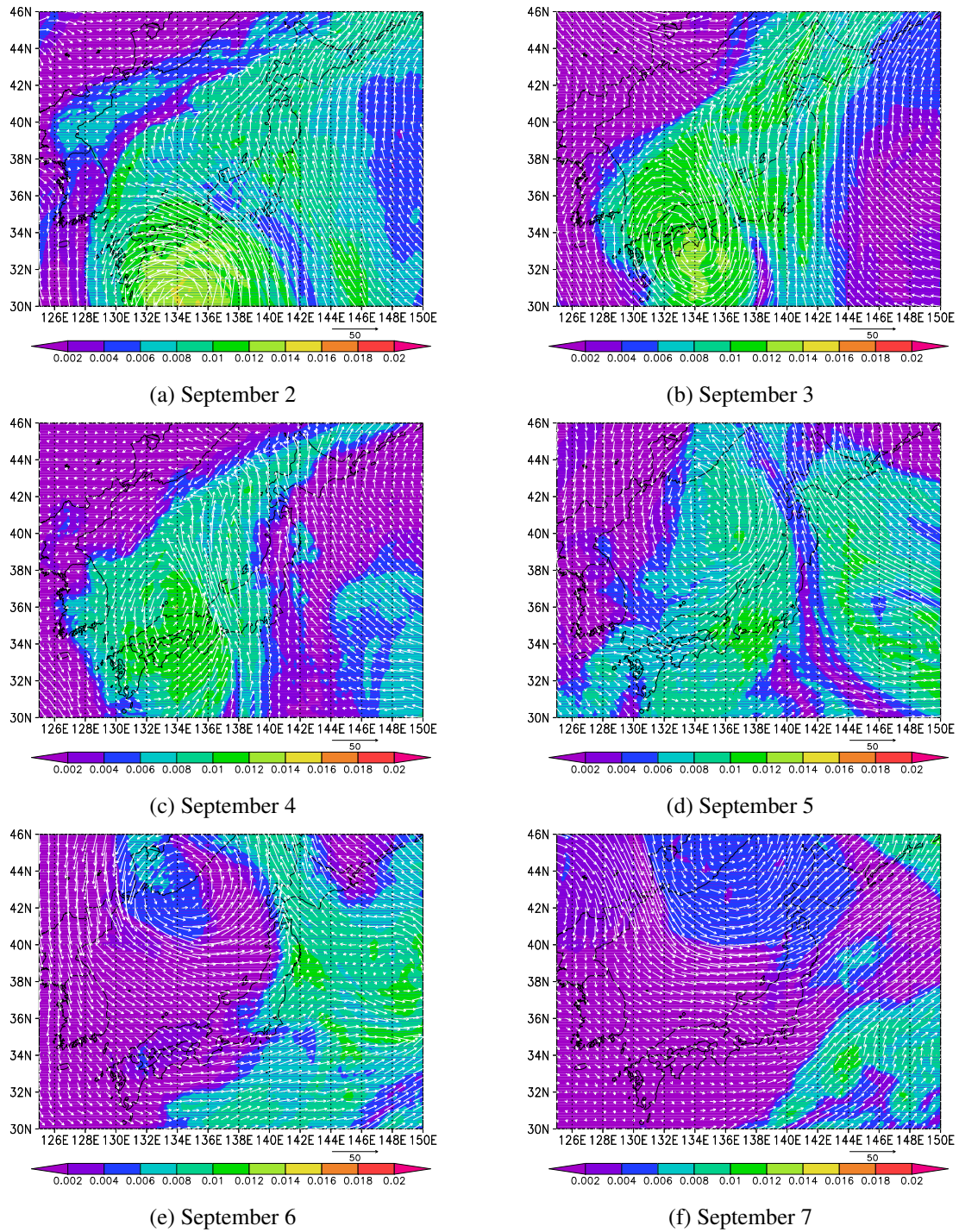
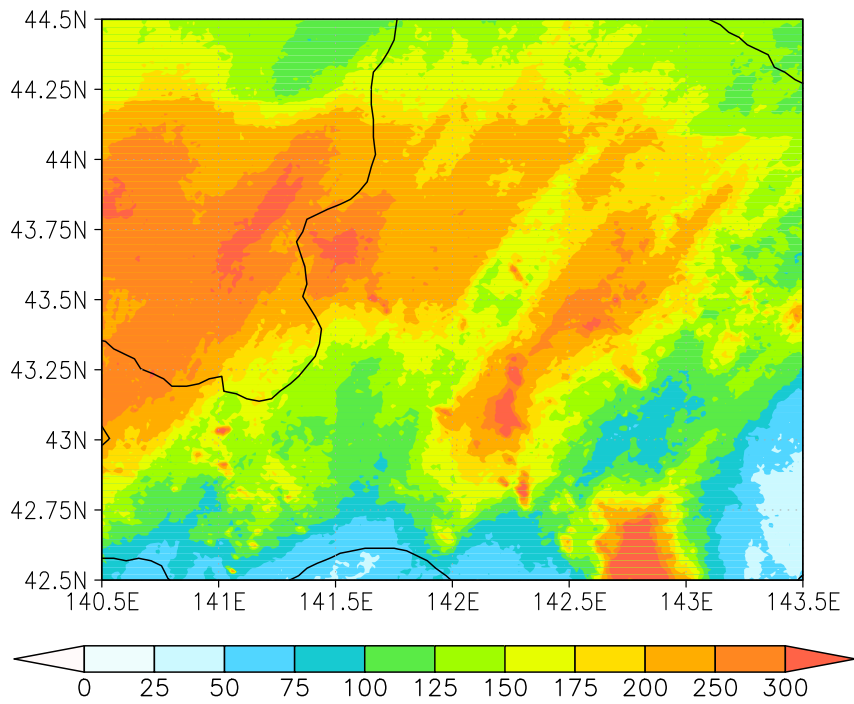
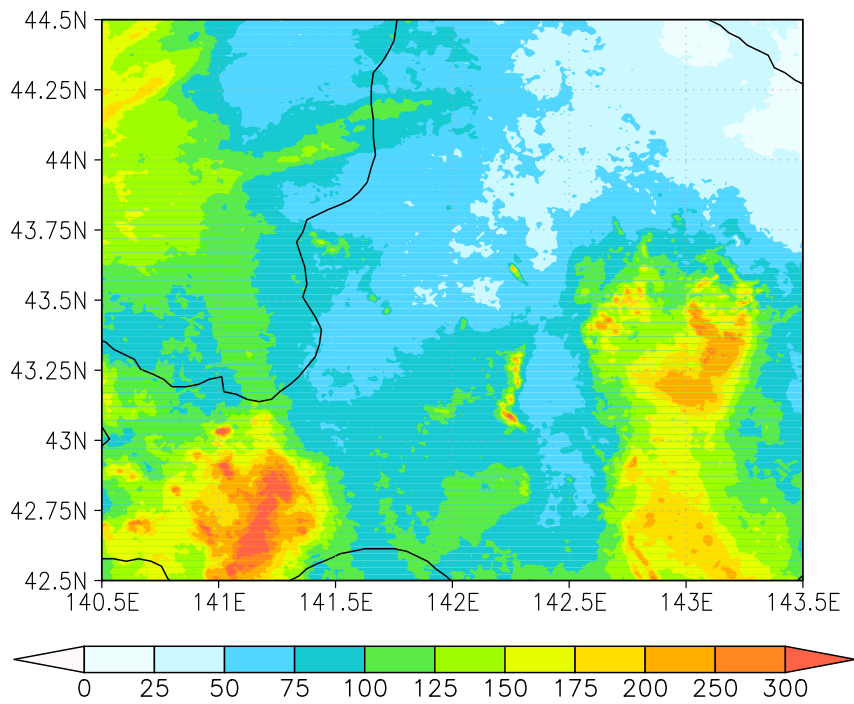


Fig. 47 Water vapor mixing, ratio and wind speed (m/s) and direction at 700 hPa on 00UTC, 2-7 September 2011 in Japan.



(a) 30 August - 4 September 2011.



(b) 5 - 12 September 2011.

Fig. 48 The total amount of precipitation.

3.2.2 流出実験

石狩川流域において流出計算を行った結果を Fig.49 から Fig.59 に図示した。石狩大橋 (Fig.49) では、model 1-1 で主観的にピークに着目したパラメータを用いて流出計算を行なうと、ピーク比は 1.05 と観測流量とほぼ同程度の値であり他の計算結果より良い値となったが、流出の立ち上がりが遅れたとともにピーク後に流出量の低減がなだらかであり、総流量が観測流量と比較して約 30%高い値となった。また NS 係数は 0.53 と整合性はあるが、0.7 以上の整合性が高い結果ではなかった。そのため、事例 1 と同様に Model 2 及び Model 3 の流出計算では主観的なパラメータ決定を行わず、SCE-UA 法を用いた。流出量を流域内 8 地点の観測流量を使用し、石狩大橋 1 地点のみパラメータを設定した Model 2-1, Model 2-2 では石狩大橋地点において NS 係数は 0.88 と 0.84 となった。point1 から 11 の観測流量を使用した Model 3-1 と Model 3-2 ではそれぞれ NS 係数は 0.92 と 0.89 となり、整合性は高かった。

石狩川中流域の岩見沢大橋地点、月形地点、奈井江大橋地点では Model 2, Model 3 とともに NS 係数が 0.70 を超え、整合性が高かった (Fig.50–52, Table 26–28)。特に Model 3-1 では、中流域の全地点で NS 係数が 0.90 を超えた。また、総流量比の差異は 10%以内、ピーク比の差異は 20%以内であった。Model 2 では、最初のピークで流出量が大きく見積もられ、約 1.3 倍から 1.6 倍のピーク値となっていた。上流域の妹背牛橋地点では、Model 2, Model 3 とともにピークが 15 時間から 20 時間早く計算され、NS 係数が Model 2-1, 2-2, 3-2 でマイナスの値となり、Model 3-1 でも 0.06 と低い値となった (Fig.53, Table 29)。だが、妹背牛橋地点より約 35km 上流にある伊納地点では、Model 2 と Model 3 とともに NS 係数が 0.70 以上であり、総流量比も約 15%以下と妹背牛橋地点より良い結果となった。

石狩川支流の千歳川、夕張川、空知川、雨竜川の観測地点では、千歳川を除き定常状態より流出量が著しく増加していた (Fig.55–59, Table 31–35)。まず、流出量の観測値がほぼ増加しなかった千歳川では、Model 2 においてピーク値が約 10 倍大きく計算された。Model 3 では、1.6 倍から 1.7 倍と Model 2 よりも極端に増加することはなかった。夕張川、空知川、雨竜川では Model 3 では全ての地点で 0.65 を超えた。point11 を除く地点の総流量比は約 10%以内であり、ピーク比は 30%以内の差異であった。Model 2 では、夕張川を除き NS 係数が 0.60 を超える値となった。夕張川ではピーク流量が観測値より約 24 時間早く計算されたため、NS 係数が 0 以下と低い値であった。

以上から、降水量を変化させた流出実験には Model 3-1 のパラメータを使用し、計算を行った。

Table 24 Parameters of the flow each experiments. For each table items, θ is volume water content, Beta is exponent constant of unsaturated hydraulic conductivity, Da is depth of capillary and non-capillary soil layers (m), Dm is depth of capillary soil layers (m), Ka is hydraulic conductivity (m/s), Nr is Manning's roughness coefficient for river (m/s), Ns is Manning's roughness coefficient for slope, initialROF is initial runoff height for kinematic wave model (mm/hr)

model	point or area	θ	β	Da	Dm	Ka	Nr	Ns	initial ROF
Model 2-1	point3	0.1951	4.618	0.7742	0.6696	0.000817	0.03580	0.01951	0.9823
Model 2-2	point3	0.8124	3.141	0.9517	0.8746	0.000340	0.04065	0.4032	0.09820
Model 3-1	area A	0.6500	2.119	1.7447	0.9029	0.00087	0.03787	0.1862	0.01544
	area B	0.6500	6.462	0.8073	0.4941	0.00108	0.02022	0.0140	0.05869
	area C	0.6500	11.81	0.2720	0.0841	0.00951	0.04741	0.7405	0.02706
	area D	0.6500	8.368	0.9280	0.4226	0.00022	0.02747	0.2485	0.08432
	area E	0.6500	12.97	0.2104	0.1981	0.00055	0.03079	0.3340	0.07838
	area F	0.6500	6.462	0.8073	0.4941	0.00108	0.02022	0.0140	0.05869
	area G	0.6500	13.40	0.4726	0.4300	0.00666	0.04916	0.7908	0.05025
	area H	0.6500	12.97	0.2104	0.1981	0.00055	0.03079	0.3340	0.07838
	area I	0.6500	13.40	0.4726	0.4300	0.00666	0.04916	0.7908	0.05025
	area J	0.6500	13.40	0.4726	0.4300	0.00666	0.04916	0.7908	0.05025
	area K	0.6500	14.21	0.8960	0.5461	0.00031	0.03489	0.7049	0.07488
Model 3-2	area A	0.6500	2.741	1.6390	0.8714	0.00090	0.02235	0.2146	0.01492
	area B	0.6500	8.033	0.7375	0.6399	0.00063	0.04997	0.0534	0.03060
	area C	0.6500	14.85	0.3156	0.0481	0.00985	0.04856	0.4705	0.07035
	area D	0.6500	6.383	0.8695	0.5610	0.00021	0.03402	0.1863	0.07630
	area E	0.6500	12.46	0.3040	0.2251	0.00011	0.02899	0.0782	0.08612
	area F	0.6500	8.033	0.7375	0.6399	0.00063	0.04997	0.0534	0.03060
	area G	0.6500	11.35	0.4565	0.4279	0.00720	0.04855	0.7924	0.07070
	area H	0.6500	12.46	0.3040	0.2251	0.00011	0.02899	0.0782	0.08612
	area I	0.6500	11.35	0.4565	0.4279	0.00720	0.04855	0.7924	0.07070
	area J	0.6500	11.35	0.4565	0.4279	0.00720	0.04855	0.7924	0.07070
	area K	0.6500	7.206	0.9688	0.9617	0.00065	0.02849	0.4017	0.03878

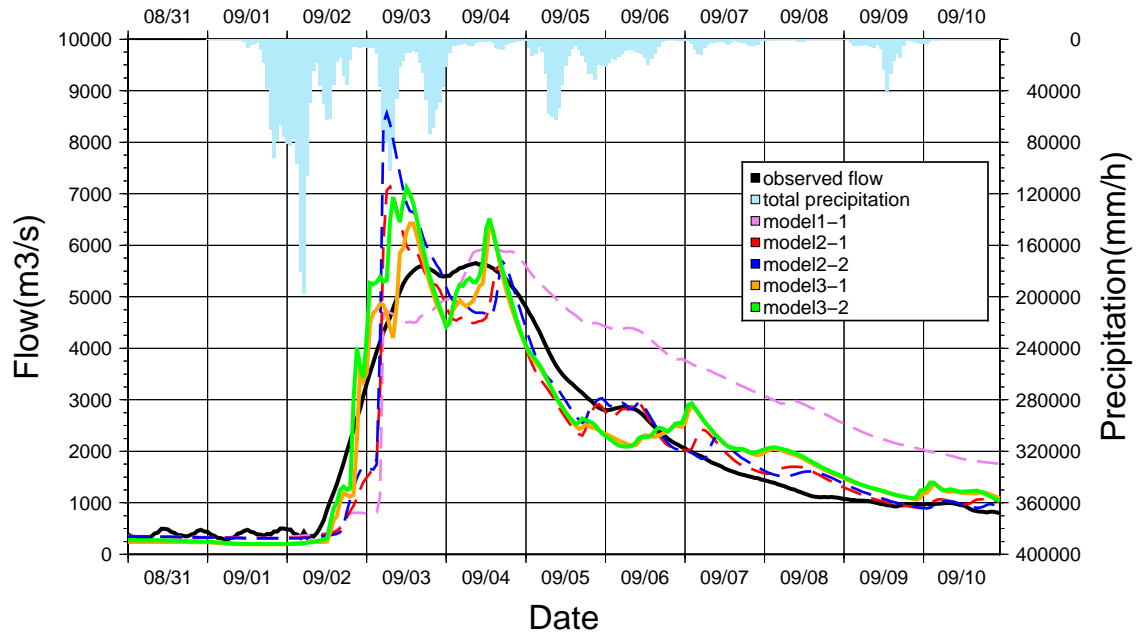


Fig. 49 Flow experiment at 31 August - 10 September 2011 at Ishikari-Ohashi (observed point3). The light blue bars denote total hourly rainfall amount of drainage basin. These color thick lines show outflow at each experiments for observation flow in black, model 3-1 in orange, model 3-2 in green. These dashed color lines denote outflow at each experiments for model 1-1 in pink, model 2-1 in red, model 2-2 in blue.

Table 25 Flow experiment comparison at Ishikari-Hashi(observation point 3). For each of table items ave. is the average value of outflow (m^3/s), max is the maximum value (m^3/s), min. is minimum value (m^3/s), NS is the Nash-Sutcliffe coefficient calculated by observed flow and calculated flow, total flow is the total sum from August 21 to 30, Tfr is the ratio of total observed flow and total calculated flow, and Pr is the peak ratio of the observed flow and calculated flow.

Point	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	2123.79	5653.69	285.71	-	560681	-	-
Model 1-1	2743.64	5960.56	319.39	0.53	734320	129.2	1.05
Model 2-1	2019.60	7135.58	313.03	0.88	533175	95.1	1.26
Model 2-2	2129.75	8566.51	310.03	0.84	562254	100.3	1.52
Model 3-1	2121.72	6424.51	194.09	0.92	560133	99.9	1.14
Model 3-2	2232.53	7117.14	199.17	0.89	589387	105.1	1.26

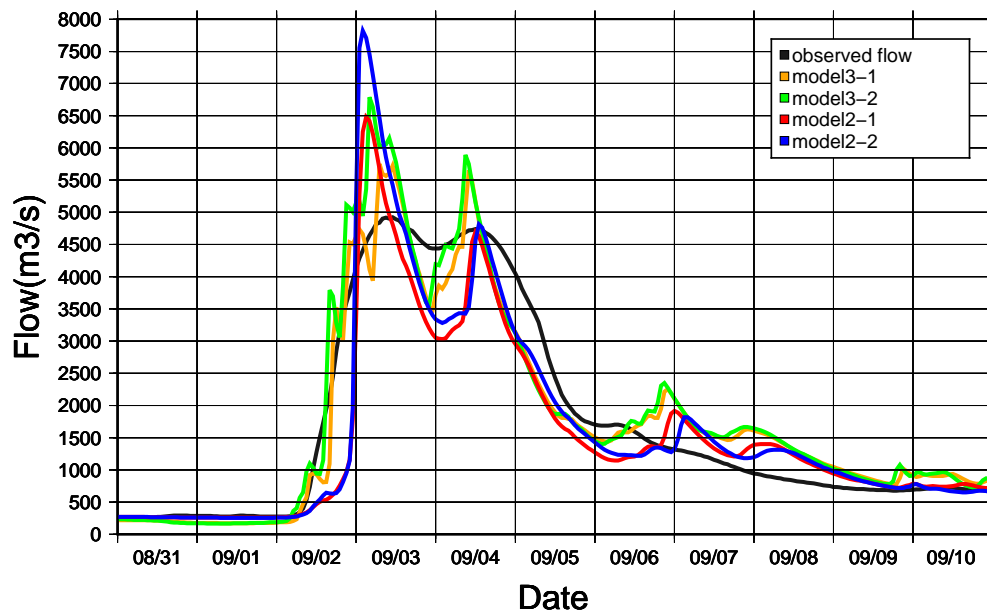


Fig. 50 Flow experiment at same term in the upper stream of the Ishikari River at Iwamizawa-Ohashi (observation point4). these color thick lines show outflow at each experiments for observation flow in black, model 2-1 in red, model 2-2 in blue, model 3-1 in orange, model 3-2 in green.

Table 26 Flow experiment comparison at Iwamizawa-Ohashi (observation point4) same as Table 25.

Point4	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	1722.52	4923.76	253.34	-	454746	-	-
Model 2-1	1534.21	6482.74	257.97	0.81	405033	89.1	1.32
Model 2-2	1628.27	7819.97	255.86	0.78	429863	94.5	1.59
Model 3-1	1757.17	5752.71	172.95	0.92	463893	102.0	1.17
Model 3-2	1859.73	6789.73	167.93	0.88	490967	108.0	1.38

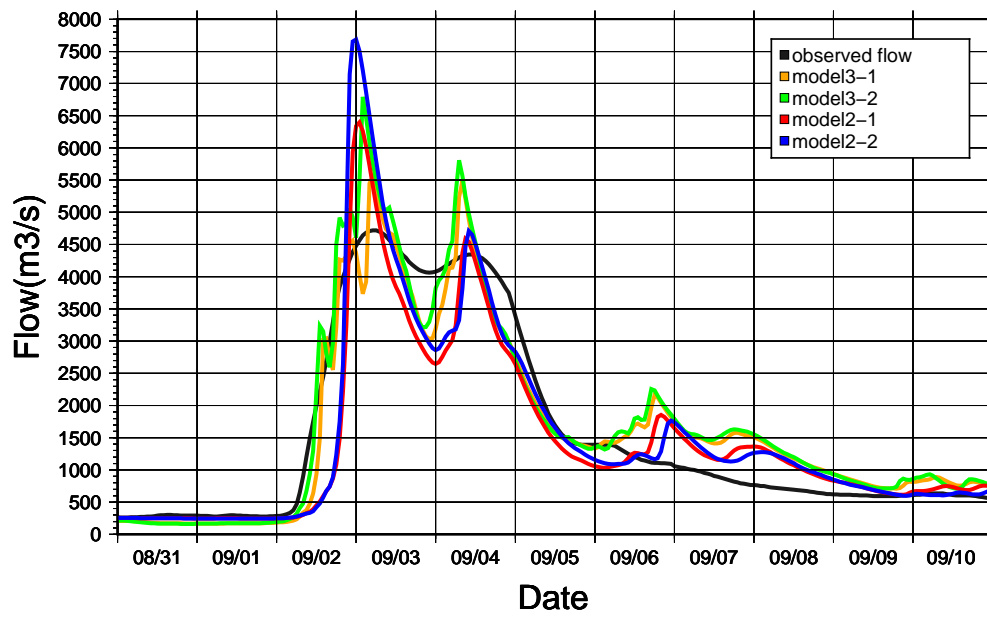


Fig. 51 Flow experiment at same term in the upper stream of the Ishikari River at Tsukigata (observation point5) same as Fig.50.

Table 27 Flow experiment comparison at Tsukigata (observation point5) same as Table 25.

Point5	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	1563.44	4722.00	262.02	-	412748	-	-
Model 2-1	1454.84	6396.52	245.05	0.81	384077	93.1	1.35
Model 2-2	1541.71	7683.05	244.09	0.78	407011	98.6	1.63
Model 3-1	1636.87	5551.96	167.48	0.91	432135	104.7	1.18
Model 3-2	1740.68	6794.08	163.45	0.88	459539	111.3	1.44

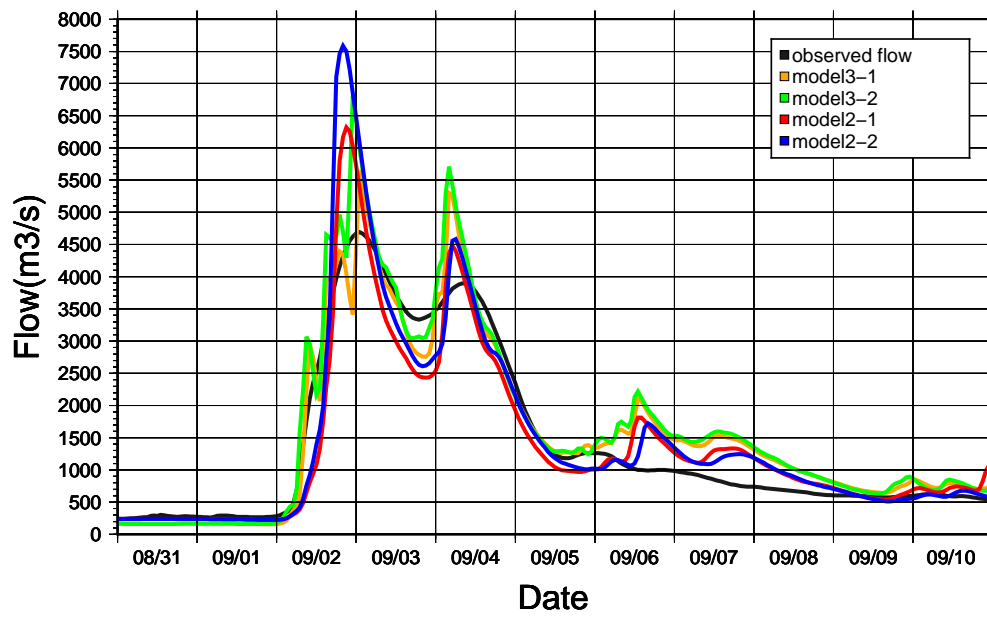


Fig. 52 Flow experiment at same term at Naie-Ohashi (observation point6) same as Fig.50.

Table 28 Flow experiment comparison at Naie-Ohashi(observation point6) same as Table 25.

Point6	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	1411.09	4696.13	237.77	-	372529	-	-
Model 2-1	1397.08	6318.72	223.67	0.87	368830	99.0	1.35
Model 2-2	1476.86	7585.10	223.35	0.81	389891	104.7	1.62
Model 3-1	1551.00	5650.42	158.21	0.91	409464	109.9	1.20
Model 3-2	1654.58	6816.09	159.36	0.86	436808	117.3	1.45

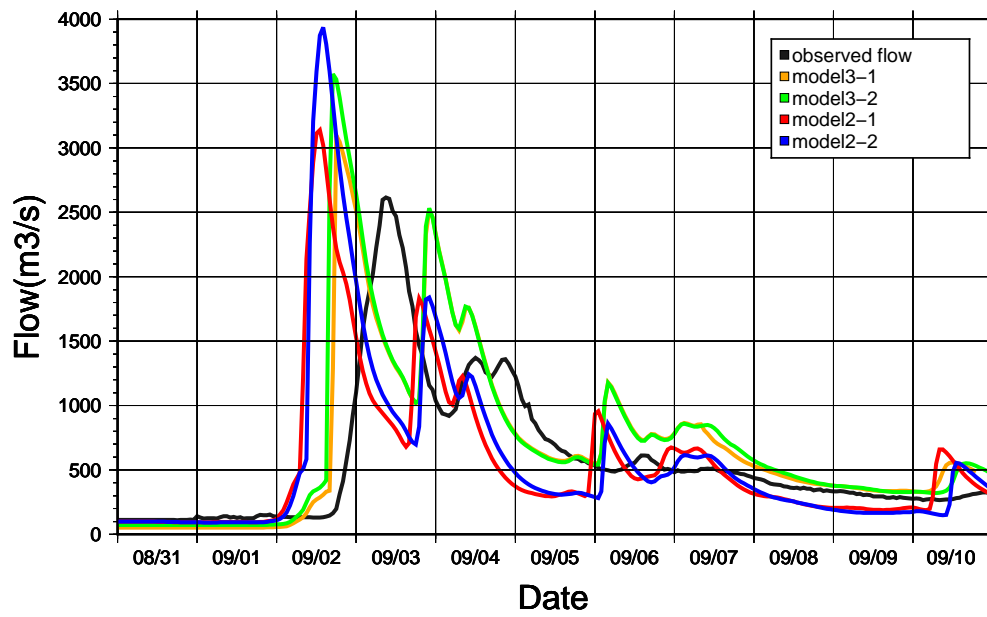


Fig. 53 Flow experiment at same term in the upper stream of the Ishikari River at Moseushi-Hashi (observation point8) same as Fig.50.

Table 29 Flow experiment comparison at the upper stream of the Ishikari River at Moseushi-Hashi (observation point8) same as Table 25.

Point8	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	573.54	2616.69	109.50	-	151414	-	-
Model 2-1	565.28	3140.18	93.44	-0.56	149235	98.6	1.20
Model 2-2	593.22	3936.66	92.36	≤ -1.00	156610	103.4	1.50
Model 3-1	689.26	3097.22	51.55	0.06	181966	120.2	1.18
Model 3-2	724.50	3574.86	71.69	-0.27	191267	126.3	1.37

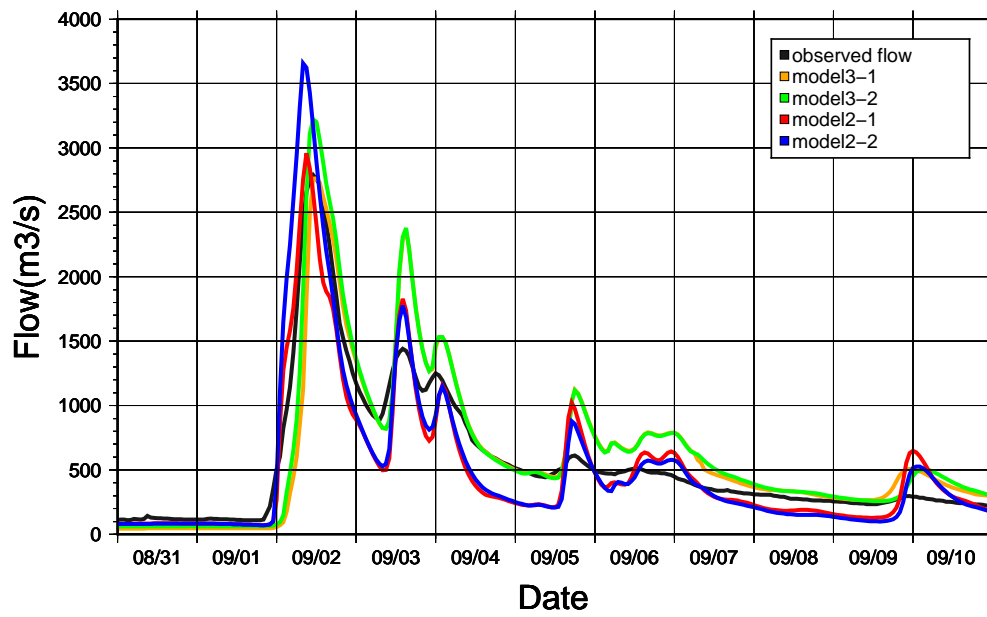


Fig. 54 Flow experiment at same term in the upper stream of the Ishikari River at Ino (observation point9) same as Fig.50.

Table 30 Flow experiment comparison at the upper stream of the Ishikari River at Ino (observation point9) same as Table 25.

Point9	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	562.54	2789.44	108.32	-	148511	-	-
Model 2-1	495.55	2958.95	71.41	0.86	130826	88.1	1.06
Model 2-2	520.10	3658.61	70.70	0.78	137307	92.5	1.31
Model 3-1	621.96	2764.43	44.52	0.77	164199	110.6	0.99
Model 3-2	648.89	3222.43	61.86	0.81	171307	115.4	1.16

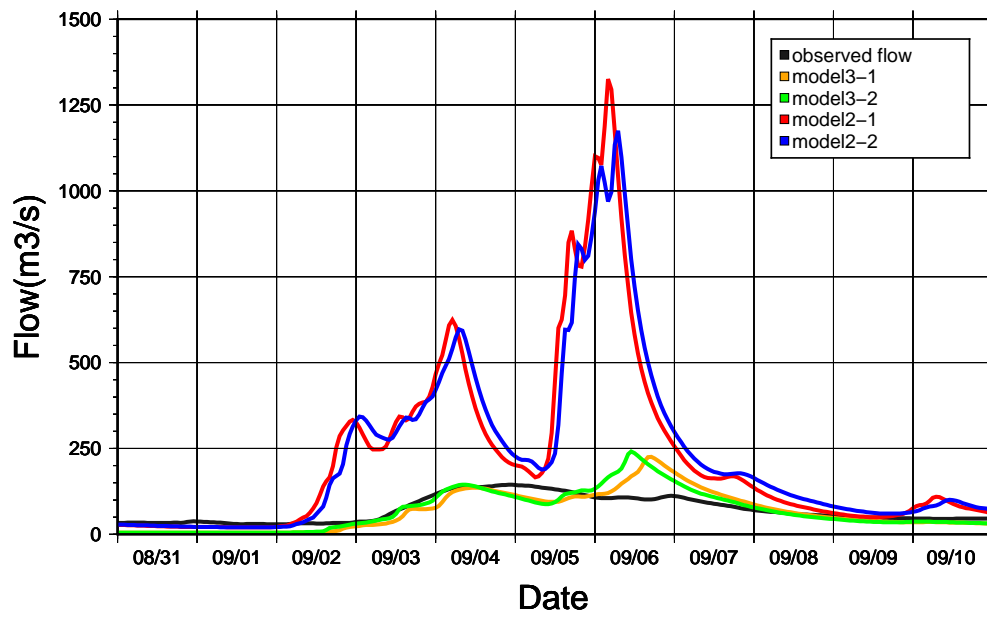


Fig. 55 Flow experiment at same term in Chitose river (observation point1) same as Fig.50.

Table 31 Flow experiment comparison in Chitose river (observation point1) same as Table 25.

Point1	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	71.43	144.25	29.30	-	18857	-	-
Model 2-1	227.25	1325.75	20.25	≤ -1.00	59995	318.2	9.19
Model 2-2	227.25	1325.75	20.34	≤ -1.00	60823	322.5	8.15
Model 3-1	66.19	225.85	4.88	0.30	17474	92.7	1.57
Model 3-2	68.34	240.83	4.72	0.26	18042	95.7	1.67

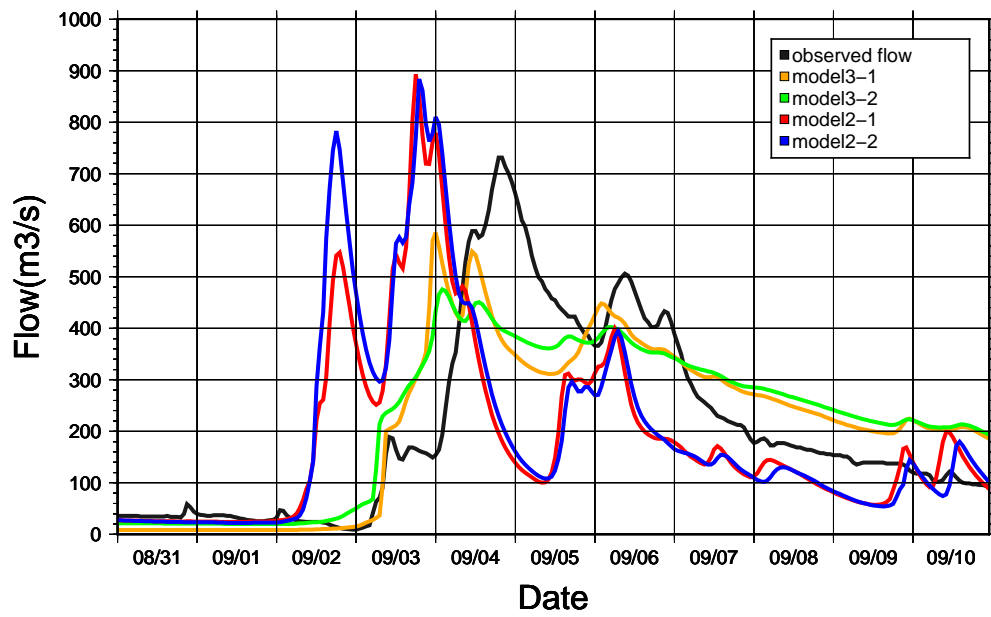


Fig. 56 Flow experiment at same term in Yubari river (observation point2) same as Fig.50.

Table 32 Flow experiment comparison in Yubari river (observation point2) same as Table 25.

Point2	ave.	max.	min.	NS	total flow	Tfr	Pr
real	209.72	731.59	9.20	-	55367	-	-
Model 2-1	193.11	892.66	24.07	-0.54	50982	92.1	1.22
Model 2-2	202.37	883.87	22.10	-0.76	53425	96.5	1.21
Model 3-1	216.24	585.39	8.27	0.65	57088	103.1	0.80
Model 3-2	224.89	475.42	19.93	0.69	59370	107.2	0.65

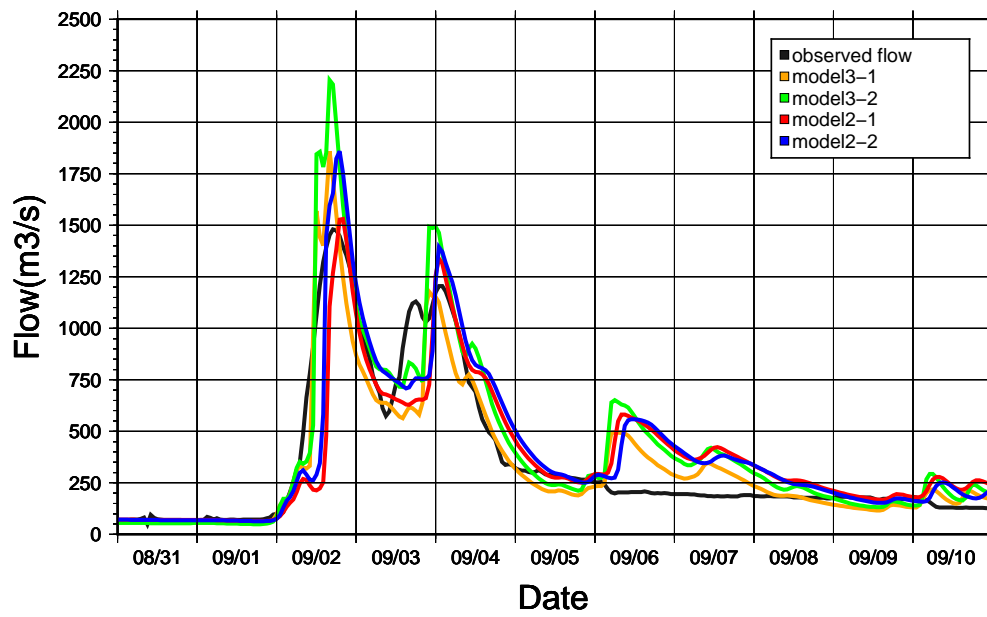


Fig. 57 Flow experiment at same term in Sorachi river (observation point7) same as Fig.50.

Table 33 Flow experiment comparison in Soraachi river (observation point7) same as Table 25.

Point7	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	347.54	1480.01	49.11	-	91750	-	-
Model 2-1	378.92	1530.79	64.42	0.70	100034	109.0	1.03
Model 2-2	402.05	1859.19	63.39	0.76	106142	115.7	1.26
Model 3-1	343.21	1858.68	53.84	0.86	90607	98.8	1.26
Model 3-2	418.49	2204.65	49.32	0.76	110481	120.4	1.49

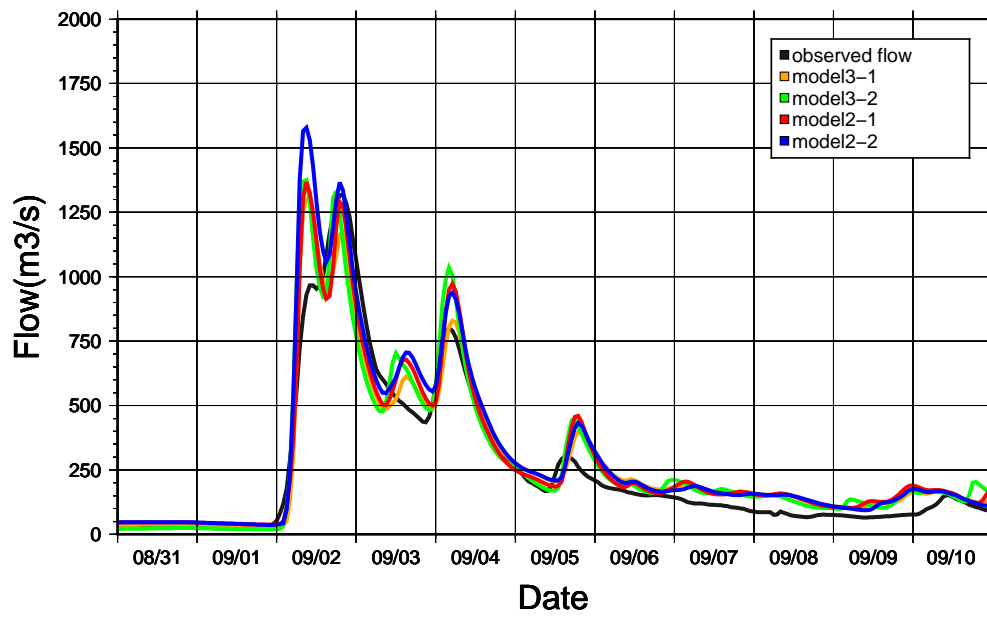


Fig. 58 Flow experiment at same term in Uryu river (observation point10) same as Fig.50.

Table 34 Flow experiment comparison in Uryu river (observation point10) same as Table 25.

Point10	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	254.81	1319.20	23.97	-	67270	-	-
Model 2-1	290.99	1367.40	37.83	0.91	76820	114.2	1.04
Model 2-2	307.98	1578.19	36.81	0.86	81307	120.9	1.20
Model 3-1	280.80	1299.33	31.69	0.92	74130	110.2	0.98
Model 3-2	284.59	1374.99	19.28	0.88	75132	111.7	1.04

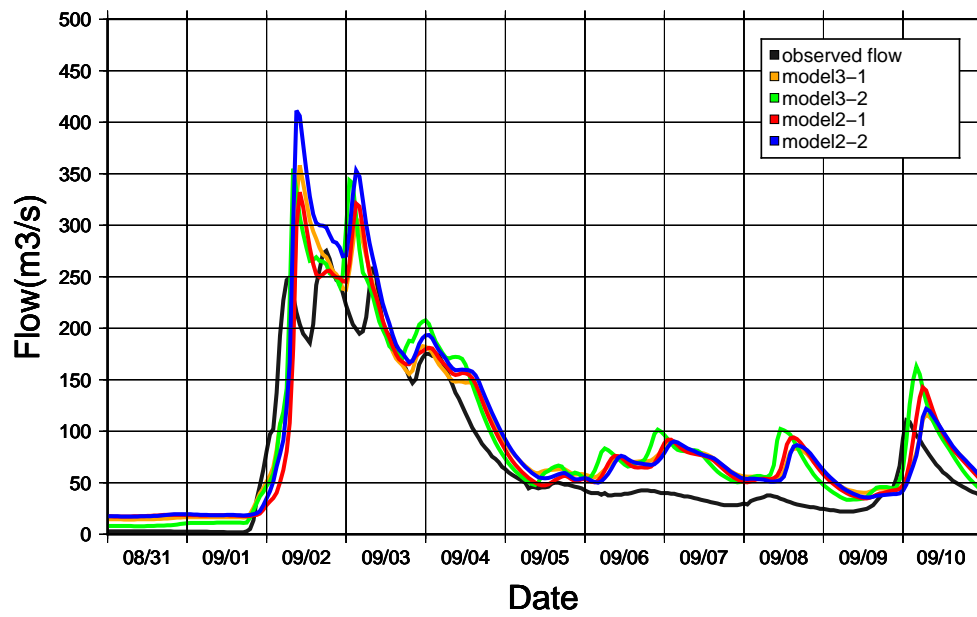


Fig. 59 Flow experiment at same term in Uryu river (observation point11) same as Fig.50.

Table 35 Flow experiment comparison in Uryu river (observation point11) same as Table 25.

Point11	ave. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	NS	total flow ($m^3/11days$)	Tfr (%)	Pr
real	72.11	275.29	2.01	-	19036	-	-
Model 2-1	90.20	332.27	17.29	0.71	23812	125.1	1.21
Model 2-2	96.50	411.37	17.26	0.62	25476	133.8	1.49
Model 3-1	92.19	358.06	14.45	0.74	24338	127.9	1.30
Model 3-2	93.29	354.99	7.92	0.75	24628	129.4	1.29

Table 36 Comparison of peak flow times of observation and each models, at each points of the Ishikari River at 2011.

point name	observation	Model 2-1	Model 2-2	Model 3-1	Model 3-2
point3	9/4 08UTC	9/3 07UTC	9/3 06UTC	9/3 14UTC	9/3 12UTC
point4	9/3 11UTC	9/3 03UTC	9/3 02UTC	9/3 07UTC	9/3 04UTC
point5	9/3 05UTC	9/4 09UTC	9/3 00UTC	9/3 05UTC	9/3 02UTC
point6	9/3 01UTC	9/2 21UTC	9/2 20UTC	9/3 01UTC	9/2 23UTC
point8	9/3 09UTC	9/2 13UTC	9/2 14UTC	9/2 18UTC	9/2 17UTC
point9	9/2 11UTC	9/2 09UTC	9/2 08UTC	9/2 12UTC	9/2 11UTC
point1	9/4 22UTC	9/6 04UTC	9/6 07UTC	9/6 17UTC	9/6 11UTC
point2	9/4 19UTC	9/3 18UTC	9/3 19UTC	9/4 00UTC	9/4 02UTC
point7	9/2 17UTC	9/2 20UTC	9/2 19UTC	9/2 16UTC	9/2 16UTC
point10	9/2 20UTC	9/2 09UTC	9/2 09UTC	9/2 10UTC	9/2 18UTC
point11	9/3 08UTC	9/2 10UTC	9/2 09UTC	9/2 10UTC	9/2 08UTC

3.2.3 事例2における降水量の変更実験

事例2における再現実験結果から、NS係数が最も高くなっていた Model 3-1 で用いたパラメータを利用し、降水量及び降水空間分布を Table 37 に従い変化させた流出計算実験を行った。降水量の変化として、計算期間である8月30日から9月12日までの降水量を1.2倍した CASE 2011-M1 (Fig.60, 61) では、8月30日から9月4日までに250 mmを超える降水が石狩川上流域から中流域を中心にあり、同期間の降水量を1.5倍した CASE 2011-M2 (Fig.62, 63) では、石狩川上流域から中流域に300 mmを超える非常に激しい雨が降った。CASE 2011-M3では降水要因が異なり、石狩川下流域を中心に降水のあった9月5日から12日までの降水量を1.5倍した (Fig.63)。CASE 2011-S4では8月30日から9月4日に降った雨を南へ30 km 移動させ (Fig.64)、CASE 2011-MS5では8月30日から9月4日に降った雨を南へ30 km 移動させ、1.2倍し流出計算を行った (Fig.65)。

石狩大橋地点では、降水量を1.2倍するとピーク流量は $8774.62 \text{ m}^3/\text{s}$ と1.4倍となり、降水量を1.5倍すると $14462 \text{ m}^3/\text{s}$ と2.3倍のピーク流量となった (Fig.66)。9月5日から12日の降水量を1.5倍した CASE 2011-M3では、石狩大橋地点の流量は観測流量や model 3-1 と大きな差異はなかった。また、8月30日から9月4日の降水量を下流側に30 km 移動した CASE 2011-S4では、石狩大橋地点におけるピーク流量は86%に減少した。ピーク値は低くなったが、約2日間に渡り $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の流出量を保っていた。30 km 南へ降水帯を移動し降水量を1.2倍した CASE 2011-MS5では、観測値の約1.3倍である $8172.36 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。降水量を1.2倍した CASE 2011-M1と CASE 2011-MS5では、CASE 2011-M1においてピーク流量の増加量が多かった。また、9月3日に見られるピーク流量と9月4日の最大値を2つのケースで比較すると、9月3日のピーク流量には $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の流出量の差異であったが、9月4日の最大値では $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ の違いがあった。

石狩川中流域の岩見沢大橋地点、月形地点、奈井江大橋地点における流出計算結果は、石狩大橋地点の結果と類似した傾向を示した (Fig.67-69)。この3地点では降水量を1.5倍した場合、ピーク流量が観測値の2.5倍の約 $14000 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。石狩川上流域の妹背牛橋地点と伊納地点のピーク流量では、CASE 2011-M1でそれぞれ $4960.38 \text{ m}^3/\text{s}$ と $4535.96 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、観測値の1.6倍の流出量であった。CASE 2011-M2では $8012.41 \text{ m}^3/\text{s}$ と $7543.62 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、2.6倍、2.7倍の流出量となった (Fig.70, 71)。CASE 2011-M3では $3154.99 \text{ m}^3/\text{s}$ と $2876.63 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、観測値と差異がほぼなかった。CASE 2011-S4では $2449.47 \text{ m}^3/\text{s}$ と $2239.93 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、観測値の80%程度の流出量であった。CASE 2011-MS5では $3972.84 \text{ m}^3/\text{s}$ と $3591.53 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、観測値の約1.3倍の値となった。

石狩川支流の千歳川では9月5日以降の降水量に強く影響を受けており、降水量を倍増した場合、9月6日にピークが発生し、その流出量は Model 3-1 の約1.8倍となった (Fig.72)。夕張川では特に CASE 2011-M1, CASE 2011-M2において9月2日似発生した降水に強く影響を受け、9月3日に降水量の倍率以上の流出量の増倍が確認された (Fig.73)。空知川では降水量および降水位置の変更によるピーク発生時刻の大きな変化はなく、流出量のみ変化していた (Fig.74)。CASE 2011-M2, CASE 2011-MS5ではピーク流量値が $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、またピーク発生時刻はほぼ同時刻であった。雨竜川では8月30日から9月4日にかけて強い雨が降った。CASE 2011-M1では雨竜橋で $1705.79 \text{ m}^3/\text{s}$ と観測値の1.3倍となり、CASE 2011-M2では $2402.79 \text{ m}^3/\text{s}$ と観測値の1.8倍となった (Fig.75)。

Table 37 The outline of changed precipitation experiment at 2011

item name	setting
CASE 2011-M1	8 月 30 日から 9 月 12 日の降水量を 1.2 倍
CASE 2011-M2	同上の期間の降水量を 1.5 倍
CASE 2011-M3	9 月 5 日から 12 日の降水量を 1.5 倍
CASE 2011-S4	8 月 30 日から 9 月 4 日の降水を南に 30km 移動
CASE 2011-MS5	同上の期間の降水を南に 30km 移動し，降水量を 1.2 倍

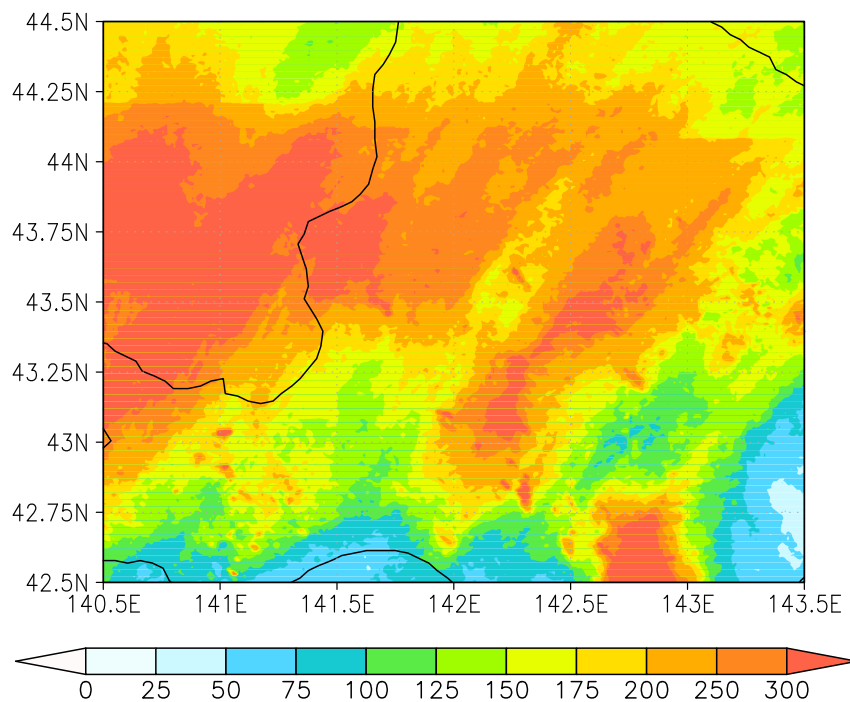


Fig. 60 In the case of 1.2 times total amount of precipitation (mm) by 1.2 from 30 August to 4 September 2011 (CASE 2011-M1).

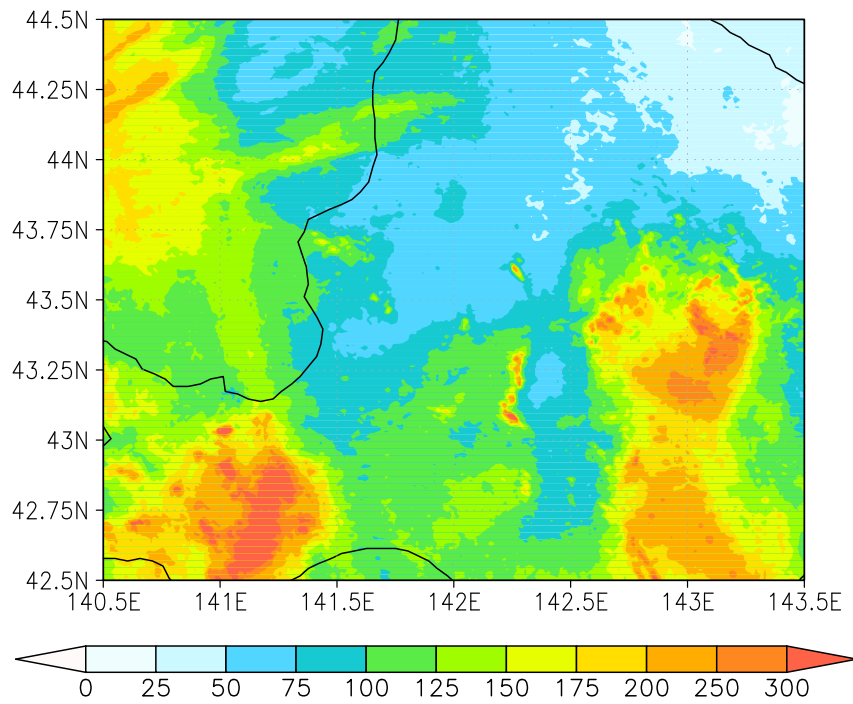


Fig. 61 In the case of 1.2 times total amount of precipitation (mm) from 5 to 12 September 2011 (CASE 2011-M2).

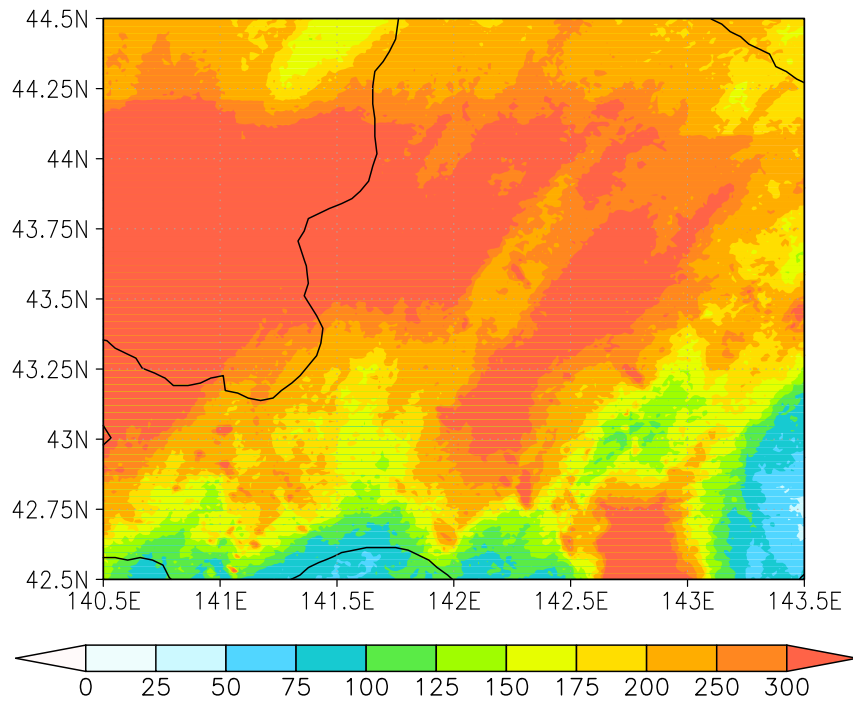


Fig. 62 In the case of 1.5 times total amount of precipitation (mm) from 30 August to 4 September 2011 (CASE 2011-M3).

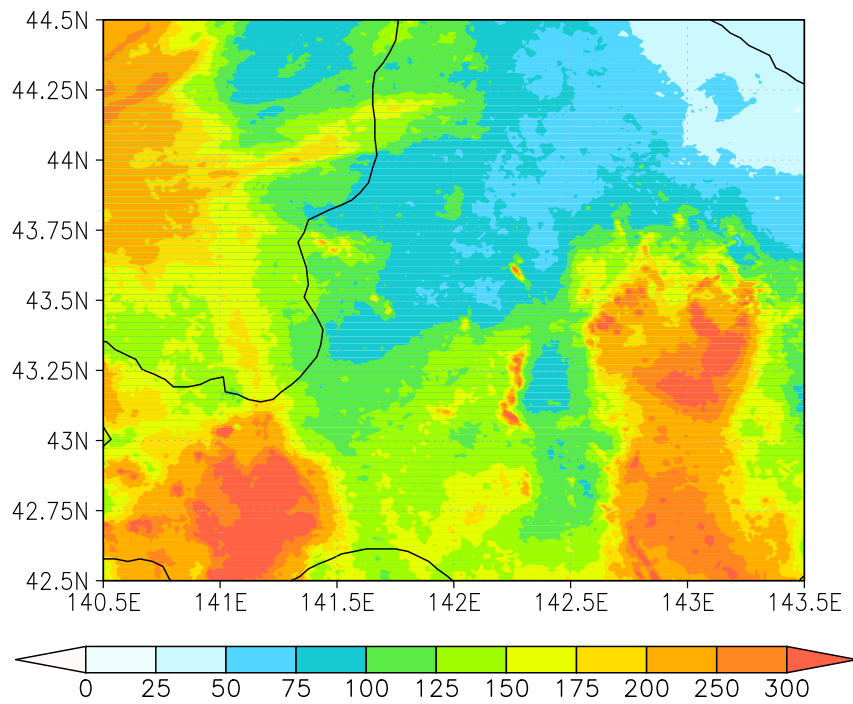


Fig. 63 In the case of 1.5 times total amount of precipitation (mm) from 5 to 12 September 2011 (CASE 2011-S4).

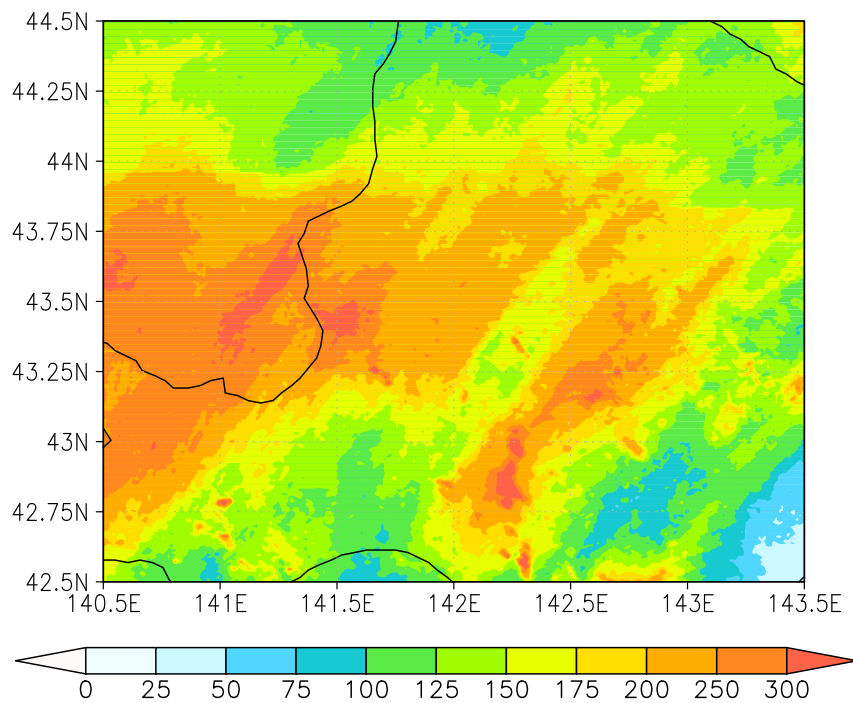


Fig. 64 The total amount of precipitation CASE 2011-MS5 when moved rainband to 30km the south at 30 August - 4 September 2011.

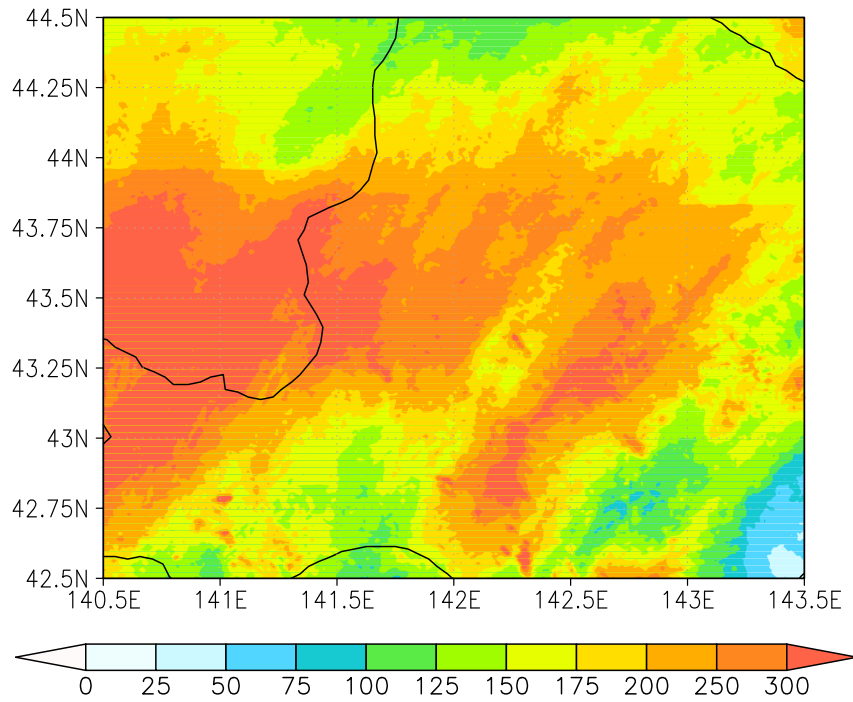


Fig. 65 The total amount of precipitation when multiplied by 1.2 and moved rainband to 30km the south 30 August - 4 September 2011.

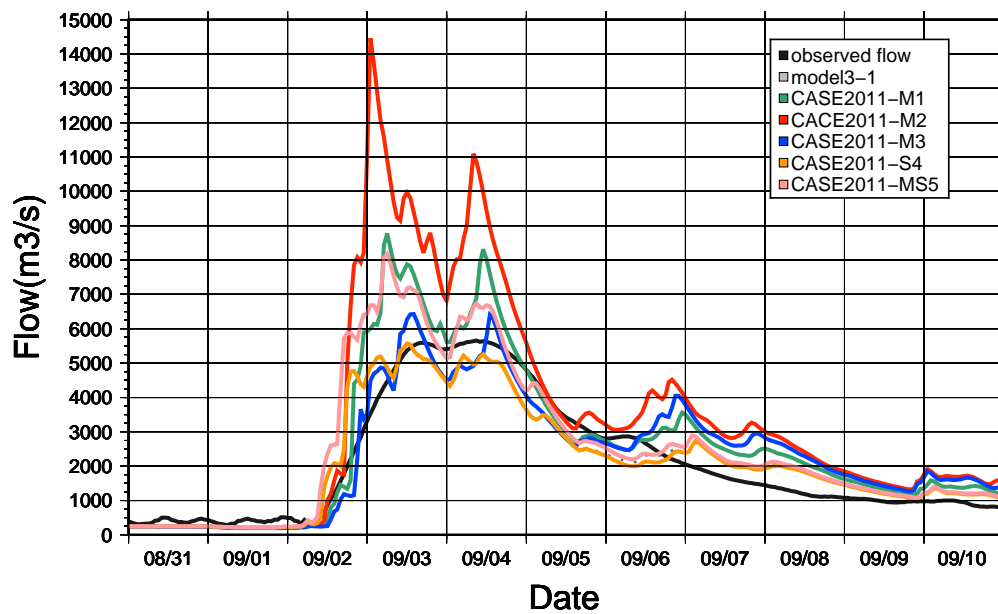


Fig. 66 Time series of flow experiment at Ishikari–Ohashi (observed point3) based on virtual precipitation from 31 August to 10 September 2011. Dashed lines denote outflow at model 2-1. These color thick lines show outflow at each experiments for observation flow in black, CASE 2010-M1 in green, CASE 2010-M2 in red, CASE 2010-S3 in blue, CASE 2010-S4 in orange, CASE 2010-MS5 in pink.

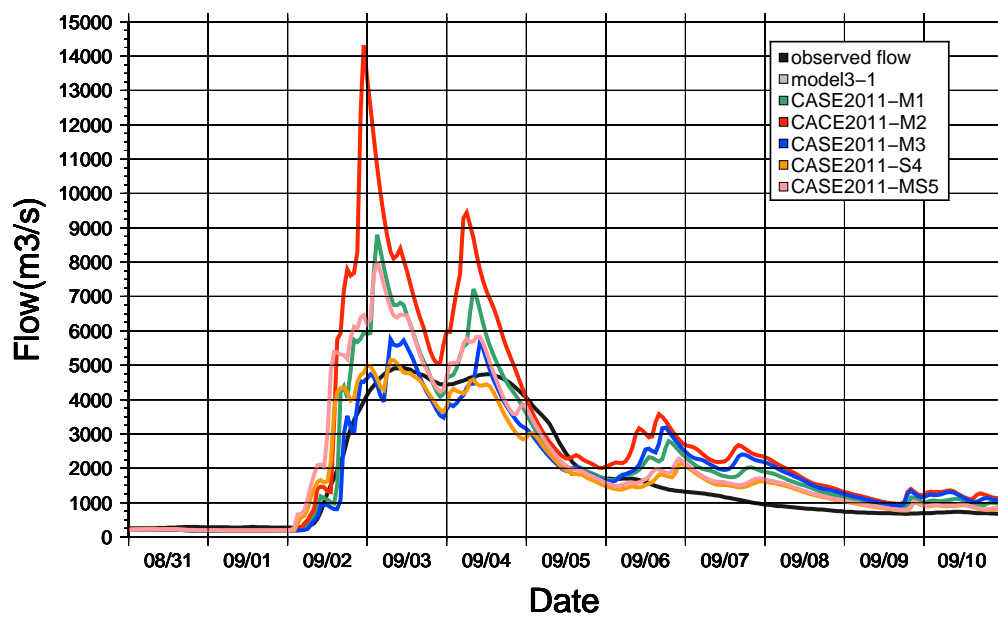


Fig. 67 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in Iwamizawa–Ohashi (observed point4) same as Fig.29.

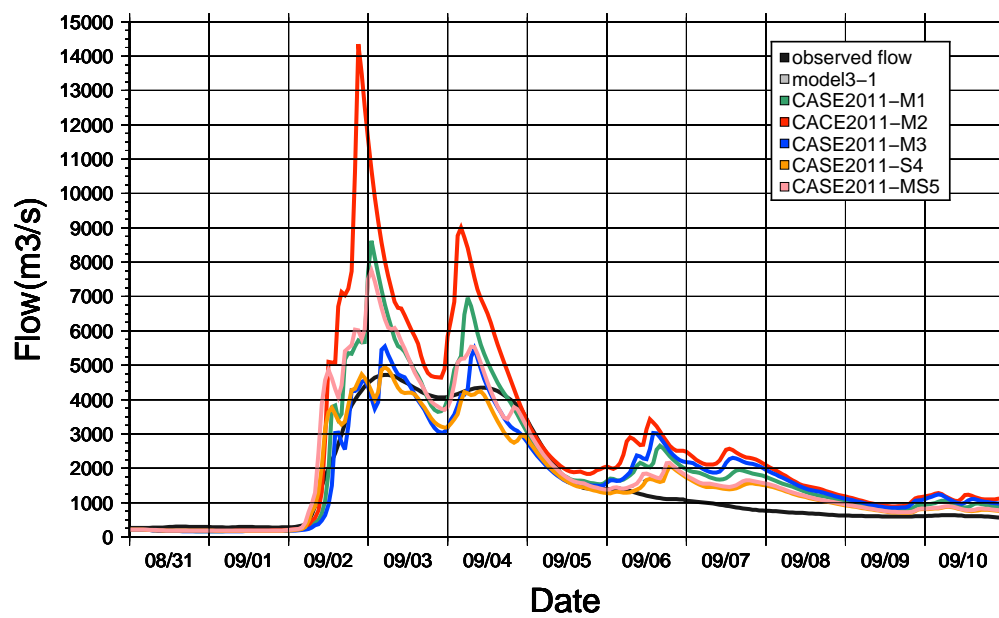


Fig. 68 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in Tsukigata (observed point5) same as Fig.29.

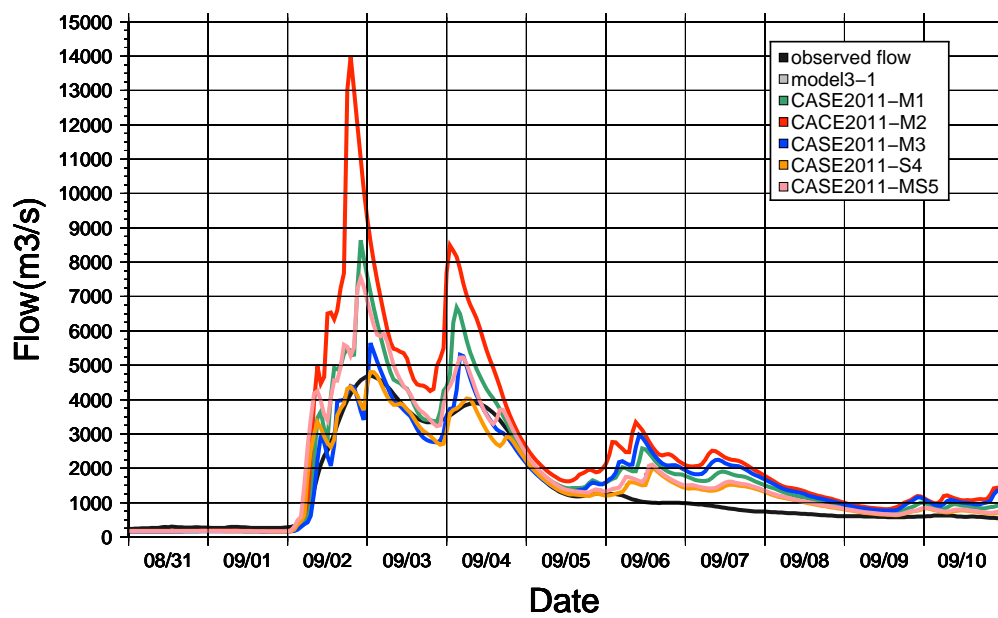


Fig. 69 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in Naie-Ohashi (observed point6) same as Fig.29.

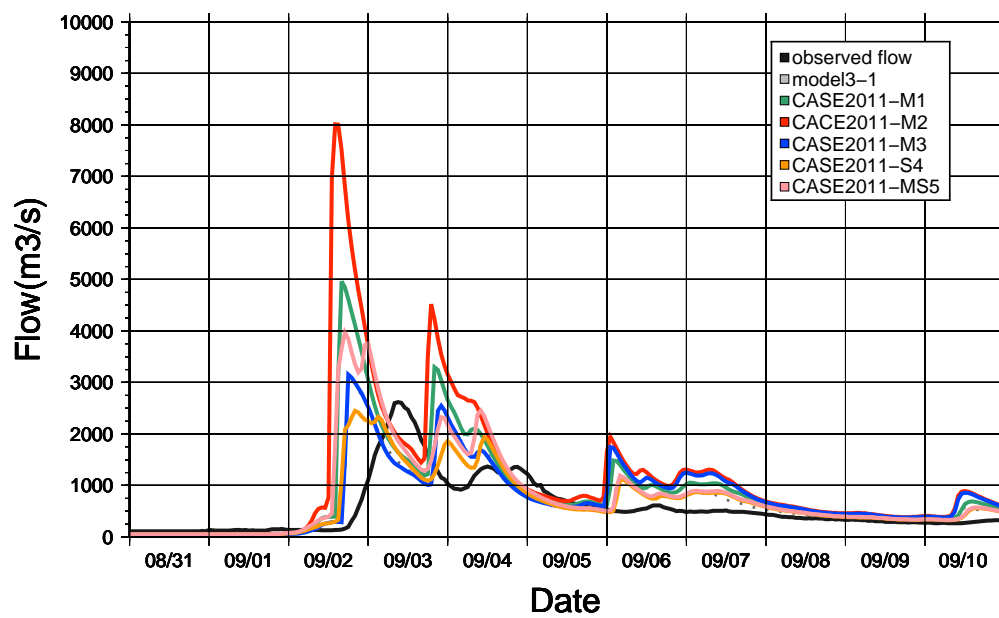


Fig. 70 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in the upper stream of Ishikari river at Moseushi-Hashi (observed point8) same as Fig.29.

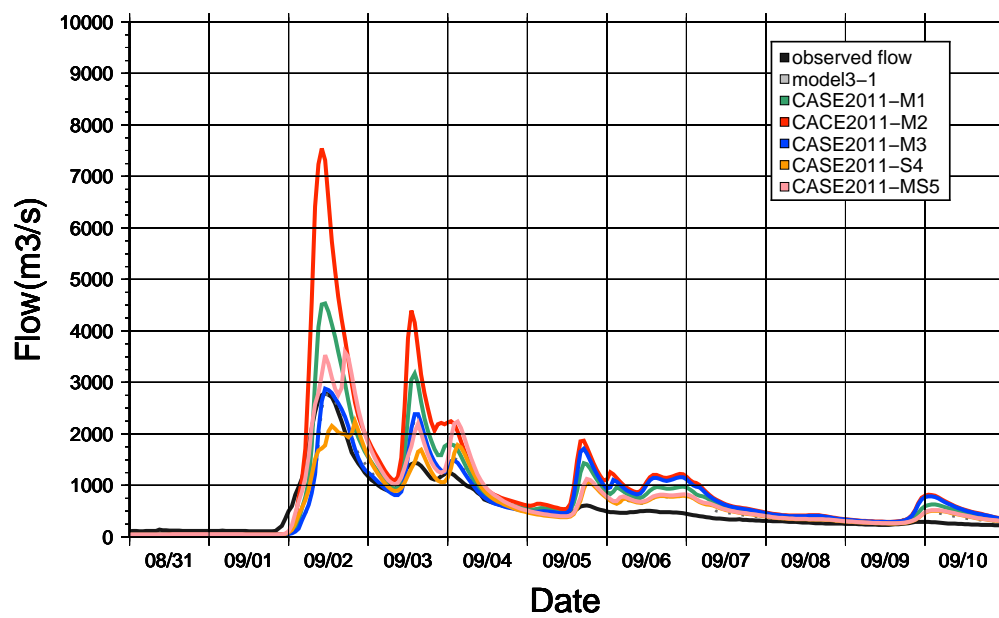


Fig. 71 The results of flow experiment using changed precipitation at the same term in the upper stream of Ishikari river at Ino (observed point9) same as Fig.29.

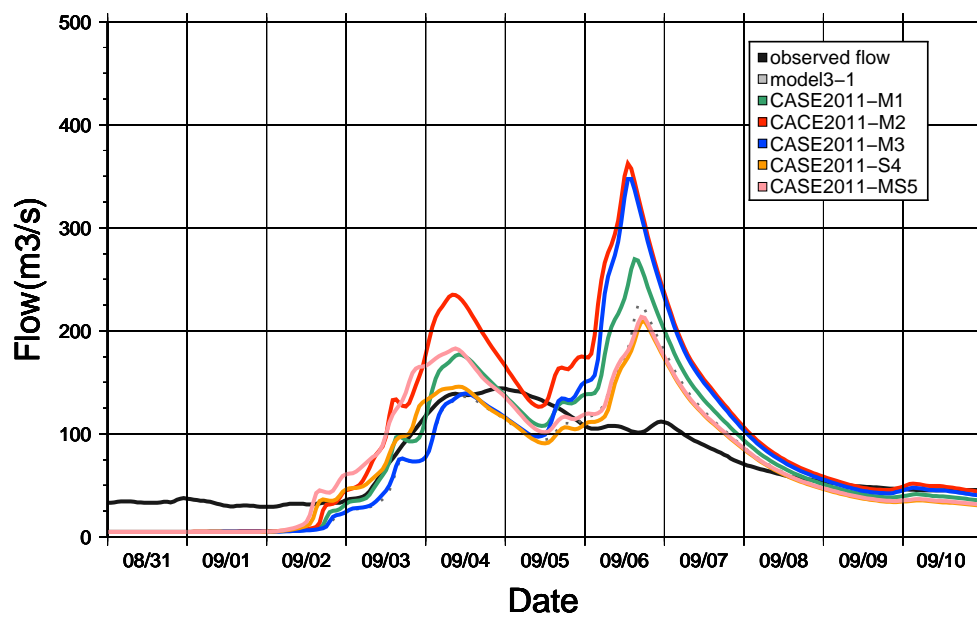


Fig. 72 The results of flow experiment using changed precipitation in Chitose river (observed point1) same as Fig.29.

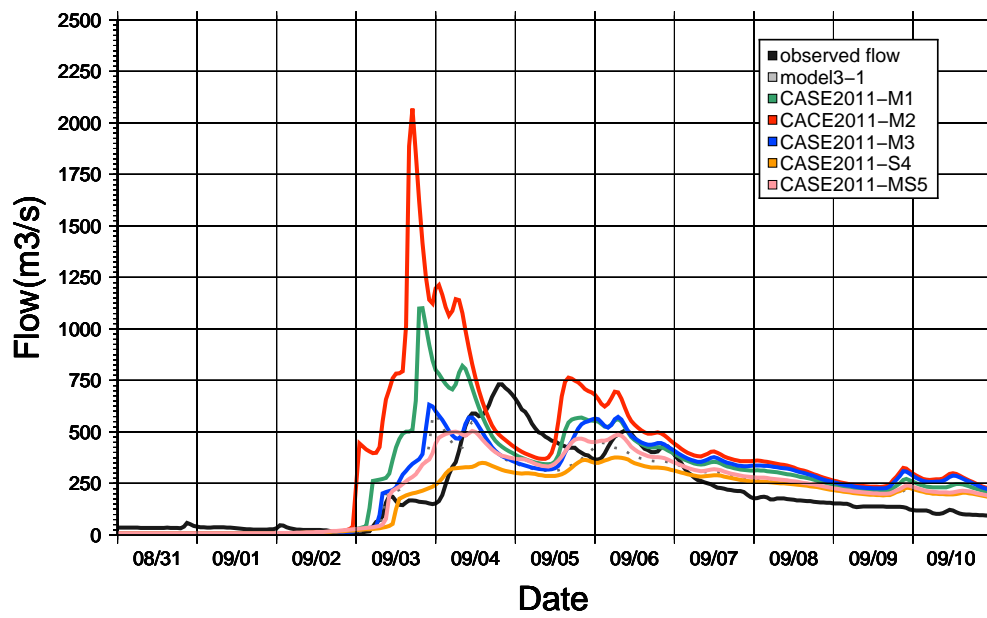


Fig. 73 The results of flow experiment using changed precipitation in Yubari river (observed point2) same as Fig.29.

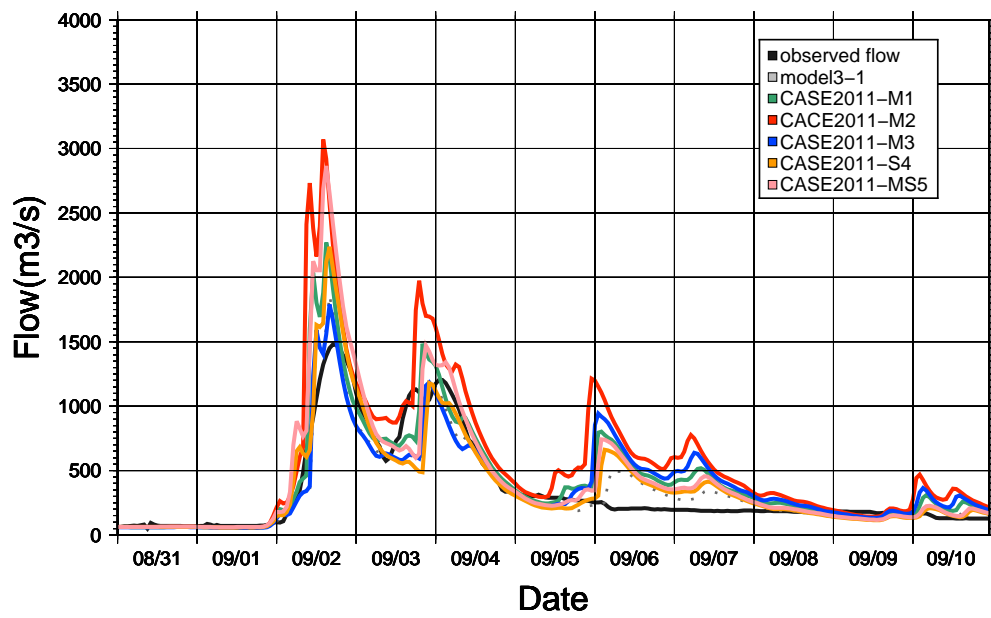


Fig. 74 The results of flow experiment using changed precipitation in Sorachi river (observed point7) same as Fig.29.

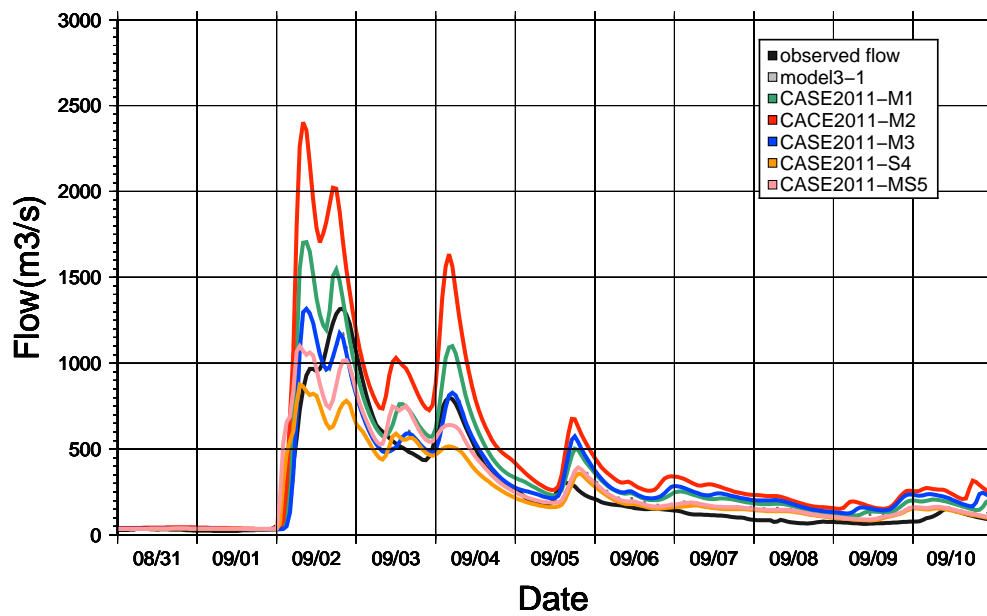


Fig. 75 The results of flow experiment using changed precipitation in Uryu river (observed point10) same as Fig.29.

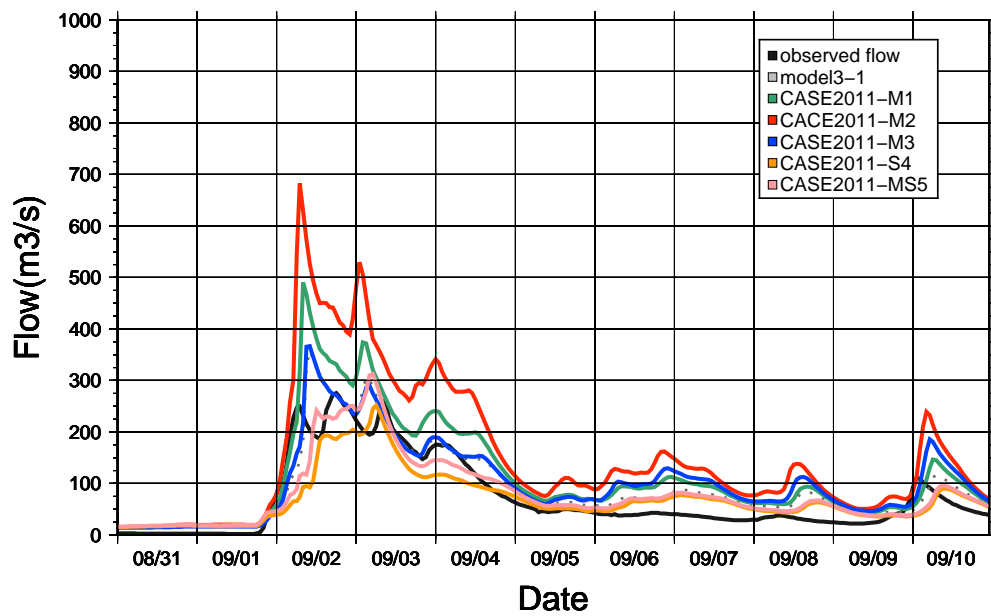


Fig. 76 The results of flow experiment using changed precipitation in Uryu river (observed point11) same as Fig.29.

Table 38 Comparison of peak flow of Model 3-1 and each experiments, at each points of the Ishikari river at 2011.

point name	model3-1	CASE2011-M1	CASE2011-M2	CASE2011-M3	CASE2011-S4	CASE2011-MS5
point3	6424.51	8774.62	14462.63	6424.51	5566.31	8172.36
point4	5752.71	8801.41	14318.95	5752.72	5153.04	8018.11
point5	5551.96	8625.06	14350.16	5551.91	4943.16	7753.77
point6	5650.42	8640.62	13990.04	5650.42	4808.20	7546.63
point8	3097.22	4960.38	8012.41	3154.99	2449.47	3972.84
point9	2764.43	4534.96	7543.62	2876.63	2239.93	3591.53
point1	225.85	269.48	362.38	347.42	209.30	213.61
point2	585.39	1100.67	2070.12	631.75	376.85	505.55
point7	1858.68	2271.36	3072.30	1788.48	2238.90	2866.65
point10	1299.33	1705.79	2402.79	1316.29	876.26	1099.71
point11	358.06	490.62	682.84	366.68	251.72	312.33

4 考察

4.1 石狩川流域における分布型流出モデルの適応可能性

分布型流出モデルを用いて線状降水帯と秋雨前線への暖湿移流の2事例を用いて、国内では大きい石狩川流域における分布型流出モデルの適応可能性と適応時に問題となり得る留意点を探った。まず、線状降水帯の事例では、石狩川中流、下流域において全てのモデルで最大24時間のピーク流量の遅れが見られた。だが、妹背牛橋地点や伊納地点といった石狩川上流域の地点では、model 2においてピーク値の際は最大で0-8時間となり、またピーク流量値は1.5倍以上となった。model 3ではピーク値が観測値と比較して50%程度と低く、総流量が多くなった。これは、流出モデル1K-DHMの流出計算では、土層内の不飽和域が飽和に達し、土層高を超える水深を持った時点で表面流が発生する構造となっている。だが、実際に発生する短時間に局所的に激しく降るような降雨では、土層の浸透量よりも多く降水があると表面流出が発生する。仮想条件と現実の降雨と流出の応答の差がmodel 3のピーク流量の差となったと考えられる。またmodel 2では表面流が卓越するように計算が行われ、ピーク値が高い値となったと推察される。

流出モデルでは線状降水帯のように短時間に局所的に激しい降水がある事例では、再現性が低い傾向にあった。その改善のため、激しい降水のある流域もしくは限定される範囲においてネスティングを行い、精度の向上が可能ではないかと考えられる。ネスティングとは入れ子構造とも呼ばれ、今回用いたモデルを例に考えると、約1km格子となっている土地勾配データに250m以下のより詳細な格子を内挿し、格子間の雨水のやり取りを詳細に計算させる方法である。例えば田中(2014)では、流出・氾濫一体型モデルを過去の氾濫事例に用いて氾濫箇所を詳細に指定し、その氾濫時の流出量および氾濫水の戻りによる流出量の回復に関して高い精度の再現結果を得られた。そのため、広い流域内で線状降水帯発生時の流出特性を詳細に検討する際には、激しい雨が観測された範囲をネスティングし、土層間の水のやり取りや表面流を詳細に計算させると高い精度で再現が可能ではないかと考える。

秋雨前線への暖湿移流および台風と温帯低気圧の暖湿移流がもたらした約7日間に渡る断続的な降水による洪水を流出モデルで再現した結果、石狩大橋地点ではmodel 2, model 3ともに0.70を超える高いNS係数となった。特にmodel 3-1ではNS係数は0.92、総流量比は99.9%、ピーク比は1.14と精度が高かった。また、中流域の観測地点においても0.90以上のNS係数であり、上流域や各支流の多くの地点で0.70以上の高いNS係数となった。これまで国内において 200km^2 から 8000km^2 の流域では、NS係数を指標として台風といった豪雨に関する精度の高い流出計算が行われてきたが(例えば、小林2006)、石狩川流域のように大きな流域を持つ河川での研究事例は少なかった。今回、本州における台風や梅雨がもたらす降水のように数日間に渡り降水があった事例では、流域を分割した分布型モデルが適応可能であると示された。

降水量増加実験の際に石狩大橋地点や中流域、上流域よりも雨竜川において流出量の増加割合が低かった要因として、雨竜川流域が広い森林地帯であることが挙げられる。森林域における流域貯留量は表層の地質と土壌型によって異なり、同じ森林土であればその最大値は花崗岩、火山灰、変成岩、堆積岩、火山岩の順となる(藤枝2007)。また、土壌の粒度分布では粒径が小さい土質ほど透水係数が小さい(土質工学会1995)。雨竜川のように森林域で火成岩や凝灰岩、礫岩や砂岩からなる土壌では、石狩川本流のように砂礫や泥炭からなる地層より流域貯留量が大きいと考えられる。今回は観測された流出量から流域内の特性をパラメータとしてSCE-UA法を用いて算出したが、地質や土壌の違いから土地ごとに特徴をパラメータに変換し、流出モデルへ応用

できる可能性がある。

4.2 地球温暖化と石狩川の河川流況

近年、線状降水帯が要因となった豪雨災害として 2017 年九州北部豪雨や 2015 年関東・東北豪雨が挙げられる。九州北部豪雨では、7 月 5 日から 6 日にかけて対馬近海に位置していた梅雨前線の南側 100km から 200km の大気下層へ東シナ海から暖湿な空気が流入し、5500m の上空へ寒気が流入したため、大気が不安定となり、積乱雲が次々と発生し、東へ流され、線状降水帯が発生した。これにより、福岡県朝倉市では 545.5mm/24hr を観測し、土石流や地すべりによる甚大な被害が発生した（気象研究所 2017；内閣府防災担当報道室 2017；国土交通省 2017）。関東・東北豪雨では 9 月 9 日から 10 日にかけて台風 18 号の東側に存在していたアウターバンドに伴う降雨域が関東地方へ移動し、変化した幅 100km から 200km の南北に伸びた降雨域の中で、多数の線状降水帯が発生、発達しながら北へ移動し、栃木県日光市で 551mm/24hr を記録した。そのため、鬼怒川では決壊や溢水といった甚大な被害が発生した（気象研究所 2015；国土交通省 2015）。このように、線状降水帯による豪雨災害は全国各地で発生している。Yamada *et.al* (2012) では、線状降水帯の発生件数は 1990 年から 2010 年のうち 2010 年で最も発生数が多く、次いで 1994 年、2007 年で発生数が多くなっており、これらの年の特徴として、日本海の海面水温が平年より高く、日本海上から北海道にかけて西から水蒸気供給量の平年偏差が正であったと示している。温暖化の影響により日本海では海面水温が 100 年で 1.08 度上昇し、21 世紀後半に向け昇温は続くと考えられている（IPCC 2007）ため、将来、線状降水帯の発生数や降水量の増加が考えられる。本研究で行った線状降水帯の降水量増加実験では、線状降水帯の最大雨量は最大でも CASE2010-M2 の 300mm/12hr である。これは先述の九州北部豪雨や関東・東北豪雨より低い値であるが、石狩川上流域では計画高水流量 $6000\text{m}^3/\text{s}$ を超える流量となっており、氾濫の危険性が高い流量である。また、一般的に河川上流域や山地に存在する中小河川では洪水対策が万全でないことも多く、CASE2010-M1、CASE2010-M2 の両方で観測された値でも氾濫が起こり得ると考えられる。線状降水帯を南へ移動し、増倍した仮想実験では夕張川で $2000.53\text{m}^3/\text{s}$ 、空知川において $3580.02\text{m}^3/\text{s}$ と計画高水流量（夕張川 $2400\text{m}^3/\text{s}$ ；空知川 $4200\text{m}^3/\text{s}$ ）に近い流量となった。

線状降水帯を南へ移動させた CASE2010-S3 と CASE2010-S4 では、ピーク値が model2-1 より $400\text{m}^3/\text{s}$ から $600\text{m}^3/\text{s}$ 程度減少したが、ピークが 2 つに分割され、約 $2000\text{m}^3/\text{s}$ の流出量を持つピークがおおよそ 1 日の間を空けて発生した。CASE2010-MS5 では、降水量を 1.5 倍したため分割された 2 つのピーク値はそれぞれ約 $4000\text{m}^3/\text{s}$ となった。このピークの分裂は、降水帯を南へ移動したため石狩川中流域での激しい降水が 1 つ目のピークとして、空知川中流、上流域での激しい降水が 2 つ目のピークとして求められたと考えられる。線状降水帯による降水では、流域内の本流、支流内の激しい降水が観測される範囲によって、本流と支流の降水量が合わさった流出量となるか、本流と支流の降水量が分けられ、2 つ以上のピークを持つ流出となるか決定する。

南へ降水帯を移動した実験においても千歳川流域に対する線状降水帯が及ぼす影響は雨量の空間分布から求められなかった。だが千歳川では 2014 年に支笏湖畔で 24 時間で 280mm、48 時間で 359.5mm の降水をもたらした線状降水帯が非常に激しい雨をもたらした。支笏湖周辺では大規模な土砂災害が発生した。現状では、線状降水帯は天気図に明確な特徴が現れず、降水帯の位置を正確に予測することは難しい。過去、北海道に発生した線状降水帯を詳細に検討し、石狩川本流や各支流へ与える影響を予め検討する必要があると考えられる。

事例 2 を用いて石狩川流域の流出量用いて降水量増加実験を行った結果、石狩大橋地点では CASE2011-M1 では観測流量の 1.4 倍である $8774.62\text{m}^3/\text{s}$ となり、CASE2011-M2 では 2.3 倍である $14462.63\text{m}^3/\text{s}$ となった。石狩大橋地点における計画高水流量は $14000\text{m}^3/\text{s}$ であり、降水量を 1.5 倍すると計画高水流量を超え、氾濫の危険性ある流出量となった。他の流量観測地点においても計画高水流量と比較すると、石狩川中流域では石狩大橋地点より $500\text{m}^3/\text{s}$ 程度小さい値であるが、石狩大橋地点における計画高水流量 $14000\text{m}^3/\text{s}$ と同程度の流出量であり、氾濫の危険性が高いことが示された。上流域では、妹背牛橋地点において $8012.41\text{m}^3/\text{s}$ 、伊納地点では $7543.62\text{m}^3/\text{s}$ となり、基準地点である伊納の計画高水流量 $6000\text{m}^3/\text{s}$ を $1500\text{m}^3/\text{s}$ 以上超えた。降水量増加実験の結果、将来気候下において秋雨前線への暖湿移流が発生し激しい降水が長期間に渡り発生すると、石狩川本流では全域において洪水発生危険性が極めて高いと示唆された。また、支流では特に雨竜川において $2402.79\text{m}^3/\text{s}$ の流出量となり、計画高水流量 $2700\text{m}^3/\text{s}$ に近い流量となった。CASE2011-S4 や CASE2011-MS5 のように降水域を南に 30km 移動した場合、石狩川中流、上流域と空知川を中心に強い雨が降った。石狩川中流、下流域では大きい流量を約 2 日間保っていた。特に降水量を 1.2 倍すると観測されたピーク流量の 1.3 倍程度の流出量を保っており、恐らく降水量が 1.5 倍であれば CASE2011-M2 のように流出量は 2.0 倍程度の流出量が約 2 日間保たれると考えられる。高い流量が長い期間保たれると、河川堤防に浸透による強度低下や河川湾曲部による流水の加速や乱れによる洗掘や破堤の危険性が高まる（興田 2014）。特に堤防法面がコンクリートにより覆われていると洗掘がある程度防がれるが、覆われていない場合では洗掘が生じ得る。また、支流と本流の合流地点では、本流から支流へ水が逆流する可能性もある。例えば 2015 年関東・東北豪雨では宮城県北部を流れる鳴瀬川水系多田川から渋川に洪水流が逆流し、浸水拡大へ寄与した（土木学会水工学委員会 2016）。そのため、断続的な降水や長く流出量が高い状態が保たれる状況は、河川氾濫において危険性が高いと考えられる。

北海道では 2016 年 8 月 17 日から 23 日の 1 週間に台風 7 号、11 号、9 号と 3 つの台風が上陸した。これは主に道東の十勝川水系や常呂川水系へ大きな被害をもたらした。このように北海道においても台風が前線を刺激して大雨が発生するだけでなく、台風の接近や通過による被害も考慮しなければならない時期にあると推察される。また、台風の強度や維持、発達にも海水温の昇温と水蒸気供給が大きく関わっている（吉崎、加藤 2007）。そのため、将来気候に向け、秋雨前線だけでなく台風による洪水氾濫も考慮しなければならないと考えられる。

欧米諸国では気候変動による降水特性の変化を踏まえた社会基盤の整備が行われている。イギリスのテムズ川や、ドイツのバイエルン州、アメリカのニューヨーク市において過去に甚大な災害をもたらした事例とともに気候変動予測を参考にダムや堤防といった洪水調整施設の整備が行われている（Department for Environment, Food & Rural Affairs（イギリス環境食料農村地域省）2006；KLIWA（ドイツ KLIWA プロジェクト）2012；New York City（ニューヨーク市）2013；平成 28 年度 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会 2017）。日本では 2015 年に既存施設の機能向上や維持管理を中心に防災、減災対策の方針を気候変動の影響への適応計画として閣議決定している。北海道では、2016 年に北海道総合開発計画が閣議決定され、環境との調和にも配慮したハード面、ソフトの適切な組み合わせによる防災・減災対策として河川改修や洪水調整施設等の治水設備の推進が必要であると述べられている。気象庁では 2017 年 7 月より洪水警報の危険度分布の提供が開始した。これは、都市域と非都市域で分けられた分布型のタンクモデルを用いて流出量を予測し、事前に洪水発生危険度を一目でわかりやすく周知する気象警報である。この警報にも用いられている降雨のレーダー観測や降雨予測モデル・流出モデルは発展途中であり、今後の予測技術の向上が警報の発令をより正確に行える可能性を担っている。

5 総括

本研究では、北海道最大の流域面積を持つ石狩川流域において 2010 年の線状降水帯と 2011 年の秋雨前線への暖湿移流事例の 2 つの洪水事例を用いて物理過程を考慮した分布型流出モデルの適応可能性の検証と簡易的な温暖化実験を行った。

線状降水帯のように局所的に集中して降水がある場合、石狩川本流の特に下流、中流域ではピーク流量に最大 24 時間の遅れが生じ、上流域ではピーク流量に大きな遅れは発生しなかったが、ピーク比が 1.5 倍以上と高くなった。その要因として流出モデル 1K-DHM の流出計算では、土層内の不飽和域が飽和に達し、土層高を超える水深を持った時点で表面流が発生する構造となっているが、実際に発生する短時間に局所的に激しく降るような降雨では、土層の浸透量よりも多く降水があると表面流出が発生するという仮想条件と現実の降雨と流出の応答の差が石狩川中流、下流域と上流域におけるピーク発生時刻の差になったと考えられる。その改善策として、激しい雨が観測された範囲をネスティングし、土層間の水のやり取りや表面流を詳細に計算させると高い精度で再現が可能ではないかと考えられる。線状降水帯による降水では、流域内の本流、支流内の激しい降水が観測される範囲によって、本流と支流の降水量が合わさった流出量となるか、本流と支流の降水量が分けられ、2 つ以上のピークを持つ流出となるか決定する。現状では、線状降水帯は天気図に明確な特徴が現れず、降水帯の位置を正確に予測することは難しい。過去、北海道に発生した線状降水帯を詳細に検討し、石狩川本流や各支流へ与える影響を予め検討する必要があると考えられる。また、簡易温暖化実験により激しい降水のあった石狩川の上流域や支流では、局所的に流出量が増加し、それに伴い洪水氾濫が発生する危険性が示唆された。

秋雨前線への暖湿移流のように広範囲に断続的な降水がある場合、特に整合性が高く、NS 係数は 0.92、総流量比は 99.9%、ピーク比は 1.14 となった。簡易温暖化実験において将来、年最大降水量が 1.5 倍として計算を行なうと石狩川では現状の計画高水流量を超える流出量となった。降水域を南に 30km 移動した場合、石狩川中流、上流域と空知川を中心に強い雨が降り、石狩川中流、下流域では高い流量を約 2 日間保っていた。本流と支流が流出するまでの時間差により、石狩川中流、下流域では高い流量を約 2 日間保っていた。ピーク流量とその継続時間は洗掘や浸透等の影響により河川堤防を脆弱にする可能性がある。台風の強度や維持、発達にも海水温の昇温と水蒸気供給が大きく関わっているため、将来気候に向け、秋雨前線だけでなく台風による洪水氾濫も考慮しなければならないと考えられる。

今回対象とした 2 事例では、簡易温暖化実験により降水量を増加させた場合、その増加率よりも流出量の増加率が高くなった。だが降水量と流出量の増加率は明確ではなく、降水の時空間分布に流出量の増加率は大きく左右されると考えられる。研究対象とした石狩川流域だけでなく多くの地域で線状降水帯や秋雨前線、台風による豪雨災害のハード面での対策が急務であるとともに、人的被害を防ぐため、降雨予測や河川流出モデル、降雨と河川氾濫一体型の予測モデルの精度向上が必須である。堤防や洪水調整施設により洪水が全く発生しない河川を作るとは、相当に難しいと考えられ、想定を超える降雨、洪水に備え、河川から水が溢れた際に如何に河川水を導き被害を最小限に抑えるか、氾濫水を河川に戻すかという問題を考慮し、河川の周辺環境を視野に含めた対策が望まれている。また、温暖化による降水量の増加、局所的に発生する短時間強雨による洪水の予防や減災のため、現段階からダムや堤防等の社会基盤や迅速な避難情報の提供といった幅広い対策が求められる。

謝辞

本研究にあたり，指導教官及び主査である馬場賢治准教授には，修士論文の実験から執筆，学会発表において丁寧なご指導を賜りました．心より感謝致します．お忙しい中，副査を担当して頂いた生態系物質循環研究室の保原達准教授，環境空間情報学研究室の小川健太准教授に深く感謝致します．

名古屋大学の上田博名誉教授には気象学の基礎知識から数値実験，修士論文の執筆まで，大変お世話になりました．また宇宙地球環境研究所の加藤雅也様には，水文モデルを使用した実験方法について数多くのご指導を頂きました．深く御礼申し上げます．

京都大学 水文・水資源研究室の立川康人教授には，ご多忙のところ，修士論文の方針や数値実験に関する多くの助言を賜りました．誠にありがとうございました．

最後に，両親，友人，研究室の皆様，同専攻の皆様，職員の皆様にも大変お世話になりました．皆様のお力添えのおかげで，大学院での研究をやり切ることができました．心から感謝の意を表します．

図表の作成にあたり COLA(Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies) による GrADS(Grid Analysis and Display System)，GMT(Generic Mapping Tools) ソフトウェア (Wessel and Smith,1998) を使用しました．

参考文献

- 阿部清明, 芝崎一也, 塩月善晴, 1998: タンクモデルによる都市浸水発生予測. 土木学会論文集, 44, 1-10.
- 秋山壽一郎, 重枝未玲, 野村心平, 2013: 数値シミュレーションに基づく短時間豪雨に対する遠賀川流域の洪水と飯塚市街地のしんすい特性の検討. 土木学会論文集 B1, 69, 1579-1584.
- Department for Environment, Food and Tural Affairs**, Flood and Coastal Defence Appraisal Guidance FCDPAG3 Economic Appraisal Supplementary Note to Operating Authorities Climate Change Impacts. <http://www.sdgc.org.uk/Climate-change-update.pdf> (2018.1.15 閲覧).
- Duan, Q., S. Sorooshin and V. K. Gupta**, 1992: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Reserch, 28, 1015-1031.
- Duan, Q., S. Sorooshin and V. K. Gupta**, 1994: Optimal use of SCE-UA global optimization method for calibration watershed models. Journal of Hydrology, 158, 265-284.
- 端野道夫, 吉田弘, 市原秀樹, 1991: 降雨遮断及び SPAC を考慮したタンクモデルによる長期流出解析. 水工学論文集, 35, 93-98.
- Hirabayashi, Y., R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim and S. Kanae**, 2013: Global flood risk under climate change. nature climate change, 3, 816-821.
- Hirabayashi, Y., S. Kanae, S. Emori, T. Oki, M. Kimoto**, 2016: Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. Hydrological Sciences Journal, 53, 754-772.
- 兵庫県 流出ワーキングチーム, 兵庫県流出解析ワーキングチーム 資料一覧. https://web.pref.hyogo.lq.jp/hnk/hn04_0000000111.html (2018.1.4 閲覧).
- 池淵周一, 椎葉充晴, 宝馨, 立川康人, 2006: エース水文学. エース 土木工学シリーズ, 朝倉書店, 201pp.
- 井本昂志, 小尻利治, 田中賢治, 浜口俊雄, 2008: 気候変動による流域水環境の変動特性に関する比較. 京都大学防災研究所年報, 51, 799-813.
- Inatsu M., T. Sato, T. J. Yamada, R. Kuno, S. Sugimoto, M. A. Farukh, Y. N. Pokhrel and S. Kure**, 2015: Multi-GCM by multi-RAM experiments for dynamical downscaling on summertime climate change in Hokkaido. Atomos. Sci. Let., 16, 297-304.
- IPCC (気候変動に関する政府間パネル)**, 2014: 気候変動 2014 IPCC 第5次評価報告書 政策決定者向け要約. www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/pdf/0414SPM.pdf (2017.01.04 閲覧).
- 環境省, 内閣府, 閣議決定. <http://www.sdgc.org.uk/Climate-change-update.pdf>

(2018.1.15 閲覧).

川宮未知生, 石井正好, 鬼頭昭雄, 木本昌秀 , 2013 :

「 21 世紀気候変動予測革新プログラム」における CMIP5 実験仕様に基づいた温暖化予測実験. 天気 , 60, 223-246.

川島正行 , 2012 : 前線に伴う降水帯. 細氷, 58, 2-7.

菊地渉, 村上泰啓, 石谷隆始 , 2009 : 北海道内の豪雨傾向の地域・経年特性について. 国土交通省北海道開発局第 52 回 (平成 20 年度) 北海道開発技術研究発表会.

木村誠, 城戸由能, 中北英一 , 2011 : 都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法に関する基礎的検討. 土木工学論文集 B1, 67, 931-936.

気象研究所 , 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の発生要因～二つの台風からの継続的な暖湿流の流入と多数の線状降水帯の発生～. 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の鬼怒川における洪水被害等について (2018.1.15 閲覧).

気象研究所 , 平成 29 年 7 月 5-6 日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について～上空寒気による不安定の強化と猛烈に発達した積乱雲による線状降水帯～.

http://www.jma.go.jp/jma/press/1707/14b/press_20170705-06_fukuoka-oita_heavyrainfall.pdf (2018.1.15 閲覧).

KLIWA , Climate Change in Southern Germany Extent - Impact - Adaption. http://www.kliwa.de/_download/broschueren/KLIWA-Broschuere-2012-e.pdf (2018.1.15 閲覧).

小林健一郎, 立川康人, 佐山敬洋, 寶馨 , 2006 : 分布型降雨流出モデルによる 2004 年 10 月台風 23 号由良川洪水解析. 水工学論文集 B1, 50, 313-318.

国土交通省 , 2017 : 水文水質データベース <http://www1.river.go.jp/> (2017.2.1 閲覧).

国土交通省 気象庁 , 2018 : 気温・降水量の長期変化傾向. www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/index.html (2017.01.04 閲覧).

国土交通省 , 2017 : 水管理・国土保全 河川整備基本方針 石狩川水系. https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/ishikari_index.html (2017.7.10 閲覧).

国土交通省 気象庁 , 2017 : 気候変動監視レポート 2016 世界と日本の気候変動及び温室効果ガスとオゾン層等の状況. www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2016/pdf/ccmr2016_all.pdf (2017.12.5 閲覧).

国土交通省 河川局 , 2004a : 石狩川水系河川整備基本方針. https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/kasen_keikaku/kluhh4000000dbmr-att/kluhh4000000dd33.pdf (2017.6.12 閲覧).

国土交通省 河川局 , 2004b : 計画高水等に関する資料. http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/ishikari-2.pdf (2017.6.12 閲覧).

国土交通省 河川局 , 2004c : 流水の正常な機能を維持するため必要な流量に関する資料. http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/

- ishikari-3.pdf (2017.6.12 閲覧).
- 国土交通省 河川局, 2004d: 石狩川水系流域及び河川の概要. http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/ishikari-4.pdf (2017.6.12 閲覧).
- 国土交通省 北海道開発局 石狩川流域委員会,
石狩川水系河川整備計画の一部変更について.
https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/kasen_keikaku/kluhh4000000hzt9.html (2018.1.4 閲覧).
- 国土交通省 北海道開発局, 北海道総合開発計画. <http://www.sdcg.org.uk/Climate-change-update.pdf> (2018.1.15 閲覧).
- 国土交通省 気象庁, 警報の危険度分布. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/riskmap.html> (2018.1.15 閲覧).
- 国土交通省 気象庁, 流域雨量指数. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/ryuikishisu.html> (2018.1.15 閲覧).
- 国土交通省 関東地方整備局, 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の鬼怒川における洪水被害等について. 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の鬼怒川における洪水被害等について (2018.1.15 閲覧).
- 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害の概要 速報版 vol.6. 平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害の概要 速報版 vol.6 (2018.1.15 閲覧).
- 京都大学 水文・水資源研究室, 2016: 1K-FRM/DHM. <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html> (2016.11.9 閲覧).
- 松原隆之, 土田和稔, 日比谷正則, 2015: SCE-UA 法を適応した分布型流出モデルの代表パラメータ設定手法に関する検討. 土木工学論文集 B1, 71, 265-270.
- Milly, P. C. D., R. T. Wetherald, K. A. Dunne and T. L. Delworth**, 2002: Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415, 514-517.
- 内閣府防災担当, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨による被害状況と政府の対応等について. http://n-bouka.or.jp/local/pdf/2017_10_04.pdf (2018.1.15 閲覧).
- 中津川誠, 高田賢一, 小倉勉, 2004: 天気図からみた北海道の大雨動向について. 水文・水資源学会 2004 年研究発表会要旨集, 240-241.
- 中津川誠, 濱原能成, 星清, 2003: 積雪変化を考慮した長期流出計算. 水工学論文集, 47, 58-63.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe**, 1970: River flow forecasting through conceptual models part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- New York City**, A STRONGER MORE RESILIENT NEW YORK. www.nyc.gov/html/sirr/html/report/report.ashtml (2018.1.15 閲覧).
- 二宮洸三, 2006: 気象がわかる数式入門. オーム社, 184pp.
- 二宮洸三, 2005: 気象解析の基礎. オーム社, 244pp.

- 二宮洸三 , 2002 : 図解 気象の基礎知識. オーム社, 226pp.
- 小倉義光 , 2016 : 一般気象学 第2版改訂版. 一般財団法人 東京大学出版会, 309pp.
- 岡田翔太, 鈴木善晴, 喜田智也 , 2013 : GCM 出力に基づいた日本域における降雨イベントの将来変化に関する研究. 土木学会論文集, 69, 373-378.
- 大川隆 , 1992 : 北海道の動気候. 北海道大学図書刊行会, 246pp.
- Ragab, R., D. Moidinis, J. Albergel, J. Khouri, A. Drubi and S. Nasri** , 2001 : The HYDROMED model application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs 2 : rainfall-runoff model applications to three Mediterranean hill reservoirs. Hydrology and Earth System Sciences, 5, 554-562.
- 佐藤嘉展, 森英祐, 浜口俊雄, 田中賢治, 小尻利治, 中北英一 , 2009 : 気候変動に対する先行適応のための流域スケールでの洪水及び渇水リスク評価. 京都大学防災研究所年報, 52, 573-586.
- 佐藤嘉展, 森英祐, 浜口俊雄, 田中賢治, 小尻利治, 中北英一 , 2009: 気候変動に対する先行適応のための流域スケールでの洪水および渇水リスク評価. 京都大学防災研究所年報, 52, 573-586.
- 佐藤嘉展, 道広有理, 鈴木靖, 中北英一, 小尻利治 , 2010 : 気候変動に伴う木曽三川流域の流況予測. 京都大学防災研究所年報, 53, 723-735.
- 椎葉充晴, 立川康人, 市川温 , 2010 : 例題で学ぶ水文学. 森北出版株式会社, 224pp.
- 新保明彦 , 2001 : レーダー・アメダス解析雨量 (I) . 天気, 48, 579-583.
- 新保明彦 , 2001 : レーダー・アメダス解析雨量 (II) . 天気, 48, 777-784.
- 総合科学技術会議 環境研究開発推進プロジェクトチーム , 2006 : 地球規模水循環変動研究の最前線と社会への貢献. www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/pub/H17water_report/water_top.html (2017.01.04 閲覧) .
- 立川康人, 永谷言, 寶馨 , 2004 : 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発. 水工学論文集, 48, 7-12.
- 立川康人, 滝野晶平, 藤岡優子, 萬和明, キム スンミン, 椎葉充晴 , 2011 : 気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響予測. 土木工学論文集 B1, 67, 1-15.
- 立川康人, 森信治, キム スンミン, 萬和明 , 2015 非定常水文頻度解析手法を用いた極値降水量の変化予測-地球温暖化予測情報への適応-. 土木学会論文集 B1, 71, 367-372.
- 立川康人, 滝野昌平, 藤岡優子, 萬和明, キムスンミン, 椎葉充晴 , 2011 : 気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測. 土木学会論文集 B1, 67, 1-15.
- 高瀬信忠 , 2001 : 河川工学入門. 森北出版株式会社, 201pp.
- 滝野昌平, 立川康人, 椎葉充晴, 山口千裕, 萬和明 , 2010 : 地球温暖化に伴う日本の河川流況変化の推計. 水工学論文集, 54, 475-480.
- 田村隆雄, 端野道夫, 橘大樹 , 2006 : 一般中小河川にも適応可能な雨量・水位データを用いた流出解析モデルパラメータの同定方法. 水工学論文集, 50, 355-360.

- 田中智大, 立川康人, 萬和明 , 2014 : 分布型流出モデルをネスティングする流出・氾濫一体型モデルの構築. 土木学会論文集 B1, 70, 1495-1500.
- 谷岡康, 福岡捷二, 谷口将俊, 小山幸也 , 1998 : 都市中小河川の洪水特性. 土木学会論文集, 42, 1-12.
- Yamada, T. J., J. Sasaki and N. Matsuoka** , 2012 : Climatology of line-shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010. Atmos. Sci. Let., 13, 133-138.
- 山本隆弘, 陸旻皎 , 2009 : 分布型水文モデルによる長期流出計算とその河川計画への応用可能性. 水文・水資源学会誌, 22, 198-208.
- 吉崎正憲, 加藤輝之 , 2007 : 豪雨・豪雪の気象学. 応用気象学シリーズ, 朝倉書店, 187pp.

付録

GrADS を利用した図の作成コマンド

MSM データを利用した計算とその表示

```
*_____

*usage: ( after opening grads and control file )

* ga- > run msm-ept-e-es-mr.gs

* ga- > d variables

*_____

*

* p = atmospheric-pressure (pa)

* T = temperature (K)

* RH = relative-humidity (%)

* pt = potential-temperature (K)

*ept = equivalent-potential-temperature (K)

* e = water-vapor-pressure (hPa)

* es = saturated-water-vapor-pressure (hPa)

* mr = water-vapor-mixing-ratio (kg/kg)

* q = specific humidity (kg/kg)

*

* pow = power ( ruijo )

* exp = exponent ( e no x jo )

*

*_____

*****SETTING*****

*

set gxout shaded

set mpdset hires
```

```

set LON 125 150

set LAT 30 46

set grads off

*

*****CALCULATION*****

*

tmp=t

pt=tmp*pow(1000/(p/100),0.286)

es=6.1173*10*10*exp((-2.501*pow(10,6)/461.5)*((1/tmp)-(1/273.2)))

es=621.97*(es/(p-es))

w=(rh*ws)/(100*1000)

ept=(tmp+((2.501*pow(10,6))/1004)*w)*pow((1000/(p/100)),287/1004)

e=rh/100*es

mr=0.622*e/(p-e)

q=mr/(1.0+mr)

*

*****DISPLAY*****

*

set clevs 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360

d ept

set arrscl 1 50

d skip(u,8,8);v

cbarn 1 0 5.5 0.5

*

*_____

*

```

相当温位の鉛直断面における時間変化

```

set xlopts 1 2 0.18

```

```

set ylopts 1 2 0.18

color 300 350 -kind steelblue- > deepskyblue- > skyblue- > greenyellow- > yellow- > darkorange- >
red

set clevs 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350

set clevs 315 317.5 320 322.5 325 327.5 330 332.5 335 337.5 340

d ept

cbarn 1 0 5.5 0.5

set arrscl 1 15

set ccolor 1

d u;v

```

総降水量の表示

```

set LON 140.5 143.5

set LAT 42.5 44.5

set grads off

set mpdset hires

set gxout shaded

set map 1 1 5

set xlopts 1 4 0.15

set ylopts 1 4 0.15

color 0 200 -kind snow- > lightcyan - > deepskyblue- > lawngreen - > yellow- > orange- > tomato

set clevs 0 25 50 75 100 125 150 175 200 250 300

set parea 1.5 9.5 1.5 8

d rain

cbarn 1.5 0 5.5 0.5

```

GMT を利用した図の作成コマンド

地図

```
#!/bin/bash
```

```

gmtset PAPER_MEDIA=a4+
makecpt -Cglobe.cpt -T-6000/6000/250 -Z > dem.cpt

####input-data

input1=riverlines.txt
input2=ishikari_bound.txt
input3=point_obs.txt
input4=point_dam.txt
input5=numbers.txt
input6=mount.txt
input7=river_name.txt
input8=timei.txt

####output-data

output=area.eps

#-Rsetting

range=140.5/143.5/42.3/44.5

#

grdimage Hokkaido_50m.grd -R$range -JM15 -Cdem.cpt -P -Q -X3 -Y5 -K > $output
psbasemap -R$range -JM15 -Ba0.5f0.5/a0.5f0.5 -P -K -O > > $output
psscale -Cdem.cpt -Ba2000g250f500:"Elevation(m)": -D7.5/-1.2/17/0.5h -K -O > > $output
#
psxy $input1 -JM -W3/67/135/233 -M -R -P -V -K -O > > $output
psxy $input2 -JM -W10/229/0/30 -M -R -P -V -K -O > > $output
psxy $input3 -JM -R -W0.25/25/25/25 -G255/255/255 -Sc0.45 -K -O > > $output
psxy $input4 -JM -R -W0.25/25/25/25 -G231/232/226 -Sn0.48 -K -O > > $output
psxy $input8 -JM -R -W0.25/25/25/25 -G242/216/223 -Sd0.50 -K -O > > $output
#
pstext $input5 -JM -R -C0/0 -D0/0 -P -K -O > > $output
pstext $input6 -JM -R -C0/0 -D0/0 -W250/250/250,O -G25/25/25 -C0.1 -P -K -O > > $output
pstext $input7 -JM -R -C0/0 -D0/0 -G255/79/25 -C0.1 -P -K -O > > $output
#

```

```

pslegend -Dx0.3/14/5.0c/1.8c/TL -JM -R -F -O ;END > > $output
S 0.2c c 0.30c 255/255/255 0.2p 0.5c Observation Points
S 0.2c n 0.35c 231/232/226 0.2p 0.5c Dam Points
S 0.2c d 0.35c 242/216/223 0.2p 0.5c Place name
END

```

日付軸のグラフ

```

#!/bin/bash

$gmtset PAPER_MEDIA=a4$
$gmtset PLOT_DATE_FORMAT=mm/dd$
$gmtset OUTPUT_DATE_FORMAT=mm/dd$

out=output.ps

in1=input1.txt
in2=input2.txt
in3=input3.txt
in4=input4.txt

range=2010-08-21T00:00:00/2010-08-31T23:00:00/0/10000

size=X22T/13

Xscale=a1Df1Dg1D
Yscale=a1000f250g1000

#black in1

psxy $in1 -R$range -J$size
-B$Xscale:"Date":/$Yscale:"Flow(m3/s)":WSne
-W8/25/25/25 -X5 -Y3 -K > $output

#blue in2

psxy $input2 -R$range -J$size
-B -W8/15/82/188 -K -O > > $output

#green in3

psxy $input3 -R$range -J$size

```

```
-B -W8/0/255/65 -K -O > > $output
```

```
#red in4
```

```
psxy $input4 -R$range -J$size
```

```
-B -W8/255/0/55 -K -O > > $output
```

```
pslegend -Dx14.1/13/5c/4.5c/TL -G255/255/255 -JX -R -F -O < < END > > $output
```

```
S 0.2c s 0.3c 25/25/25 0.25p 0.4c ishikari-ohashi
```

```
S 0.2c s 0.3c 188/189/194 0.25p 0.4c iwamizawa-ohashi
```

```
S 0.2c s 0.3c 0/255/65 0.25p 0.4c tsukigata
```

```
S 0.2c s 0.3c 255/0/55 0.25p 0.4c naie-ohashi
```

```
END
```

2 軸のグラフ

```
#!/bin/bash/
```

```
$gmtset PAPER_MEDIA=a4$
```

```
$gmtset PLOT_DATE_FORMAT=mm/dd$
```

```
$gmtset OUTPUT_DATE_FORMAT=mm/dd$
```

```
rain=rain.txt
```

```
flow=flow.txt
```

```
out=output.ps
```

```
in1=input1.txt
```

```
in2=input2.txt
```

```
in3=input3.txt
```

```
in4=input4.txt
```

```
rangeSW=2010-08-21T00:00:00/2010-08-31T23:00:00/0/10000
```

```
rangeNE=2010-08-21T00:00:00/2010-08-31T23:00:00/0/400000
```

```
size=X22T/13
```

```
size2=X22T/-13
```

```
afgS=a1Df1Dg1D
```

```
afgW=a1000f250g1000
```

```

afgN=a1Df1Dg1D
afgE=a40000f10000g40000

psbasemap -R$rangeSW -J$size -B$afgS:"Date";/$afgW:"Flow (m3/s)":WSne
-X3.5 -Y4 -K > $out

psxy $flow -R -J$size -W12 -K -O > > $out

psbasemap -R$rangeNE -J$size2 -B$afgN/$afgE:"Rainfall (mm/h)":wsNE
-K -O > > $out

psxy $rain -J$size2 -R$rangeNE -Sb0.041u -G180/235/250 -K -O > > $out

psxy $in1 -R$rangeSW -J$size -W12/53/161/107 -K -O > > $out
psxy $in2 -R$rangeSW -J$size -W12/255/40/0 -K -O > > $out
psxy $in3 -R$rangeSW -J$size -W12/0/65/255 -K -O > > $out
psxy $in4 -R$rangeSW -J$size -W12/199/178/222 -K -O > > $out

pslegend -Dx15.5/9.9/6.2c/3.5c/TL -G255/255/255 -J$size -R$range
-F -O < < EOF > > $out

S 0.2c s 0.3c 0/0/0 0.25p 0.4c flow
S 0.2c s 0.3c 180/235/250 0.25p 0.4c rain
S 0.2c s 0.3c 53/161/107 0.25p 0.4c input1
S 0.2c s 0.3c 255/40/0 0.25p 0.4c input2
S 0.2c s 0.3c 0/65/255 0.25p 0.4c input3
S 0.2c s 0.3c 199/178/222 0.25p 0.4c input4

EOF

```