

(千葉大学審査学位論文)

アムール川流域における洪水
リスクに関する研究

2015年1月

千葉大学大学院理学研究科
地球生命圏科学専攻 地球科学コース
尤 欽

目 次

Abstract	1
第一章 洪水リスクに関する従来の研究	8
1. 洪水マネージメントに関する研究	9
1.1 洪水氾濫を形成するメカニズム	9
1.1.1 降水量	10
1.1.2 地形	11
1.1.3 土地利用変遷	12
1.2 ハザードマップ	13
1.3 流出モデル解析	15
2. 洪水リスクに対する工学的対応	16
3. 洪水リスク研究の重要性	18
4. 洪水リスク研究における GIS と RS との応用	19
5. 日本、欧米国家及び中国で洪水リスク研究について	21
5.1 日本	21
5.2 欧米	21
5.3 中国	22
6. アムール川流域における洪水リスク低減への提言	22
引用文献	23
第二章 アムール川流域の地域特徴	27
1. 地理的特徴	27

1.1	気候	28
1.2	地形	28
2.	流域の水文学的特徴 ^(*注)	28
2.1	アムール川流域における地表水の流向	29
2.2	アムール川流域における各地点水の集積量	29
2.3	アムール川流域における地表水の流路	30
2.4	アムール川流域における集水域の区画	31
3.	人文環境	32
3.1	中国	32
3.2	ロシア	32
3.3	モンゴル	33
4.	アムール川流域における洪水リスクに関する研究の必要性	33
	引用文献	34
	第三章 アムール川流域における河川氾濫の空間特徴	36
1.	はじめに	36
2.	使用データ	36
2.1	MODIS データ	36
2.2	AVHRR データ	37
2.3	SRTM データ	38
2.4	降水データ	38
2.5	Global Forest Change 2000-2012	38
3.	研究手法	39

3.1	河川氾濫域の抽出	39
3.2	氾濫水のノイズの判断	40
4.	結果及び検証	41
4.1	結果	42
4.1.1	1998年洪水氾濫状況	42
4.1.2	2013年洪水氾濫状況	42
4.1.3	1998年洪水と2013年洪水の氾濫の空間分布の検討	43
4.1.4	アムール川流域における氾濫履歴図	44
4.2	結果の検証	44
5.	考察	46
5.1	アムール川流域における洪水期間の降水の特徴	46
5.1.1	平年降水量	46
5.1.2	1998年の降水量とその分布	48
5.1.3	2013年の降水量とその分布	49
5.2	地形と氾濫域との関係	51
5.3	森林被覆変化と洪水氾濫との関係	53
6.	まとめ	54
	引用文献	56
	第四章 アムール川流域における水害リスク評価	
	—中国三江平原を例として	57
1.	はじめに	57
2.	研究地域	59

2.1	三江平原の地形	59
2.2	三江平原の気候	61
2.3	三江平原の水系	62
3.	使用データ	62
3.1	衛星リモートセンシングデータ	62
3.2	標高データ	63
3.3	資料データ	63
3.3.1	統計年鑑データ	63
3.3.2	中国 1 km メッシュ土地利用データ	63
3.3.3	水情年報	64
4.	研究手法	64
4.1	耕地面積の抽出	64
4.2	氾濫域の抽出	65
4.3	ハザードマップの作成	67
4.4	資料調査	67
5.	結果	68
5.1	耕地面積	68
5.2	氾濫域及びハザードマップ	70
5.2.1	氾濫域の抽出	70
5.2.2	ハザードマップ	73
5.3	農家の経済収入状況及び利農政策	75
6.	考察	76
6.1	耕地面積減少域の解明	76

6.1.1	山地域	76
6.1.2	沖積平野	76
6.2	耕地面積増加域の解明	77
6.2.1	水害リスクのない場所	78
6.2.2	河川近傍における相対的に水害リスクが小さい場所	78
6.2.3	水害リスクが高い場所	78
7.	まとめ	78
	引用文献	79
	第五章 結論	82
	謝辞	87
	付注	88
	表一覧	92
	図一覧	93

Abstract

As a continental river the Amur River flows the border of China and Russia, which has 205 million km² of basin area. The features of landform of the basin is made up with a lot of fluvial plains, which are easily get water flood. However, there is almost no consecutive embankment along the river course or dam for controlling the flood. Therefore, in the rainy season, immersion happened a lot and in large scale, made damage to the city and arable land. There are a little research about flood risk analysis, which is effective way to reduce the damage caused by the flood in Amur River Basin. And the research about whole river basin as an international zone is never. The Amur River Basin is important food production in China and Russia, and it is also play a crucial role in two countries concerning economy. Therefore, in this paper the author used remote sensing and GIS method to analyze the flood risk, aim to reduce the damage caused by flood in the Amur River.

The basic methods of flood analysis include integrated flood history mapping and make the map of the possibility of flood and so on. The Amur River Basin area is too wide to integrate flood information about whole zone. However, great floods happened in 1998 and 2013 and the water level exceeded the historical records. And those two events provide the valuable data for Amur River Basin flood management. So in this study, using the satellite remote sensing, the author make the historical flood maps of whole Amur River Basin.

The difference between continental river flood and flash flood in Japan is the former has a long inundation period. Long inundation period in the rainy season

leads to error in classification of water area due to the cloud effect. Therefore an algorithm to extract flood body by removing the error based on the characteristic of continental river such as long period of flooding, gentle slope in addition to high frequency of satellite observation. Moreover, DEM is used to confirm the accuracy of the extraction of flooded area by examining slope of water body and proximity to main river course.

Historical flood maps of the Amur River Basin that record flooded area for two big flood events happened in 1998 and 2013. Using these maps, the area damaged by the floods, characteristics of the Inundation are examined. This study achieved the creation of historical flood maps of whole Amur Basin for the first time. It will provide valuable information for the Amur River basin management.

The historical flood maps reveal the vulnerable areas for flood in Nen River-Songhua River basin, Sanjiang Plain and middle and low stream in Amur River. The author also discussed the relationship between the distribution of twice-flooded areas and precipitation distribution, terrain and forest cover change.

The Amur River Basin is too vast to get sufficient historical record of flood event. Therefore, Sanjiang Plain in China is taken as a typical flood plains in the Amur River Basin to analyze flood risk. The Sanjiang Plain is an important food production base in China, and 75 % of food production as commodity is exported to the outside. Development of arable land made loss of wetland and forest succession, which brought environmental problems. Especially, due to the geographical features of Sanjiang Plain, it got frequent flood. The flood have big

influence to the crop production. The flood control facilities in Sanjiang Plain not have been completed, and effects of dam and embankment haven't appeared immediately. Therefore, the flood risk analysis is an effective means to avoid damage of flood to agriculture. So in this study, in order to increase food production and to guarantee the security of food production, the hazard map is made by satellite remote sensing in Sanjiang Plain. The flooded area was extracted from NDVI value changes in vegetation damage due to the flooding, and flooded area from 1998 to 2011 was also extracted to assign risk level of flood. The risk were defined by the frequency of flooding in 14 years. Arable land and its time changes were extracted from seasonal NDVI variation, and confirmed the status of arable land area and its changes in Sanjiang plain in recent years. As a result, the hazard map for arable land in Sanjiang Plain was created by using the recent arable land area to mask hazard map of Sanjiang Plain.

As results, the author can identify the high risk area to flood. About 80% of arable land had flood risk in Sanjiang Plain, and the author cleared available arable land had been used in whole zone.

Based on the relationship between the change of arable land area and flood risk, flood risk potential factors were considered. The result was that the driving force to reduce the area of arable land in Sanjiang Plain was not only the harsh natural environment, but also effect of government policy, such as return arable land to forest or return arable land to wetland policies. On the other hand, arable land in some places of high risk got increased, because agricultural insurance and the advantage of agricultural policy to support

farmers, also the superiority of location which near to the urban and highway got a lot profit, so the enthusiasm of cultivation may be raised. And the low risk areas also got increased.

In this study, the author studied the Amur River Basin, so as to make the whole basin historical flood maps using the satellite remote sensing. The historical flood maps could be used as a basic material of the coming flood management. However, due to the lack of flood events, Sanjiang Plain, which is a typical floodplains in the Amur River Basin, was taken to make up the flood hazard map by using satellite imageries in 14 years, and the flood risk analysis was carried out for Sanjiang Plain.

要 旨

アムール川は中国とロシアの国境線を流れる大陸河川であり、205 万 km² の広大な流域面積を持つ。その流れが形成する流域地形の特徴として氾濫原が発達した複数の河成平野を流域内に形成していることが挙げられる。しかし、河道には連続堤防はほとんど設置されておらず、洪水調節用のダムはない。そのため雨期には平野において浸水が常に発生し、規模が大きくなると都市や農地に被害を及ぼす。洪水リスク分析は洪水による被害を軽減する有効な手段であるが、アムール川流域における検討は少なく、国際河川であるため流域全体を対象とした検討はまだなされていない。アムール川流域は中国、ロシアの食糧生産地として期待されている重要な地域であるとともに、流域内に存在する大都市は両国の経済にとって重要な役割を果たしている。したがって、本研究ではアムール川流域における水害による被害を軽減するため、リモートセンシング及び地理情報システムを手法として洪水リスク分析を行うことを目的とする。

洪水リスク分析の基本的な手法として洪水氾濫の履歴を集積し、浸水の可能性を示すハザードマップとして用いる方法がある。アムール川流域は面積が広く、全流域の氾濫情報の集積は困難であるが、1998 年及び 2013 年に歴史水位の記録を上回る洪水が発生した。この 2 回の洪水の浸水履歴はアムール川流域の洪水マネジメントに対して、貴重な資料を提供するはずである。そこで、本研究では衛星リモートセンシングを用いて、アムール川流域全体を対象とした氾濫履歴図を作成した。

大陸河川の洪水は日本のフラッシュフラッドと異なり、洪水氾濫期間が長い。この期間は雨期でもあるため、衛星画像解析において雲とその陰は水面の抽出結果に影響を与える。そこで、誤分類を除去するため本研究では長い氾濫期間、

緩い水面勾配といった大陸河川の特徴，および短い回帰時間を持つ衛星観測の特徴に基づく水面抽出アルゴリズムを開発した。さらに，DEMを用いた精度検証方法を用いて，抽出した氾濫域の精度を確認した。

その結果，1998年と2013年の2回の大洪水イベントを対象としたアムール川流域の浸水履歴図を作成することができた。この図を用いてアムール川流域における水害脆弱地域の記載を行った。本研究で初めて作成された流域全体の浸水履歴図はアムール川の流域管理に対して貴重な情報を提供すると考えられる。

ここで作成した浸水履歴図からは，嫩江・松花江流域，三江平原，アムール川中・下流域における氾濫に対して脆弱な地域を地図化することができた。2回の洪水イベントを対象とした氾濫域の分布は降水量分布，地形および森林被覆の変化と重ね合わせて解釈した。

アムール川流域は広大であり，その洪水リスク分析には1998年と2013年の事例だけでは不十分である。したがって，本研究ではアムール川流域における典型的な氾濫原である三江平原を例として洪水リスク分析を行った。

三江平原は，中国の重要な食糧生産基地である。生産する食糧は75%が商品として域外へ輸出される。耕地開拓に伴う湿地の消失や森林遷移による環境問題，特に三江平原の地理的特徴に起因する頻繁な水害の発生は作物の生産量に大きな影響を与えている。三江平原では治水施設の整備は不完全であり，建設が進むダムや堤防の効果は直ちに現れない。よって，水害リスク分析は効果的に農業被害を避ける手段として重要である。そこで，本研究では，食糧生産安全保障及び食糧生産量の増加を担保するため，洪水氾濫域を衛星リモートセンシングにより抽出し，水害リスクの地図化を試みた。

洪水氾濫域は湛水による植生被害をNDVI値の変化から抽出するアルゴリズム

ムにより地図化し、1998年～2011年の三江平原の氾濫域を年ごとに抽出し、14年間における氾濫の回数をリスクのレベルとして三江平原における水害リスクを地図化した。また、農事歴に基づきNDVIの季節変化から耕地を抽出するアルゴリズムを構築し、近年の三江平原の耕地面積変化及び耕地面積の現状を確認するとともに、耕地分布図と水害リスク図を結合することにより三江平原における耕地水害ハザードマップを作成した。

その結果、小興安嶺山脈・完達山山脈の山麓及び河川に沿った平野などの氾濫リスクが高い地域を特定することができた。三江平原では耕地面積の約8割が洪水氾濫のリスクを抱えており、三江平原内で耕作に適した場所は、全て耕作地として利用されていることが明らかとなった。

耕地面積の変化と水害リスクとの関連性に基づき、潜在的な水害リスクに対する要因も検討した。その結果、三江平原において耕地面積を減少させる駆動力は厳しい自然環境だけではなく、政府の政策、すなわち“退耕還林”、“退耕還湿”政策の効果が考えられた。一方、耕地を増やす原因としては、農家が農業保険及び利農政策で支えられていることと、都市、高速道路との近接性といった地理的な優位性が収益につながるため、耕作の熱意が上がったことが考えられる。洪水リスクが少ない地域では耕地面積は増加していた。

本研究では、アムール川流域を研究対象として、衛星リモートセンシングを用いて流域全体の洪水氾濫履歴図を作成した。本研究で作成された洪水氾濫履歴図は今後の洪水マネジメントの基礎的な資料として活用することができる。ただし、洪水イベントの事例が不足しているため、アムール川流域内の典型的な氾濫原である三江平原を対象として14年間の浸水図を作成し、耕地水害ハザードマップを作成し、三江平原の水害リスクの検討を行った。本研究の成果の現場への実装が今後の課題である。

第一章 洪水リスクに関する従来の研究

日常の飲用水から、鋼鉄を洗練する工業用水や、灌漑のための農業用水や、洗濯、調理に使う生活用水まで、水は人間の生活と互いに密接な関係にある。しかし、水は人間の健康及び財産を脅かすこともある。洪水は人間に巨大な損失をもたらす自然災害ともなる。人間が洪水に抵抗する歴史は西暦紀元前から始まっている。中国では4000年前の「大禹治水」（拼音で“Da Yu Zhi Shui”，意味は禹王の治水である）という歴史記録がある。特に、その時から洪水に抵抗する方法は、洪水を土で塞ぎ、通水を妨げるものを掘って取り出すことで水の流れを良くする方法をすでに見つけている（高橋・鎬木，1992）。水と人間活動とは関係が深く、昔から河川の周辺に人が集まっていた。人類文明の発達に伴い、流域での人間活動範囲はますます広くなり、財産の集中度や、人口密度も高くなってきた。その結果、洪水の氾濫はさらなる損失をもたらした。自然災害の中で経済損失が一番高く、影響を受けた人数が一番多いのは水害である（Taubebock *et al.*, 2011）。

Munich *et al.* (2009) は1980年から2008年までの世界における自然災害発生回数をまとめた。図1.1に表すように、過去約30年間で水害の発生頻度の増加は著しい。2008年のみでも、自然災害が750回発生し、その内、水害が292回である。水害の発生回数は2008年の自然災害のおおよそ4割を占める。

近年、人間が水害を抑制することの重要性を唱える研究は増えているが、災害を全くなくすることが出来ないため、最低限に軽減する必要があると認識し、「減災」という言葉が出てきた。そのため、洪水リスクに関する研究はますます様々な研究領域にまたがっている。

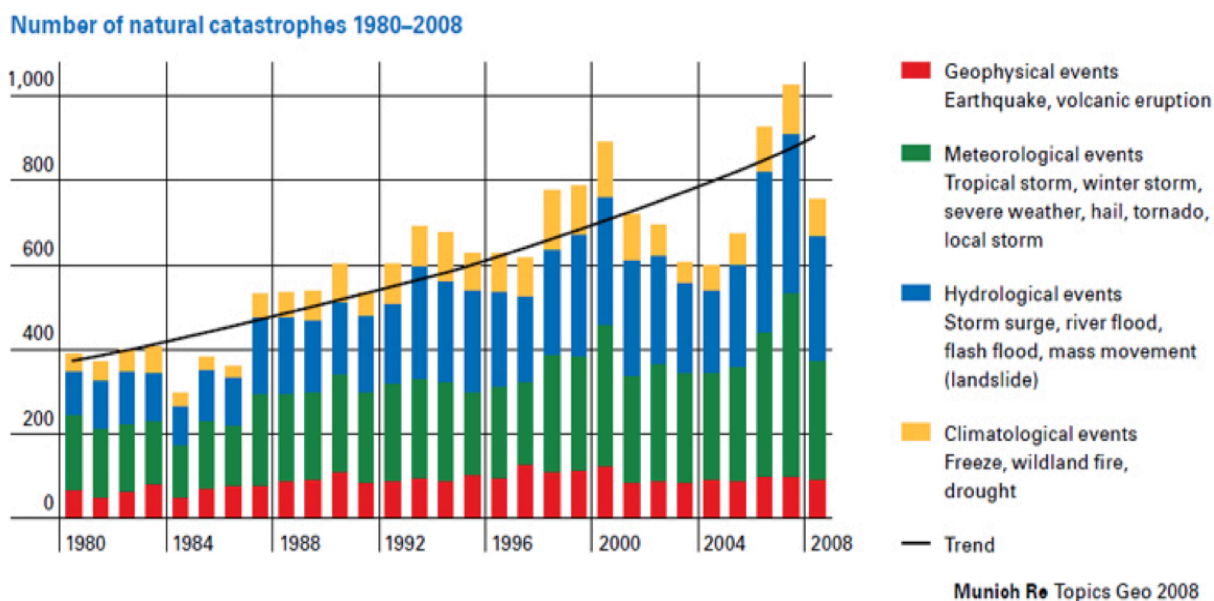


図 1.1 1980～2008 年自然災害発生回数 (Munich *et al.*, 2009)

1. 洪水マネージメントに関する研究

「減災」の有効な手段の一つとして、洪水マネージメントはよく検討されている。降水量とその分布，地域の地形及び土地利用の転遷は洪水氾濫を形成する要因である。それらの分析により洪水予警報が可能となる。特に氾濫の発生域分布は地形の特徴により記憶性がある。

一方，ハザードマップの作成と流域の流出モデル分析により洪水リスクを予見することができ、「減災」に有益な効果を果たすため，洪水マネージメントによく検討されている手法となっている。

よって，アムール川流域の洪水リスクを低減するため，これまでの洪水マネージメントの経験をレビューする必要がある。

1.1 洪水氾濫を形成するメカニズム

氾濫域における降水の特徴および地形が氾濫域を形成する要因として検討さ

れている。一方，都市化に伴って耕地の宅地化や地表面の舗装化，人口の増加による林地，湿地の耕地化および土地資源の過度開発による土地利用状況および土地被覆状況が変化することで，雨水の貯留・浸透能力が低下しているため，氾濫を形成する要因として重視されている。

1.1.1 降水量

洪水氾濫中，降水量の異常および空間分布の不均一性は氾濫を直接的に導く原因である。1998年6月から中国長江流域において降水量が多かったことによって洞庭湖及び鄱陽湖で洪水氾濫が発生した。それから7，8月に降水域が長江に沿って東進し，流域規模の洪水が発生した。洪水期間（6，7，8月）には武漢（Wuhan）で最大総降水量835 mmとなった，宜昌（Yichang）で日最大降水量が242 mmに達した（Li *et al.*, 1999）。2008年8月28日～31日には日本の関東地方と東海地方を中心に短時間豪雨で愛知県岡崎市伊賀川が氾濫することによって人的被害が発生した。最大降水量は200年確率の60分雨量を超えた146.5 mmであった（鷲見，2009）。洪水発生の予測，及び氾濫を引き起こす降水の特徴を明らかにするために，降水量についての研究及びデータセットがくまなく整備されている。

Barrett (1973) は，雲の形状および雲のタイプに基づいて雲を分類し，それらと降水量との関係の経験値により，降水量を推定できることを示した。Griffith *et al.* (1981) および Scofield (1987) は，対流性降水に対してGMSの赤外バンドと高分解能可視光バンドの雲画像を用いて半時間ごとの降水量を推定した。日本の環境省の環境研究総合推進費に受託された，APHRODITE's Water Resources (Asian Precipitation-Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources) プロジェクトはアジア地域における

雨量計観測による日降水量を空間内挿で日降水量グリッドデータに作成し、ウェブで公開したものである (APHRODITE's Water Resources, 2006)。NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (NOAA, 2010) は全世界の 40000 観測地点の気象データを提供し、衛星データを用いて気象に関する推算値も提供している。

そのため、本研究にとって、降水量及びその分布の推定により氾濫を推測できるように、アムール川流域における洪水イベントに対して氾濫を引き起こす降水の特徴をまず明らかにする必要がある。その際に様々なデータセット及び、降水量の推定方法が参考になる。

1.1.2 地形

氾濫域の地形特徴も氾濫を引き起こす直接的要因の一つである。単に勾配しか考えない場合には、勾配が大きい地域では水は重力により排水しやすくなる。勾配が小さい下流地域では水流が集中し、排水能力も低くなるため、一般的に湛水しやすい傾向にある。

具体的に地形と洪水氾濫との関係について熊木ら(1995)は、実例の分析により洪水氾濫と地形との関係を明らかにした。谷底平野では、その質が多様であるため一概には言えないが、平野の幅が狭いため氾濫水が広がらず、洪水が土砂を多く含むことから、いったん氾濫すると被害は大きくなる傾向がある。洪水時には土砂災害も多い。扇状地では、土砂被害もあるが、氾濫しても排水が早い。両岸に堤防がある川では、天井川を形成しやすく、それが氾濫すると新しい流路が出来る。扇状地では天井川が出来やすい傾向がある。氾濫原では、旧河道は氾濫水の流路になることが多い。後背湿地は排水条件が悪いため、氾濫水が長期間湛水し、水深も深い。三角州や干拓地では、洪水氾濫と共に高潮

の被害を受けやすい。海岸平野では、浜堤、砂州は冠水しにくいものの、津波と高潮は乗り越えられる。破壊された堤防の付近では、侵食と堆積が発生する。台地では、水害をあまり受けない。春山・志田 (2006) によると自然堤防では一時的に冠水しても離水が早い。盛土地が広い地域では洪水氾濫の初期にその力が緩和される。また、メコンデルタの水害リスク評価により、地形が洪水氾濫に影響を与えることを明らかにしている。

アムール川流域で、嫩江・松花江、アムール川、ウスリー川、ゼヤ川などの流れによる河成平野はよく分布している。これから湛水時間や、被害の程度などを判断できるように、各河成平野の微地形を判読する必要がある。

1.1.3 土地利用変遷

都市化の推進によって、耕地が宅地に改変され、地表面が舗装される現象が多く見られる。食糧の需要によって、林地・湿地が耕地化されることも随所に見られる。それらがもたらすのは雨水の貯留・浸透能力の低下である。近年、土地利用・被覆の変化、特に湿地と林地の減少が氾濫を起こしやすくする要因として検討されている。

Li *et al.* (1999) によると森林が洪水を緩和する作用がある。彼らは 1998 年の中国嫩江・松花江流域における水害は、平原周辺の山地における森林被覆が 1949 年の 70~80% から 1998 年の 30% に減少したと密接に関わるとしている。Meng *et al.* (1999) によると湿地は遊水池の効用がある。湿地を大幅に開墾して遊水池機能を失うことは 1998 年嫩江・松花江流域洪水氾濫のもう一つ要因と考えられている。

アムール川流域では農業も盛んである。農業を発展させるため他の土地利用タイプから転用するケースが多い。一方、農作物は洪水に対する脆弱性が高く、

洪水による被害が厳しい。アムール川流域は 205 万 km² の広大な面積をもつが、土地利用変遷状況及びその駆動力を確認することは解くべき課題の一つである。

1.2 ハザードマップ



図 1.2 ハザードマップの例 (国土交通省より)

洪水を抑制することに対する認識が「洪水のコントロール」から「洪水のマネージメント」に転換するに伴って、ハザードマップが洪水マネージメントの一つの重要な手段になった。ハザードマップについて語義から簡単に理解すると、「ハザード」を地図化にするものである。氾濫域の分布は地形に対して記憶性をもつため、地形に関連してよく検討される。図 1.2 に東京都における 23 区

の一部分の洪水ハザードマップを示す (国土交通省, 2010)。図は浸水深をハザードのレベルとし、洪水リスクをマッピングしており、このマップはさらに氾濫水の進路の予測、避難時の路線および避難場を含む。日本では 1980 年代からハザードマップの作成が進められており、2005 年までに全国 520 市街区が作成された (Ma *et al.*, 2005)。

Islam and Sado (2000) および Twumasi and Raymond (2002) は、GIS ソフトを用いて、地形データを用いて冠水しやすさを示すハザードマップを作成した。

現実にハザードマップは単にリスクを表すことだけではなく、土地利用の計画や、防災および避難対策の制定や、洪水保険等にも応用されている (Gu,2010)。

ハザードマップは様々なものが作成されている。氾濫の頻度は重要なリスク指標としてもよく検討されている。Dewan and Islam (2007) は地形データに土地被覆データを加えて、それらが洪水の頻度および水深に影響を与えることに基づき、バングラデシュの首都ダッカの洪水ハザードマップを作成した。Femandez *et al.* (2010) は GIS を用いて MCDA (Multi Criteria Decision Analysis) に基づき、都市のハザードマップを作成するモデルを作り、アルゼンチンの都市洪水ハザードマップを作成した。

氾濫頻度を算出するため、洪水履歴の検討は極めて重要である。過去に氾濫した地域で再び氾濫が起こる可能性が高いという経験則から見ても洪水履歴は洪水マネージメントでリスク評価の基礎として一番検討すべきものである。よって、本研究ではアムール川流域の洪水リスク評価を行う際に、洪水氾濫履歴の作成から始めたいと考える。

もちろんハザードマップの研究および応用に関して、製図技術および情報の

獲得・処理の技術の発展に伴う、より精度の高いハザードマップの作成、および新しいマップの現場への実装は挑戦的な研究課題である。

1.3 流出モデル解析

洪水リスクマネジメントの有効な手段の一つとして流出モデル解析は洪水氾濫を形成するメカニズムを物理的に考慮し、流出を算出し、洪水や濁水を予測することが出来る手法である。

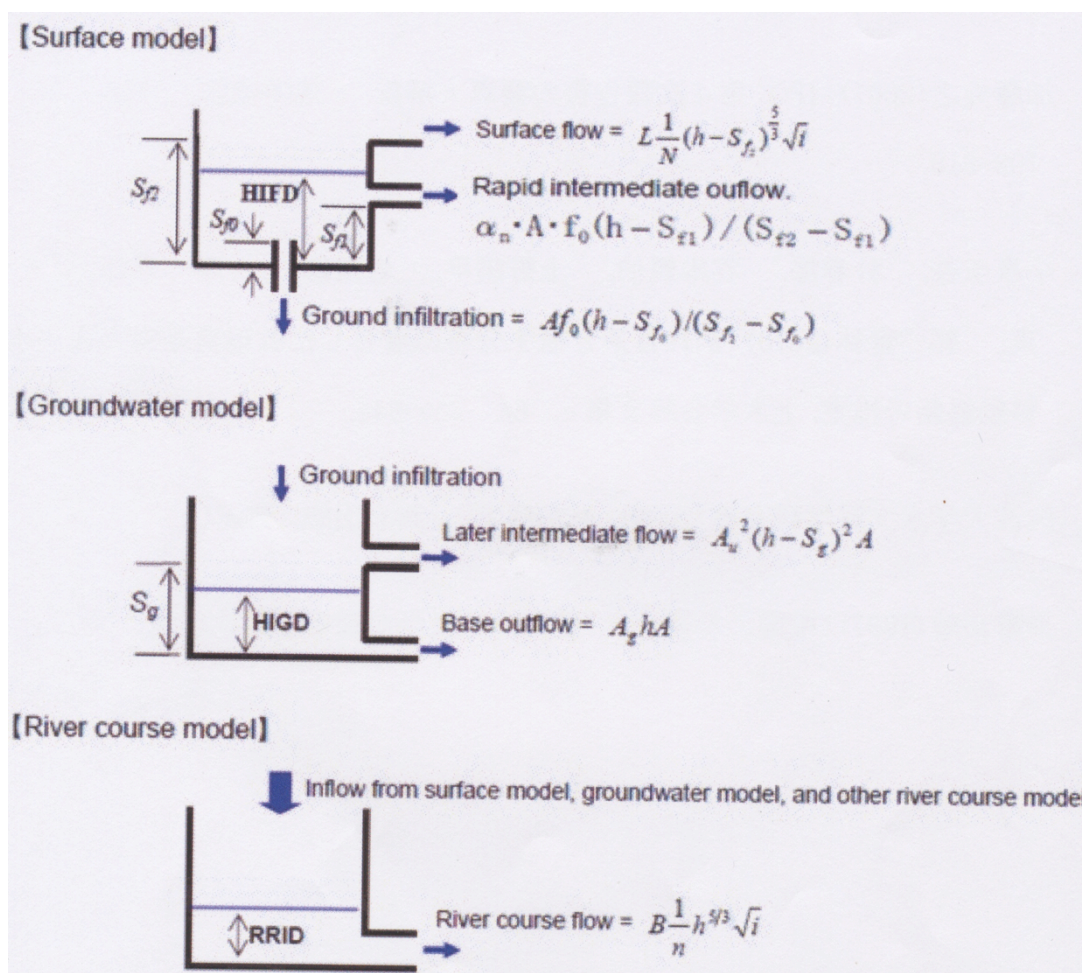


図 1.3 タンクと計算の模式図 (深見ら, 2009)

これまでに多くのモデルが提案され、使用されてきた。日本において慣用さ

れている代表的なモデルの一つであるタンクモデルはブラックボックスモデルである。このモデルは降水量，蒸発散量を与えて，タンク内の貯留量から各孔からの流出量を計算できる。降雨流出現象の非線形な応答も再現でき，実測されたハイドログラフを簡単な計算で良く再現できる。ブラックボックスモデルだが，流域内の貯留量が多ければ流出も多いという基本的な性質を具備する(菅原，1972)。図 1.3 に模式図を示す。

Beven and Kirkby (1978) による分布型モデルである TOPMODEL の構築背景は地下水位が地表勾配と平行であること，また透水係数が貯留不足量と指数関数の関係であること等がある。TOPMODEL には対象の流域面積の上限は 500km^2 との制限がある。さらに広い流域に適用出来るように，Takeuchi *et al.* (2008) は，大きな流域を細かく分けて流量を計算できる BTOPMODEL (Block-wise TOPMODEL) を開発した。

流出モデルに入力するパラメータデータを獲得し，精度を高めて，今後の洪水リスクマネジメントに対してさらに信頼性が高いモデルを作ることが今後の課題である。

2. 洪水リスクに対する工学的対応

洪水リスクを軽減することに対しては，理論的な研究によってリスクを分析したり，経験をまとめたりすることと同時に，ある程度の工学的施設を実際に導入しなければ，理論的な研究のみでは良い効果は得られない。よって，洪水リスクを最低限に抑えるため，理論的な研究と合わせ，ある程度の工学的施設の導入も必要である。

ダムは川や谷を横断もしくは窪地を囲むように作られる土木構造物である。

多目的ダムによる洪水調節は日本において既に 60 年以上の経験をもっている (佐藤, 1978)。2005 年に竣工した益田川ダムは 32 年間をかけた自然調節方式の治水専用ダムであり, 常用洪水吐は洪水調節機能 ($950 \text{ m}^3/\text{s}$ を $570 \text{ m}^3/\text{s}$ に調節) と排砂機能 ($170 \text{ 万 m}^3/100 \text{ 年}$ を自然排砂) を併せ持つ (中村, 2008)。

堤防およびダムは洪水を低減する伝統的な手段として利用されている。そして, それらは土木工学研究および建設技術の発展に伴って, 洪水低減および調節の能力も伸ばしてくる。しかし, 研究対象とするアムール川流域では, 河川の沿岸に連続堤防はなく, 現有のダムはほぼ灌漑用, 発電用のための施設である。減災に役に立つように, 堤防とダムの整備を今後は検討しなければならない。

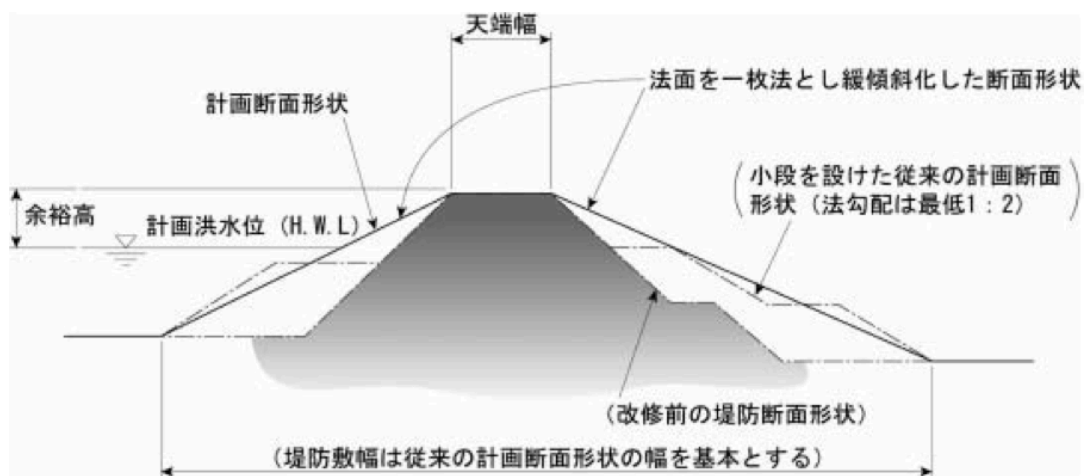


図 1.4 日本の河川堤防の基本構造 (吉川, 2011)

日本は地理的位置および地形・降雨の影響で洪水氾濫や津波などの自然災害が多発する国の一つである。一方, 日本では人口の半分, 資産の 3/4 が河川の洪水氾濫の危険性がある氾濫原に位置する (福成ら, 2007)。主要な氾濫平野は堤防により守られるようになっている。河川堤防は, 道路等と同様に, 国土

の存立基盤を形成している基本的な社会基盤施設である。日本の河川堤防基本構造は、i 計画高水位、ii 堤防余裕高、iii 堤防天端幅（堤防の頂の部分）、iv のり勾配（堤防斜面の勾配）で示される。典型的な堤防の構造は図 1.4 のように表される（吉川，2011）。今後アムール川流域における防災施設を整備する際に、日本の技術及び経験を役立てることができれば、大きな成果を得ることができる。

土地利用計画の際にも、内水氾濫（河川水を外水としてその氾濫は外水氾濫と呼ぶ、河川へ排水しにくいため発生した洪水氾濫は内水氾濫という）を減輕することが出来るように、さまざまな工学的なデザインが提案された。例として黄・磯部（2006）は氾濫時に洪水を誘導する機能を備える多目的道路整備を提案した。さらに 2004 年新潟・福島豪雨による三条市の氾濫シミュレーションを通じて、中小河川流域の整備において、提案の効果があることも検証した。アムール川流域における耕地は洪水に対する脆弱性が高いため、この多目的道路の開発は内水氾濫を解決する有効な手段であると考えられる。

3. 洪水リスク研究の重要性

洪水氾濫によって建物の浸水・破損や、耕地の被害や、人的被害などが発生する。そのため、もたらされる損失は洪水氾濫の規模により違う。2002 年にヨーロッパのエルベ川の氾濫によってもたらされた経済損失が、チェコ共和国ではおよそ 30 億ドルとなり、ドイツでは 90 億ドル以上となった（Becker and Grunewald, 2003）。毎年世界全体で洪水氾濫によって生命を失う人は約 20,000 人といわれる（Smith, 1996）。

水系感染症とは水を介して細菌やウイルス、原虫が体内に侵入し増殖するこ

とで下痢や嘔吐，発熱等の症状を引き起こす感染症である (Gordon・金子，1992)。洪水氾濫発生時に蔓延することが多い。相澤ら (2006) は，メコン河における洪水規模による水系感染症のリスク変動を検討し，i 洪水規模の拡大に伴い，大腸菌群の分布範囲は拡大し，ii 閉鎖的水域においては水位上昇と共に大腸菌群濃度は上昇し，それ以外の箇所においては減少していく傾向にあり，iii 全て氾濫域の水系感染症リスクは洪水規模の拡大に伴い減少する傾向にあるが，大規模洪水時は水系感染症の感染危険域が拡大することを示した。山川ら (2012) はタイの大洪水の被災者の健康影響について検討した。その結果，全ての地域の患者において，筋・関節痛，慢性疾患，急性呼吸器感染症が高い割合で認められたことを示した。急性呼吸器感染症については，上気道感染症が96%以上を占めていた。照本ら (2004) による治水整備と洪水災害が住民の意識に及ぼす影響の研究中によって，洪水を経験した人々は被害時のイメージを長く記憶する傾向にあることがわかった。このように，洪水氾濫による，社会経済損失，人的被害は大きく，健康の影響が長時期に及ぶ。さらに被害地域における復興には巨額の人件費，労働時間と施設費がかかる。

このように水害による問題が多いが，水害リスクがゼロになることはない (照本ら，2004)。よって，災害リスクを軽減することは社会と人間の健全・健康に貢献するために必要である。また水害の存在する地域ごとに洪水リスクマネージメントが必要であり，重大な課題として各関係分野と共同して実現する必要がある。

4. 洪水リスク研究における GIS と RS との応用

リモートセンシング (Remote Sensing, RS) とは，対象を遠隔から測定する手

段である。それは人工衛星技術の進歩と共により精度が高い空間データを入手することが可能となっている。現在、リモートセンシングは研究対象の特徴によって可視・赤外域からマイクロ波まで幅広く観測データを利用できる。リモートセンシングの利点は、研究対象地域を含むほぼすべての地域をデジタルデータとして入手できることであり、精度の要求に応じ空間分解能は数 km から数 m まで選択することができる。しかしセンサーによって画像を取得するため、一定のノイズを含んでおり、それを除去する必要がある。

地理情報システム (Geographic Information System, GIS) は地理情報を解析するシステムであり、位置の情報を処理するための図形処理機能と属性情報を扱うためのデータベース機能を併せ持つ。この二つの機能がリンクすることによって人間の能力を超える解析機能をもつようになる (近藤, 1996)。現実的な研究およびその応用にはリモートセンシングデータは GIS と結びつけて解析されることが多い。

前節で述べたように、洪水リスクを分析する際に、降水データ、地形データおよび土地利用データは必須である。ハザードマップと流出モデル解析には単に空間情報を入手することだけではなく、情報処理、即ち入手したデータを適確に演算しなければならない。研究対象地域においてより詳しい空間データを得ること、より複雑な空間情報を GIS を用いて処理することは洪水リスクマネージメントに対し、より良い結果を得ることにつながる。リモートセンシングと地理情報システムの応用は洪水リスク評価に対し多くの成果をもたらしたが、現実世界の現象に対処するためのリモートセンシングデータに対する認識は未だ不足している。よって、解析対象に対する理解に基づき、新しいデータ処理の手法を開発することによって、洪水リスク評価に関する研究に対して新しい成果が出るはずである。

5. 日本，欧米国家及び中国で洪水リスク研究について

洪水リスクマネジメントは，洪水災害の低減に対して有効な手段としてますます多くの研究者に受け入れられている。データの収集，処理，及び分析手段などの技術の発展に伴って，洪水リスクに関する研究に関する多くの成果をもたらしている。

5.1 日本

日本では台風や，豪雨による被害が頻繁に発生している。1960年代には流出モデルが開発された。現在よく使われるタンクモデルもその際が開発されたものである（菅原，1972）。全国規模のハザードマップの制作も1994年から始まり，2004年までに180河川の洪水ハザードマップの作成が終了した。1.2節に述べたように，このハザードマップは地区の湛水（湛水域，湛水深）や，避難（避難場所，避難路（詳しくは建物ごとまで），避難途上にある潜在的な危険箇所など）などの情報を含んでおり，住民に周知させる役割を持っている。

5.2 欧米

米国では洪水保険法が制定される1968年以前は堤防や，ダムなどの施設による洪水被害低減が基本であった。洪水に関する法律の改定に伴って洪水リスクマネジメントがますます注目され，2003年に米国は1.5億ドルを投じて洪水ハザードマップを紙からデジタルに変更した。米国のハザードマップは市町村ごとに洪水氾濫の発生率に基づいて100年に1回から500年に1回までの発生確率を段階分けしており，洪水の氾濫範囲及び洪水の通路の情報を含む。

ヨーロッパでは米国の経験より洪水の確率年を 10 年, 20 年, 50 年, 100 年及び 500 年に分けてハザードマップを作成した。さらに, 氾濫履歴による様々な自然災害のハザードマップも検討されている。

5.3 中国

中国は発展途上国として, 河川の観測について歴史があるものの, 洪水リスクに関する研究はまだ始まったところである。1998 年の大洪水 (長江, 松花江, 珠江) 以降, 洪水マネージメントの重要性が重視されてきたが, 長江, 黄河のような相対的に人口密集流域に限り検討されている。中国人口の増加及び土地の開拓・利用に伴って, ますます多くの河川の洪水マネージメントを再考する必要がある。

6. アムール川流域における洪水リスク低減への提言

アムール川流域はユーラシア大陸東部に位置する 205 万 km² の流域面積をもつ国際河川であり, 流域内には氾濫原がよく発達している。毎年の雨期には平野で氾濫が数多く発生している。中国領内の沖積平野は穀倉地帯となっており, ロシア領内の沖積平野も穀物生産が期待されており, 水害が発生すると, その影響は甚大である。水害による被害は経済だけではなく, 人間の心理や, 健康などにも影響を与える。

アムール川の河川流長は長く, 4350 km に達する。河川近傍に連続堤防はほぼなく, 治水専用ダムも設置されておらず, 治水施設は不備である。よって, 現在一番有効的かつ迅速に水害による被害を低減する手段は洪水マネージメントであると考えられる。洪水マネージメントの基礎として洪水履歴の検討はア

ムール川流域に対して極めて重要なことである。しかし、流域には3国の領土を含むため、洪水の情報は集積し難い。リモートセンシングとGISは空間情報を取得し、大量の空間情報を処理する技術である。その技術を応用してアムール川流域の洪水マネージメントに有効な空間情報を提供すべきである。そのためには、まずアムール川流域の洪水氾濫履歴を地図化することが重要である。

洪水に対する流域の安全性維持は洪水マネージメントを行うことだけでは効果は不十分である。長久な治水効果を考えて工学的施設の導入も重要である。日本はアムール川流域に近く、水害の常襲国として洪水を低減する工学的な対応は世界のトップレベルに位置する。本章では日本における堤防の構造および治水用ダムを例として紹介したが、それは今後アムール川流域における防災施設建設に役に立てることができると考えられる。

引用文献

- APHRODITE' s Water Resources 2006. "APHRODITE' s Water Resources" ,
APHRODITE's Water Resources, <http://www.chikyu.ac.jp/precip/jp/> APHRO
DITE' s Water Resources. (参照: 2014.8.1)
- Barrett E.C.. 1973. Forecasting daily rainfall from satellite data. *Mon Wea R
ev*, **101** (3) : 215-222.
- Beven K.J., Kirkby M.J.. 1979. A physically based, variable contributing area
model of hydrology. *Hydrological Science-Bulletin* **24**: 43-69.
- Becker A., Grunewald U.. 2003. Flood risk in central Europe, *Science* **300** (5
622) : 1099. DOI: 10.1126/science.1083624
- Dewan A.M., Islam M.M.. 2007. Evaluating flood hazard for land-use plannin

- g in greater Dhaka of Bangladesh using remote sensing and GIS techniques. *Water Resour Manage* **21** : 1601-1612.
- 福成孝三・白井勝二・吉川勝秀 2007. 河川堤防システムの安全管理に関する実証的研究. 建設マネジメント研究論文集 14: 311-320.
- Gordon A.M.・金子光美 1992. 飲用水の微生物学, 技報堂出版; 499
- Griffith C.G., Woodley W.L., Auguztine J.A.. 1981. Satellite rain estimation in the U.S. high plains. *Journal of Applied Meteorology* **20** (1) : 53-66.
- Gu X.R.. 2010. Design of Risk Management System of Dahuangou Detention Basin. *Journal of Natural Resources* **31** (2) : 165-174.
- 春山成子・志田 健 2006. JERS-1 SAR 画像解析によるメコンデルタの洪水リスク評価. 地学雑誌. 115 (1) : 72-86.
- 深見和彦・杉浦友宣・馬籠 純・川上貴宏 2009. 総合洪水解析システムユーザーズマニュアル. 土木研究所 4149: 231.
- Islam M.D., Sado K.. 2000. Development of flood maps of Bangladesh using NOAA-AVHRR images with GIS. *Hydrological Sciences Journal* **45** (3) : 337-335.
- 国土交通省 2010. "身の回りの防災に役立つ情報をまとめて閲覧", 国土交通省ホームページ, <http://disaportal2.gsi.go.jp/hazardmap/site/index.html#zoom=13&lat=35.68525&lon=139.81204&layers=TTTTFBTFFT>. (参照 : 2014.9.30)
- 近藤昭彦 1996. リモートセンシングと地理情報システム. 地形学から工学への提言 (日本地形学連合編), 古今書院; 150.
- 黄 光偉・磯部雅彦 2006. "水のみち" による都市域水害軽減の提案. 水工学論文集 50: 571-576.
- 熊木洋太・鈴木美和子・小原 昇 1995. 技術者のための地形学入門. 山海堂;

157-158.

Li J.R., Kondoh A., Nakayama D.. 1999. Analyses on Floods of 1998 in China. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources* **12** (4) : 307-318

Ma J.M., Xu J., Zhu Y.F., Zhang W.B.. 2005. General introduction of flood hazard mapping in other countries. *China Water Resources* **17**: 29-31. (in Chinese)

Meng X.M., Cui B.SH., Deng W., Lv X.G.. 1999. An Examination of the Catastrophic Flood in Songnen Drainage Basin: Recognition of Wetland Functions. *Journal of Natural Resources* **14** (1) : 15-21 (in Chinese) .

Munich Re Group 2009. " Natural catastrophes 2008 - Analyses, assessments, positions, available" , TopicsGeoat, 2010/11/16, http://www.munichre.com/publications/302-06022_en.pdf. (参照: 2012.10.10) .

中村寿浩 2008. 益田川ダムの設計と施工. *ダム工学* 18: 111-117.

NOAA 2010. "National Climatic Data Center", NOAA, <https://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo> NOAA. (参照: 2014.8.1)

佐藤政良 1978. 多目的ダムにおける洪水調節操作の分析. *農業土木学会論文集* 76: 45-53.

Scofield R.A.. 1987. The NESDVS operational convective precipitation estimation technique *Mon Wea Rev*, **115** (8) : 1773-1792.

Smith, k.. 1996. *Environmental Hazard*. Routledge: London; 133-135 .

菅原正巳 1972. 流出解析法. 共立出版株式会社; 257.

高橋 裕・鏑木孝治 1992. 長江水利史. 古今書院; 24-26.

Takeuchi K., Hapuarachchi P., Zhou M.C.. 2008. Ishidaira Hiroshi, Magome

- Jun. A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins. *Hydrological Processes* **22**: 3236-3251.
- Taubebock H., Wurm M., Netzband M., Zwenzner H., Roth A., Rahman A., Dech S.. 2011. Flood risks in urbanized areas multi-sensoral approaches using remotely sensed data for risk assessment. *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.* **11**: 431-434.
- 照本清峰・元吉忠寛・佐藤照子・福園輝旗・池田三郎 2004. 治水整備と洪水災害が住民の意識に及ぼす影響. 水工学論文集 48: 397-402.
- Twumasi Y.A., Raymond A.R.. 2002. Mapping seasonal hazards for flood management in Accra, Ghana using GIS. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* : 2874-2876.
- 鷺見哲也 2009. 岡崎市伊賀川における 2008 年 8 月末豪雨災害調査. 河川技術論文集 15: 37-42.
- 山川路代・Pairoj Khruerkarnchana・頼藤貴志・大政朋子・土居弘幸 2012. タイの大洪水の被災者の健康への影響-医療支援活動に基づく記述. *Journal of International Health* **27**: 183-189.
- 吉川勝秀 2011. 河川堤防システムの整備・管理に関する実証的考察. 水文・水資源学会誌 **24**: 21-36.

第二章 アムール川流域の地域特徴

アムール川はユーラシア大陸東部を流れる大河川の1つであり，世界でも水流長の長い河川の一つである。流域内に中国，ロシア，モンゴルおよび北朝鮮の四カ国の領土を含む国際河川である。流域の南北の幅は1,600 km，東西の幅は2,400 kmで，流域面積は $205 \times 10^4 \text{ km}^2$ を超える。アムール川は中国とロシアとの国境線に沿って流下する。

1. 地理的特徴

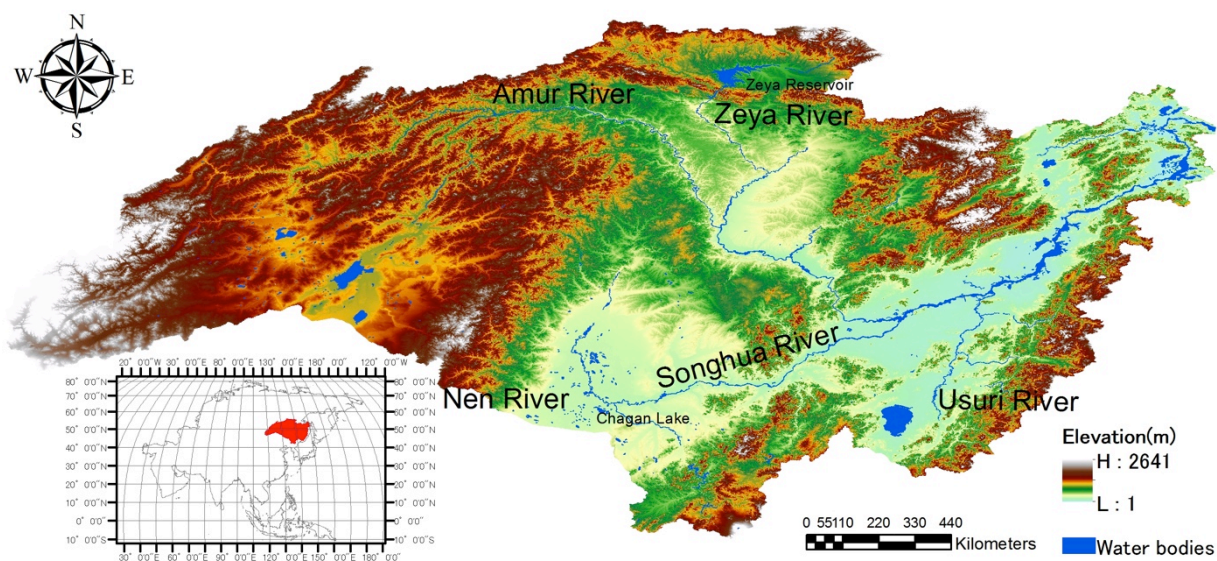


図 2.1 アムール川流域地形図

アムール川流域 (図 2.1 に示す) は， $41^{\circ} 38' \sim 55^{\circ} 56' \text{ N}$ ， $107^{\circ} 59' \sim 141^{\circ} 13' \text{ E}$ の範囲に位置する。モンゴルのヘンティエー山脈から発し，中国黒龍江省の北側とロシアのハバロフスク区の東南側を經由してオホーツク海に注ぐ。流域内の支流はおよそ 950 本 (季節河川を含む) ある。その中の最大支流が中

国域内を流れる松花江 (Songhua River) であり、アムール川の中中部で合流する。

1.1 気候

アムール川流域の気候は寒温帯湿潤モンスーン気候であり、冬にシベリアの寒気団の影響、夏に海洋気候の影響を受けて、冬季は乾燥し、夏季に降雨が集中する。降雨量は、4～10月で年降雨量の90～93%を占め、特に6～8月の降水量は年降水量の60～70%を占める。最低および最高気温はそれぞれ1、7月に出現し、1月の平均気温は流域南部で-24℃、北部で-33℃であり、7月の平均気温は南部で21℃、北部で18℃である。

1.2 地形

流域の地形は、主に山地と平野から構成される。流域の西半部は主に山地から構成され、西へ行くほど標高が高くなる。流域の東半部流域では広大な沖積平野が分布する。アムール川上流部ではゼヤ川が形成した沖積平野、中国の有名な食料生産基地である松嫩平原（嫩江と松花江による沖積平野）と三江平原（松花江、ウスリー江及びアムール川による沖積平野）を含む。平野部分の起伏は極めて緩やかで、夏の雨期には常に山から流れてくる水を湛水し、氾濫が生じている。

2. 流域の水文学的特徴 (*注)

アムール川流域における地表面の水の流動を把握するため、さらに今後流域に対する流出モデル解析に利用できるように、その入力の基本資料となる流域の水文学的特徴を地理情報システム空間解析に基づいて下記に述べる。

2.1 アムール川流域における地表水の流向

流域面積をグリッドに分割し，降水により，グリッドで形成された地表水の向かう方向として地表水の流向を図 2.2 に表す。

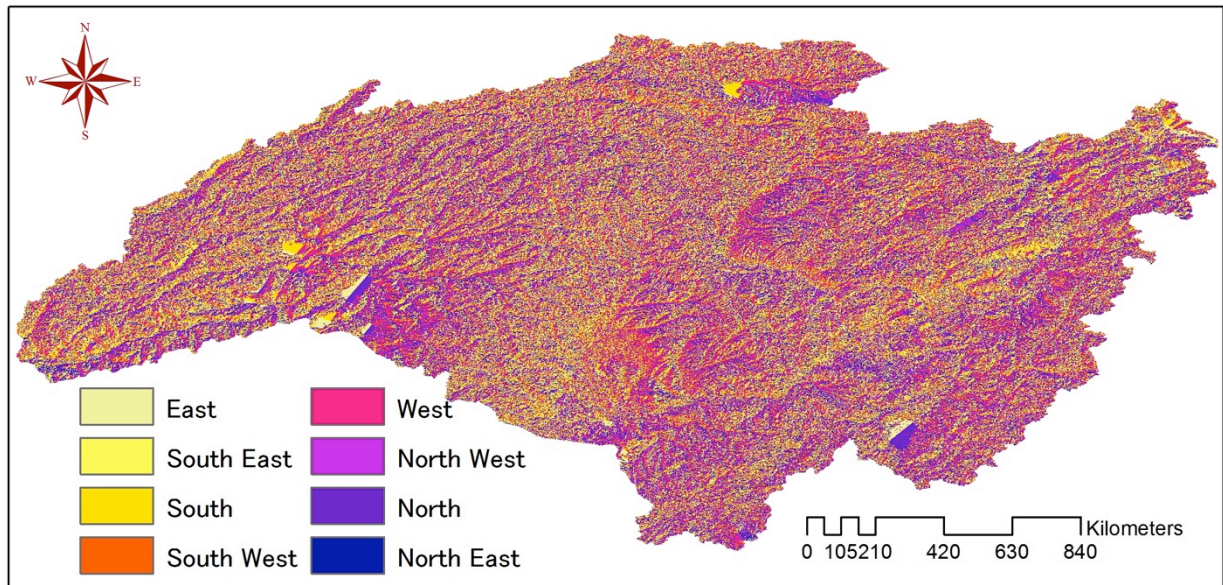


図 2.2 アムール川流域の流向

図 2.1 に示した研究地域の地形を参照すれば，降水による洪水は山地で発生すると，平野へ向かう傾向にある。平坦な平野で排水しにくいいため，氾濫しやすくなる。

2.2 アムール川流域における各地点水の集積量

各グリッドの流向に基づいて各グリッドに地表水が流入できるグリッド数は各地点における水の集積量として表される。図 2.3 はアムール川流域の流向を用いて算出された各地点水の集積量を示す。これにより降水が発生する場所を確認すると同時に，洪水が集まるはず場所を予測できる。水害を低減するには

有用な資料である。

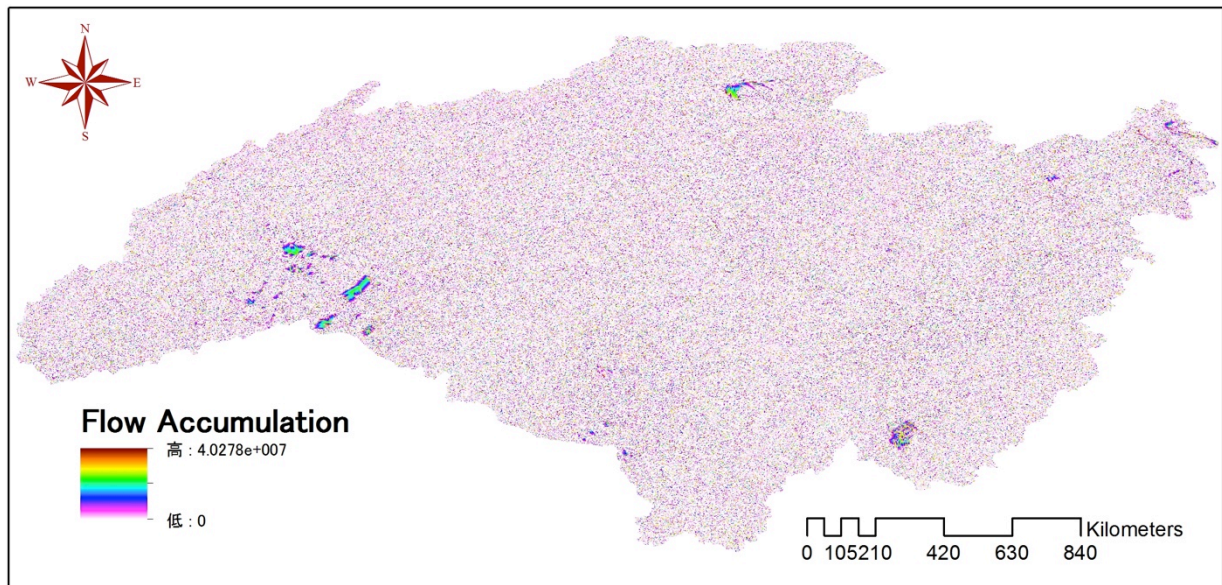


図 2.3 アムール川流域における各地点水の集積量

2.3 アムール川流域における地表水の流路

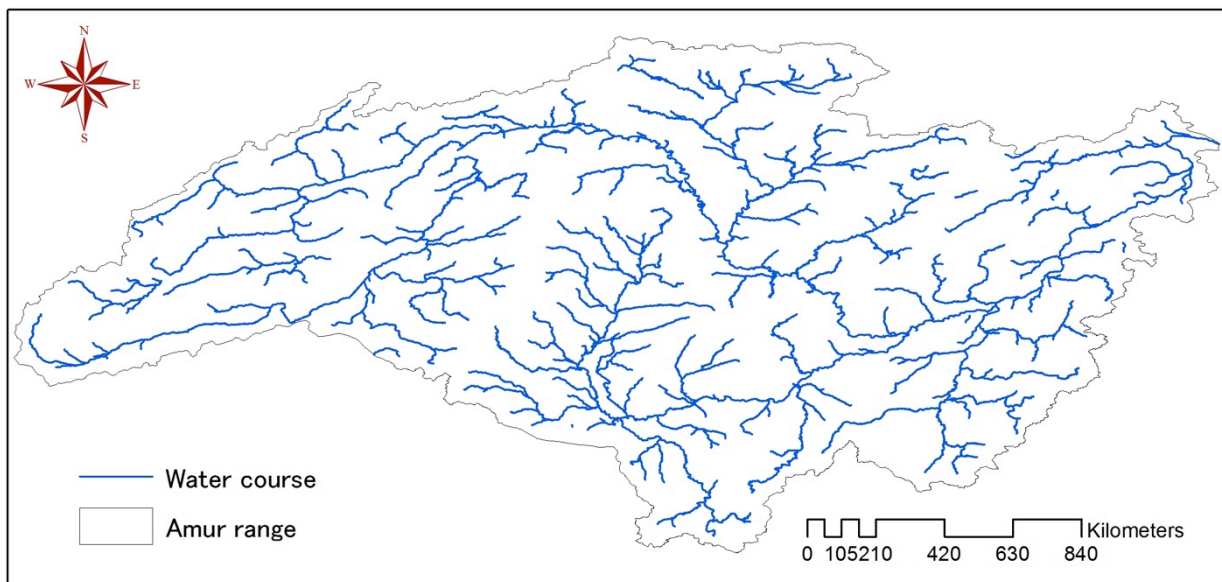


図 2.4 アムール川流域における地表水の流路

地表水がよく集積する場所は、地表水の流路を形成する。地表水の流路を明らかにすれば、洪水の動向を明瞭することができるため、各地点水の集積量に基づいてアムール川流域における地表水の主要な流路（図 2.4）を作成した。松嫩平原において流路の分布がやや多い。それにより洪水氾濫時に洪水の流路とし、氾濫面積が広がると予想される。

2.4 アムール川流域における集水域の区画

集水域は、ある共通の流出点へ排水が集中する範囲を表す上流方向のエリアである。ここでは上述した流路の合流点を共通の流出点として求めたアムール川流域の集水域を図 2.5 に表す。降水を発生する集水域の位置を知る上で、氾濫が発生する可能な場所を予見することができる。逆に氾濫域を知る上で、水害を形成する途中で影響される範囲も推測できる。

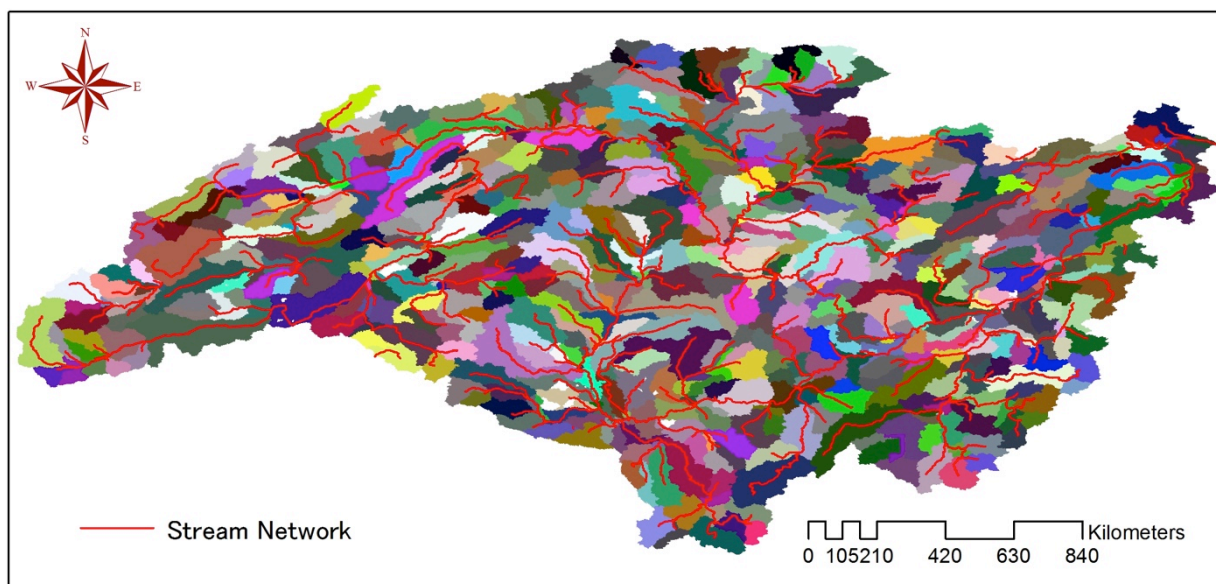


図 2.5 アムール川流域の集水域

以上、地理情報システムを活用してアムール川流域の水文学的な特徴を明らかにした。これは流出モデルへ入力するパラメーターとしても、洪水が発生する可能な場所を予測に使っても重要な情報である。

3. 人文環境

アムール川流域はロシア、中国、モンゴル及び北朝鮮の領土を含むが、ロシアがおよそ 47%、中国がおよそ 43%、モンゴルがおよそ 10%を占め、北朝鮮が占める面積はその他の三国と比べて極めて小さい。

3.1 中国

中国のアムール川流域は黒竜江省の全部、および吉林省の一部を含む。中国の建国以来、この地域は工業基地として発展していた。1980年代の改革開放に伴って、中国南方の発展が迅速になることによって、食糧生産は主要な役割になった。域内の総人口は 6577.4 万人である。経済活動は主に鉱物業、石油、石炭、農業などである。農業の方は中国の食糧生産基地である三江平原（松花江、アムール川とウスリー川により形成された沖積平野）および松嫩平原（嫩江流域及び松花江の中流域の平野）が含まれる。中国のアムール川流域の耕地面積は中国全土の 14.2%を占める。

3.2 ロシア

ロシアのアムール川流域はロシアの極東連邦管区である。サハリン州、ハバロフスク地方、マガダン州、カムチャツカ地方、沿海地方、ユダヤ自治州、アムール州、サハ共和国及びチュコト自治管区を含む。総人口は 629.3 万人であ

り，ロシア人口の 4.4%を占める（田畑，2012a）。天然ガス，石油，鉱物業，水産業，農業，林業，木材加工業が盛んである。域内の GDP はロシア全体の 5.4%を占める（田畑，2012b）。

3.3 モンゴル

モンゴル域内では，ドルノド県，ヘンティール県，スフバートル県，トゥブ県からなる。総人口 16.5 万人である。住民は主に遊牧，家畜の放牧，農業，乾草の生産及び工業に従事している（Simonov and Dahmer，2008）。

4. アムール川流域における洪水リスクに関する研究の必要性

前述した通り，アムール川流域の平野は典型的な氾濫原の地形である。降水量は季節的に変動が大きく，夏によく集中する。降水は高山で集中すれば，洪水氾濫が平野で引き起こされることになる。一方，アムール川は中国，ロシア及びモンゴル三ヶ国を流れ，流長が長い為，連続堤防はほぼ建設されていない。農業の生産量は三ヶ国で重要な割合に相当し，耕地が広く分布しているため，一度洪水氾濫が発生すると，農産物の被害が深刻になる。

流域面積は 205 万 km² があるため，流域における氾濫情報の集積には困難を伴う。2013 年に流域規模の洪水が発生したが，ロシアで，この洪水によりもたらされた家屋の浸水被害は 1.2 万戸で，その内の約 20%は再建を要するほどの被害であった。また，被災者の総数は 16.8 万人であった（Danilov-Danilyan *et al.*, 2013）。この洪水は中国にとっては，東北地域における 1998 年以来の最大の洪水となった。被災域は東北三省の遼寧省・吉林省・黒龍江省にわたり，この 3

省 111 県 (区, 市) で 373 万 7 千人が被災, 85 人が死亡し, 105 人が行方不明となり, 36 万人が避難した。倒壊あるいは著しく損壊した家屋は 6 万軒余, 農作物の被害面積は 787.2ha, 直接的な経済損失は 161 億 4 千万元に上った (人民網, 2013)。

洪水リスクマネジメントが災害を低減する有効な手段であるものの, この地域における洪水リスク分析は極めて少ない。よって, 本研究の目的は, アムール川流域における洪水氾濫による被害低減を目標として, リモートセンシングと地理情報システムを活用して流域の洪水リスクを明らかにすることである。

引用文献

- Danilov-Danilyan V.I., Gelfan A.N., Motovilov Yu.G., Kalugin A.S.. 2014. Disastrous Flood of 2013 in the Amur Basin: Genesis, Recurrence Assessment, Simulation Results. *Water Resources* **41** (2) : 115-125.
- ESRI 2012. “水文解析ツールセットの概念”, ArcGIS Resource Center, [http://help.arcgis.com/ja/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z00000063000000/](http://help.arcgis.com/ja/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z00000063000000/00000/) (参照: 2014.9.15) .
- Jenson S.K., Domingue J.O.. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **54** (11) : 1593-1600.
- 人民網 2013. “中国東北部各地で洪水被害-被害状況 (毎日更新)”, 人民網日本語版 (人民日報), <http://j.people.com.cn/94475/8371461.html>. (参照: 2014.2.10) .

Simonov E.A., Dahmer T.D.. 2008. *Amur-Heilongjiang River Basin Reader*.
Ecosystems Ltd.: Hong Kong; 426.

田畑朋子 2012a. ロシア極東の人口減少問題. 環オホーツク海地域の環境と経済 (田畑伸一郎, 江淵直人編), 北海道大学出版会; 245-268.

田畑伸一郎 2012b. 環オホーツク海地域の経済発展. 環オホーツク海地域の環境と経済 (田畑伸一郎, 江淵直人編), 北海道大学出版会; 141-166.

第三章 アムール川流域における河川氾濫の空間特徴

1. はじめに

2013年7月以降、アムール川流域の広い範囲で雨の多い状況が続き、そのため中流および下流域では各地で洪水が発生し、既往最高水位を1.5~2 m上回った。この洪水によって、ロシアのハバロフスク市における水位は、9月3~4日に808 cmに達し、これまでの最高記録642 cm (1897年)を上回った(気象庁, 2013)。

これまでもアムール川の中流・下流域では洪水時にしばしば氾濫し、洪水による被害は毎年のように生じている。一方、洪水に関して公開された情報は極めて少なく、1998年と2013年の二回の大洪水にほぼ限られている。しかし、1998年と2013年の洪水は既往最大の水位記録を超えたイベントであったため、これらの洪水履歴に関する分析は洪水氾濫に対する脆弱性の予測を通して災害被害の低減に寄与することができると考えられる。

よって、アムール川流域における洪水氾濫による被害を低減することを目的として、既往の水位記録を超えた1998年と2013年の事例について、リモートセンシングを活用して氾濫域を明らかにした。

2. 使用データ

2.1 MODIS データ

MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) とは、NASA (National

Aeronautics and Space Administration) が開発した光学センサーである。MODIS は 1999 年 12 月 18 日に打ち上げられたアメリカの地球観測衛星 Terra と 2002 年 5 月 4 日に打ち上げられた Aqua に搭載され、 $0.4\sim 14\ \mu\text{m}$ の範囲を 36 バンドで観測する。その内 1・3・4 バンドは可視光の赤・青・緑、2 バンドは近赤外である。本研究では水の吸収・反射の特徴から MODIS の 2・4 バンドを使用することにした。

MODIS センサーは 2 つの太陽同期軌道衛星に搭載されるため、同一の地点を昼と夜で最大 4 回/日の撮影が可能である。MODIS は観測頻度が高いため、観測周期が短い、すなわち高時間分解能のデータが得られる。本研究において使用した MODIS データは東京情報大学が 2013 年 7, 8, 9 月に受信、処理した 269 シーンの衛星データである。

2.2 AVHRR データ

本研究では研究地域の過去の洪水イベントの事例から氾濫域の空間的特徴を明らかにするため、1998 年の洪水イベントも対象とした。MODIS の運用開始前であるため、氾濫域の解析には AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, 改良型超高分解能可視赤外放射計) を使用した。AVHRR は米国の極軌道気象衛星シリーズ NOAA に搭載されるマルチスペクトルセンサーである。AVHRR は 1978 年打ち上げの TIROS-N/NOAA (Television InfraRed Operational Satellite- Next-generation/NOAA) では 4 バンドであったが、1981 年打ち上げの NOAA7 号では 5 バンドに改良され、1998 年に打ち上げられた NOAA15 号以降では 6 バンドになっている。観測波長範囲は $0.58\sim 12.5\ \mu\text{m}$ である。本研究で使用した NOAA14 号の AVHRR のバンド 1 は緑～赤を含む $0.58\sim 0.68\ \mu\text{m}$, バンド 2 は近赤外域の $0.724\sim 1.00\ \mu\text{m}$ である。1998 年の洪水氾

濫状況の抽出には、NOAA14号の洪水氾濫時期である7、8、9月の378シーンの衛星画像を使用した。このデータは、千葉大学環境リモートセンシング研究センターが受信しアーカイブしているデータである。

2.3 SRTM データ

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) は、2000年2月にNASA (National Aeronautics and Space Administration) , DLR (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt) と ISA (Italian Space Agency) によって作成された DEM (Digital Elevation Model) プロダクトである。全球の60° N~56° Sの範囲をカバーし、陸地面積の80%を含む。使用したSRTMによるDEMの空間分解能は90 m×90 mである。ここでは、衛星データから抽出された氾濫域に対して地形に基づく検証を行い、誤判別画素の除去及び地形的な考察に使用した。

2.4 降水データ

洪水の特徴を検討するため、降水データを収集した。GHCND (Global Historical Climatology Network) -Monthly Summaries は NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) の国際気象データセンター (National Climatic Data Center) からダウンロードできる降水量データである。このデータは全球で40,000カ所を超える観測点における毎日の気象記録から作成された情報であり、温度 (月平均温度, 月間最大日降水量) , 降水量 (毎月の降水量, 月間最大日降水量, 降水量の変化) , 降雪及び積雪量を含む。本研究では1963年~2013年の月降水量を使用した。

2.5 Global Forest Change 2000-2012

Li *et al.* (1999) による 1998 年の嫩江・松花江の大洪水の分析によると、山地の森林被覆が 1949 年の 70~80% から 30% に減少したことにより、森林の保水機能が下がり、氾濫の要因になったとしている。森林被覆は人間により調整可能でもあり、間接的な洪水氾濫要因として森林被覆変化の解析を試みた。本研究で使用した森林被覆データはメリーランド大学ウェブサイトからダウンロードした Global Forest Change 2000-2012 である (Hansen, 2014)。このデータは 2000 年から 2012 年までの Landsat7/ETM+ の 654,718 シーンのデータを用いて、その期間のグローバルな森林変化を地図化したものであり、空間分解能は 30m である。

3. 研究手法

3.1 河川氾濫域の抽出

水体のスペクトル吸収及び反射の特徴に鑑みて、本研究では衛星データの近赤外と緑バンドを用いた。AVHRR は緑バンドがないため、緑波長を含むバンド 1 を使用することにした。図 3.1 に示すように、まず、センサーごとに雲量の少ない画像から洪水氾濫域の ROI (Region of Interest) を選択し、二つのバンドに対して氾濫域のスペクトルの特徴を得た。次に、MODIS と AVHRR の全ての画像を日単位で一シーンずつレベルスライスを行った。各画像で氾濫域の特徴を満たさない画素を氾濫していない場所として“0”のフラグを与える。一方、氾濫域の条件を満たすピクセルを“1”として、時系列画像ごとにフラグ“1”を積算する。日単位で判断する氾濫域ピクセルには、雲や山影などによる誤分類があるため、仮氾濫域と定義する。研究対象は大陸河川であるため、一日内で氾濫域と非氾濫域の入れ替えは考えにくい。そこで、一日内で複数回に仮氾

濫域とされた画素は氾濫域と判断する。一回しか抽出されなかった画素はノイズである可能性があるため、その判断は次節で述べる方法で行った。最後に、抽出された氾濫域箇所を流域全体で合成し、氾濫域マップを作成した。

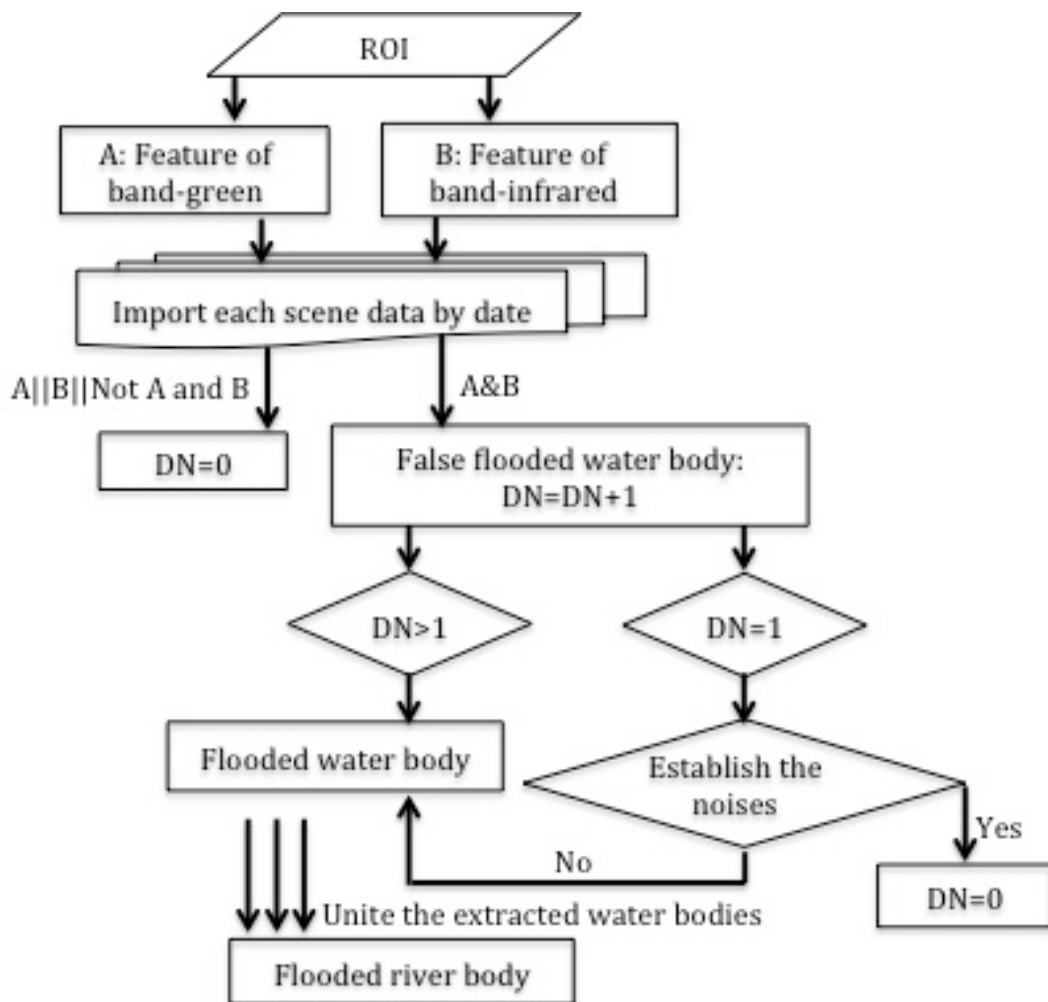


図 3.1 河川氾濫抽出フローチャート

3.2 氾濫水のノイズの判断

ノイズを判断するアルゴリズムを図 3.2 に示す。前述のように時間軸で連続性を持っている仮氾濫域を氾濫域と判断したが、一日に複数回観測がある場合でも、一回しか氾濫域と判断されない画素については地形情報を用いて氾濫域

の再確認を行った。

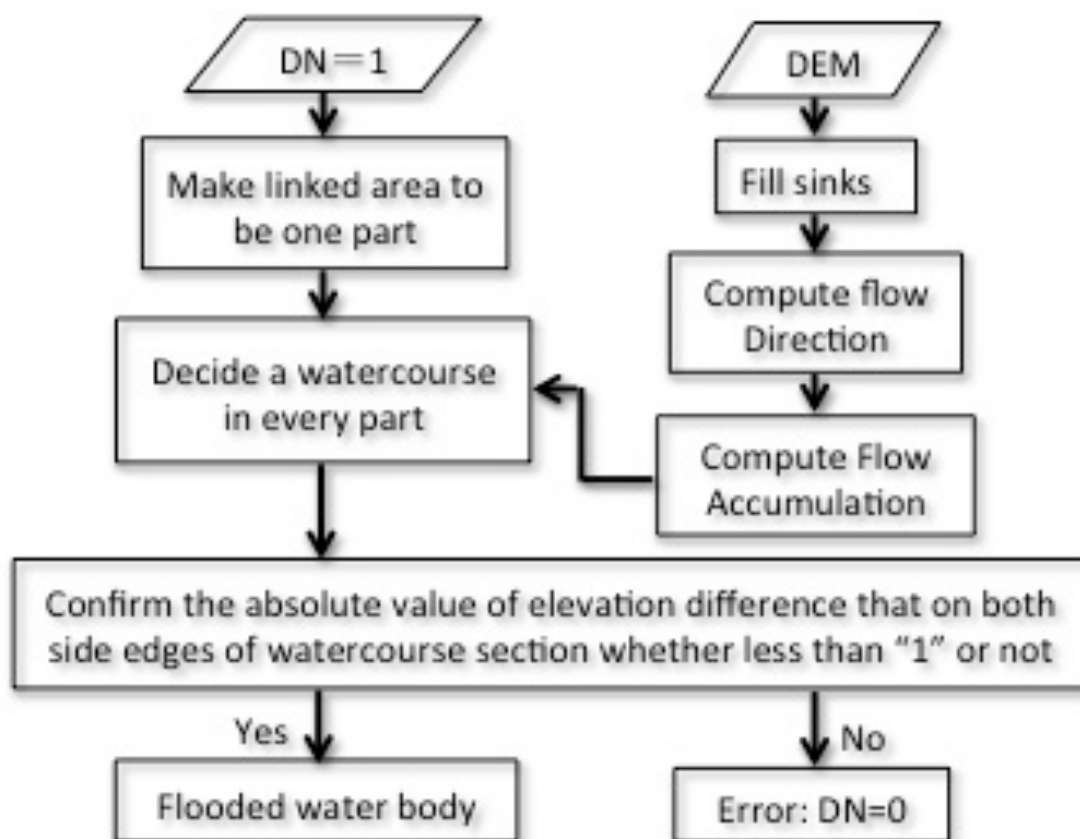


図 3.2 雲によるノイズの判断

アムール川は大陸河川であり、氾濫原では起伏が極めて小さいため、氾濫域は緩慢な速度で下流に移動し、水面勾配は局所的に大きくなることはない。よって、洪水流路である氾濫域の両岸における水面の高さはほぼ同じになるはずである。ここでは第二章で作った累積流量を用いて仮氾濫域に覆われる水路を判断した上で、水路の横断方向の水面の高低差が“1m”より大きい場合をノイズと判断することにした。

4. 結果及び検証

4.1 結果

4.1.1 1998年洪水氾濫状況

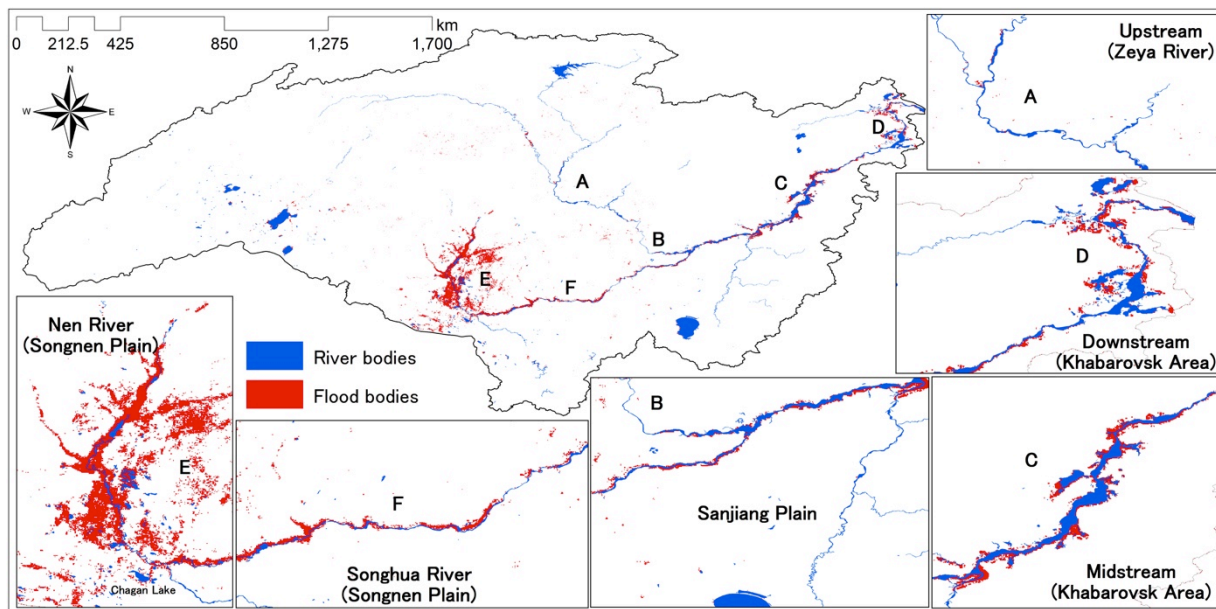


図 3.3 1998年河川氾濫

1998年洪水の河川氾濫状況を図3.3に表す。アムール川中・下流域及び主要な支流における氾濫状況も図中に枠囲いで示した。氾濫域が嫩江流域(E)、松花江(F)、三江平原(B)及びアムール川中・下流域(C、D)に分布している。氾濫の状況は主に河道に沿って氾濫したものの、嫩江流域では氾濫が平野域全般で広く氾濫した様子が見られた。特に嫩江の下流域及び流域東北部では大幅に氾濫した。

4.1.2 2013年洪水氾濫状況

図3.4に表したのは2013年洪水の河川氾濫状況である。主要な氾濫域も枠で囲んで示す。河川氾濫域が1998年洪水の事例より広くなり、上流の支流であるゼヤ川流域(A)でも氾濫した。そして、三江平原(B)における洪水時に平

野内の河川（ナオリー河）の沿岸で氾濫域が1998年より広がっている。さらに1998年には氾濫が認められなかったウスリー川でも氾濫が確認された。

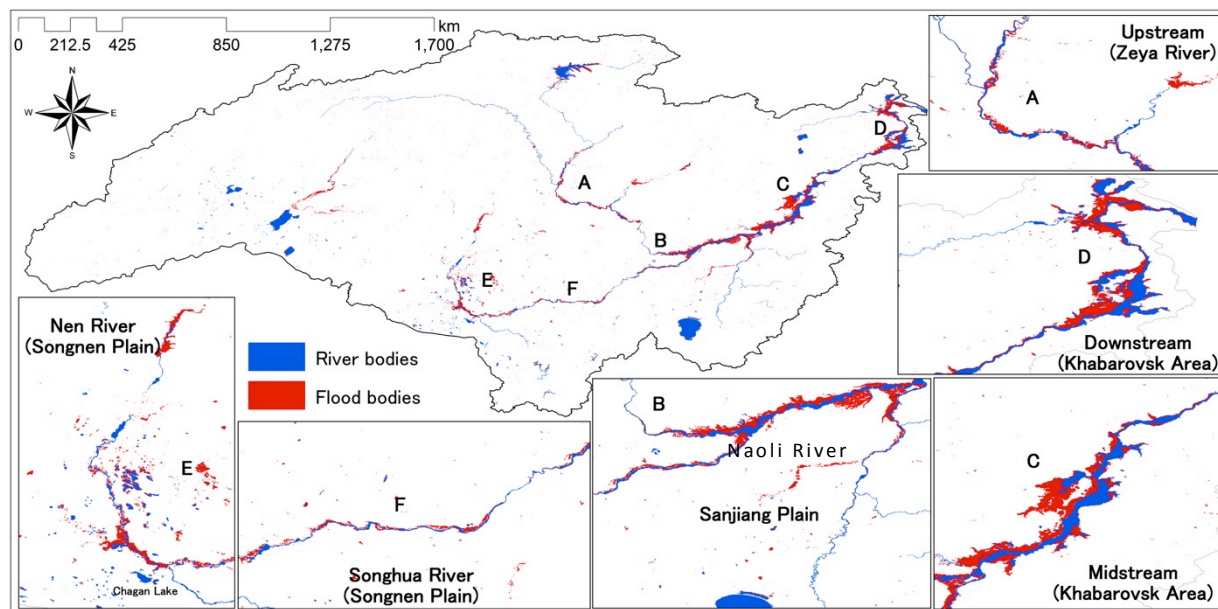


図 3.4 2013 年河川氾濫

4.1.3 1998 年洪水と 2013 年洪水の氾濫の空間分布の検討

1998 年と 2013 年の大洪水は主に嫩江，松花江，アムール川の氾濫によるものである。特に 1998 年においてその他の支流域では大きな氾濫はなかった。

1998 年と 2013 年における流域の氾濫面積はそれぞれ $52,883 \text{ km}^2$ と $47,016 \text{ km}^2$ となった。1998 年の方が広いが，主に嫩江流域（松嫩平原，E）に集中している。1998 年，嫩江流域では，氾濫面積が $26,635 \text{ km}^2$ であり，全氾濫域の約 2 分の 1 となった。2013 年，氾濫域の面積は $4,279 \text{ km}^2$ であった，1998 年氾濫域のおよそ 6 分の 1 となった。

嫩江合流後の松花江（F）でも 1998 年，2013 年の双方の洪水で氾濫している。アムール川合流前の下流沿岸（三江平原部，B）では 2013 年洪水における氾濫域がより広い。

ロシアのハバロフスク地区，即ち，アムール川中流域（C）と下流域（D）で

は双方の洪水で氾濫した。2013年の氾濫域が1998年より広がった。1998年と2013年の氾濫面積はそれぞれ15,016 km²と23,005 km²であった。2013年にはこの地域での氾濫域が全氾濫域のおよそ2分の1を占めた。

4.1.4 アムール川流域における氾濫履歴図

1998年と2013年の氾濫履歴を合わせて、アムール川流域における氾濫履歴図を作成することができた。図3.5に示した氾濫履歴図に基づいて氾濫の発生域を予見することができる。今後、洪水イベント発生の際に更新して信頼度を高めることができる。

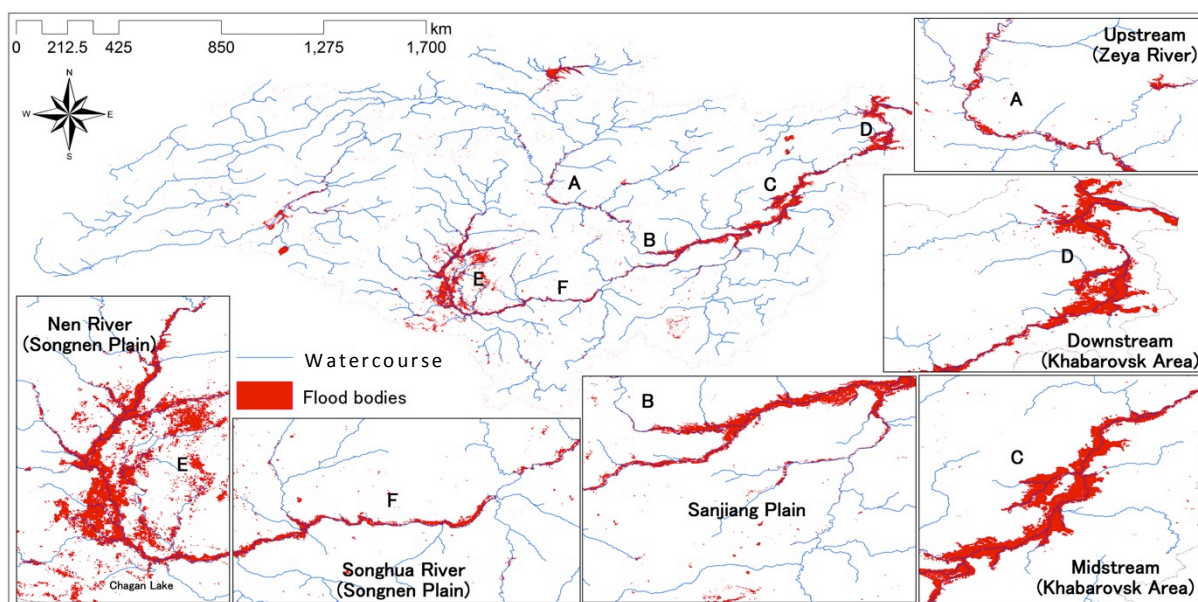


図 3.5 アムール川流域における氾濫履歴図

4.2 結果の検証

抽出した氾濫域の精度を確認するため、DEMデータを用いて河道の縦断方向と横断方向の二つの観点から2ステップに分けて検証を行った。

ステップ1では、河道の縦断方向の確認を行った。氾濫は河道近傍で発生するため、第二章で述べたように、氾濫の領域は累積流量値の大きいグリッドの

周辺にあるはずである。そこで、図 3.5 に表したように、氾濫域は図 2.3 の累積流量マップおよび図 2.4 の流路マップと重ね合わせ、氾濫域が地表水の流路と重なり合っていることを確認することによって、抽出した氾濫域は縦断方向に関して精度を保持することが検証できた。

ステップ 2 では、河道の横断方向の検証で、抽出された氾濫河川の幅を検証するものである。アムール川流域は大陸河川流域である。造山帯の河川と異なり、安定大陸を流れるアムール川の流域は広大で、中・下流に勾配が非常に緩やかな平野を形成する。流域内の広域で大雨が降ると、大量の水が平野に集中し、氾濫する。緩勾配のため洪水流の流速が小さく、湛水期間が長い。よって、河川の横断面に沿った氾濫域の標高は非氾濫域より相対的に低い。そこで、氾濫域と判別された領域の横断方向の標高が大きく異なることにより、氾濫域の抽出精度を検証することができる。

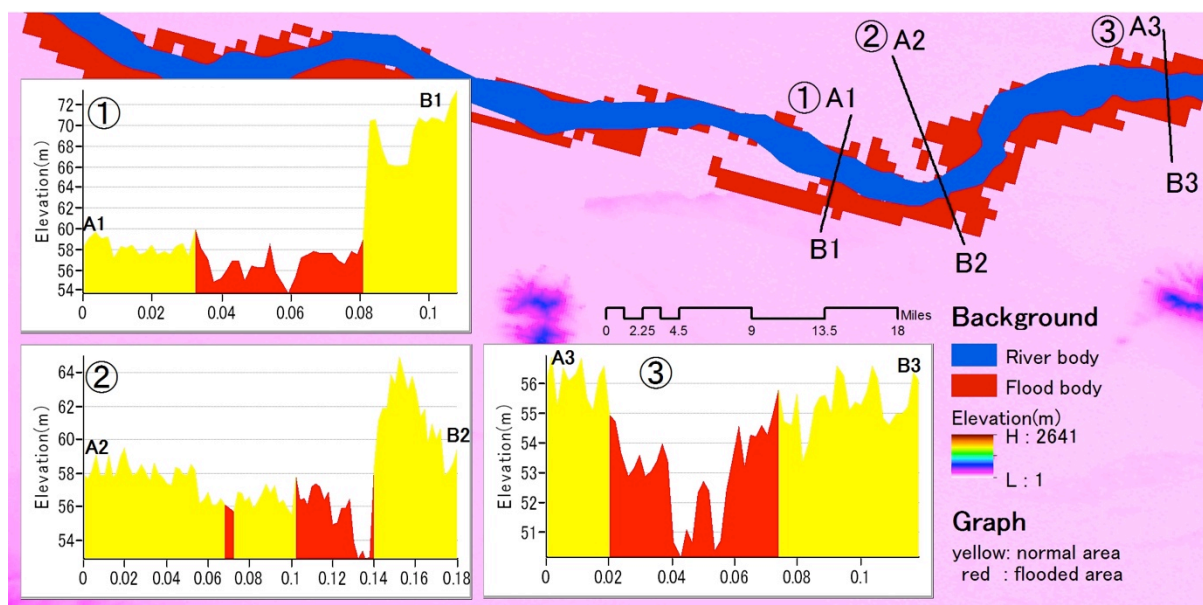


図 3.6 結果検証の例

図 3.6 は氾濫域の任意の横断面の標高を検討した例である。氾濫の抽出及び

未抽出域は標高分布と矛盾することはなく，氾濫域抽出の結果は一定の精度を有すると考えられる。

5. 考察

降水量とその分布，及び地形は氾濫を形成する最も直接的な要因である。また，山地域の森林は洪水緩和作用を持つと考えられるため，森林被覆の減少は氾濫を起こしやすくする (Li *et al.*, 1999)。よって，森林被覆の変化を間接的な空間要因として検討することにする。

5.1 アムール川流域における洪水期間の降水の特徴

降水が洪水氾濫を形成するメカニズムの一つとして，ここでは，アムール川流域の洪水氾濫中の降水状況，及び氾濫域と降水との空間分布を明らかにする。ここでは 1998 年の嫩江・松花江流域の氾濫と 2013 年のアムール川全流域の氾濫期間 (7, 8, 9 月) の降水量及びその分布を検討する。

5.1.1 平年降水量

平年の月降水量として月降水量の平年値 (1963 年～2013 年の平均値) を図 3.7 に示す。全流域では洪水氾濫期間 (7, 8, 9 月) の平年の月平均降水量がそれぞれ 114 mm, 104 mm, 60 mm である。9 月の平年降水量が全体として少なく，7 月，8 月における降水の分布は，西部，アムール川流域の下流では降水量が少ない。実際の降水量は，90 mm 以下となる。7 月に，降水が嫩江上流，松花江中上流及びアムール川流域の中東部で多く，月降水量が 142 mm 以上に達する。8 月には，嫩江上流の降水が減少の傾向にあり，平均月降水量が 106 mm となる。8 月の降水は松花江の中上流から中下流へ，さらに全域の中東部へ移

動し、アムール川流域の中東部（アムール川の中上流）で拡大する。最大降水量はアムール川流域中東部に出現し、159mmに達する。それは降水量が少ない場所（西部，アムール川下流）の約2倍になる。

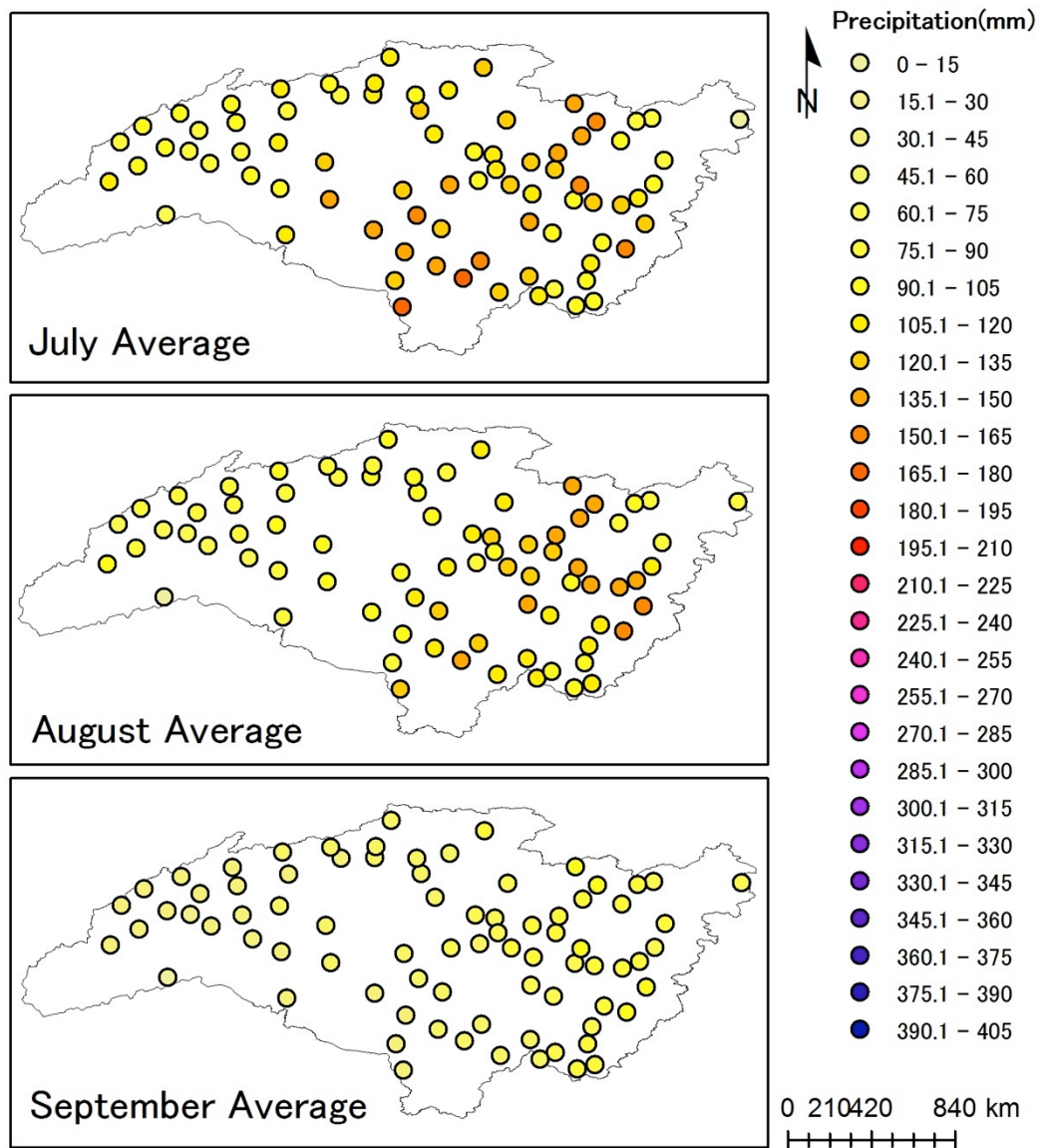


図 3.7 平年降水量の分布

各氾濫域（アムール川上流・中流・下流，三江平原，松嫩平原，松花江沿岸）の平年降水量状況は，7月にそれぞれ118 mm，120 mm，85 mm，114 mm，140 mm，136 mm，8月にそれぞれ111 mm，131 mm，92 mm，116 mm，104 mm，

116 mm, 9月にそれぞれ 67 mm, 81 mm, 74 mm, 69 mm, 48 mm, 54 mm となる。アムール川下流域以外の全流域の平均降水量以上であった。

5.1.2 1998年の降水量とその分布

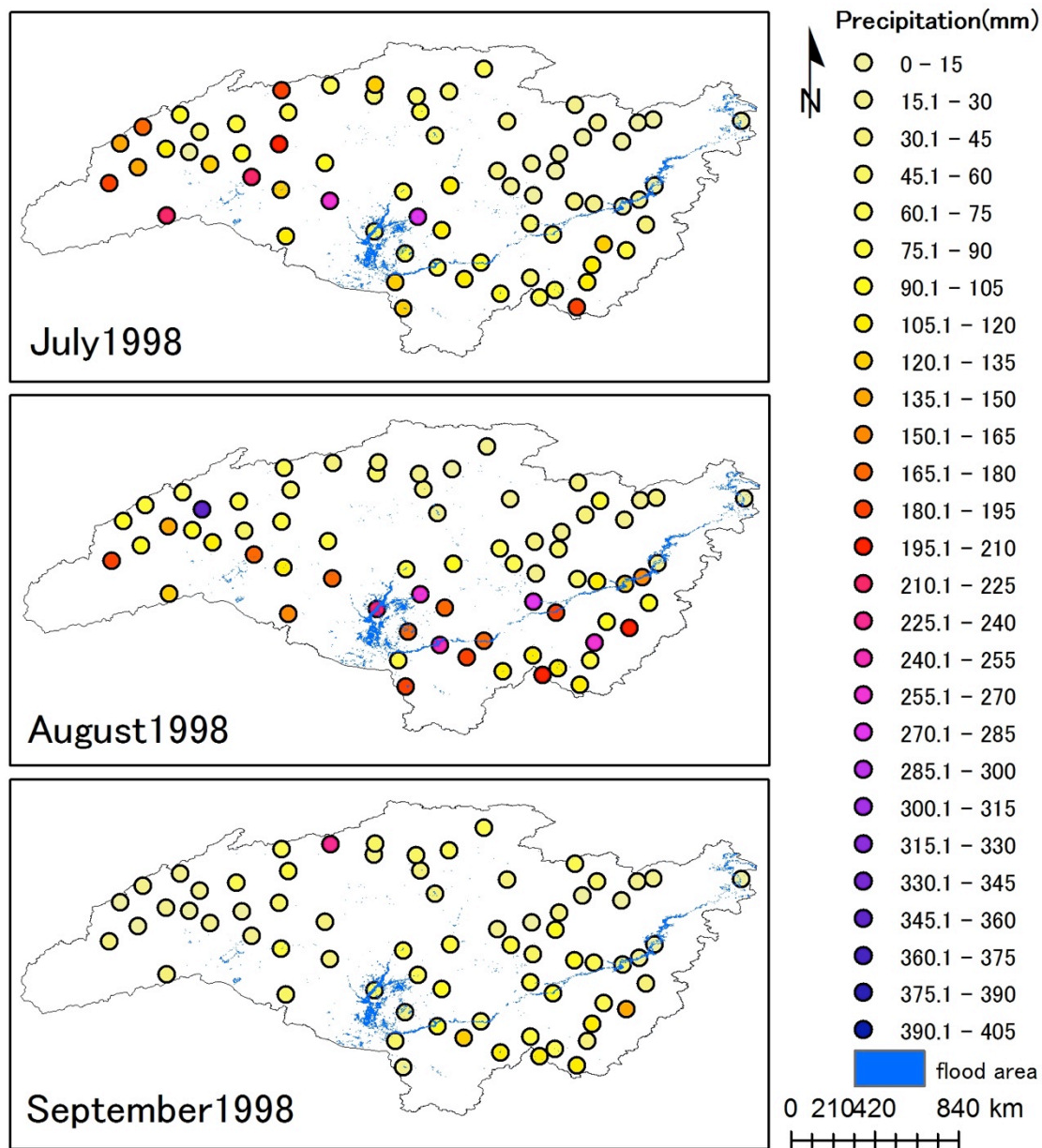


図 3.8 1998年7, 8, 9月降水量分布

図 3.8 に 1998 年の洪水氾濫期間 (7, 8, 9 月) の月総降水量を示す。平年降水量は前に述べた図 3.7 における経年平均総降水量 (1963 年~2013 年の平均

値) を，氾濫域の状況は図 3.3 を参照されたい。

1998 年の洪水氾濫域では，降水量が平年より多かったことがわかる。洪水期間 (7, 8, 9 月) における全流域の平均平年降水量はそれぞれ 114 mm, 104 mm, 60 mm である。1998 年の洪水期間 (7, 8, 9 月) の降水量はそれぞれ 84.5 mm, 105.1 mm, 56.5 mm であり，8 月に平年と均衡を保つが，ほぼ平年より少ない。しかし，嫩江流域 (E) では，7 月から降水が多くなり，8 月まで継続した。この 2 ヶ月間で降水日数は最大 40 日に達した。嫩江上流の丘陵地で 7 月の降水量が多く，その範囲の平均総降水量は 265.7 mm で，平年の月降水量の 2.5 倍であった。8 月には降水域の面積が広がり，嫩江流域の平均総降水量は平年の 1.7 倍となった。また，松花江流域 (F)，三江平原 (B) およびアムール川中流域 (C) の氾濫域の周辺では 8 月の平均総降水量が 181.8 mm で，平年の 1.5 倍となり，降水日数は最大 21 日に達した。アムール川の上流域 (A) では，降水量が平年と比較して大きな変化はなかった。アムール川の下流域 (D) で氾濫が発生したが，降水量が平年より変わらなかった。それは支流である松花江・嫩江流域及び中流域の氾濫と関わるものである。9 月になるとほぼ全域で降水量が平年値に近づいた。

5.1.3 2013 年の降水量とその分布

図 3.9 に 2013 年の洪水期間における降水量及びその分布を示した。前節と同じく，平年降水量の状況は図 3.7，氾濫域の状況は図 3.4 を参照されたい。

2013 年 7, 8 月に多量の降水量を記録した。全流域の平均降水量はそれぞれ 181.7 mm, 123.9 mm である。その平年値より多くなった。アムール川流域では，7 月に中央の南から北まで (A, B, E, F) 降水量が平年より顕著に増加した。その平均総降水量が 272.2 mm となり，平年の 2.16 倍であった。流域で降水量

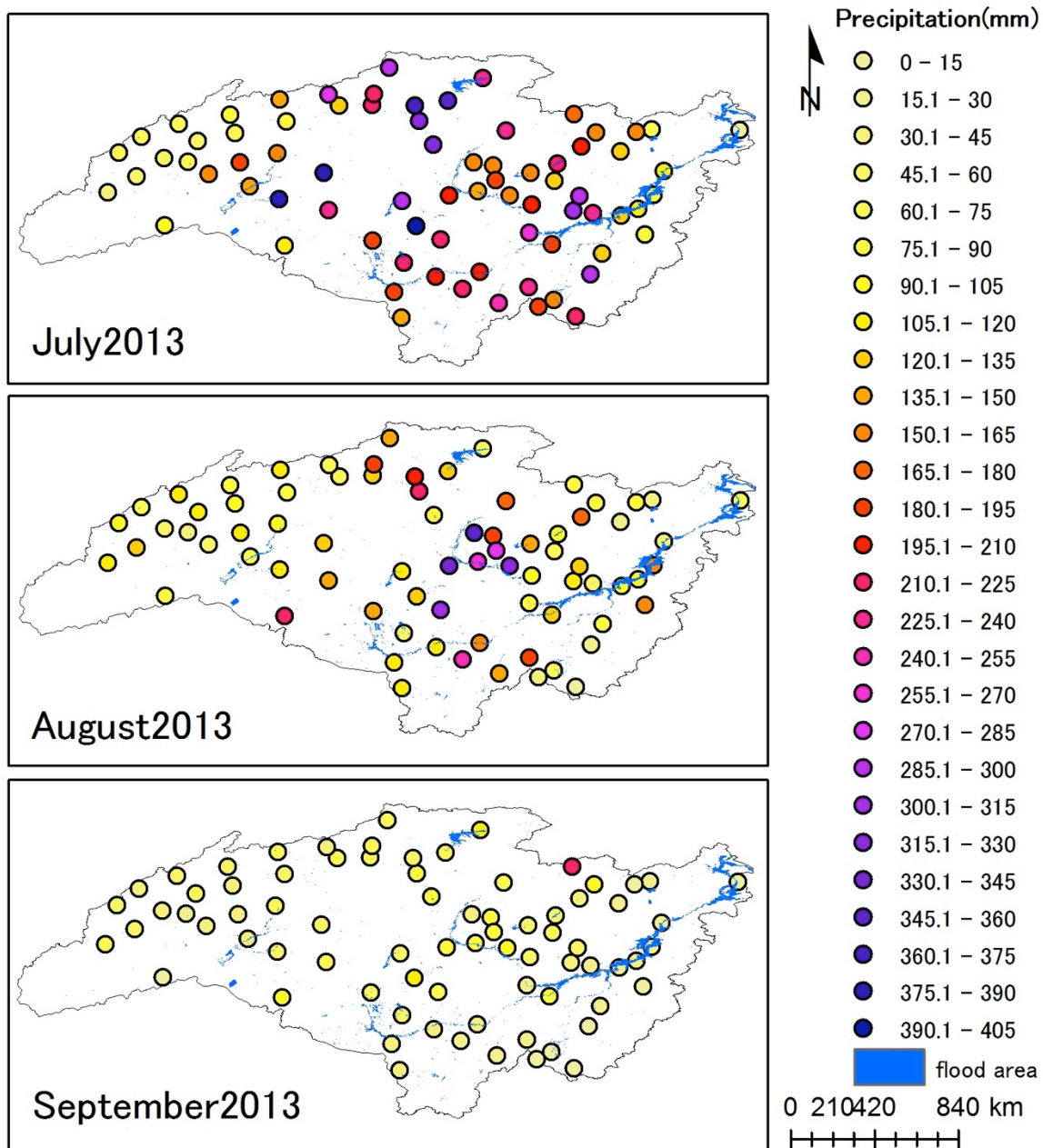


図 3.9 2013 年 7, 8, 9 月降水量分布

が最も多かった場所は松嫩平原 (E) の東北部である山地であった。そこでは 7 月の総降水量が 384.5 mm に達し、平年の 3.81 倍であった。アムール川の支流であるゼヤ川流域 (A) も平均総降水量が 328.1 mm となった。その流域において各観測点の月降水量が平年の 3 倍を超えた。氾濫域周辺の最大降水日数は 23 日であった。7 月の多量の降水量は 8 月までに少なくなった。アムール川上流

とゼヤ川との合流点 (A, 氾濫域の周辺) 及び松花江の北部における丘陵地 (F) では 8 月の総降水量は平年の 2 倍以上を維持したが, 他の場所では大部分が平年値に戻っていった。8 月の降水量が最大であった場所はアムール川上流域である。そこにおける各観測点での総降水量の最大は 330.6 mm に達した。降水量最大の地点における降水日数は 23 日であり, 他の地点の降水日数も 16 日以上に達した。

ここでは, 氾濫をもたらす直接的な原因として, 歴史水位記録を超えた大洪水である 1998 年と 2013 年との降水量の空間特徴とその対応年間の氾濫域の空間分布を検討した。図 3.8 と図 3.9 から, 1998 年より 2013 年の方が, 降水量と降水域の面積が大きかったことを確認した。2013 年にはアムール川の中流域 (C) ・下流域 (D) で 1998 年より広く氾濫したが, 降水量が平年値より多くないことを確認した。それはアムール川の上流及び主要な支流である松花江・嫩江流域の氾濫から及ぼされた水であると考えられる。アムール川下流域での氾濫はほとんど支流 (ゼヤ川, 松花江・嫩江) 及びアムール川中流以上の氾濫によるものであることがわかった。

5.2 地形と氾濫域との関係

地形は, 洪水氾濫に形成するメカニズムの一つである。地形を判読することは, 洪水の発生前に, 地域環境に合った土地利用を策定し, 洪水災害による被害を低減するためには有効な手段である。被害を低減する事を目的とし, ここでは 1998 年と 2013 年のアムール川氾濫域の地形特徴を明らかにする。

図 3.10 にアムール川流域の勾配分布を示す。図 2.1 に表した流域の地形と合わせて判読すると, 氾濫域はほぼ沖積平野に対応していることがわかる。氾濫域の勾配はほぼ 0.2° 以下であり, 緩傾斜の平野に洪水が集中し, 氾濫を引き

起こしたことが理解できる。

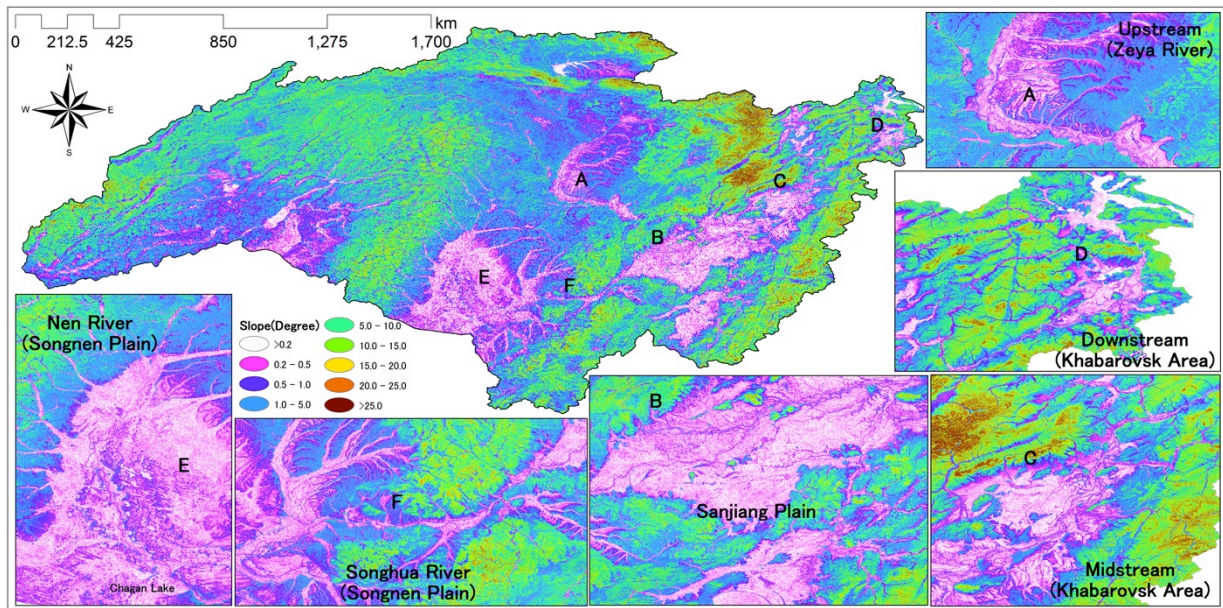


図 3.10 アムール川流域の勾配

松嫩平原 (E) は嫩江と松花江による沖積平野であるが、地勢が平坦で勾配はほとんど 0.5° 以下である。平野内には河道の遷移による旧河道 (河川両側の自然堤防の間) の形跡が多く、自然堤防の背後には後背低地もよく発達している。そのため、山地から流出する洪水が平野に流入し、排水しにくい氾濫原を形成する。1998年と2013年の洪水氾濫は旧河道が洪水の水路になったものである。特に1998年この地域で長時期の降水が発生し、背後低地は氾濫が広がる原因であった。三江平原 (B) およびアムール川の中・下流域 (C, D) も松嫩平原と類似する特徴を持ち、氾濫が生じやすい。

三江平原 (B) とアムール川の中・下流域 (C, D) では、平野の勾配が氾濫域の勾配とほぼ一致し、 0.2° 程度となる。これらの地域では、背後湿地および旧河道の分布が松嫩平原と比べるとあまり明瞭ではない、台地は河川近傍に広く分布している。それにより氾濫域が広がることができずに河川沿岸で激しく氾

濫したと考えられる。

氾濫域の中で 2 カ所の狭窄部がある。一つは松嫩平原と三江平原との間における松花江が山地を流れてきた谷底平野 (F) である。別の狭窄部はアムール川とゼヤ川の合流地点 (A) である。平野部分の勾配が 0.4° 以下であっても兩岸山地から流れてきた水も 1998 年と 2013 年に広く氾濫しなかった。それは、河川が平野 (B, C, D, E) における上流から、下流まで標高の落差がおよそ 3~20 m となって、峡谷 (A, F) における短距離でその落差が 40 m 程度になり、峡谷では河道の傾斜が大きくなって通水能力を上げたからと考えられる。

氾濫にもたらす直接的な原因として、ここでは、アムール川流域における 1998 年と 2013 年の氾濫域の空間分布と地形の空間特徴を検討した。各地区の地形が氾濫域の形を制限していることを確認した。

5.3 森林被覆変化と洪水氾濫との関係

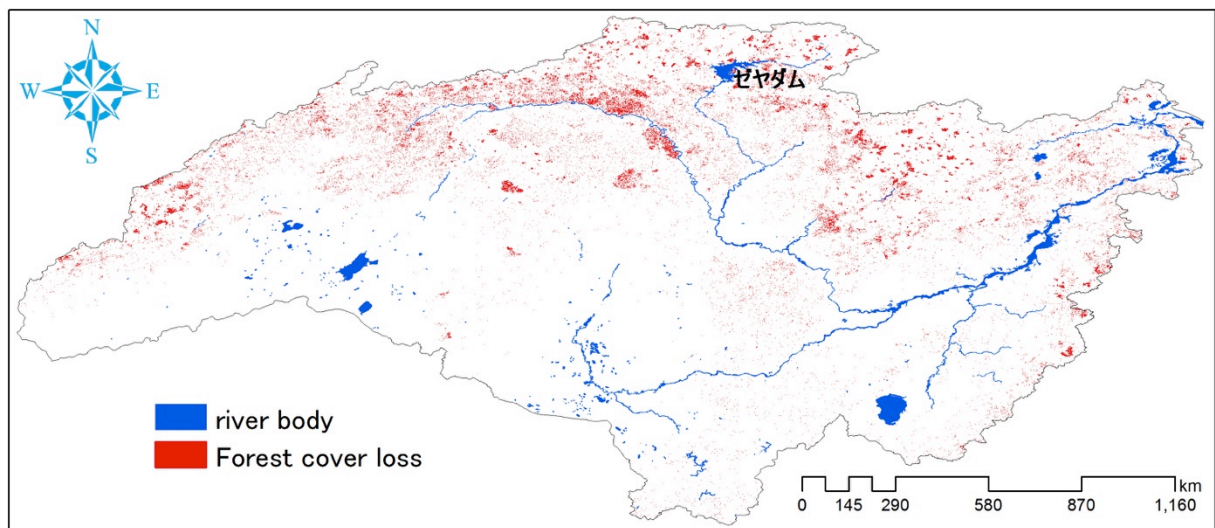


図 3.11 Global Forest Change 2000-2012 (University of Maryland) による

2000-2012 年の森林被覆減少域の分布

森林は洪水緩和機能を持ち、同時に流出土砂を減少させる。図 3.11 は Global Forest Change (Hansen, 2014) による 2000 年と 2012 年間の森林減少域の分布を示す。松嫩平原の氾濫原周辺の丘陵では森林分布は大きな変化はなかったが、これが 2013 年洪水において 7 月流域の山地における月降水量は 384.5 mm だったにも関わらず、嫩江流域の氾濫域は 1998 年洪水より拡大しなかった原因の可能性はある。

アムール川流域内で森林減少域はロシア側に広く分布している。アムール川上流の両岸の山地、ゼヤダムの周辺、ゼヤ川の両岸、アムール川の中下流域における山地では森林被覆域が減少している。これが 2013 年アムール川洪水における氾濫を引き起こした素因の一つである可能性もあるが、森林被覆変化の検証とともに、今後の検討を要する課題である。

ここでは、人間活動より関与される森林被覆変化を間接的な要因としても確認した。2000～2013 年間に森林の被覆がアムール川流域で減少した。ただし松嫩平原では森林面積にあまり変化がなかった。それは 2013 年の降水が多い場合にも氾濫域が 1998 年より大きくなる一つの原因として考える。同様に、アムール川の氾濫がアムール川の沿岸、特に沿岸の山地地域に森林の減少と関わる可能性があると考えられる。

6. まとめ

アムール川は大陸河川として、その流れによって形成する流域の地形の特徴はこの流域で常に洪水の影響を受ける要因となる。さらに、アムール川沿岸には連続堤防がないため、洪水リスク評価は水害を軽減する有効な手段となる。洪水履歴は洪水リスクを判断する基準であるものの、流域面積が広いため、全

流域の氾濫域情報の集積は困難である。1998年及び2013年、歴史水位の記録を上回る流域的洪水が発生した。氾濫した場所で再氾濫する可能性が高いという経験的事実に基づいて、全流域に対してリモートセンシングを手段として氾濫の空間解析を行った。

結果は、嫩江流域・松花江流域及びアムール川の中・下流域は氾濫しやすい場所であることを確認した。上流及びその支流であるゼヤ川の合流処では2013年に氾濫したことがわかった。松花江による山間に流れた平野部分では、氾濫が1998年とも2013年とも沿岸で氾濫し、あまり平野で広がらなかったことがわかった。

氾濫にもたらす直接的な原因として、降水量、地形の空間特徴と氾濫域の空間分布を明らかにした。アムール川流域では、降水の量および分布が氾濫の場所と強く関連付けられる。氾濫域における氾濫時期の降水量は平年の2倍以上であった。氾濫域の勾配は 0.2° 以下である。旧河道が多く分布するところが氾濫時期に洪水の流路になる。台地が広く分布する河岸において氾濫水は河川沿岸で激しく氾濫し、平野全体に広がらなかった。

人間活動より関与される森林被覆変化を間接的な要因として確認した。2000～2013年の間に森林の被覆がアムール川流域で減少した。ただし、松嫩平原では森林面積があまり変化しなかった。それは2013年降水が多い場合にも氾濫域が1998年より大きくならなかった一つの原因として考える。同様に、アムール川の氾濫も森林被覆の減少と関わる可能性があると考ええる。

アムール川流域における全流域の洪水履歴についての検討は初めてである。本研究で作成した2回の洪水イベントを対象とした氾濫域の分布図は浸水履歴図として今後の洪水マネジメントの基礎的資料として活用することができると考えられる。

引用文献

Hansen M.C. 2014. “Global Forest Change 2000-2012”, University of Maryland, <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download.html> (参照 : 2014.8.26) .

気象庁 2013. “2013年7月以降のアムール川流域の多雨について”, 気象庁, 2013/9/19, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1309/19a/world20130919.html>. (参照 : 2013.10.5) .

Li J.R., Kondoh A., Nakayama D.. 1999. Analyses on Floods of 1998 in China. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources* **12** (4) : 307-318.

NOAA, “GHCND”, NOAA, https://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=obs_m&theme=ghcndms (参照 : 2014.5.26) .

第四章 アムール川流域における水害リスク評価 --中国三江平原を例として

洪水リスク評価は洪水をマネジメントする重要な方法の一つである。アムール川流域に対する洪水リスク評価は、災害を低減する有効な手段になると考えられる。しかし、アムール川流域面積は 205 万 km² と、広大であるため、流域内の土地の自然的な性質が複雑である。一方、三江平原はアムール川の中流域の一部であり、面積が 10.6 万 km² であり、典型的なアムール川流域の氾濫原地形である。よって、ここでは、アムール川流域の一部である三江平原を例とし検討することとする。

1. はじめに

三江平原 (Sanjiang Plain) は中国とロシアの国境に沿って流れるアムール川 (黒竜江)、ウスリー川と松花江 (Songhua River) に囲まれた平野であり、三川合流後のアムール川は、世界で最も生産性の高い海域の一つであるオホーツク海に流出する (李ほか, 2011)。

1949 年の中国建国当時の三江平原の湿地面積は 5.36×10^4 km² であり、三江平原全域の 49.3% を占めていた。中国の人口増加・経済発展に伴い食糧需要量も増加したため、その後の開墾によって湿地面積は 1.04×10^4 km² まで減少した (Wang *et al.*, 2008)。Murooka *et al.* (2007) はリモートセンシングを用いて 1992 年～1996 年の四年間の湿地面積及び耕地面積の変化を地形單元ごとに検討した結果、全ての地形單元で耕地が増加していたが、沖積平野の湿地が耕地開拓の主な対象とされており、湿地は氾濫原と丘陵地域で減少したことを明らかに

している。

1998年に黒竜江省政府は三江平原の湿地状況調査に基づき、その時期まで残されていた湿地の開拓を禁じ、以降、三江平原は湿地保護の時期に入った(Wang *et al.*, 2008)。しかし、2009年11月、中国国家発展改革委員会は2009年～2020年の中国食糧生産計画を決定したが(以後は“食糧生産量企画”と呼ぶ)、食糧生産量は2015年までは 5300×10^8 kg/year、その後2020年までは 5500×10^8 kg/yearを維持し、東北地域は食糧生産の核として全国の食糧生産量の増量のうち30%を分担することを決定した。三江平原の食糧生産能力は 100×10^8 kg/yearであり、黒竜江省の食糧生産力の20%に相当する(Liu, 2011)。よって三江平原における食糧生産状況は今後の中国における食糧生産量にとって重要な役割を果たすことになる。

三江平原は中国における食糧生産基地として、生産された食糧の75%を域外へ輸出している(Liu, 2011)。1994年から日本もこの地域の米を輸入しており、中国のみならず日本の食糧問題を考えるためにも重要な地域である(春山・増田, 2007)。

三江平原では、地殻変動により地形は相対的に山地が隆起し、平原が緩やかに沈降している。老年地形を呈するため、山地から流入する河川の侵食力は大きくはなく、平原の起伏が小さいため、平原は堆積傾向にある。そのため、河床は上昇し、河道は浅く狭くなり、河川の排水機能が低くなる。水が集中する増水期に、山地から流入する水が湛水し、氾濫原がよく発達している(Hou *et al.*, 2003)。

2000年における三江平原の耕地の中で 2.31×10^4 km²は氾濫しやすい区域にあり、全耕地面積の63%を占めるとされている。中国建国以降の50年間で三江平原では大水害が16回発生したが、これは三年に一回の割合となる(Wang *et*

al., 2003)。主要な河川である松花江は 4.1 年ごとに一回の大洪水，アムール川は 6 年ごとに大洪水，3 年ごとに小洪水が発生し，ウスリー川では 5 年ごとに大洪水，2 年ごとに小洪水が発生している (Hou *et al.*, 2003)。最近では 1998 年と 2013 年に大規模な水害が発生している。三江平原においては常に洪水による農業へのリスクが存在しているが，洪水に備える施設も完備されておらず，大洪水に抵抗出来る堤防はほとんどない。ダム・堤防の建設は計画中で，一部は完成したが，その効果は直ちには現れない (Dai *et al.*, 2012)。

よって，三江平原において食糧増産を確保するためには，より迅速かつ効果的に災害を避ける手段を見つける必要がある。そこで，水害リスク分析により三江平原においてリスクが存在する場所を予見し，中国政府の食糧生産量企画を達成するために，耕地面積の変化を把握し，耕作における水害リスクを確認し，水害による損失を減少させることを本研究では目指している。

本章の目的は広大なアムール川流域の洪水リスク評価を行うことができるように，典型的な氾濫原の一つ，中国における重要な商品化食糧生産地である三江平原を対象として，食糧生産に対する安全を確保し，食糧生産量の増加を担保するために，平野の水害リスクを明らかにすることである。

2. 研究地域

2.1 三江平原の地形

三江平原 (図 4.1) は中国黒竜江省東部の $129^{\circ} 30' \sim 135^{\circ} 05' E$ ， $43^{\circ} 50' \sim 48^{\circ} 40' N$ に位置するアムール川，松花江とウスリー川の遷移で形成された沖積平野である。三江平原の行政管轄地域は鶴岡市 (Hegang)，ジャムス市 (Jiamusi)，双鴨山市 (Shuangyashan)，鶏西市 (Jixi)，七台河市 (Qitaihe)

位置する。完達山山脈は三江平原を南部と北部の二つに分割し、北部には狭義の三江平原（本文では小三江平原と呼ぶ）、西南部に倭肯河（Woken River）によって形成された河谷平野、東部に穆稜河（Muling River）によって形成された沖積平野が位置する。

域内の標高は数十 m から数百 m の範囲にある。平野の北東部では段丘がよく発達し、河川近傍では氾濫原が形成されている。残丘状地形の背後では高位の氾濫原が形成されている（領域①）。小三江平原中部、松花江の左岸では山地から流出するヅル（Dulu）河による扇状地が形成されている（領域②）。平野の西部では、山岳が多いが、倭肯河による河谷平野及び松花江による沖積平野がある。二つの平野の標高は倭肯河側がやや高い（領域③）。平野の南部では、主な地形としてハンカ湖と穆稜河が形成した沖積平野がある（領域④）。

2.2 三江平原の気候

三江平原は寒温帯湿潤モンスーン気候に属する。常にシベリアとモンゴル高原の寒気団の影響を受けて、冬は長く、寒冷で乾燥し、夏は短く湿潤である。海洋気候の影響で、春は強風が多く、少雨である。秋に降雨が多く、春期と秋期における気温の変化は大きい。三江平原全域の年平均気温は 1~2 °C であり、1 月に最低気温を記録する。1 月の平均気温は -24~-20 °C であり、11 月から翌年 3 月の期間の気温は 0 °C 以下となる。7 月の気温が年間で最高となり、平均気温は 21~23 °C となる。年降水量は 384~886 mm であるが、雨期は 7 月以降となり、7~9 月の降水量は年間の 50~70% を占める。年間の降水日数は 84 日から 126 日の範囲にあり、平均は 105 日である。年間の降水量は変動が大きく、春の旱魃、秋の冠水の原因になる。三江平原では年日照時間が長く、霜降期が長い。しかし、熱量・水分・日射量の三つの作物成長に影響する気候要素は一

年一作の需要を十分に満たすため、主に水稻・小麦・トウモロコシ・大豆を一年一作で耕作する (Dai *et al.*, 2012)。

2.3 三江平原の水系

三江平原では、河川が 190 本あまり存在している。主要な河川は 19 本、主に松花江、ウスリー江及びアムール川の支流である。三江平原はアムール川の中流とウスリー江・松花江との合流所に位置する。三江平原を流下する松花江は、流域面積は 100 万 km² であり、河道の幅が 1,000~2,500 m、平均流量がおよそ 4,000 m³/s となる (Dai *et al.*, 2012)。三つの河川が三江平原で平野河川になる。地勢が平坦のため、流速が遅く、流量が大きくなる。

3. 使用データ

3.1 衛星リモートセンシングデータ

耕地および氾濫域の抽出のために SPOT VGT (SPOT VEGETATION) データセットを使用した。SPOT VGT は SPOT4 号・5 号に搭載された陸域の植生被覆状況を観測するセンサーである。1998 年 3 月から運用が開始された。本研究では 1998 年以降の連続データが得られる植生指標 (NDVI) の S10 プロダクト (VITO, 2007) を使用した。S10 プロダクトではピクセルごとに 10 日間の NDVI の最大値を選択することにより雲の影響を取り除いてある。時間分解能は 1 旬 (10 日)、空間分解能は 1km である。

SPOT VGT データの解析期間は 1998~2011 年とした。氾濫域を抽出するために、研究地域の降雨の季節配分の特徴及び作物の成長期間に基づき、5 月下旬 (15 旬) の播種から 10 月上旬 (28 旬) の収穫までのデータを利用した。

3.2 標高データ

第三章で紹介した SRTM データは、ここでは DEM を用いた地形解析に基づき氾濫域及び作成したハザードマップを検証するために使用した。

3.3 資料データ

3.3.1 統計年鑑データ

中国統計出版社が出版している「中国統計年鑑」(2012年)及び「黒竜江省統計年鑑」(1999～2012年)に記載されている耕地面積を使用して、リモートセンシングにより抽出した耕地面積を検証した。洪水については記載されている降雨量データから、研究地域の洪水氾濫時期(7,8,9月)の降雨量を纏めて、抽出した氾濫域の検証に利用した。

3.3.2 中国 1 km メッシュ土地利用データ

「中国国家資源環境のリモートセンシングマクロ調査と動態研究」と「国家基本資源・環境のリモートセンシング情報動態サービス体系の設立」の2つのプロジェクトにより作成された中国 1 km メッシュ土地利用 2000 年代(1996～2000年)データは 25 個の空間レイヤをもち、1つの空間レイヤが一つの土地利用タイプを表す。各レイヤの任意メッシュ値は該当土地利用タイプの実際の面積が 1km^2 の中に占める百分率の値である。この百分率は 100 万分の 1 土地利用ベクターデータの面積属性の統計から得られたものである。ここでは抽出された耕地面積の空間分布を検証するため、水田と畑のレイヤを使用した。

3.3.3 水情年報

中国水利部のホームページに掲載された「水情年報」は年ごとに中国の大河川における水状況の異常（氾濫状況など）について記述している。1998年からの情報が利用可能であり，2007年までの資料をホームページから収集した。1998年の洪水に対しては松花江について詳細な記述があった。本研究では抽出した氾濫域の検証情報として利用した。

4. 研究手法

4.1 耕地面積の抽出

耕地の水害リスクを明らかにするために，研究対象地域の耕地を抽出する必要がある。李ほか（2011）は NDVI と NDWI (Normalized Difference Water Index) の季節変化（フェノロジー）に基づき水稻を抽出する条件を求め，三江平原の水田面積およびその経年変化を求めている。三江平原の作物は主に水稻，トウモロコシ，大豆，小麦であり，播種時期はほぼ同じ（5月下旬）で，収穫時期もほぼ同じ（9月下旬）である。作物の成長パターン（フェノロジー）も類似しており（ほぼ8月中旬頃に作物の葉が全展開），一年一作である。よって，作物の成長パターンを耕地・林地・湿地・草地の四つに纏め，衛星データによるフェノロジーによる分類・抽出を試みた。

図 4.2 は，2000年の NDVI データによる土地タイプごとのフェノロジーを表す。エラーバーは各旬の各土地被覆における標準偏差である。ほぼ各旬にて林地の NDVI 値が最大であること，草地と湿地の NDVI が区別しにくいこと，耕地が 15～17 旬で他の三つの土地タイプの NDVI より著しく小さいことがわかる。それは 15～17 旬における作物が播種から展葉にいたる成長期であるからである。よって，15 旬における耕地は植生被覆がないが，草地・湿地・林地は植生

に被覆されている。その後の作物生長の差別より，NDVI の差違が小さくなるため，ここでは，15 旬における耕地の NDVI とその標準偏差による耕地 NDVI 閾値を作って，耕地の抽出に使用することにした。

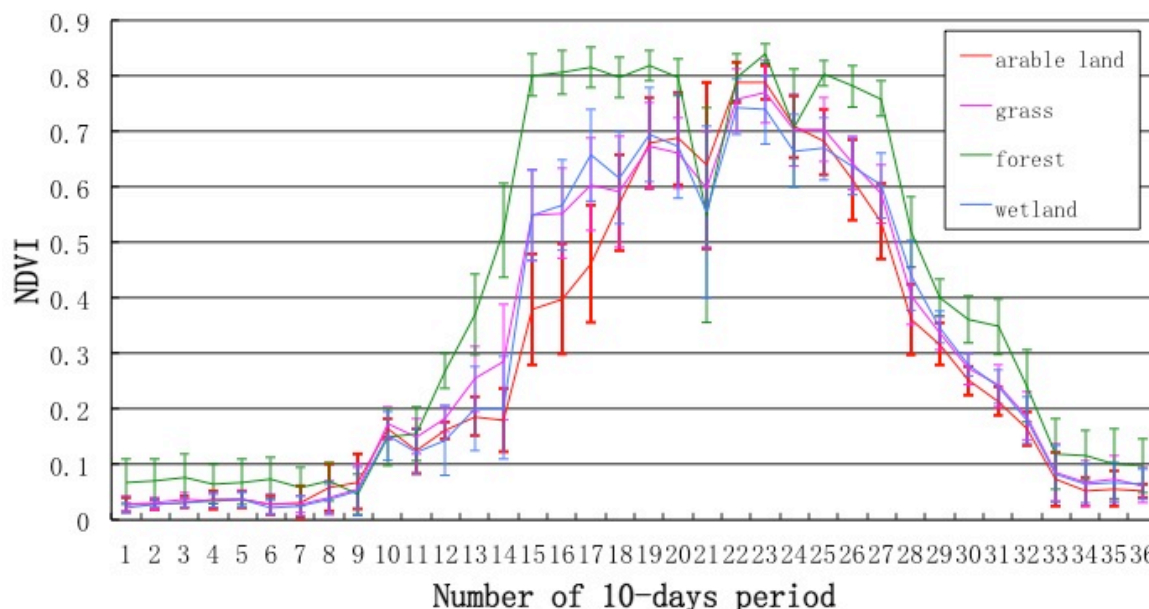


図 4.2 三江平原の典型的な土地利用における 2000 年の NDVI の季節変化パターン

4.2 氾濫域の抽出

水のスペクトル特性は近赤外で吸収が強く，緑で反射が強い。よって水域を抽出する際に，この二つのバンドを使用することができるが，使用する衛星データの時間分解能が長い場合（SPOT VGT は 10 日），洪水氾濫の正確なタイミングを抽出することは難しい。また，植生に覆われた湛水域（以後は一括して“氾濫域”と呼ぶ）の抽出も困難である。しかし，水害の発生により，植生が影響を被ると NDVI 値が正常時より小さくなることが予想される。また，災害後も植生に対する影響が残存するため，NDVI の時系列から洪水氾濫を同定することができる。

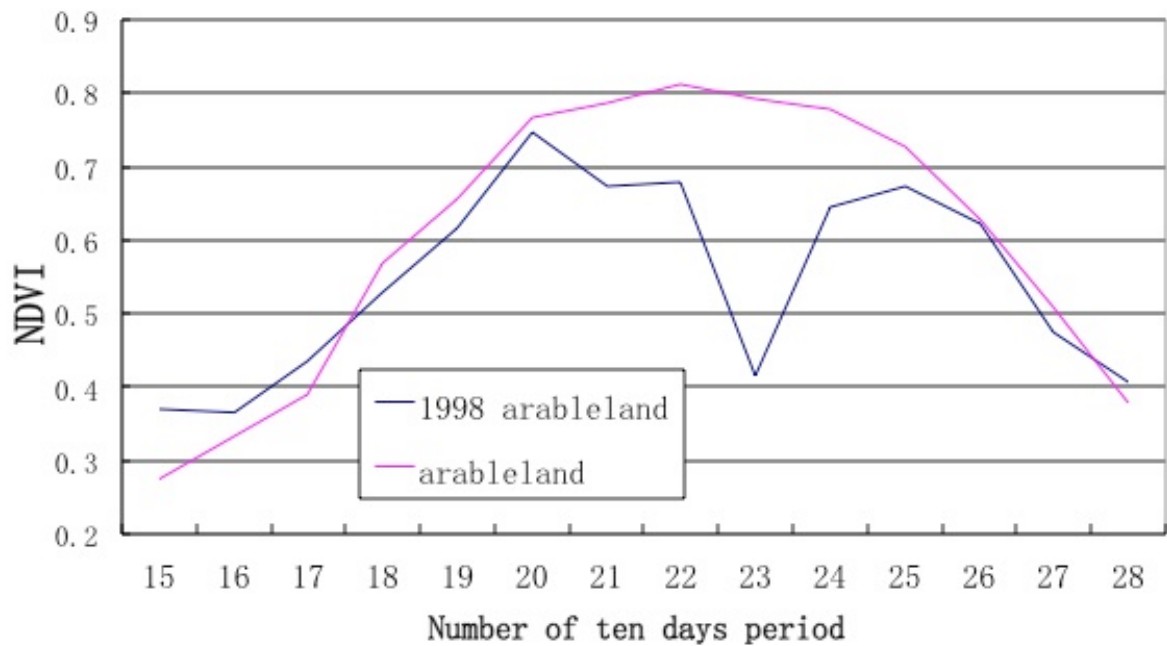


図 4.3 耕地の NDVI 経年平均値と 1998 年の耕地の NDVI の季節変化

Shrestha *et al.* (2013) は研究地点における 13 年間の NDVI の中央値を正常の植生パターンとして、氾濫年のパターンと比較することにより、洪水氾濫月をよく抽出できることを示した。図 4.3 に本研究地域の二つの土地タイプにおける植生の 1998～2011 年の NDVI の平均値と洪水年であった 1998 年の耕地の NDVI の季節変化を示す。春季の作物成長に従って、NDVI は作物の葉が全て展開する（8月上旬）前に上昇し、その後に低下することが確認された。1998 年は 7月下旬から 8月下旬まで異常が発生しているが、それと「水情年報」に記載された洪水の経緯における松花江本流の記述とよく合致することがわかっている。そこで、平年からの偏差を用いて、8月上旬以前では後旬が前旬より下がった場合、その後は前旬が後旬より小さい場合を水害発生と判断した。ただし、展葉前後（7月中旬～8月下旬）は NDVI の差違が小さく、三江平原では虫害・干害が NDVI に影響を与える場合もある。NDVI の微小な変化を水害と誤判別しないように、洪水年であった 1998 年の NDVI の異常値を参照して、こ

の期間前後の旬における変化率が 11%より大きくなった時、水害による変化として氾濫域と判断した。

なお、この方法は、氾濫が植生の生長に影響することを利用するもので、本研究では耕地を主な対象として検討する。他の植生被覆（林地、湿地、草地など）の氾濫に対する応答は耕地と異なる可能性があるが、今後の検討課題である。

4.3 ハザードマップの作成

本研究では、研究地域の氾濫履歴を用いて、各場所の氾濫回数をリスクとして、ハザードマップを作成することにした。実際には下記の計算式を用いて算出した。

$$\alpha = \sum_{i=1}^{14} Ni \quad (Ni = \{0, 1\}) \quad (1)$$

ここで、 α は氾濫発生年数であるが、リスクを表すと考えた。また i は各年、 N は画素ごとの氾濫発生フラグを表す。 N は、平常年は 0、氾濫域と認定された年は 1 を与える。

画素ごとに求めた α は 0~5 の範囲に全体の 85%が入るため、この範囲でリスクレベルを設定した。14年間の画像を使っているため、 $\alpha = 1, 2, 3, 5$ 以上はそれぞれ“14年に1回”、“7年に1回”、“5年に1回”、“3年以内に1回”に対応する。そこで、相対的なリスクレベルを「氾濫なし」、「レベル 1」、「レベル 2」、「レベル 3」、「レベル 4」の 5段階に分類した。

4.4 資料調査

本研究では、ホームページ・参考文献を参照すると同時に、Tencent 社が開

発したオンラインチャットソフト「QQ」を使って，三江平原の 30 世帯の農家に聞き取り調査を行い，2011 年頃の農作収支状況について 2013 年 8 月に調査した。

「QQ」はチャットの相手の場所・年齢を選択することができる。本研究では，中国ネットを利用する人群を考慮して年齢は 30～40 代に設定した。聞き取りを行った方の職業は全て農業であることを確認した。母集団の代表性については検討の余地があるが，聞き取り調査のための簡便法として使用した。

5. 結果

5.1 耕地面積

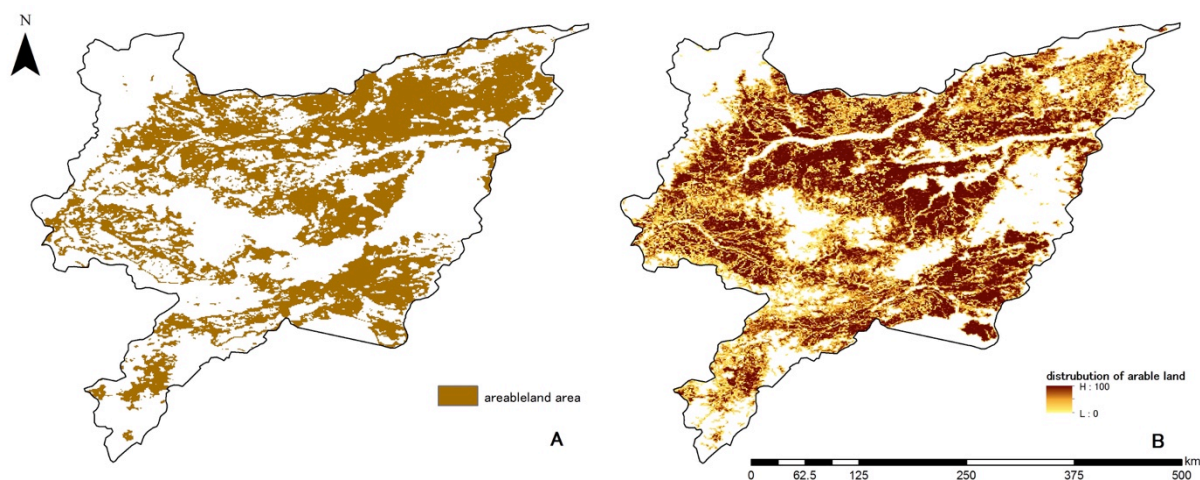


図 4.4 SPOT VGT による 2000 年の耕地の抽出結果(A)及び中国 1 km メッシュ土地利用データによる耕地分布図(B)

図 4.4 (A) に SPOT VGT の 2000 年第 15 旬のデータを利用した耕地の抽出結果を示す。2000 年における三江平原の耕地は，西部では分散しているが，東部の特に北東部では集中している。それは北東部に大規模な国営農場があるため

と考えられる (李ほか, 2011)。図 4.4 (B) は中国 1 km メッシュ土地利用データによる三江平原の 2000 年の耕地状況である。分布状況を比較すると, 両者はよく一致しているように見える。さらに, 面積の検証のために 2000 年の黒龍江省統計年鑑データと比較した。

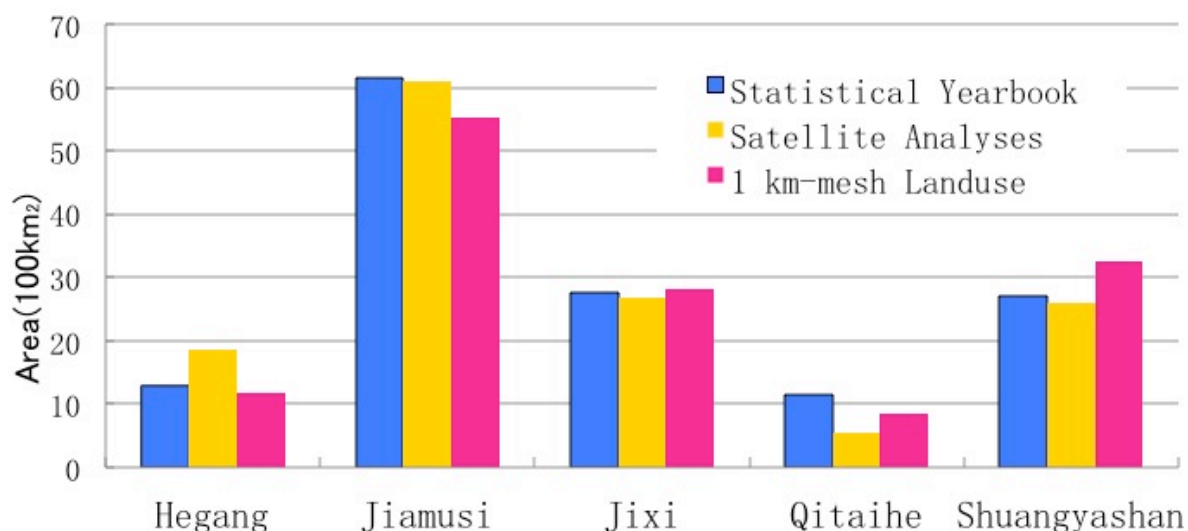


図 4.5 統計年鑑、中国 1km メッシュ土地利用データ及び衛星画像解析により得られた耕地面積の比較

図 4.5 に選択した 5 市における耕地面積の統計値と本研究による計算結果, 及び中国 1 km メッシュ土地利用データによる耕地面積を示す。なお, 中国 1km メッシュ土地利用データは 1km メッシュ内の耕地の被覆率で表されているので, 耕地の面積率が 50% を超えるメッシュを耕地と認定して面積を積算した。図 4.5 から三者はよく一致しており, 本研究による耕地の抽出結果は一定の精度を持つと考えられる。

抽出した 1998 年と 2011 年の耕地を図 4.6 (A), (B) に示す。三江平原における耕地面積は増加したが, 平野の南部山岳地帯及び穆稜河の下流 (ウスリー川

との合流点付近) ではやや減少する結果となった (図 4.6 (C))。小三江平原における松花江の下流及び平野への流入部分の河道域で耕地が出てきたが, Google Earth によると平野への流入部における河岸段丘や, 下流のアムール川との合流点でも耕作の痕跡が認められた。

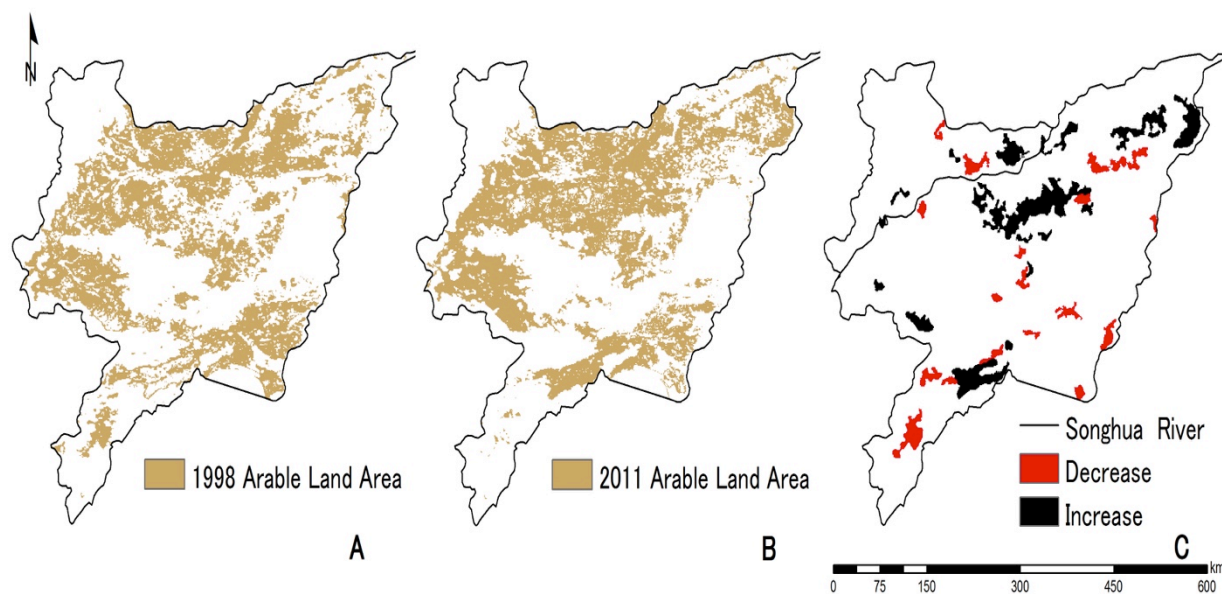


図 4.6 1998 年と 2011 年における耕地面積の変化

(A) 1998 年・ (B) 2011 年・ (C) 耕地面積の増減

5.2 氾濫域及びハザードマップ

5.2.1 氾濫域の抽出

図 4.7 は三江平原の経年洪水による被害履歴である。三江平原では, 洪水による被害がほぼ毎年が発生している。非常に激しいのは 1998 年の大洪水である。そのほか, 2004 年及び 2006 年に比較的な広く氾濫があった。よく氾濫する場所は松花江の近傍及び山麓の扇状地である (図 4.7)。

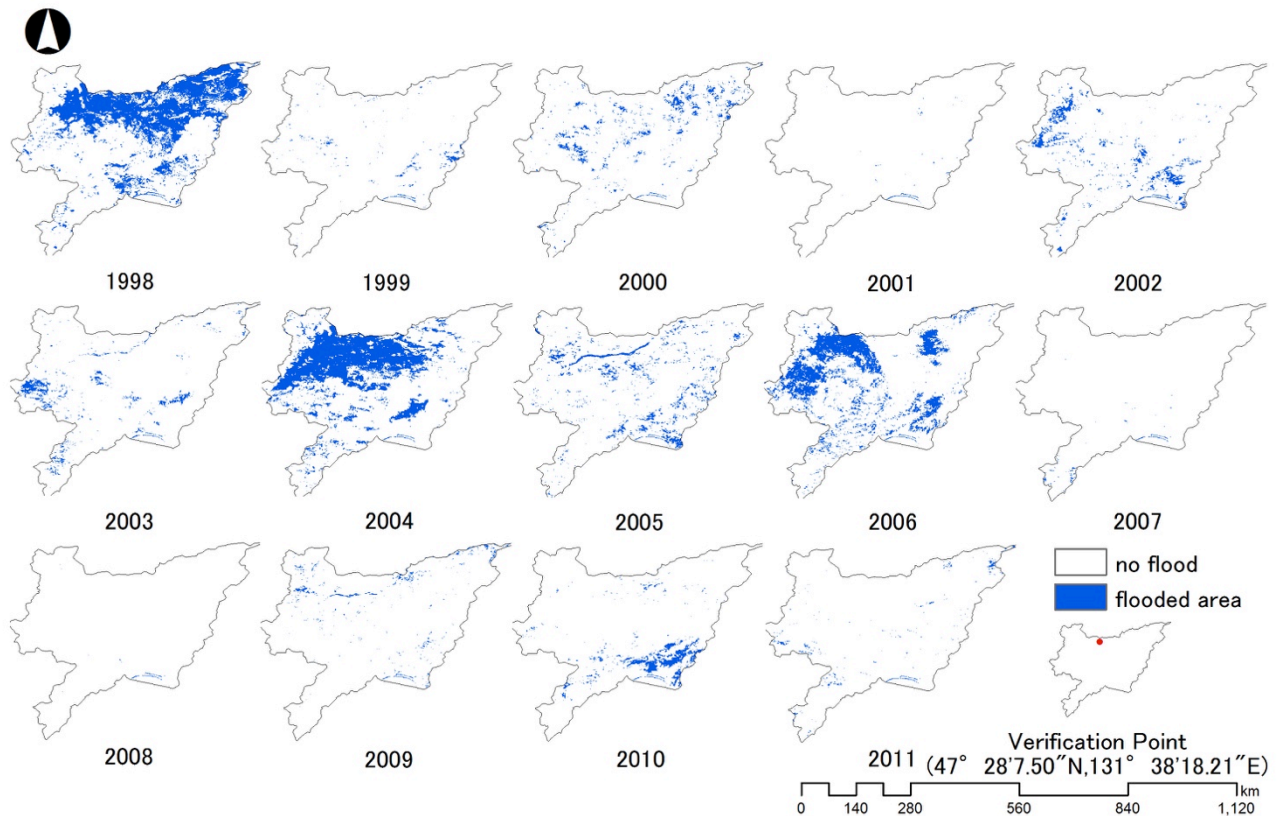


図 4.7 1998-2011 年における洪水氾濫域の抽出結果

三江平原における洪水氾濫域を抽出した結果を図 4.7 に示す。1998 年の洪水氾濫域が大きいのは夏期の嫩江、松花江における大洪水の発生による (Li *et al.*, 1999)。統計年鑑によると洪水時期 (7 月～9 月) の降雨量は、鶴岡・双鴨山・ジャムス地域においてそれぞれ 453 mm, 424 mm, 429 mm であり、鶏西地域 (三江平原最南部) における降雨量は 247 mm であった。この時期の平年の降雨量はそれぞれ 357 mm, 300 mm, 296 mm, 271 mm であり、平野内でも 1998 年の降水量が多かったことがわかる。2004 年の氾濫域も大きいですが、各地域の降雨量はそれぞれ 413mm, 161mm, 206mm, 223mm であり、やはり平年値よりも大きかった。氾濫域分布を直接検証するデータはないが、画像 (SPOT VGT と Google Earth 時間スライダ, および Landsat 画像を併用) の判読を行うと同時に, Ranjay

et al. (2013) の方法で任意の地点で NDVI の季節変化を確認した。ここでは、例として地点 $47^{\circ} 28'7.50''N, 131^{\circ} 38'18.21''E$ (図 4.7 参照) の値を使用し、14 年間の NDVI の中央値とその地点の NDVI 値を比較した結果を図 4.8 に示す。1998 年および 2004 年の NDVI の季節変化には明瞭な氾濫のシグナルがあり、氾濫域として抽出されていると同時に、画像判読結果とも整合性があり、本研究における氾濫域抽出の精度を確認することができた。

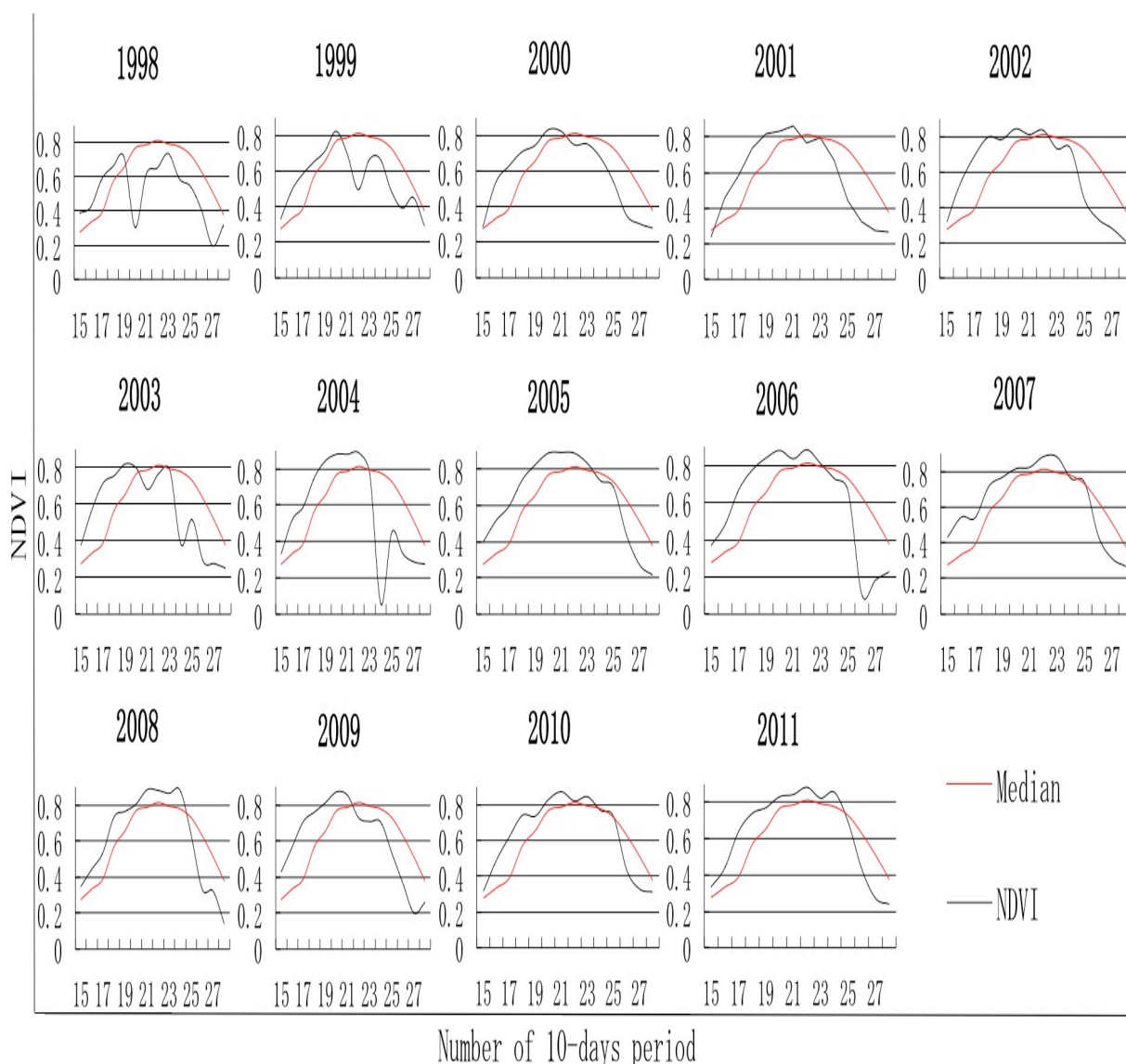


図 4.8 抽出された氾濫域の検証 (位置は図 4.7 に示す)

5.2.2 ハザードマップ

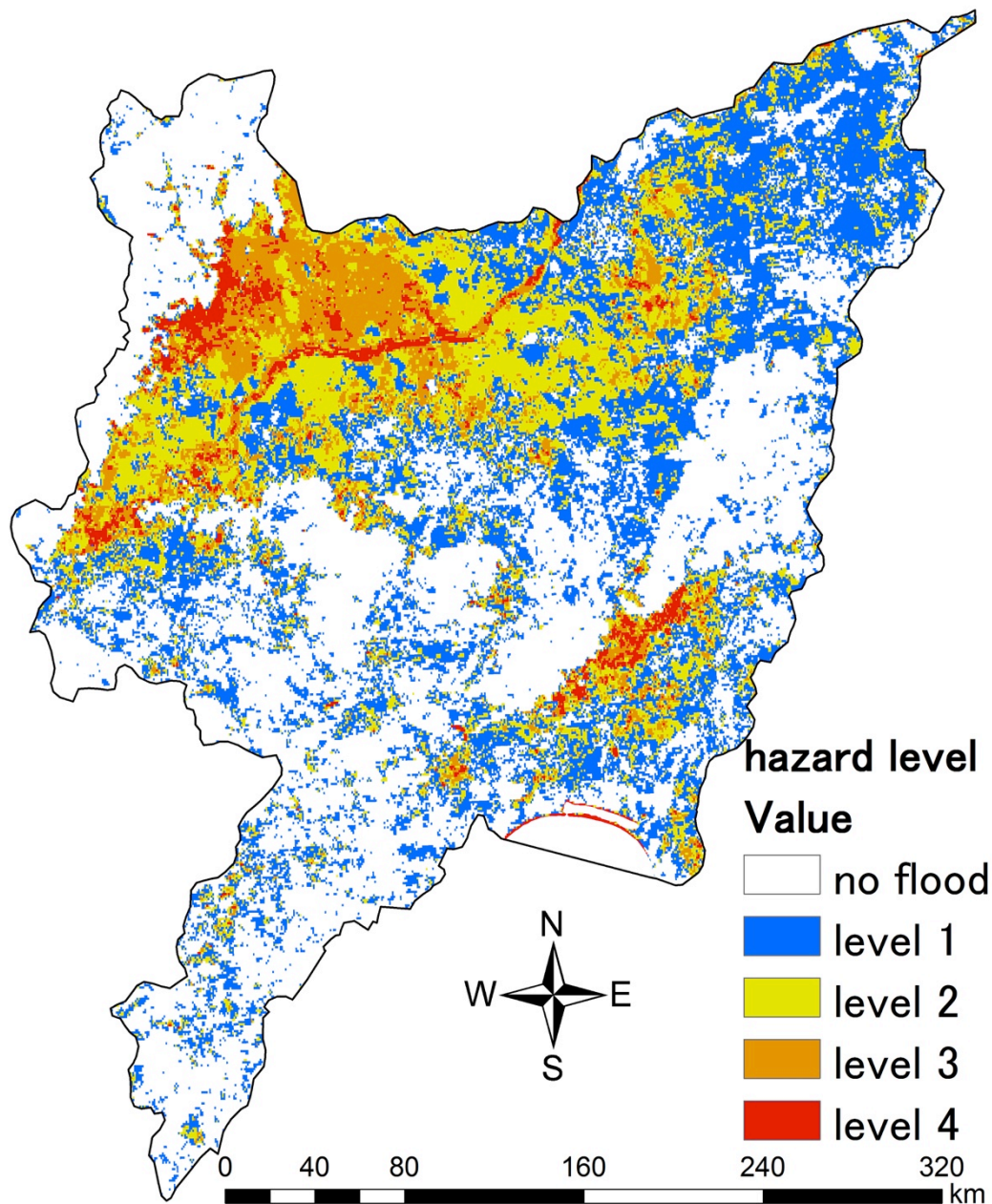


図 4.9 三江平原ハザードマップ

式 (1) に基づいて求めた三江平原における水害ハザードマップを図 4.9 に示す。リスクが高い地域は平野北西部の小興安嶺山脈、完達山脈の山麓である。南東部の完達山脈の南東麓でもリスクが高い。松花江およびアムール川に沿った平野も氾濫リスクが高いことがわかる。湿地は遊水機能が大きいいため、洪水氾濫を緩和する可能性がある (室岡ほか, 2012)。倭肯河の流れにより形成さ

れた河谷平野と穆稜河の中流部とナオリー河およびその支流の近傍に湿地保護区があり (Wang *et al.*, 2008) , ほとんど洪水氾濫していないこともわかる。

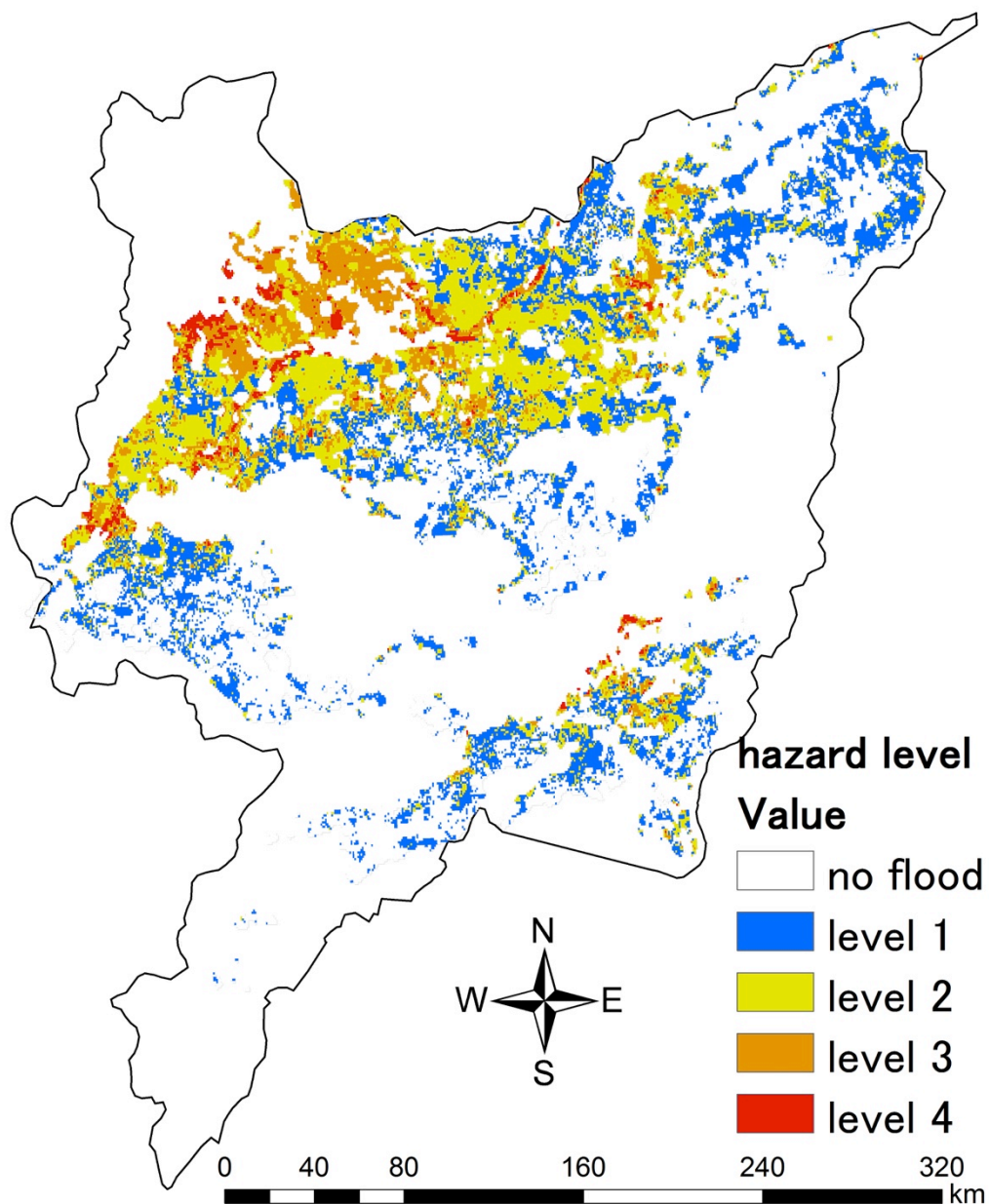


図 4.10 三江平原耕地水害ハザードマップ

図 4.10 には耕作地の氾濫レベル分布を示した。三江平原では、およそ 8 割の耕地面積が洪水氾濫のリスクを抱えている。特に小三江平原の北西部では降雨が集中する季節に、山地からの洪水が平野域でよく氾濫することになる。こ

のため、穆稜河と完達山山脈の谷部における農業は非常に厳しい。河川の近傍は耕作地としてよく利用されているが、河川の豊水期には氾濫のリスクが高まる。なお、三江平原内で耕作に最適な場所は、すでに耕作地として利用されている。

5.3 農家の経済収入状況及び利農政策

三江平原の主要作物である水稲とトウモロコシの 2011 年の耕作収支状況から農家の経済収入の特徴を説明するために、30 世帯からの聞き取り結果を纏めたものが Table 4.1 である。食糧買取価格を上げる政策 (Wang *et al.*, 2008) の下で農業の収益率 (収入/支出) は非常に高く、およそ必要経費の 3 倍となっている。

表 4.1 農業の収益率表

Category		Corn	Rice
Expenses	Seed (yuan/a)	60	56
	Pesticide (yuan/a)	160	80
	Fertilizer (yuan/a)	290	20
	Manpower cost (yuan/a)	56	620
	Irrigate cost (yuan/a)		10
	Total (yuan/a)	566	786
Income	Price (yuan/kg)	2.12	5
	Per-mu yield (kg/a)	1200	600
	Total (yuan/a)	2544	3000
Income rate		349.47%	281.68%

現行の農業政策として、1980 年からの農業用地の使用契約期限の延長、2003 年からの作物の種別ごとの補助金の付与、2004 年からの農業税の免除、2006

年からのディーゼル燃料・肥料・農薬・農機の購入に対する補助金，といった政策は農民の耕作意欲の向上に役立ったことがわかる (Wang *et al.*, 2008)。

6. 考察

中国 1 km メッシュ土地利用 2000 年データによると，農業用地以外に氾濫リスクの少ない場所は，ほとんどが湿地と林地である。Li *et al.* (1999) による 1998 年の洪水に対する分析では，嫩江・松花江で氾濫した原因について，耕地の開拓が森林及び湿地の減少に結びついたためと述べている。そこで，1998 年と 2011 年の耕地面積の変化について，水害リスクとの関連性について検討した。

6.1 耕地面積減少域の解明

図 4.11 に 1998 年と 2011 年の間で耕地面積が変化した範囲 (図 4.6 (C) 参照) を水害リスクマップに重ねて示した。耕地面積が減少した場所は地形により 2 つにわけて考えることができる。

6.1.1 山地域

平野の西南部は山地であるが，Google Earth を利用して，耕地が減少した場所が林地となっていることを確認した。これは 2000 年以降の黒竜江省の“退耕還林” (無理に開墾した土地を，もとの森林に戻そうということである) 政策に関わると考えられる (王，2005)。

6.1.2 沖積平野

小三江平原の松花江・アムール川の近傍及び穆稜河と完達山の谷部の間において耕地が減少した場所は作成したハザードマップによると洪水氾濫が起きや

すい領域である。黒竜江省政府は“退耕還湿”（無理に開墾した土地を，もとの湿地に戻そうということである）政策を実施しているが（Wang *et al.*, 2008），ナオリー河及び支流の七星河で耕地が減少した領域は国家の湿地保護政策に関わる可能性が高い。

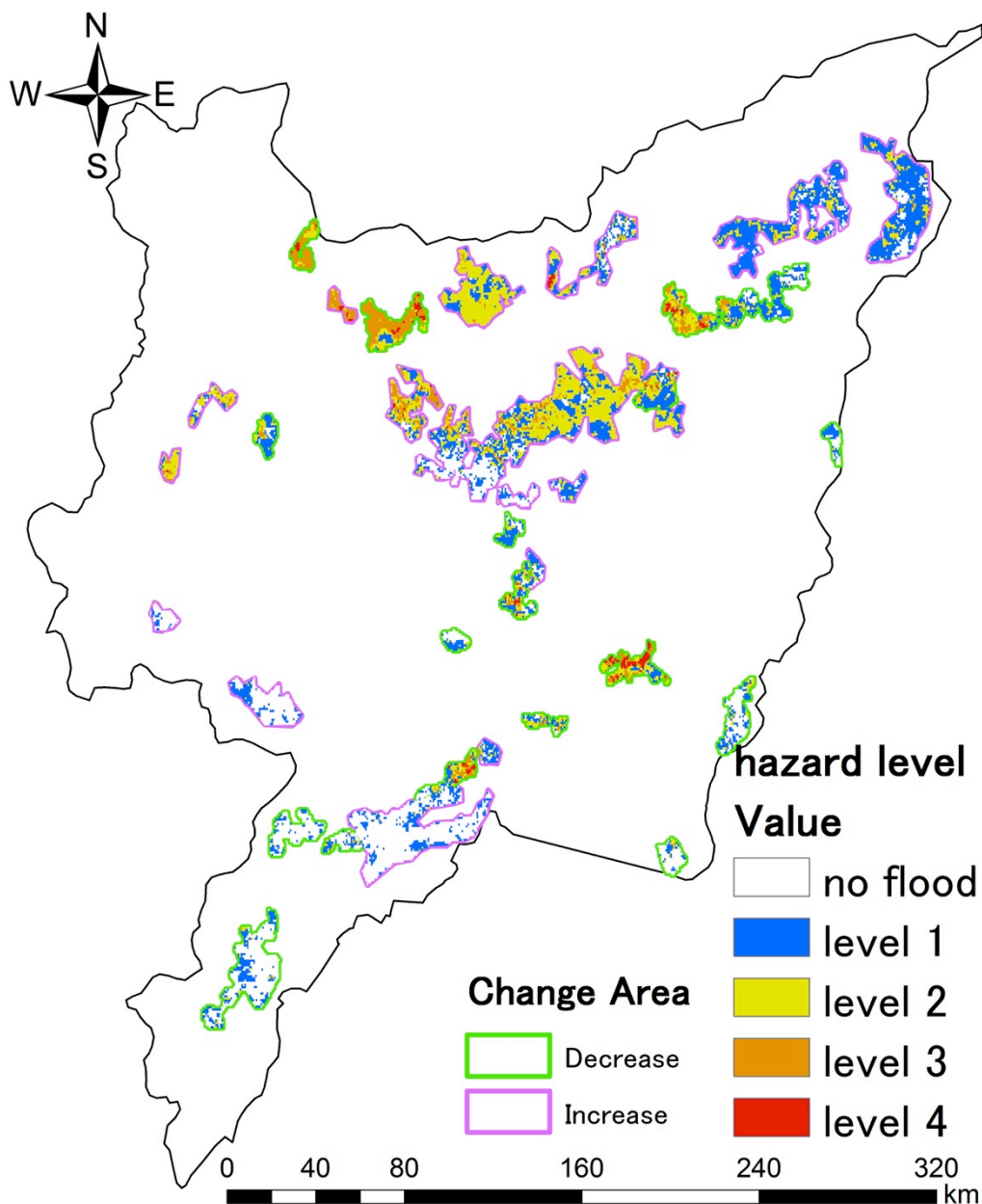


図 4.11 耕地面積増減域のハザードレベル

6.2 耕地面積増加域の解明

図 4.11 に示した耕地面積が増加した領域は沖積平野に相当している。耕地面積が増加した場所における水害リスクの特徴は下記のようにまとめられる。

6.2.1 水害リスクのない場所

倭肯河による形成される河谷平野及び穆稜河により形成される沖積平野にて水害リスクは 0 であったが、この地域では耕地面積が増加している。

6.2.2 河川近傍における相対的に水害リスクが小さい場所

小三江平原にて、耕地の増加域は減少域よりも相対的に水害リスクが小さい場所であることが認められる。

6.2.3 水害リスクが高い場所

松花江が平野へ流入する場所、およびその下流の河道にて耕地面積の増加が認められる。この地域は大都市が近く、高速道路により生産物の輸送も容易である。Table 4.1 にまとめたように、大きな経済の収益率は水害リスクがある場所でも耕地面積増加の動機になる可能性が高い。そして現在、実施中の農村政策も農民の負担を軽減し、それによってもたらされるのは農民の耕作に対する意欲を大きく上げるものであり、耕地面積を増やす一因となる (Wang *et al.*, 2008)。また、農業保険の実施は災害の被害を受けた農業を援助することと同時に、リスクが存在する場所で耕作を行う動機を高めた可能性もある。

7. まとめ

三江平原は中国国内でも著名な食糧生産基地であり、食糧生産量は中国の上位を占める。しかし自然災害の影響を受けやすく、特に水害に対する脆弱性が

大きい。

この研究では、衛星リモートセンシングにより耕地の分布を確認した。2011年の耕地面積は1998年と比較して増加し、増加した耕地の一部は水害リスクの高い河道にも及んでいた。

洪水氾濫時の湛水による植生指標の変化を利用して1998-2011年の氾濫域を抽出し、氾濫の履歴に基づく研究地域の水害ハザードマップを作成した。結果として現有の耕地のおよそ8割が水害のリスクを有していた。水害リスクが小さな場所は全て耕作に使用されていたが、食糧増産のための湿地・林地の開拓が生態環境を破壊すると同時に、水害ももたらしてきたといえる (Li *et al.*, 1999)。

三江平原において耕地面積を減少させる駆動力は厳しい自然環境だけではなく、政府の政策、すなわち“退耕還林”、“退耕還湿”政策の効果が考えられる。一方、耕地を増やす原因としては、農家が農業保険及び利農政策で支えられていることと、都市、高速道路との近接性といった地理的な優位性が収益につながるため、耕作の熱意が上がったことが考えられる。洪水リスクが少ない地域では耕地面積は増加していた。

本研究では、現有の耕地の水害リスクを確定した上で、さらに、潜在的な水害リスクに対する要因も検討した。次の課題は本研究の成果の現場への実装である。

引用文献

中華人民共和国国家統計局 2012. 中国統計年鑑. 中国統計出版社;464-465.

中華人民共和国水利部 1998. “水情年報 (三) ”, 中華人民共和国水利部, 199

8.12.29, http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/sqnb/199812/t19981229_29402.html.

(参照: 2013.8.3) .

Dai C.S., Long X.Z., Wang B.. 2012. Countermeasures of Utilization and Protection of Water and Soil Resources in Sanjiang Plain (in Chinese) . *China Agricultural Science and Technology Press*; 13-165.

Google 2005/6/28. “Google Earth download” , Google, <https://www.google.com/earth/>. (参照 : 2013.10.4) .

春山成子・増田佳孝 2007. アムール川中流地域の土地利用変化. アジア研究所・アジア研究シリーズ ISSN1345-5060 No.66:101-115.

Hou F., Yu X.Y., Yin X.L., Zhang C.X.. 2003. Flood disaster in Heilongjiang Province (in Chinese) . *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College* **30** (1) :39-41.

黒竜江省統計局・国家統計局黒竜江調査総隊 1999-2012. 黒竜江統計年鑑, 中国統計出版社.

Li J.R., Kondoh A., Nakayama D.. 1999. Analyses on Floods of 1998 in China. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources* **12** (4) : 307-318.

Liu D.. 2011. Measure Methods and Application of Complexity of Agricultural Hydrological Systems, Sanjiang Plain (in Chinese) . *China Water Power Press*: 3-21.

Murooka M., Haruyama S., Masuda Y.. 2007. Land Cover Change Detected by Satellite Data in the Agricultural Development Area of the Sanjiang Plain, China. *Journal of Rural Planning Association* **26** (Special_Issue) : 197-202.

室岡瑞恵・栗原康裕・春山成子 2012. アムール川中流域における洪水の数値解

- 析による湿地の遊水地機能に関する考察. 日本地理学会 **6** (2) : 138-148.
- 王 永霞 2005. “黒竜江退耕還林6年“披緑”千万アール荒山”, 新華網, 2005.12.1, http://news.xinhuanet.com/politics/2005-12/01/content_3863153.htm. (参照: 2013.12.20) .
- 李 海蘭・近藤昭彦・沈 彦俊 2011. 衛星リモートセンシングによる中国三江平原の水田面積の経年変化に関する研究. 水文・水資源学会誌 **24** (6) : 328-336.
- Shrestha R., Di L.P., Yu G.N., Shao Y.Z., Kang L.J., Zhang B.. 2013. Detection of Flood and Its Impact on Crops Using NDVI-Corn Case. *Agro-Geoinformatics 2013 Second International Conference Fairfax VA 13823469*: 200-204.
- Tencent 1998. “QQ download”, QQ, <http://im.qq.com/index.shtml>. (参照: 2013.8) .
- VITO 2010/7/1, <http://www.vito-eodata.be/collections/srv/eng/main.home?uuid=0ce4e2fe-183f-4c04-928c-e1f770fa5b34> (参照: 2013.8.2) .
- Wang L.B., Jin L.S., Cheng S.X.. 2008. Conservation and Alternative Livelihoods Study on the Sanjiang Plain Wetlands. *Social Sciences Academic Press (China)* ; 109-166.
- Wang S.H., Wang D., Liu X.Z.. 2003. Drought and Waterlogging in the Sanjiang Plain and Their Comprehensive Control (in Chinese) . *Journal of Beijing University of Technology* **29** (4) :457-461.

第五章 結 論

ユーラシア大陸東部の $205 \times 10^4 \text{ km}^2$ の流域面積から水を集水し、4,350 km に達する長大な河川長を持つアムール川は大陸河川の特徴として、大降雨イベント時に下流域の平野において緩慢な洪水氾濫をもたらす。アムール川流域におけるほとんどの河川区間では連続堤防は設置されておらず、治水施設による洪水コントロールは行われていない。よって、洪水リスク分析はアムール川流域の水害を軽減する有効な方法となる。

過去の氾濫履歴は流域の水害に対する脆弱性に関する情報を提供する。この情報を使うことにより将来の水害リスクを判断することができる。よって氾濫履歴図は洪水リスクマネジメントにおける基本的な情報となり、ハザードマップとしての活用も可能となる。そこで、本研究ではアムール川流域における水害を軽減するため、洪水氾濫履歴図を作成し、洪水氾濫の可能性を判定するためのハザードマップを作成して、流域の洪水リスク分析を行うことを目的とした。

アムール川は広大な流域面積をもつため、全流域の氾濫情報を集積することは困難である。しかし、1998年及び2013年には歴史水位の記録を上回る流域的洪水が発生し、洪水氾濫に関する貴重な情報を提供することになった。河川流域では氾濫履歴がある場所で再び氾濫する可能性が高いという経験的事実に基づき、衛星リモートセンシングを用いてアムール川流域における1998年と2013年の洪水イベント時の氾濫域の地図化を試み、流域全体の氾濫履歴図を作成した。

氾濫域の抽出のために、水の反射スペクトルの特徴に基づき、1998年のAVHRR、2013年のMODISのそれぞれの洪水期間に受信された全ての画像につ

いて 1 シーンずつレベルスライスを行い、水面の抽出を行った。大陸河川氾濫の特徴は、氾濫水の湛水時間が長く、1 日以内で氾濫域の形がほぼ変わらないことと、氾濫水の水面は緩勾配で、氾濫域の標高が非氾濫域の標高より常に低いことである。MODIS と AVHRR は同一地点を 1 日に最大 4 回観測するが、同日のシーンに明らかに雲による水面の誤判別が含まれた。よって、大陸河川氾濫の特徴と衛星観測の周期に基づいて、雲による誤分類を除去するアルゴリズムを構築した。即ち、1 日に複数回に抽出された水面を氾濫域と判断し、それ以外を誤分類とした。また水面に覆われた水路の横断面に沿って水面の標高が相等である場合を氾濫域と判断した。この処理により誤分類を除去し、氾濫域を地図化した。

1998 年と 2013 年の洪水イベントの氾濫域マップから、嫩江・松花江流域及びアムール川の中・下流域でよく氾濫することが認められた。また、アムール川上流及びその支流であるゼヤ川の合流点においても 2013 年洪水では大規模な氾濫があったことが明らかになった。作成された氾濫履歴図はアムール川における今後の洪水マネジメントの基礎的資料として活用することができる。

降水量データを浸水履歴図と重ねることにより、降雨イベントの強度および空間分布と氾濫域の関係に関する検討も行った。今後、気象観測により洪水氾濫を予測する基礎資料として使うことができる。例えば、アムール川上流の支流であるゼヤ川は 2013 年に氾濫したが、氾濫を形成する原因として狭窄部につながる平野であるという素因としての地形的特徴と、誘因としての流域における月降水量が平年の 3 倍以上、降水日数が半月以上に達したことを明らかにした。氾濫履歴図を地理情報システムの上でデータベース化することにより様々な主題図を重ね合わせることにより人間活動による素因の形成に関する検討も可能になった。例えば、2000～2013 年にかけて森林被覆はアムール川流域のロ

シア領では減少したが、松嫩平原では変化が少なかった。2013年の降水量は多く、アムール川中流域では広く氾濫したが、松嫩平原では氾濫域が1998年と比較して小さかった。これらの特徴は森林面積の減少とも関わる可能性があるが、本研究では解析を行うための基盤情報を作成することができた。

アムール川流域における歴史的な二つの洪水イベントを対象にして、氾濫域の地図化とその特徴について解析を行ったが、洪水リスク分析を行うためにはまだ洪水イベントの事例が足りない。そこで、中国の重要な食糧生産基地であり、典型的な氾濫常襲地域である三江平原を例として洪水リスクに関する詳細な検討を行った。

三江平原では、生産する食糧の75%が商品として域外へ輸出されている。耕地開拓に伴う湿地の消失や森林遷移による環境問題、特に三川が合流する位置に形成された三江平原の地理的特徴に起因する頻繁な水害の発生は作物の生産量に大きな影響を与える。三江平原では治水施設の整備は不完全であり、建設が進むダムや堤防の効果は直ちには現れない。よって、水害リスク分析は効果的に農業被害を避ける手段として重要である。

ここでは1998年から2011年のSPOT/VEGETATIONの10日コンポジットNDVIデータを用いたが、氾濫域を直接抽出することは困難である。そこで、氾濫の発生により作物が影響を被るとNDVI値が正常時より小さくなり、水害後も植生に対する影響が残存するため、NDVIの時系列から洪水氾濫を同定するアルゴリズムを用いて氾濫域を地図化した。得られた各年の氾濫履歴図を用いて、14年間の氾濫頻度をリスクの指標として、ハザードマップを作成し、洪水リスクの検討を行った。

三江平原における耕地分布は衛星データによるフェノロジーに基づき、分類・抽出を試みた。耕地が15～17旬で他の土地タイプのNDVIより著しく小さ

いのは 15～17 旬における作物が播種後の成育初期であるからである。15 旬における耕地は植生被覆が少ないが、草地・湿地・林地はすでに植生に被覆され、NDVI は高い。その後の作物生長により、NDVI の差違が小さくなるため、ここでは、15 旬の NDVI を使って、耕地の抽出に使用することにした。

得られた耕地分布とハザードマップを比較検討した結果、三江平原では小興安嶺山脈・完達山山脈の山麓及び河川に沿った平野などで氾濫リスクが高い地域を特定することができた。三江平原では耕地面積の約 8 割が洪水氾濫のリスクを抱えていた。特に増加した耕地の一部は水害リスクの高い河道にも及んでいた。三江平原内で耕作に適した場所は、全て耕作地として利用されていた。

耕地面積の変化と水害リスクとの関連性に基づき、潜在的な水害リスクに対する要因も検討した。耕地面積増加の場所は洪水リスクが少ない場所ではなかった。農家が農業保険及び利農政策で支えられていることと、都市、高速道路との近接性といった地理的な優位性が収益につながるため、耕作の動機が上がったことがリスクを問わずに耕地面積を増やす潜在的な要因になると考えられる。耕地面積を減少させる駆動力は洪水リスクが高いことだけでなく、政府の政策、すなわち、“退耕還林”・“退耕還湿”などの政策の効果が高いと考えられる。

本研究では、世界で初めてアムール川流域の氾濫履歴図を作成した。その際に大陸河川の特徴と衛星観測周期が短い AVHRR および MODIS の特徴に基づく水面抽出アルゴリズムを開発した。アムール川流域は広大で、その洪水リスク分析には 1998 年と 2013 年の事例だけでは不十分であるため、典型的な氾濫原である三江平原を例として検討した。三江平原における洪水氾濫域は湛水による植生被害を NDVI 値の変化から抽出するアルゴリズムにより地図化した。14 年の氾濫頻度によってハザードマップを作成した。農事歴に基づき NDVI の季

節変化から耕地を抽出するアルゴリズムを構築し、近年の三江平原の耕地面積変化及び耕地面積の現状を確認するとともに、耕地分布図とハザードマップを結合することにより三江平原における耕地水害ハザードマップを作成した。耕地面積の変化と水害リスクとの関連性に基づき、潜在的な水害リスクに対する要因も検討した。本研究の成果の現場への実装がこれからの課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，ご教導頂いた千葉大学環境リモートセンシング研究センター・近藤昭彦教授に感謝の意を表します。また，研究のための貴重なリソースを提供して頂いた千葉大学環境リモートセンシング研究センター及び東京情報大学の衛星データ受信・アーカイブ担当者に深く感謝を申し上げます。また，本研究に対する貴重なご意見を頂いた中国蘭州大学大気科学学院の閉建栄博士及び中国科学院合肥物質科学研究院王珍珠博士に深く感謝致します。日本留学に対してご支援いただき，私を信じてくれた両親および家族に感謝の言葉を申し上げます。最後に，一緒に困難を乗り越え，思い出すと心から暖かくなれる研究室の方々に，感謝の意を表します。

付 注

使用データ

SRTM データ

詳細は第三章を参照する。ここでは水文学的特徴を抽出に使用された。

データの分析手法

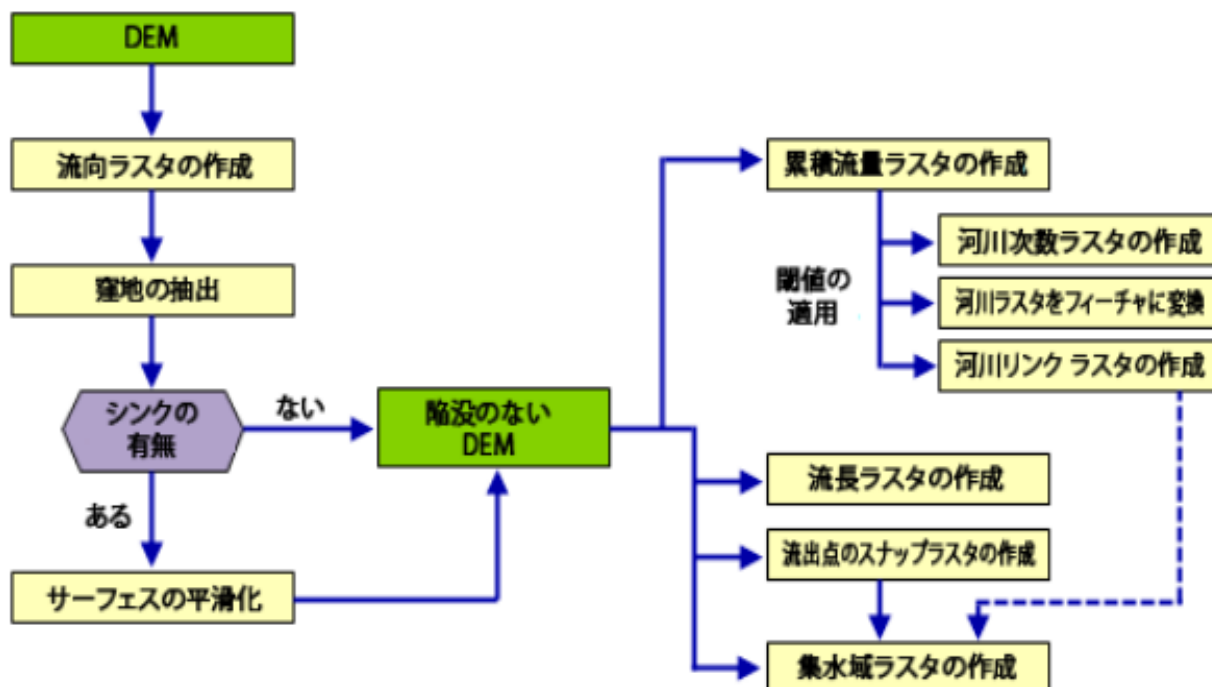


図 A 水文解析のフローチャート (ArcGIS Resource Center より)

ArcGIS はアメリカの ESRI 社により開発された、現在に主流の地理情報空間分析ソフトである。それは幅広い環境で利用可能な地理情報システムソフトとすぐに利用可能な地理情報システムコンテンツ/サービスを共通利用できる統合プラットフォームである。ArcGIS の地表面水文解析ツールの機能およびフローチャートは図 A のように表す。地表面水文解析は地表面の水の

移動に着目する。その検討対象が水文解析モデルによく入力されたパラメータである。それも洪水水位及び氾濫情況（洪水の進路，氾濫域の面積，洪水流速など）を推測する際に，必要な情報になるものである。さらに，洪水水位，氾濫情況は洪水リスクマネジメントの重要ポイントである。よって，水文解析の対象を明らかにすると，重要な意味をつける。ここでは地表面水文特性として流向，累積流量，河川ネットワーク，集水域を明らかにした。

a. 流向の抽出

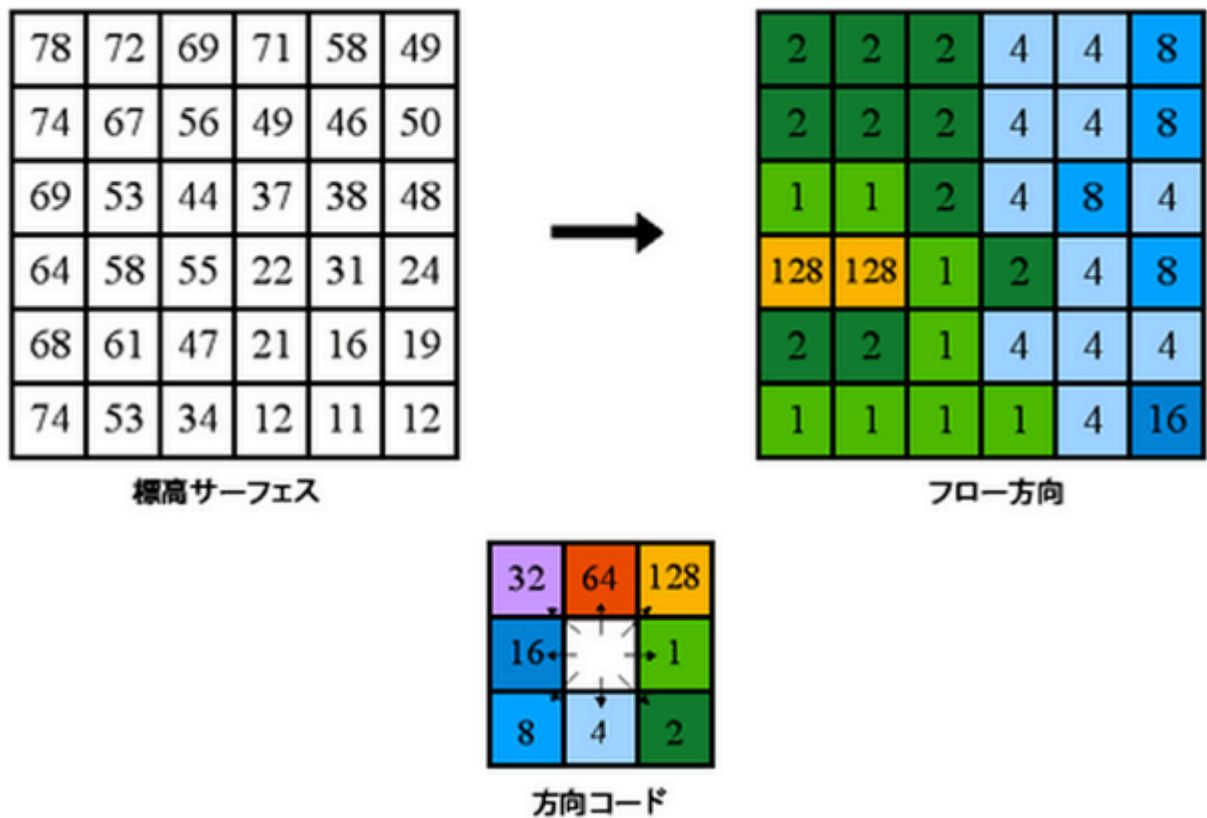


図 B 流向の算出 (ArcGIS Resource Center より)

流向 (Flow Direction) とは，地表面水文特性を算出するための重要な項目の一つである。ラスタ内の各セルから流向を特定することである。各セルか

ら最も急な降下傾斜となる近傍セルへの流れの方向を示すラスタを作成する。具体的に図 B のように行う。有効な出力方向は 8 つである (Jenson and Domingue, 1988)。

b. 累積流量の算出

累積流量 (Flow Accumulation) は、出力ラスタの各セルに流れ込むセルの数に基づくものである (図 C を参照)。累積流量が大きいセルは流れが集中するエリアで、流路の特定に使える。一方、累積流量が流路にする同時に、洪水氾濫の際に、湛水を発生しやすい地域に、累積流量が 0 のセルは局所的な高地や、屋根の特定に使える。

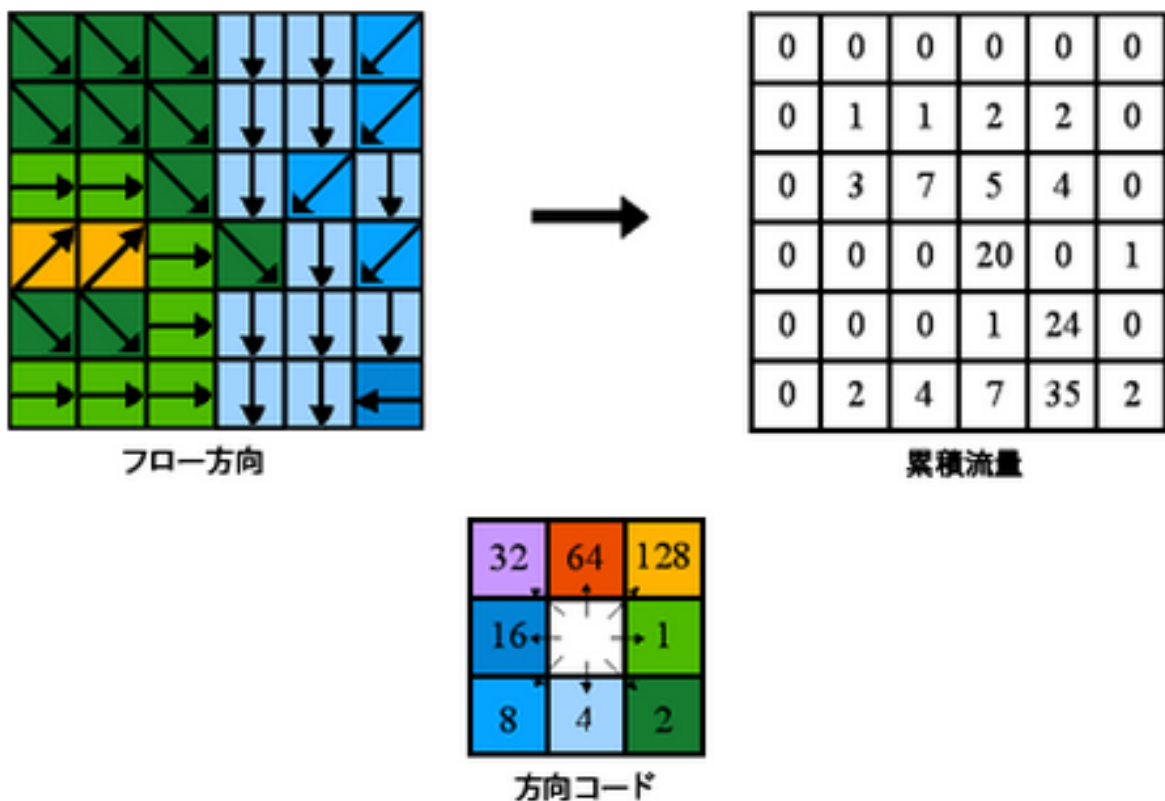


図 C 累積流量の算出 (ArcGIS Resource Center より)

c. 河川ネットワークの抽出

河川リング (Stream Link) によって、累積流量から、流れ込むセルの 50000 個以上を閾値にして河川ネットワークを算出し、また、算出された河川ネットワークをベクトル化にして、アムール川における河川の分布を求められた。解析用データは元々 DEM であるので、算出した河川の中でいくつかの窪地、季節河川を含むものと考えておるが、Google Earth で確認して抽出された河川中で河川以外に湿原河川を含んでいる。

d. 集水域の算出

作った河川ネットワークがここに流出点 (水がエリアから流出する地表面のポイントである。それは集水域の境界での最も低いポイントである) として集水域の算出に使われる。

表一覽

表 4.1 農業の収益率表

Table 4.1 Income and expenses at planting.

図一覽

図 1.1 1980～2008 年自然災害発生回数 (Munich, 2009)

Fig. 1.1 Number of natural catastrophes from 1980～2013 (Munich, 2009) .

図 1.2 ハザードマップの例 (国土交通省より)

Fig. 1.2 An example of hazard map (Source: MLIT, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism) .

図 1.3 タンクと計算の模式図 (深見ら, 2009)

Fig. 1.3 Schematic diagram of tank and calculation (Fukami et al., 2009) .

図 1.4 日本の河川堤防の基本構造 (吉川, 2011)

Fig. 1.4 Basic structure of river levees in Japan (Yoshikawa et al., 2011) .

図 2.1 アムール川流域地形図

Fig. 2.1 Topographic map of Amur River Basin.

図 2.2 アムール川流域の流向

Fig. 2.2 Flow direct of Amur River Basin.

図 2.3 アムール川流域における各地点水の集積量

Fig. 2.3 Flow accumulation of Amur River Basin.

図 2.4 アムール川流域における地表水の流路

Fig. 2.4 Watercourses of Amur River Basin.

図 2.5 アムール川流域の集水域

Fig. 2.5 Watershed of Amur River Basin.

図 3.1 河川氾濫抽出フローチャート

Fig. 3.1 Flow chart of extracting the flooded river.

図 3.2 雲によるノイズの判断

Fig. 3.2 Flow chart of judgment about noises of clouds.

図 3.3 1998年河川氾濫

Fig. 3.3 Flood event in 1998.

図 3.4 2013年河川氾濫

Fig. 3.4 Flood event in 2013.

図 3.5 アムール川流域における氾濫履歴図

Fig. 3.5 Distribution of flooded areas in Amur River Basin.

図 3.6 結果検証の例

Fig. 3.6 Sample of result verification.

図 3.7 平年降水量の分布

Fig. 3.7 Distribution of precipitation in normal years.

図 3.8 1998年7, 8, 9月降水量分布

Fig. 3.8 Distribution of precipitation in July, August, September 1998.

図 3.9 2013年7, 8, 9月降水量分布

Fig. 3.9 Distribution of precipitation in July, August, September 2013.

図 3.10 アムール川流域の勾配

Fig. 3.10 Slope of Amur River Basin.

図 3.11 **Global Forest Change 2000-2012 (University of Maryland)** による
2000-2012年の森林被覆減少域の分布

Fig. 3.11 Forest cover loss from 2000 to 2012.

The data is obtained from Global Forest Change 2000-2012 (University of Maryland) .

図 4.1 三江平原地形図

XMR : 小興安嶺山脈, **ZMR** : 張広才嶺山脈, **LMR** : 老爺嶺山脈, **TMR** :
太平嶺山脈, **WMR** : 完達山山脈

Fig. 4.1 Relief Map of Sanjiang Plain.

XMR: Xiaoxing'an Mountain Range, ZMR: Zhangguangcai Mountain Range, LMR:
Laoye Mountain Range, TMR: Taiping Mountain Range, WMR: Wanda Mountain

Range.

図 4.2 三江平原の典型的な土地利用における 2000 年の NDVI の季節変化パターン

Fig. 4.2 Seasonal NDVI patterns in typical land use categories in Sanjiang Plain in 2000.

図 4.3 耕地の NDVI 経年平均値と 1998 年の耕地の NDVI の季節変化

Fig. 4.3 Seasonal changes of average NDVI for arable land and arable land NDVI in 1998.

図 4.4 SPOT VGT による 2000 年の耕地の抽出結果(A)及び中国 1 km メッシュ土地利用データによる耕地分布図(B)

Fig. 4.4 Comparison of spatial distribution of arable land obtained from satellite analyses using SPOT VGT in 2000 (A) and 1 km-mesh land use data (B) in Sanjiang Plain.

図 4.5 統計年鑑、中国 1km メッシュ土地利用データ及び衛星画像解析により得られた耕地面積の比較

Fig. 4.5 Comparison of arable land area obtained from statistical yearbook, 1 km-mesh land use data and satellite analyses.

図 4.6 1998 年と 2011 年における耕地面積の変化

(A) 1998 年・ (B) 2011 年・ (C) 耕地面積の増減

Fig. 4.6 Arable land obtained from satellite analyses in 1998 (A) and 2011 (B) , and their changes (C) .

図 4.7 1998-2011 年における洪水氾濫域の抽出結果

Fig. 4.7 Extraction of flooded area from 1998 through 2011

図 4.8 抽出された氾濫域の検証（位置は図 4.7 に示す）

Fig. 4.8 Verification for extraction of flooded area in selected point portrayed in Fig. 4.7 .

図 4.9 三江平原ハザードマップ

Fig. 4.9 Hazard map of Sanjiang Plain.

図 4.10 三江平原耕地水害ハザードマップ

Fig. 4.10 Hazard map of arable land in Sanjiang Plain.

図 4.11 耕地面積増減域のハザードレベル

Fig. 4.11 Hazard level for areas of arable land changes.

図 A 水文解析のフローチャート（ArcGIS Resource Center より）

Fig. A Flow chart of hydrologic analytic (Source: ArcGIS Resource Center) .

図 B 流向の算出 (ArcGIS Resource Center より)

Fig. B Calculation of flow direction (Source: ArcGIS Resource Center) .

図 C 累積流量の算出 (ArcGIS Resource Center より)

Fig. C Calculation of flow accumulation (Source: ArcGIS Resource Center) .