

レナ川における気温データに基づく氷板厚変動と アイスジャム災害の予測に関する一検討

Ice sheet thickness fluctuation based on air temperature and
prediction of Ice jams disaster on the Lena River

北見工業大学
東北大学
宇宙航空研究開発機構
総合地球環境学研究所
総合地球環境学研究所

○正員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
非会員 高倉 浩樹 (Hiroki Takakura)
非会員 渡邊 学 (Manabu Watanabe)
非会員 檜山 哲哉 (Tetsuya Hiyama)
非会員 酒井 徹 (Toru Sakai)

1. はじめに

寒冷地の河川では、気温の低下および流速の減少によって、河道内に河水が形成される。河水は、水面に存在する硬い氷板、流水内に存在する柔らかい晶氷、氷板の上に堆積する雪に大別できる。気温が上昇し流量が多くなると、河水は、融解および破壊されて下流へと流下する。解氷した河水が、狭窄部や橋脚箇所、蛇行部などで滞留して河道を閉塞させると、川の流れがせき止められて、アイスジャムが発生し、河川水位は急激に上昇する。寒冷地の河川における洪水は、降雨による洪水、融雪による洪水に加えて、アイスジャムによる洪水が存在する。アイスジャムは、日本においても発生¹⁾しているが、アメリカ、カナダ、中国、ロシアなどの気温が零下になる諸外国では、大規模に発生するため、水位の上昇とともに流水および河水が民地に氾濫し災害となる。

ロシアのレナ川流域に暮らすサハの人々にとって、水が凍る現象は、洪水時には氾濫原となりレナ川の流路となる湖沼において、氷の飲料水利用や氷の下にカゴを仕掛けて小魚を捕捉するカゴ漁の実施²⁾、河川、湖沼、湿地に形成される氷の上を道路として利用³⁾するなど、生活に密接に関わる現象である。一方で、解氷時に大規模なアイスジャムが発生すると、人々に甚大な被害を与える。2001年5月には、人口2万8000人のLenskにおいて、大規模なアイスジャム⁴⁾が発生している。このアイスジャムにより、水位は12m上昇し、Lenskは水没し、40億ルーブルの損害額となり、サハ共和国全体では60億ルーブルの損害額となった。

アイスジャム対策として、既往研究⁴⁾では、ヘリコプターによる爆撃が一定の成果があることを示している。また、レナ川のアイスジャムを対象とした水理実験⁵⁾では、アイスジャム災害からLenskを守るための対策として、以下の3つを挙げている。Lenskより40km下流の地点での流量制御、河水の強度を減少させるための河水の分断、Lenskより20km上流の地点で人工的にアイスジャムを形成。有効な対策として、人工的にアイスジャムを形成する対策としている。その他の対策として、河床洗掘や河道拡幅などの河道改修による氷の輸送能力の増加やアイスジャムを人工的に破壊するなどの対策も考えられる。

アイスジャムの予測に関する既往研究⁶⁾では、Lensk

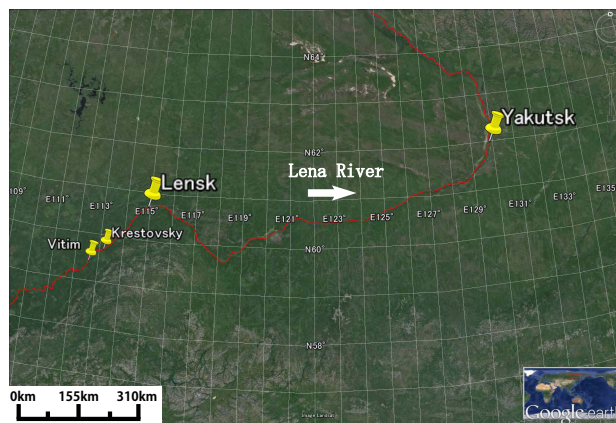


図-1 レナ川の位置図 (Google earth に加筆)

におけるアイスジャム災害の有無について、Lenskより上流185kmの地点の2日前の水位を用いて予測している。一方で、予測精度を上げるためには、熱収支、河水の強度、河川の水理を考慮した手法の開発が必要としている。また、短期予想のためには衛星データの活用が有効だとしている。

寒冷地の河川管理を行う上で、アイスジャム災害の発生の有無を予測する簡便な手法が求められている。アイスジャム現象は、河水の形成融解、流水および河水衝突による破壊、河水の流下堆積という熱力学、構造成力学、水理学等の分野を含む複雑な現象である。

既往研究¹⁾では、アイスジャム発生前の解氷現象は、気温の上昇により引き起こされることを指摘している。一方で、レナ川等の河川において、解氷時期とアイスジャムによる水位上昇の時期は、時間差がないことが示されている⁷⁾。このため、気温から解氷時期を予測することにより、アイスジャム災害を予測できる可能性がある。

本研究は、アイスジャム発生要因は、気温、水温、融雪、流量、河道地形など多岐に渡るため、より利便性を高めることを念頭に、予測する場所を固定し、気温データのみからアイスジャム災害を予測可能かを試みた。具体的には、図-1に示すレナ川流域の主要都市であるLenskおよびその下流のYakutskで発生したアイスジャム災害データを収集し、気温データのみから氷板の形成から融解までの変動を計算できる計算式⁸⁾を用いて、氷板厚を計算し、最大厚および最大厚からの減少日数に着目した予測手法を検討した。

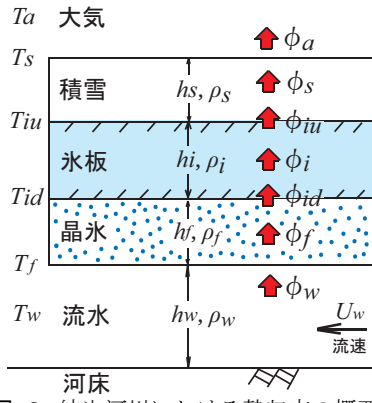


図-2 結氷河川における熱収支の概要図

2. レナ川における氷板厚計算式の適用性

(1) 氷板厚計算式⁸⁾

結氷河川における熱収支の概要図を図-2に示す。温度 $T[^\circ\text{C}]$ ，層厚 $h[\text{m}]$ ，密度 $\rho[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]$ ，速度 $U[\frac{\text{m}}{\text{s}}]$ ，熱フラックス $\phi[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}]$ ，添え字は各層の値である事を示している。積雪深の増減は，大気および氷板との熱収支を考慮して式(1)で表した。式(1)は，熱収支による積雪深の増減のみを考慮しているため，降雪による積雪深の増加や風による積雪の吹あげ，吹きだまりは考慮していない。氷板厚の増減は，積雪および晶氷との熱収支を考慮して式(2)で表わした。式(2)において，積雪と氷板の境界層，氷板と晶氷の境界層および氷板内部では熱フラックスが異なると仮定して，氷板の熱フラックスを積雪と氷板の境界層 ϕ_{iu} ，氷板と晶氷の境界層 ϕ_{id} および氷板内部 ϕ_i に区分して考えた。晶氷厚の増減は，氷板および流水との熱収支を考慮して式(3)で表わした。式(3)は，熱収支による晶氷厚の増減のみを考慮しているため，上流からの晶氷の流下による晶氷厚の増加，下流への晶氷の流下による晶氷厚の減少は考慮していない。

式(1)，式(2)，式(3)を整理すると，本計算式の基礎式となる式(4)が導出される。

$$\rho_s L_s \frac{dh_s}{dt} = (\phi_a - \phi_s) + (\phi_s - \phi_{iu}) \quad (1)$$

$$\rho_i L_i \frac{dh_i}{dt} = (\phi_{iu} - \phi_i) + (\phi_i - \phi_{id}) \quad (2)$$

$$\rho_f L_f \frac{dh_f}{dt} = (\phi_{id} - \phi_f) + (\phi_f - \phi_w) \quad (3)$$

$$\rho_i L_i \frac{dh_i}{dt} = \phi_a - \rho_s L_s \frac{dh_s}{dt} - \rho_f L_f \frac{dh_f}{dt} - \phi_w \quad (4)$$

各層の熱フラックスは，熱交換係数，熱伝導率，層厚，温度差を変数として近似的に式(5)，式(6)，式(7)，式(8)で表わされる。

$$\phi_a = h_{sa} (T_s - T_a) \quad (5)$$

$$\phi_s = \frac{k_s}{h_s} (T_{iu} - T_s) \quad (6)$$

$$\phi_i = \frac{k_i}{h_i} (T_{id} - T_{iu}) \quad (7)$$

$$\phi_f = \frac{k_f}{h_f} (T_f - T_{id}) \quad (8)$$

表-1 氷の物性値一覧

	h_{sa}	ρ_i	L_i	k_i	Δt
	熱交換係数	密度	潜熱	熱伝導率	時間
単位	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\frac{\text{Ws}}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$	s
値	25.0	917.4	3.336×10^5	2.31	$24 \times 60 \times 60$

ある時間において各層の境界面における変動は平衡状態であると仮定すると， $\phi_a = \phi_s = \phi_i = \phi_f$ となり，河氷表面から大気への熱フラックス ϕ_a は，式(9)となる。

$$\phi_a = \frac{T_f - T_a}{\frac{1}{h_{sa}} + \frac{h_s}{k_s} + \frac{h_i}{k_i} + \frac{h_f}{k_f}} \quad (9)$$

流水から河氷底面への熱フラックスである ϕ_w は，式(10)で表わされる⁹⁾。 C_{wi} は $1622 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.8}}{\text{C} \cdot \text{m}^{2.6}}$ であり， $U_w[\frac{\text{m}}{\text{s}}]$ は鉛直平均流速， $h_w[\text{m}]$ は河床から河氷底面までの有効水深である。

$$\phi_w = C_{wi} \frac{U_w^{4/5}}{h_w^{1/5}} \times (T_w - T_f) \quad (10)$$

流水断面が大きい鉄管やコンクリート管などの平均流速の計算には Manning 式が広く用いられていることから，結氷河川において水圧が河氷の割れ目から開放されるため完全な管路とはならないが，水面が河氷によって覆われているため近似的な管路と仮定して Manning 式の適用を試みると式(11)となる。式(10)に式(11)を代入すると式(12)となる。 n_c は Manning の粗度係数で河床と河氷の合成粗度であり， i は動水勾配である。

$$U_w = \beta h_w^{2/3}, \quad \beta = \frac{1}{2^{2/3}} \frac{\sqrt{i}}{n_c} \quad (11)$$

$$\phi_w = C_{wi} \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3} \quad (12)$$

基礎式である式(4)を差分し，式(9)，式(12)を代入すると氷板厚の計算式である式(13)が導かれる。係数 α は式(14)で定義し，河氷底面温度 T_f は 0°C とした。

$$h_i = h'_i - A \frac{T_a}{h'_i} - W T_w h_w^{1/3} \quad (13)$$

$$\begin{cases} A = \left(\frac{k_i \Delta t}{\rho_i L_i} \right) \alpha \\ W = \left(\frac{C_{wi} \Delta t}{\rho_i L_i} \right) \beta^{4/5} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \alpha = \alpha' \times \alpha'' \\ \alpha' = 1 - \frac{\rho_s L_s \frac{dh_s}{dt}}{\phi_a} - \frac{\rho_f L_f \frac{dh_f}{dt}}{\phi_a} \\ \alpha'' = \frac{\frac{h'_i}{k_i}}{\frac{1}{h_{sa}} + \frac{h'_s}{k_s} + \frac{h'_i}{k_i} + \frac{h'_f}{k_f}} \end{cases}$$

さらに，式(13)に表-1の各値を代入すると，実用的な氷板厚の計算式である式(15)が導出される。

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5} \right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{45.8}{10^2} \right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3} \quad (15)$$

式(15)において，例えば1時間毎に氷板厚を計算する場合は，式(15)の T_a ， T_w は1日の平均値となる

ため、1時間毎(60×60秒毎)の T_{a1} , T_{w1} を用いて、 $T_{a1} \times \frac{60 \times 60}{24 \times 60 \times 60}$, $T_{w1} \times \frac{60 \times 60}{24 \times 60 \times 60}$ が入力値となる。 h_i [m]の初期条件は1mmとして与え、それ以降は計算される1時間前の氷板厚を与える。

(2) 計算条件

式(15)の α [無次元]は、氷板厚の計算値が観測値を再現できる値として、試行錯誤で行い、本検討では $\alpha=0.15$ を与えた。 $\beta[\frac{m}{s}]$ は、式(16)を用いた。

$$\beta = \frac{U_w}{h_w^{2/3}}, \quad U_w = \frac{Q}{B h_w} \quad (16)$$

$$h_w = \left(\frac{2^{2/3} n_c Q}{B \sqrt{I_b}} \right)^{3/5} \quad (17)$$

図-1のLenskより約150km上流のKrestovskyにおいて、流量 $Q[m^3/s]$ は、11月から4月までの平均値¹⁰⁾として899を与え、川幅 $B[m]$ と河床勾配 I_b [無次元]は、Google earthより値を読み取り、 $B=815m$, $I_b=1/14833$ の値を得た。粗度係数 $n_c[\frac{s}{m^{1/3}}]$ は、一般的な値として0.03を与えた。

水温の計算式⁸⁾は、式(18)を用いた。

$$T_w = \frac{T_a}{1 + \gamma} + \frac{\gamma T'_w}{1 + \gamma} \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{h_w \rho_w C_p}{(1 - N) h_{wa} \Delta t} \quad (19)$$

$T_w[^\circ C]$: 水温, $T'_w[^\circ C]$: Δt 前の水温である。 $\rho_w[\frac{kg}{m^3}]$: 水の密度で999.84を与え、 $C_p[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}]$: 水の比熱で4200を与えた。 $h_{wa}[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$: 水面の熱交換係数で20を与えた。 $\Delta t[s]$: 計算時間間隔である。 N [無次元]: 横断結氷比であり、 N は川幅 B に対する結氷幅の割合であり $0 \leq N \leq 1$ である。本計算では、横断面の平均氷板厚 h_i が $0.7m(=h_{imax})$ の場合は全面結氷と仮定して $N=0.99$ とし、 $h_i=0$ の時は $N=0$ として、氷板厚に比例して N を与えた。マイナスの水温となった場合は計算上ゼロとした。気温は、Lenskから約200km上流のVitimの1日毎の平均気温¹¹⁾を用いた。

(3) 氷板厚の計算値と観測値の比較

氷板厚の計算値の妥当性を確認するために、1986年11月から1987年4月、1987年11月から1988年4月に、10日間毎に観測¹²⁾された氷板厚と計算値を比較した。図-3と図-4に、観測値と計算値を示す。図-3の1986年11月から1987年4月では絶対値平均誤差6.3cmで、図-4の1987年11月から1988年4月では絶対値平均誤差6.6cmであり、本計算式は、気温データのみで上記の精度で氷板厚の観測値を再現可能である。

3. 氷板厚計算式を用いたアイスジャム災害の予測

レナ川流域のLenskまたはYakutskにおけるアイスジャム災害の有無について、ダートマス大学によるデータベース¹³⁾を用いて判断した。1998年から2009年の期間において、災害があった年は、1998, 1999, 2001, 2003, 2007であった。

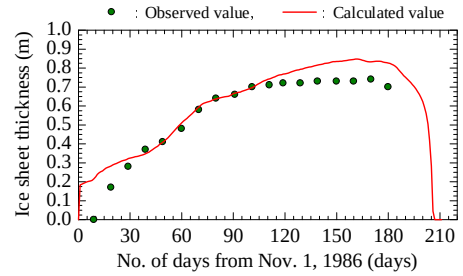


図-3 氷板厚の観測値と計算値 (1986-1987)

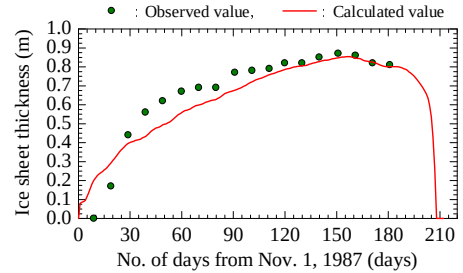


図-4 氷板厚の観測値と計算値 (1987-1988)

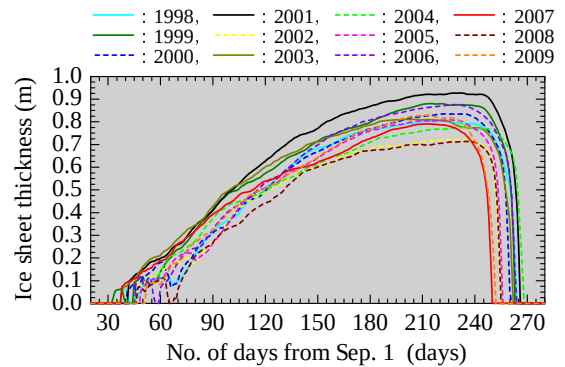


図-5 氷板厚の計算値 (Lena River, Vitim), ※実線はアイスジャムによる災害がある年

Lenskから約200km上流のVitimの1日毎の平均気温¹⁴⁾を用いて計算した各年の氷板厚を図-5に示す。アイスジャムによる災害がある年は実線で示した。横軸は、対象年の前年の9月1日からの日数である。1998年であれば1997年9月1日からとなる。図-5より、氷板の形成から融解まで計算可能であることが分かる。

計算された最大氷板厚の発生日から融解されて無くなるまでの日数を分母とし、各日数を分子とした割合を横軸とし、氷板厚の1日毎の減少速度を縦軸としたものを図-6に示す。図-6より、アイスジャム災害がある年は氷板厚の減少速度が遅い。このことは、最大氷板厚の発生日から融解までの期間、言い換えると解氷に向かう期間で、気温の上昇が遅いことを示している。河氷の解氷時においては、気温の上昇によって、河氷の融解や流量の増加による河氷の破壊が発生し、気温上昇は解氷現象の大きな要因である。一方で、解氷後に発生するアイスジャム災害は、解氷後に気温が上昇せず、低い気温が長く続き、河氷が河道内に存在できる条件下において、その被害は拡大することが、本計算結果から示唆された。

図-6の大規模なアイスジャム災害があった2001年の氷板厚の減少速度(図の黒色実線)は、他のアイスジャム災害のある年と比べて速く、アイスジャム災害のな

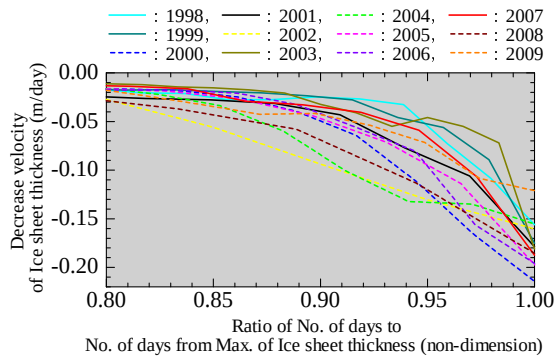


図-6 最大氷板厚から氷板厚ゼロまでの日数に対する各日数の割合と氷板厚減少速度

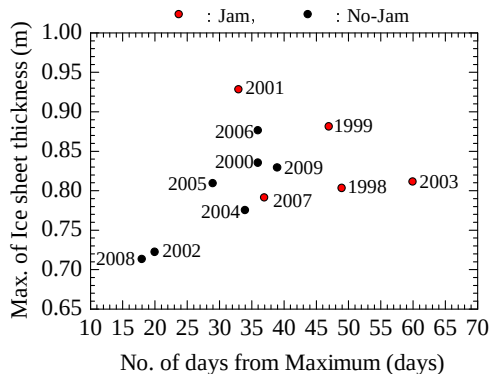


図-7 最大氷板厚と最大氷板厚から氷板厚ゼロまでの日数

い年に近い。最大氷板厚の発生日から融解されて無くなるまでの日数を横軸とし、最大氷板厚を縦軸としたものを図-7に示す。2001年については、他の年に比べて、最大氷板厚が大きい。アイスジャム災害の要因の一つとして、解氷時における氷板厚の減少速度が遅いことに加えて、最大氷板厚が大きいことが考えられる。

2009年について、図-6横軸の0.98以降、2007年と比べて、氷板厚の減少速度は遅い。2007年と2009年のSAR衛星データの比較¹⁵⁾では、2009年は、2007年に比べて、森林部の氷の融解が遅く、気温の上昇が遅いことが示唆されており、本検討と同様の結果を得ている。図-7から、2007年と比べて、最大氷板厚の発生日から融解されて無くなるまでの日数は長く、最大氷板厚は大きい。2009年は、他のアイスジャム災害の年と同等の条件を満たしているが、アイスジャム災害は発生していない。アイスジャム災害が発生しなかった原因として、解氷現象が小規模でアイスジャムが形成されなかった、別の場所でアイスジャムが形成された、アイスジャム対策によりアイスジャムが解消された、などが考えられるが、本検討では原因の特定には至らなかった。

4. まとめ

本研究で用いた氷板厚計算式は、観測値と計算値の比較から、レナ川において適用が可能であることが分かった。レナ川流域のLenskおよびYakutskにおけるアイスジャム災害の有無について、氷板厚計算式を用いて、気温データのみから予測した。アイスジャム災害は、氷板厚が減少する解氷時において、気温が上昇せずに、低い気温が長く続き、河水が河道内に存在で

きる条件の場合において、その被害は拡大することが、本計算結果から示唆された。また、最大氷板厚が大きいことも一因として示唆された。

アイスジャム災害の予測手法の一つとして、リアルタイムで得られる気温データを用いて、氷板厚計算式により氷板厚を計算し、図-7に値をプロットし、過去にアイスジャムが発生した年の値に近づくかをみることにより、災害の可能性を予測すること考えられる。

謝辞：苫小牧工業高等専門学校の八田茂実先生には研究資料の提供を頂いた。河川整備基金 25-1212-002の助成を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuharu WATANABE, Hiroshi HAYAKAWA and Yasuyuki HIRAI, Field observation of a river ice jam in the shokotsu river in february 2010, *Proceedings of The 21th IAHR International Symposium on Ice*, pp.105-117, 2012.
- 2) 高倉浩樹：アイスジャム洪水は災害なのか？—レナ川中流域のサハ人社会における河川氷に関する在来知と適応の特質：東北アジア研究，17巻，pp.109-138，2013.
- 3) 奥村誠，河本憲，Sardana BOYAKOVA：ロシア連邦サハ共和国の冬道路と地球温暖化の影響，運輸政策研究，Vol.14，No.3，pp.16-23，2011.
- 4) Shahramanjan M. A. : Ice Jams forecast and technologies of their destruction on the rivers of the Russian Federation, *International Association of Hydraulic Engineering and Research, International Symposium on Ice*, 17th, pp.XXVII-XLII, 2004.
- 5) V.A. Buzin, A.B. Klaven, Z.D. Kopalani: Laboratory modelling of ice jam floods on the Lena river, *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security*, NATO Science Series Volume 78, pp 269-277, 2007.
- 6) V.A. Buzin, Z.D. Kopalani: Ice jam floods on the rivers of Russia: risks of their occurrence and forecasting, *ECWATECH IN MOSCOW*, pp.582-587, 2008.
- 7) Tamlin Muir Pavelsky, Laurence C. Smith : Spatial and temporal patterns in Arctic river ice breakup observed with MODIS and AVHRR time series, *Remote Sensing of Environment* 93, pp.328-338, 2004.
- 8) 吉川泰弘，渡邊康玄，早川博，平井康幸：結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.68，No.1，pp.21-34，2012.
- 9) George D. Ashton, Ed.: *River Lake Ice Engineering*, Water Resources Publications, pp.289, 1986.
- 10) ArcticRIMS, A Regional, Integrated Hydrological Monitoring System for the Pan-Arctic Land Mass, <http://rims.unh.edu/>
- 11) Ohata, T., Razuvaev, V.N., and Suzuki, R. : Baseline Meteorological Data in Siberia. in Dataset for Water and Energy Cycle in Siberia (Version 1), GAME-Siberia and Frontier Observational Research System for Global Change, 2003.
- 12) Vuglinsky, V.S. and Kubota, J. : Hydrological and Ice Regime Data of River in Eastern Siberia, in Dataset for Water and Energy Cycle in Siberia (Version 1), GAME-Siberia and Frontier Observational Research System for Global Change, 2003.
- 13) G. Robert Brakenridge : Dartmouth Flood Observatory, Space-based Measurement and Modeling of Surface Water, <http://floodobservatory.colorado.edu/>
- 14) NOAA Satellite and Information Service, NNDC CLIMATE DATA ONLINE, <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>
- 15) 渡邊学，高倉浩樹，米澤千夏，吉川泰弘，島田 政信：PALSAR フルポーラリメトリによる極域洪水原因の推定，日本リモートセンシング学会，第 53 回 学術講演会講演論文集，pp.243-244，2012.