

アンカーアイスが結氷河川の 物質循環に与える影響

THE INFLUENCE OF ANCHOR ICE ON MATERIAL CIRCULATION IN THE ICE-COVERED RIVER

鈴木広卓¹・橋場雅弘¹・吉川泰弘²・黒田保孝³

Hiroataka SUZUKI, Masahiro HASHIBA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasutaka KURODA

¹正会員 (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

²正会員 博(工) 北見工業大学助教 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³正会員 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-7602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

This study was conducted to clarify the mechanism of anchor ice formation on the river bed and to understand the impact of anchor ice on material transport in ice-covered river. Field observations indicated that anchor ice formation was significantly affected by the air temperatures and water temperatures as well as by the hydraulic conditions, such as the water depth and the flow velocity. We tried to simulate anchor ice formation in the actual river. The simulation results showed that accurate estimation of the temperature of river bed material that incorporated the influence of solar radiation and ground heat was critical for enhancing calculation precision. We could estimate that the anchor ice pulled away the algae from the river bed and flushed them to downstream, similar to a bed load transport in summer flood. This study proved that the river used for simulation had a specific material circulation due to frazil ice and anchor ice.

Key Words : anchor ice, ice-covered river, material circulation

1. はじめに

積雪寒冷地の河川は、12月中旬から4月中旬までの約100日間、気温の低下により河川内が結氷する。河川水面が結氷しない急勾配の箇所においては、河川水が0℃以下となる過冷却状態となり、晶氷 (Frazil ice) が流水中に発生する。また、水深の浅い箇所においては、河床に氷が付着・集積する現象がみられる。この氷はアンカーアイス (anchor ice) と呼ばれ、気温の昇降や流量の増減によって消長を繰り返す。橋場ら¹⁾の既往研究では、アンカーアイスは、河床から剥離する際に、藻類や河床材料を取り込みながら流下し、結氷河川特有の物質輸送が存在することを現地観測により示唆している。しかし、この既往研究は1地点のみの観測結果であり、アンカーアイスの発生メカニズムおよび結氷河川の物質輸送については、十分には研究が実施されていない。また、アンカーアイスが下流へと流下する際に、取水口に流入し、取水障害を発生させる課題があり、アンカーアイスの発生メカニズムに関する知見が利水面からも求められてい

る。アンカーアイスの発生条件について、平山ら²⁾の既往研究によると、流速と水深の条件が大きなパラメータであり、水深は0.3mから0.4mが発生限界、流速は0.6m/secから0.8m/secが限界流速であることを明らかにしている。また、笹本ら³⁾の既往研究によると、アンカーアイスの発生がみられるフルード数は、0.2から1.2の範囲であることを明らかにしている。しかし、実河川において、アンカーアイスの発生メカニズムを定式的に検討した研究は、十分には実施されていない。結氷していない開水時の河川の藻類について、戸田ら⁴⁾の既往研究では、フルード数0.4前後で底面付近の乱流が大きいほど藻類の一次生産力は高まることを指摘している。一方で、フルード数0.4前後という数値は、アンカーアイスの発生条件と同等であり、開水時に繁茂した藻類が初期に発生するアンカーアイスに取り込まれて流下する物質輸送が推測される。

本研究では、アンカーアイスの発生メカニズムの解明およびアンカーアイスが結氷河川の物質循環に与える影響を明らかにするために、現地観測を実施し、定式化された計算モデルおよび観測データを用いて検討を行った。

2. アンカーアイスの現地観測

現地観測は、図-1に示す北海道東部に位置する湧別川（流路延長87km、流域面積1,480km²）において、既往研究²⁾を参考にアンカーアイスの発生条件と一致するKp26.7で実施した。観測機器は、自記水位計（応用地質製S&DLmini 圧力センサ精度0.1%F.S）、自記水温計（アレック電子製 MDS-MkV/T 精度±0.05℃）、自記気温計（(株)MCS製 JISA級±0.15℃以下）、アンカーアイスの発生状況を捉えるために定点カメラを用いた。観測機器の設置図を図-2に示す。観測機器の測定間隔は、全て10分間隔とした。

(1) フルード数

流量観測時の水深に対する2割と8割の平均点流速と測深データを基に、式(1)から測線毎にフルード数を算出した。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (1)$$

V ：流速， g ：重力加速度， D ：水深である。2013年12月19日から3月7日までの期間で観測したアンカーアイスの発生個所と河氷横断形状、各測線毎のフルード数を図-3に示す。本観測では、笹本ら³⁾がアンカーアイスの発生条件とするフルード数0.2以上の河川中央部で発生する傾向がみられた。また、アンカーアイスはフルード数が0.2以上でも河氷が発達する左右岸付近では発生せず、河氷が無い箇所が発生がみられた。

(2) アンカーアイスの発生条件

定点カメラにより、2013年12月23日にアンカーアイスの発生が確認され、2013年12月25日に現地確認した状況を図-4に示す。図より河床にアンカーアイスが広範囲に発生している状況が分かる。また、直上流のいわみ橋よりkp26.7周辺を撮影した状況を図-5に示す。kp26.7周辺は、冬期間も全面結氷とはならず、開水状態のため、気温低下に伴い河川水は過冷却状態となり、アンカーアイスを形成する晶氷（Frazil ice）が発生しやすい条件であると推察される。



図-4 アンカーアイス発生状況



図-1 調査箇所図

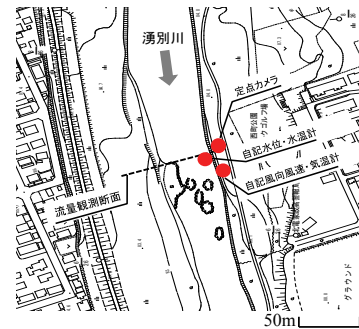


図-2 機器配置図

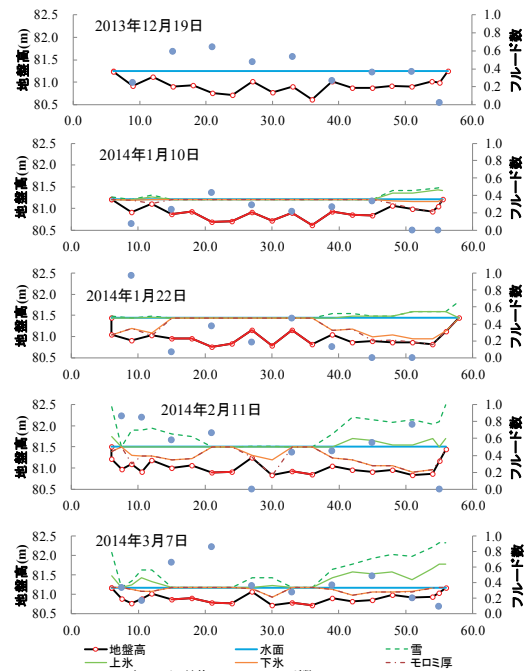


図-3 フルード数分布



図-5 Kp26.7周辺の結氷状況

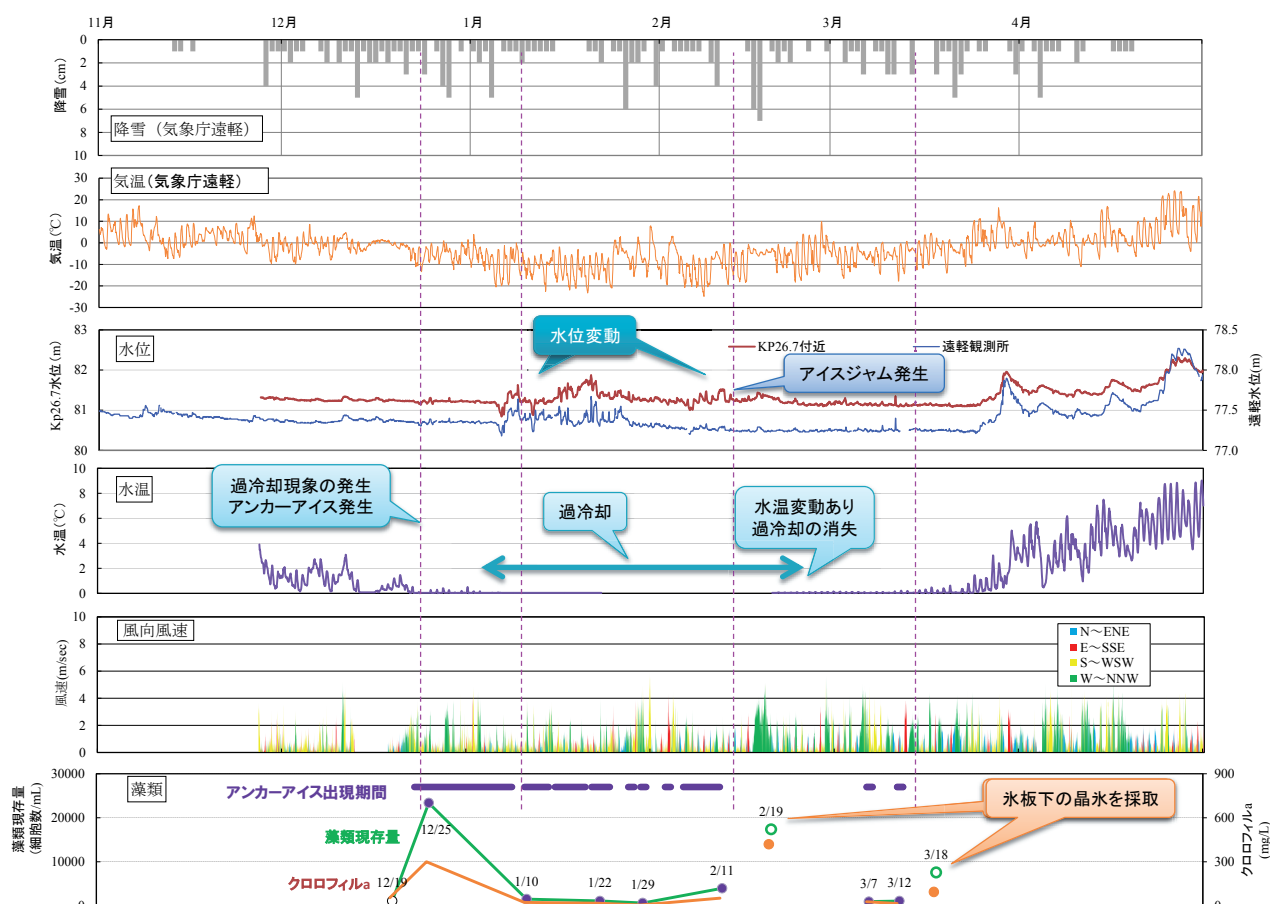


図-6 アンカーアイス発生サイクルと含有物質

アンカーアイスの発生サイクルと含有物質について、観測結果を図-6に示す。

アンカーアイスが発生した2013年12月23日において、積雪量は20cm程度、気温は-7℃付近、水温は0℃程度である。アンカーアイス発生後の水温は、0℃付近で安定し、変動がみられなかった。過冷却状態では熱交換が一瞬で行われるため、0℃以下の水温が継続しないと推察されることから、過冷却状態であったと推察される。本観測結果から、アンカーアイス発生要因として水温の低下が考えられる。

2013年12月23日から3月上旬の期間、気温は-20℃程度まで低下し、最高気温は0℃以下となる状況が続き、水温は0℃となっており過冷却現象が継続したと推察される。一方で、この期間のアンカーアイスは消長を繰り返している。この期間内の1月上旬から下旬にかけて、水位が変動していることから、水位の影響が推察される。

2014年1月5日24時には、それまで安定していた水位が0.3m低下し、その後0.6m程度上昇し、1m程度の変動を繰り返している。水位低下は、上流での河水の詰まりなどで一時的に発生したもので、その後、晶氷などの流下により水位が変動するが、下流でこれらが詰まることで水位が上昇するものと推察される。時期は異なるが、2014年2月11日に本観測地点で、図-7に示すように、下

流で河水が集積して水位上昇を引き起こすアイスジャムの発生が確認されている。アンカーアイスがアイスジャムの直接的な原因になっているかどうかは不明であるが、Tremblay⁵⁾らの研究より、かつてアンカーアイスだった晶氷が表面の氷と癒合してブロックを形成し、アイスジャムの要因になることを指摘している。2014年2月11日に発生したアイスジャムは、2月初旬の気温上昇による河水の流下が原因と推察され、同時期にアンカーアイスも消失している。その後、3月上旬までは、不定期にアンカーアイスが短期間で発生している。この期間は、気温が最高気温でも0℃以下の条件下であった。アンカーアイスの消失の要因の一つとしては、水位の変動が考えられる。3月上旬以降は、水温が上昇するため、アンカーアイスは発生しなかったと考えられる。



図-7 アイスジャム発生箇所

(3) アンカーアイスに含有される藻類残存量

アンカーアイスに含まれている藻類現存量については、図-6より、最初にアンカーアイスが発生した直後の2013年12月25日が最も多く、総細胞数が23,374cells/mL、クロロフィルaが300 μ g/Lであった。水位上昇によってアンカーアイスが一時消失した後に、再びアンカーアイスが発生した2014年1月10日では、総細胞数が1,537cells/mL、クロロフィルaは23 μ g/Lと、初期に比べて1/13に減少していた。水位上昇時のアンカーアイス消失の際に、河床の礫に付着していた藻類が、アンカーアイスとともにフラッシュされたと推察される。

2014年2月19日と3月18日に藻類現存量が増加している。この期間は、アンカーアイスが発生していなかったため、氷板下に堆積している晶氷を採取して観測した結果である。今回の観測結果から、本観測地点より上流において、河床から剥離したアンカーアイスが流下し、本観測地点の氷板下に堆積した可能性が示唆される。

3. アンカーアイスの発生メカニズム

本現地観測結果から、アンカーアイスの発生には、気温、水温の気象条件と、水位、流速などの水理条件が重要であることが分かった。

アンカーアイスの発生メカニズムについて、式(2)のShenら⁶⁾による計算式を用いて検討を行った。

$$\frac{dh_a}{dt} = \frac{1}{1-\lambda_a} \left(\bar{r}C_v + \frac{\phi_{wi}}{\rho_i L_i} \right) \quad (2)$$

$$\phi_{wi} = C_{wi} \frac{U_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} (T_i - T_w) \quad (3)$$

γ : アンカーアイスの増加係数(m/s), C_v : 流水中の晶氷濃度(無次元), C_{wi} : 1622(W $\cdot$ s^{0.8})/($^{\circ}$ C $\cdot$ m^{2.6}), U_w : 平均流速, h_w : 水深, L_i : 氷の潜熱, λ_a : 晶氷の空隙率, T_i : 氷の表面温度で0 $^{\circ}$ Cを与えた, T_w : 水温であるが、本計算式では水温が0 $^{\circ}$ C以下にならないとアンカーアイスが発生しない。観測値では0 $^{\circ}$ Cに近くなるものの、0 $^{\circ}$ Cを下回る値は測定できなかった。これは、過冷却下では熱交換が一瞬で行われるためと推察される。そこで本研究では、吉川ら⁷⁾による水温の簡易計算式(4)を用いて、現地の気温データから時系列の水温を算出した。

$$T_w = \frac{T_a}{1+\gamma} + \frac{\gamma T'_w}{1+\gamma} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{h_w \rho_w C_p}{h_{wa} \Delta t} \quad (5)$$

T_a [$^{\circ}$ C]: 気温, T'_w [$^{\circ}$ C]: Δt 前の水温, Δt [sec]: 計算の時間ステップ, 本研究では10分を与えた。 h_w [m]: 水深, ρ_w [kgm³]: 水の密度で1000.0を与え, C_p [Jkg $\cdot$ $^{\circ}$ C]: 水の比熱で4200.0を与えた。 h_{wa} [Wm $^{\circ}$ C]: 大気と水との熱交換係数で20.0を与えた。図-8に示す計算水温と実測水温の絶対誤差の平均値は-0.09 $^{\circ}$ Cであり、整合性が高い。

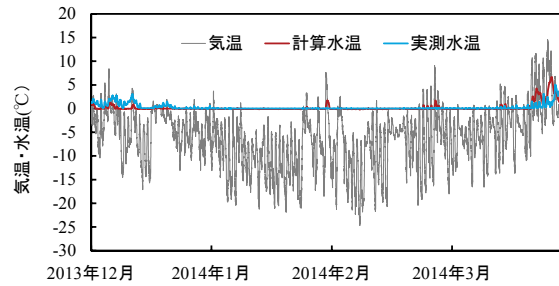


図-8 気温と水温の計算値と実測値

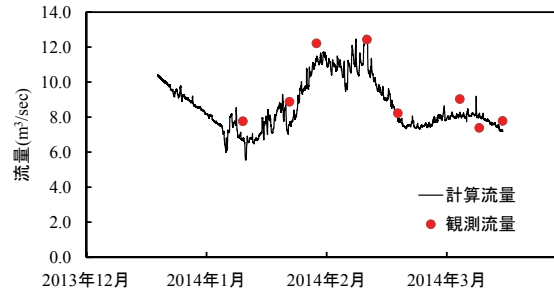


図-9 計算流量

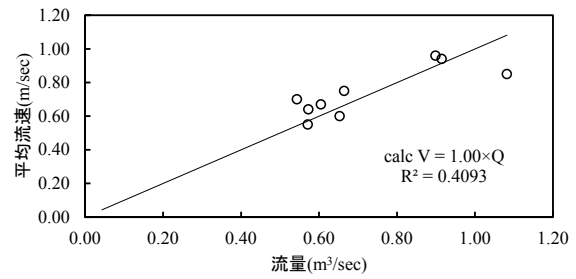


図-10 流量と平均流速の関係(観測値)

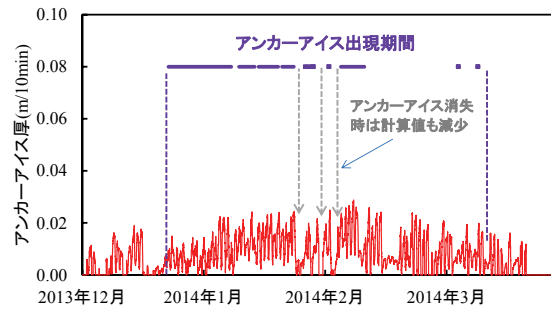


図-11 アンカーアイス厚の計算値

式(3)の平均流速 U_w の算出については、まず式(6)に示す吉川ら⁸⁾による結氷期流量算出手法を用いて、期間内の10分毎の計算流量を図-9に示した。

$$Q = C B_w^{\frac{1}{4}} A_0^{\frac{5}{4}} \quad (6)$$

C : 河氷底面粗度を表す値, B_w [m]: 川幅, A_0 [m²]: 流積次に、図-10に示す流量と平均流速の相関式から10分毎の平均流速を算出した。式(3)と式(5)の水深 h_w の算出については、流量観測断面の横断データから径深を算出し、径深=水深と仮定し、水位と径深の相関式から、10分毎の水位を用いて算出した。

計算によるアンカーアイス厚の時系列変化と現地設置カメラによるアンカーアイスの出現期間を図-11に示す。計算結果はアンカーアイスの出現期間と概ね一致している。特に、1月下旬から2月上旬の一時的なアンカーアイスの消失を再現している。しかし、2月中旬から3月にかけては再現できていない。この原因のひとつは、アンカーアイスの出現は定点カメラ画像で確認しているため、薄く発生したアンカーアスを把握できなかった可能性があることと、本計算式では、式(3)の T_f を 0°C として与えているが、この条件は、河床材料が十分に冷却されていることを前提としている。実現象として、日射や地熱などによって河床材料は温められていることが考えられるが、本研究では、この現象を考慮していないため、アンカーアイス厚を適切に計算できなかったと推察できる。

4. アンカーアイスが物質循環に与える影響

(1) アンカーアイスに含有される藻類

本観測期間中におけるアンカーアイスに含有される藻類は、珪藻46種、緑藻5種、黄色鞭毛藻3種、藍藻4種の計58種であった。河水内の藻類残存量を図-12に示す。なお、2014年2月19日と3月18日はアンカーアイスが消失していたため、氷板下の晶氷を採取した。藻類現存量は、アンカーアイス発生直後の2013年12月25日が最も多く、優占種の上位は羽状目珪藻であった。この時の顕微鏡での状況を図-13に示す。珪藻では、*Hannaea arcus* (クノジケイソウ)、*Cymbella minuta* (クチビルケイソウ)、*Gomphoneis okunoi* (ゴンフォネイス) *Nitzschia* spp. (ニッチア) が、黄色鞭毛藻では、*Hydrurus foetidus* (ミズオ) が優占種の上位になり、これらで全体の80%程度を占めた。一方、2014年1月5日の水位変動によって最初のアンカーアイスが消失し、再びアンカーアイスが発生した2014年1月10日は、図-14に示すように藻類は少なく、最初のアンカーアイス流失でフラッシュされて、藻類の生産が追い付いていないものと推察できる。2014年2月19日は氷板下の晶氷に含まれる藻類現存量が多くなっているが、優占種は同様に、アンカーアイスよりも黄色鞭毛藻ミズオの含有量が多くなる傾向がみられた。

(2) アンカーアイスに含有される有機物と栄養塩

図-15に示す有機物と栄養塩の期間毎の特徴を以下に記す。

- ① アンカーアイス発生直後は、BOD (有機物) 濃度が高く、SS、窒素、リンともに高濃度である。河床の石にアンカーアイスが付着したため、石表面に付着していた藻類がアンカーアイスに取り込まれたものと推察できる。
- ② 最初のアンカーアイスの流失によって、石表面の

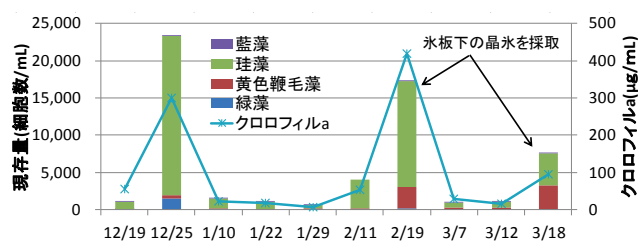


図-12 河水の藻類現存量

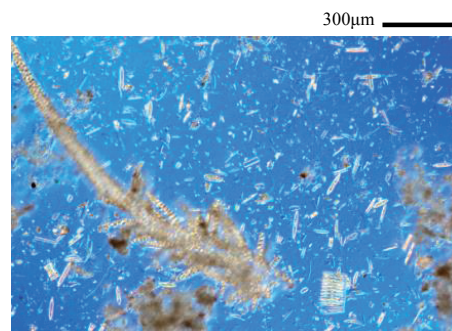


図-13 アンカーアイス発生時(2013.12.25)

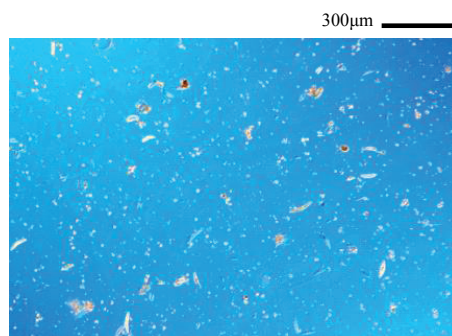


図-14 フラッシュ後のアンカーアイス(2014.1.10)

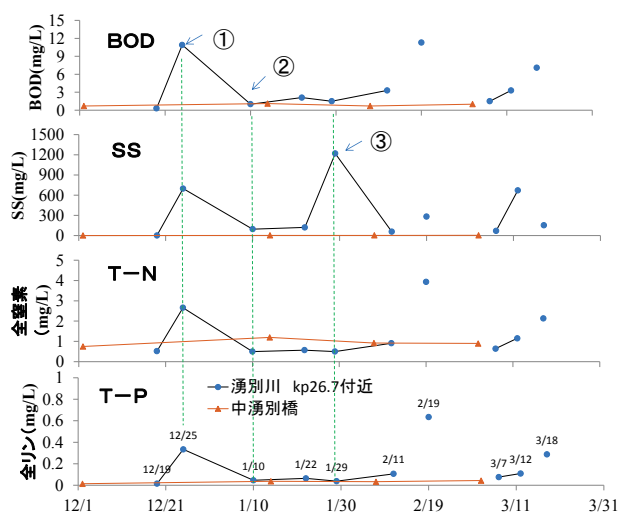


図-15 水質濃度変化

付着物がフラッシュされるため、再び発生したアンカーアイス内のBODやSSは低い濃度になった。

③ アンカーアイスのSS濃度は、BODなどに比べて高い。藻類の生産ではなく、一時的な土砂の掃流で、土粒子がアンカーアイスに付着したと推察できる。

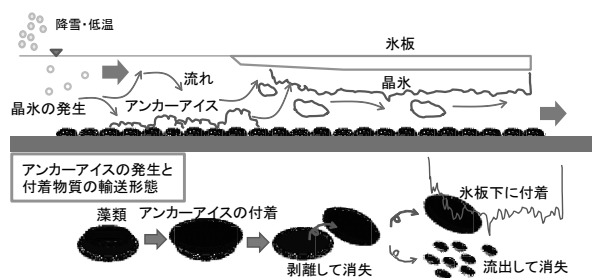


図-16 アンカーアイスの発生と付着物質の輸送形態

なお、観測地点下流の中湧別橋の水質とアンカーアイスの濃度変動は連動していない。アンカーアイスの発生量および発生範囲が限定されるため、下流水質への直接的な影響は少ないと推察できる。

本観測で得られたアンカーアイスの発生と付着物質の輸送形態を整理すると図-16となる。アンカーアイスは水と河床との温度差、または晶氷が流れによって河床に運ばれて発生し、その後、河床から剥離し、下流に流下する。その一部は氷板下の晶氷に取り込まれる。

(3) アンカーアイスの消長が河川水質に与える影響

アンカーアイスの水質分析結果をもとに、アンカーアイスからの流出負荷量を算出する。

アンカーアイスの発生体積（縦方向×横方向×厚さ）を現地状況の目視から100m×50m×0.1mとした。アンカーアイスは、気温が低い早朝に発生し、日射が多くなる昼間には融解する日周期がみられることから、1サイクル/日と仮定して流出量を算出する、 $100 \times 50 \times 0.1 \div (24 \times 60 \times 60) = 0.006 \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。12月から3月までの7回分のアンカーアイスに含有する単位体積当たりのBODの平均値は3.4mg/L、SS平均値418mg/L、全窒素平均値は1.0mg/L、全リン0.1mg/L、クロロフィルa 63.3μg/Lに流出量0.006m³/secを乗じた負荷量を算出した。アンカーアイスが発生していない2013年12月19日と2014年3月18日の河川水内の平均値（BOD 3.7mg/L、SS 76.5mg/L、全窒素1.3mg/L、全リン0.2mg/L、クロロフィルa 75.5μg/L）に平均河川流量（中湧別流量17.02 m³/sec）を乗じた負荷量を算出した。本観測結果から、アンカーアイスに含有している物質が河川を流下する物質に占める割合は、BODは河川負荷量の0.2%、SSは8.5%、全窒素は0.05%、全リンは0.14%、クロロフィルaは0.03%であった。

5. おわりに

本現地観測結果から、アンカーアイスの発生には、気温、水温の気象条件と、水位、流速などの水理条件が重要であることが分かった。アンカーアイス発生の計算式

式は、アンカーアイスの発生・消長を概ね再現しているが、計算精度を高めるためには、日射、地熱による河床材料の温度を適切に見積もることが重要であることが分かった。アンカーアイスが発生する本観測地点のフルード数は0.3から0.6程度であり、開水時（非結氷時）の河川における藻類の一次生産力は高まると言われているフルード数0.4前後の値と同等であった。アンカーアイスに含まれている藻類現存量については、最初に発生したアンカーアイスが観測期間中、最多であった。本観測結果より、開水時に繁茂した藻類が初期に発生するアンカーアイスに取り込まれて下流へと流下するフラッシュ現象による物質輸送が推測された。また、氷板下に堆積している晶氷を採取した結果、本観測地点より上流において、河床から剥離したアンカーアイスが流下し、本観測地点の氷板下に堆積した可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、網走開発建設部より観測資料の提供を受けた。国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野（河川）、JSPS科研費若手研究(B) 26870023の助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋場雅弘, 吉川泰弘, 伊藤丹, 黒田保孝: アンカーアイスの平面分布と含有物質に関する現地観測, 水工学論文集, 第58巻, pp.1279-1284, 2014.
- 2) 平山健一, 佐藤志貴, 寺田浩一郎, 笹本誠, 堺茂樹, 滝口大樹: アンカーアイスの発生に関する現地観測, 第12回寒地技術シンポジウム, pp.499-504, 1996.
- 3) 笹本誠, 牛渡久雄, 平山健一, 劉曉東, 寺田浩一郎, 斉藤智彦: 流水中でのアンカーアイスの付着状況に関する研究, 第16回寒地技術シンポジウム, pp.74-80, 2000.
- 4) 戸田祐嗣, 赤松良久, 池田駿介: 水理特性が付着藻類の一次生産に与える影響に関する研究, 土木学会論文集, No705, pp.161-174, 2002.
- 5) Tremblay P., Leconte R., Lacey R.W.J., Bergeron N.: Anchor ice cycles: observations from field study on the Stoke River, CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 17th Workshop on River Ice, pp.47-54, 2013.
- 6) Shen H.T., Wang D.S., Wasantha Lal A.M.: Numerical Simulation of River Ice Processes, Journal of Cold Regions Engineering, ASCE 9(3), pp.107-118, 1995.
- 7) 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.
- 8) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法, 水工学論文集, 第54巻, pp.1075-1080, 2010.

(2015. 4. 3受付)