

小川原湖における氷板揚陸の観測例

Ride-up and Pile-up of Ice-cover
in Lake Ogawara

平山健一・堺 茂樹・笹本 誠・江口 斉

By Ken-ichi Hirayama, Shigeki Sakai, Makoto Sasamoto and Hitoshi Eguchi

In spring of 1987, a large ice movement and ice ride-ups on the shore of Lake Ogawara in Aomori Prefecture were observed. About 15 cm thick ice cover invaded inland 23 m deep and piled up 1 m high. Calculation of wind shear stress as an ice driving force resulted in 600 tons. As a conclusion, ice formation and its movements could cause considerable loads on hydraulic structures, and it is strongly recommended to pay enough attention for possible damages of structures by ice.

key words : ice, ride-up, wind shear stress, ice load
hydraulic structures

1. まえがき

小川原湖は青森県下北半島基部に位置し、高瀬川の一部をなす面積62km²の湖である。湖から河口までの距離は約5km、満潮時には塩水が流入する汽水湖であり、しじみやわかさぎの漁がおこなわれている。この地域の1, 2月の平均気温は平年値で-2℃、積算寒度は-100℃・day程度であるが、湖はほぼ毎年全面結氷し、多量の積雪のため最大氷厚は40cmに達する。著者らは昭和54年より湖の結氷と氷状の実態調査を実施してきたが、本報告は昭和62年3月15日に発生した移動性低気圧による西風の影響で、氷板が東方に移動して東岸砂浜に押し上がった「氷板の揚陸」(ride-up and pile-up)の調査・検討結果を述べ、結氷する湖沼の水理構造物設計において氷に対する考慮の必要性を示したものである。

正会員 Ph.D. 岩手大学教授 工学部土木工学科

(〒020 岩手県盛岡市上田4-3-5)

正会員 工博 岩手大学助教授 工学部土木工学科(同上)

正会員 岩手大学技官 工学部土木工学科(同上)

正会員 建設省北陸地方建設局松本砂防工事事務所

(〒390 長野県松本市元町1丁目8-28)

2. 観測結果の概要

小川原湖東岸への水板の揚陸が観測された3月15日は、低気圧の接近により三沢市で最大風速6m/sec、平均風速3m/sの西風が観測された。湖中央にある建設省観測施設と三沢市のこれまでの観測値の比較より、小川原湖では日平均風速10m/sec、最大風速18m/sec程度の西ないし西南西の風が吹いていたと予想される（当日湖中央の観測施設は休止）。揚陸の見られた湖東岸は幅30m程度のなだらかな砂浜（汀線付近の平均勾配 5.7度）で湖水浴場として利用されている。図-1には揚陸現場の平面図、図-2にはそれぞれの地点の様子を示した。揚陸は幅500mにわたって発生しているが、内陸への侵入長が場所により異なり、揚陸の発生が同時ではなかったことが推察される。また、一部では水片の揚陸が樹木により止められていた。表-1に揚陸の諸元を示したが、汀線より最大侵入長23m、平均で10m程度、水片の最大堆積高さは砂面上約1mであった。水の移動時、C地点付近にいた人によれば「水板が岸に揚陸を初めてから、水面の水板がビニールハウス状に持ち上がり水面に落ちた」との話があり、揚陸後さらに押された後続の水板が挫屈破壊したようである。前日の3月14日には、土場川、高瀬川、花切川、砂土路川の河口付近は融雪水によって、開水面が生じていることが観測され（図-3参照）、また例年、舟ヶ沢、鶴ヶ崎地域より、根井、湖水浴場方面に向かって大きなクラックの形成が見られるが、3月15日には同様のクラックが観測されている。このように入沼、沼崎方面より湖水浴場方向への水板の移動に対して、地形的障害が少なく、東西方向の移動が発生し易い状況にあったことが推察される。本移動によって3月16日には西部水域の水板は一掃され、開水面となり、水片は東岸方向に押しやられた。本例のような水板の揚陸は、(1)湖岸に水縁が接している状態で、風力を受けて水板が岸に押し上がる静的な移動の場合、(2)水板が風によって加速されて移動し、岸に向かって動的に揚陸する場合が考えられるが、本例では、水板は東に移動して一部接岸している状態のところに、更に強風による吹送力が加わり揚陸が発生したと考えられ、以下に示す解析では静的な場合のアプローチを示す。

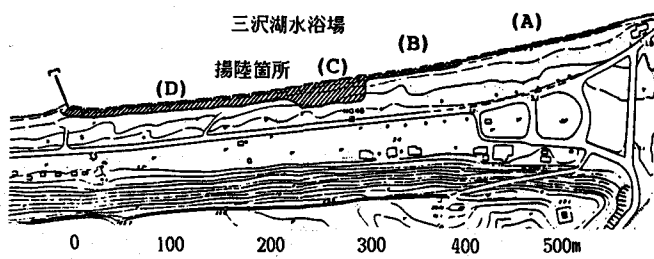


図-1 水板揚陸地点の平面図（小川原湖三沢湖水浴場）

地点	侵入長 L (m)	氷厚 t(m)	氷片寸法 W (m)	揚陸型	堆積高 Z(m)
A	1.0 ~ 2.3	0.15	0.8 ~ 1.8	I 型	—
B	4.0 ~ 4.5	0.15	0.8 ~ 1.8	I 型	—
C	20.0 ~ 23.0	0.15	0.4 ~ 1.7	I 型	—
D	12.0 ~ 12.5	0.20	0.6 ~ 1.7	II 型	1.0

表-1 水板揚陸の諸元



図-2(a) 氷板揚陸の状況
A地点（左-湖側）



図-2(b) 氷板揚陸の状況
B, C地点（右-湖側）



図-2(c) 氷板揚陸の状況
D地点（左-湖側）

3. 風による環境力

風による応力、海流・潮汐流れのせん断力、コリオリ力など氷板の運動の原因となる自然力を環境力と総

称する。小川原湖の環境力は風による応力であり他の影響は無視できる。従ってその大きさKは次式で与えられる。

$$K = C_{10} \cdot \rho_a \cdot V^2 \cdot A$$

- C_{10} : 地上10mの風速に対する抗力係数
 ρ_a : 空気の密度(0.132 kgf・sec²/m⁴)
 V : 地上10mの風速(m/sec)
 A : 氷板面積(m²)

抗力係数は Danys(1977)のまとめによれば表-2のように与えられる。氷板の揚陸が発生した当時の風による環境力は、氷板面積を図-4のように、雪のある平坦な氷板の抗力係数 $C_{10}=1.1 \times 10^{-3}$ を仮定し、風速を18m/secとすれば、 $K=640\text{tonf}$ 程度と考えられる。一般に構造物に作用する水力は、氷の破壊に必要な力と環境力の小さい方の値となり、環境力を上回る荷重は発生しない。単位幅当りの環境力は本例のように主たる接岸幅を250mとすれば2.56tonf/mとなる。なお氷板下面に働く流体抵抗力は、氷板の速度を0.1~0.2 m/s程度とすると風による応力の20%以下と見積られる。

Surface texture	C_{10}
Smooth snow-covered ice	1.1×10^{-3}
Normal snow-covered ice	1.6×10^{-3}
Rough ice cover	2.2×10^{-3}

表-2 平均的抗力係数(Danys, 1977)

4. 揚陸に必要な力

氷板が湖岸斜面を押し上がり揚陸するために必要な力Pは図-5のそれぞれのタイプについて図-6を参照して次式のように計算される。

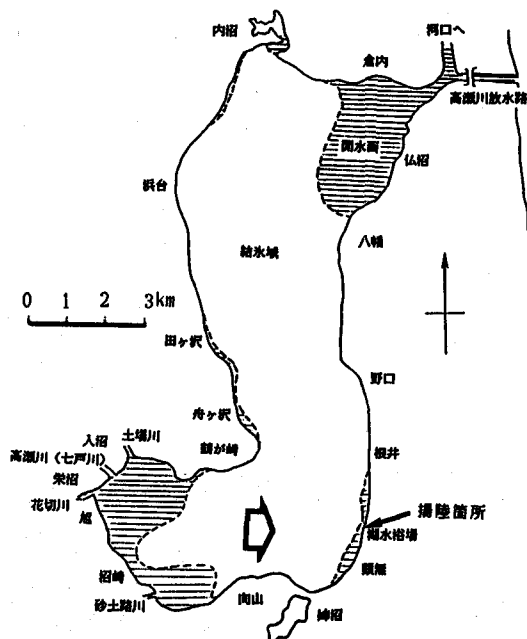


図-3 小川原湖氷板分布
(昭和62年3月14日)

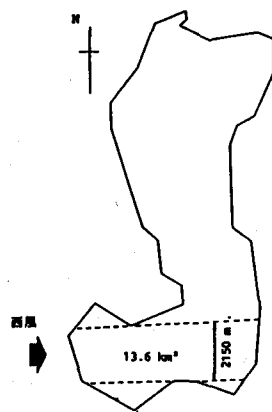


図-4 計算に用いた氷板面積

$$P/b = L t \rho_w g (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)$$

また水平力Hは、

$$H/b = (V/b + P \sin \alpha / b) \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) / (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + P \cos \alpha / b$$

Vは氷板が曲げ破壊するために必要な鉛直反力で次式により与えられる。

$$V/b = 0.68 \sigma_f (\rho_w g t^5 / E)^{0.25}$$

ここで L: 侵入長 t: 氷厚 b: 氷板幅
 $\rho_w g, \rho_w g$: 氷および水の単位体積重量 α : 斜面勾配
 σ_f : 氷の曲げ強度 E: 氷の弾性係数

上式を用いて観測された揚陸例について、揚陸に必要な力を計算する。計算に用いた数値は次のように与えられる。

小川原湖では満潮時海水が流入するが、これまでの水質調査

の結果ブラインなどの海水特有の性質は観察されず淡水氷と見なされる。また主たる氷層が雪氷層であり、気泡の含有が見られるため比重は純氷より小さく0.9程度であった。よって氷の単位体積重量は900kgf/m³となる。また曲げ強度 σ_f は片持ち梁試験より4kgf/cm²、弾性係数Eは直接測定されていないがE/ σ_f の比を3000と仮定して12000kgf/cm²、氷と砂の摩擦係数は実測より1.0を与える。但しD地点では氷片の堆積の上を後続の氷片が移動した区間が存在するため汀線から7.5mまでI型(図-5参照)で道上がり、その後5mは氷の堆積上を道上がったものとして氷-氷の摩擦係数の実測値0.7をもちい、また堆積高が1mであったことから斜面勾配を $\theta=11^\circ$ とした。それぞれの区間で氷板の道上がりに必要な力を計算した結果は表-3に示される。

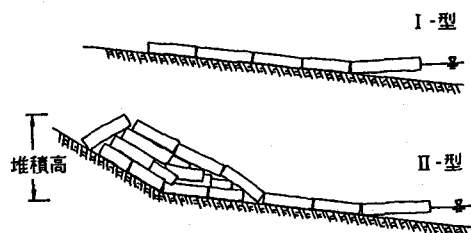


図-5 氷板揚陸のタイプ

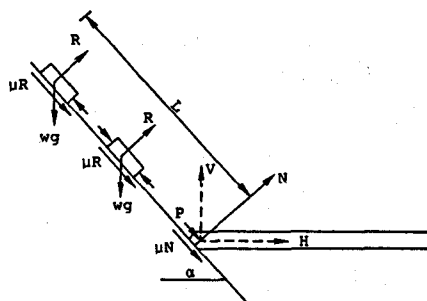


図-6 氷板揚陸模式図

地点	侵入長 L(m)	氷厚 t(m)	単位幅荷重 P/B(kgf/m)	単位幅水平力 H/B(kgf/m)	氷板幅 B(m)	水平力 H(kgf)
A	2.0	0.15	295.5	496.5	150	74475.0
B	4.0	0.15	590.9	826.3	100	82634.0
C	23.0	0.15	3397.9	3959.8	50	197992.0
D	7.5	0.20	1477.4	1888.0	200	377598.0
	5.0		790.1	1133.9		226769.0
合計					500	959 ton

表-3 氷板揚陸に必要な力

前節で求めた環境力に比べ50%程度大きな値になっているが、氷板の揚陸は氷板全幅で同時に発生したのではなくて部分的に順次発生したためと考えられる。また上記の環境力の計算では幅2150mの氷板を仮定しているが、実際の揚陸幅は500m、著しい揚陸はこのうち南側の250mであり、約8分1の長さに氷板全体の環境力が集中したことになる。氷板幅と揚陸幅が一致しないのは湖岸の地形や氷板縁の形状に起因する。

5. 水理構造物に対する耐氷設計の必要性

これまで7年間の小川原湖水状調査で3回の大規模な道上がり観測されたが、幸いにして人家などへの被害は発生しなかった。前節では小川原湖の水状と氷力の概要について述べたが、小川原湖総合開発事業では、湖岸に湖岸堤、矢板護岸、取水施設、排水樋門、橋梁橋脚、河口堰、船溜りなどの諸施設が計画されている。これら構造物の設計では氷の影響に対する種々の検討がなされ、氷力が設計上支配的外力であることが結論された。湖沼の結氷は中部地方以北で広く見られるが、結氷に伴う影響について検討が必要な場合も少なくないと考えられる。特に、湖中央や湖岸よりとび出た構造物の設計では氷の破壊荷重を考慮することも必要である。また護岸のように幅の広い構造物では、単位幅当りの氷力は小さいが、氷力は狭い範囲に集中する場合が多く、氷力は波力を上回る大きさとなる場合もありうる。また、全面結氷期より、結氷初期、融氷期など氷の移動に自由度の大きい時期に対する検討が大切であることなどが今回の調査により明らかになった。

謝辞

本報告の作成にあつては建設省東北地方建設局高瀬川工事事務所の多大の援助を受けたことを付記し謝意を表します。

参考文献

- (1) 坂本典正他「青森県小川原湖に発生した氷片のライドアップに関する一考察」
寒地技術シンポジウム'87講演論文集、1987年11月
- (2) Hirayama, K., "Ice Conditions of Lake Ogawara", Proc. of 9th IAHR Ice Symp. on Ice, 1988, Sapporo
- (3) Carstens, T., "State-of-the-Art Report, Working Group on Ice Forces on Structures", CRREL Special Report 80-26, 1980
- (4) Sanderson, T., "Ice Mechanics", Graham & Trotman, 1983
- (5) Danys, J.V., "On Wind Induced Static Ice Forces on Offshore Structures", Proc. of POAC, Newfoundland, 1977
- (6) 長崎作治, "海洋構造物の設計と施工", 森北出版、1970