

# 冬季貯水池における結氷板の形成過程と 挙動に関する研究

## STUDY ON FORMATION AND BEHAVIOR OF THE ICE COVER ON COLD REGION RESERVOIR

笠井 秀男<sup>1</sup>・神藤 謙一<sup>2</sup>・横辻 宰<sup>3</sup>

Hideo KASAI, Kenichi KANDO and Osamu YOKOTSUJI

<sup>1</sup>正会員 工修 北海道電力株式会社 総合研究所 (〒067-0033 北海道江別市対雁 2-1)

<sup>2</sup>正会員 北海道電力株式会社 総合研究所 (〒067-0033 北海道江別市対雁 2-1)

<sup>3</sup>正会員 北海道電力株式会社 土木部 (〒060-8677 北海道札幌市大通東 1 丁目 2)

In the cold region Hokkaido, ice problems have occurred in the hydropower station. While we have investigated the river ice frazil and developed the river ice control structure, research on ice formation and behavior on a reservoir where the water level has fluctuated in, have never been performed.

In this paper, thickness of the ice cover in a reservoir is discussed from heat balance and ice behavior. From a view point of heat balance, the transition of snow ice thickness on the reservoir during winter period was simulated by a numerical model, considering heat transfer between ice and air, and flow of water, etc. From a view point of ice behavior, by performing a two-dimensional hydraulic model test with simulating reservoir slope, fluctuation of water level, and ice jam condition, ice behavior around slope of this model was observed, and hydrological behavior to study on ice thickness distribution in a reservoir was confirmed.

*Key Words : ice thickness, upper reservoir, heat balance, ice behavior, numerical simulation, two-dimensional hydraulic model test*

### 1. はじめに

積雪寒冷地に属する北海道では、冬期間に水力発電所において、晶氷 (Frazil) や氷盤等の流氷雪により取水障害の問題が発生する。

峯田ら<sup>1),2)</sup>は、毎年のように取水口から流氷雪が流入し発電不能となるような取水障害がたびたび発生していた北海道電力(株)仁宇布川発電所において、氷の形成過程や結氷板下の流速分布を観測し、フェンス型の対策工を考察して現地試験により効果の確認を行っている。

一方、水位変動を伴う貯水池、特に 1 日の水位変動量が大きい揚水発電所調整池の水面を覆う結氷板の形成過程および挙動に関しては、研究事例が少なく十分な知見が得られていない。現在、北海道電力(株)の揚水発電所は河川からの流入分を取水し比較的大容量の貯水池を有する混合揚水式であり、流入河川の熱量と大容量貯水池の熱エネルギーによりこれまで氷による顕著な問題は生じ

てこなかった。ところが、河川の流入がほとんどなく十分な熱量を得ることが期待できない純揚水式の揚水発電所上部調整池 (以下、上池という) が気象条件の厳しい高地に建設される場合には、積雪量が最大 5 m 程度、最低気温が  $-25^{\circ}\text{C}$  程度になることも想定される。このような気象条件下で上池を覆う結氷板が促進され、取水口呑口断面を塞ぐような事象が発生した場合には、発電運用上に支障を来たすような状況も懸念される。

そこで著者ら<sup>3)</sup>は気象条件が類似している雨竜発電所等を対象とした冬季現地調査を実施した。その結果、結氷板の厚さが周辺の積雪深よりも小さくなることや、積雪深が大きい地点での結氷板の形態は柔らかい雪泥状態になることを確認した。

以上の現地調査結果を踏まえ、揚水発電所上池における氷板厚について、熱収支と氷板挙動の両面から検討を行うこととした。熱収支の観点からは、池内の水温や流動により結氷板が融解し、周辺の積雪深より小さくなる

と考えられることから、冬季上池における流動や外気との熱収支を考慮した氷板の発達・融解過程に関する検討によって、上池の最大氷板厚を数値シミュレーションで解析することとした。また、氷板挙動の観点からは、利用水深の大きいプールタイプの調整池では、水位変動による氷板の滑走（スライディング）に起因して法面付近で局所的に氷板厚が大きくなる場合が考えられることから、上池法面を模擬した二次元水理模型により、法面付近における氷板挙動を観察することとした。

本報告はこれらの結果について述べるもので、対象とする貯水池の気象データや運用方法を入力することで、雪氷厚の経時変化を定量的に予測することを可能とした。さらに水理模型実験により、水位変動に伴う法面付近の雪氷厚が増大する現象を見出し、池内の氷板厚分布を検討するための有用な基礎的知見を得ることができた。

## 2. 氷板厚解析

冬季の揚水発電所上池における結氷板の厚さは、非運転時と運転時では異なる。すなわち、発電所運転時には下池からの揚水により上池で流動が発生するため、結氷板と池水との熱交換が大きくなり、流動が発生しない非運転時より結氷板が融解し、氷板厚が小さくなると考えられる。

ここでは冬季の揚水発電所上池における結氷板の断熱効果や下池からの揚水による結氷板の融解等を想定し、池内の氷板発達・融解量について熱収支を考慮した数値解析を行い、非運転時および運転時における上池での氷板厚変化を時系列的に予測した。非運転時の解析は揚水発電所上池および気象条件の類似した雨竜第一ダムを対象に、運転時の解析は揚水発電所上池を対象に流速を設定して行うこととした。

### (1) 解析手順

解析手順は以下のとおりとする。表-1 に解析ケースと入力条件を示す。

- ①外気温や積雪深等の気象データ、および結氷板の熱物性値を解析モデルに入力する。
- ②水位変動が小さく池内流動をほとんど伴わない雨竜第一ダム等の氷板厚実測データと、ダムの非運転時を想定した流速を考慮しない静止場での解析値を比較する。

③ダムの運転時を想定し池内の流速を考慮することで、池内の熱交換による水温変化を反映した解析を行う。

### (2) 解析手法

熱収支の考え方については、平山らの研究<sup>4),5),6)</sup>を参考とし、以下のモデルを構築した。一層の熱収支模式図を図-1 に示す。

氷板厚の変化 $\Delta\eta$ は結氷板下面 $\Delta\eta_{i1}$ と結氷板上面 $\Delta\eta_{i2}$ とで行われる（単位：m）。

$$\Delta\eta = \Delta\eta_{i1} + \Delta\eta_{i2} \quad (1)$$

結氷板表面、結氷板内、池水の熱収支量 $\Phi_{ia}$ 、 $\Phi_i$ 、 $\Phi_{wi}$ （単位：W/m<sup>2</sup>）はそれぞれ次式で表される。

$$\Phi_{ia} = h_{ia} \cdot (T_{ia} - T_a) \quad (2)$$

$$\Phi_i = K_i \cdot \frac{(T_i - T_{ia})}{\eta_i} \quad (3)$$

$$\Phi_{wi} = h_{wi} \cdot (T_w - T_i) \quad (4)$$

ここに、

$h_{ia}$ 、 $h_{wi}$ ：結氷板表面、池水の熱伝達係数（W/m<sup>2</sup>/°C）

$K_i$ ：結氷板内の熱伝導率（W/m/°C）

$T_a$ 、 $T_{ia}$ 、 $T_i$ 、 $T_w$ ：大気、結氷板上面、結氷板下面、池水の温度（°C）

である。

$$\Phi_{ia} = \Phi_i \text{ とすると}$$

$$\Phi_i = \frac{T_i - T_a}{\frac{\eta_i}{K_i} + \frac{1}{h_{ia}}} \quad (5)$$

また、結氷板下面 $\Delta\eta_{i1}$ に要する熱量は結氷板下面を移動する熱量の差に等しいため、次式が得られる。

$$\Phi_i - \Phi_{wi} = \rho_i \cdot \lambda \cdot C \cdot \frac{\Delta\eta_{i1}}{\Delta t} \quad (6)$$

ここに、

$\rho_i$ ：氷の密度（kg/m<sup>3</sup>）、 $\lambda$ ：凝固潜熱（J/kg）

$C$ ：水の占める割合、 $\Delta t$ ：時間間隔（日）

である。

表-1 解析ケース

| ケース名 | ケース  | 解析地点    | 比較検討対象     | 入力条件 |        |             |       |        |
|------|------|---------|------------|------|--------|-------------|-------|--------|
|      |      |         |            | 計算時間 | 対象期間   | 水温          |       | 流速     |
|      |      |         |            |      |        | 時期・水温       | 位置    |        |
| 非運転時 | ケース1 | 揚水発電所上池 | 上池近隣湖沼の実測値 | 日単位  | 2000年度 | 期間中1.5°C    | 雪氷下2m | 0cm/s  |
|      | ケース2 | 雨竜第一ダム  | 雨竜第一ダムの実測値 |      | 1998年度 |             |       |        |
| 運転時  | ケース3 | 揚水発電所上池 | —          | 日単位  | 2000年度 | 雪氷融解による水温変化 | 池内全体  | 1cm/s  |
|      | ケース4 |         |            |      |        |             |       | 50cm/s |

(4) (5) (6)式より、結氷板下面 $\Delta \eta_{i1}$ について次式が得られる。

$$\Delta \eta_{i1} = \frac{1}{\rho_i \cdot \lambda \cdot C} \left( \frac{\Phi_i}{\eta_i + \frac{1}{K_i}} - h_{wi} \cdot (T_w - T_i) \right) \cdot \Delta t \quad (7)$$

同様に結氷板上面 $\Delta \eta_{i2}$ については次式が得られる。

$$\Delta \eta_{i2} = \frac{1}{\rho_i \cdot \lambda \cdot C} \left( Q_S + Q_E + Q_N - \frac{\Phi_i}{\eta_i + \frac{1}{K_i}} \right) \cdot \Delta t \quad (8)$$

ここに、

$Q_S, Q_E, Q_N$ : 顕熱, 潜熱, 放射収支量 (単位:  $W/m^2$ ) である。

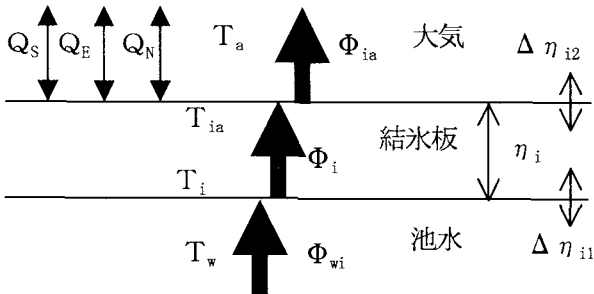


図-1 熱収支模式図 (一層)

実際の氷板形態は一層だけでなく、積雪・雪泥・雪泥水など多層から構成されるため、各層間の熱収支を考慮したモデルを構築して解析を行う。また、貯水池内の流動(流速)を考慮する場合は熱伝達係数 $h_{wi}$ を、考慮しない場合は熱伝導率 $K_{wi}$ をそれぞれ用いる。

解析に用いる結氷板の物性値を表-2に示す。物性値は主に、揚水発電所上池における結氷状況を低温室で再現した室内実験<sup>7)</sup>により決定した。

表-2 結氷板の物性値

|     | 熱物性値                         |                                   |  | 水の占める割合            |
|-----|------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------|
|     | 熱伝導率<br>( $W/m^2/^\circ C$ ) | 空気との熱伝達係数<br>( $W/m^2/^\circ C$ ) | 水との熱伝達係数<br>( $W/m^2/^\circ C$ )                         |                    |
| 水   | 0.561 <sup>※2</sup>          | —                                 | —  | —                  |
| 真氷  | 2.24 <sup>※1</sup>           | 風速と熱伝達係数の関係 <sup>※3</sup> より推定    | $h_w = C_w \cdot V^{0.8} / D^{0.2}$<br>$C_w = 1622^{※1}$ | 1 <sup>※3</sup>    |
| 積雪  | 0.3 <sup>※1</sup>            |                                   |  | —                  |
| 雪泥  | —                            |                                   |  | 0.53 <sup>※1</sup> |
| 雪泥水 | 2.24 <sup>※1</sup>           | —                                 | —  | 1 <sup>※4</sup>    |

※1 室内実験より同定, ※2 理科年表<sup>8)</sup>より,

※3 竹内の論文<sup>4)</sup>より, ※4 真氷と同じ

### (3) 非運転時の解析

#### a) 解析条件

非運転時の解析は貯水池内の流速を考慮せず、結氷板と水との熱収支計算には熱伝導率を用いることとする。

北海道北部に位置する雨竜第一ダムでの水温調査(1998年)では、結氷期における結氷板下2.0mでの水温がほぼ $1.5^\circ C$ であったため、熱収支解析にはこの水温値を用いた。また、雨竜第一ダムでの観測結果において結氷開始日の積算寒度は $-52.7^\circ C \cdot \text{日}$ であったため、これを揚水発電所上池および雨竜第一ダムに適用すると結氷開始日がそれぞれ2000年11月19日、1998年11月29日となることから、それぞれその前日を解析起算日とした。

#### b) 解析値と実測データとの比較

揚水発電所上池の解析結果と上池近隣湖沼での氷板厚実測データ、および雨竜第一ダムでの解析結果と氷板厚実測データを比較した結果を図-2~5に示す。

ここで、結氷板の物性値は表-2を用い、雪泥圧縮率を0.8、室内実験結果より雪泥層密度 $0.94g/cm^3$ 、現地観測結果より積雪層密度 $0.15g/cm^3$ とした。上池近隣湖沼および雨竜第一ダムの実測データはそれぞれ2000年度、1998年度の実測値を用いた。

この結果、全氷板層厚および各層の占める比率についても、実測値と解析値でよい一致がみられる。また、全氷板層厚は熱収支による融解と雪泥部分の圧縮により、湖沼近隣における陸上積雪深よりも小さく、8割程度となった。

### (4) 運転時の解析

運転時の解析は池内の流速を考慮し、結氷板と水との熱収支計算に必要な熱伝達係数は、竹内ら<sup>4)</sup>による理論式を用いることとした。

$$h_w = C_w \cdot V^{0.8} / D^{0.2} \quad (9)$$

ここに

$h_w$ : 熱伝達係数 ( $W/m^2/^\circ C$ ),  $V$ : 流速 ( $m/s$ ),  $D$ : 水深 ( $m$ )  
 $C_w$ : 結氷板下面の凹凸による係数 ( $W \cdot s^{0.8} / m^{2.6} / ^\circ C$ ),

1,622~2,433 (室内実験により解析では1,622を採用) である。

運転時の池内流速は発電時を想定した $1cm/s$ 、揚水時を想定した $50cm/s$ の2ケースとし、氷板融解による水温変化を考慮して解析した結果を図-6~7に示す。水温の計算は、初期水温を $5^\circ C$ 、氷の融解潜熱を $80cal/g$ とし、日単位で結氷板の融解量および融解に費やした熱量を算出し、池水量および池水水温に順次反映させる方法で行った。

解析結果は以下のとおりである。

- 池内の流速が大きい場合は、早い時期での氷板融解に寄与するが、池内の熱交換が進むことで水温の下がり方が大きく $0^\circ C$ 近くになる時期が早くなるため、これ以降は氷板融解にほとんど寄与しなかった。
- 流速の大小に拘らず最大氷板厚は $1.6 \sim 1.9m$ 程度であ

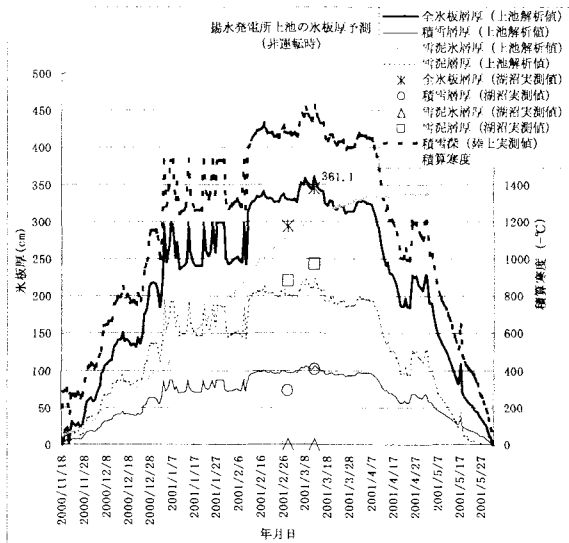


図-2 揚水発電所上池での解析結果 (ケース1)

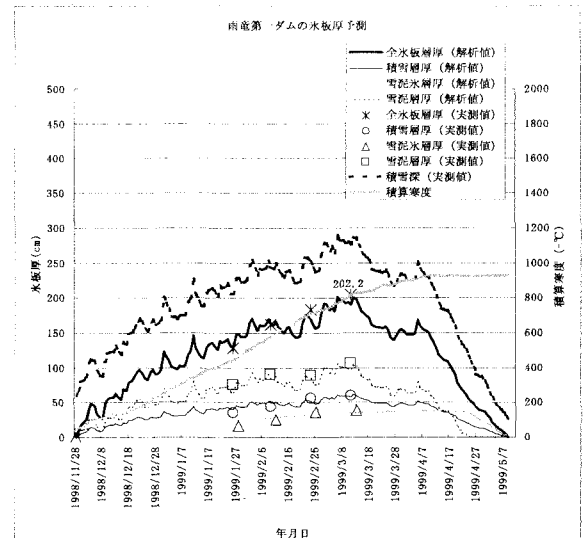


図-4 雨竜第一ダムでの解析結果 (ケース2)

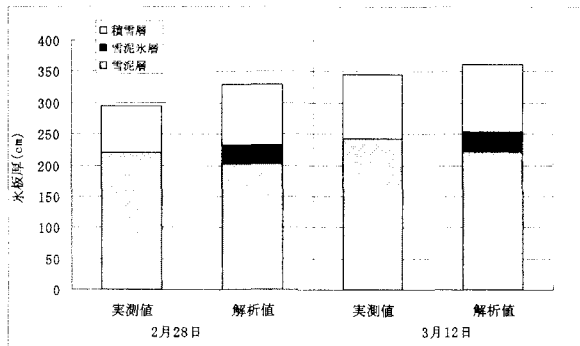


図-3 湖沼実測値と上池解析値 (ケース1)

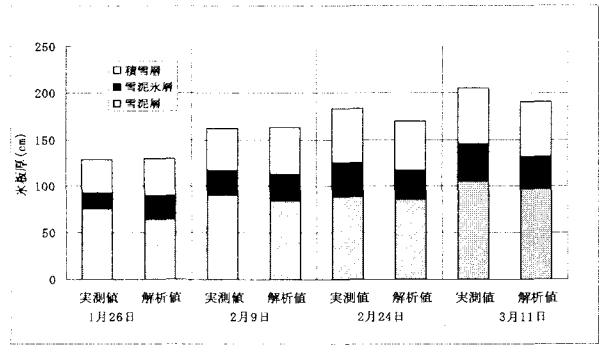


図-5 雨竜第一ダム実測値と解析値 (ケース2)

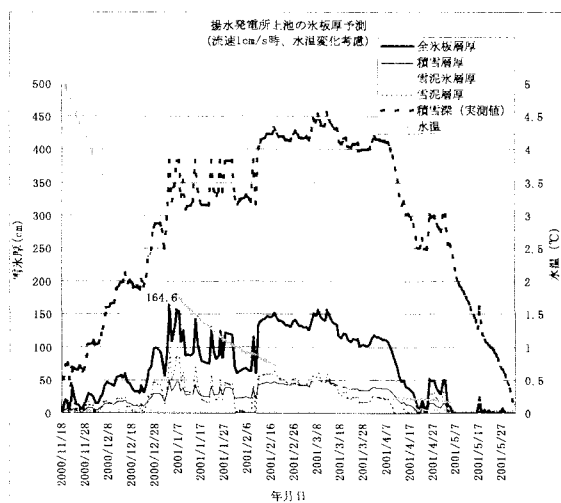


図-6 ケース3解析結果 (流速1cm/s)

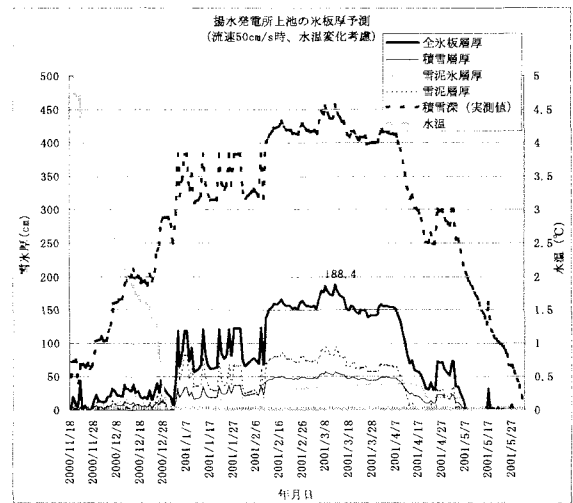


図-7 ケース4解析結果 (流速50cm/s)

り、非運転時最大氷板厚(ケース1)の5割程度、積雪深の4割程度となった。

### 3. 二次元水理模型実験

利用水深の大きい揚水発電所の調整池、特にプールタイプの調整池では、水位変動により結氷板が法面上に置かれ、滑走(スライディング)することにより法面付近

で局所的に氷板厚が大きくなる場合が考えられることから、プールタイプの上池法面を模擬した二次元水理模型により、水位変動に伴う氷板挙動および氷板厚の変化を観察することとした。

#### (1) 実験方法

##### a) 実験装置

実験装置は主に上池模型(縮尺1/70)、ポンプ、給排水

管、給水槽で構成する(図-8)。上池模型は法面勾配を1:2.5に設定し、氷板挙動が観察できるように模型の一部を透明アクリル製とした。取水口は法尻から14m 沖側(模型上で20cm 沖側)に設置し、給水槽との間で取水・放水を行う構造とした。

また、実験は実験材料である氷が融けない冬期間に、屋外のテント内に実験装置一式を設置し、実験中の気温・水温を測定しながら適正な温度条件を保つようにして実施した。

### b) 実験条件

水位変動は上池の利用水深を45mに設定し、HWLからスタートし、LWLまで下げた後にHWLまで上げる一往復を基本としたが、実際の降雪による氷板発達過程を考慮し、水位変動一往復終了後に氷を追加して水位変動させる実験ケースも実施した。

水位変動については、変動速度を一定として実施した。実験対象とした揚水発電所上池の有効貯水容量、取水量、揚水量、およびフルード相似則による速度の縮尺換算(模型/実物=1/70<sup>0.5</sup>)を考慮すると、模型上の速度V<sub>m</sub>は1.3cm/min程度となるが、実験の効率化を考慮し、実験上の雪氷挙動に影響が出ない範囲である1.5倍の速度(V<sub>m</sub>=2.0cm/min)で実施することとした。これに伴い、水位低下時・上昇時の経過時間は32分程度(1往復水位変動時間はLWL時の段取り替え時間を除き63分)となる。

氷板厚は、対象地点での最大積雪深を5mと想定しこれを氷板厚として1/70に模型換算した7cm、解析結果から運転時の氷板厚が積雪深の4割程度であることから、氷板厚を2mとし模型換算した3cmの2パターンとした。

積雪量の多い上池では結氷板の断熱効果により氷板形態が硬い氷層ではなく柔らかい雪泥状態となると考えられる<sup>3)</sup>ことから、実験材料は粒径1.5cm程度の氷を用い、現地における雪泥状態を再現するため、材料同士が凝結しないよう材料を浮かべた直後に実験を行った。

上池模型の法面は、実際の上池法面で氷板挙動が起きやすい場合を想定し、滑りやすいアクリル板を使用した。

### (2) 実験結果

二次元水理模型実験の実験ケースおよび結果を表-3に示す。表中の水位および氷板厚は現地換算値である。また、実験の代表ケースとして、ケース3-3の観測結果を写真-1に示す。なお、写真中の破線は氷の分布を示す。

水位変動に伴う模型内結氷板の発達過程を以下に示す。

- ①水位を低下すると水面の氷が徐々に模型法面上に置かれ、最初は法面上の氷の滑り荷重、水面上の氷の浮力など氷全体に作用する力が釣り合った。
- ②さらに水位低下が進むと法面上の氷の滑り荷重が大きくなり、氷全体に作用する力のバランスが崩れ、法面に置かれた氷が瞬時にスライディングした。
- ③水面下に沈んだ氷は取水口に到達する前に水中で分散し、その後浮上して水面に浮かんでいた氷と結合し氷板厚を増大させた。

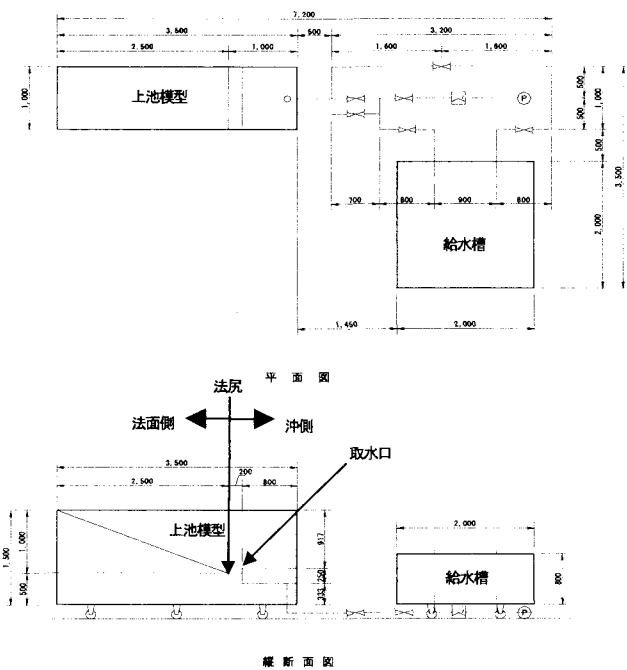


図-8 二次元水理模型実験装置 概要図  
(図中の長さの単位はmm)

表-3 実験ケースおよび実験結果

| ケース名   | 実験条件        |                     |                 | 実験結果   |       |                |               |
|--------|-------------|---------------------|-----------------|--------|-------|----------------|---------------|
|        | 水位※1        | 材料                  | 氷板厚※2           | 平均気温   | 平均水温  | スライディング水位※1    | 最大氷板厚(最低水位時)  |
| ケース1   | +45m ⇄ +0m  | 粒径<br>1.5cm程度<br>の氷 | 5m(m:7cm)       | -1.1°C | 1.9°C | +20m・+14m(低下時) | 12m(沖側5m位置)   |
| ケース2   |             |                     | 2m(m:3cm)       | 0.9°C  | 1.6°C | +13m(低下時)      | 7m(法面側30m位置)  |
| ケース3-1 | +45m ⇄ +32m |                     | 5×1/3m(m:7/3cm) | 7.5°C  | 2.0°C | +32m(低下時)      | 8m(法面側80m位置)  |
| ケース3-2 | +45m ⇄ +22m |                     | ケース3-1に5×1/3m追加 | 5.2°C  | 2.3°C | +22m(低下時)      | 10m(法面側50m位置) |
| ケース3-3 | +45m ⇄ +0m  |                     | ケース3-2に5×1/3m追加 | 4.8°C  | 2.0°C | +13m(低下時)      | 14m(沖側10m位置)  |

※1:水位はLWLを基準とする

※2:雪氷厚括弧内のmは模型上の寸法である

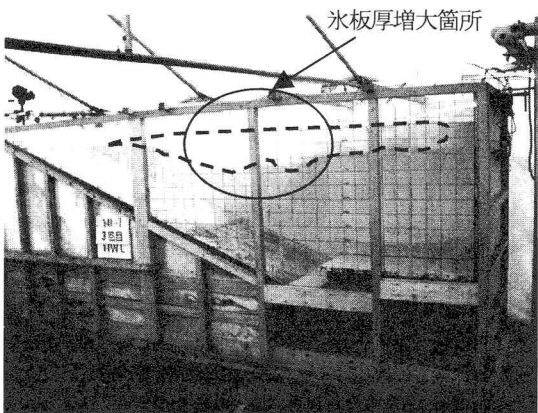
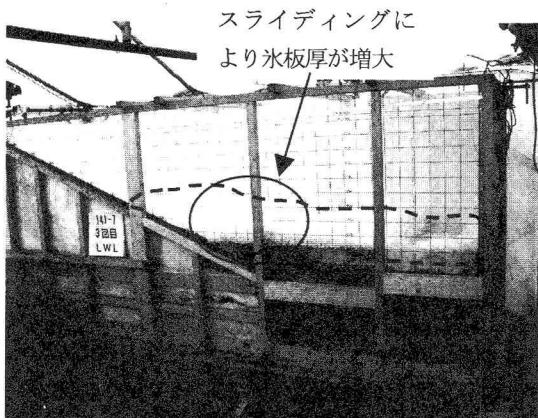
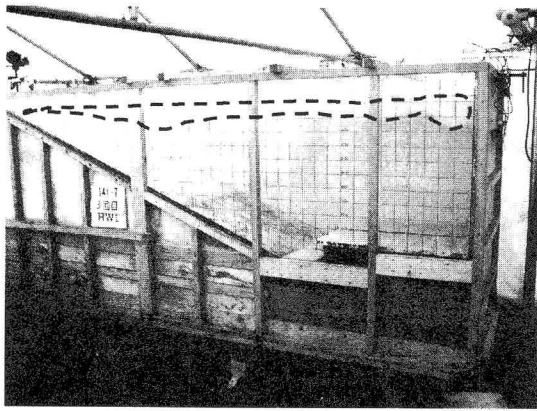


写真-1 ケース3-3の実験結果

(上から開始時・LWL時・終了時、破線は氷の分布を示す)

1層1往復の実験(ケース1および2)では、最大氷板厚が初期厚さの2~3倍程度となった。最大となった位置はケース1で法尻から沖側5m、ケース2で法尻から法面側30mであり、どちらも取水口よりも法面側であった。

また、実際の降雪による氷板発達過程を考慮した実験(ケース3-1~3:初期厚さ5mを3層に分けて3回の水位変動を実施)では、水位変動を繰り返した事によりスライディングが数回発生し、LWL時には氷板厚の分布が2箇所でも卓越したが、最大氷板厚については1層1往復の場合(ケース1)とほぼ同程度であった。最大となった位置はケース3-3で法尻から沖側10mと取水口よりも法面側であった。

以上の実験結果より、水位変動により上池法面付近では氷板厚が部分的に大きくなる結果が示されたが、大きくなった箇所が取水口より法面側であり、取水には影響がないものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究の成果をまとめると、以下のとおりとなる。

- ・氷板厚解析の結果から上池の氷板厚は、非運転時で積雪深の8割程度、運転時で積雪深の4割程度となる。また今回使用した氷板厚解析モデルは、対象とする貯水池の気象データや運用方法を入力することで、氷板厚の経時変化を定量的に予測することができる。
- ・雪泥状態を再現した二次元水理模型実験では、水位変動により上池法面付近では氷板厚が部分的に大きくなる結果が示されたが、取水口より法面側であるため、取水には影響がないものと考えられる。
- ・以上より、上池が冬期間常に運転している場合の最大氷板厚は陸上積雪深より大幅に小さくなるが、水位変動により上池法面付近では氷板厚が部分的に大きくなると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 峯田稔・山崎誠・平山健一・杉田誠:小規模寒地河川における流氷雪制御方法に関する研究, 水工学論文集第37巻, pp. 135-140, 1993.
- 2) 山崎誠・小山俊・平山健一・杉田誠:小規模河川における結氷面下の流速分布, 水工学論文集第39巻, pp. 845-848, 1995.
- 3) 笠井秀男・神藤謙一・青山信幸:冬季貯水池の法面における雪氷の挙動について, 第19回寒地技術シンポジウム, pp. 796-803, 2003.
- 4) 竹内教浩:水域の結氷過程に関する研究, 岩手大学修士論文, 1987.
- 5) 平山健一・竹内教浩・坂本典正・笹本誠:小川原湖における最大氷厚の推定, 第2回寒地技術シンポジウム, pp. 138-141, 1986.
- 6) 小野延雄他:雪氷水文現象, 基礎雪氷学講座VI, 古今書院, 1994.
- 7) 笠井秀男・神藤謙一・横辻幸:水力発電所の雪氷対策に関する研究, 北海道電力(株)総合研究所研究年報第35巻, pp. 100-107, 2004.
- 8) 丸善株式会社:理科年表机上版, 1999.

(2004.9.30 受付)