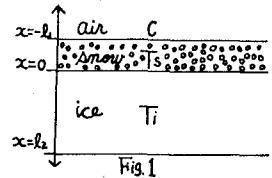


はじめに 冬期間に結氷するダム貯水池等において、気温上昇に伴う氷の膨張は構造物に水平力を生じさせる。この水平力である氷圧は氷上積雪による断熱によって著しく減少する。本研究は氷上積雪の断熱効果による氷層内温度分布並びに氷圧の減少について調べたものである。

1 氷温の計算法

氷上積雪による断熱効果を受ける氷層内の温度分布は次の一次元熱伝導方程式を境界条件並びに初期条件を用いて解く。(Fig.1参照)



$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = h_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (-l < x < 0, t > 0) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = h_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} \quad (0 < x < l_2, t > 0) \quad (2)$$

境界条件

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = k_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \quad (x=0, t > 0) \quad (3)$$

$$T_s = T_i \quad (x=0, t > 0) \quad (4)$$

初期条件

$$T_s = 0 \quad (t=0) \quad (5)$$

$$T_i = 0 \quad (t=0) \quad (6)$$

T_s : 雪温 (°C) h_s : 雪の熱拡散率 (m^2/hr) k_s : 雪の熱伝導率 ($Kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$) t : 時間 (hr)

T_i : 氷温 (°C) h_i : 氷の熱拡散率 (m^2/hr) k_i : 氷の熱伝導率 ($Kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$) x : 距離 (m)

ラプラス変換を用いて、熱伝導方程式(1),(2)を解くと次のようになる。

$$T_s = \frac{C(k_s l_2 - k_i x)}{k_s l_2 + k_i l_1} - 2C \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin k l_2 \beta_n \sin \beta_n (l_1 + x)}{\beta_n (l_1 \sin k l_2 \beta_n + \sigma k l_2 \sin^2 l_1 \beta_n)} e^{-k_s \beta_n^2 t} \quad (7) \quad k = \sqrt{\frac{h_s}{h_i}}$$

$$T_i = \frac{C k_s (l_2 - x)}{k_s l_2 + k_i l_1} - 2C \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin l_1 \beta_n \sin k l_2 \beta_n \sin k (l_2 - x) \beta_n}{\beta_n (l_1 \sin k l_2 \beta_n + \sigma k l_2 \sin^2 l_1 \beta_n)} e^{-k_s \beta_n^2 t} \quad (8) \quad \sigma = \frac{k_i}{k_s} k$$

ここで、 β_n は $\cot \beta l_1 + \sigma \cot k \beta l_2 = 0$ の n 番目の根である。

大気温度変化に伴う場合は以下のようなになる。 $F(t)$: 気温の時間関数

$$T(x, t) = F(0) T_i(x, t) + \int_0^t T_i(x, t-\tau) F'(\tau) d\tau \quad (9)$$

2 氷温の計算例

気温の時間関数が $F(t) = 10 \cos(2\pi t/24) - 15.0$ の場合について調べた。氷上積雪の雪質並びに氷質はTable 1, Table 2の数値と仮定した。氷上積雪の有無による氷層内温度分布の差異をFig.2に示す。これによれば、積雪10cmがあるために著しく氷温が小さい値となっている。

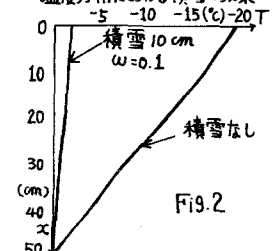
Fig.3に氷温-時間曲線を示す。これによると、氷層が大きいほど気温の増減の周期と時間的ズレが大きいことがわかる。また時間が経つにつれて一定の周期的変化となる傾向がみられる。これは氷上積雪が大なるほど著しい。

本研究で仮定した氷上積雪の大きさは5cm, 10cm, 20cmである。

Table 1 雪質			
雪質	$\omega = 0.10$ (g/cm^3)	$\omega = 0.20$	$\omega = 0.30$
k_s ($Kcal/cm \cdot hr$)	0.0559	0.1050	0.1765
h_s (m^2/hr)	0.001117	0.001048	0.001174

Table 2 氷質	
k_i	2.0647 ($Kcal/cm \cdot hr$)
h_i	0.0042 (m^2/hr)

温度分布における積雪の効果



3 氷圧の計算例

氷圧の計算は Monfore の研究結果による表を用いた。この方法は氷圧が初期温度と温度上昇率との2つのパラメータによって決定されると仮定して求めるものである。氷圧算定のために用いた値は Table 3 に示す。このうち Monfore の表に適合する密度が 0.3 の場合について求めると、氷上積雪 5cm で氷の表層付近については約 3.87 kg/cm²、10cm では 0.91 kg/cm²、20cm ではほとんど氷圧がないことがわかる。

氷上積雪がある場合の氷圧は氷上積雪がない場合の氷圧に補正係数 α を乗じることにより求めることを、Korzhavin が研究提案している。補正係数 α は、次のようである。

$$\alpha = \frac{d_i}{d_i + 9.1 d_s} \quad (10)$$

d_s : 積雪深
 d_i : 氷厚

この経験式と本研究で計算した温度分布に、Monfore の表を用いて算出した α の値を Fig. 5 に示す。本研究の値は Korzhavin の経験式から求めた α よりもかなり小さい値となっている。これは本研究に用いた Monfore の実験とこの経験式を求めるために行われた実験の条件の相違によるものと考えられる。

4 考察

以上、氷温並びに氷圧に及ぼす氷上積雪の断熱効果について調べてみたわけであるが、積雪を 5cm, 10cm, 20cm と変化させてみたが、積雪 5cm という一見小さい値でも予想以上の断熱効果がみられることがわかる。故に氷圧が問題となるのは氷面上に雪が降る前の氷温が最低値から急激に増温する場合である。

5 今後の課題

1. 氷温の変化の経過時間をもっと長く取り、調べてみたい。
2. Monfore の図表によらないで氷圧を力学的方面から計算してみたい。
3. これから行なう氷層内温度分布の実測並びに氷圧測定と計算値との比較検討をしてみたい。
4. より精度の高い氷温、氷圧の測定技術の改善

参考文献

1. 平山, 佐藤
 2. H.C. Carslaw and J.C. Jaeger
 3. Bernard Michel
 4. Frank Kreich
 5. Monfore
 6. Korzhavin
- 温度変化に伴う氷圧について
Conduction of Heat in Solids
Ice Pressure on Engineering Structures
Heat Transfer
Ice Pressure against Dam
Action of Ice on Engineering Structures

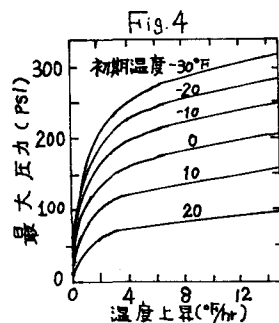
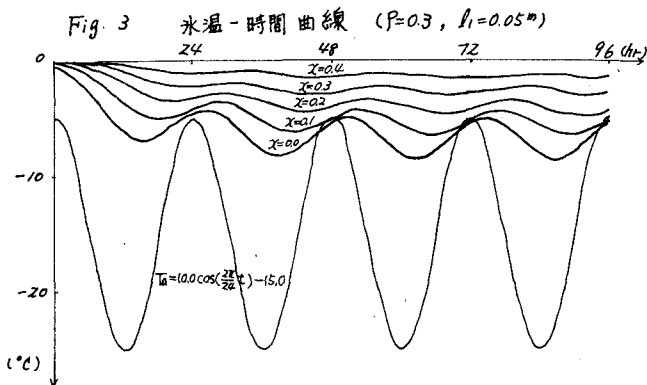


Table 3 氷圧算定のための数値

密度 (g/cm ³)	雪厚 (m)	初期温度 (°C)	温度勾配 (°C/h)
$\omega=0.10$	0.05	-3.71	0.0983
	0.10	-2.02	0.0492
	0.20	-1.01	0.0175
$\omega=0.20$	0.05	-6.07	0.1825
	0.10	-3.48	0.0867
	0.20	-1.79	0.1708
$\omega=0.30$	0.05	-8.63	0.2958
	0.10	-5.26	0.1442
	0.20	-2.88	0.0692

