

## 灌漑用パイプラインの水温（その2）

広瀬 慎一・瀧本 裕士

（短期大学部農業技術学科農業土木専攻）

### 1. 調査についての考え方

富山市西部に位置する古洞ダムは、有効貯水容量3,320千 $\text{m}^3$ の灌漑専用ダムである。受益地は呉羽・射水丘陵に展開する、富山市、婦中町、小杉町の畑及び樹園地469haと、その裾野に広がる水田305haである。古洞ダムから圃場までの配水システムは、まず幹線パイプラインにより受益地近傍に設けられたファームポンドへ送水される。受益農家は各圃場に設けられた給水栓の操作により、ファームポンドから末端パイプラインを通じて取水することができる。ダムと各ファームポンドは総延長26.9kmのパイプラインで結ばれているが、これらの広い地域に展開する諸施設の管理・運用は、中央管理所1、テレメーター・テレコントロール子局8、テレメーター・テレコントロール孫局14からなる水管理システムにより運用されている。

ダムの集水域には、直接流域にも、間接流域にも高山地域がない。したがって富山県の他の河川流域で見られるように、農作物に対して灌漑水温が低すぎると

というような問題は今のところ生じていない。しかしながら、農作物にとって灌漑水温は収量に影響を及ぼす微妙な問題ではある。

また、このパイプラインシステムは、水資源の面から、水エネルギーの面から、地域にとっては貴重な存在であり、今後水需要の逼迫が予想される中において、灌漑用途のみならず地域発展のための様々な用途が考えられ、それらの研究も大いに進められるべきと考える。いずれにしてもパイプラインの中の水温の動向について、その時期的変化、流下距離による変化などを明らかにしておくことは、今後の利用にとって有意義なことと思われる。

### 2. 灌漑水温の観測方法

水温の測定はサーミスタ（JIS規格 $0^{\circ}\text{C}6\text{k}\Omega$ ）で行った。入力温度の範囲は $-50.0^{\circ}\text{C}$ から $+120.0^{\circ}\text{C}$ 、分解能は $0.1^{\circ}\text{C}$ のものである。示度の検定は（株）安藤計器製工所の棒状標準度計で行い、いずれも $0.1^{\circ}\text{C}$ の範囲内におさまった。

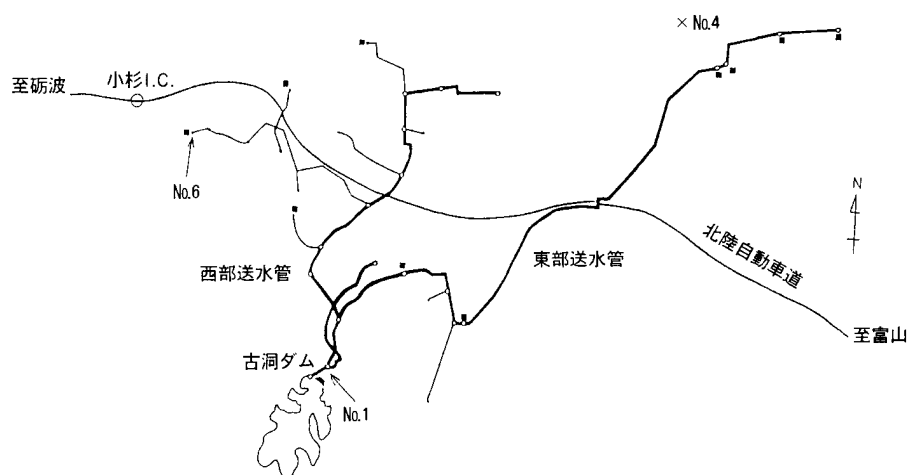


図1 観測場所の略図

表 1 観測機器の仕様

観測場所	記号	観測対象	記号	FILE NAME	TYPE	NO	備考
ダム減勢工	No.1	流入水温	$\theta_i$	1ONDO	U2	2002	
支線2号末端	No.6	流出水温	$\theta_o$	6ONDO	U	24043	
住吉梨園	No.4	地温	$\theta_s$	4ONDO	U2	50032	地表下 1.2m

データの記録はKONASYSTEM社製のKADEC-Uで行った。データ記憶容量は、30,720データであり、測定インターバルを60分としたので、1,280日分のデータが保存されるが、安全上頻りにデータを取り出すことにしている。データの取り出しはRS232Cシリアルインターフェースと携帯型パソコンによる。KADEC-Uの外形は58×80×175mmとコンパクトであり、防水型なので現場のどこへでもそのまま放置できるが、今回はプラスチックケース（タッパーウェア）に入れている。

流量については、パイプラインの途中にある超音波流量計および羽根車流量計データを、土地改良区のコントロールセンターで処理したものをを用いた。

### 3. 観測結果

西部送水管（延長1,260m）の流入水温  $\theta_i$  と流出水温  $\theta_o$  を前節2の方法で観測した。流入水温  $\theta_i$  は、古洞ダムから取水直後の減勢工No.1で計った。流出水温  $\theta_o$  は西部水管を1,260m流下した支線2号末端No.6で計った。送水管の埋設深1.2m深さの地温  $\theta_s$  を、東部送水管近傍の梨園No.6で計った。それぞれの冬期の12月～3月の観測値を、表3に半旬平均値として整理した。冬期においては、流入水温  $\theta_i$  が暖かい地温の影響を受けて最低0.8℃、最高3.5℃上昇( $\Delta\theta$ )して流出水温  $\theta_o$  となっている。

### 4. 埋設パイプの熱収支の理論

埋設パイプの中の水が流下する間に、地温の影響を受けて水温が変化する現象については、すでに梅田安治らが「配水管路における水温問題」（農業土木学会誌第48巻第12号pp.33～38、1980.12）においてとりあげている。この論文を参考にしながら、西部送水管の熱収支について、以下に検討する。

管路中心から  $R_3$  の距離における地温  $\theta_s$  °C が一定であり、管内径を  $2R_1$  m、管外径を  $2R_2$  m、とする。ま

表 2 西部送水管の管径と延長

呼び径	内径 $R_1$	外径 $R_2$	延長
800 mm	800 mm	832 mm	740 m
600	600	624	210
400	400	416	60
300	286	316.2	80
250	240	265.4	120
200	194	214.6	50
平均、合計	638	666	1260 m

- No.1（減勢工）からNo.6（支線2号末端）まで。
- SAKURAI製キルビメータと1/10000の地図を使用。
- 距離は5回測定の平均である。

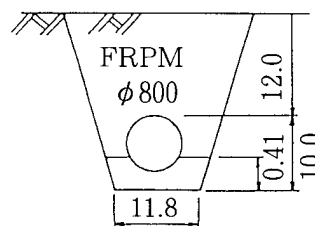


図 2 送水管の標準断面図

た、管の熱伝導率を  $\lambda_p$  kcal/(m・hr・℃)、土の熱伝導率を  $\lambda_s$  kcal/(m・hr・℃)、管内内壁近傍の乱流域の熱伝導率を  $\alpha$  kcal/(m・hr・℃)、管内の水温を  $\theta$  °C、管内壁表面温度を  $\theta_1$  °C、管外壁表面温度を  $\theta_2$  °C とする。

管内の水から、半径方向に管周囲の一定地温の土に熱が伝わり、単位時間に管の単位長さ当たりを通過する熱量は、(1)水→管内壁 ( $Q_1$ )、(2)管内壁→管外壁 ( $Q_2$ )、(3)管外壁→一定温度域 ( $Q_3$ ) とすると、 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  は次式で表される。

$$Q_1 = 2\pi \times \alpha \times R_1 (\theta - \theta_1)$$

$$Q_2 = -2\pi \times \lambda_p \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta}{\int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{R}} = 2\pi \frac{\lambda_p}{\ln(R_2/R_1)} (\theta_1 - \theta_2)$$

$$Q_3 = -2\pi \times \lambda_s \frac{\int_{\theta_2}^{\theta_s} d\theta}{\int_{R_2}^{R_3} \frac{dR}{R}} = 2\pi \frac{\lambda_s}{\ln(R_3/R_2)} (\theta_2 - \theta_s)$$

$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$  とし、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  を消去すると、

$$Q = \frac{2\pi (\theta - \theta_s)}{\frac{1}{\alpha R_1} + \frac{1}{\lambda_p} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{R_3}{R_2}}$$

となる。ここで、

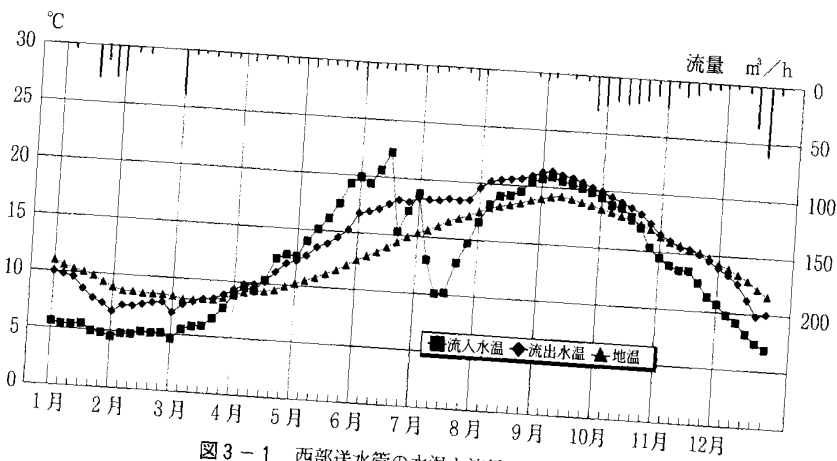


図3-1 西部送水管の水温と流量（1993年）

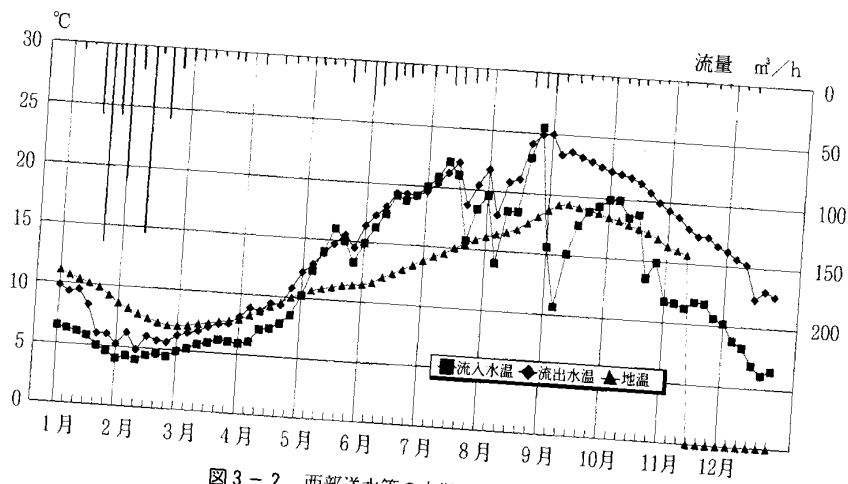


図3-2 西部送水管の水温と流量（1994年）

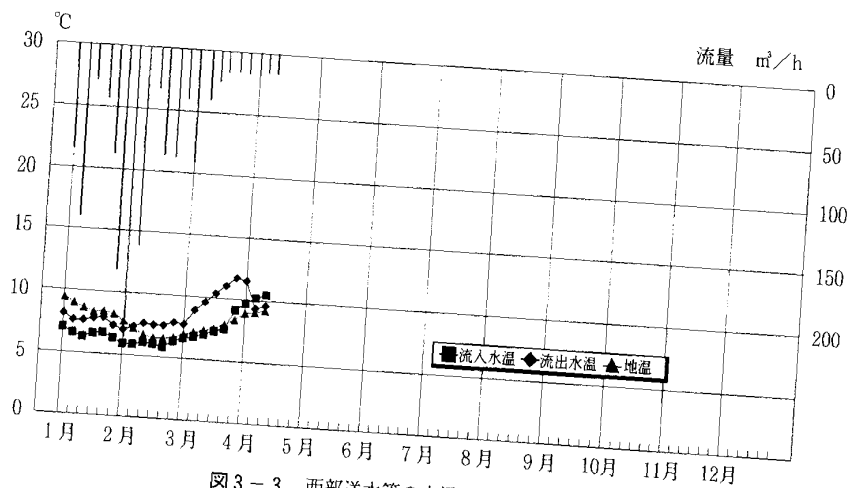


図3-3 西部送水管の水温と流量（1996年）

表 3 西部送水管の熱収支 (No1-No6間)

年/月/半旬	流入水温	地 温	流 量	流 速	観 測 値		計 算 値	
					流出水温	水温上昇	流出水温	水温上昇
	$\theta_i$	$\theta_s$	q	v	$\theta_o$	$\Delta\theta$	$\theta_o$	$\Delta\theta$
	℃	℃	m <sup>3</sup> /hr	m/S	℃	℃	℃	℃
93/3/第1	4.6	8.4	11.6	0.0101	6.9	2.3	6.7	2.1
第2	5.5	8.2	0.8	0.0007	7.7	2.2	8.2	2.7
第3	5.8	8.2	0.0	0.0000	8.0	2.2	5.8	*
第4	5.9	8.3	25.0	0.0217	8.3	2.4	6.7	0.8
第5	6.7	8.3	64.4	0.0560	8.4	1.7	6.9	0.2
第6	7.6	8.5	70.4	0.0612	8.8	1.2	7.7	0.1
93/12/第1	10.7	14.3	0.1	0.0001	13.9	3.2	14.3	3.6
第2	9.8	13.9	0.8	0.0007	13.3	3.5	13.9	4.1
第3	9.2	13.4	4.8	0.0042	12.6	3.4	12.8	3.6
第4	8.2	12.9	29.3	0.0255	11.2	3.0	9.5	1.3
第5	7.4	12.2	64.3	0.0559	9.8	2.4	8.1	0.7
第6	6.9	11.6	6.4	0.0056	10	3.1	10.5	3.6
94/1/第1	6.5	11.1	0.9	0.0008	9.8	3.3	11.1	4.6
第2	6.3	10.7	4.6	0.0040	9.3	3.0	10.1	3.8
第3	6.1	10.4	0.3	0.0003	9.5	3.4	10.4	4.3
第4	5.8	10.1	61.6	0.0535	8.3	2.5	6.4	0.6
第5	5.0	9.8	173.1	0.1504	6.0	1.0	5.3	0.3
第6	4.6	9.3	115.3	0.1002	6.0	1.4	5.0	0.4
94/2/第1	4.0	8.6	125.3	0.1089	5.2	1.2	4.3	0.3
第2	4.4	8.2	27.6	0.0240	6.2	1.8	5.5	1.1
第3	4.0	7.8	156.2	0.1357	4.8	0.8	4.2	0.2
第4	4.4	7.5	4.5	0.0039	6	1.6	7.1	2.7
第5	4.6	7.2	58.8	0.0511	5.7	1.1	5.0	0.4
第6	4.4	7.0	22.4	0.0195	5.6	1.2	5.3	0.9
94/3/第1	4.9	7.0	6.6	0.0057	6.2	1.3	6.5	1.6
第2	5.2	7.1	10.8	0.0094	6.5	1.3	6.3	1.1
第3	5.6	7.3	7.0	0.0061	6.7	1.1	6.9	1.3
第4	5.8	7.4	2.5	0.0022	7.1	1.3	7.4	1.6
第5	6.1	7.6	4.8	0.0042	7.4	1.3	7.4	1.3
第6	6.0	7.7	7.5	0.0065	7.5	1.5	7.2	1.2
96/1/第1	7.0	9.4	80.7	0.0701	8.1	1.1	7.3	0.3
第2	6.6	9.0	141.3	0.1227	7.6	1.0	6.8	0.2
第3	6.3	8.6	36.8	0.0319	7.6	1.3	6.8	0.5
第4	6.6	8.3	46.8	0.0406	7.8	1.2	6.9	0.3
第5	6.7	8.4	86.2	0.0748	7.9	1.2	6.9	0.2
第6	6.3	8.2	178.7	0.1551	7.3	1.0	6.4	0.1

管路延長x=1260m, 熱通過率k=0.840kcal/(m・hr・℃)

$$k = \frac{1}{\alpha R_1} + \frac{1}{\lambda_p} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{R_3}{R_2}$$

とすると、 $k$  は熱通過率である。

$2R_1$  : 管の内径 (m)

$2R_2$  : 管の外径 (m)

$R_3$  : 管内の水温により地温が変化しない領域までの距離 (=  $R_2 + 0.2$ (m))

$\lambda_p$  : 管材の熱伝導率：プラスチック系は  $0.1 \sim 0.3 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$  とする。

$\lambda_s$  : 土の熱伝導率：水田の近傍で  $0.7 \sim 1.0 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

ここでは中間値の  $0.85 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$  とする。

ここで管内壁近傍の乱流境界層における熱伝導率  $\alpha$  は、次式により示される。

$$\alpha = (1600 + 19.84 \cdot \text{tb}) Q^{0.8} / d^{1.8}$$

tb : 平均水温 ( $^\circ\text{C}$ )

Q : 流量 ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )

d : 管径 (m)

No.1-No.6間の管径別延長表（表2）から、延長加重平均により平均管径を求めると、

$$2R_1 = \frac{740 \times 0.8 + 210 \times 0.6 + 60 \times 0.4 + 80 \times 0.286 + 120 \times 0.24 + 50 \times 0.194}{1260} = 0.638 \text{ m}$$

$$2R_2 = \frac{740 \times 0.832 + 210 \times 0.624 + 60 \times 0.416 + 80 \times 0.3162 + 120 \times 0.2654 + 50 \times 0.2146}{1260} = 0.666 \text{ m}$$

したがって、 $d = 2R_1 = 0.638 \text{ m}$  とする。また、tbおよびQについては、1994年2月第1半旬のデータを採用して、 $\text{tb} = \theta_i = 4.0^\circ\text{C}$ 、 $Q = 125.3 \text{ m}^3/\text{hr} = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$  とする。以上の値により  $\alpha$  を求めると、

$$\alpha = (1600 + 19.84 \times 6.5) \times 0.035^{0.8} / 0.638^{1.8} = 266 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$$

よって熱通過率  $k$  を求める式において

$$\frac{1}{\alpha R_1} = \frac{1}{266 \times 0.319} \approx 0 \quad \text{とみなす。}$$

したがって、 $R_1 = 0.319 \text{ m}$ 、 $R_2 = 0.333 \text{ m}$ 、 $\lambda_p = 0.15 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $\lambda_s = 0.85 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$  を用いて熱通過率  $k$  を求めると、

$$k = \frac{1}{0.15} \ln \frac{0.333}{0.319} + \frac{1}{0.85} \ln \frac{0.333 + 0.2}{0.333} = 0.840$$

つぎに、流入水のもつ熱量  $Q_i$  は比熱を  $C$ 、流量を  $q$ 、水の単位体積重量  $p$ 、流入水温を  $\theta_i$  とすると、

$$Q_i = C \times p \times q \times \theta_i \times dt$$

流出水のもつ熱量  $Q_o$  は流出水温を  $\theta_o$  とすると、

$$Q_o = C \times p \times q \times \theta_o \times dt$$

水の管内通過による損失熱  $\Delta Q_1$  は、

$$\Delta Q_1 = Q_i - Q_o = C \times p \times q \times d\theta \times dt$$

水から土への移動熱量  $\Delta Q_2$  は、

$$\Delta Q_2 = \frac{2\pi(\theta - \theta_s)}{k} \times dx \times dt$$

水の管内通過による損失熱量  $\Delta Q_1$  と土が水より得る熱量  $-\Delta Q_2$  は等しく、

$$C \times p \times q \times d\theta = -\frac{2\pi}{k}(\theta - \theta_s) dx$$

$$\frac{1}{\theta - \theta_s} \frac{d\theta}{dx} = -\frac{2\pi}{c \times p \times q \times k}$$

$$\ln(\theta - \theta_s) = -\frac{2\pi}{c \times p \times q \times k} \times x + c$$

$x=0$  において  $\theta = \theta_i$  であるから、

$$c = \ln(\theta_i - \theta_s)$$

したがって、

$$\ln(\theta - \theta_s) = -\frac{2\pi}{c \times p \times q \times k} \times x + \ln(\theta_i - \theta_s)$$

$$\frac{\theta - \theta_s}{\theta_i - \theta_s} = \exp\left(-\frac{2\pi}{c \times p \times q \times k} \times x\right)$$

$$\theta = \theta_s + (\theta_i - \theta_s) \exp\left(-\frac{2\pi}{c \times p \times q \times k} \times x\right)$$

ここで、管内の水温低下を  $\Delta\theta$  とすると

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta = (\theta_i - \theta_s) \times$$

$$\left\{1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{c \times p \times q \times k} \times x\right)\right\}$$

となる。今 No.1-No.6間においては、

$\theta_i$  : 流入水温 ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_s$  : 地温 ( $^\circ\text{C}$ )

$C$  : 流入水の比熱 {  $1000 \text{ (kcal)/(ton} \cdot ^\circ\text{C})$  }

$p$  : 流入水の単位体積重量 {  $1 \text{ (ton/m}^3\text{)}$  }

$q$  : 流量 ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )

$X$  : 管路延長 {  $1260 \text{ (m)}$  }

$k$  : 前述の熱通過率 {  $0.840 \text{ (kcal)/(m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$  }

であるから水温低下  $\Delta\theta$  は、

$$\Delta\theta_{1-6} = (\theta_i - \theta_s) \times$$

$$\left\{1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{1000 \times 1 \times q \times 0.840} \times 1260\right)\right\}$$

$$= (\theta_i - \theta_s) \times \left(1 - \frac{1}{e^{9.42/q}}\right)$$

すなわち水温上昇  $\Delta\theta$  は次式で求まる。

$$\Delta\theta_{1-6} = (\theta_s - \theta_i) \times \left(1 - \frac{1}{e^{9.42/q}}\right)$$

## 5. 水温上昇シミュレーションの結果と考察

冬期(12月～3月)のNa1における流入水温 $\theta_1$ は、4.0℃から10.7℃の間に分布している。また、送水管の埋設深(土かぶり厚)1.2mに相当する地温 $\theta_s$ は、その間、7.0℃～14.3℃に分布している。送水管を流下する水は、この暖かい地温の影響を受ける。その結果、Na1から1,260m流下したNa6における $\theta_6$ は4.8℃～13.9℃の間に分布している。水温上昇 $\Delta\theta$ で見ると、最小0.8℃、最大3.5℃である。

埋設パイプラインに関する熱収支の理論により、西部送水管に関する諸条件から $\Delta\theta$ を推定する式を求めた。

西部送水管の水温上昇

$$\Delta\theta_{1-6} = (\theta_s - \theta_1) \times \left(1 - \frac{1}{e^{9.42/Q}}\right)$$

この式により水温上昇を計算し、実際の水温上昇の観測値と比較したものを表3と図4に示す。

このシミュレーション結果の $\Delta\theta$ は最小0.1℃、最大4.6℃となっている。このように、西部送水管については、このシミュレーション手法はおおむね正しいと考えられるが、観測期間が冬期3シーズンと短いので継続調査により精度をあげる必要がある。

本論の資料整理は干場勝(平成6年卒、富山県高岡農地林務事務所)、山下勝良(平成9年卒、高岡市土地改良協議会)が行なった。感謝申し上げる。

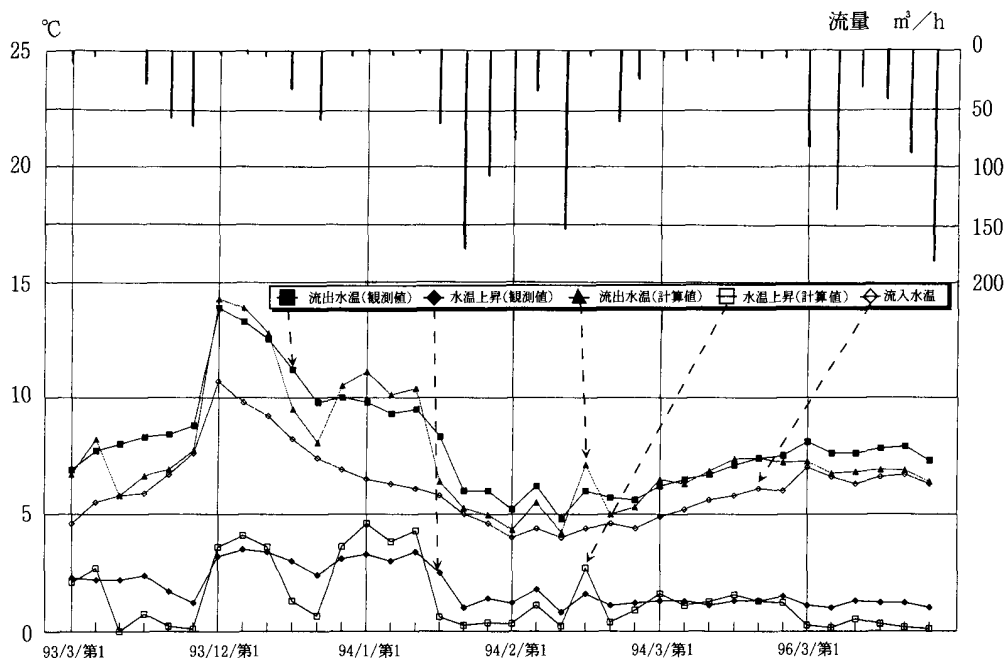


図4 流出水温のシミュレーション

## The Temperatures of Water Supplied by an Irrigation Pipeline (2)

Shin-ichi HIROSE and Hiroshi TAKIMOTO

Section of Agricultural Engineering, Department of Agricultural Technology,  
College of Technology

A temperature survey involving a pipeline system in Imizu Foothill Area has produced the following findings :

- (1) The water temperature ( $\theta_i$ ) at point No.1, where the pipeline begins, is affected by the temperature of the soil along the pipeline ( $\theta_s$ ) and rises to the water temperature ( $\theta_o$ ) at point No.6, 1,260m down at the end of the pipeline.
- (2) The differences ( $\Delta\theta$ ) between  $\theta_i$  and  $\theta_o$  range from 0.8°C to 3.5°C.
- (3) From various data involving the pipeline system we obtained an equation simulating the relationship between  $\theta_i$  and  $\theta_o$ .
- (4) The values of  $\Delta\theta$  generated by this equation range between 0.1°C and 4.6°C. Our equation is considered to be generally useful for estimating the temperatures of pipeline-supplied water based on the temperatures of the source water and of the soil along the pipeline, the flow volume, and other relevant factors.