

# 管路内下水の熱収支

北海道大学工学部

神山 桂一

## 1. まえがき

寒地で下水を処理する場合に、生物化学的な作用によっている現在では、冬季間の下水の温度が浄化率に大きく影響してくる。さいわいなことに、従来の調査によれば、外気温が零下 $20^{\circ}\text{C}$ 近くになるような時にも、都市下水は各家庭から排出された直後も、また下水処理場へ流入する時にも、凍結するほどの低温とはならず、札幌市における実例では、浄化作用を或程度期待しうることがわかった。しかし、下水の温度がより以上に下ることは好ましくないし、むしろ何等かの方法で温度を高くすることができるならば、浄化効率を高くできると思われる。下水処理場へ入ってから下水の温度維持については既に二三発表した<sup>1)</sup>こともあり、他にも種々な問題があるが、その問題は別の機会にゆずり、ここでは下水処理場に入るまでに、家庭などから排出された下水が主としてコンクリート管を通過している間に、下水の温度がどのように変化するかという点に問題を限定し、実測例をもとにして若干理論的な考察を加えてみたいと思う。

## 2. 管路内流下にとまらう下水温度変化量の測定

実際に下水が地中に埋設された管路のなかを流下してゆく間に、どのような温度変化を示すかを知らるために、昭和40年2月から翌3月にかけて、札幌市内の真駒内住宅団地の下水道を利用して測定を行って見た。測定を行った下水管の区間は同団地の一号井戸ポンプ場前の人孔から、下水処理場沈砂池入口にある着水井までの320mで、この区間には他の下水管の合流も、分岐も無い幹線の排水管である。管の内径は400mm、管厚は35mmの鉄筋コンクリート管で、この区間の平均勾配は7‰、土壌りは最小4m、最大6m、途中には3ヶ所の人孔があるが、測定期間中は完全に積雪でおおわれていた。下水および気温などの測定は銅-コンスタンタンの熱電対を用い、電子管式の記録計に連続記録せしめた。下水の流量は沈砂池の下流側で測定した値を利用した。また地中温度は人孔のすぐ近くでは測定できなかったため、約20mは離れた一号井戸ポンプ場の構内に鉄管を打

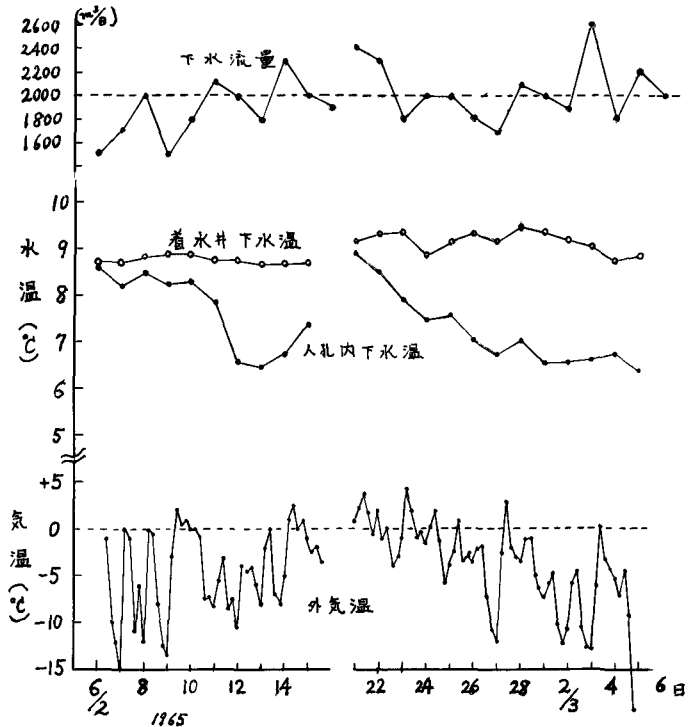


図-1 気温、下水温、流量の日変化

ち込み、この中に熱電対を挿入し、砂で封をして外気の流通を防いだ。

測定区間の土質は玉石まじりの砂質層で、地下水位以下も下水管が通っている所が多い。

### 3. 測定結果と考察

測定の途中で一部記録の欠けた期間が生じたので、2月6日から15日までと、2月21日から3月5日までの二期間にわけて、気温、人孔内下水温、着水井下水温および下水温を取まとして図-1に示した。外気温は4時、9時、14時、19時、24時の5英を、下水温は毎時0分の値の平均値を、また流量は記録計の積算値を示している。

この結果をみると、人孔内の下水は9℃から6.5℃までの間をかなり大きく変化しているが、管路を通過した後の着水井ではほとんど一定に居つてゐることがわかる。この期間の外気温は最低零下16℃にまで下つたが、日中の気温が低く、一日中零度以下であつたような期間（即ち、2月11～13日、2月25日以後）には人孔内の下水温度が低くなりがちであつた。下水の温度と1日の流量との間にはこれだけでも何の關係も認められない。ここでも特に注目すべきことは、上流の人孔内の下水温が低いにもかかわらず、下流の着水井で温度が高くなることで、これは管路内で下水があたためられたことによる。

当時の地中温度の測定結果は図-3のようであつた。各測定深度ともほとんど変化なく、地表も積雪の直下では零度以下となることはまれであつた。なお、地中温度測定地先の地表は人孔のあと地先の地表より約1.5m高い。

図-1の着水井下水温がほぼ9℃の一定値を示すことから考えて、測定した下水管路の区間で下水は地中の温度より低かつたために、管の外部から熱の供給をうけていたものと思われる。地中温度の測定が管のすぐ近傍で行うことができなかったために、実際に下水管の外側の地温がどのようなであつたかは想像の域をでないが、着水井下水温が上流の下水温にほとんど影響をうけていない英と、地下水位以下にあつた英とを考へ合せて、

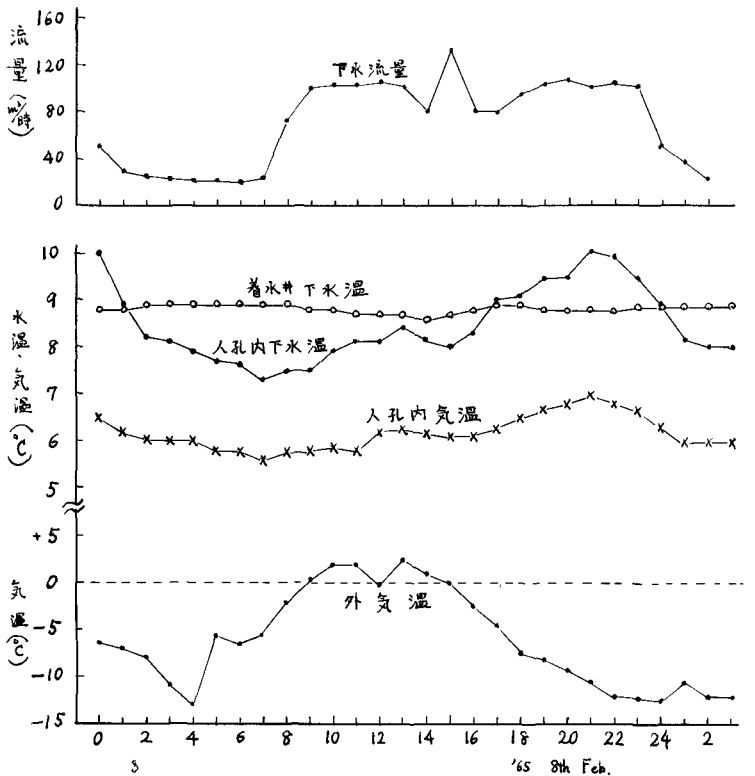


図-2 時間変化の一例（加熱の程度少ない場合）

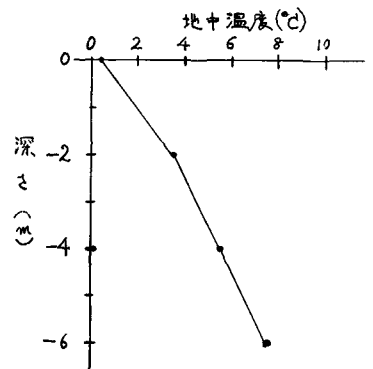


図-3 地中の温度

管の周辺は約  $9^{\circ}\text{C}$  に保たれていたと思われる。この間の関係をさらに詳細に調べるために、下水があまり外部から熱を供給されなかったと思われる2月8日の時間変化と、特に多くの熱を供給されたと思われる2月12日の二つの例をとり出して、図-2および図-4に示した。2月8日の場合には着水井の温度より高くなっていることもあるが、2月12日の場合は1日中、低い水温を示している。

図-2および図-4のカーブを見ると、下水流量が増加すると下水温（人孔内の）がやや高くなる傾向にある。

人孔内の気温は下水の温度とほぼ平行して変化しており、特に時間的ずれは認められない。図-2と図-4を比較すると、図-4の場合の方が人孔内気温がやや低い、下水温が低くなった程度にくらべると下り方は少く、ほぼ  $6^{\circ}\text{C}$  を前後している。

#### 4. 下水管を通しての熱の伝導

今回の測定では以上のような結果が得られたが、一般に地中に埋設された下水管路も下水が流れてゆく間に、下水が地中の熱を受取り、あるいは地中へ熱を伝達してゆく様子を若干理論的に考察してみる。

一般に下水は管内を流下する場合には、満流状態であることはまれで、下水の上部に空気の部分を有している。従って普通に用いられている内管を通しての熱伝導の公式はそのままでは利用できない。また下水管の特長として、管内壁の粗度は大きく、時には種々の汚物が付着していたり、管内流量が常に変動をくりかえすことなど、理論的に解析することは困難である。永久凍土地帯のような管周辺の温度が非常に低い場合については、M. M. アンリヤーシェフ<sup>2)</sup>が外部へ逃げる熱量を求める計算式を誘導しているが、参考文献を入手できなかったため途中の誘導過程が不明である。

前記の各種の測定結果をもとにして、コンクリート管を通しての下水と土との熱伝導はつぎのような条件の下にあると考えられる。

- (1) コンクリート管と土とは密着しており、両者の間には対流をともなわない固体間の熱伝導が行われている。
- (2) コンクリート管の内面と管内の空気との間の熱伝達は、管内の空気がほとんど静止の状態にあり、外部との流通も無視しうるので、自然対流をともなう熱伝達が行われている。

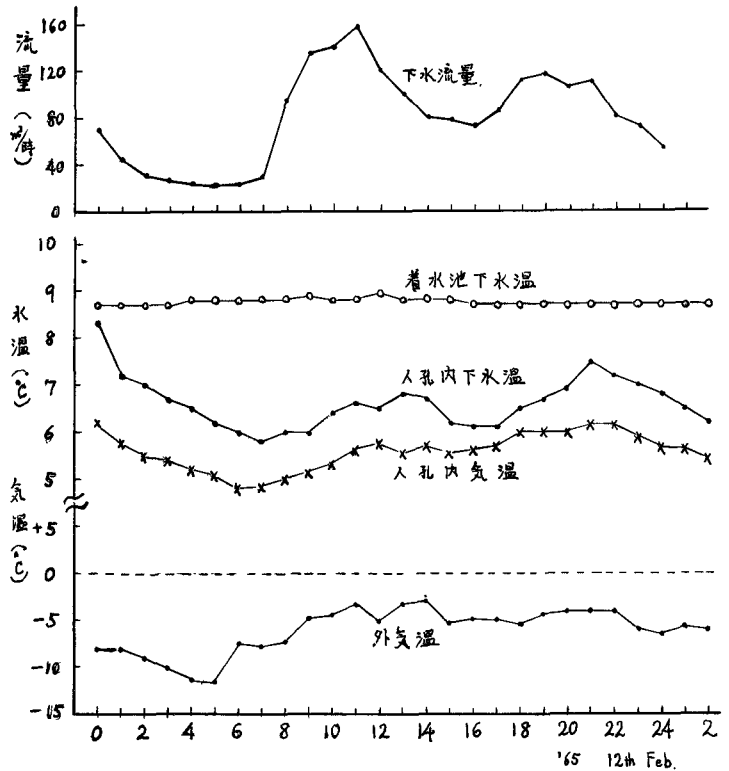


図-4 時間変化の一例 (加熱の程度多い場合)

- (3) コンクリート管内壁と下水との間には下水が強制対流をともなう熱伝達が行われている。  
 (4) 下水と管内空気との間にはよと同様に強制対流をともなう熱伝達が行われている。  
 (5) 下水の蒸発による熱損失および放射による熱損失

以上のうちで最後のものはほとんど無視しよう。なぜならば管内の空気は常に飽和に近い水蒸気を含み、下水の蒸発を極度におさえてゐるし、また放射による熱損失は、今考えている系が閉じたものであるから、このための熱移動も上の熱伝達量に含めてしまつてもさしつかへないと思われる。

今、下水から熱が土中へ流れるとして、図-5のようなモデルを考えてみる。下水が流れている部分のコンクリート管と、空気に入っている部分のコンクリート管とを切りはなしてみると、下水中の熱は左方へはコンクリートの管壁を通して土中へ伝るのに対し、右方へは空気の層とコンクリート管壁とを通して土中へ伝わることになる。この場合、コンクリートおよび土の熱伝導抵抗と比較して、空気+コンクリートおよび土の組合せの場合の熱伝導抵抗ははるかに大きいので、大部分の熱は下水→コンクリート管壁→土の経路をたどって伝達されるものと思われる。このようにして下水管の下方の部分から土中へ伝達される熱量を

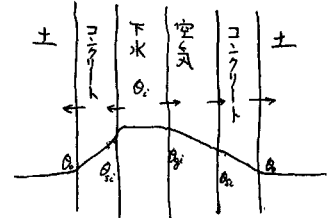


図-5

$$Q = U A \Delta t$$

とあらわせば、 $U$ はこの場合の総括伝熱係数となる。

図-2 および図-4 に示した2例について下水が外部から供給するべき熱量を計算してみよう。表のようになつた。1日分の合計で見ると2月12日の例では4,304,000 kcalの熱量を受取っているが、2月8日はわずかに308,000 kcalである。また、2月8日の場合は17時以後は熱を失つてゐる。この値をも

(下水温度) × (流量)  $\times 1000 \text{ kcal/deg}$

| 時間 | 2月8日             |        | 2月12日              |        |
|----|------------------|--------|--------------------|--------|
|    | 上流               | 下流     | 上流                 | 下流     |
| 1  | 258              | 255    | 331                | 400    |
| 2  | 208              | 222    | 224                | 278    |
| 3  | 188              | 204    | 188                | 244    |
| 4  | 171              | 196    | 169                | 229    |
| 5  | 162              | 187    | 161                | 229    |
| 6  | 152              | 178    | 156                | 229    |
| 7  | 166              | 204    | 180                | 273    |
| 8  | 561              | 667    | 576                | 845    |
| 9  | 750              | 880    | 822                | 1,220  |
| 10 | 892              | 995    | 909                | 1,250  |
| 11 | 1,022            | 1,088  | 1,049              | 1,400  |
| 12 | 1,271            | 1,348  | 787                | 1,077  |
| 13 | 987              | 1,009  | 680                | 880    |
| 14 | 672              | 705    | 543                | 713    |
| 15 | 1,071            | 1,165  | 490                | 695    |
| 16 | 696              | 721    | 458                | 652    |
| 17 | 720              | 712    | 531                | 756    |
| 18 | 874              | 854    | 735                | 883    |
| 19 | 999              | 915    | 784                | 1,018  |
| 20 | 1,037            | 952    | 746                | 940    |
| 21 | 928              | 801    | 826                | 957    |
| 22 | 960              | 845    | 591                | 713    |
| 23 | 874              | 819    | 560                | 696    |
| 24 | 440              | 445    | 476                | 609    |
| 合計 | 16,059           | 16,367 | 12,972             | 17,286 |
|    | $\Delta Q = 308$ |        | $\Delta Q = 4,304$ |        |

とにして、管内下水温と管外の地中温(おおよそ $9^{\circ}\text{C}$ )との値から総括伝熱係数を概算するとつぎのようになる。

$$U = Q / A \cdot \Delta t = \left( \frac{4,304,000}{24} \right) / 134 \times 2.2$$

$$= 610 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr.}^{\circ}\text{C}$$

この値を用いて上流側(すなわち人孔内下水温)から下流側の下水温を計算してみよう。非常に近い結果が得られ、逆に下水から外部へ熱が失われてゆく場合も同様に計算できた。上の計算で伝熱面積 $A$ としては各流量に対する水深から求まる潤辺長に管路延長を乗じた値を使用している。

## 5. おまけ

下水管からの熱伝達量を単に流水部分のコンクリート壁面からの伝熱量として計算してみたが、今回実測のものについては実用上差支えない程度の推定ができた。しかし、管の周辺の土質状態が異なったり、地下水の流動が激しい所ではもっと異なった値を示すであろう。コンクリート管の厚さが変ることによる影響は前記の値の他に若干の測定（例えばコンクリート管外側の温度の測定）をつけ加えれば解決できる。ただし、以上の考察では管が充分深い所に埋設されており、地表の温度変化が埋設深さの附近へ影響をおよぼさないと考えているので、非常に深い管については割に考えねばならない。理論的な考察についてはさらに測定例をせし、より厳密な伝熱量の計算式を求められようとしている。

一方、はじめに考えていたように、下水が管路内で熱を失って次第に低温になってゆくのではないかという推定が全く逆にあって、地中で加温されることになったのは大きな収穫で、今後の寒地下水道の建設にあたっては、このような現象をうまく利用するような設計が行われることを期待する。

おわりに、測定にあたって種々の便宜を与えて下さった北海道真駒内団地開発事務所の皆様には厚く感謝の意を表す。

## 参考文献

1. 神山桂一，土木学会北海道支部技術資料，第18号（昭37）
2. M. M. АНПРИЯКОВ，水道及び衛生技術誌（1957-12）；抄録 水道協会雑誌 284号（昭33）