

# 第5回八光熱の実験コンテスト 実験報告

## 分布型温度センサの試作

群馬大学大学院  
猪瀬世親

2011年12月14日

### 概要

Distributed temperature sensor (DTS) technology is used widely among many applications, such as temperature monitoring in plant engineering. The author has developed a novel DTS, capable of bringing a drastical cost-down on DTSs. With the low-costness, DTSs shall be used more universally. In this paper, the theory and some experiments are shown. The potential of DTS that can measure more physical values other than temperature is also discussed.

## 1 はじめに

分布型温度センサ (以下 DTS) とは, 線状のセンサ内部の温度情報を, センサ各部に沿って 1 次的に取得することができるセンサである. 現在では光ファイバを使用する方式の DTS のみが実用化されている. DTS は線状であるため, センサを対象物に敷設することにより広がりをもった空間の温度分布を調査することができる.

現在は, 火災報知やプラントの温度分布計測などに活用されている [1] が, 応用分野は特殊分野にとどまっているように思われる. 他の温度センサにない特徴を持った DTS であるが, 広く普及していない原因は, 高価であることによると考えられる. 2 次元の温度分布を取得する目的では, サーモグラフィを DTS の代わりに用いることができるが, 同様に高価である. これらを勘案すると, 現状では, 低コストで温度分布を測定することが難しいとみられる.

今回, 新規な DTS の原理を考案したので報告する. また, 考案した DTS について実験を行った. 本報告書の最後にて, 実用的な DTS のための検討を行った. また考案した DTS は, 温度以外の物理量の測定に使用できると考えられるので, 測定可能な量および想定される応用分野について述べる.

## 2 理論

図 1 に示すチューブを想定する. 図中にて, 茶色部分 (以下感温体) は電気を通すことができ, その電気抵抗率は位置  $x$  について  $\rho(x)$  で与えられるとする. 水色部分 (以下導電液) の電気抵抗率は  $\rho(x)$  に比べ十分小さいとし, 導電液が位置  $l$  から  $L$  にあるとき, チューブ両端の電気抵抗は次式で近似することができる.

$$R = \frac{1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \int_0^l \rho(x) dx \quad (1)$$



図 1: 考案した DTS

ここで,  $r_1, r_2$  はそれぞれチューブの外径, 内径を半径で示したものである. ここで導電液を速度  $v$  でチューブ内に注入するとき,

$$\rho(x) = \pi(r_1^2 - r_2^2) \frac{dR}{dt} \cdot \frac{1}{v} \Big|_{t=x/v} \quad (2)$$

となり, 各点  $x$  における感温体の電気抵抗率を取得することができる.

電気抵抗率が温度により変化する材料を感温体に用いることにより, センサに沿った温度分布を測定することができる.

### 3 実験

前項の理論を検証するために, 実験を行った.

#### 3.1 電気伝導率の温度依存性の確認

簡易な実験装置で測定するために, 今回の実験では, 寒天でゲル化させた食塩水を DTS の感温体として使用することにした. 文献 [2] によれば, 7.11352wt% の KCl 溶液の電気抵抗率は, 0~25 度で温度に対しおおむね線形に変化し, 温度係数は-1.6%/度である. 食塩でも同様の特性が得られることが望ましいので, 電気伝導率の温度依存性を実験により確認した.

使用した実験装置の模式図を図 2, 写真を図 3 に示す. 感温体は, 5wt% の NaCl, 3wt% の寒天 (形状を保持するため) で構成するゲルとした. 測定に先立ち, 溶液を試験管に注入し湯煎で寒天を溶解させた後室温に戻し, ゲル化させた. 電極及び温度センサはゲル化前に挿入した. 図 2 のヒータに通電し, 温度センサの指示値が 45 程度になったところで通電をやめ, 自然放冷により感温体の温度を変化させた. NaCl の電気分解を防ぐために電源には交流を使用した. 電源周波数は 300Hz である. 波形は正弦波である. この装置では, 電極間の電気抵抗はゲルの電気抵抗率に比例するため, 電気抵抗率の温度依存性を測定できる.

図 4 に, そのときの感温体の温度と電気抵抗の関係を示す.

図より, 電気抵抗率は-1.3%/度程度で変化することが確認できた. 文献 [2] とは異なる電解質を使用したがる, ゲルに電気抵抗率が温度に伴い線形に変化することが確認できた. また, 温度係数も概ね一致した.

次項で説明する DTS の測定実験では, DTS を 0 以下の低温とした. 文献 [3] では, 豚肉の導電率の温度依存性が議論されている. 豚肉も寒天ゲルと同様に, 電解質が電気抵抗率の温度依存性に参与するが, 常温から低温領域まで, 温度の低下と共に導電率が単調に減少する. すなわち, 温度が決まれば電気抵抗率が決まる. その逆も真であり, 電気抵抗率から温度を決めることができる. 寒天ゲルを用いた感温体でも電気抵抗率から温度を読み取れることが確認できた.

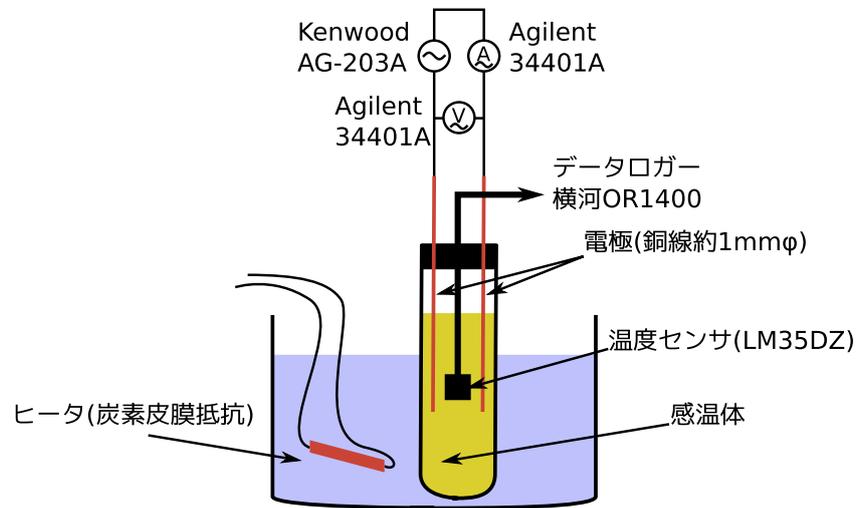


図 2: 実験装置の模式図

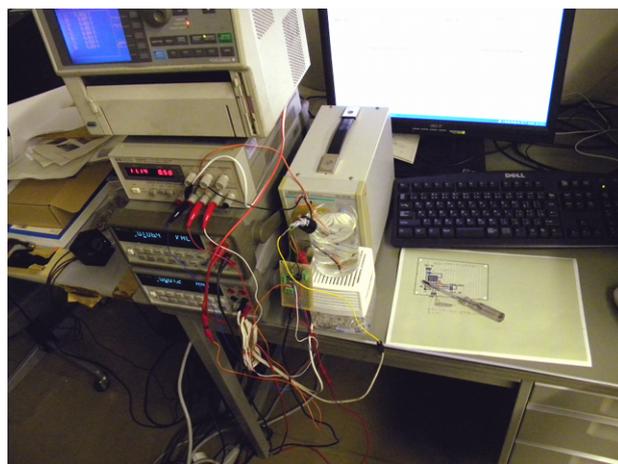


図 3: 実験装置の写真

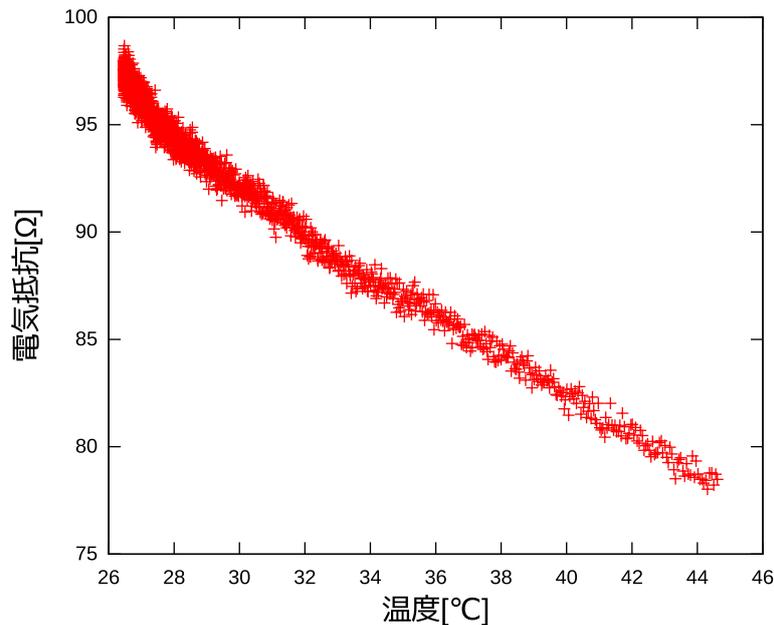


図 4: 感温体の電気抵抗の温度依存性

### 3.2 DTS の動作確認

前項で特性を確認した寒天ゲルを感温体として、DTS を作製し動作確認を行った。DTS と測定装置は図 5 に示す回路図の通りに結線した。図 6 に実験装置の全景を、図 7 に実験装置各部の関係を示す。

DTS は、前項と同一の配合の寒天液を作製し、溶融したままフィルタ用スポンジに含浸させることにより作製した。スポンジを用いたのは、寒天単体ではチューブの形状を作れないためである。作製した DTS の長さは 30cm 程度、直径は 10mm 程度である。寒天液を含浸させる前に裸線をねじってスポンジに密着させ、DTS の電極とした。DTS の一端には導電液を充填した注射器を取り付け、ポンプにより定速度で駆動した。

導電液を DTS に注入するためのポンプは、パソコン用スキャナのセンサヘッドを活用した。センサヘッドの移動にはステッピングモータが用いられており、移動速度を高精度に決定できるため、本実験に適している。導電液には飽和食塩水を使用した。飽和食塩水の電気伝導率は不明であるが、溶解度は 35.9wt% であり寒天ゲルの 5wt% に比べ十分大きいと考えられる。

図 5 において、電源電圧は 200mV 程度、電源周波数は 300Hz に設定した。波形は正弦波である。 $R_t$  は DTS である。 $R_S$  は電流検出抵抗であり、 $1k\Omega$  の炭素皮膜抵抗を使用した。データロガー(横河, OR1400) が直流入力のみに対応しているため、 $R_t, R_S$  に生じる交流電圧は AC-RMS 変換器(タートル工業, T-RMS01-1)により直流電圧に変換した上でデータロガーに入力した。また、モータコントローラ出力波形を測定開始信号として活用し、DTS に導電液が入り込む瞬間が測定データの始点となるようにした。

今回、DTS の温度センサとしての動作確認のために、DTS を 2 つの区間に分け、それぞれの区間で異なる温度を設定した。一方は室温(20 に設定)とし、他方はエアダスターの低温を利用し、表面に霜がつく程度に冷却した。図 8 に冷却した様子を示す。以上の装置を用い、DTS 両端の電気抵抗を測定した結果を図 9 に示す。縦軸は電気抵抗、横軸は注入開始後の経過時間である。図

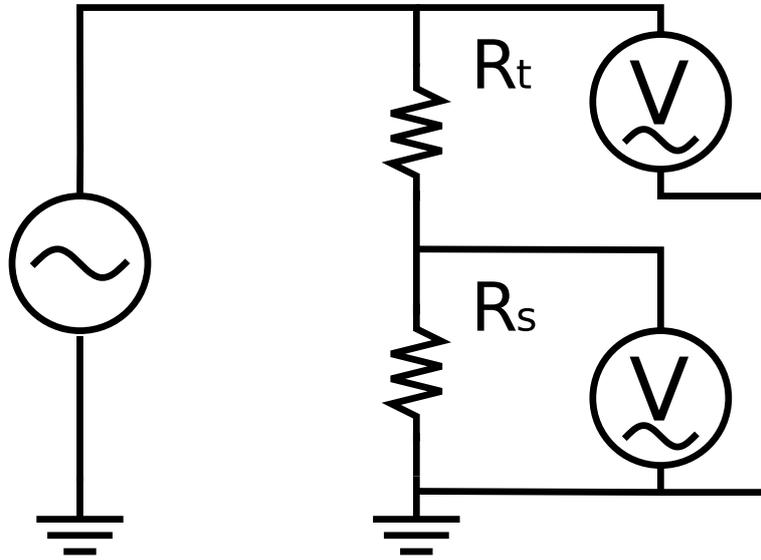


図 5: DTS の測定回路

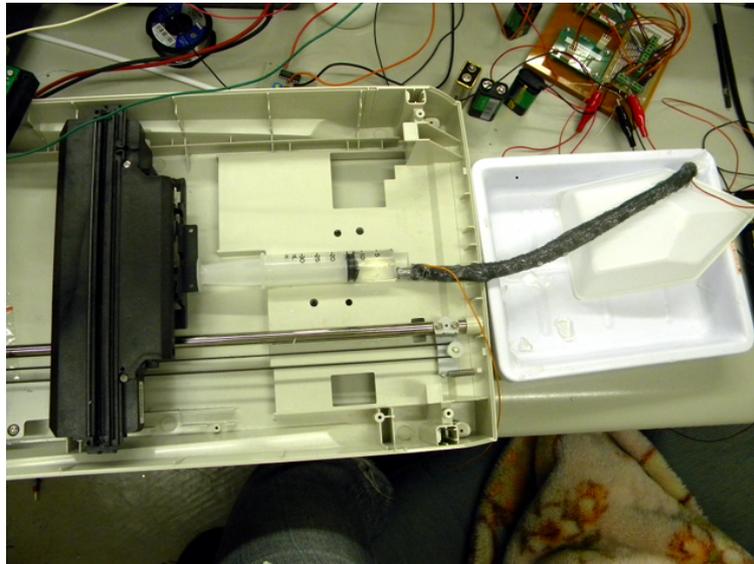


図 6: 実験装置全景

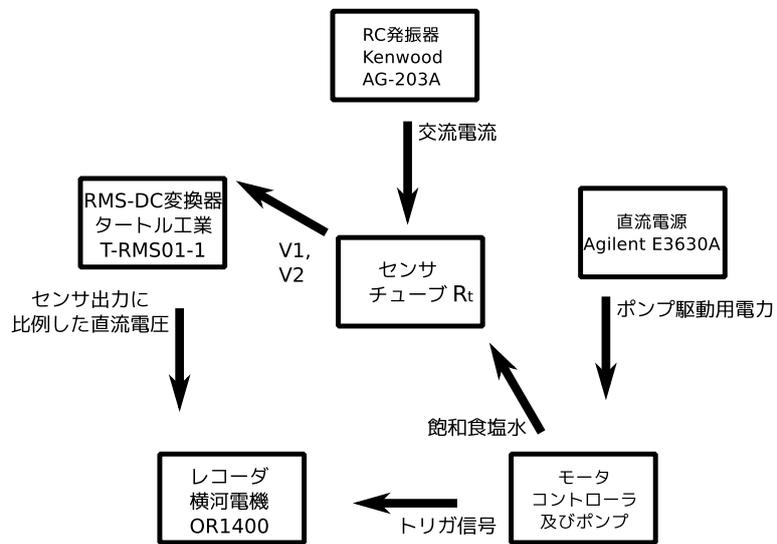


図 7: 実験装置関係図

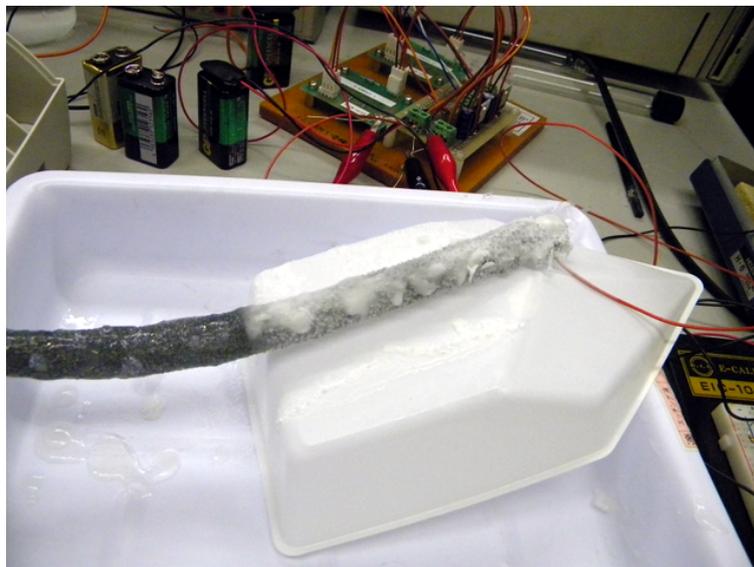


図 8: DTS を冷却した様子

中，経過時間 1.2 秒付近まで常温領域であり，2.0 秒付近までは低温領域である．それ以降は DTS が導電液で満たされ，開放端から導電液が溢れている状態である．

図 10 に，図 9 の抵抗値を移動平均（前後 500 点で平均）し，数値微分した結果を示す．式 2 より，

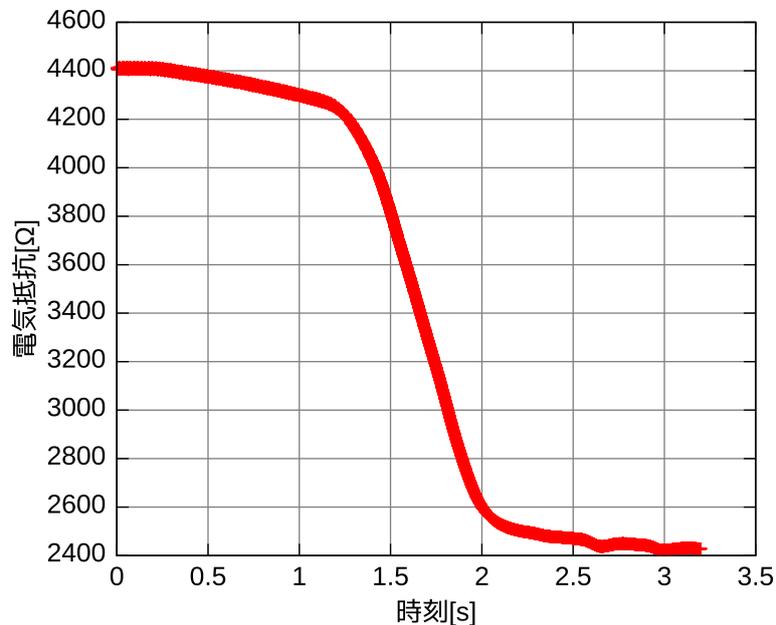


図 9: DTS 両端の電気抵抗

図 10 はセンサの温度分布を反映した情報を示す．常温領域と低温領域で値が 2 値に分かれており，エアダスターにより作り出した温度分布を DTS で測定できていることが確認できる．

常温領域と低温領域の境界で波形が緩やかに変化している様子がみられるが，これは作り出した温度分布が均一でないことによると考えられる．境界付近では両者で熱の交換が行われるため，明確に 2 つの温度を分けることができないことが原因の一つとして考えられる．また，エアダスターによる低温が，均一でないことも原因の一つと考えられる．

### 3.3 感温体の低温特性

前項で，温度分布に不均一が生じた原因を調査するため，感温体の低温特性を調査した．前項の実験において，エアダスターで感温体を冷却するときに，冷却しすぎた場合に DTS の抵抗値が極めて大きい値を示し，測定が出来なかった．そのため，抵抗値が測定に適する程度 ( $R_S$  と  $R_t$  が同程度) になるように冷却を行っていた．

DTS が極めて大きい抵抗値を示す原因として，感温体の凍結が考えられる．感温体の凍結温度を検証するため，実験を行った．温度センサの表面に感温体を付着させ，図 11 のようにエアダスターで出来る限り冷却を行ったのち，室温による加熱を行い感温体の温度を変化させた．この時の感温体の温度変化の様子により凍結温度を推定した．

図 12 に感温体の温度変化を示す．横軸は時間経過，縦軸は温度である．図 12 より， $-20$  付近に温度変化が平坦になる部分が見られる．

食塩水を冷却すると，流氷などに見られるように水が先に凍結をはじめ，水のみでできている結晶

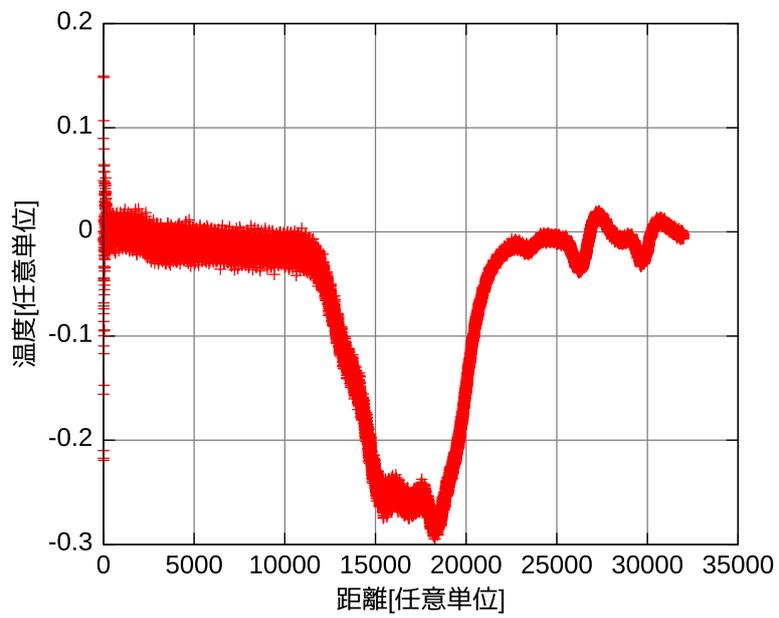


図 10: 図 9 から得られた温度分布

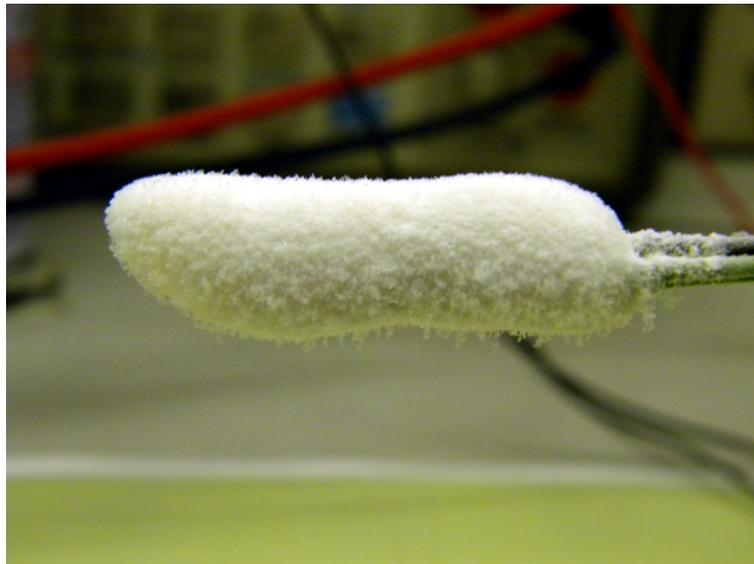


図 11: 温度センサ表面に感温体を附着させ、凍結させた様子

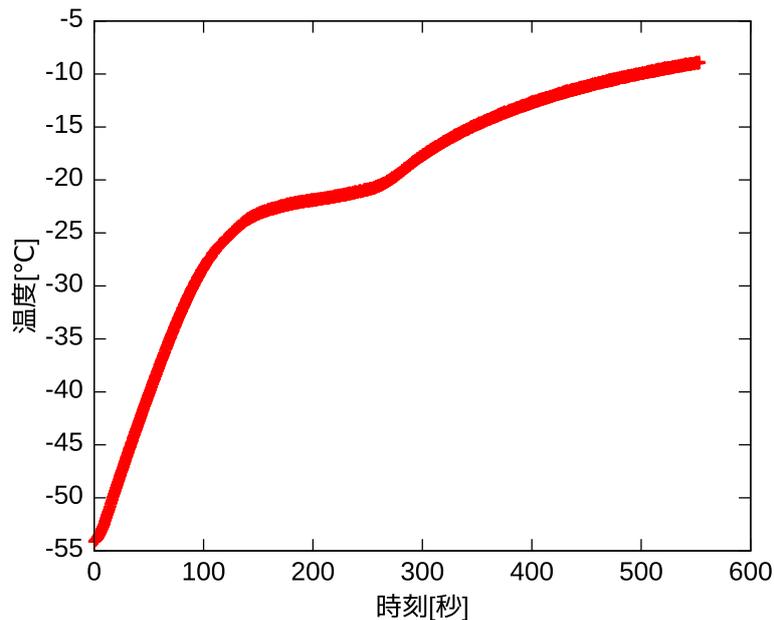


図 12: 時間経過に伴う感温体の温度変化

が生成される (つまり氷ができる)。これは氷の生成がこれ以上できなくなる点である共晶点まで続き、共晶点より冷却すると完全に固体となる。食塩水の共晶点は $-21.1$  である。共晶点より低い温度では相転移に伴う熱放出がないため、温度上昇は速くなる。これから、図 12 をみると、感温体においても同様に  $-20$  付近に共晶点が存在し、これ以下の温度では感温体は完全に固体状になると考えられる。共晶点以下では、食塩 (の水和物) と氷が別々に存在するため、電気が非常に流れにくい。

図 12 からエアダスターでは、 $-50$  程度まで冷却が可能であることが分かる。従い、冷却しすぎると容易に感温体が共晶点以下となる。DTS の抵抗値が極めて大きい値を示したのは、DTS が共晶点以下となったためと考えられる。一方、共晶点では相転移が起こるため、感温体は一定温度に保たれる。逆に共晶点以上では相転移による温度維持は不可能であり、DTS の温度分布を均一とすることは難しい。図 10 において波形が緩やかとなった原因として、温度分布が一定でなかったことが大きく寄与していると考えられる。

## 4 実用上の検討

### 4.1 使用材料について

今回は感温体に寒天ゲルを使い実験を行ったが、いわゆる生ものであるため、安定性に乏しいなどの欠点がある。実用的な DTS を構成するためには、例えば PTC ポリマが使用できると思われる。PTC ポリマは樹脂に導電性粉末を混入して成型したもので、温度により電気抵抗率が増加する。樹脂であるため管状に成型したり曲げることができ、DTS に適していると考えられる。導電液には飽和食塩水を用いたが、濃度の高い電解質溶液であるため安定性に問題があり、また直流での使用ができない。導電液には、イオン液体や液体金属を使用することが考えられる。これら

は電気分解しないか、しにくい特性を持つ．そのため今回と異なり直流で測定することが可能であり、より簡易な回路で測定可能になるなどの利点がある．

## 4.2 測定回路について

本実験では原理検証のため、DTS の抵抗値を直接測定し、得られた抵抗値を数値処理により微分し温度情報を得た．実用的な DTS では、本実験より距離精度がよく、また長いセンサが必要と考えられる．しかし、本実験のように抵抗値を測定した後微分処理する方法では、困難が生じる．例えば距離分解能<sup>1</sup>を 100、抵抗値分解能<sup>2</sup>を 100 とする．DTS の抵抗値は導電液を入れることにより変化する．導電液の出入りにより 0 ~ 100k $\Omega$  の変化をとする．DTS の最初の区間 (500 メートルの DTS なら、0 ~ 5 メートル) では数百  $\Omega$  程度の抵抗レンジで 1% の精度で測定できる測定器が必要であり、最後の区間 (500 メートルの DTS なら、495 ~ 500 メートル) では 100k $\Omega$  程度を同じく 1% で測定する測定器が必要である．1% の測定精度は達成可能であると考えられるが、区間により変化する測定レンジの全てに対応することは困難と考えられる．そこで、以下の回路を提案する．

必要とされる測定器のダイナミックレンジを節約するため、図 13 の回路が有効である．ここで  $R_M$

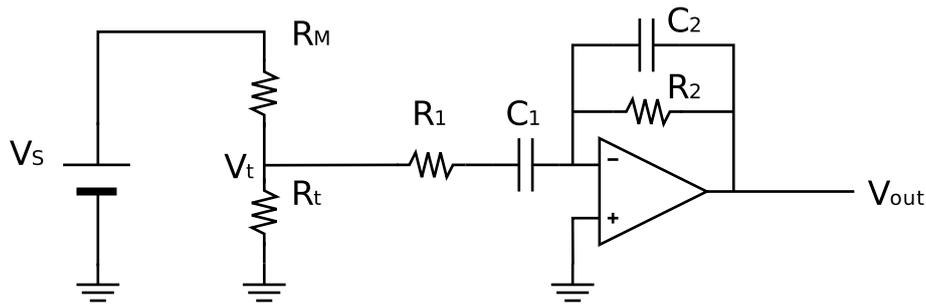


図 13: ダイナミックレンジを節約する回路

は固定抵抗で、 $R_t$  は DTS とする． $R_t$  両端の電圧を  $V_t$  としたとき、

$$\frac{\partial V_t}{\partial t} = \frac{\partial V_S}{\partial t} \frac{R_t}{R_t + R_M} + \frac{V_S R_M}{(R_t + R_M)^2} \frac{\partial R_t}{\partial t} \quad (3)$$

が成り立つ． $R_t \ll R_M$  であれば、

$$\frac{\partial R_t}{\partial t} \sim \frac{\partial V_t}{\partial t} \frac{R_M}{V_S} \quad (4)$$

となる．上式は、微分項以外は定数項となっているため、 $R_t$  の変化によりレンジが大きく変化することはない．測定器に必要なダイナミックレンジは  $\partial R_t / \partial t$  が取りうる値の範囲のみ、つまり温度変化の幅のみである．

$R_t$  以降は微分回路であり、 $R, C$  を適切に選ぶことにより

$$G = -C_1 R_2 \frac{\partial}{\partial t} \quad (5)$$

<sup>1</sup>DTS で温度分布を測定するとき、どのくらい細かく測定できるかを示す．500m の DTS で距離分解能が 100 であれば、5m というように定義することにする．

<sup>2</sup>DTS が測定する温度情報は、各区間の抵抗値の関数として得られる．その抵抗値をどれだけ細かく測定できるかを示す．

のゲインが得られる．高周波領域では積分回路となり，ノイズを抑制する．全体の入出力特性は，

$$\frac{\partial R_t}{\partial t} \sim -\frac{R_M}{C_1 R_2 V_S} V_{out} \quad (6)$$

となる．

### 4.3 温度測定以外の用途

本実験の原理では，測定対象となる物理量と電気抵抗率に関係があればよいので，温度測定の他に，大変幅広い種類の分布型センサを構成することができる．例えば，感温部をスポンジに置き換えると，付着した水分により電気抵抗率が変化するため，漏水検知センサを構成できる．その他にも，腐食検知センサや湿度分布センサなどへの応用が考えられる．

## 5 おわりに

新しい原理に基づく DTS を考案し，原理の検証を実施した．2 値に分けた温度分布を使用し，DTS の動作を確認した結果，良好な動作が確認された．考案した DTS は低価格で構成可能と考えられ，温度をはじめ多彩な物理量を測定可能である利点を持つため，将来の発展を期待する．実験では簡易な検証のみを行ったため，実用的な装置での検証が今後の課題である．

## 6 謝辞

本実験は，株式会社八光，株式会社八光電機のご支援を頂きました．ここに深く感謝申し上げます．

## 参考文献

- [1] 電気学会誌特集，光ファイバによる計測技術の最前線，電学誌，p668-688, 2010
- [2] 東京天文台編纂，理科年表，丸善，p113, 58, 1985
- [3] 田原迫 他，導電率による肉の解凍測定，鹿児島大学農学部学術報告 38, p231-236, 1988
- [4] 岡村迪夫，定本 OP アンプ回路の設計，CQ 出版，1990