Hiroshi YAHAGI 1975 Integrating Thermometers with a Device of Mercury Coulometers. *Low Temperature Science, Ser. A, 33.* (With English Summary p. 226)

電量計型積算温度計*

矢作　裕**
(北海道教育大学)

(昭和50年10月受理)

I. まえがき

この報告は，温度の積算値を直続することのできる電気的な積算計に関するものである。ここでいう積算温度とは，測定開始時から，ある時刻までの各時刻における温度 $U(t)$ の測定期間 T の積算値で，$S=\int_0^T U(t)\,dt$，(U: 温度，t: 時間) と表現される量である。積算温度計は，この S あるいは平均温度 $\bar{U}=S/T$ を直接求めるための計器である。S は，温度が時間的に記録されていれば，もとよりそれから算出できる量であるが，例えば土壌凍結の深さのように，細かな気温の変動よりも，凍結期間中の平均的な温度による効果を問題とするような場合に，一つの指標 (積算寒度) として用いられる。野外の観測において，気温などは観測値を，日平均，月平均のように，期間中の平均の値にして用いることが多いので，このような計器があれば，それらを直接求めることができて好都合であろう。この種の装置として，すでに孫野[1]が実用的なものを考案し製品化されている。それは，温度による油の粘性の変化を利用したもので，長さ約 40 cm のガラス製で筒状，使用温度範囲が，−10°C～+32°C で使用温度範囲によって，3 領域に分割した算定式によって積算値が得られる。この積算計の最大積算温度は 90°C·Day である。ここに報告する積算温度計は，電量計型と名づけるべきもので，本来時間計として使用することを目的として開発されて市販されている水銀を電極とする電量計 (第 1 図参照) に，温度に比例した電流を流して電気量として積算するものである。積算のための素子は，ガラス管入りヒューズと同型で，小型で取扱いが容易なため，全体として非常に簡潔な装置となりうる。ここでは，この電量計を使用して，一つは −10°C から +35°C の使用温度範囲をもつ「一般用」，他の一つは，積算寒度を求めるための「低温用」の 2 種類の積算温度計を作成し試験を行った。

この積算方式によれば温度に限らず日射量，湿度，熱流量などの積算値が比較的簡単に求められ，その応用範囲も広いと思われる。

II. 一般用積算温度計 (−10°C～+35°C)

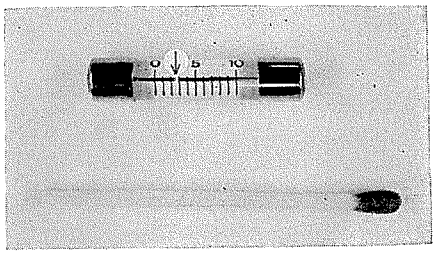
1. 電量計・測温素子・電源

一般用の積算温度計として，週巻自記温度計の使用される条件での気温および土壌温度の

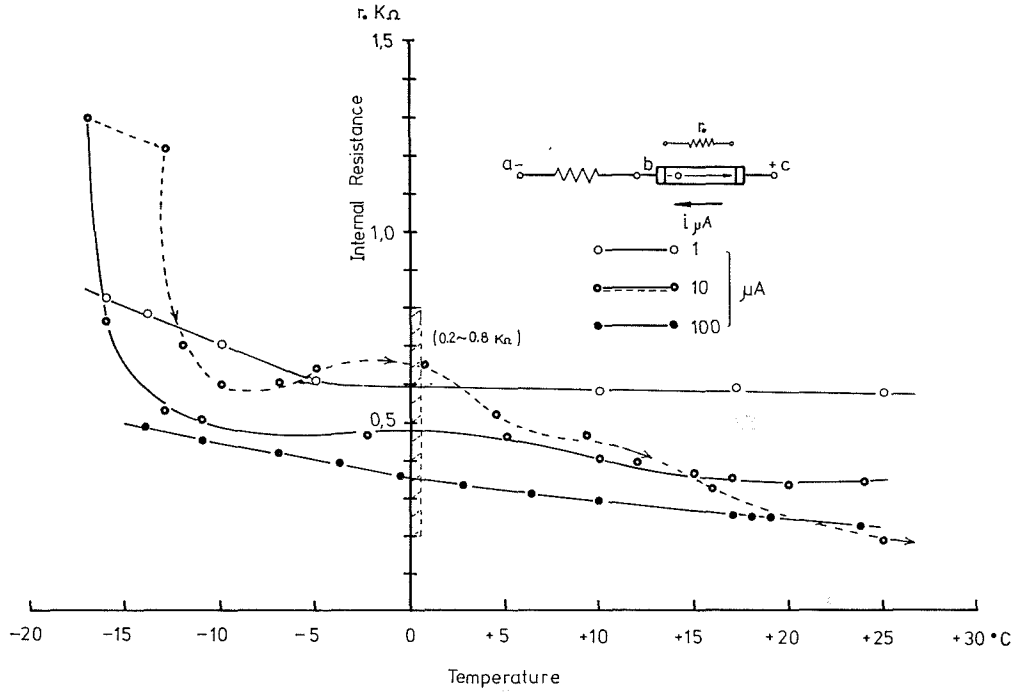
* 北海道大学低温科学研究所業績　第 1711 号

** 昭和 50 年度低温科学研究所内地研究員

積算を想定し，回路の簡略化，小型化，取扱いの容易さを旨として全体の構成を行なった。第1図は，使用した電量計（商品名テルモタイマー TMO 型）の外観である。電量計への電流の流入により，電解液ギャップ（図中の矢印の位置）は正方向に移動し，その移動幅からガラス管に刻まれた目盛によって，積算された電気量を知ることができる。第2図は実測による電量計の温度による内部抵抗変化の特性図である。個々の素子によってまた，極性反転のさいに内部抵抗は変化して，−10°C から +40°C までの温度変化に対して，0.2 kΩ から 0.8 kΩ までの抵抗値を示す。この素子に 20 kΩ の抵抗（同図 a–b）を直列に接続した場合，内部抵抗 r_0 の変化の影響は，a–c 間の抵抗値の高々 3% 程度になり，r_0 の変動の影響から解放される。尚，温度が低下して，−10°C より低くなると電量計の電解液が凍結するおそれがあり，野外に電量計を測温素子などと共に放置して使用するときは，−10°C が使用限界となる。



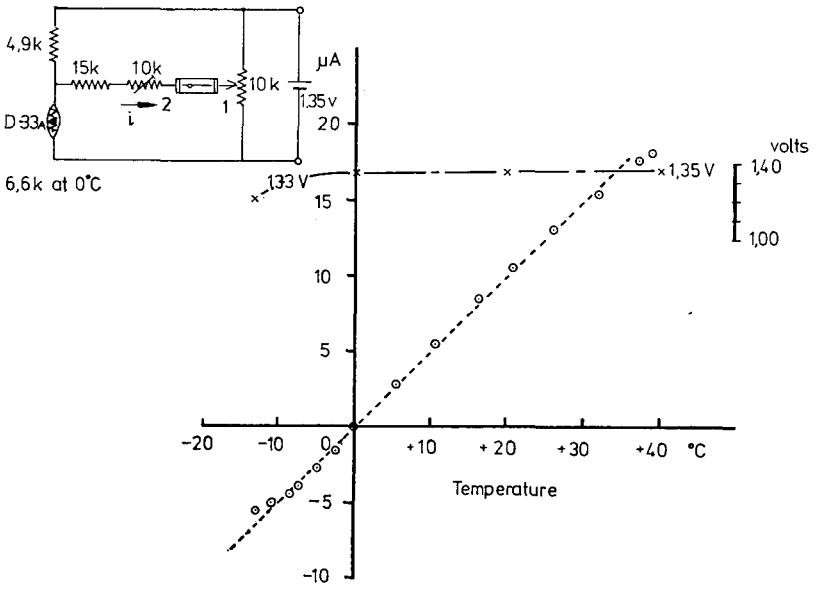
第1図 電量計（テルタイマー TMO 型）



第2図 電量計の内部抵抗の温度特性（破線は凍結融解後電流を反転したもの）

測温素子として直線的な電気的特性をもつものとして，熱電対，ダイオードの順方向特性の利用が考えられ，ダイオードの逆方向特性，サーミスタの特性は対数的な変化をする。電源として水銀電池を1個使用し，定電圧素子を使用せず，特別に増幅を要しない点から，温度補償用のサーミスタ D33A を採用し，第3図の図中の試験回路を構成した。電量計を除く回路

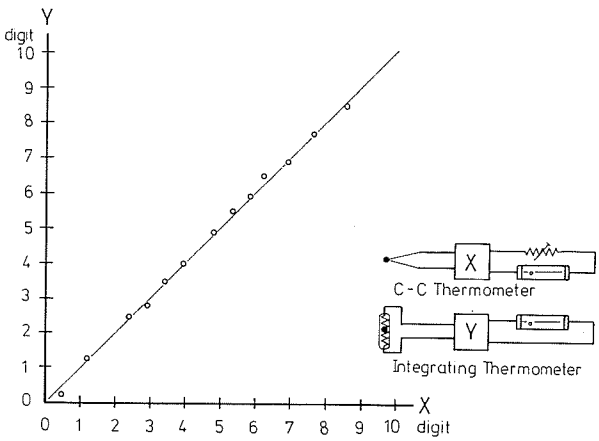
全体を測定温度中におき，温度と電流の関係を調べたものが第3図のグラフである。−10°C 附近から，水銀電池の起電力が劣化しはじめるが，図のような所要の特性が得られた。尚，サーミスタは素子によって定数が若干異なるが，電池と直列の可変抵抗(1)を加減して，0°C のとき電流が停止するように零点調整をしたのち，電量計と直列の可変抵抗(2)によって電流を 0.5 μA/°C となるよう調整する。ここでは，電流が温度に比例するように，サーミスタに直列に接続されている抵抗値を変化させて，出力電流の直線化をはかった。温度—電流の測定は，水槽内（低温は氷—アルコール混合）で行ない，出力電流は，電量計に直列に接続された抵抗（15 kΩ）の両端の電圧（例えば，±10°C→±75 mV）によって調整した。



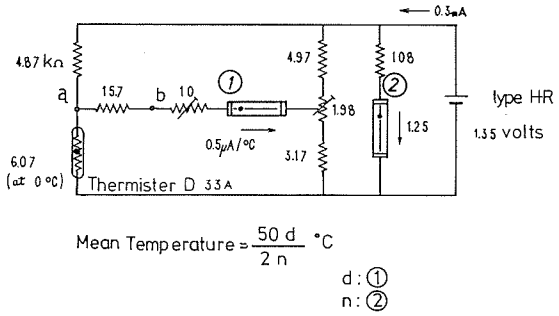
第3図　試験回路による温度—電流曲線

2. 試験回路・実用回路

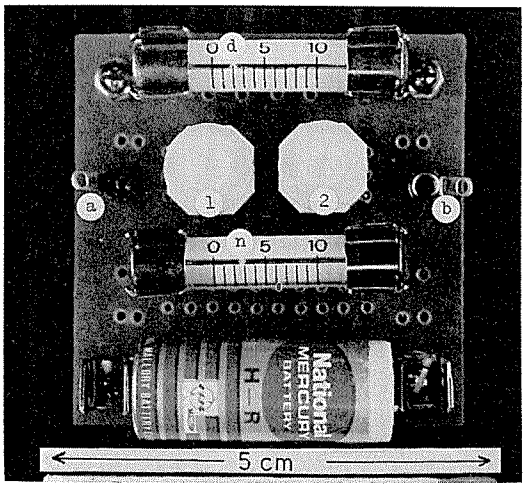
第4図は，第3図の試験回路による積算値と熱電対温度計による積算値との比較試験の結果である。出力端子付の熱電対温度計に電量計を直接接続した回路(X)と，第3図の積算温度計(Y)とを同時に作動させて，温度範囲 +16°C～+30°C，測定期間1週間における測定値の相関図を作成したものである。第5図は，実用的な回路で，第6図は完成した重さ 63 g の一般用積算温度計である。使用した水銀電池 HR 型は，600 mAh の容量があるので[2]，使用電流 0.3 mA のこの積算計では，2,000 時間（約 80 日間）使用可能である。2 kΩ，10 kΩ の半固定の抵抗は，金属皮膜のものを用い，それぞれ零点調整用(1)，温度幅（0.5 μA/°C）調整用(2)であり，電量計に直列の抵抗の両端（第5, 6図 a-b）の電圧（この場合は ±10°C→78.5 mV）の調整によって所要の電流を得る。実用型では，試験回路と異なり積算温度用の電量計（第5, 6図 ①）のほかに時間計（同図 ②）を設け，最大 20 日間（2 日/1 目盛）の経過日数を知ることができる。積算温度計の1目盛は，50°C·Day であるから，積算温度は $S=50d$（d：電量計 ① のギャップの移動幅）によって，また期間中の平均温度は $\overline{U}=50d/2n$（n：電量計 ② のギャップの移動幅）



第4図 熱電対温度計による積算値(X)と積算温度計の値(Y)との比較試験(室温)



第5図 一般用積算温度計の回路



第6図 一般用積算温度計(重さ 63 g)

① 積算温度 $S=50d$ (°C·Day) ② 経過日数 $2n$ (Day)
平均温度 $\bar{U}=\frac{50d}{2n}$ (°C) a, b: 温度幅調整用出力端子

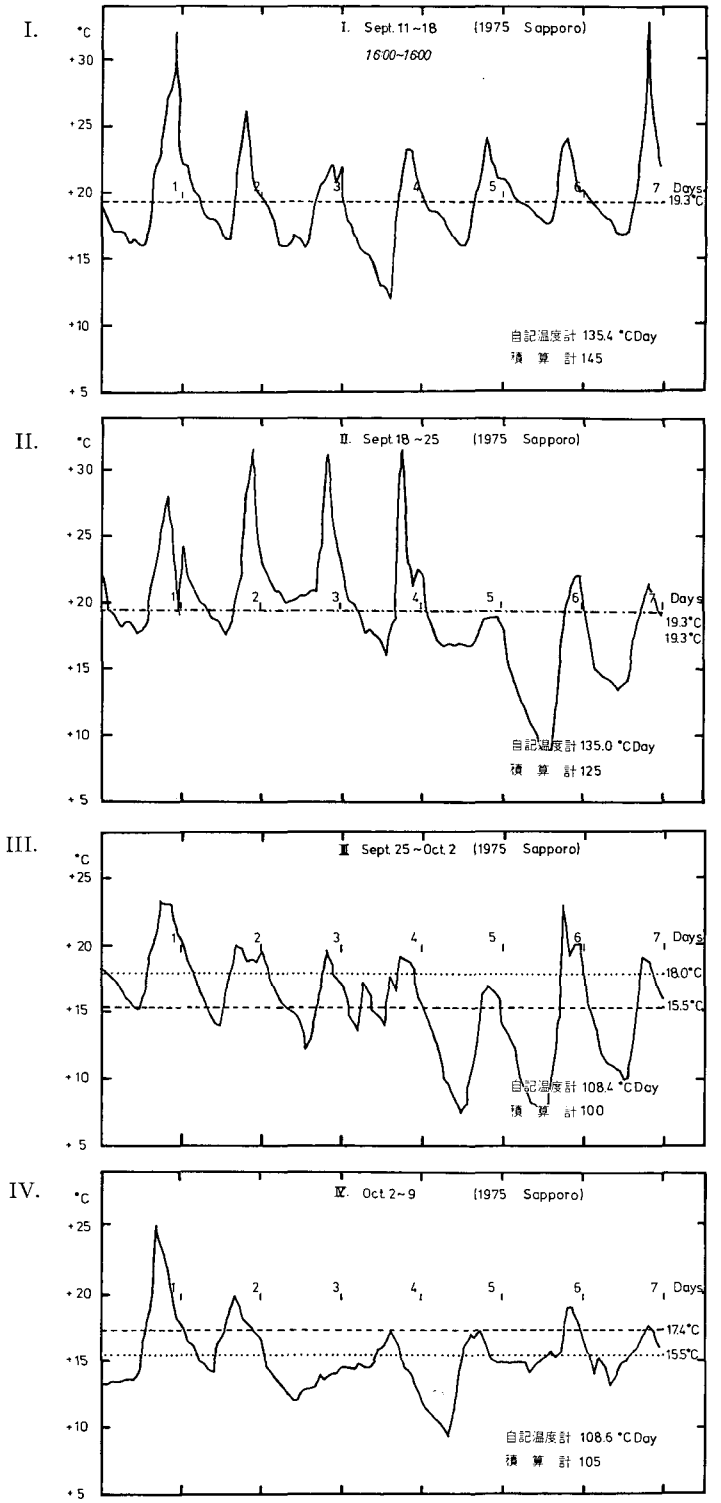
によって求めることができる。尚，実用的な積算温度計に使用した部品の主な規格は，第1表に掲げてある。

3. 一般用積算温度計の実用試験結果

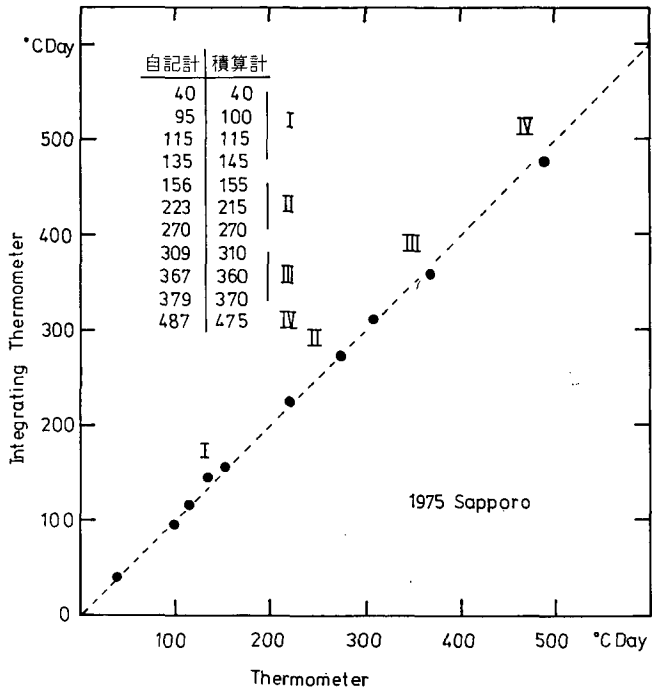
第7図I～IVは，1975年9月11日から10月9日までの4週間にわたる週巻自記温度計による気温の推移と，記録紙からの週積算温度(15 samples/day)，積算温度計による積算値とを示したものである。図中の破線は，その週の，また点線は，期間中の自記計による平均気温である。第8図および第2表は，実用試験の観測結果をまとめたものである。

第1表 使用した部品の主な規格

電量計		単位
目盛	1～10	digit
最大許容電流	100	μA
最大積算量	6,000	μAh
使用温度範囲	−10～+70	°C
水銀電池 HR 型		**単位**
公称電圧	1.3	V
標準電流	20	mA
電気容量	600	mAh
許容電流	35	mA
サーミスタ D33A		**単位**
抵抗値(25°C)	2,500±200	Ω
特性温度	3,000±300	°K
熱放散係数	6.0	mW/°C
温度係数	−3.0～−3.7	%
使用温度範囲	−10～+70	°C
使用部品		
電量計×2，サーミスタ(D33A)×1，固定抵抗 5 kΩ×2，3 kΩ×1		
半固定抵抗(金属皮膜) 10 kΩ×2，2 kΩ×1		



第7図 1975年9月11日～10月9日の気温の推移（札幌市）



第8図 一般用温度計の実用試験結果

第2表 一般用積算温度計の実用試験結果

1975	I. Sept. 11～18					II. Sept. 18～25				
	自記温度計	積算温度計		日最高，最低気温の積算		自記温度計	積算温度計		日最高，最低気温の積算	
積算値 (digit)	—	0～2.9	指示差	—	指示差	—	2.9～5.4	指示差	—	指示差
積算温度 (期間中) (°C·Day)	135.4	145	+7.1%	147.9	+9.2%	270.4	270	−0.1%	298.2	+10.3%
週積算温度 (°C·Day)	135.4	145	+7.1%	147.9	+9.2%	135.0	125	−7.4%	150.3	+11.3%
平均気温 (期間中) (°C)	19.3	20.7	+1.4°C	21.1	+1.8°C	19.3	19.3	0.0°C	21.3	+2.0°C
週平均気温 (°C)	19.3	20.7	+1.4°C	21.1	+1.8°C	19.3	17.9	−1.4°C	21.5	+2.2°C

1975	III. Sept. 25～Oct. 2					IV. Oct. 2～9				
	自記温度計	積算温度計		日最高，最低気温の積算		自記温度計	積算温度計		日最高，最低気温の積算	
積算値 (digit)	—	5.4～7.4	指示差	—	指示差	—	7.9～9.5	指示差	—	指示差
積算温度 (期間中) (°C·Day)	378.8	370	−2.3%	408.4	+7.8%	487.4	475	−2.5%	519.4	+6.6%
週積算温度 (°C·Day)	108.4	100	−7.7%	110.2	+1.7%	108.6	105	−3.3%	110.0	+2.2%
平均気温 (期間中) (°C)	18.0	17.6	−0.4°C	19.4	+1.4°C	17.4	17.0	−0.4°C	18.6	+1.2°C
週平均気温 (°C)	15.5	14.3	−1.2°C	15.7	+0.2°C	15.5	15.0	−0.5°C	15.9	+0.4°C

積算電流： 0.5 μA/°C　　最大積算量： 500°C·Day　　使用温度範囲： −10°C～+35°C

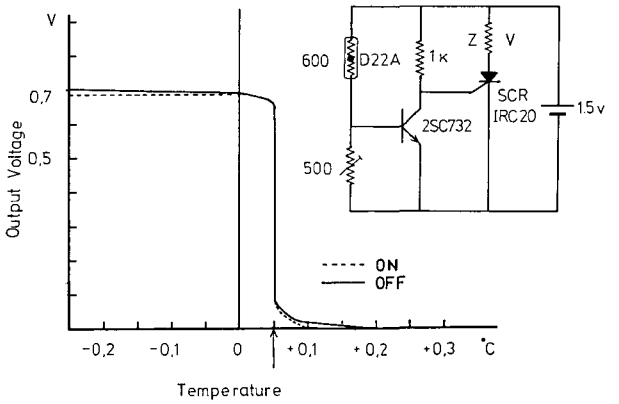
これらの図，表に見られるように，自記温度計の記録紙より直接求めた週毎の積算温度と，積算温度計の示す値との差は，前者を基準とした絶対値で，第1週から，それぞれ7.1%，7.4%，7.7%，3.3%，平均値は6.4%であった。一方，記録紙から日最高最低気温を求めて積算した結果は，それぞれ，9.2%，11.3%，1.7%，2.2%，平均6.1%であり，1週毎の積算値に関しては，最高最低気温より算出した値とほぼ等しい結果となった。次に期間中の積算温度については，第2週以降，積算温度計では，自記計積算温度に対して，それぞれ，0.1%，2.3%，2.5%で平均1.6%，日最高最低気温によるそれぞれに対応する値は，10.3%，7.8%，6.6%で，平均8.2%であった。

以上の結果によれば，電量計型積算温度計によって週単位で積算値を求めた場合は，日最高最低気温から得た積算値と同程度の精度の値が得られる。2週間以上の期間にわたる積算値は，自記温度計から求めた積算値（15 samples/day）に対して，高々3%の指示差であることがわかる。尚，電量計の読取りにさいしては，目盛を直接読みとる方法によったが，水銀糸に写った目盛線の像を利用して視差を最小にとどめるように注意した。

III. 低温用試作積算温度計（0°C～−20°C）

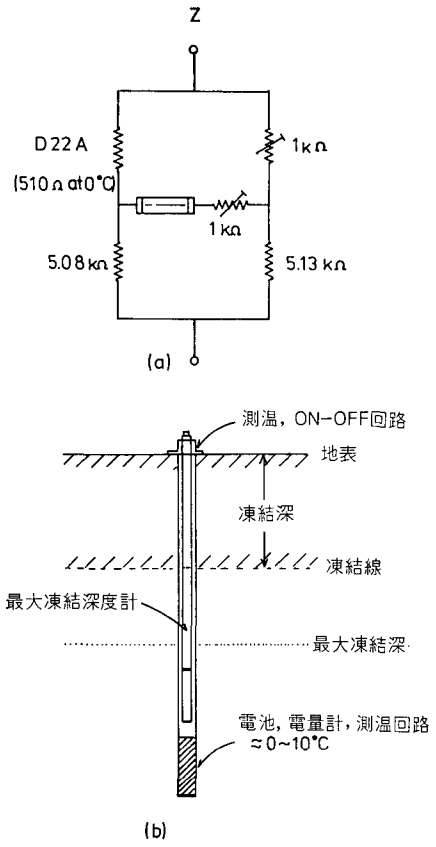
1. 回路・積算寒度

冬期間に，しばしば用いられる温度に関する指標として，積算寒度（Freezing Index）がある。これは，凍結期間中の，0°Cを下まわる温度の絶対値を積算したものである。例えば土壌凍結の深さDは，この積算寒度Iとの間に$D=\alpha\sqrt{I}$（α：土壌によって定まる定数）の関係の成立つことが知られている[3),4)]。この積算寒度を野外で求めるための次のような装置を試作し，先の一般用積算温度計に先立って，野外試験を行なった。第9図は，0°Cを境として，負の温度で動作するON-OFF回路である。この回路は，温度—負荷Zの端子電圧曲線に見られるように，ほとんど0°Cで鋭いON-OFF特性を示し，0°C以下でZ（≒2 kΩ）に700 mVを印加する。第10図(a)は，負荷Zの温度積算回路で，一般用の積算温度計と同様に温度が図中央の電量計によって積算される。この回路では，1 μA/°Cの電流が流れるように測温回路を構成している。積算寒度を求めるさい，これらの回路を低温下（−10°C～−25°C）で使用する場合，



第9図　(0°C) スイッチング回路

電源の電池の性能が劣化し，電量計の電解液の凍結による使用不能の状態が生じ，半導体類の使用条件も非常に厳しくなる。しかし，ここでは，土壌凍結の深さの測定に関連させて考えることができるので，第10図(b)のように，測温端子，ON-OFF回路の測温端子を地表附近に置き，電池，電量計など低温から保護すべき部分を凍結深度計（あるいは最大土壌凍結深度計[5]）の容器の底部に収めることにする。深度計の底部は，予想される最大凍結深以下の地中に置かれているので，温度はプラス数度附近で温度変化が少なく，例えば苫小牧の凍上観測室試験プールの地下1mで+8°C（11月）から+1.5°C（3月）の値をとり[6]，先の低温下での問題点の全てを解消することができる。この試作回路では，後者を室温において試験を行なった。第2図に見られるように室温附近では，同一の電量計に対して内部抵抗変化は極めて少ない。



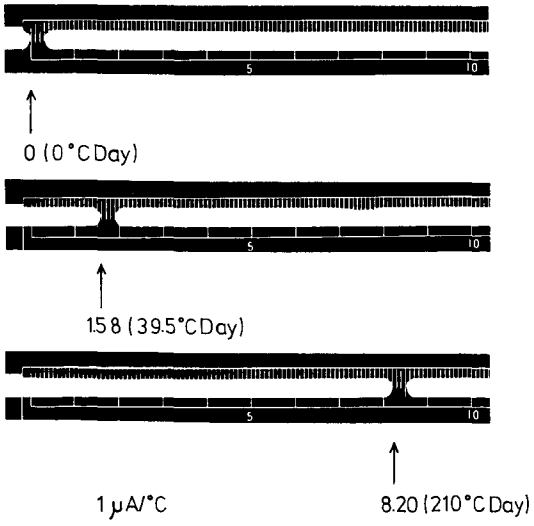
第10図 測温回路と凍結深度計

2. 電量計の目盛の拡大・野外試験結果

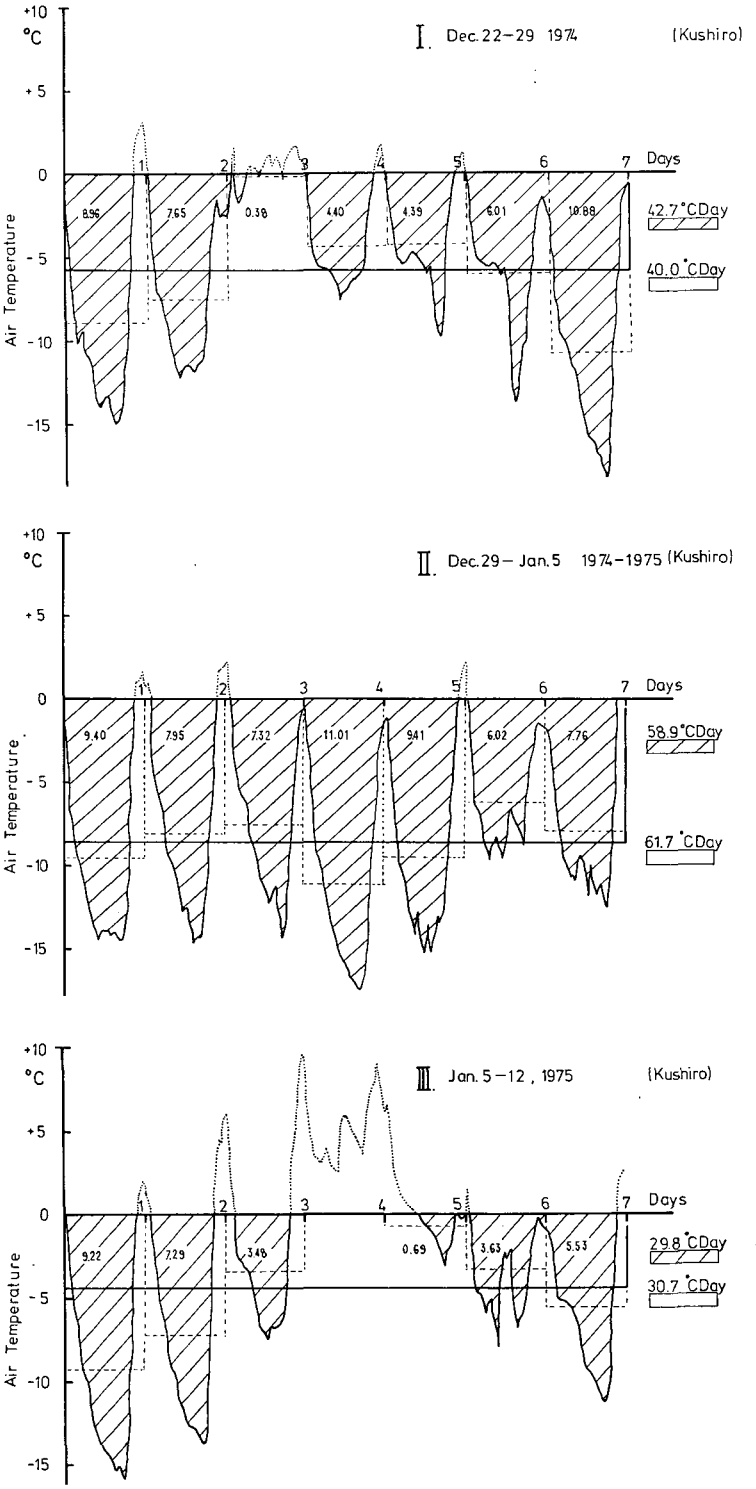
電量計の目盛の読みとりは，第11図のように，電量計を直接引伸器にかけて拡大（倍率×5）して，同時に目盛を写しこんで行なった。図中の矢印は，上から順に電量計の目盛の移動を示したもので，このように小型ながら，精細に読みとることができる。

第12図I, II, IIIは，1974年12月22日から1975年1月12日までの3週間にわたる熱電対温度計の記録紙から得た温度記録（48 samples/day）である。図中の斜線部分は，積算されるべき負の温度領域を示し，破線の枠の面積は，週積算温度をあらわしている。点線および0°Cの横軸に囲まれた部分の面積は，ON-OFF回路によって切り捨てられ積算されない。

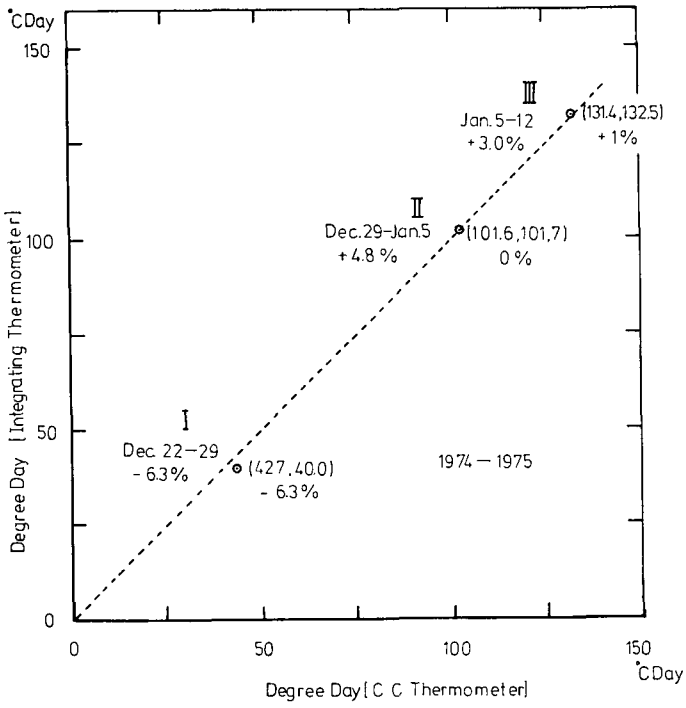
第13図および第3表は，3週間の野外における試験結果をまとめたものである。この結果によれば，熱電対温度計の記録紙から得た積算値を基準とした積算温度計の値の指示差は，絶対値で第1週からそれぞ



第11図 電量計のギャップの移動（倍率：×5）



第12図 低温用積算温度計の野外試験結果



第13図 低温用積算温度計の野外試験結果

第3表 低温用積算温度計の野外試験結果

1974～1975	I. Dec. 22～29					II. Dec. 29～Jan. 5				
	熱電対温度計	積算温度計		日最高，最低気温の積算		熱電対温度計	積算温度計		日最高，最低気温の積算	
積算値 (digit)	—	0～1.64	指示差	—	指示差	—	1.64～4.17	指示差	—	指示差
積算温度 (期間中) (°C·Day)	42.7	40.0	−6.3%	38.3	−10.3%	101.6	101.7	0%	86.9	−14.5%
週積算温度 (°C·Day)	42.7	40.0	−6.3%	38.3	−10.3%	58.9	61.7	+4.8%	48.6	−17.5%
平均気温 (°C)	−6.1	−5.7	+0.4℃	−5.5	+0.6℃	−7.3	−7.3	0.0℃	−6.2	+1.1℃
週平均気温 (°C)	−6.1	−5.7	+0.4℃	−5.5	+0.6℃	−8.4	−8.8	−0.4℃	−6.9	+1.5℃

1975	III. Jan. 5～12				
	熱電対温度計	積算温度計		日最高，最低気温の積算	
積算値 (digit)	—	4.17～5.43	指示差	—	指示差
積算温度 (期間中) (°C·Day)	131.4	132.5	+1.0%	116.3	−11.5%
週積算温度 (°C·Day)	29.8	30.7	+3.0%	29.4	−1.3%
平均気温 (°C)	−6.3	−6.3	0.0℃	−5.5	+0.8℃
週平均気温 (°C)	−4.3	−4.4	−0.1℃	−4.2	+0.1℃

積算電流： 1 μA/℃
最大積算量： 250°C·Day
使用温度範囲： 0°C～−20°C

れ，6.3%，4.8%，3.0% の差があり，第2週以降の期間中の積算値については1% 以下の指示差でほとんど一致するよい結果が得られた。ちなみに，記録された日最低気温×$\frac{1}{2}$による積算値を求めてみると，第3週の週積算温度の場合の1例1.3% を除き，10.3～17.5% 記録された積算値より小さい値が得られた。

IV. あとがき

小型の電量計に最もふさわしい応用の一つと思われる積算温度計についての試験を一応了えた。当初，電量計の目盛の長さが短かいことから，読みとりに起因するかなりの誤差が予想されたが，以上に見られるように，比較的よい結果が得られた。「一般用」に比較して，「低温用」がよい結果を得ているのは，後者の出力電流が大きいことと，目盛りを拡大して読みとっていることによる。

測温回路としては，素子にサーミスタを使用せずに，広い温度範囲について直線的な出力を取出すことができ，0°C 接点を必要としないダイオードの順方向特性を用い，これと最近豊富な種類が出まわっている低消費電力の集積回路（例えば LM 4250 C, CMOS ディジタル IC）との組合せが考えられる。しかし，前者の使用温度範囲は，0～+70°C (LM 4250 は−55°C～+125°C) で，一般用積算温度計とは異なり，低温下で使用が予想されるような場合は使用することができない。「一般用」の積算計では，部品を定格限度一杯まで使用して，全体として簡略化をはかり，一応の結果をみたが，経済性の点から簡単な差動増幅器と NiCd 電池の組合せによって出力電流に余裕をもたせ，最大積算温度を可変にしたり，有効積算温度を測定する機能をもたせたりするなど，まだ回路的に工夫すべき点が残されている。また「低温用」のものは，地中に増幅回路部分を設置する方法をとれば，「一般用」とは逆に高性能の IC 群を十分に活用できるので，今後土壌凍結深の観測機器と関連させて発展させていきたい。

稿を了えるにあたり，低温用の積算温度計の野外試験に協力してくれた北海道教育大学研究生細川文良君に謝意を表わす。また，論文作成にあたって有益な助言を賜った低温科学研究所木下誠一教授にお礼申し上げる。

文　献

1) 孫野長治 1949 積算温度計の試作. 応用物理, **18**, 2-3, 87-92.
2) 渡辺　潤・清水幸麿 1973 現用ポータブル電池の概要とその取扱いについて. 電子展望, **10**, 7, 61-77.
3) 東　晃 1954 北海道の土壌凍結. 農業物理研究, **3**, 145-157.
4) Aldrich, H. P. 1956 Frost Penetration Beow Highway and Airfield Pavements. *Highway Res. Board, Bull.* **135**, 124-144.
5) 矢作　裕・佐々木一郎 1974 OVERFLOW 型最大土壌凍結深度計. 日本雪氷学会講演予稿集.
6) 木下誠一・鈴木義男・堀口　薫・田沼邦男 1972. 苫小牧における凍上観測. 低温科学, 物理篇, **29**, 203-210.

Summary

Two different sorts of integrating thermometers were developed by using small mercury coulometers (Fig. 1). The one is used for the temperature range of −10°C～+35°C (Fig. 6), and the other for the range of 0°C～−20°C. According to observational results, good agreement was seen between the values obtained by the integrating thermometers and the degree days calculated from charts of temperature. A summary of the experimental results is given in the following table:

Charactaristic	Term		
	Operational Temperature	Maximum Degree Days	Error
For General Use	−10°C～+35°C	500°C·Day	3.3～7.7% (a week) 0.1～2.5% (over 2 weeks)
For Freeezing Index	0°C～−20°C	250°C·Day	3.0～6.3% (a week) less than 1% (over 2 weeks)