

出水時における河川水温の変動
Variation of Water Temperature of Flood in Small Mountainous Basin

名古屋大学 学生員 宮本良平
豊橋技術科学大学 学生員 小林由委
豊橋技術科学大学 正員 中村俊六
名古屋大学 正員 高木不折

1. 緒 言

ダム貯水池における冷水放流問題、濁水長期化問題および富栄養化問題などに関連して、出水時における貯水池水の流動現象を解析する機会は近年著しく増加しているが、密度流現象としての貯水池水の流動をシミュレートするにあたっては、貯水池に流入する河川水密度の時間変化が正確にインプットされることが必要である。出水時における流入河川水の密度を決定するものは主として濁度と水温であるが、出水時における河川濁度に関しては、村本・道上ら¹⁾(1974)、あるいは金屋敷・芦田ら²⁾(1980)によって生産、流下過程の研究が行なわれており、いくつかの問題点はあるにしてもかなりの程度に解明されてきている現状である。しかしながら、出水時における河川水温に関しては、量的にも質的にも驚くほど研究成果が少ない現状にあるように思われる。その原因のひとつは、我国における河川水温の研究が主として稲作の冷水害を避ける立場から関心を持たれたため、中・下流部における無降雨時の熱収支の議論に終始したことにあるようであるが、河川水温の形成過程を流域全体で考察する立場や雨水の流出経路をふまえた水文学的考察の立場からの研究がきわめて少なかったことも原因のひとつの側面として挙げられよう。^{3),4)}

本研究は、以上の観点から、愛知県大山市山間部に設置された地殻変動観測用トンネル横坑横の小流域を試験地として、(1)降雨量、気温、渓流水温、横坑湧水温、雨水水温、渓流流量、横坑湧水量などを観測し、(2)表面流、中間流などの流出成分ごとに雨水流出量(渓流流量および横坑湧水量)を解析できるモデルを検討したのち、(3)雨水が各流出成分に分離形成されていく過程での土中水の熱収支と土粒子(あるいは岩盤)の熱収支を検討することによって、出水時における河川水温形成機構を考察したものである。

2. 流域の概要

試験地として設定した流域は、図-1に示すように濃尾平野北東端山間部に位置し、図-2に示す名古屋大学理学部附属大山地震観測所(地殻変動観測所)の地殻変動観測用トンネル横坑(図中の太い実線)に隣接する小流域である。図中破線で囲まれた試験地の流域面積は約6400m²であり、流域内の主な構成地質は古生層砂岩、頁岩、チャート層である。また、

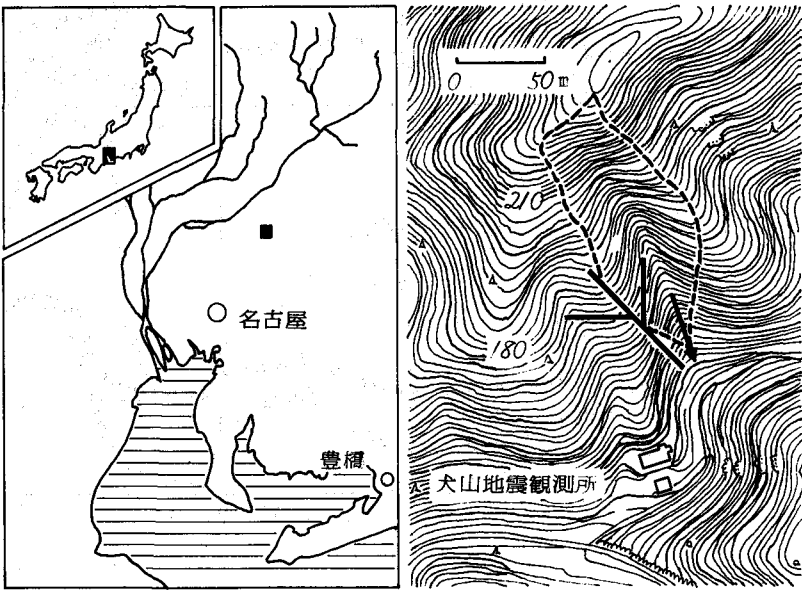


図-1 試験地の位置

図-2 流域の地形

渡辺・茂木ら⁵⁾(1981)の調査によれば、地層はほぼ東西走行であり傾斜は鉛直に近くやや北落ちであって、平均的に50 cm程度の表土層に覆われている。地殻変動観測用横坑内では、横坑奥の破砕帯からと思われる湧水と横坑入口付近の風化帯からと思われる湧水がみられ、これらの湧水量は志知ら⁶⁾(1970)によって常時自動計測されている。図-2中の矢印は流域からの溪流の流れの方向を示すものであるが、流域下端には幅約2 m、高さ約80 cmのダムが設けられ流量計測用の直角三角ゼキが設置されている。

3. 観測結果

昭和57年7月中旬と9月中旬(台風18号)における観測結果を示せば図-3のようである。同図中の降雨量は地震観測所屋上、気温および溪流水温はダム地点、雨水水温(9月のみ)は地震観測所横、湧水量は横坑奥、溪流流量はダム地点、風化帯湧水量は横坑入口付近、破砕帯湧水量は横坑奥で、それぞれ観測されたものである。雨水水温は雨水をポリ容器に1時間程度集めて測定した。同図を見ると以下のようである。

- (1) 溪流水温は、降雨開始直後(流量増加時)にいったん上昇し、流量の大きい時期(ピーク時前後)にかなり急激に低下した後、流量の減少に伴って徐々に日変化があらわれる。
- (2) 降雨中、気温は低下するが、雨水水温も著しく低下する。
- (3) 横坑奥からの破砕帯湧水量は、降雨によってほとんど変化しないが、風化帯湧水量は、溪流流量の変化よりも小さいながらも、かなり変化する。
- (4) 溪流流量の変化に対する湧水量変化の時間的遅れは、短期間の降雨の時に大きく、長期間の降雨のとき小さい。

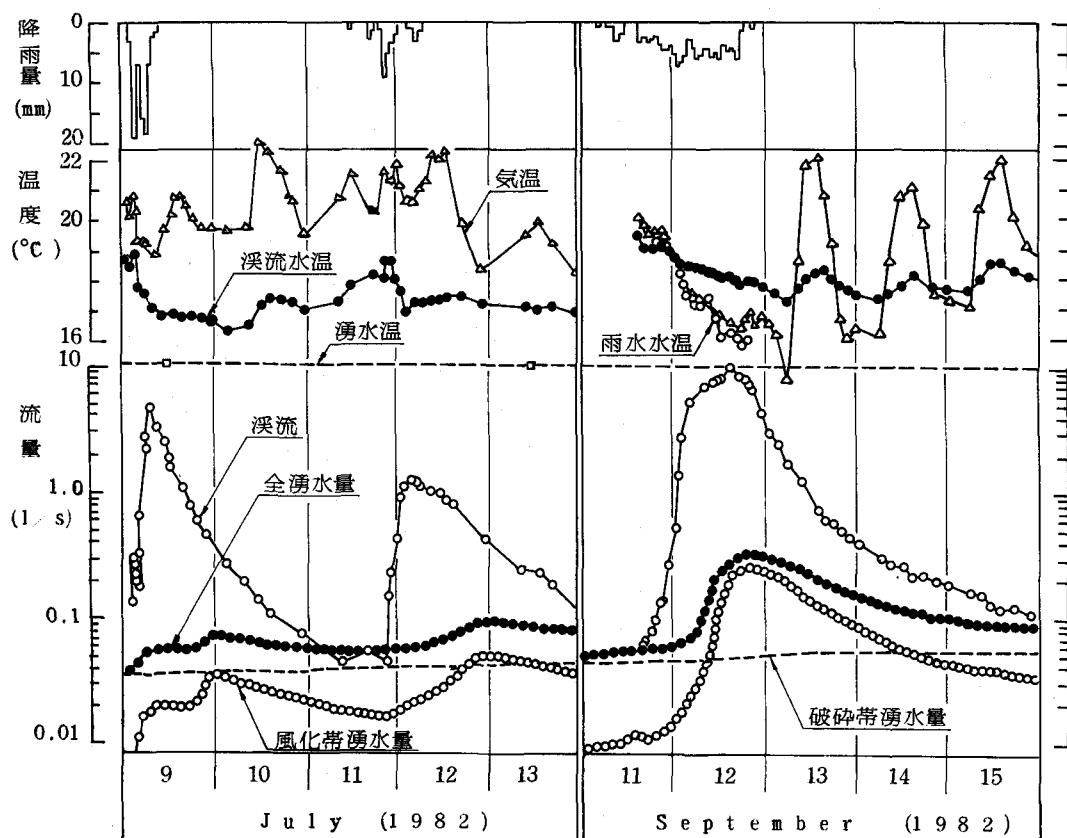
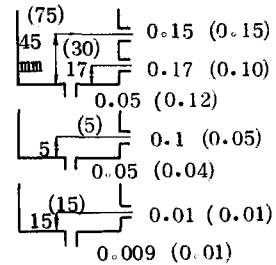


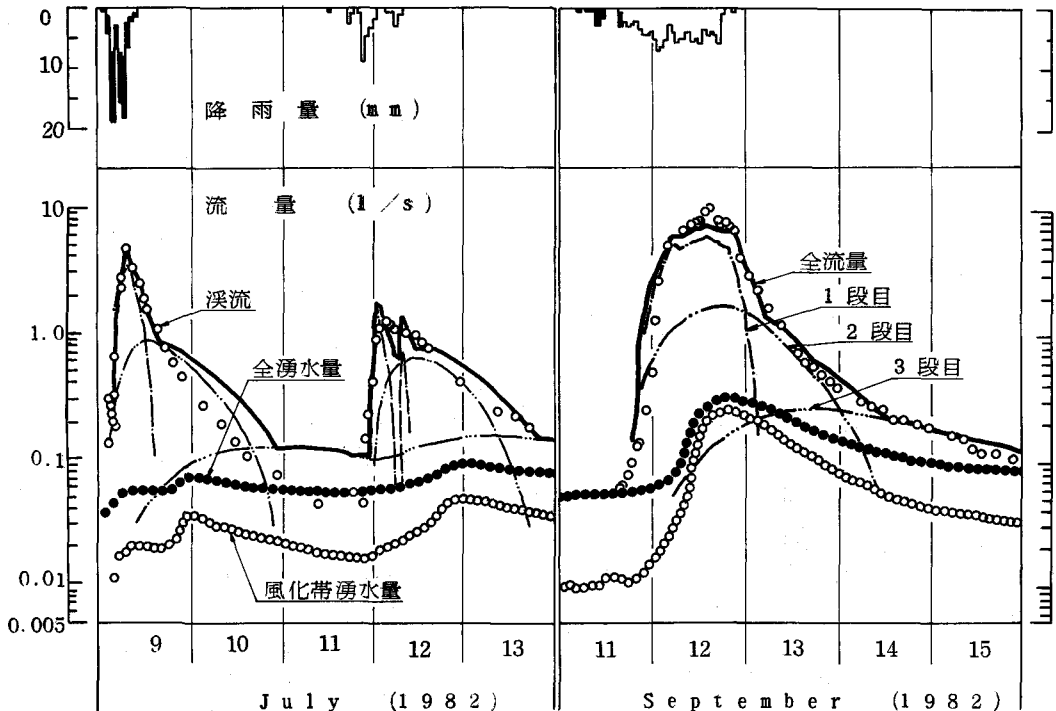
図-3 昭和57年7月と9月における観測結果

4. 流出解析（水収支）モデル

本研究の目的からは、流出解析モデルには、（１）流域を、降雨および斜面特性の一様性が保証される程度の規模に細分化して解析できること、（２）表面流出、中間流出および地下水流出の各成分に分離して解析できること、（３）土層あるいは岩盤内での熱収支計算モデルが導入しやすいこと、の３点が必須の条件である。ここでは、これらの事柄を考慮して、流域を細分化したうえでタンクモデルを用いる小葉竹（１９７９）のモデルを基礎にして検討を加えることにした。小葉竹のモデルの最大の特徴は、（１）流域を一定の規則で細分化すること、（２）細分化された各単位流域に対して、地質に応じた一定のタンクモデルを用いること、にあるが、この他にも（３）有効雨量の求め方も指定されている（４）細分化された各流域からの流出量は、面積集中曲線の概念を導入して合流されるが、（５）その方法も含めて、すべてのパラメータが指定され、解析にあたっての任意性がほとんど無いこと、なども特筆されるべきだろう。このモデルについては、筆者の一人中村（１９８１）もその有用性を確かめている。ただ、今回対象とする流域は非常に小さいので単一流域とし、パラメータに若干の修正を加え、各タンクに初期水深を与えて適用した。使用したタンクのパラメータの諸数値を図－４に示す。同図中（ ）内の数値は小葉竹指定の値である。図－４のタンクモデルによる計算結果を実測値（丸印）とともに図－５に示す。同図最上段に降雨量を併記したが、黒くぬりつぶした部分は無効降雨である。７月の雨については７月８日以前の無降雨日数が長くて小葉竹の指定する方法では無効（初期損失）雨量を算出できないため、７月９日の降雨量の４割を無効降雨とし、９月の雨については指定通りに初期損失を与えている。また、各タンクには初期水深として、１、２、３段目にそれぞれ１５、５、１５mmが与えられている。



図－４ タンクモデル



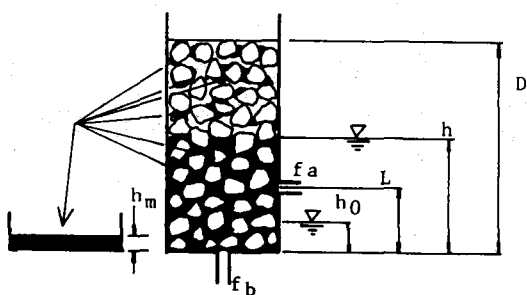
図－５ 流出解析計算結果

(1) 各タンクの横孔からの流出量の合計として与えられる全流量は、渓流流量の実測値と良く一致している。(7月10、11日における実測値との差異は、この期間中の蒸散その他による損失を考慮していないことによる誤差として許されよう。)

と見ることができよう。このうちとくに、上記(2)に注目すれば、用いたタンクの2段目、3段目の構造は、単に全流量の解析の便宜上のものではなく、物理現象としての中間流出、あるいは流域の地盤構造にもある程度対応しているものと考えて良いように思われる。

上記の流出解析用タンクモデルが流域の地盤構造や雨水の流出経路と対応しているのであれば、各タンクごとに対応する土層あるいは地盤の熱容量を想定して、土層と水との熱交換を計算すれば、地盤内における熱収支が解析できるはずである。ここではタンクモデルによる水収支に対応する熱収支として表-1に示す各式を想定した。式中の記号の意味は表の下に付図とともに付したが、添字 w 、 g 、 r は、それぞれ、水、

水収支	$\frac{h(i+1)-h(i)}{\Delta t} = r(i+1) - q_a(i) - q_b(i)$	1
土中水の 熱収支	$\frac{K_w(i+1)\theta_w(i+1) - K_w(i)\theta_w(i)}{\Delta t} = K_r(i+1)\theta_r(i+1) + K_\alpha(i+1)[\theta_g(i+1) - \theta_w(i+1)] - K_q(i)$	2
土粒子の 熱収支	$\frac{K_g[\theta_g(i+1) - \theta_g(i)]}{\Delta t} = -K_\alpha(i+1)[\theta_g(i+1) - \theta_w(i+1)]$	3
K	$K_g = C_g \rho_g \beta D, \quad K_\alpha(i+1) = \alpha \kappa [h(i+1) + h_m]$	4
	$K_w(i+1) = C_w \rho_w [h(i+1) + h_m]$	5
	$K_q(i) = C_w \rho_w \theta_w(i) [q_a(i) + q_b(i)]$	6
	$K_r(i+1) = C_w \rho_w r(i+1)$	7


$$r = \text{降雨量} \quad (\text{m/h})$$

C = 比熱 (Cal/Kg)
 ρ = 単位体積重量 (Kg/m³)
 D = 土層 (岩盤) 厚 (m)
 L = 流出孔の高さ (m)
 h = 貯留水深 (m)
 h_0 = 初期水深 (m)
 h_m = 付着水の換算水深 (m)
 θ = 水温 (°C)
 β = 間隙率に關係する係数 (無次元)
 α = 土粒子と水の接觸面積、間隙率、付着重量等土層の状態に關する係数 (m⁻¹)
 κ = 熱伝達係数 (cal/m² h °C)

土粒子（土層あるいは岩盤）、および雨の各値であることを示している。また、 h_m はタンク内の水深 h が 0 になっても土粒子あるいは岩盤に付着して土層内に常時貯えられている水分に対応するもので、水収支には関係しないが、熱収支には関係するものである。なお、表-1には1段目のタンクに適用する式を示したが、2段目、3段目のタンクにおいても、降雨に関する諸量の代りに上段のタンク底の孔からの流出流量および水温を用いれば全く同じ式を用いれば良い。各式の表現法としては、マイコンによるプログラミングの便を考えてステップ i とステップ $i+1$ （時間間隔 Δt ）を用いたが、 t と $t + \Delta t$ の表現を用いれば差分形の見なれた形に、また、 $\Delta t \rightarrow 0$ とすれば微分方程式の形に、それぞれ書き換えることができる。

同表中の1式は、タンクモデルによる水収支計算式であって、側方孔よりの流出量とタンク底からの流出量がいずれも前のステップの貯留水深に比例するという慣用法に従っている。2式は土中水の熱収支であって、右辺第1項は雨の持ち込む熱量、第2項は土から受ける熱量、第3項は側方および下方への流出に伴って持ち去られる熱量、にそれぞれ対応している。3式は土粒子（土層あるいは岩盤）の熱収支であって、右辺は土中水に与える熱量に対応する項のみとしている。各係数 K の内容は4~7式に示したが、4式および2式（または3式）から明らかなように、土と水との熱交換は、両者の温度差とタンク内の貯留水深との積に比例すると仮定されており、単なる土と水との熱伝達係数（ k ）で表現できない複雑さは、すべて係数 α に集約されている。また、以上の計算では、土と水との熱交換のみを考えており、（1）太陽光による熱吸収は無視され、（2）大気との間には熱交換は無い（地上よりの蒸発も無い）と仮定されていることに注意しなくてはならない。計算手順は、適当な初期条件が与えられれば、入力としての降雨量から1式によってまず貯留水深が計算され、つぎに、これを用いて各係数 K を計算したのち、土および水の温度を2、3式を用いて求めれば良い。

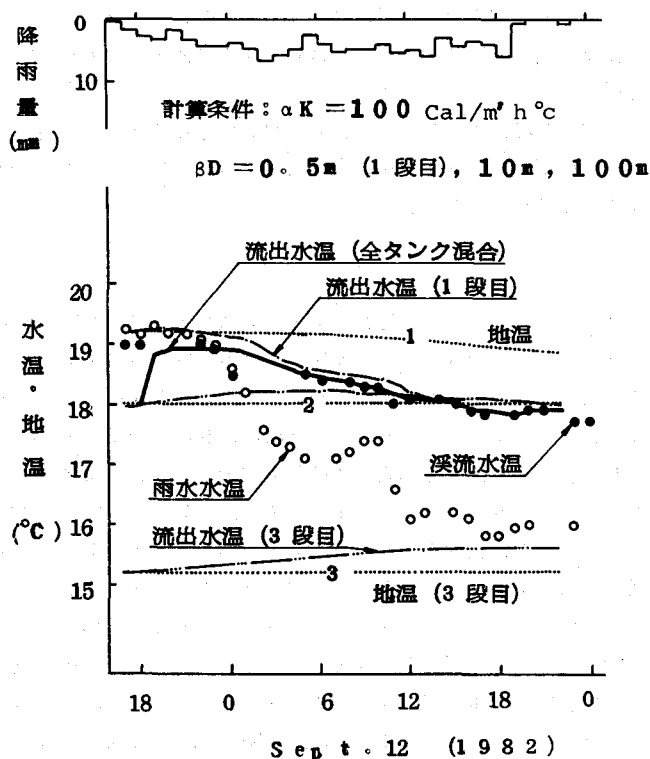


図-6 計算結果（丸印は実測値）

上記（1）と（2）の仮定をほぼ満足すると考えられる9月18日の降雨期間中に対して、上記のモデルを適用した計算結果を示せば図-6のようである。計算の開始時点は、9月1日17時であり、初期条件としては（渓流水温および湧水温の実測値を参考にして）、初期水温を1段目19.2、2段目18.0、3段目15.2（℃）とし、初期地温は初期水温と等しいとした。また $h_m = 0.02$ m、 $\alpha k = 100$ 、 $C_g \rho_g = 540$ 、 $C_w \rho_w = 1000$ の諸数値を全段に用い、 βD としては1段目0.5 m、2段目1.0 m、3段目1.00 mをそれぞれ仮定した。

さて、同図を見ると、まず全タンク混合の流出水温と渓流水温実測値との比較から、

（1）計算初期にはかなりの差異が見られるが、出水初期にいったん昇温するという7月の降雨時に見られた傾向は計算に

よって表現されている。

(2) 9月11日から12日にかけて実測値は急激に水温低下しているが、計算結果は必ずしもこれを良くシミュレートできていない。しかしながら午前2時頃から5時頃にかけて急低下の傾向を見せており、上記(1)の差異とともに、時間的遅れの問題と考えられないこともない。

(3) 午前5時以後は、計算値と実測値はきわめて良く一致している。

と見ることができよう。また、2段目と3段目の各地温および流出水温を見ると、地温はほぼ一定で流出水温はわずかながら昇温する傾向を見せており、本研究の解析モデルでは出水時における河川水温低下の主要原因は、あくまでインプットとしての雨水水温の低下にあることがわかる。出水時における小流域の河川水温変動特性については、小林⁹⁾(1977)も出水初期にいったん昇温しその後急低下することを報告しており、今回の調査結果や揖斐川、飛騨川¹⁰⁾の各上流部での調査結果とも併せ考えて、小流域での一般的特性と考えて良いように思われるが、水温低下の原因としては、小林⁹⁾の指摘する地下での冷却の他に、雨水自身の水温低下に着目する必要があると思われる。雨水の水温については、森田¹¹⁾(1971)による調査例や雨滴の水温形成機構に関する G. D. Kinzer ら¹²⁾(1951)の研究などがあるが、本研究が対象とするような現象の予測精度に耐え得る成果は見当たらない現状にある。パラメーターの諸数値とその定常性の吟味とともに今後に残された大きな課題と思われる。

6. 諸言

以上、出水時における河川水温の形成機構について、(1)詳細な観測事例を報告するとともに、(2)表面流、中間流などの流出成分ごとに雨水流出量(溪流流量およびトンネル湧水量)を解析するモデルとしてのタンクモデルの有用性を示し、(3)タンクモデルに熱容量をもたせて土と水の熱収支を計算するモデルを提示してその有用性を検証し、出水時における河川水温の形成には雨水水温の変動が主役を果している可能性が十分あることを明らかにした。今後は、雨水水温の予測手法も含めてさらに検討を加えるとともに、地温の実測を付加して現象への認識をさらに高めたいと考えている。

なお、現地観測においては名古屋大学理学部助教授、志知龍一先生、文献収集に際しては、名古屋大学水圏科学研究所教授、武田喬男先生ならびに水産庁東海区水産研究所、古田能久氏に、それぞれ多大なる御援助を賜わった。末尾ながら深甚なる謝意を表して結びとしたい。

参考文献

(1) 村本嘉雄、道上正規、下島栄一：ウォッシュロードの流下過程に関する数値解析、第18回水理講演会論文集、1974、(2) 金屋敷忠儀、芦田和男、江頭進治：山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究、第24回水理講演会論文集、1980、(3) 森田浩：日本における河川水温研究の概観と問題点、水温の研究、第11巻、第4号、1967、(4) 谷誠：湧水温の形成について、水温の研究、第21巻、第3号、1977、(5) 渡辺邦夫、茂木君郎、志知龍一：破砕帯内地下水流れの特徴とその数値シミュレーション、応用地質、第22巻、1号、1981、(6) 山内常生、志知龍一、飯田汲事：地殻変動の連続記録に現われる降雨によるノイズについて、測地学会誌、第16巻、第4号、1970、(7) 小葉竹重機：河川流域における洪水の形成過程に関する研究、京都大学学位論文、1979、(8) 中村俊六、建設省横山ダム管理所：横山ダム流域白濁源調査、横山ダム報告書、1981、(9) 小林大二：雨竜川源頭部における増水時の水温特性、日本陸水学会第42回大会講演要旨集、1977、(10) 中村俊六、神谷将弘：飛騨川濁水長期化現象軽減について、電力土木、177、1982、(11) 森田浩、河川水温の研究(Ⅱ)、水温の研究、第15巻、第2号、1971、(12) G. D. Kinzer, R. Gunn: The Evaporation, Temperature and Thermal Relaxation-time of Freely Falling Waterdrops, Journal of Meteorology, Vol. 8, No. 2, 1951