

釜淵森林理水試験第2回報告

地下水によると認められる減水について

丸 山 岩 三¹⁾
根 田 和 男²⁾

1 緒 言

森林の伐採が無降雨期間の減水状態にどのように影響するかについては、森林の存在を有利とするもの、不利とするものの両方の説がある。この問題についての1つの資料を提供するために、現在実行中の林業試験場秋田支場釜淵分場における森林理水試験の成績により、この問題について考察を加えたものの一部が本報告である。しかし、この報告は日流量を資料としているので、このような考察については本質的に不適當の点もあり、他の同種の試験結果を総合してこの点についての詳細の検討は後日にゆずりたい。すなわち、この報告は森林伐採が無降雨期間の地下水によると認められる減水にどのように影響するかについての中間報告である。

この報告のとりまとめについては、萩原防災部長より指導をうけた。また、観測資料は長年にわたる釜淵分場職員各位の労苦によるものであつて、その氏名は本試験第1回報告¹⁾にあり、1952年観測および資料の整備をした方は前年と同様である。また、本試験の実行にあつては、秋田営林局、真室川営林署の当局者各位より御協力を受けている。上記の諸氏に厚く感謝の意を表する次第である。

2 資 料

試験林と測定方法の詳細については、第1回報告を参照されたい。この点について略記したのが第1表である。

この観測結果の中から、資料としてとりあげたのは、地下水によると認められる減水の資料であつて、次のようなものである。

- (1) 1939～1952年の間の雪が流出に影響しないと認められる5月下旬より11月下旬までのもの。
- (2) 降雨終了後無降雨日数が5日以上にわたるものを一応とりあげ、この中から地表流下・中間流の影響すると認められる部分を除いた。この結果資料の期間が4日以下になつたものも除いた。
- (3) 流量の単位として、mm単位の日流量をとつた。これはこの種の検討には適當なもの

1) 防災部理水研究室長 2) 元防災部理水研究室、現在真室川営林署

第1表 試験流域の概況
Table 1. Out-look of the experimental watersheds.

項目 Item	記載 Description		備考 Remark
位置 Locality	山形県最上部及位村釜淵,最上川上流; Kamabuti, Nozoki Village, Mogami County, Yamagata Pref. Uppdr stream of the Mogami River.		38°56' N.L., Long. 140°15' E.
地質 Geology	凝灰炭, 頁岩; Tuff, Shale.		
流量測定 Stream gaging	45° 三角堰および自記水位計 (1938年に設置; 45° V-notch weir and water level recorder completed in 1938.		
雨量測定 Rain gaging	両沢の出口近くに設けられた自記および普通雨量計; A self recording and a usual rain gauge installed near the foot of the watersheds.		
年平均気温 Average annual temperature	9.6°C		1930~50
	I号沢 Watershed No. I	II号沢 Watershed No. II	
面積 Area (ha)	3.060	2.482	
平均傾斜 Average slope	34°30'	35°50'	
平均方位 Average bearing	E 21° S	E 5° S	
高 Elevation	160~245m	160~240m	
植生 Vegetation (1942)	針葉樹 Conifer 27m ³ /ha (スギ Sugi 80%), 広葉樹 Broad leaved tree 45 m ³ /ha (ナラ, ブナなど) Nara, Buna etc)	針葉樹 Conifer 28m ³ /ha (スギ Sugi 60%) Broad leaved tree 33m ³ /ha (ナラ, ブナなど Nara, Buna etc)	Sugi: <i>Cryptomeria japonica</i> D. Don. Nara: <i>Quercus serrata</i> Thunb. Buna: <i>Fagus crenata</i> Blume.
処理 Treatment	None	1947~48年に皆伐,以後毎年刈払う Woody Vegetation was clear cut in 1947~48, regrowth has been cut annually	
平均土壌深 Average soil depth(cm)	45.6	48.0	
	第1期 First period	第2期 Second period	第1期 First period
	1940~47	1948~52	1940~47
平均年降水量 Average annual precipitation (mm)	2616	2408	2616
平均年流量 Average annual runoff (mm)	2017	1713	2075
平均年流出率 Average annual runoff-ratio (%)	76	74	79
			第2期 Second period
			1948~52
			2408
			1883
			82
			Snow: About 40% of annual precipitation.

ではないが, もつと短い時間内の流量, たとえば秒単位の流量をとつての検討は次の機会にゆずりたい。

(4) このようにして, とりあげられた資料は伐採前 12 例, 伐採後 5 例, 計 17 例であり, 初日の流量は 0.1~0.2 mm 内外のものが多かったが, これが必ずしも降雨終了の翌日のものではないことは, (2) の項で述べたとおりである。

3 結 果

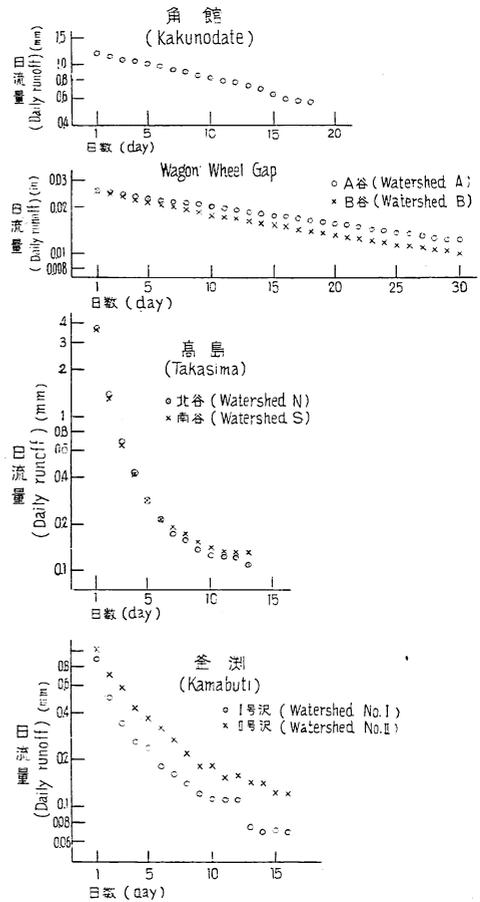
1. 減水曲線

資料の項で述べたように、資料としてとりあげたのは地下水によると認められる減水のものであり、具体的には次のようにした。すなわち、降雨の止んだ翌日からの経過日数を横座標に、日流量を縦座標（対数目盛）に、半対数方眼紙上にとつた場合に減水の後期のほぼ直線をなすと認められる部分をとつた。このようにとつた場合に、第1図にみられるように、降雨終了翌日から比較的直線に近いものと（角館¹⁰⁾、Wagon Wheel Gap²⁾）下方に凸の傾向をもつ場合（高島⁸⁾、釜淵）、後者の場合に、減水後期にみられる直線部をここで仮定したように、地下水による減水と考えることには疑問はあるが、Barnes¹⁾氏のように、半対数方眼紙上に直線を重ねて、減水曲線の構造を検討した例もあり、まずこの仮定を認めてよいのであるまいか。同氏の Storm seepage は、降雨による流出を地表流下・中間流・地下水によるもの（たとえば Linsley 氏等³⁾）に分類した場合に、中間流に相当するものと考えられるが、こ

これは地表流下によるピーク後2~3日して現われるものとしている。しかし、釜淵のように流域面積の小さい場合、中間流の期間はきわめて短いものと思われる。すなわち、概略の計算であるが、Darcy の法則の常数 k を $k=14.2d^2$ により⁵⁾、平均径 d を 0.5 mm として計算すると、 $k=3.55$ となり、水圧勾配 I を地表に平行と仮定して 30° とすると、流速は 2.0 m/hr を得る。釜淵の場合、最も長い斜面長を 100 m とすると、ほぼ 50 時間、すなわち、2日強で一応中間流が終ることになるが、緩斜地のあること、減水後期の水圧勾配の減少等を考慮に入れると、もつと後までつづくことは当然予想されるが、とにかく、大きな流域に比して比較的早期に中間流の終ることは予想されることである。

上記の考え方を認めると、減水の函数として考えられるのは指数型であつて、指数型の中の次の型を想定した。

$$q = q_0 e^{-ct} \dots \dots \dots (1)$$



第1図 減水状況の例
Fig. 1 Some examples of depletion

ここに q_0 : 正の常数であつて、対象としてとりあげた期間の初日より 1 日前の日流量を表わす、 e : 自然対数の底、 c : 正の常数、 t : q_0 のあつた日を 0 としての経過日数、 q : t 日における日流量である。また、この場合に、指数型を仮定すれば、適合度が高いのは当然である。

なお、この適合度の問題に関連して、(1) 式の $t=1$ の日より前に無降雨期間が何日かある場合には、上記のような指数関数を 2 つ重ねた形、すなわち $q_0' \cdot c'$ を常数として

$$q = q_0 e^{-ct} + q_0' e^{-c't'} \dots\dots\dots (2)$$

という式を想定すると、降雨の止んだ翌日よりの流量と比較的よく適合する。これは中野氏⁹⁾が高島の資料について検討した場合にも同様な形の関係式を見出している。

このようにして得られた $q_0 \cdot c$ の値の概要を略記したのが第 2 表である。

第 2 表 常数 q_0 と c の 値
Table 2. Values of constant q_0 and c

時 期 Period	流 域 Watershed	q_0 (mm)		c		備 考 Remark
		平 均 Average	範 囲 Range	平 均 Average	範 囲 Range	
第 1 期 First period	No. I (A)	0.115	0.024~0.280	0.207	0.088~0.385	サンプルの数 12
	No. II (B)	0.155	0.072~0.333	0.097	0.044~0.145	
	B/A	1.35		0.47		
第 2 期 Second period	No. I (C)	0.157	0.057~0.335	0.152	0.074~0.269	" 5
	No. II (D)	0.237	0.120~0.372	0.114	0.083~0.168	
	D/C	1.51		0.75		

2. 伐採の常数 q_0 に及ぼす影響

第 2 表にみられるように、第 1 期 (Ⅱ号沢伐採前)・第 2 期 (Ⅱ号沢伐採後) を通じて q_0 はⅡ号沢が大きい、平均の比をみると、一応伐採によつて q_0 が大きくなつたのではないかとと思われる。

伐採前後を通じての全期間のⅠ・Ⅱ号沢の q_0 (以下 $q_{01} \cdot q_{02}$ とする) の間の相関係数は第 3 表にみられるように有意である。ここに E を q_{01} に対応する q_{02} の期待値として、全期間の回帰方程式を作ると

$$E = 0.860 q_{01} + 0.070 \dots\dots\dots (3)$$

をうる。これより第 1 期・第 2 期の差の標準誤差をとり、 t -test をすると、 $t = 1.51 > 1.341$ ($\alpha = 0.2$) となり、伐採により差が生じたとはいえない。

上記の検定方法によつては伐採による差はあるとはいえないけれども、第 1 期・第 2 期についての相関係数をみると、第 3 表のように有意であるので、回帰方程式を作ると

$$\left. \begin{array}{l} \text{第 1 期} \quad E_b = 0.681q_{01} + 0.077 \\ \text{第 2 期} \quad E_a = 0.950q_{01} + 0.089 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となり (第 2 図参照)、伐採により生じたとみなされる量 Δq_{02} は $E_a - E_b$ より

第3表 相 関 係 数
Table 3. Correlation coefficients

	第 1 期 First period	第 2 期 Second period	全 期 間 Entire period
q_{01} と q_{02} Between q_{01} and q_{02}	0.713*	0.883*	0.801**
c_1 と c_2 Between c_1 and c_2	0.310	0.902*	0.352

註 Note: 1. 例えば q_{01} は I 号沢の q_0 を意味する。For example, q_{01} is q_0 of watershed No. I.
2. Symbols * and ** mean significant and highly significant respectively.

$$\Delta q_{02} = 0.269q_{01} + 0.012 \dots (5)$$

としてえられる。これに第2期の q_{01} の平均 0.157 mm をいれると $\Delta q_{02} = 0.054$ mm となる。

3. 伐採の常数 c に及ぼす影響

常数 q_0 の場合と同様に、第1期・第2期を通

じて、常数 c は I 号沢 (c_1) が II 号沢 (c_2) より大きく、また伐採により II 号沢の c が大きくなっているように見える。しかし、第1期・第2期を通じての $c_1 \cdot c_2$ の間の相関係数はきわめて小さく (第3表)、 q_0 の場合のような検定は不可能である。さらに、第1期と第2期の相関係数をみると、第3表のごとくであつて、 q_0 の場合と同様にして伐採による c の増加量を推定するのに危険のともなうことも当然予想されるが、同様の計算をすると (第2図参照)

$$\left. \begin{array}{l} \text{第1期} \quad E_b = 0.116c_1 + 0.073 \\ \text{第2期} \quad E_a = 0.490c_1 + 0.040 \end{array} \right\} \dots (6)$$

となり、伐採による増加 Δc は $E_a - E_b$ より

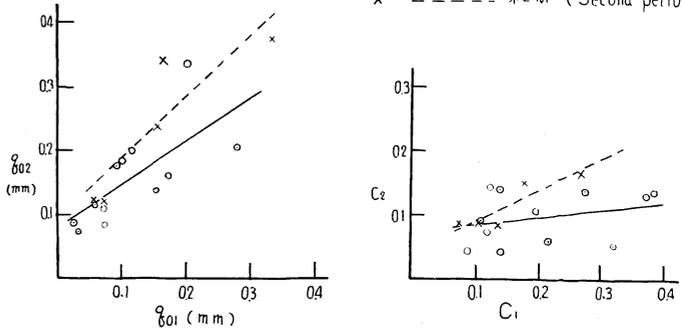
$$\Delta c_2 = 0.374c_1 - 0.033 \dots (7)$$

をうる。これに第2期の c_1 の平均 0.152 をいれると $\Delta c_2 = 0.024$ となる。

4 考 察

前項の結果を要約すると、伐採による影響としては、検定による差は有意とはいえないが、一応常数 $q_0 \cdot c$ の増加しているように見えることである。したがつて、伐採により地下水のみによる減水開始時の流量が大きくなつたと同じように、減水が急になつたように見えることである。

○ ——— 第1期 (First period)
x - - - - 第2期 (Second period)



第2図 両沢の常数 q_0 および c との関係
Fig. 2 Relation between q_0 and between c of watershed No. I and No. II.

この点の解明については、流域の植生による遮断量・蒸散量および伐採による土壌水分や透能等の検討がまだなされていないので、断定的にいうことはもちろん危険であるが、既存の資料の範囲内で考察をすすめることにする。

1. 常数 q_0 の増加

q_0 の増加したようにみえる理由として考えられることは、伐採による遮断量の減少が1つの原因となつていることは疑いのないことであろう。なお、この点については伐採したとはいえ、草本類は残つていることであり、遮断量はなくなつたとはいえないが、伐採前に比し、減少していることは確言してよいであろう。

さらに理由の1つとして、伐採による透能の減少を挙げてよいであろう。この点については、流域について特別の測定をしていないのであるが、四手井氏等⁷⁾の釜淵分場庁舎附近の有林地（スギ林）と無林地（5年前のスギ林の伐跡地）における比較結果が後者の吸水・透能の低下を報告しており、また伐採による透能の低下現象は一般に認められているとしてよいであろう。

また、この試験の第1回報告は、豪雨時の最大比流量と増水量の増加傾向を小数例からとはいえ示している。これは流量を時間の函数とみたときに、この函数の不連続でないことを認めるならば、流量のピーク時とあまり時間的に離れていない場合（常数 c の差が影響するほど時間的に十分離れていないことを意味する）、 q_0 が大きいのは最大比流量の増加傾向の延長と考えてよいのではあるまいか。したがつて、伐採による常数 q_0 の増加傾向を林地保水量の減少のみと結びつけて考えることは早計であろう。四手井氏等⁷⁾も有無林地の総含水量に大差の認められなかつたことを報告している。

2. 常数 c の増加

この点については、玉手氏⁹⁾の茨城県太田の試験地の森林伐採前後の常数 c についてそれぞれ $0.03279 \cdot 0.03845$ とした結果と定性的には全く同じ傾向を示しているが、異なるのはこの場合に、 q_0 の差は 1% 以下であつて、まず差はないとしてよいことである。

この理由として考えられるのは、大きな仮定であるかも知れないけれども、降雨による増水の前後において流域の土壌の総含水量に大差がないとすると、減水開始初期（蒸散量・蒸発量に比し、土壌の含水量がある大きさをもつている時期を意味する）においては、伐採により常数 q_0 が増加したと考えられる伐採後の減水が急であつて、 c の大きいことは当然であろう。しかし、この場合、植生の遮断損失による差と蒸散・蒸発による損失の差が問題になるのであつて、遮断量の少ない伐採後のこれによる流出増加分は、ある時期にその流量に加算されるので、この場合減水の比較的初期に流出に加わるものと考えたい。また、蒸散・蒸発による損失の差は土壌の含水量が十分に小さくなると考えられる減水の後期において敏感に影響してくることも予想され、このように考えると、伐採により一応考えられた常数 c の増加も無降雨日が

長くつづいた場合にまでいえるかどうか疑問であろう。すなわち、ここでとりあげた資料の中の多くは、地下水による減水の比較的初期に終わっていると思われるのである。

3. 常数 $q_0 \cdot c$ についての総合的考察

別々に考察を加えた常数 $q_0 \cdot c$ について、同時に厳密に考察をすすめるには、 q_0 と c との間の関係の確立が必要であるが、 $q_{01} \cdot c_1$ および $q_{02} \cdot c_2$ 間の共通した関係式を見出すのが、困難であるために、厳密を欠くけれども次のようにして考察を加えた。

(4)~(7) 式に第2期の常数 $q_{01} \cdot c_1$ の平均 $0.157 \text{ mm} \cdot 0.152$ をいれて、Ⅱ号沢を伐採しなかつた場合の第2期の減水状況を推定し、Ⅱ号沢の第2期の現実の減水状況とを対照すると、次式をうる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{伐採前} \quad q_{02} = 0.184e^{-0.091t} \\ \text{伐採後} \quad q_{02} = 0.237e^{-0.114t} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

今(8)の両式 q_{02} を等しいとおくと、 $t=10$ 日をうる。すなわち、一応この条件下では10日目にほぼ等しい流量になり、以後伐採後の流量が小さくなることになる。しかし、もちろん第2表にみられるような両沢の流出状態の本来の相違のために、 t が10日前後の期間をもちながら、Ⅰ・Ⅱ号沢の流量が交叉している例は伐採後の5例中1つもない。

次に(8)式より10日までの流量の和を計算すると、伐採前 1.03 mm 伐採後 1.17 mm となり、その比は $1.17/1.03=1.14$ となる。また、この減水期間の両沢の総流量が 1 mm 以上に達した場合の平均総流量(単位 mm) はⅠ・Ⅱ号沢についてそれぞれ第1期 $1.43 \cdot 1.74$ 、第2期 $1.33 \cdot 1.84$ であつて、Ⅱ号沢のⅠ号沢に対する比は第1期のものは $1.74/1.43=1.22$ となり、 $1.33 \text{ mm} \times 1.22=1.62 \text{ mm}$ を第2期のⅡ号沢を伐採しないと仮定した場合の平均総流量と考えると、これの伐採後の伐採前に対する比は $1.84/1.62=1.14$ となり、上記の計算による比 1.14 とほぼ一致する。

要するに、森林の伐採により、地下水のみによると考えられる減水は、はじめの流量が大きくなると同時に、減水の割合も大きくなつたように思われる。しかし、これは地下水による減水の初期のみをとりあげたと考えられるので、土壤水分が少なくなつて、植生の蒸散・蒸発が敏感に影響すると考えられるような状態になると、異つた現象がみられるかもしれない。

5 要 約

1. この報告は第1表に概要が示されている釜淵森林理水試験の地下水のみによるとみなされる無降雨期間の減水状態に及ぼす森林伐採の影響を検討したものである。

2. (1) 式のような指数式を仮定し、常数 $q_0 \cdot c$ に及ぼす伐採の影響を検討した。これらの常数は第2表にみられるように、いずれも伐採により一応増加したように見える。この場合統計的処理をすると、有意の差があるとはいえない。

しかし、Ⅰ・Ⅱ号沢の q_0 と c の間の相関係数は第3表のようにだいたいにおいて比較的

高いので、第 1 期・第 2 期別に (4) (6) 式にみられるような回帰方程式を作り、 $E_a - E_b$ より伐採による変化を推定した。(5) (7) 式がその変化を示している。

これらの式に第 2 期の I 号沢の平均の q_0 と c をいれて、II 号沢の第 2 期と伐採しないと仮定した場合の第 2 期の状態とを比較対照したのが (8) 式である。すなわち、伐採によりはじめの流量が高くなり、減水の割合も大きくなつたように見えるが、(8) 式より計算すると、10 日で日流量が等しくなることになる。

さらに (8) 式よりこの 10 日までの総流量を計算すると、伐採しない場合 1.03 mm、伐採した場合 1.17 mm となる。これは I・II 号沢の総流量の伐採前後の平均値から想定した II 号沢の伐採しないと仮定した場合に対する伐採後の現実の平均総流量の比は上記の $1.17/1.03 = 1.14$ にほぼ一致する。

しかし、これらの資料としてとりあげた期間は地下水のみによると認められる減水の初期をとりあげたと考えられるので、土壤水分が少なくなつて、植生による蒸散が敏感に影響すると考えられるような状態になると、異つた現象がみられるかも知れない。

引用文献

- 1) Barnes, B. S.: The Structure of discharge-recession curves. Trans. Amer. Geophys. Union p. 721—725 (1939).
- 2) Bates, C. G. and A. J. Henry: Forest and stream-flow experiment at Wagon Wheel Gap, Colo. Month Weath. Rev. Suppl. No. 30 (1928).
- 3) Linsley, R. K. and others: Applied hydrology. p. 387~388 McGraw-Hill Book, Comp. New York (1949).
- 4) 丸山岩三, 猪瀬寅三: 釜淵森林理水試験第 1 回報告, 林業試験場研究報告, No. 53, p. 1~46 (1952).
- 5) 物部長穂: 水理学, p. 465~466, 岩波書店, (1939).
- 6) 中野秀章: 竜ノ口山水源涵養試験に関する未発表資料.
- 7) 四手井綱英・菅原敬二・片岡健二郎: 有無林地表層土の含水量変化に就て, 林業試験集報, No. 60, p. 31~43 (1951).
- 8) 武田繁後: 竜ノ口山水源涵養試験第 1 回報告, 施業参考資料第 7 輯, 農林省山林局 (1942).
- 9) 玉手三稜寿: 有林地と無林地の水源涵養比較試験, 林業試験報告, No. 23, p. 63~100, (1923).
- 10) 吉田重助: 角館森林治水試験地に於ける溪水観測成績 (第 1 回報告), 森林治水試験彙報, No. 16, p. 1~23 (1937).

IWAZO MARUYAMA, KAZUO NETA: Experiment of forest influences upon streamflow at Kamabuti. The second report.

—On the depletion due to by ground water—

Résumé

1. This paper deals with effects of clear cutting upon depletion of streamflow due to the ground water after rain. The conditions of the experimental watersheds are summarized in Table 1 (p. 124).

2. Exponential function presumed for discussion is as follows:

$$q = q_0 e^{-ct} \dots\dots\dots (9)$$

where q is daily runoff; q_0 is a positive constant representing daily runoff of the first day in millimeter of water height though it is not always of the first day after rain; e is the base of natural logarithm, c is a positive constant, t is the number of days passed from the day of q_0 .

Table 2 (p. 126) shows the values of constants q_0 and c . These constants seem to become larger by clear cutting, although not of statistical significance. Correlation coefficients between q_{01} and q_{02} and c_1 and c_2 are shown in Table 3 (p. 127). Here, we made regression equation about q_{01} and q_{02} and about c_1 and c_2 as shown in Fig. 2 (p. 126)

$$\left. \begin{array}{ll} \text{First period} & E_b = 0.681q_{01} + 0.077 \quad E_b = 0.116c_1 + 0.073 \\ \text{Second period} & E_n = 0.950q_{01} + 0.089 \quad E_n = 0.490c_1 + 0.040 \end{array} \right\} \dots\dots (10)$$

where E_b and E_n are estimated values of constants q_{02} and c_2 of watershed No. II. Effects of clear cutting upon constants q_{02} and c_2 (Δq_{02} and Δc_2) were estimated as the difference between E_n and E_b as follows:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta q_{02} = 0.269q_{01} + 0.012 \\ \Delta c_2 = 0.374c_1 - 0.033 \end{array} \right\} \dots\dots (11)$$

Formulas (11) are considered to represent the changes of q_0 and c due to clear cutting. Substituting average q_{01} ($=0.157$ mm) and average c_1 ($=0.152$) for second period in formulas (11) we get normal depletion curve of watershed No. II under an untouched condition as:

$$q_{02} = 0.184 e^{-0.091t} \dots\dots (12)$$

When actual average q_{01} and c_1 are substituted in exponential equation above mentioned, the following formula is obtained.

$$q_{02} = 0.237 e^{-0.114t} \dots\dots (13)$$

Values of q_{02} in formulas (12) and (13) become equal when $t=10$ days. Total runoff computed from formulas (12) and (13) ranging $t=1$ to $t=10$ are 1.03 and 1.17 mm respectively. The ratio of 1.17 to 1.03 is 1.14.

The ratio of the average total runoff of watershed No. II to that of watershed No. I is 1.22 for the first period and the average total runoff of watershed

No. Ⅱ is 1.33 mm for the second period. If watershed No. Ⅱ were not clear cut, the average total runoff would be the product of 1.33 and 1.22 i. e. 1.62 mm. The ratio of the actual average total runoff of watershed No. Ⅱ for the second period is 1.84 mm, the ratio of 1.84 mm to 1.62 mm is 1.14 and this is equal to the ratio 1.14 above mentioned.

It is considered that the data of this paper are based upon those for comparatively early period in the depletion due to the ground water. However, a different result may be obtained under less soil moisture as well as more vegetative transpiration.