

森林伐採または森林生長が流出量におよぼす 影響の検出法に関する考察

文 部 教 官 野 口 陽 一

Yooichi NOGUCHI :

A Study on the Method of Finding the Effect of Forest
Cutting or Forest Growth on Run-off

目	次	Page	Page
I 緒 言		91	
II 予備的考察		92	
III 従来の森林理水試験における 比較法の数例		95	
§ 1. 試験の種類		95	
§ 2. 実 例		96	
(1) Emmmental		96	
(2) 高 島		96	
(3) Wagon Wheel Gap		97	
(4) Coweeta		98	
(5) 釜 淵		98	
§ 3. 考察——対照流域について		98	
IV 愛知県演習林における測定結果		101	
§ 1. 平行法（東山と穴の宮の比較）		101	
§ 2. 愛演における対照流域法の 予備的考察		102	
(1) 対照流域としての価値		102	
(2) 雨量に関係のない流出量の バラツキの近似計算		104	
i) 単独法, ii) 対照流域法			
V 有意差検定法の利用		106	
VI 要 約		108	
参 考 文 献		109	
Résumé		109	

I 緒 言

森林理水試験の方法は単独法、平行法、対照流域法の3種類に大別できるが、最後の対照流域法は前2者の欠点を相補うものとして生れたとみることができる。対照流域(control area)から採られた資料(data)の処理方針を従来の報告についてみると、それは本法の開始された当時から今日に至るまで次第に変化進歩して来ている。しかし森林理水試験の実行上、あるいは新しい試験を計画する場合にも、その方針は、一応予め確立しておくことが必要であるとも考えられる。本研究は東京大学農学部附属愛知県演習林内の量水試験地に、将来対照流域法を実施¹⁾する場合を想定し、対照流域はどんな条件を具備しておればよいか、採られた data はどんな具合に用いられるべきか等に関して最も基礎的に考察したものである。浅学非才で慥からぬ誤りを犯していることを深く恐れているが、多くの方からこれらを指摘して戴くことを期待している。稿を

1) 現在も一部においては対照流域法を実施している。

起すに当り、終始御懇篤な御指導と激励とを賜り、かつ丁寧に原稿を訂正して戴いた荻原教授および最初の稿を読んで種々の注意をして下さった丸山農林技官に対し厚く御礼を申上げる次第である。なお太数字は巻末参考文献の番号を示す。

Ⅱ 予 備 的 考 察

森林理水試験の1つの目的は森林の有無あるいは林況の良否が流出量におよぼす影響を知ることである。森林理水試験は野外試験であつて、重要な測定条件の1つである雨量は、その変化を人為的に小さくすることが現在の段階ではできないものである。流出量は年々の雨量変化に伴つて変化し、森林の伐採等が流出量におよぼす影響は雨量の変化が流出量におよぼす影響に比べて必ずしも顕著ではないから、この2つを分離しなければ森林伐採の影響はわからない。したがつて一定の森林状態において雨量が流出量に対してどんな影響をおよぼしているかをしらべることは、森林伐採の流出量におよぼす影響を知るために必要な予備知識を与えることになるであろう¹⁾。森林伐採等の影響は比較的小さいとはいえ、人為的に変化させることができる点に大きな意味をもっているから、これを求めることが試験の目的になるのである。

年流出量の年雨量に対する関係は従来の研究ですでに明かにされているところであるから、ここに繰返すまでもないかもしれないが、相当長期間にわたる愛知県演習林の観測成果を利用し⁷⁾、また他の試験結果を総合的に考えて後章に対する予備とする意味で、以下にその実例を掲げる。東京大学農学部附属愛知県演習林における年流出量を年雨量階級別に配列すると第1

1) 統計学の教えるところでは、雨量を統計的管理 (statistical control)⁽¹¹⁾として、これに対する流出量の回帰を用いれば、雨量の変化に依存しない流出量自身のバラツキを知ることができる。本章は年雨量に対する年流出量の回帰についての基礎的考察とみることもできるが、回帰という概念を用いたのは次章以下である。

第1表 雨量階級別の流出量および消失量
(単位 100 mm)

Table 1. Run-off and losses at Tokyo University Forest in Aichi rearranged regarding with rain class.
(100 mm unit)

流域 Watershed	A		B		C	
事項 Item	流出量 Run-off	消失量 Losses	流出量 Run-off	消失量 Losses	流出量 Run-off	消失量 Losses
雨量階級 Rain class						
12					6	6
					6	6
					5	7
					6	6
13						
	6	8	5	9	8	6
	5	9	6	8	7	7
14			6	8	8	6
			4	10	7	7
			5	9		
15	6	9	7	8	10	5
	6	9			7	8
	5	10				
16	8	8	8	8	10	6
	7	9			10	6
	8	8			10	6
17	7	10	7	10	12	5
			9	8	10	7
18	10	8	10	8	12	6
	9	9	8	10	11	7
	10	8			12	6
19	12	7	11	8	13	6
	12	7	10	9	13	6
	10	9	10	9		
	9	10	10	9		
20	10	10	10	10	13	7
	12	9	12	9	13	8
21	11	10	11	10		
			12	9		
22	13	9	12	10		
	13	9				
23	13	10	15	8		
24			16	8		

場 所：東京大学農学部附属愛知県演習林
流域名：A 東山, B 白坂, C 穴の宮
観測期間：1930—1951

第2表 100 mm 毎の年雨量階級に応ずる年流出量を，各試験地から1個ずつ任意抽出し
これらに対する代表値を想定したもの (100 mm 単位)

Table 2. Data of annual run-off—for each class of rain a sample is randomly taken from
each experimental watershed—and their presumed representative values. (100 mm unit)

Water- shed 流域 雨量 階級 Rain class	(1)	(2)	(3)		(4)	(5)			(6)	(7)		(8)	(9)	(10)
	Wagon Wheel Gap, Area A.	Takashima, South Valley	Emmental		Coweeta, Area No. 18	愛知県演習林 Aichi			Kamabuchi, Valley I.	宝川 Takaragawa		流出 模 型 量 Model of run-off	雨量 階級 Rain class	消 失 量 Losses
	(control)	高 尾 谷	Sperbel.	Rappen.		C	A	B		Shozawa	Honryu			
4	2											1	4	3
5	1											1	5	4
6	2											2	6	4
7												2	7	5
8		1										3	8	5
9												4	9	5
10		1	4									4	10	6
11				5								5	11	6
12		3				6						5	12	7
13		4			4							6	13	7
14		7	7			8	6	5				7	14	7
15			11	9		10	6	7				7	15	8
16			9	10	5	10	8	8				8	16	8
17			11		8	12	7	7				9	17	8
18				12	8	12	10	10				10	18	8
19			10	13	10	13	12	11				11	19	8
20				12		13	10	10				12	20	8
21			11	13	11	13	12	12	13			13	21	8
22							13	12	15			14	22	8
23							13	15				15	23	8
24								16		15		16	24	8
25									19	17		17	25	8
26									19	17		18	26	8
27												19	27	8
28									23	20		20	28	8
29												21	29	8
30												22	30	8
31											29	23	31	8
32												24	32	8
33											30	25	33	8
34									29			26	34	8
35											28	27	35	8
36											33	28	36	8
37										24	31	29	37	8
38											33	30	38	8
39												31	39	8
40												32	40	8
41											33	33	41	8
42												34	42	8
43												35	43	8
44												36	44	8
45												37	45	8
46												38	46	8
47											41	39	47	8
48												40	48	8
資料の出 所 Source of data	(2)	(4)	(1)	(3)	(7)	(6)	(5)							

表のとおりとなる。この表から、年流出量は年雨量の増加に伴ってほぼ同率を以て増加する関係にあることがうかがわれる。

従来他の森林理水試験の成果からも、年流出量の年雨量に対する関係はこれとほぼ同様のことが認められている。

今各地の試験成果について、各雨量階級から任意に1個ずつの年流出量を抽出した結果は第2表のとおりである。1地域の試験結果からは得られないような雨量の広い範囲にわたって、雨量に関係する年流出量変化のありさまを、地域の差を無視してこの表から求めようとするのも無理ではない。すなわち第2表における各地の観測値が仮に同一の源から採られた標本(sample)であると仮定して、年雨量の各階級に対応する年流出量の代表値を想定して、これを第2表(8)欄に模型的に示したようなものと考え、各雨量階級に属する標本はほぼこれに近い値を示しているのである。この模型はす

でによく知られている雨量と流出量との関係(第1図)を数字の模型で表したものにほかならない¹⁾。異なる流域を通じてこのあてはめができる²⁾こと、すなわち森林状態その他流域固有の因子の影響が皆違うことを無視しても一貫した法則に実際の観測値がほぼあてはまることは、流出量に対しては雨量以外の因子は、雨量に比べて遙かに小さい影響しかおよぼさないことを物語っている。100 mm 括約

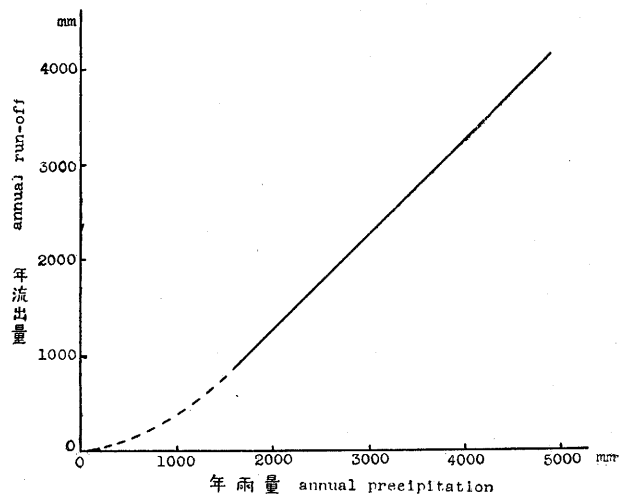


Fig. 1. Relation between annual precipitation and run-off.

第1図 年雨量に対する年流量の関係

値を用いたのは、本章の段階では森林伐採の影響を推定するのが目的ではないからである。

(附) 数字模型使用の利点について

第2表(8)欄のように流出量の模型を作つた後、これによつて消失量(=雨

第3表 同じ雨量に対して流出量の変化があるとき、流出量の変化係数と、消失量のそれとは、雨量に対する百分率の大きい方がより小さくなることを示す数字模型

Table 3. A model which shows that the coefficient of variation of run-off is smaller than that of losses when the percentage of run-off is larger than that of losses.

Rain 雨量	Run-off 流出量	Losses 消失量
10	7	3
10	8	2
10	6	4
10	7	3
10	5	5
変化係数 C. V.	0.15	0.29

- 1) 模型では記載の簡単のため小数を用いながつたので、不連続の点があるようにみえるが、真の代表値としてはこれらを移動平均したもの(連続的に変化する値)を考えている。
- 2) ここに用いた資料には寒帯や熱帯に属するものは含まれていないから当然、それらの地域に拡張して考えることは危険である。

量一流出量)を求めると、これは雨量が 1500 mm 以上では一定となる。しかし、もし生まの流出量 data から個々に消失量を求め、これと雨量階級とを比較しても、消失量は雨量が 1500mm 以上では一定になるという推定を行うことが前のように容易ではない¹⁾。それは流出率が 50% 以上(消失率が 50% 以下)のときは、同じ雨量階級における流出量の変化係数よりも、そのときの消失量の変化係数が大きくなる。すなわち偶然的な変化がこの場合消失量では目につき易いからである。(第3表参照)これと逆の関係にある場合の例としては Wagon Wheel Gap を挙げるができる。第4表においては雨量階級の上昇に伴い消失量が増加することは直ちに認められるが、流出量は雨量に対してどんな関係にあるか直接には判定し難い。この場合は前とは逆に消失量の変化の模型(第5表)を通じて流出量の変化の有様を判断することができる。

第4表 Wagon Wheel Gap における
年雨量階級別年消失量および年流出量(単位 10 mm)

Table 4. Annual losses and run-off rearranged by rain class at Wagon Wheel Gap. (10mm unit)

Rain 雨量	Losses 消失量	Run-off 流出量
43	25	18
46	35	11
47	35	12
48	40	8
51	37	14
54	39	15
56	45	11
57	43	14
58	44	14
62	47	15

第5表 雨量が少い場合の消失量および
流出量の模型(単位 10 mm)。(雨量の範囲は Wagon Wheel Gap のもの)

Table 5. Models of losses and run-off when precipitation is small as at Wagon Wheel Gap. (10 mm unit)

Rain 雨量	Losses 消失量	Run-off 流出量
43	29	14
44	30	14
45	31	14
46	32	14
47	33	14
48	33	15
49	34	15
50	35	15
51	36	15
52	37	15
53	38	15
54	39	15
55	40	15
56	41	15
57	42	15
58	43	15
59	43	16
60	44	16
61	45	16
62	46	16

Ⅲ 従来の森林理水試験における比較法の数例

§ 1 試験の種類

従来の森林理水試験を大別し

(1) 単 独 法……………単独の流域で森林伐採前後の流出量その他²⁾を比較する方法。

1) 特に data が少い場合にそうである。

2) 種々の測定値が比較されたが結局流出率の比較に落着いているようである。平行法でも同じ。

(2) 平行法……………最初から森林状態の異なる2流域の流出量その他を比較する方法。

(3) 対照流域法……………2流域のうち1つを対照流域 (control area)¹⁾とし、他方の流域の伐採前後の流出量その他を、対照流域の資料を標準として比較する方法。
とすることができる²⁾。

これら3方法の長所短所は萩原教授によつて指摘³⁾されているからここには述べないが、(1)、(2)の欠点を相補う方法としての(3)が如何なる方法論的根拠を持つているかに関する考察を行おうとするに当たり、順序として次に試験の数例を掲げる。

§ 2 実 例

(1) Emmental¹⁾ H. Burger は, Emmental の試験結果について、年流出率を2流域について比較すると、

Sperbelgraben (林況良好) ……………906 mm/1614 mm \approx 56% (分母、分子とも12ヶ年平均値)

Rappengraben (林況不良) ……………1076 mm/1668 mm \approx 65% (同上)
となり、R谷の流出率が9%多いが、その中4%は湧泉、雨量測定上の定誤差、海拔高の差による蒸発量の差を考慮して補正し、林況の差による流出率の差を5%と判断している。この補正計算

は認められるが、補正はこれだけでは不十分のように思われる。すなわち筆者は2流域の雨量が異なることを考慮する以上、これに基づいて流出率を補正することが必要ではないかと考える。

第2表(8)欄の流出量モデルはEmmentalだけについて考えても適用できるであろうから。この雨量と流出量の関係から当然得られる流出率のあり方は第6表に示される。これによればS谷およびR谷の雨量が1600mm程度では雨量に4%の差があることを認める以上、流出率には約2%の差が自動的に表れることを認めなければならない。林況の影響の差を求めるには前に得た5%からさらにこの2%を差引かねばならないのではあるまいか。

第6表 雨量の増加率に伴う流出率の増加を示す模型

Table 6. A model showing the increase of run-off percentage with respect to rain increase.

雨量 Rain	雨量の増加率 Percentage of increase of rain %	流出量 Run-off 量	流出率 Run-off percentage %	流出率の増加 Increment of run-off percentage %
100 mm		100 mm		
15	7	7	47	3
16	8	8	50	3
17	6	9	53	3
18	6	10	56	2
19	5	11	58	2
20	5	12	60	2
21	5	13	62	2

(2) 高島^(4)の1) 岡山県上道郡高島村において、昭和12年から同14年まで森林状

1) 2流域の中の1つから他流域のdataを検討する際の基準となるdataを探る。そのような目的のために設けられる流域を対照流域 control watershed or control area といい、伐採の行われる流域を処理流域 treated watershed という。(2),(3)

2) 萩原貞夫：森林理水・砂防 p. 11 所載のわけ方に従った。歴史的には平行法が最も古い。

3) 同上

態に殆んど差がない南北両谷の流出率の比較は次の通りである。

	北 谷	南 谷
昭和 12 年	22.8%	21.1%
" 13	31.0	30.0
" 14	8.1	8.4

大体において北谷の流出率が大きいと認められるがその理由を報告者は、主として集水地の山腹傾斜が南谷よりも北谷においてより大きいことであるとしている。

この時期までの本試験は、平行法というよりも寧ろ対照流域法の思想をもっているもので、傾斜による流出率の差を、森林状態の相異によるそれに補正すべきものとして求めていると解される。

(3) **Wagon Wheel Gap**⁽²⁾ これは対照流域法の例であるが、まづ説明に用いる符号を次のように規約する。

P : 雨量, R : 流出量, 添字 C, T は流域の区別を示し, 添字の後に dot を附して伐採後のものであることを示す。その配置は第7表のようである。

伐採前8年, 伐採後7年間の各平均値について,

$$P_C = 534, P_T = 536; R_C = 154, R_T = 157 \text{ (単位 mm)}$$

$$P_{C.} = 537, P_{T.} = 529; R_{C.} = 157, R_{T.} = 185$$

を比較するに当つて, Bates と Henry は

$$(R_{T.} - R_{C.}) - (R_T - R_C) = (R_{T.} - R_T)$$

$$-(R_{C.} - R_C) = 25 \text{ mm} \cdots \cdots (\text{流量の差})$$

を伐採前後で差引く), あるいは

$$R_T/R_C = 1.02 \longrightarrow R_{T.}/R_{C.} = 1.17 \cdots \cdots (\text{流量の比を伐採前後で比較する})$$

という2とおりの比較を行つている。たゞし雨量については, P_T が他に比して小さいのは伐採によつて風の影響を受け, 雨量計の受け得る量が減少した——すなわち測定上の定誤差のため見掛け上小さくなった——としている。これは基地雨量でなく, 全地域雨量を考えるとときは

$P_C - P_T$ と $P_{C.} - P_{T.}$ とは殆んど変りがない筈であるという考え方を暗示していると解される。

また『各年における R_T/R_C の中, 特に大きい値を示すのは雨の影響であることはわかるが, R_T/R_C の “normal” な値を求めることはできない。たゞ 1916—17 年と 1923—24 年とを比較するのが安全 (safe) であろう』と述べているのは,

$$\text{伐採前 (1916—17)} \quad P_T/P_C = 579/581 = 0.997$$

$$\text{〃 後 (1923—24)} \quad P_{C.}/P_{T.} = 426/432 = 0.985$$

第7表 対照流域法における観測値の配置

Table 7. Lay out of observed values taken from both control and treated areas.

watershed 流域	C	T
期間 period	control area	treated area
before cutting 伐 採 前	R_C	R_T
after cutting on T Tのみ伐採の後	$R_{C.}$	$R_{T.}$

註. 伐採後を示すため添字の次に dot を附す。

すなわち処理流域の後期において雨量は比較的に減少しているにもかかわらず

$$(1916-17) R_T/R_C = 250/245 = 1.02$$

$$(1923-24) R_T./R_C. = 204/180 = 1.13$$

流出量は比較的に増加している。したがってこの流出量の増加は雨量の影響ではなく、森林伐採の影響であると考えても誤りを犯す率は少い（安全）という意味に解釈できる。しかしこのような論法を用いる限りにおいては、折角測定した各年のすべてのデータを最も有効に使用したとはいえないのではあるまいか¹⁾。

(4) Coweeta⁽³⁾ M. D. Hoover は Coweeta の観測結果から伐採以前の月流出量を用い R_T の R_C に対する回帰直線式

$$\hat{R}_T = 0.972 R_C - 0.195^{2)}$$

を求め、伐採以後の月流出量 $R_C.$ を式中の R_C に代入して得た左辺の値 \hat{R}_T を、仮に伐採を行なわなかったと考えた場合 T 流域に推定される流出量とし、これと実際の流出量 $R_{T.}$ との差を伐採の影響による増加分とした。雨量は論外におかれているようであるが、実は 2 流域において殆んど等しいことが予め確められている。

(5) 釜淵⁽⁴⁾ 丸山・猪瀬は釜淵のⅠ号沢 (C)、Ⅱ号沢 (T) において先づ対照流域の流出量 R_C , $R_C.$ に対する処理流域の流出量 R_T , $R_{T.}$ の回帰からの偏差が伐採前後で有意差があるかどうかを検定している³⁾。そうした後に伐採前後における 2 つの回帰直線式

$$\hat{R}_T = 1.005 R_C + 3.1$$

$$\hat{R}_{T.} = 1.046 R_{C.} + 17.3$$

を求めこの 2 式から

$$\hat{R}_{T.} - \hat{R}_T = 0.041 R_C + 14.2^{4)}$$

を得、この R_C に適宜の値を代入して $\hat{R}_{T.} - \hat{R}_T$ を求め伐採による流出量の増加分と推定した。

§ 3. 考察——対照流域について

月流出量に対して回帰直線を用いる方法は Hoover から丸山に受け継がれたが、丸山がこの回帰を用いる際、まず伐採前後の流出量自身の変化に有意差があるかどうかの検定を行つたことは、森林理水試験発展史の上で特に注目すべき意義をもつていると私には思われる。それは何故かという、現在森林伐採の流出量に対する効果はいまだ必ずしも質的に明かにされているとはいえないからである。

対照流域は Wagon Wheel Gap においては単に比較の対照として用いられたが、Coweeta

1) 尤も Bates と Henry は他の多くの角度から資料を検討しているが、毎年繰返し測定された data が statistical control としては用いられていない。

2) 夏季。

3) この検定に関する考察が本研究の主題である。

4) 夏半年の式。

を経て釜淵に至つては、対照流域は単に比較の対照としてではなく、統計的管理 statistical control となる data を採るための流域として用いられたといつてよいであろう。他流域の流出量がどうしてこのような意義をもつかについて考察しよう。

処理流域の流出量 R_T はまず同流域の雨量 P_T に対して回帰直線をもつことは明らかである。(第2図)。そして流出量の、雨量に対する回帰からの偏差は雨量によつて説明のつかない(雨量に依存しない)ものであることも回帰直線の意義から自ら明らかである¹⁾。対照流域を用いる必要のない場合(IV. § 2 例1)についてはこれ以上述べる必要はない。対照流域を用いるのは R_T の P_T に対する回帰からのバラツキよりも R_T の R_C

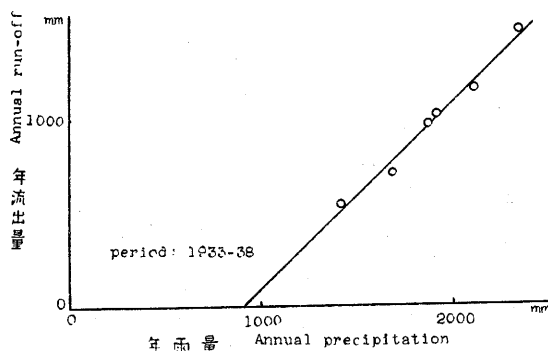


Fig. 2. Linear regression of annual run-off on annual precipitation at Shirasaka.

第2図 白坂における年雨量に対する年流出量の直線回帰

に対する回帰からのバラツキが小さい場合(IV. § 2 例2)である。本質的には R_T は雨量 P_T に依存しているが、見掛け上²⁾、 R_T の P_T に対する依存関係は簡単に直線回帰のあてはめがで

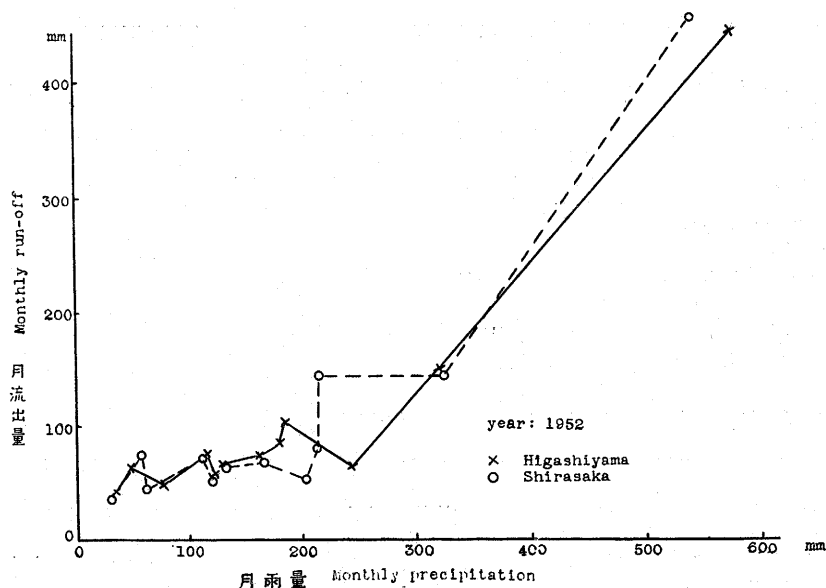


Fig. 3. The relation between monthly precipitation and run-off at Higashiyama and at Shirasaka.

第3図 東山および白坂流域における月雨量に対する月流出量の関係

- 1) 雨量に対する回帰を算定する場合は便宜上雨量に誤差なしとの仮定を前提としている。
- 2) たとえば、月毎に区切つてデータを採る場合、本来1個の測定値として得らるべき雨量や、流出量が不当に区切られて前後の月にわけられるために起ることなどを指す。

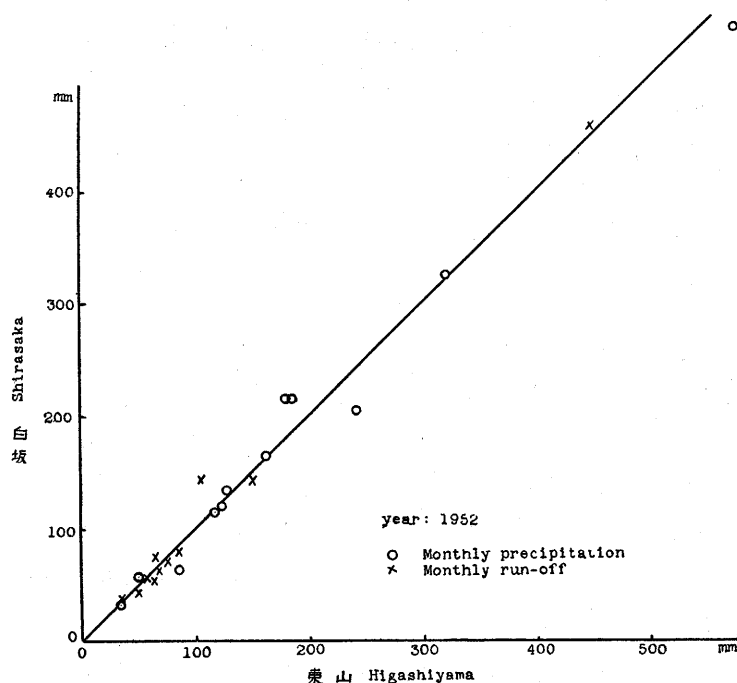


Fig. 4. The relation between Higashiyama and Shirasaka using data of monthly precipitation and monthly run-off.

第 4 図 月雨量および月流出量を用いた東山に対する白坂の関係

きない（あるいは仮にあてはめても極めて適合度の悪い）ものとなつて現れる。この依存関係不明瞭化（複雑化）のありさまは、対照流域の R_c と P_c との間でも殆んど類似である。（第 3 図）。そのとき両流域の雨量 P_c と P_T の変化のありさまが殆んど同様であるならば R_c と R_T との間には容易に直線回帰¹⁾ が認められるものとなり（第 4 図），その回帰からのバラツキは雨量に依存しない流出量自身のバラツキであると考えられるのである。従つて， R_c は P_T の代り役をするものとして測られ，しかも P_T が R_T に対してもつであらう“直線回帰で表わされるような影響”を P_T 自身よりもより明瞭に示すものとして用いられるのである。

このように考えると対照流域の林相は必ずしも処理流域のそれと同じでなければならぬことはない。処理流域の地域雨量と殆んど同じ雨量を受けるような流域であれば，寧ろ裸地であつても差支えないであらう。たゞ対照流域の状態は前後に変化しないということが必要であるが，裸地はこの点で安定した林地に劣るであらう。そして，それが果して対照流域としての価値をもつかどうかは，IV. § 2 に示すように，使用の目的に従つて検定計算を行つてみなければ何ともいえない。

1) この際 R_c に誤差なしと仮定することは前に同じ。雨量の誤差に比して，流出量の誤差は一般に小さいから，この仮定はより満足される。

Ⅳ 愛知県演習林における測定結果

§ 1. 平行法（東山と穴の宮の比較）

2流域の流出率を比較する場合に、雨量の相違を無視して、流出率のみを比較することに対する疑問を前に述べたが、それではこれを如何にして正しく比較するかについて、実例を以て考察する。年流出量の年雨量に対する回帰直線は東山、穴の宮2流域について第5図のようになる。この図には流出率を示す線が描かれているので、2流域の流出率を比較するには、比較しようとする場合の雨量条件（雨量軸における位置）が定まりさえすれば、それに応ずる2つの回帰直線上の点が何%を示すかを読めばよい。

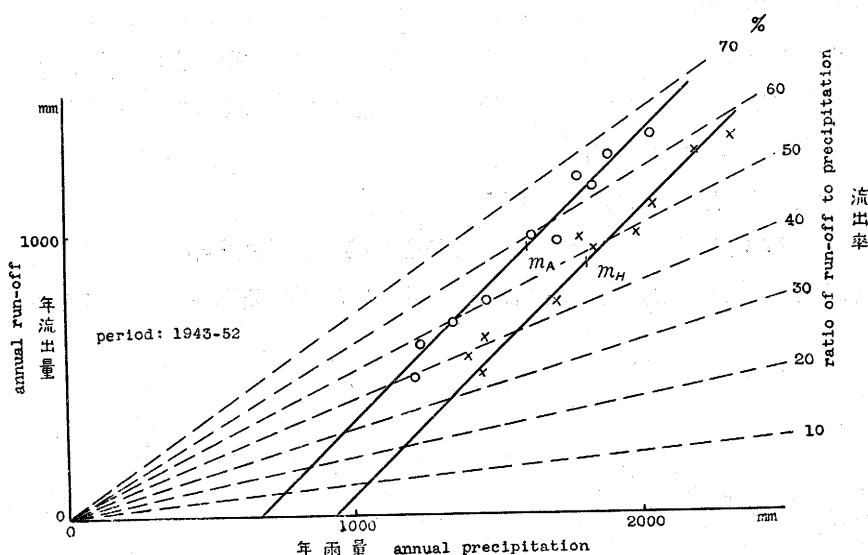


Fig. 5. Linear regression of run-off on precipitation at Ananomiya (left) and at Higashiyama (right).

第5図 年雨量に対する年流出量の直線回帰（太線左は穴の宮、右は東山、破線は流出率を示す）

年雨量の平均値は東山 $m_H = 1821$ mm, 穴の宮 $m_A = 1615$ mm である。穴の宮流域が仮に森林その他の状態¹⁾はそのまゝで東山流域と同じ位置に移動したと仮定すれば、流出量はどうかであろうか？ これを推定して東山の流出量と比較するのでなければ、森林その他の違いが、流出量におよぼす影響を求めることにはならない。こういう位置の移動が仮にできたとすると、当然雨量は東山流域のものと同一になるであろう。そうして雨量と流出量の関係を示している回帰直線の位置は変わらないであろう。そこで $m_H = 1821$ mm において流出率は東山：48%，穴の宮：

- 1) 流出量に影響する第1次の変動原因が雨量であることを予備的に考察し、ここでは第2次以下の変動原因として森林、地質、地形等を総合したものを考えているのであつて、それらの各々が第2次、第3次、第4次……のいづれに相等するかはまたこの先の問題である。

63%で15%の差がある。しかるに若し東山流域が森林その他の状態はそのままの官流域と同じ位置に移動したと考えると $m_A = 1615 \text{ mm}$ において流出率は東山: 42%, 穴の宮: 58%で16%の差があり, 前とは異なる結果を得る。すなわち森林その他の影響の差は流出率で何%ということは雨量と無関係にいうことはできないのである。もし雨量と無関係に2流域の違いをいう必要があるときは寧ろ, 流出量の差, あるいは消失量の差を用いることができる。何故かといえば, この場合2つの回帰直線は殆んど平行であると認められるからである¹⁾。

§ 2. 愛演における対照流域法の予備的考察

(1) 対照流域としての価値 年々測定を繰り返さずときは, 流出量にはそれ自身の偶然の変動があるから, これに比べて森林伐採前後の間の流出量の変動が有意であるかどうかを考えることができる。雨量と関係のない変動の状態からみて, 森林伐採前後の流出量に有意差が認められるとき, 初めて森林伐採の影響があると考えることができる。前章 § 3 の考察に基づき, 雨量と関係のない流出量自身のバラツキは, 雨量または対照流域の流出量に対する回帰からの標準偏差を以て表わすことができるのは明かである。

例1 対照流域を用いる必要のない場合

第6図は白坂²⁾年流出量の雨量に対する回帰直線(左)と, 東山³⁾年流出量に対する回帰直線(右)を示したものであるが, 図では回帰からのバラツキは左と右とのどちらが大きいかが明瞭で

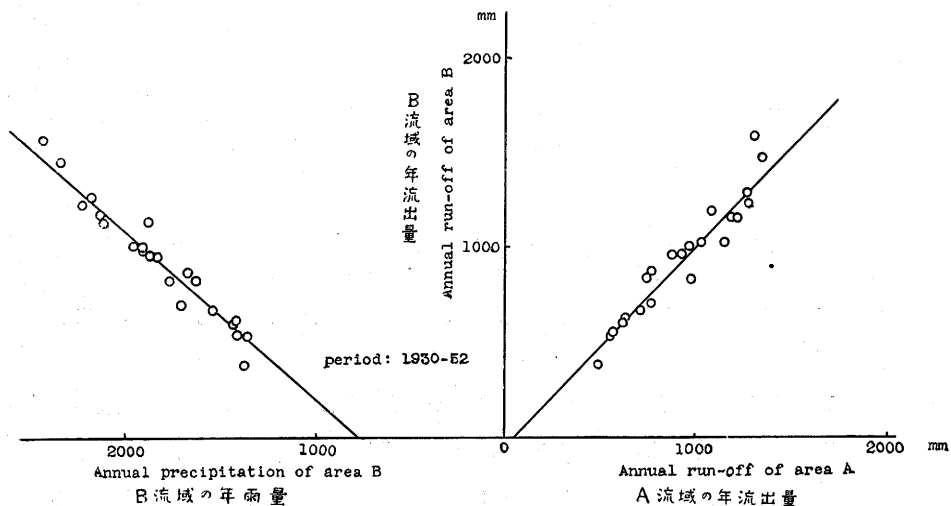


Fig. 6. Linear regression of annual run-off on annual precipitation (left) and linear regression on annual run-off of control area (right)

第6図 処理流域(B)の年流出量の, 同流域の年雨量に対する回帰(左)と対照流域(A)の年流出量に対する回帰(右), A: 東山, B: 白坂。

- 1) 雨量の範囲が著しく異なる2流域では2つの回帰直線は平行とならない。このような場合, 平行法的取扱は行わない。
- 2), 3) 共に流域名で約2.5 kmの距離がある。

ないから計算してみると第8表のとおりとなる¹⁾。この表によれば、白坂の年流出量を Y とするとき、 X としては東山の年流出量を用いるよりも白坂自身の雨量を用いる方が回帰からのバラツキが少い。このバラツキが小さいものを用いる方が、森林伐採前後における流出量の有意差の検定にはより有効である。従つてこの場合、東山流域を対照流域として用いる必要はないことになる。

第8表 白坂年流出量 (Y) の X に対する
回帰からの標準偏差

Table 8. Standard deviation of annual
run-off at Shirasaka (Y) from
regression on X .

X \ period 期間	1933-42	1943-52	1933-52
Annual precipitation of Shirasaka 白坂年雨量	55.1	69.2	56.2
Annual run-off of Higashiyama 東山年流出量	59.9	86.3	79.9
n (Number of years) 年 数	10	10	20

第9表 白坂月流出量 (Y) の X に対する
回帰からの標準偏差

Table 9. Standard deviation of monthly
run-off at Shirasaka (Y) from
regression on X .

X \ period 期間	1933-35	1947	1948	1949
Monthly precipitation of Shirasaka 白坂月雨量	30.2	56.0	33.3	76.5
Monthly run-off of Higashiyama 東山月流出量	13.5	8.0	24.5	44.8
n (Number of months) 月 数	1 ¹⁾ 12	2 ²⁾ 12	12	12

1) 月はV, VI, VII, VIIIのみ

2) I月からXII月まで全部

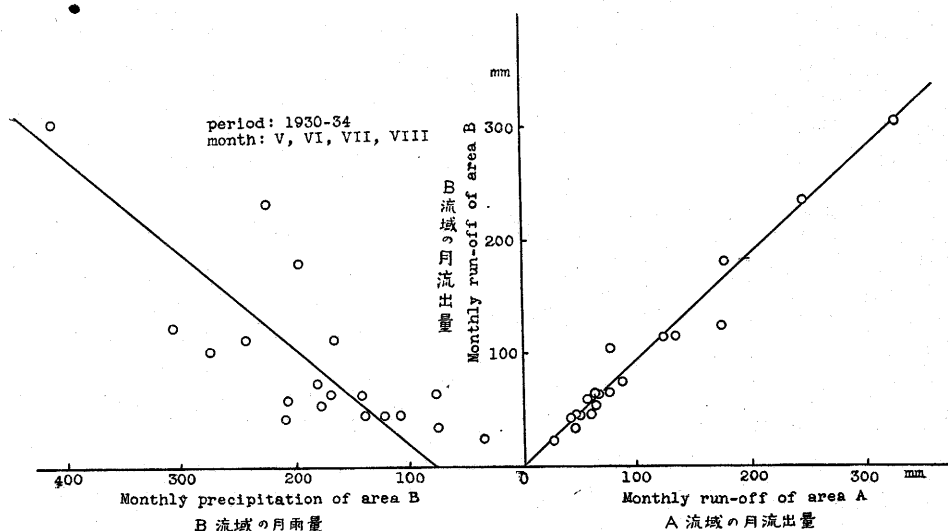


Fig. 7. Linear regression of monthly run-off on monthly precipitation (left) and
linear regression on monthly run-off of control area (right).

第7図 処理流域 (B) の月流出量の、同流域の月雨量に対する回帰 (左) と対照流域
(A) の月流出量に対する回帰 (右), A : 東山, B : 白坂。

1) 図と計算では期間、したがって n を少し違えてみた。

例2 東山流域が対照流域としての価値をもつ場合

月流出量に着目すれば、第7図の図上だけでも明かなように、白坂月流出量の回帰からのバラツキは、白坂月雨量に対する回帰を用いるときよりも、東山月流出量に対する回帰を用いるときの方が小さい。計算の結果（第9表）によつても確かめられる¹⁾。したがつて月量を用いるときは東山を白坂の対照流域として用いた方がよいことがわかる。

年量を用いて回帰直線を得るには少くとも数ケ年の観測結果をまたねばならぬが、月量を用うれば1ケ年でも回帰直線は得られるから、この意味で東山は白坂の対照流域としての価値がある。

(2) 雨量に関係のない流出量のバラツキの近似計算 以下次のように記号を規約する。

R : 流出量, P : 雨量, L : 消失量 (個々の標本値)

\bar{r} , \bar{p} , \bar{l} : それぞれ R , P , L の平均値

$$r = R - \bar{r}, \quad p = P - \bar{p}, \quad l = L - \bar{l}$$

添字を附した場合は C は対照流域, T は処理流域を示す。たとえば

R_T : 処理流域の流出量

r_C : 対照流域の流量の平均値からの偏差

また数字は番号を示す。たとえば

R_1 : 第1年(月)目の年(月)流出量, n は年(または月)数

\hat{R} : 流出量の回帰(推定値)

i) 単独法 (流出量の雨量に対する回帰)

流出量の雨量に対する回帰は一般に $\hat{R} = aP + b$ (a, b は const.) の形で表わされるが、多くの場合(特に愛知県演習林のものにおいて)は、 a は殆んど1に近いことがすでに認められている。そこで以下簡単のため $a=1$ すなわち

$$\hat{R} = P + b \quad \dots \dots \dots (1)$$

と考える。したがつて b は次の回帰公式において a を1とおくことによつて求められる。

$$\hat{R} = \bar{r} + a(P - \bar{p}) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$a=1 \quad \therefore \quad \hat{R} = P - (\bar{p} - \bar{r}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$(1), (3) \text{ より } b = \bar{p} - \bar{r} = \bar{l}$$

$$\text{すなわち } \hat{R} = P - \bar{l} \quad \dots \dots \dots (4)$$

(4) 式を近似的に、流出量の雨量に対する回帰直線式とみなすことができる。

回帰からの偏差は

$$R_1 - \hat{R} = R_1 - P_1 + \bar{l} = -(L_1 - \bar{l})$$

$$R_2 - \hat{R} = R_2 - P_2 + \bar{l} = -(L_2 - \bar{l})$$

⋮

1) 期間のとり方は図とは少し違えてみた。

$$\begin{aligned}
 \Sigma(R-\hat{R})^2 &= \Sigma\{-(L-\bar{l})\}^2 \\
 &= \Sigma(-L)^2 \\
 &= \Sigma l^2 \dots\dots\dots (5)^{1)}
 \end{aligned}$$

ここに Σ は \sum_1^n を意味する、以下同じ。

すなわち流出量の、回帰からの偏差の変動は近似的には消失量の変動と考えてよい。

ii) 対照流域法 (流出量の、対照流域の流出量に対する回帰)

対照流域の流出量に対する処理流域の流出量の回帰は

$$\hat{R}_T = \bar{r}_T + a(R_C - \bar{r}_C) \dots\dots\dots (6)$$

この場合も $a=1$ とみなしてよいことは Coweeta や釜淵の資料により明かである。

$$\therefore \hat{R}_T = R_C + \bar{r}_T - \bar{r}_C \dots\dots\dots (7)$$

回帰からの偏差は

$$\begin{aligned}
 R_{T1} - \hat{R}_T &= R_{T1} - R_{C1} - (\bar{r}_T - \bar{r}_C) \\
 R_{T2} - \hat{R}_T &= R_{T2} - R_{C2} - (\bar{r}_T - \bar{r}_C) \\
 &\vdots \\
 \Sigma(R_T - \hat{R}_T)^2 &= \Sigma \left\{ R_T - R_C - \left(\frac{\Sigma R_T}{n} - \frac{\Sigma R_C}{n} \right) \right\}^2
 \end{aligned}$$

1) 以上の誘導は次のように行ってもよい。

回帰からの偏差の公式より

$$\Sigma(R - \hat{R})^2 = \Sigma r^2 - \frac{(\Sigma pr)^2}{\Sigma p^2}$$

ここで $a = \frac{\Sigma pr}{\Sigma p^2} = 1$ とおけば

$$\begin{aligned}
 \Sigma(R - \hat{R})^2 &= \Sigma r^2 - \left(\frac{\Sigma pr}{\Sigma p^2} \right)^2 \Sigma p^2 = \Sigma r^2 - \Sigma p^2 \\
 &= \Sigma R^2 - \frac{(\Sigma R)^2}{n} - \Sigma P^2 + \frac{(\Sigma P)^2}{n} \\
 &= \Sigma R^2 - \Sigma P^2 - \frac{(\Sigma R)^2 - (\Sigma P)^2}{n} \\
 &= \Sigma R^2 - 2\Sigma P^2 + \Sigma P^2 - \frac{(\Sigma R)^2 - 2(\Sigma P)^2 + (\Sigma P)^2}{n} \\
 &= \Sigma R^2 + \Sigma P^2 - \frac{(\Sigma R)^2 + (\Sigma P)^2}{n} - \left\{ 2\Sigma P^2 - \frac{2(\Sigma P)^2}{n} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\text{ここに } \frac{\Sigma pr}{\Sigma p^2} = 1 \therefore \Sigma P^2 - \frac{(\Sigma P)^2}{n} = \Sigma(PR) - \frac{(\Sigma P)(\Sigma R)}{n}$$

$$\begin{aligned}
 \text{したがって } \Sigma(R - \hat{R})^2 &= \Sigma R^2 + \Sigma P^2 - \frac{(\Sigma R)^2 + (\Sigma P)^2}{n} + \frac{2(\Sigma P)(\Sigma R)}{n} - 2\Sigma(PR) \\
 &= \Sigma(R^2 - 2PR + P^2) - \frac{(\Sigma P)^2 + (\Sigma R)^2 - 2(\Sigma P)(\Sigma R)}{n} \\
 &= \Sigma(P - R)^2 - \frac{(\Sigma P - \Sigma R)^2}{n} \\
 &= \Sigma L^2 - \frac{(\Sigma L)^2}{n} \\
 &= \Sigma(L - \bar{l})^2 \\
 &= \Sigma l^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \Sigma \left\{ (R_T - R_C)^2 + \left(\frac{\Sigma R_T - \Sigma R_C}{n} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. - 2 \frac{(R_T - R_C)(\Sigma R_T - \Sigma R_C)}{n} \right\} \\
&= \Sigma (R_T - R_C)^2 + \frac{(\Sigma R_T - \Sigma R_C)^2}{n} - \frac{2(\Sigma R_T - \Sigma R_C)^2}{n} \\
&= \Sigma (R_T - R_C)^2 - \frac{(\Sigma R_T - \Sigma R_C)^2}{n} \dots\dots (8)^D
\end{aligned}$$

(8) 式の形が最も計算が容易である。

以上のように、雨量に関係のない流出量自身の変動は近似的に、単独法では消失量の変動に等しく、対照流域法では2流域の流出量の差の変動に等しい。

V 有意差検定法の利用

上述のような近似計算法によつて流出量自身のバラツキを求めるものとすれば、一々回帰式を求める必要はなく、流出量あるいは消失量の data から簡単にその分散が求められるから、伐採前後の分散比の F テストを行つて2期間における流出量に有意差があるかどうかを検定するには極めて好都合である。以下にその2, 3の例を掲げよう。

(1) 東京大学農学部附属愛知県演習林内の東山(A), 白坂(B), 穴の宮(C)3流域をそれぞれ単独法的に取扱ひ、前期=1933—42, 後期=1943—52年とすると、各流域の消失量の分散分析表は第11表の通りで、穴の宮流域だけは消失量の増加——流出量の減少が危険率5%以下で認められる。その原因として、穴の宮流域に行われた砂防植栽を考えることができるが、それだけが原因であるとは思われない節もあるので、この点に関してはなお結論を差し控えるこ

1) 以上の誘導は次のように行つてもよい。

回帰からの偏差の公式により

$$\begin{aligned}
\Sigma (R_T - \hat{R}_T)^2 &= \Sigma r_T^2 - \frac{(\Sigma r_T r_G)^2}{\Sigma r_G^2} \\
&= \Sigma r_T^2 - \Sigma r_G^2 \quad \because \left(\frac{\Sigma r_T r_G}{\Sigma r_G^2} \right)^2 = 1 \\
&= \Sigma R_T^2 - \frac{(\Sigma R_T)^2}{n} - \left\{ \Sigma R_G^2 - \frac{(\Sigma R_G)^2}{n} \right\} \\
&= \Sigma (R_T^2 - R_G^2) - \frac{(\Sigma R_T)^2 - (\Sigma R_G)^2}{n} \\
&= \Sigma (R_T - R_G)^2 - \frac{(\Sigma R_T - \Sigma R_G)^2}{n} \\
&\quad - 2\Sigma R_G^2 + 2\Sigma R_T R_G + 2 \frac{(\Sigma R_G)^2}{n} - \frac{2(\Sigma R_G)(\Sigma R_T)}{n}
\end{aligned}$$

第3項以下の和は0となる。

$\because \Sigma r_T r_G = \Sigma r_G^2$ より

$$\begin{aligned}
\Sigma (R_T R_G) - \frac{(\Sigma R_T)(\Sigma R_G)}{n} &= \Sigma R_G^2 - \frac{(\Sigma R_G)^2}{n} \\
\therefore \Sigma (R_T - \hat{R}_T)^2 &= \Sigma (R_T - R_G)^2 - \frac{(\Sigma R_T - \Sigma R_G)^2}{n}
\end{aligned}$$

ととする。

(2) 東山流域を対照流域としたときの白坂流域の月流出量は、1947年と1948年および1947年と1949年の比較(第12表)で有意差は認められない。——これは伐採等の森林状態変化がないから当然である。しかしここに注意しなければならないことは、いま仮に1949年の白坂流出量が実際より5%ずつ多かつたとして計算しても1947年に比べて有意差は認められない。すなわちこの場合には、有意差の判定に第2種の過誤¹⁾を犯していることが明らかである。このような点につき、有意差検定法の利用上、判断には慎重でなければならない。

第10表 愛知県演習林における年流出量と年消失量(単位 10 mm)

Table 10. Annual run-off and losses at Tokyo University Forest in Aichi. (10 mm unit)

Watershed 流域 事項 Item 年 Year	A		B		C	
	流出量 Run-off	消失量 Losses	流出量 Run-off	消失量 Losses	流出量 Run-off	消失量 Losses
1933	77	79	70	99	83	58
34	56	84	54	87	64	58
35	119	93	115	96	130	62
36	103	89	102	89	121	59
37	94	92	96	91	101	60
38	135	90	146	88	132	58
39	66	91	67	88	59	64
40	62	84	60	84	70	66
41	129	95	124	99	130	75
42	78	83	87	82	75	61
43	62	84	62	80	68	68
44	49	96	38	100	48	74
45	131	102	158	85	133	72
46	93	91	96	87	96	70
47	55	85	53	85	60	64
48	74	97	83	94	75	72
49	98	101	111	101	115	69
50	108	97	119	94	118	60
51	97	82	100	91	98	65
52	127	92	128	90	126	64

流域名 A: 東山, B: 白坂, C: 穴の宮

第11表 愛知県演習林における年消失量の分散分析表

Table 11. Analysis of variance of annual losses at Tokyo Univ. Forest in Aichi.

流域 watershed	S. V.	SS	f	v	F ₀
A(東山)	b w	111 698	1 18	111 38.8	2.86
B(白坂)	b w	0.8 724	1 18	0.8 40.2	0.02
C(穴の宮)	b w	162 492	1 18	162 23.8	6.8 > 4.41*

Note b: between year groups
w: within year individuals

第12表 月流出量差 $R_A - R_B$ の分散分析表
Table 12. Analysis of variance of monthly run-off's difference of A and B areas at Tokyo Univ. Forest in Aichi.

期間 period	S. V.	SS	f	v	F ₀
1947:—48	b w	571 6667	1 22	571 303	1.88
1947:—49	b w	989 20697	1 22	989 941	1.05
1947:(-49)	b w	1763 24170	1 22	1763 1098	1.60

Note
(-49): 1.05 R_B is used.

1) 真実に差があるにもかかわらず、差があると認めない過失。

(3) Wagon Wheel Gap における C , T 2流域の流出量 (第13表) の差について分散比を求めると第14表の通りで, 前期=1911—18, 後期=1919—25 年の間に危険率 1% 以下で年流出量に有意差が認められる。このような場合森林伐採の効果は容易に認められる。

第13表 Wagon Wheel Gap における
年流出量 (単位 10 mm)

Table 13. Annual run-off at Wagon
Wheel Gap. (10 mm unit)

before cutting period	R_C R_T		after cutting period	R_C R_T	
	21	21		20	22
	12	13		17	21
	14	14		17	22
	14	14		15	18
	14	14		18	20
	24	25		11	13
	8	9		11	13
	15	15			

第14表 Wagon Wheel Gap における
年流出量差の分散分析表

Table 14. Analysis of variance of
run-off's difference between two
watersheds of Wagon Wheel Gap.

変動 要因	Source of variation	SS	f	v	F_0
期間 年	periods years	22.5 11.2	1 13	22.5 0.9	26.5**
合計	total	33.7	14		

(あとがき) 愛知県演習林では, まだ伐採を行っていないので, 森林伐採の効果を検出すべき data がないが, 将来はこの方法を, 白坂小流域にも, また東山 (あるいは白坂) を対照流域として, 白坂大流域 (あるいは東山) にも適用できると考えられる。有意差検定法のこのような利用については, 標本分布の正規性や, 任意抽出の実際問題に関する前提的事項についてなお疑問の点があり, これらに関する考察が必要となるが, それは当然有意差を生ずると期待されるものと多くの data を得た後に譲ることとする。

Ⅵ 要 約

以上を要約すれば次の通りである。

(1) 年流出量は主として年雨量に関係し, そのありさまは年雨量約 1,500 mm 以上では直線的である。これはとくに新しいことではないが, 換言すれば流出量は雨量に対し回帰直線をもっているといえる。この回帰という見方から出発して対照流域法の意義が明かにされる。

(2) 単独法や平行法では, 観測値調整の標準がほとんどないが, 対照流域法では, 対照流域から採られる data が, 統計的管理として用いられ観測値の調整に役立つのである。

(3) 対照流域法で回帰直線を用いるのは, 雨量に関係のない流出量自身のバラツキを求めるためである。換言すれば, 人工的になくすことのできない雨量の変動を対照流域によつて見出しこれを利用して, 実験的に雨量の変動を無くしたと同じ効果を得るためである。

(4) 流出率の比較は元来, 等しい雨量の場合にのみ正しい意味があるのであつて, 雨量が異なる場合の流出率は, 若し雨量が等しくなつたら流出率はどう変化するかという推定を行つた後に比較されねばならない。この推定は流出量の雨量に対する回帰直線を用いて行い得る。

(5) ある流域が他の流域に対し, 対照流域として価値があるかどうかは, 流出量自身のバラツキを当該流域の雨量に基いて計算した値と, 他流域の流出量に基いて計算した値とを比較して

みればわかる。

(6) 流出量自身のバラツキは、近似的には消失量のバラツキ、あるいは対照流域の流出量との差のバラツキとして計算することができる。

(7) この方法によれば、東京大学農学部附属愛知県演習林内の東山、白坂2流域は約2.5km以上の距離にあるにもかかわらず、月流出量を用いる研究のためには、相互に対照流域となり得ることが明らかとなった。

参 考 文 献

- (1) 武藤博忠抄訳：ハンス・ブルガー、河川の水位に及ぼす森林の影響、興林会(1937)
- (2) C. G. BATES, A. J. HENRY: Forest and stream-flow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado, Monthly weather review, Supplement No. 30, (1928).
- (3) M. D. HOOVER: Effect of removal of forest vegetation upon water yield, Trans. Amer. Geophys. Union, Part 6, pp 969—975 (1944)
- (4) (イ) 武田繁後：竜ノ口山水源涵養試験第1回報告、山林局。
(ロ) 中野、大滝：竜ノ口山水源涵養試験第3回報告、林試研報第44号。
(ハ) 白井、他：同上 第4回報告、林試研報第68号。
- (5) 武田繁後：宝川森林治水試験第2回報告、前橋営林局(1950)。
- (6) 丸山、猪瀬：釜淵森林理水試験第1回報告、林試研報第53号。
- (7) 東京大学農学部附属愛知県演習林量水試験による未刊行資料。
- (8) 荻原貞夫：森林理水・砂防、朝倉書店、林学講座第9冊(1953)。
- (9) 丸山、川口：森林の治山治水機能に関する研究抄録、林野庁(1952)。
- (10) G. W. SNEDECOR: Statistical methods, 4th edition, 4th print, (1950).
- (11) 畑村、他、同上訳：統計的方法、岩波書店(1952)。
- (12) 増山元三郎：実験計画法大要、学術図書出版社(1952)。
- (13) R. K. LINSLEY: Applied hydrology (1949).

Résumé

This paper deals with the principle of "control area method" in forest and water experiment and its illustrative examples. In the control area method two (or more if desired) areas are used for experimental comparison. At the beginning they have forest conditions similar to each other. After a certain period forest cutting or some planned treatment is to be conducted leaving the forest condition of one area untouched for the purpose of control.

In the discussion data of some well known experiments are used besides those of Tokyo University Forest in Aichi Prefecture. The results of the study are summerized as follows.

(1) Annual run-off has an important relation to annual precipitation, being represented by a straight line within the range of precipitation over 1,500 mm a year. This is the fact that has already been known, but in this paper it is discussed from the view point of regression in statistics. (Fig. 2)

(2) The reason that the control area method is thought to be better than the

single area method or the parallel area method is that the data taken from the control area are useful for statistical control, which are not available in other two methods.

(3) The aim of using linear regression in the process of statistical control is to measure the amount of run-off's own variation not associated with changing precipitation. Thus every datum taken from control and treated areas may be useful effectively, so that we need not try to control the precipitation artificially that is impossible in field experiment on a large scale.

(4) Moreover, the idea of linear regression is effectively applied in comparison of run-off ratios of two or more watersheds. But before comparison the values of run-off ratios must be so adjusted as they correspond to equal precipitation. (Fig. 5)

(5) Whether a watershed (A) deserves as a control area or not is determined by whether the standard deviation of A's run-off with respect to B's run-off is smaller than that with respect to B's precipitation. (Fig. 6, 7 Table 8, 9)

(6) In the formula of run-off regression

$$\hat{R} = aP + b,$$

if a is assumed approximately to be 1;

in single area method

$$\Sigma(R - \hat{R})^2 = \Sigma l^2,$$

in control area method

$$\Sigma(R_T - \hat{R}_T)^2 = \Sigma(R_T - R_C)^2 - \frac{(\Sigma R_T - \Sigma R_C)^2}{n},$$

where R : run-off, P : precipitation, a , b : constants,

\hat{R} : regression of run-off, \bar{l} : average of losses,

l : deviation of losses, i. e. $l = L - \bar{l}$, L : losses = $P - R$, n : number of years or months, suffix C and T show the control area C and treated area T respectively. In other words, the variance of run-off of its own is approximately equal to the variance of losses of respective area, or to the variance of difference between run-offs on control and treated areas. By these formulas the calculation of variance is much simplified. Accordingly the F test of variance ratio about two periods before and after cutting of forest is easily done. (example Table 13, 14)

(7) It is found that Higashiyama and Shirasaka area can be a satisfactory control area to each other in spite of the fact that they are located at over 2.5 km distance.