

受入ID- 1520030117B00054

図
書
館

防 災	4
資 料	1



図
書
室

65

急峻な山岳地帯における雨量調査



02000-00131068-7

農林省林業試験場防災部

昭和33年2月

試
災
8

頁	行	誤	正
目次	8 ~ 9		雨量観測値に及ぼす誤差の性質-----22 挿入
1	11, 12	<u>S</u> amp <u>i</u> e	<u>S</u> amp <u>l</u> e
2	19	灌木や <u>棚</u> 垣	灌木々 <u>柵</u> ・垣
3	7	(<u>126</u>)	(26)
3	下から 6	cellul <u>e</u> r sheet	cellul <u>a</u> r sheet
4	13	計算 <u>が</u> 求められる	計算 <u>で</u> 求められる
5	10	自雨量計	自 <u>記</u> 雨量計
5	脚註	Lyle F. Re <u>i</u> mann	Lyle F. Re <u>i</u> mann
8	7	受 <u>入</u> 口	受 <u>水</u> 口
9	15	東北の3成分	東 <u>西</u> の3成分
12	10, 11	stereo gage, though	stereo gage, trough
17	2	Vectoplui <u>o</u> me-	Vectoplui <u>v</u> isme
17	下から 10	角な <u>屋</u> 限	角な <u>尾</u> 根
19	1	Tab <u>l</u> i	Tab <u>l</u> e
21	下から 11	雨量計の <u>差</u> で	雨量計の <u>%</u> 差で
24	下から 4	1雨量計 <u>で</u>	1雨量計 <u>に</u>
24	Fig 80 読取	鉛 <u>直</u>	鉛 <u>直</u>
29	1	違 <u>ね</u> ぬ	違 <u>わ</u> ぬ
30	下から 12	内 <u>挿</u>	内 <u>挿</u>
32	3	亜鉛 <u>渡</u> 鉄板	亜鉛 <u>鍍</u> 鉄板
32	3	ea <u>t</u> er	h <u>e</u> ater
33	下から 6	雨と <u>線</u> と	雨の <u>線</u> と
34	下から 1	E-W=R <u>e</u>	E-W=R <u>e</u>
35	2	tan in	tan in
35	4	書き直すと雨の.....	書き直すと $\tan W = \tan$ ie/in 雨の.....
35	5	Rn/R tan in	$Rn/R = \tan in$

訳 者 序

ここに訳した報告は、米国の San Dimas 試験地で、急峻な山岳地帯の正確な集水地雨量を求めるための観測、調査方法について研究した結果を取りまとめたものである。

現在吾国においても、山岳地帯の正確な集水地雨量をどうして求めるかと云うことが問題になっている。訳の拙さが不正確を欠くおそれなしとしないが、少しでも参考になれば幸と思い、訳した次第である。

写真および図には省略したものが若干あるが、図の番号はここでは通し番号を附した。

援助を受けた気象研究室本木技官に感謝の意を表する。

防 災 部 気 象 研 究 室

岡 上 正 夫

急峻な山岳地帯における雨量調査

Rainfall Sampling on Rugged Terrain

By E. L. Hamilton, Forester,
California Forest and
Range Experiment
Station, Forest Service.

岡 上 正 夫 訳

Technical Bulletin No. 1096
U. S. Department of Agriculture
Washington. D. C.
Decembre 1954

	頁
結 論	1
問 題 点	1
問題についての過去の研究	3
改善のための現代の報告	4
研 究	4
降雨の特性に関する研究	10
雨量計の比較研究	12
Bell 流域における2種の雨量計に関する研究	17
雨量観測網の改善	27
観測値の補正	31
過去の雨量資料の補正方法	36
直立雨量計による観測値の缺陷	37
直立雨量計による観測値を Fourcade の式で 補正したときの効果	38
綜 括	39
文 献	41



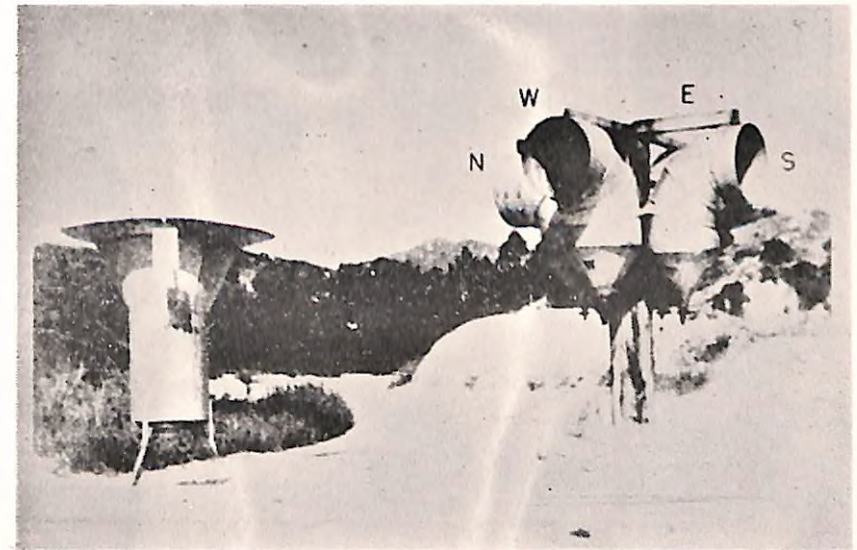
PL.1 左は、アメリカ気象局標準型8吋口径雨量計を斜面に直角に傾斜させたもの。右は、受水面を斜に切った Fergusson の自記雨量計。



PL.2 Bell 流域 No. 2



PL. 3 Bell 流域 No. 2におかれた斜立及び直立の対の雨量計。



PL.4 右は、降雨の水平成分を測る VectoPluviometer 左はシールドをつけた口径8時の雨量計で降雨の鉛直成分を測る。

急峻な山岳地帯における雨量調査¹⁾

イー・エル・ハミルトン 著

山林局カリフォルニア林野試験場²⁾

緒 論

地表面におちた水の量、すなわち雨量の観測は、気候学においては、重要な部分を占めている。雨量観測は、その地方の気候型を定めるに必要な基礎的な知識を与えてくれる。そして雨量観測資料は、農業・都市の発展、水力電気の開発、或は洪水等に対する色々な形の土地管理にとって不可欠のものである。降雨は河の流れの根に直接これを測定することが出来ないで、流域内の色々な場所で、標本 Sample をとって推定しなければならない。満足な推定をなすには、個々の Sample は出来る限り正確であり、それが応用される地域をよく代表するものでなければならない。普通比較的平らな入家のある地区での雨量観測技術には、大した困難はないが、山岳地方における雨量を正確に決定することには多くの困難がある。

水の供給の問題、流れの調節、洪水調節等に必要基礎資料をうるためには、山岳地方でも使えるように、標本採取の技術及び測器の使用法を変えることが必要である。この報告においては、いかにしてどれだけの雨が山岳地方の流域に降ったかの詳細なる研究結果と、雨量観測方法の改善に関する勧告を述べている。

問 題 点

1933年カリフォルニア森林、及び地域試験場は Chaparral の生えた流域管理の理論と実務を向上させるために、南カリフォルニアにおいて、水文学的な研究を実施した³⁾。そしてこの試験のために Big Dalton 及び San Dimas 溪谷を含むカリフォルニア

- 1) 1954年5月受理
- 2) アメリカ農務省山林局にて維持され、カリフォルニア大学の協力を受けている。
- 3) 括弧内の数字は巻末の文献表番号を示す。

州 Glendore 市の北東数哩の Angeles 国立公園内 San Gabriel 山に試験地を設けた。この試験地は起伏の峻険に多い山地であつて、カリフォルニア山脈の最も南部にあり、San Dimas 試験地と名付けられた。ここは、谷がV型にけずられており、サイフの様な嶺で、それらの個々の傾斜は30~120%にわたっている。試験地の平均傾斜は、60%と推定されている。一般に、この試験地流域の傾斜は、シェラネヴァダ、ロッキー及び欧州のアルプスの峻しさと同じ位である。試験計画には、山地流域の雨量を正確に決定することが要求されていた。

この測定を効果あらしめるに、今までにない強力な雨量観測網が計画され、口径8時のアメリカ気象局型の雨量計318ヶが17,000エーカーの面積にばらまかれた。50エーカーに1ヶの密度である。雨量計は2100, 3100, 4100及び5100呎の高さで、等高線に沿ひ、半哩毎におかれた。又この外、利用できる道路はすべて利用して雨量計をおいた。雨量計をこのように配置したのは、非常に急峻の地であり、又灌木が密に生えているところなので、最も実際に則した方法と考えられた。個々の雨量計はアメリカ気象局の仕様書によつて鉛直に設置した。この方法では雨量計に風除けをする必要が感じられた。灌木や柵垣等を用いることがすすめられた。しかし垣や柵等がこの山おくには、なかつたので、風の影響を防ぐために Chaparral のはげたところに雨量計をおくことが希望された。

観測資料は、雨量観測網から集められた。そして各々の雨量が、正しく流域内の雨量を、与えるに統計的に十分なものであるか、どうかをみるための観測を2年やつた後に資料の解析をおこなつた。然し乍ら解析の結果によると観測そのものが正確であるという保証はえられなかつた。雨量が非常にまちまちであることが注目されたが、これらは地形による差であると思はれた。あるものはその差が非常に極端であつたので、このような急峻な地帯の雨の降り方をもつとよく調べる必要があると感じられた。

此の問題についての過去の研究

1つの流域内の総雨量を決めることについては各国で研究が行われた。此の問題についての重要な研究は、1919年 Horton (14), 1938年 Brooks (6), 1944年 Wicht (30) 等によつて総合報告されている。一般に雨量計に雨が入るときの風の影響を重視している。雨量計が雨を捕捉するについての風の効果は、早くも1841年に Thomas Stevenson (126) によつて記録されている。

1861年 Jevons (16) は地上より或高さを高く置いた雨量計中の雨量が、地面においた雨量計の雨量より少いことを発見した。彼はこの不足は雨量計附近の気流の擾乱によつて起るものと推論し、この現象は Jevons 効果と呼ばれた。この対策として Jevons は大きな雨量計を地面において測ることを提案した。

Nipher (20) は1878年に雨量計のシールドを考案試作実験して雨量観測に重要な貢献をした。

1865年~1872年の間に英国の Rotherham で実験が行われたが、これは地上いろいろの高さにおいた雨量計に入つた量と風速との関係を調べたもので、英国ではこれが基となつて雨量計設置の指針が決められた。雨量計は、上の口が水平になるように地上1呎の高さとし雨量計を中心として直径5呎のところに、円い芝生の垣を築いた(4)。これは起伏のない地方では、極めてすぐれた設置方法であるが、南カリフォルニアの如く、人手の入らぬ雨の多い山では明かに不適當である。

1933年 Koschmieder (18) は乱れを防ぐために雨量計をたて穴の中に入れ、まわりに蜂巣状の細胞状板金 (Cellular sheet metal) をおいた。この処置は、風の強い山で風の影響をうまく除いたが、然し Koschmieder は、雪・木の葉・動物等の妨害するおそれがあるとして、これを実際に広めることはしなかつた。Pagliuca (21) はニューハンプシャイアのマウント・ワシントンで研究をしていた人であるが、彼は雨量計に、Nipher 型のシ

ールドの使用を主張した。そして更に若し雨量計及びシールドを斜面に直角におくならば、もっとよい値が得られるであろうと主張した。この2つの報告は共に、San Dimas の観測法が出来上がるまで公には利用されなかった。

改善のための現代の勧告

San Dimas の雨量観測網が活動し始めてから間もなく、佛国の水文技師である Robert Pers (1, 22) が佛領アルプスで行った雨量観測報告は注意をひいた。Pers は、高い山岳地帯における総雨量を求めるとき、月並に鉛直においた雨量計の与える水深に流域の水平面積を乗じたのでは誤りであることを実際に示した。暴風雨のときは時に雨は1つの vector と考えてよい。そして真の雨量は、その観測点におけるストームの vector がわかればその方向、大きさから計算が求められると云った。平地又は地形の比較的なめらかな傾斜のゆるいところならば、普通に鉛直に立てた雨量計で充分正確な値が求められる。然し急峻な山では、普通に立てた雨量計では、真の降水量を求めることはできない。山では普通ストームは強い風を伴うので、観測値にはそれによる誤差が入ってくる。この山の強い風は雨を鉛直から少し傾斜した角度で斜面にたたきつける。時には水平に近くたたきつけることもある。

Pers はアルプスで観測した雨量の著しい違いを示し、同様な地方における水文学者に対し、雨量観測値の正確さを研究するようにすすめている。

研 究

Pers が風の強い山岳地方における雨量観測は、単に雨量計を設置するだけの問題ではないと云うことを実測上からも又、数学上からも示して以来、San Dimas 試験地の研究隊は、雨の降り方と観測方法についての研究計画を立てた。そして2種の試験が立案された。その1つは風向風速のような物理的要素が雨の捕捉にどのように影響するかをしらべること、他の1つは、雨量計

のおきかたをいろいろかえたとき、実際に地面が受ける雨量とどの位違うかを比較することであつた⁴⁾。

研究は先づ最初に Pagliuca (21) の主張したように斜面に直角に雨量計をおいたときの効果をしらべることに向けられた。その設置方法は、急斜面に斜に当る雨の観測を行うために Pers がすすめた Stereo gage を単純化したものである。Pers (23) は雨量計の受水口を測定せんとする流域のその部分に似せるように望んだ。吾々は雨量計を斜面の傾斜に従つてかたむけたり、方向を合せたりすることが同じ効果を生むものであり、又地形に応じて雨量計を作る手数を省くものと論断した。自記雨量計は、傾斜させることができない、鉛直にしておかねばならないので、受水口を斜面に平行に切った (pe / 参照) この型の受水口は後に Hayes (13) の使用するところとなつた。

雨量計を鉛直においたとき、どの位の誤差が入ってくるか、又斜面に並行に作った受水口ではいかに真の降水量がえられるかを Fig 1, 2 に示し、又次に理論的観測よりの論議を示すことにする。

4) 測器の改善並びに記録の集收を行つた Lyle, F. Reemann 及び Louell, A. Andrews の両氏に特別な名誉が与えられるであらう。

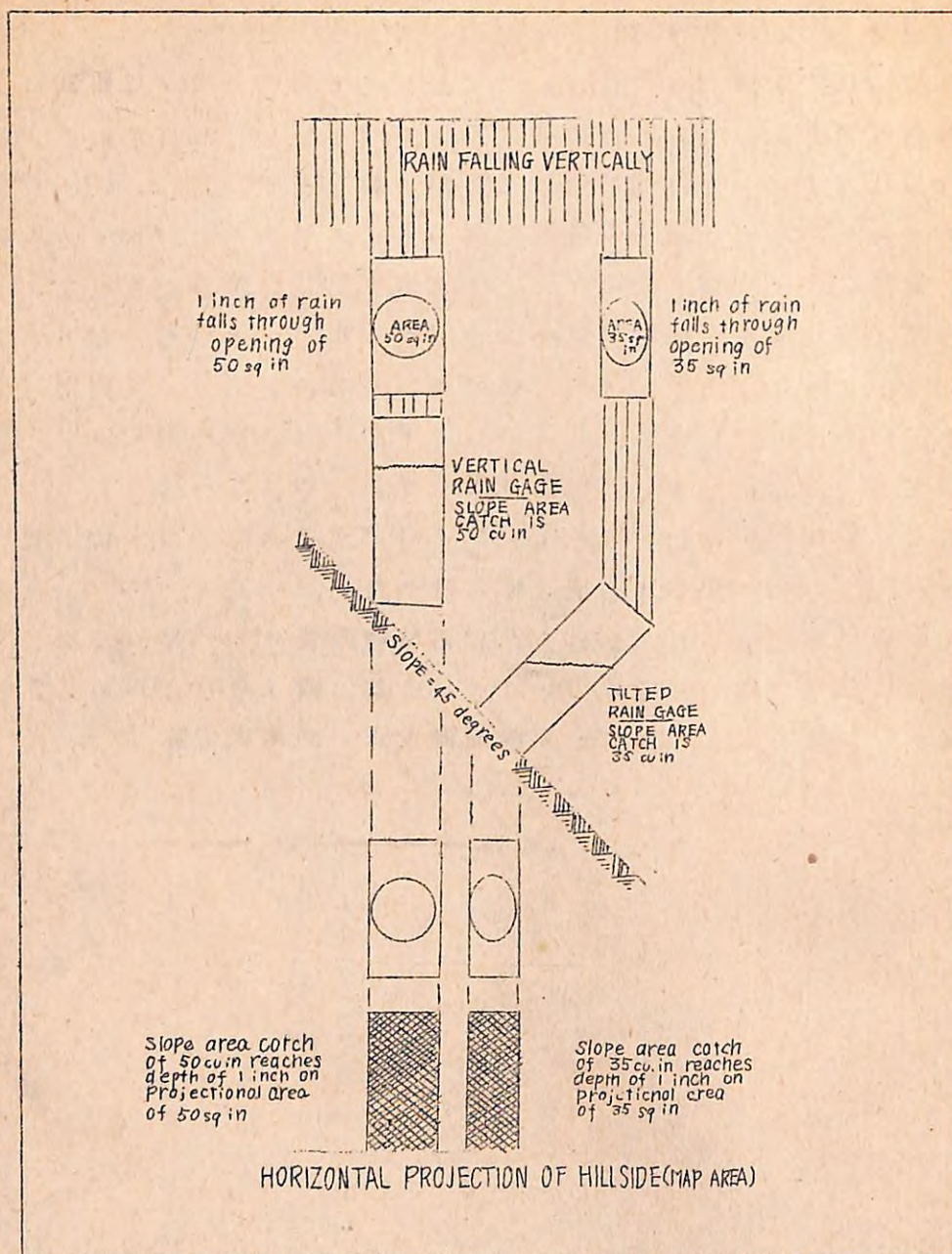


Fig 1 雨が斜面に鉛直に降るときは、直立雨量計でも斜立雨量計でも同一の雨量が観測される。

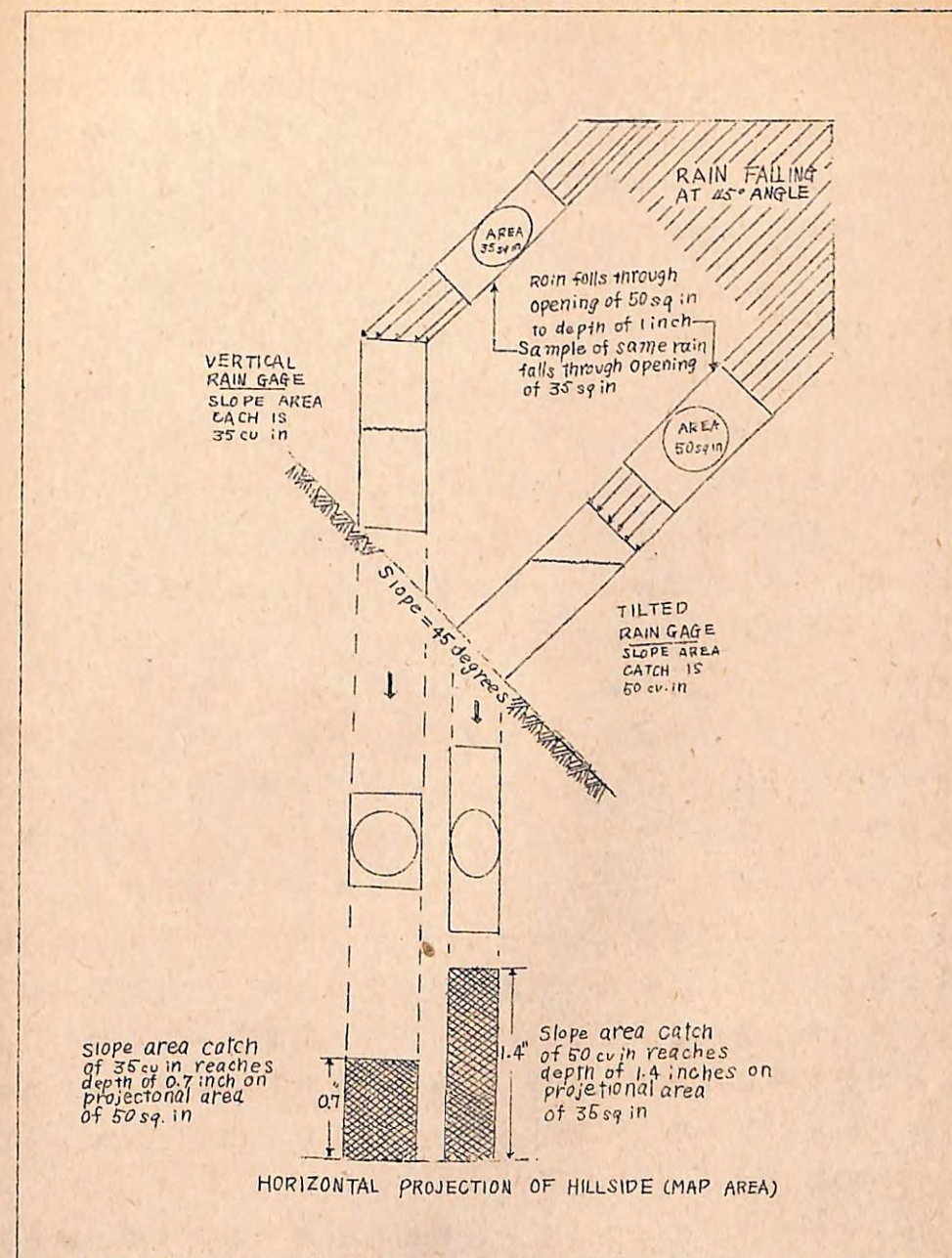


Fig 2 雨が斜めに降ったとき、直立雨量計では正しく測れぬが、斜立雨量計では正しく測れる。

雨が鉛直におちてくるときには双方とも眞の雨量を与えてくれる。50平方時の円い受水口を有し、かつ鉛直においた雨量計の中に1時の深さの雨水が入ると、50時³の雨量が測定される。雨量計の受水口は雨量計の立っている斜面の水平投影に等しい。降水量は地面の水平投影、地面面積上にたまる深さで計算されるから、雨量計中の1時の水深は、地面におちた降水の眞の値である。斜におかれた雨量計の受入口は、これを水平に投影すると楕円になる。この楕円は斜面積に傾斜角の $\cosine$ を乗じたものである。斜面積50時²の投影面積は図に示す如く、0.7を乗じた35時²となる。傾斜した雨量計は、35時³の雨水を受ける。これはその投影面積に対しては1時の水深に相当する。

斜面に鉛直に降った雨は、鉛直にたてた雨量計ですぐはかれるが、斜面に直角に傾けてたてた雨量計ではこの斜面積を水平に投影して補正しなければならない。

オ2の場合には、鉛直から45°の角度で雨が斜面に降った場合である。斜にした雨量計に1時の雨量があったと考えよう。雨量計は斜面に直角である。面積50時²の全円が降雨にむけられる。斜面積が50時²の雨をつかまえる。雨量計の斜面積を投影面積になおすと前の通り35時²になる。従つて50時²の斜面積のうけたものは、1.44時の雨量に相当する。これは地面に到達する眞の雨量に当る。しかし、鉛直の雨量計では楕円形をした有効受水面が斜の雨にさらされる。従つて斜めにおいた雨量計が、50時³、1.44時の雨量を測る同じ雨のとき、鉛直の雨量計の中には35時³の雨水がたまる。この量は雨量計の水平投影面積50時²になおすと、0.7時の雨量になる。

従つて、鉛直においた雨量計は地面に到達する雨の眞の量を示さない。更にその誤差は、眞の雨量の50%にも達するので著しい。

Fourcade (9) は、これを数理的に示した。即ちストーム(本論文では吹き降りの雨のことである)が斜面に当たるとき、観測値

の誤差はストームの方向と雨量計の向きとの間の角の $\cosine$ 函数で減少する。従つて、鉛直と斜めに立てた1対の雨量計が(以下夫々直立雨量計、斜立雨量計と称する*)正しく南向の斜面にあってストームが東か西のときには同じ値を与えるが、更に若しストームの方向が雨量計の向きと反対ならば直立雨量計は斜立雨量計よりずっと多くの雨をとらえる。

このような理論的観察から、先づオ1に普通に鉛直に雨量計をおくことは不適當であり、オ2に、雨量観測の技術として雨量計を傾けることが1つの進歩した方法であることがわかる。このような概念を醒めるために3つの研究課題が樹立された。

降雨の特性。最初の研究は、起伏の大きい地方での眞の雨量はこの降雨 $Vector$ の変化を含む問題を解決することによつて決定しなければならないという $Pers$ の理論を拡張し、又地方化するように設計された。降雨 $Vector$ を決めるためには鉛直、南北及び東北の3成分を測ることが必要である。鉛直成分は普通に鉛直にたてた雨量計で間にあい、他の2つは方向性をもった雨量計で決めることができる。このような降雨 $Vector$ の成分は風の函数であるから、更に雨に關した風の研究を必要とした。これは風速・風向・降雨強度・雨の方向・傾斜に及ぼす風の効果等を含むものであった。降雨 $Vector$ がわかると、次いで蹴々たる山の斜面上の眞の降水量を直立雨量計が受けた降水量から計算した。

雨量計の比較。オ2の研究はオ1の研究と関連して次のことを決定するように計画された。

- (1) 普通に鉛直においた雨量計の捕捉量と、地面においた標準雨量計との比較。
- (2) 雨量計の構造やおき方をかえることによつてその精度をあげる。
- (3) 風速・風向と、試験雨量計の雨の捕捉との関係を明らかにすること。

斜におかれた雨量計。オ3の研究においては、100エーカーの

地域におかれた22英よりなる観測網で、各英に直立及び斜立の雨量計をおいてそれらの捕捉量を比較した。これは才2の研究で決った技術を野外に拡張するためであつた。これらの3つの研究は、各々分けて報告(11, 28, 29.)されたので、以下それらの総合関係を示すことにする。

降雨の特性に関する研究

降雨の特性に関する研究では、風と雨の降り方の関係を取扱った(11)。このため降雨強度、風向及び風速の同時記録を行った。降雨の Vector 成分は指向性の雨量計で測定した。Sam Dimas 式の器械は Pers によって書かれたものと根本的に違っているが、同じ data がえられる。それは上向の受水口と、横向の受水口がついていて、頭が矢羽根で風の向きに面くように、ぐるぐる廻るようにしてある。受水口に入った雨水は、各々違ったタンクに溜められる。水平方向のは4方位別のタンクに溜められる。

降雨の傾斜角 i は次の式から計算される。

$$\tan i = V/H$$

V は受水口が鉛直面にあるものから入った雨量、 H は受水口が水平面にあるものから入った雨量である。ストームの平均傾斜角は、鉛直並びに水平の受水口から入ったものを別々に合計して決めた。

観測器械は、主風に対しよくさらされた小さい丘(雨量計の丘) "Rain gage Hill" に設置された。

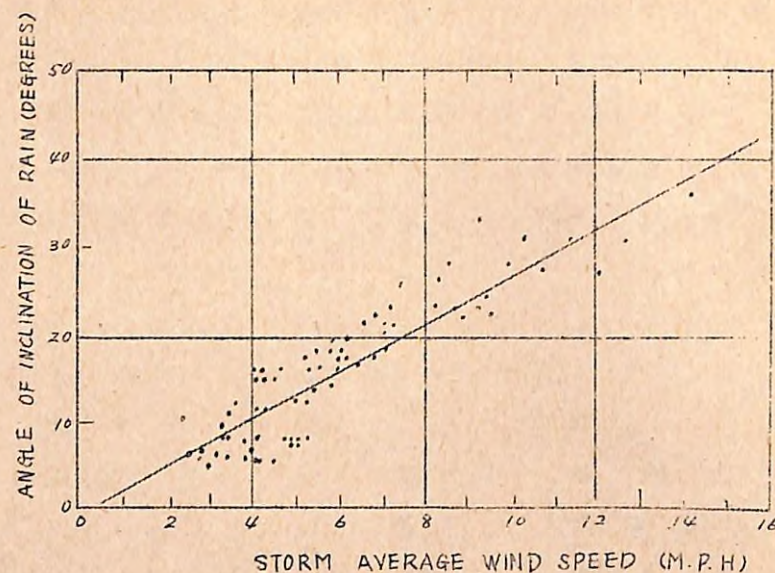
降雨の傾斜角及び平均方向は Vectopluvio meter で得た資料から計算した。これらの角度と方向から、以下の定義によって各ストームに対する降雨 Vector をきめることができた。若し降雨がストーム中同じ角度で、そして同じ方向から降って来れば、ストームは雨粒の経路に並行で、雨と平行な軸の雨量計ではかられた雨量に等しい長さの線を示すことができる。このような直線は、Vector であって、ストームの方向及び大きさをはっきり示すことができる。降雨 Vector の実際的な用法は、"測定値の補正"

で紹介しよう。ここでの降雨 vector の主な用途はストームを分類することである。7年の研究期間に174のストームがあり、251時の雨量があつた。これらのストームのうち雨量が1/4吋以上あつたのは60回で、それらの記録は完全にとれている。これらの data を解析した結果、南カリフォルニアのストームは、雨の降ってくる方向で南から北にわけられる。そしてこれらのストームの種類別に風速・降雨の傾斜角及び降雨強度を調べ次のような結果がえられた。

	ス ト ー ム の 種 類	
	北 より	南 より
ス ト ー ム 数	24	36
総 降 水 量	吋 45.6	117.8
平 均 傾 斜 角	度 19	35
平 均 風 速	哩/時 4.9	11.4
平 均 降 雨 強 度	吋/時 0.20	0.44

この資料解析の結果、北よりのストームは普通雨量が少なく、弱く、角度も小さいこと、他方南よりのストームはこれに反し雨量多く、北よりのストームより激しく、かつ風速が大であり、又降雨は通常鉛直よりかなり傾斜している。この解析の結果から測定された雨の角度は、ストームの平均風速と相関があるということがわかった。

Fig 3. ストームの平均風速と雨の傾斜角の関係



直立雨量計と斜立雨量計の理論的論議で斜面に鉛直に降った雨のときは、2つの雨量計で同一量を測定しうることを示した。すべての方向から同じ傾斜角で同じように直立雨量計に入った雨は、鉛直に降った雨と全く同一の値を与える。しかしこの研究では、双方の雨量計が正確であるというために必要な条件がこの試験地には存在しないことを明にした。即ち殆ど大部分の降雨は斜めに降ったのである。又大部分が南からの吹き降りであつた。急な傾斜地は南面であつたから、試験地の雨量観測値に誤差のあることがわかった。誤差の大きさを並ぶにより観測値をうる方法は雨量計の比較研究でわかった。

雨量計の比較研究

3ヶの円形コンクリートの大型雨量計を“雨量計の丘”に作った。これらの大型雨量計は、本研究で標準として作られたもので、南、東、北面にむいており、大きさは直径10呎、面積は285呎²

である。これらの傾斜は30~40%で地面に平行にし直落地面におかれた。各大型雨量計には、入った雨水が流出したり、はねかえりが入らぬように、周囲に金網製の柵をはりめぐらした。大型雨量計のすや近くには8ヶの雨量計をおいた。2ヶは8吋の標準型雨量計で鉛直に立て、そのうち1ヶは口を地上40吋、他の1つは口が地面と同じ高さになるようにおいた。

又3ヶの口径8吋標準型の雨量計を斜面に直角に地上40吋、1呎、0吋においた。他の3つの雨量計のうち7つは標準高においたものであり、しかも受水口を斜に切つてあるので受水面は地面と平行である。この雨量計は *Pers* の型の変形で、*Streo gage* と称した。(b) は、面積220平方呎の谷型雨量計 (*thougn type gage*) で地面に平行においた。(c) は口径4吋の雨量計で、地上高40吋、斜面に平行においた。

普通の気象局型の雨量計が最も実用的であることが最初の報告でわかつたので、本論においては、標準の大型雨量計と地上40吋に口がくるよう斜にたてた標準型の雨量計との比較を論じよう。更に北面斜面に斜につけられたものによる観測値は、附近の植物の妨害で信頼できぬと判断されたので、南面と東面に斜めにおかれたもののみについて論じよう。

この研究の結論は南斜面で94ヶのストームと、東斜面で77ヶのストームについて総括したものである。

	降水量捕捉量 (吋)	
	南向斜面	北向斜面
大型雨量計	142.3 吋	121.0 吋
直立雨量計	133.3	119.2
斜立雨量計	143.7	120.8

これらの結果によると南斜面の直立雨量計は標準の大型雨量計に入る真の雨の量を示さなかつた。観測値は平均63%、9吋少なかつた。同時に斜立雨量計では、14吋余計につかまえた。そしてこの方が標準と1%の誤差範囲内でよく一致した。東斜面では少

しかし差がなかった。即ち、直立雨量計は 1.8 吋、1.5% 斜立雨量計では 0.2 吋、0.2% 位の差であつた。この発見は重要な意義をもつていた。即ち、降雨の大部分は雨よりの吹き降りであることを示している。標準型の雨量計を地面近く、或は地面と同じ高さにおくことにより精度を高めたが、それには穴を掘ったり、はね返を防ぐスクリーンも必要であつた。更に穴に入れた雨量計は雪の観測には Koschmieder (18) の指適した通り不適當であつた。又動物の妨害を受けたり、風で飛ばされてきた木の葉や、他のものでつまるとそれもあった。

南斜面の直立雨量計が正しい雨量を求めるに不適當であるということは、Fig 4 にも示されている。同様に Fig 5 は斜立雨量計

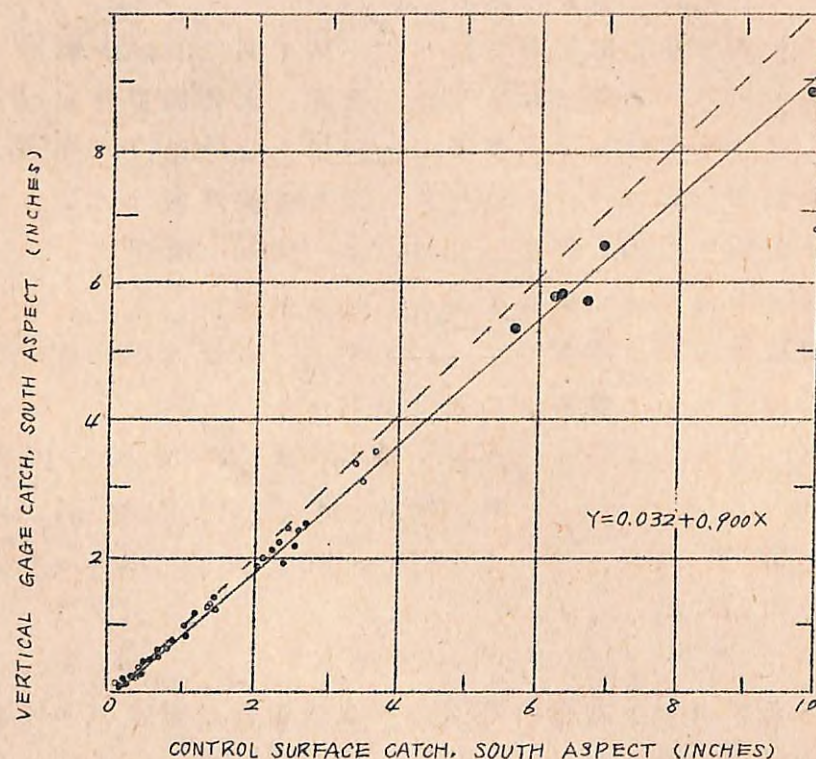


Fig 4. 直立雨量計による雨量と、受水面を地表面と同一高さにおいた標準雨量計による雨量との関係

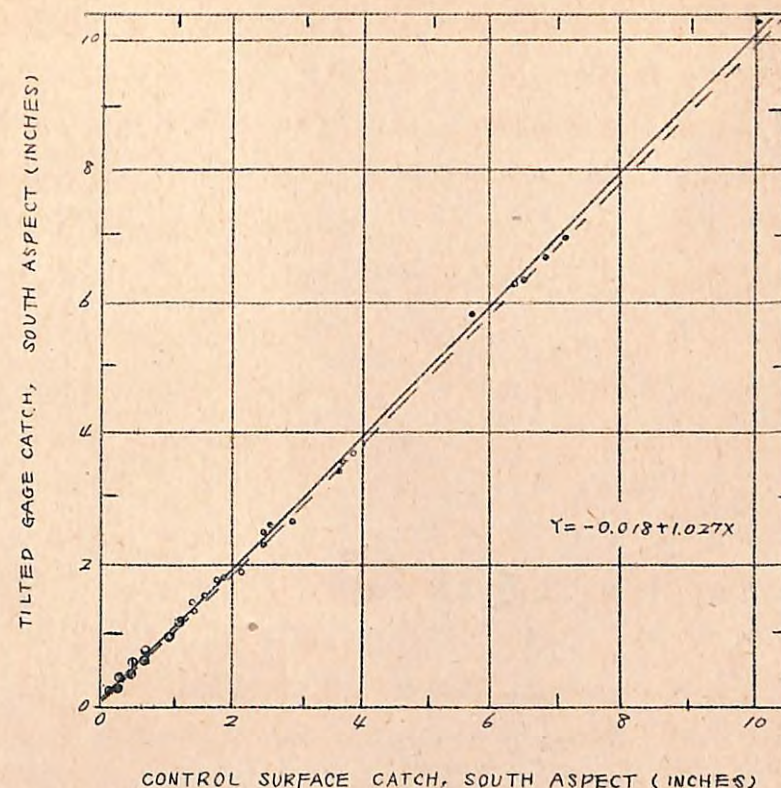


Fig 5. 斜面に直角においた雨量による雨量と、受水面を地面と同一高さにおいた標準雨量計による雨量との関係

の雨量が標準の雨量とよく一致していることを示している。最小自乗法による回帰直線は、直立雨量計については

$$Y = 0.032 + 0.900X \text{ ----- (2)}$$

斜立雨量計については

$$Y = -0.018 + 1.027X \text{ ----- (3)}$$

となった。

回帰係数は、直立雨量計 0.900、斜立雨量計 1.027 でこれらは Storey 及び Hamilton (28) のえた 0.9550 及び 1.0256 と異っている。(2)、(3) 式を得るには、3ヶ年以上の資料を用いた。

直立雨量計の誤差が著しく減っていくのに対し、斜立雨量計の

誤差が少くて殆どかわらぬということは記録に値する。

角及び東斜面でえた結果から drainage basin 上の降雨の見積に影響している因子に関する Horton (14, 15) の論議が確認された。Horton は、"若し雨を伴う風が斜面にあたれば、山の斜面に落ちる雨量は、一般に、水平投影面積と同じ平面積に降る雨量よりも多く、又雨量計の上の線を水平にした雨量計に入る雨量よりはるかに多い。"と断言した。Horton は、雨の傾斜、流域の傾斜、ストームの方向等を計算に入れて、誤差のひろがりを出す式を導き出した。Horton の式中にあるストームの方向に關する項は、東斜面での雨量計による観測値と、地面の大型の標準雨量計との間に差がないかを示している。雨量観測値の誤差はストームの方向が、斜面に直角のときに大きく、斜面を横にうつときには少い。ストームの方向と斜面との角の cosine は誤差の主因であり、斜面に直角に近いとき大で、横のとき小となる。この点に關する更にくわしい数学的な議論は、1942 年に Fourcade (9) がしており、後の雨量調査に關する研究に大いに役立った。

現在研究中の直立と斜立とのパーセントの差は、降雨特性の研究中に測られた降雨の傾斜角に帰すべきものである (Fig 6)。

最小自乗法で次の式が求められた。

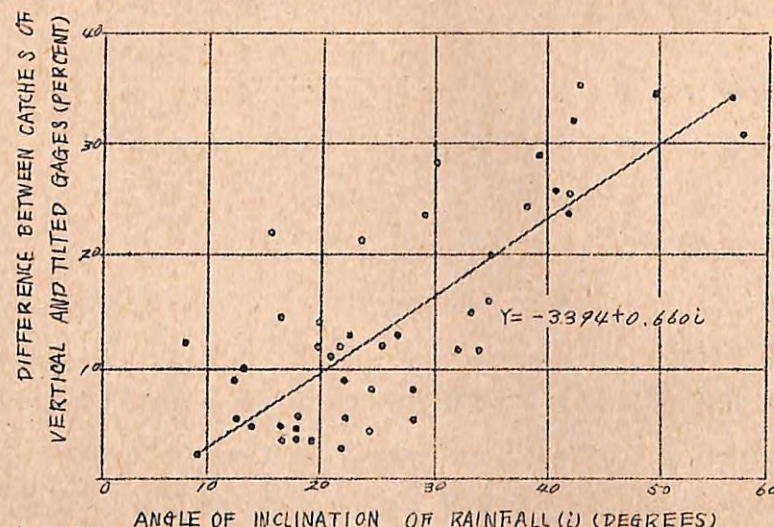


Fig 6. 東斜面における直立及び斜立雨量計による雨量の
%差と、雨の傾斜角との関係
(16)

$$Y = -3.394 + 0.660 i \quad \text{----- (2)}$$

Y は直立と斜立雨量計のパーセント差で、i は Vectopluiometer で測定した雨の傾斜角である。

雨が少ししか傾いていないときは二種の雨量計間に差は認められないが、傾斜角が 15° 以上になると差が目立ってくる。降雨の傾斜角は、直接風速に關係があるので、直立雨量計の誤差は結局風速の函数である。

真の雨量の 6% に達する誤差は、この山岳地方で直立雨量計を使用することによって起因することがわかった。斜面に直角にたてた斜立雨量計による誤差はわずかに 1% であつた。雨量計を斜めに斜面におくことが、急斜面における雨量観測のよい方法であることがわかった。残る問題は斜立の雨量計が流域にもっと正確な降水量の見積を与えるか否かであつた。

Bell 流域における斜の雨量計に關する研究

オズの研究 (29) は 1935 年に始められた。これは小さな流域で、直立雨量計並びに斜立雨量計による 2 つの観測網を比較することであつた。この研究は Bell 谷の小流域 No. 2 面積 100 町歩の中で行われた。(PL 2 参照) ここでは精密な水文研究が行われている。Bell 流域 No. 2 の地形は、角な屋根と、斜面をもち、 $40 \sim 105^\circ$ の傾斜があり斜面は S. SE. SW が卓越している。

22 ヶの雨量計を流域内で 2500, 2800, 3100, 3400 呎の高さの等高線に沿つて直立しておいた。この研究に當り、斜面に直角な斜立雨量計を各直立雨量計のすぐ近くにおいた。(PL 3 参照)

斜立雨量計の方位傾斜のしかたは斜面の角度を直立雨量計から半径 50 呎の円内でよくみて行われた。研究は 4 ケ年継続し、この間 7 のストームの記録をえた。

これらの資料は Storey 及び Wilm (29) によつて解析され、次の結論がえられた。

1. 斜立雨量計の捕捉量は、一般に直立雨量計のそれより大で、チャンスで期待されるよりはるかに大である。

2. 2種の雨量計でストームをつかまえる数の関係は次式で示される。

$$E = 1.0979 \quad X^{1.0251} \quad \text{-----} \quad (5)$$

こゝにEは、22の斜立雨量計が捕まえた平均数、Xは直立雨量計の捕まえたストームの数である。

3. Eの標準誤差は8.5%~8.9%である。

4. この標準誤差が大きいのは、おそらく風向を含む他の因子が前式の精度を制限したためと思われる。

5. 主風にもっている斜立雨量計は、多量の雨をとらえ、反対向のものは少量しか捕まえなかった。そして主風と直角のものは、直立雨量計のそれと大差なかった。

この解析は、すべての観測を1つの回帰へ集合したもので、雨量計のおき方、ストームの方向、降雨の傾斜に及ぼす風速の影響等を考慮にいれてなかった。

Storey 及び Wilm は、このとき降雨の特性に関する研究をしていなかったのである。又これらの結果を、比較観測にも応用しなかった。この2つの研究を Bell 流域 No.2 においてえられた資料と結びつけるために、著者は又別の研究を行った。ここでは22ヶの個々の雨量計の記録を検討した結果 19ヶが使用できることがわかった。他の3ヶ中の1ヶは漏っていたし、他の2ヶは傾け方がよくなかったからである。

流域雨量の見積については、直立及び斜立雨量計の観測網から計算した値が著しく異っていた。(Tab. I)

Tabl 1

Bell 流域 No.2 における年平均降水量

斜立並に直立雨量計による観測網から推算したもの

総雨量 1 吋以下のストーム

水 年	スト ーム 数	年平均雨量の見積値		見積値の差	
		直立雨量計 吋	斜立雨量計 吋	斜立 - 直立 吋	%
1935 ~ 36	9	3.6	3.9	+ 0.3	+ 8.3
1936 ~ 37	11	3.6	3.8	+ 0.2	+ 5.6
1937 ~ 38	12	5.4	5.6	+ 0.2	+ 3.7
1938 ~ 39	8	3.8	3.9	+ 0.1	+ 2.6
計	40	16.4	17.2	+ 0.8	+ 4.9

総雨量 1 吋以上のストーム

1935 ~ 36	5	18.6	21.5	+ 2.9	+ 15.6
1936 ~ 37	12	37.0	42.6	+ 5.6	+ 15.1
1937 ~ 38	8	35.2	42.5	+ 7.3	+ 20.1
1938 ~ 39	6	16.0	17.9	+ 1.9	+ 11.9
計	31	106.8	124.5	+ 17.7	+ 16.5

雨量 1 吋以下のストームについては、大きなストームに対するより%差が少なかった。又見積雨量の%差は、年により異った。観測期間中の全7ヶのストームに対し、2種の見積差は 18.5 吋、15%であった。

総雨量 1 吋以下のストームが 40、2種の雨量計に同じ平均を与えたものは、10、8ヶは直立より高い平均値を与えた。直立と斜立での差の大きかったのは22ヶの雨よりのストームのときであ

った。

総雨量が1吋以上のストームは31ヶ、ただ7ヶが北寄りでありこれは直立雨量計の方が6%多かった。1吋以上の雨量のあつたストーム中残りの30ヶは平均捕捉量が16.6%直立より大であつた。年々の差は雨の降る時の傾きによる。これらの差はストームの風向と風力の変化に起因している。

又年々の2種の見積雨量の差の差は比較観測によつて説明がえられた。7つの良好相関が、直立・斜立の雨量計と、雨の傾きとの間にえられた。(p. 2) Bell 流域 No. 2 の雨量計の丘はわずかに傾しかはなれていなかったから、雨量計の丘ではかられた傾斜角がこの流域にそのまま応用できるか否かの試験を行つた。

雨量計の丘における傾斜角 i の年平均値を求め本流域での見積雨量の年平均差と比較すると次の通りである。

水	年	年平均傾斜角 i	見 積 差 斜立 - 直立 %
1935	~ 36	36°	+15.6
1936	~ 37	34°	+15.1
1937	~ 38	41°	+20.8
1938	~ 39	25°	+11.8

水年は10月1日から翌年の9月30日の12月である。

この比較の結果、(5)式を使うより、直立雨量計を使つてもつとよく流域雨量を見積る方法がわかつた。南よりのストームのとき、Bell流域 No. 2 において、直立と斜立の雨量計19ヶの間の%差と雨量計の丘で測定した雨の傾斜角との関係は、Fig. 7の通りであつて、次の如き回帰直線が求められた。

$$Y = -4.65 + 0.64 i \quad \text{--- (6)}$$

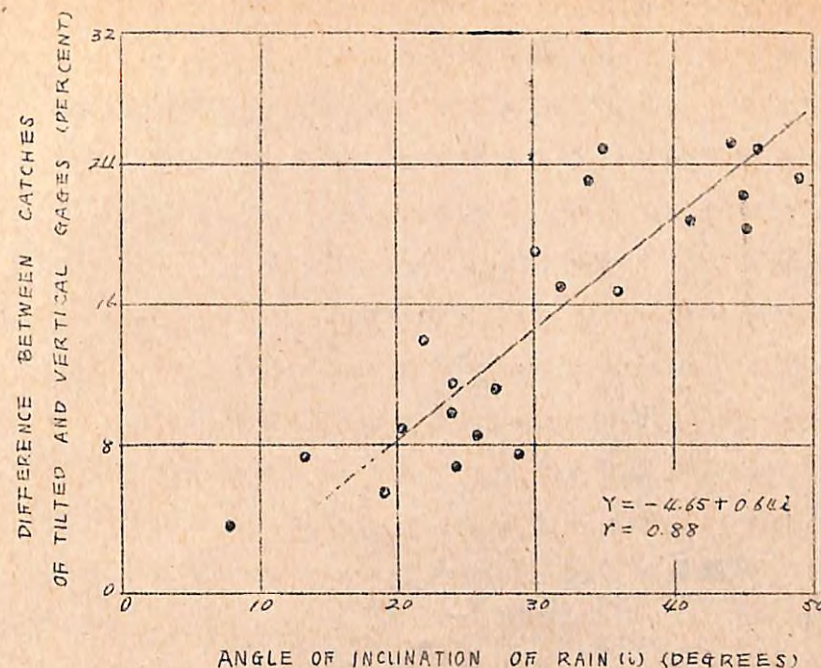


Fig. 7 雨量計の丘で観測した雨の傾斜角と、流域内におかれた斜立並びに直立の雨量計による観測値でえられた雨量の%差との関係

ここで Y は、直立及び斜立の雨量計の差で、 i は降雨の傾斜角である。⁵⁾

この式は相関係数 $r = +0.88$ で、関係式としては非常に高い精度を示している。

(6)式は雨量計の丘の雨量計に対する(4)式と全く似ている。傾斜角を(6)式にいれれば、直立雨量計に対する%補正値が求められる。直立雨量計の平均値にこれらの%補正値を加えると斜立雨量計から求めた流域雨量の推定値がえられる。(6)式を用いて斜立雨量計に入る量を計算し、その実測値との標準誤差を求めてみると3%である。このことは大凡3/5の場合において斜立雨量計で測つた値に比して3%以内の誤差に止ることを意味している。

⁵⁾ Ross, K. D. a method of correcting vertical gage measurements to tilted gage basis. Calif. Forest Range Exp. Sta. progress report. 1946 (Typewritten)

この式を更に検討してみるため12、式の計算に使用しなかった10ヶのストーム—但し斜立雨量計の観測値は利用できる—について見積った。この10ヶのストームについて、計算値の斜立雨量計に対する標準偏差は4%であつて、これは先の標準誤差3%と大体よく一致する。Storey 及び Wilm (29) がえた 8.5, 8.9 %の標準誤差と比べると、ストームの特性観測に基づく(6)式が雨量の差から求めた(5)式よりはるかにすぐれていることがわかる。尚(5)式も(6)式もこの流域のみにしか応用できないということは、あきらかにしておく必要がある。この制約は(5), (6)式とも比較的せまい試験地内におかれた比較的多数の雨量計の相互関係から求められているからである。他の流域における傾斜面、雨量計の向き、風速等との関係は本流域とのそれとは異なるであらう。

雨量観測値に及ぼす誤差の性質

従来の研究は Horton (14), Pers (22) 及び Fourcade (9) 等によつて非常に起伏の多い地方における雨量観測の精度について勧告されたことを確めたものである。これらの研究は、吾々の始めの雨量観測網における雨量計の数、配置が統計的にはよかつたが、或る場所では正しい観測値をうるに失敗したことを示している。しかし下ら同様の研究から、雨量観測方法の質を改善する方法がわかつた。直立雨量計が誤差をもつという研究は、斜立雨量計の効能をあきらかにした。そして起伏の多い植生の低い本地方で、風によつて起る雨の斜め降りは、地面におちる雨を正確にはかるとき、直立雨量計では少くであることを説明した。

雨量計が雨をつかまえるときの風の影響については、多くの研究者が長く論議した。(2, 4, 5, 14, 16, 18, 20, 24, 26)。そしてほとんど例外なく、雨量が少くであることを雨量計によつて起される気流の乱れに帰した。この乱れを少なくするために、多くの研究者は雨量計の受水口附近の気流を滑らかにするようなシールドを考えた。(2, 3, 20, 24)。Røstad (24) は1924年

にシールド作用は、それを地面に平行にすることによつて改良されるといつた。又 pagliuca (2) は1934年に雨量計及びシールドを地表面に直角におくことをすすめた。雨量計が雨を捕えるとき風の影響がよく認められてから、雨量計の型、おき方に変化が起つた。Pers (22) は1932年に、風の擾乱作用には目もくれなかつたが風が雨を傾けることを観測してから、この効果に注目して彼の雨量計を變形した。

これまでかいた San Dimas 試験地での実験では風が乱れていようと、いまいと差をつけずに行つた。吾々の研究は、直立雨量計が正しい雨量を与えないこと。この不正確さは風によつて雨が傾斜されるためであるとした。研究の結果は更に斜立した雨量計が1%の誤差内で正しい雨量を与えることを示した。

雨量測定の研究において他によい方法がないということをはかめるために、シールドをした雨量計の簡単な研究も行つた。Mt. Washington 型のシールド—Brooks (7) によつて記されたもの—をつけ、2つのごく近い場所でシールドしたものとしないうものとの比較を行つた。

ライシメーター区の研究

雨量計の丘から数100mはなれたところに、Chaparral の生えているところから失われる蒸発散量を求めるために土をつめた、タンク、ライシメーターを作つてある(8)。ライシメーターの上は平らで面積は2エーカーある。7つの直立雨量計を数ヤード毎においたがこの中では雨量に著しい差はなかつた。

雨量計 No. L-7 はその1つであるが、2年の観測後にシールドをつけその後更に2年観測を行つた。L-7 の資料と近くのシールドの施してない L-1 雨量計の比較結果を Fig 8 に示した。シールドする前に L-7 は L-1 より 0.8 % 余計に雨をとつていた。これは大した違ひではなかつた。

シールド後、L-7 の積算補正量は、L-1 よりわずか 1.8 % 多かつた。このようにシールドしたものとしないうものとの差が少いことは、L-7 にシールドした効果が極めて少いことを意味している。

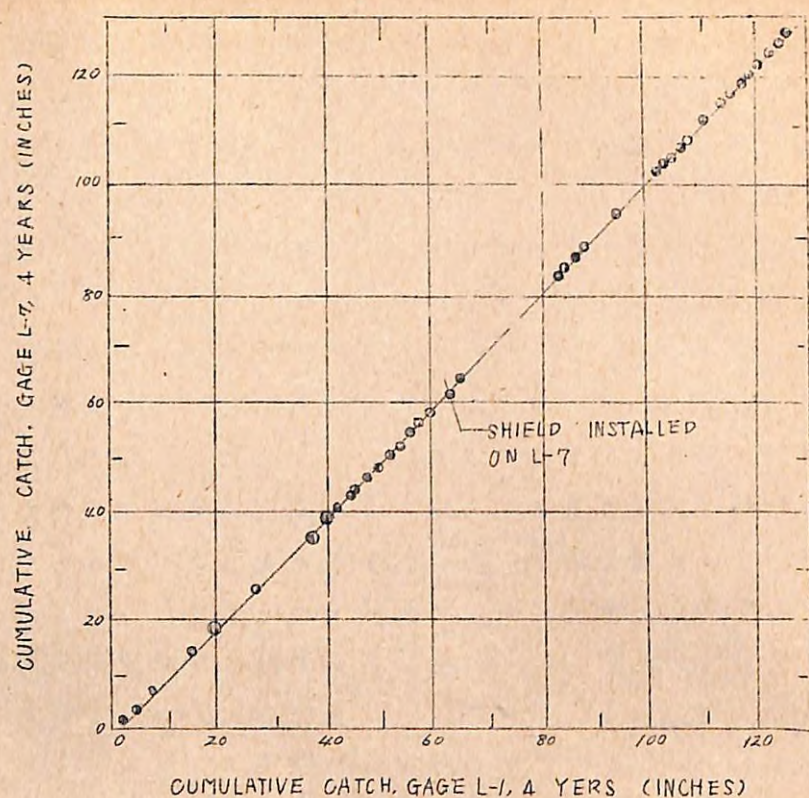


Fig. 8 平らなところの鋭直にたてられた雨量計の積算雨量と、もう一つの雨量計にシールドをつける前後の積算雨量との関係

雨量計の丘のシールドした雨量計の研究

さきの研究は低い平坦地で行われたものであったため、直立も斜立の雨量計でも同じ値を示した。平地より乱れが多いはずの斜面においた雨量計をシールドすることにより捕捉量がどう変わるかを決定するためにオズの研究を雨量計の丘で行った。ここでは二つの直立雨量計V-1, V-2を標準雨量計にごく近づけて設置した。2年間の測定後、1雨量計でMt. Washington型のシールドをつけた。そして他の1雨量計は斜面に直角に傾けて設置した。測定を更に2年続けた。

変形処理を行った前後各2年の data をそのそばの標準大型雨

量計の資料と比較した。V-1及びV-2の積算雨量を地面においた大型雨量計の積算雨量に対してプロットした。(Fig 9-10)

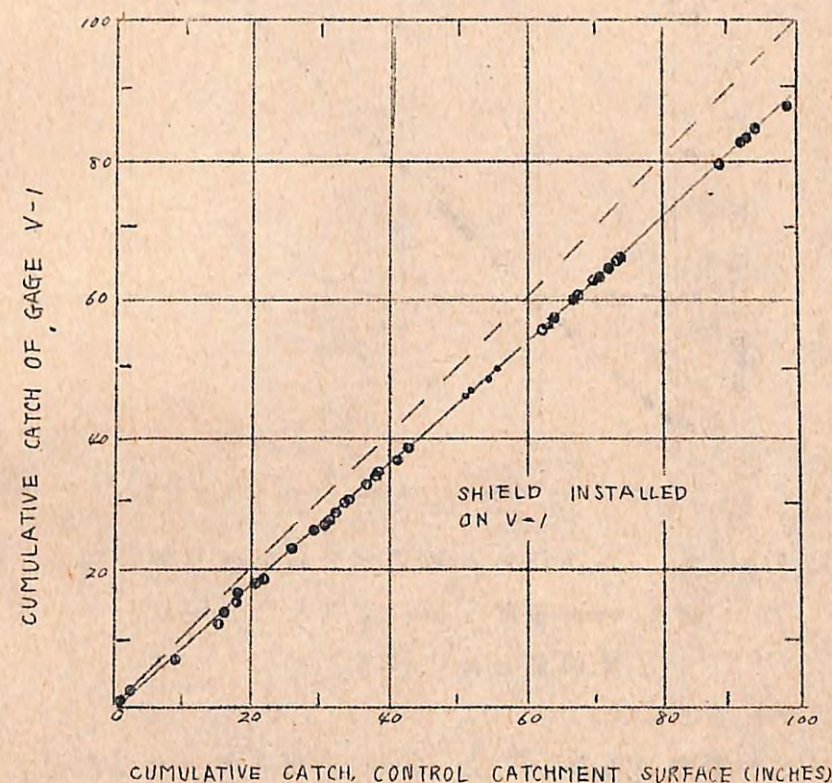


Fig 9 斜面においた標準雨量計と、オズの雨量計にシールドをつけた前後の積算雨量との関係

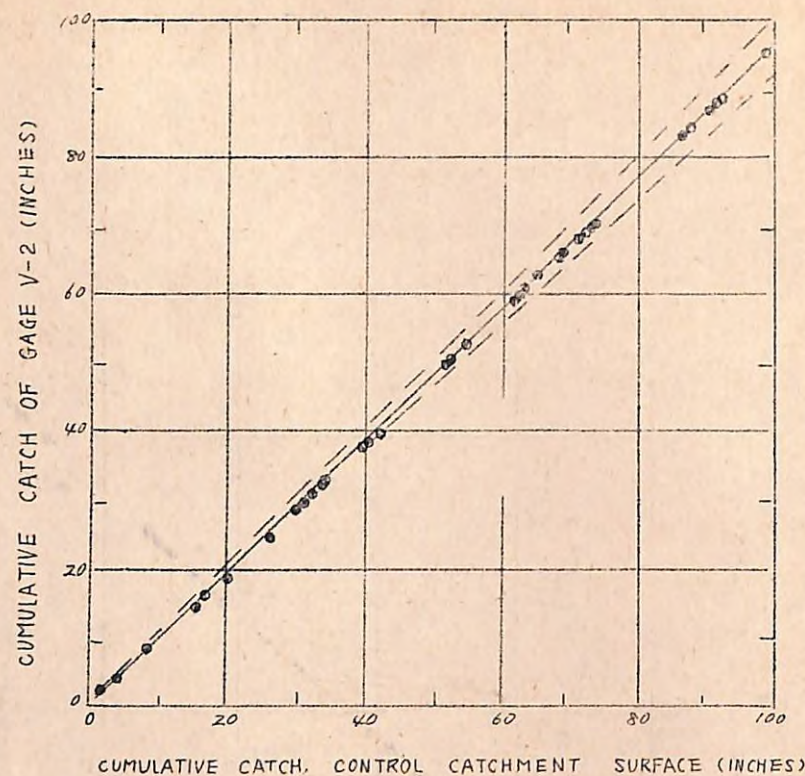


Fig 10 斜面に於ける標準雨量計の積算雨量と、 $\alpha 2$ の雨量計を最初鉛直について傾けたときの積算雨量との比較

V-1は最初2ヶ年0.91の slope で同等線から発散していった。これは標準大型雨量計より10.7%少なかった。この雨量計にシールドをつけてから後の2ヶ年に対して、曲線は同等線からはなれていった。このときは0.88の slope で、標準大型雨量計より10.7%少なかった。

他方雨量計V-2の捕捉量は、最初の2ヶ年はV-1と同様に、同等線から同じ角度ではなれていった。しかし雨量計を傾けてからは標準大型雨量計と同じ値の雨をつかめた。斜立雨量計の積算捕捉量は標準とわずか0.2%しか違っていなかった。この研究で雨

量計をシールドすることは、重要なことではないことがわかった。雨量計を斜面に直角に傾けることが、非常にすぐれた測定方法であるから。

この研究から、本試験地のような山岳地帯においては雨量観測における主たる誤差は、雨量計を鉛直におくためにおこること、又シールドしても傾けたものにはとても及ばぬことがわかった。San Dimas の研究は雪より雨の方を取扱った。雨量計による効果的な降雪量観測は別問題であり、その技術は満足すべきものがえられていない。雪は本試験地ではごくわずかの部分しかおいていないので、測定方法についてはほとんど研究していない。

雨量観測網の改善

吾々の降水量観測に誤差のあったこと、個々の観測値の誤差を少なくする方法を発見したことから吾々は次に流域内の雨量をより正しく求めるための観測網を工夫することにした。同時に観測並びに整理の労力を減ずるために、測誤を減らすということも望ましいことであつた。従つて少い雨量計でしかもその中の6ヶを除き、他はすべて傾けた雨量計で観測網をつくつた。観測網は本試験地を含む12ヶの中流域の各々において、同じような斜面・地形・高度の小斜面においた。

試験的に少くとも1斜面に1ヶの雨量計をおくべきだということが決められた。この初歩的な雨量計の配置を行うために1000呎の間隔で高度帯を示す地図を作つた。次に各流域の各高度帯を2つ以上の地区に分け普通水路又は尾根によつて境した。それらは比較的一様な主斜面をもっている。若し小区域が比較的大きく2つ以上の主斜面をもつときはそれを更に細分した。こうして68ヶの小斜面に分けた (Fig 11)。総数22ヶの雨量計を、観測にゆくことの難易、直立雨量計の観測網により測定した資料による降雨傾面等を考慮して設置した。

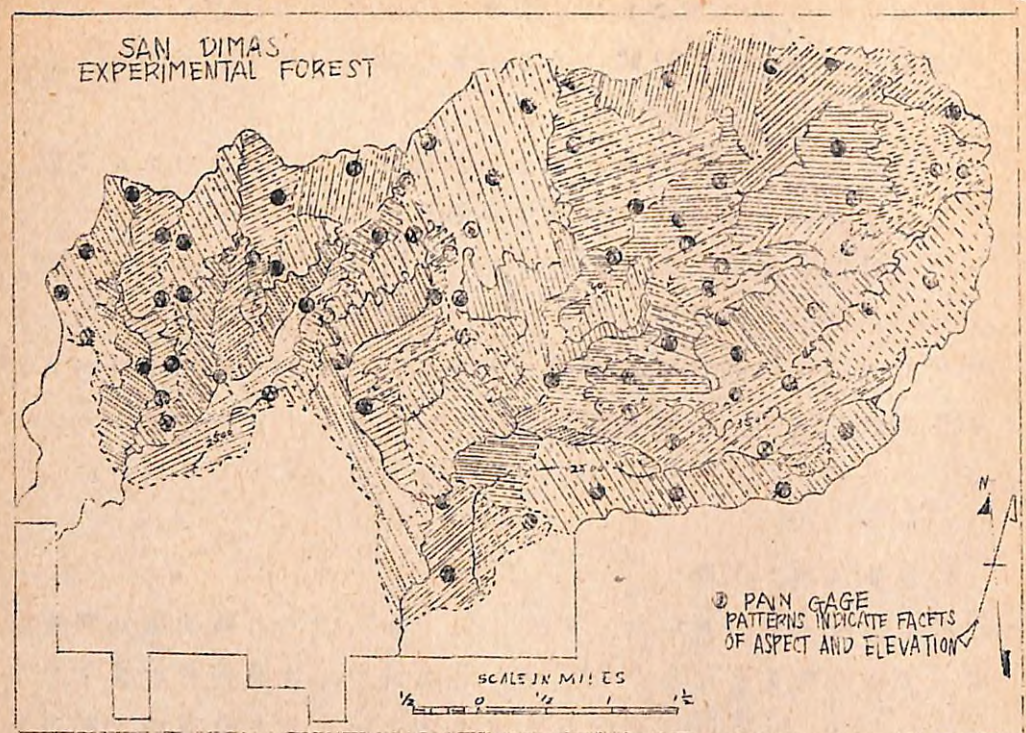


Fig 11 中程度の集水地で、高度別に同じような傾斜状受の小斜面によって作られた観測網中の斜立雨量計の分布図

この数は最初には流域雨量を求めるために必要と思われた雨量計数より著しく少ない。しかし下ら、この減少は正しかった。降水量の著しい違いは或限られた区域内における地形的影響によるものであるということ、二例でもわかるとおり誤りであった。

Storey は Bell 谷の流域における研究の結果として地形と雨量の断面図を示した (Fig 12 A)。彼のこの研究は、吾々が雨の斜降りが雨量計の捕捉に及ぼす影響の研究を完成する前に行われたものである。吾々は生の観測値を (A) 式に似た関係式によって補正して雨量断面図を作った (Fig 12)。次の結果地形によって

雨量がどれ程違ねぬことがわかった。

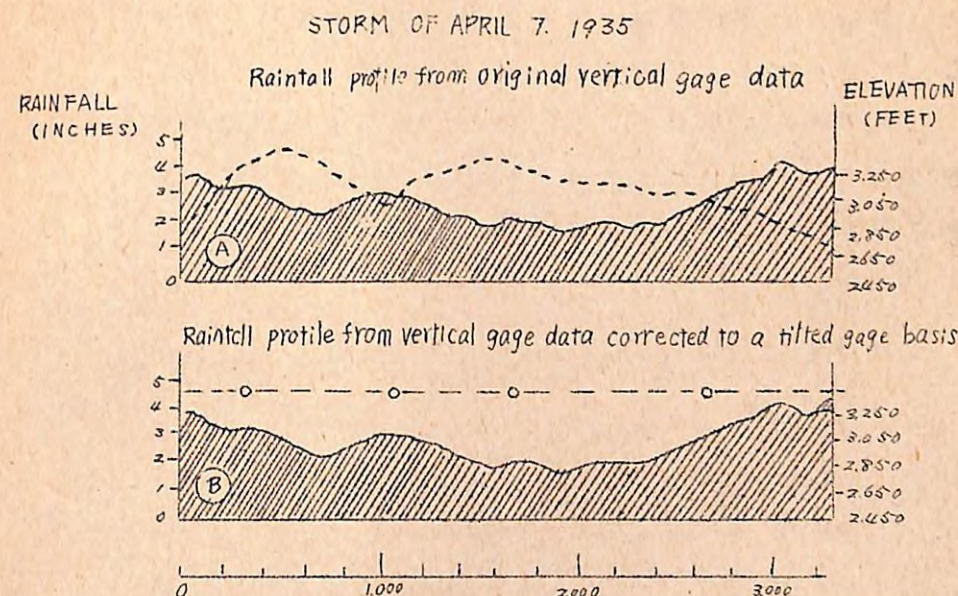


Fig 12. 正しくない雨量観測値が、地形の雨に及ぼす効果として、誤った結論を導き出した例である。

A は、H. C. Storey の“雨量に及ぼす地形の影響”と題する報告中にある 1935 年々月日のストームのときの Bell 小流域における雨量断面図である。B は補正した資料によって書き改めた断面図である。

直立雨量計 No. 51 と No. F-1 は共に Fern Canyon の頂きと同じ高度 (5,100 呎) にあり、同じような斜面をもち、互に離れている。双方の雨量計は風の強いところにあり、1934 年—1949 年の 16 年間に、No. 51 は 365 時の雨量を、F-1 は同じ期間に 308 時をつかまえた。18.5 時だけ少ない。

差は雨量計のある場所の違いと考えられていた。1947 年雨量計を

斜にしてから4年間観測を続けた。この間 No 51 は 102 吋の雨を、
F-1 は 100 吋の雨をつかまえたが、これは多少少かった。このよ
うに雨量計の捕捉量は、外的影響よりも雨量計の据付けが正しく
ないことによることを示した。

このような比較から、San Dimas 試験地内の雨量の量は、ま
さに考えられていたものよりは、はるかにわずかであることが、
あきらかになった。吾々は雨量計を各高度帯の面積に応じて分布
した。

Altitudinal zone (feet)	Area %	Raingage %
1500 — 2500	27	28
2500 — 3500	44	45
3500 — 4500	19	18
4500 — 5000	10	9

個々の流域においては、雨量計を各高度帯の面積%に応じ、5
名に1ヶの割合で置いた。Fig 20 を仔細にみると、数ヶの斜面に雨
量計のないことがわかるであらう。これらの斜面は雨量計をおき
に近づきがたい所であつて、これらの斜面に対する降雨量は他の
最寄りの雨量計から内挿されるものである。又ノ方他の斜面では、
期待されるよりは多い雨量計のあることがわかるであらう。余分
の雨量計は接近の困難な他の斜面の降水量を決定するためのもの
である。

新しい測定網ではできるだけ斜面の中央に雨量計をおいた。各
雨量計は斜面に直角に斜立させた。斜面が急峻で雨量計を直角に
おけぬようなところもいくつかあり、5ヶの雨量計はV型の谷底
に、1つは山の稜線上において適当な観測網を完成した。

最初のものと次の新しい観測網は共に3ヶ年働いた。此の期間
の観測結果を比較してみると、

- (1) 斜立雨量計網から計算された平均流域雨量は、直立のもの
によるより多い。

- (2) 斜立雨量計から求めた等雨量線図は、直立雨量計の資料
から求めたものより簡単である。直立雨量計の資料から
求めた等雨量線図には、島、谷、稜線等がみられるがこ
れは直立雨量計の雨量に誤差があることを証明している。

San Dimas 試験地で、斜立雨量計をすすめたのは、これが直
立雨量計よりも多くの雨を捕捉したからでは決してなかつた。ス
トームと反対方向に向いていた雨量計では直立雨量計よりも少な
い。San Dimas 試験地で雨量計をおいた斜面の多くは南面であ
つた。そして多くのストームは南からきた。従つて斜立雨量計が
直立雨量計よりも多くの雨をつかまえた。北よりのストームのとき
は、斜立雨量計は直立雨量計よりも雨量が少なかつた。直立雨量計
の捕捉量の誤差は正又は負のこともあるが、そういうときでも雨
量計が傾けてあるときはこれが帳消しになる。

正しくない観測値の補正

雨の降り方及び雨量計の精度に関する研究を行っている間、
最初の直立雨量計網の観測資料は蓄積されていつた。これらの資
料は水文学的解析に應用する前に補正が必要である。直立雨量計
による観測値の補正の方法は発展して(6)式がえられた。この
式は Bell 流域附近だけでしか使えない。が若し直立雨量計と斜
立雨量計の關係及び降雨の傾斜角がわかつておれば、どこでもこ
の原理は應用できるであらう。直立雨量計の資料補正を期待して
San Dimas 試験地に次のような装置が付けられた。ストームの
状態と、雨量計の捕捉量の關係をもつと細かく研究する必要があ
ると思われる、ところを直立雨量計のあるところと斜立雨量計を
13ヶ所対においた。ストーム Vector を決定するために Vectopluri-
ometer を試験地のあちこちにおいた。

本報告の最初にかゝげた回転型の Vectopluviometer は、他の
型のものとしてえられた。吾々が最初に使った指向性雨量計は
Pers の記したものに改良を加えたものであつたが、構造や取り

あつかいが複雑であつたのでもっと簡単な仕組みが考案された (Pl. 4 参照)。Pers ののは4つのプリズム型をした郵便箱型のものであつたが、吾々はそのかわりに亜鉛渡鉄板製の筒状の water pipe 型の曲管を4つつけたものを作つた。曲管は口径8吋あつて、4吋角の柱につけたリケットに鉄帯を取付けてあり、90° づつはなしてある。そして垂直な口は、コンパスの四方位にあわせてある。各々の下に円錐形の水ためがあり、その下側に水をとり出すコックをつけてある。各口から入った水は、下のコックから出して8吋雨量計用の雨量計で測定する。この指向性雨量計は、すえつけたら降水の水平 vector がわかるようになっている。降雨の垂直成分は、直立雨量計でえられる。若し降雨の各成分がわかるとストームの方向、かたむきが一様であつてもかわつても、直立雨量計の雨量から真の雨量を計算することができる。若し雨が一定の傾斜で一定の方向から降ってくれば、ストームは雨滴の経路に並行で同方向の軸をもった雨量計で測つた雨量に等しい長さで表わすことができる。(Fig 13)

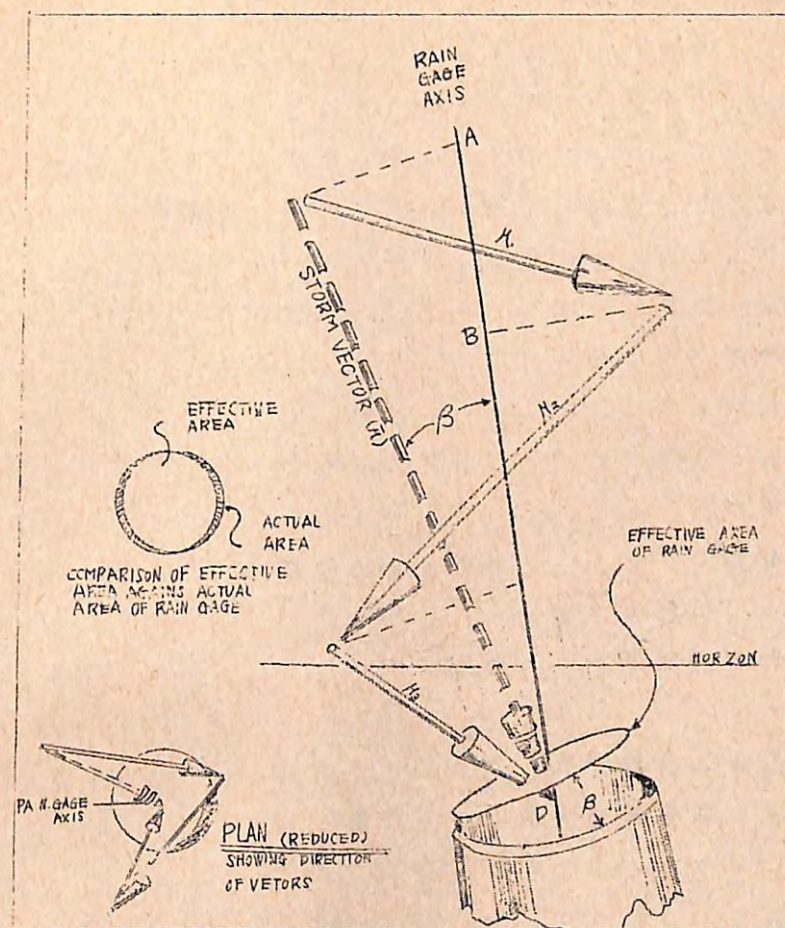


Fig 13 ストームのヴェクトルによる表現

若し雨量計の軸が雨と線と並行でないときは、その補正量は雨と同軸の雨量計がえたであろうところの補正量から計算される。ただしこのときは、その有効面積は、雨量計の口を雨の軸に垂直な平面に投影した面積となる。若し雨と雨量計の軸のなす角が β であるとする、雨量計の口と、有効平面のなす角は β であつて、有効面積は、雨量計の口面積に $\cos \beta$ をかけたものになる。かく

して雨量計による捕捉量の深さ、量は雨に頭を向けている雨量計の捕捉量の $\cos \beta$ 倍になる。若し $\bar{r}$ を、ストーム vector の長さとするれば、雨量計の捕捉する量は、 $\bar{r} \cos \beta$ となる。即ちストーム Vector を雨量計の軸に投影した長さになる。

若しストームが一定の方向、傾斜角をもたないときは、その phase の数だけに分割し、各 phase における雨量 Vector を集めて、全ストームを表わす Vector をうることができる。

Vector の和は次々に Y_1, Y_2, Y_3 と加えていき最初の Vector の矢と最後の矢を結んだ Vector $\bar{r}$ で (Fig. 13) 表わされる。Vector 和の投影は、Vector の投影の和に等しい。換言すると、ストーム Vector の雨量計軸への投影長 AD は雨量計の実際に捕捉した量に等しい。

雨の傾角 i 、ストームの方向 W の計算は、Fourcade の求めた式によって計算される。

彼の報告は著者がこの資料を解析中に与えられ有益な手引として役立った。

i 及び W の計算方法は次の通りである。

R = 標準直立雨量計の捕捉量

= ストームの垂直成分

$\left. \begin{matrix} N \\ E \\ S \\ W \end{matrix} \right\} \text{Vectopluiometer による捕捉量}$
 (Fig. 22)

i = 雨の降る角度 (鉛直からの)

W = ストームの方向

$\left. \begin{matrix} N-S = R_n \\ E-W = R_c \end{matrix} \right\} \text{ストームの水平成分}$

6) James, Robert C. The Storm Vector, Its Measurement, and Application to Rainfall Measurement. Calif. Forest & Range, Exp. Sta. Progress Report 1946 (Typewritten)

ストームの方向の平均を求めること。

$\tan i_n = R_n/R$ であり、同様に $\tan i_e = R_e/R$ 。従って $\tan W = R_e/R_n$ 、書き直すと雨の平均傾斜角を求めること。

$$\tan W = \tan i_e / \tan i_n \quad \tan i = R_n / R \cos W,$$

$$\text{及び } R_n/R \tan i_n \quad \therefore \tan i = \frac{\tan i_n}{\cos W},$$

$$\text{又は } \tan i = \frac{\tan i_e}{\sin W}.$$

雨量計の丘上の最初の装置の外に、11ヶの Vectopluiometer を試験地に配置した。これを異った高度で、谷、頂上、斜面等いろいろな場所の雨の方向傾斜角の各成分を決定できるようにした。

3〜7年にわたる Vectopluiometer による観測資料から、いろいろな場所の i がわかり、場所場所で i が違うこともわかった。 W の傾向もわかった。ストームの方向、雨の傾斜角等の平均値を Fig. 14 に示した。

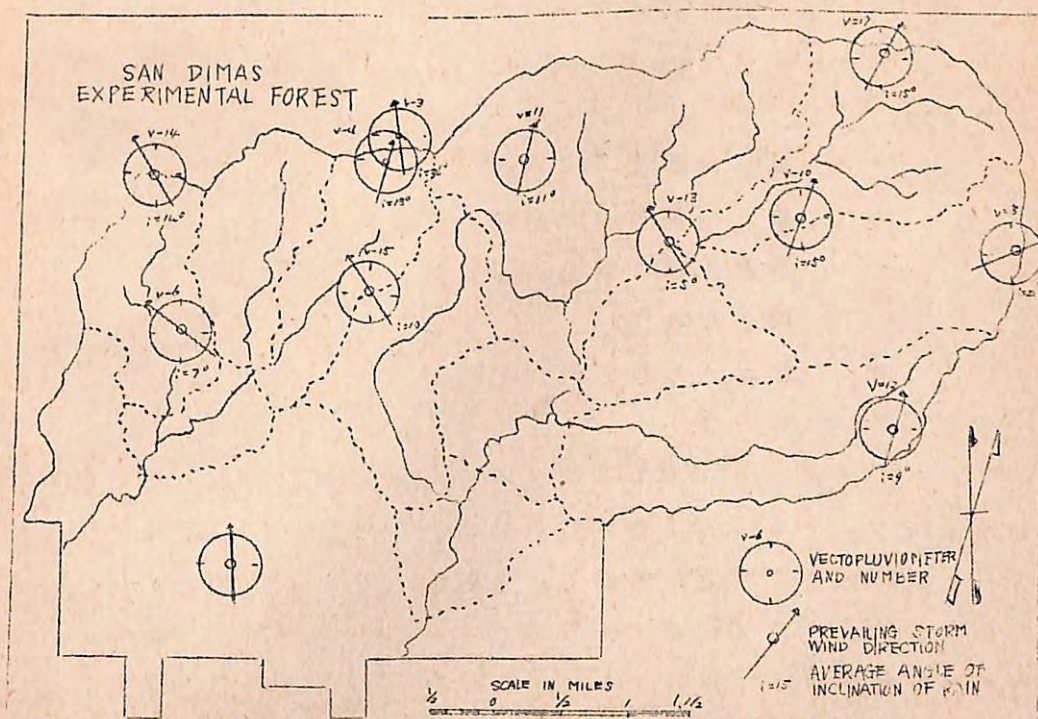


Fig. 14. Vectopluiometer による各点ストームの平均方向及び雨の平均傾斜角を示す。

地形の影響の少い、高い場所にある。ア-7, V-4の風の傾向は、試験地内の主風向が南から北にあることを示している。

他の Vectopluiometer のおいてあるところでのストームの風向は、その地域の排水型 (drainage type) を反映している。流域が北東に開いているところでは、ストームの方向は南西であつて、北面に流域の括まっているところは、南東であつた。せまい急峻な谷の口のようなところは、流域の主方向を空気が流れこむノズルのような働きをしている。

過去の雨量観測記録の補正方法

4年間にわたり集められた記録の補正は、複雑というよりはむしろ労力がかかった。

Fourcade の式を用い真に斜面におちた雨量を、直立雨量計の資料からストーム Vector (9) によつて計算した。

Fourcade の求めた式は次の通りである。

$$r = R + R \tan \alpha \tan i \cos (B - W) \text{ ----- (11)}$$

ここに

r = 真の雨量値

R = 直立雨量計の捕捉量 (雨量)

α = 測点のある斜面の傾斜角

i = 雨の傾斜角

B = 測点のある斜面の方位

W = 平均ストーム方向

(11) 式がいろいろの条件のところでもうまくつかえることを直接示そう。 α 及び B は測点で測れる。 i 及び W は、試験地内にばらまかれた6ヶ所の気象観測点の風向、風速の記録と Vectopluiometer の資料から決定できる。(11) 式の効力をストームの大きさを考慮して検討した。3〜5年にわたる斜立雨量計と並ぶおかれた直立雨量計13ヶの資料を (11) 式に適用してみた。色々な雨量計の形・ストームの型を示す約300の観測値についての例を

求めた。解析は次のことを知るよう設計した。

(1) 直立雨量計と斜立雨量計の捕捉量の差。

(2) 直立雨量計の資料から真の雨量を Fourcade の式を用いて算出したときの精度。

直立雨量計の捕捉量の偏差

Fig 15 は直立雨量計と斜立雨量計の捕捉量の差を示した。これによるとごくわずかの例を除いては、各点は線の下にきて、直立

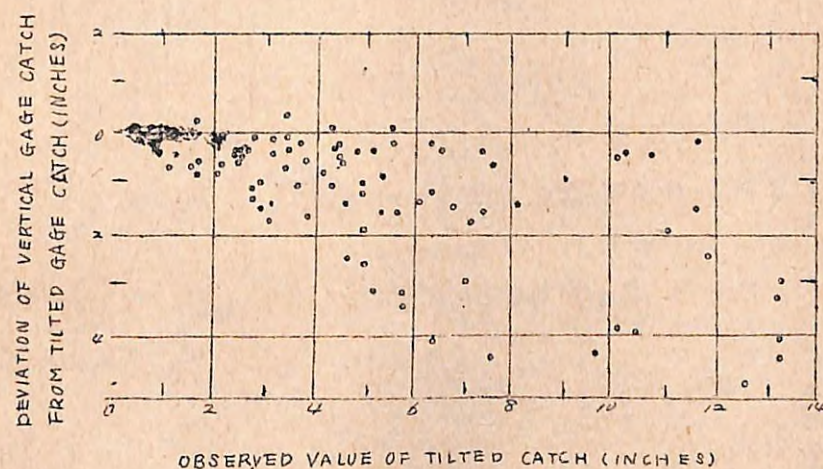


Fig 15 斜立雨量計の実測雨量と、直立雨量計の雨量から斜立雨量計の雨量を引いた差との関係

雨量計がほとんど常に斜立雨量計より少く捕捉することを示している。1吋以下の小ストームでは、直立雨量計の誤差はわずか2%である。これは本試験中の10%であつた。(Tab 2)。大きなストームでは斜立と直立との誤差は16、25、22%となつた。

Tab. 2

雨量実測値及び計算値 (ストーム階級別)

ストーム階級 (吋)	直立雨量計 雨量 (R) 吋	斜立雨量計 雨量 (T) 吋	斜立雨量計 (I) 雨量の計算値 (r) 吋	差	
				R-T %	r-T %
0-1	60	61	58	-2	-4
1-5	319	381	370	-16	-3
5-9	132	177	175	-25	-1
9-16	165	212	217	-22	+2
計	676	831	820	-19	-1

(I) (II) 式による。

直立雨量計の資料を補正したときの Fourcade 式の精度

Fig. 15 のようにプロットしてみると、斜立雨量計の値と、Fourcade の式を用いて計算したときの差は全く違っている (Fig. 16)。

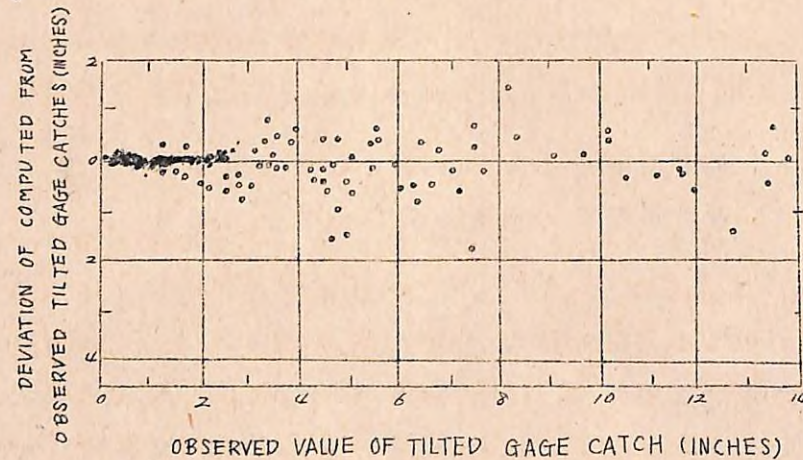


Fig. 16 Fig. 15 で欠かんの示された直立雨量計の雨量から斜立雨量計の雨量を Fourcade の式で算出したときの効果

全般的なバラツキが、水平軸を通じてみられるが、これは大小さまざまなストームを通じて (II) 式がよくきいていることを示している。

斜立雨量計の資料から計算で求めた値と、観測値はよく対応している。(Tab. 2) 0-1 吋のストームに対しては、全降雨回数 10% より少ないが、計算の結果では差が 4% で直立、斜立の実測値の差の 2 倍あった。

かように小さいストームのときは直立、斜立どちらでも大差がない。又直立雨量計の資料を補正しても大して益はないという結論がえられた。

しかし下ら、大きなストームに対しては、観測値を補正した方がよい。1-5 吋のストームが約半分を占めているが、斜立、直立の差が 16% もあるのは著しい。この場合直立のを補正すると、斜立との差は 3% 位になる。次の大きな降雨階級では、補正は更に有効で、差は 5-9 吋のストームでは 1%、9-16 吋では 2% におちる。5-9 吋のストームになると著しい地表流下が起る。そして 9-16 吋級ではしばしば洪水が起る。このように、洪水調節、水の供給の目的のために、流域雨量を見積るとき、若し直立雨量計の値を補正せずには使おうと悲しいことに不完全なものとなる。

総 括

雨量の正確な測定は、南カリフォルニアの起伏の多い San Gabriel 山岳地方においては、流域管理の研究上、先づ要に注目しなければならないことであつた。従つて San Dimas 試験地が創設されたとき、広い雨量観測網が、有益な智識を集めて作られた。しかし数個の研究で、普通の直立雨量計で観測された流域雨量の見積りの精度に疑問がもたれ始めた。

このため雨量測定に関する一連の研究が行われた。これらの試験の結果 (I) 直立雨量計は近くの標準雨量計のある地面に実際に落ちる雨量を正確に示さないが、斜面に直角な斜立雨量計はよい

資料をあたえてくれる。(2) 100 エーカーに19ヶの直立雨量計をばらまいて作った観測網の雨量はこれと並びおかれた19ヶの斜立雨量計による観測網の雨量より15%少なかった。直立雨量計の測定値の不足分は、風のために雨が著しく斜めにされるためである。これらの研究は、雨量計を傾け斜面に直角につけると云う新しい観測網を發達させた。更に本試験地内の種々な地形のところ、直立及び斜立雨量計による降雨の捕捉量に關し、いろいろ附加資料がえられた。同様にストームの風速、方向に關し多くの知識情報が集められた。この向数個の流域における直立雨量計による最初の観測網は観測を続け、非常に多量のdataが集った。これらの直立雨量計の資料から求められた見積雨量を補正することはFourcadeの式を用いることによつて可能であつた。

山の向き斜面の傾斜等がわかり又ストームの方面、降雨の傾斜角が決定されると、Fourcade式で眞の雨量が斜面に鉛直におかれた雨量計のよみの計算から求められる。直立並に斜立の斜きなした雨量計の研究は、斜立雨量計の方が、雨量約500吋において、直立雨量計より19%も多くを捕捉することを示した。同じ直立雨量計の資料を計算して求めた雨量は、斜立雨量計の捕捉量と1%の範囲でよく一致した。この研究計画は南カリフォルニアの山地におけるレイנסトームの降り方についての知識を与えてくれた。試験地に降る雨の入射角は南よりで、普通鉛直よりかなりの角度で落ちてくることがあきらかになつた。この入射角は風速の函数である。又傾斜地の流域に斜めに降ってくる雨は、鉛直にたてた普通の雨量計では正しい測定ができないことをあきらかにした。同時に、直立雨量計による不足量は測点のある斜面に直角に雨量計をかたむけてやることで矯正できた。

本研究中の原理及びやり方は、他の地方においても応用されるべきである。

文

献

LITERATURE CITED

- (1) Anonymous. 1933. La mesure des précipitations en haute montagne. Rev. des Eaux et Forêts 71 (2); 117-118 (Translation No. 334, U. S. Forest Service. 1933).
- (2) Bastamoff, S. L., and Witkewitsch, W. J. 1926, Les specters Aérodynamics des pluviomètres. Bul. Geophys. Inst. Moscow, Nr. 10, illus. (Rev. by Kofler in Met. Ztschr. (Braunschweig) 44: 71; 1927.)
- (3) _____, 1932. Sur les pluviomètres. Météorologie n. s. 8: 94-98, illus.
- (4) Bonacina, L. C. W. 1906. The effects of exposure to wind upon the amount of rain caught by raingauges and the methods of protecting raingauges from them. Brit. Rainfall, 27-45.
- (5) Braak, c. 1936. Einfluss des windes bei regenmessungen. Beitr. Geophysik 48: 231-235, illus.
- (6) Brooks, Charles F. 1938. Need for universal standards for measuring precipitation, snow-fall, or snow cover. Internatl. Union Geod. Geophys., Assoc. Sci. Hydrol. Bul. 23, 52 pp., illus.
- (7) _____, 1938. Wind-shields for precipitation gages. Amer. Geophys. Union Trans, 539-542, illus. (Processed.)
- (8) Colman, E. A., and Hamilton, E. L. 1947. The San Dimas lysimeters: Part
Part 1. The lysimeter installation and research program.
Part 2. The relative performance of four types of lysimeters.
Calif. Forest and Range Experiment Sta. Res. Note 47, 33 pp. illus. (processed.)
- (9) Fourcade, H.G. 1942. Some notes on the effects of the incidence of rain on the distribution of rainfall over the surface of unlevel ground. Royal Soc. So. Africa, Cape Town, Trans. 29: 235-254, illus.

- (10) _____, 1945. A note on multiple rain-gages. Amer. Geophys. Union Trans. 26 (II): 267-268. (Processed.)
- (11) Hamilton E. L. 1944. Rainfall measurement as influenced by storm characteristics in Southern California Mountains. Amer. Geophys. Union Trans. Part III, 502, 518, illus.
- (12) _____, 1949. The problem of sampling rainfall in mountainous areas. In Proc. Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 469-475, illus. Berkeley, Calif.
- (13) Hayes, G. L. 1941. A method of measuring rainfall on windy slopes. U. S. Monthly Weather Rev. 72: 111-114, illus.
- (14) Horton, R. E. 1919. The measurement of rainfall and snow. New England Water Works Assoc. Jour. 33 (1): 14-65, illus.
- (15) _____, 1932. Drainage basin characteristics. Amer. Geophys. Union Trans. 350-361, illus.
- (16) Jevons, W. S. 1961. On the deficiency of rain in an elevated gauge as caused by wind. Phil. Mag. and Jour. Sci. 22: 421.
- (17) Kadel, Benjamin C. 1922. Measurement of precipitation. U. S. Dept. Agr. Weather Bur. Bul. 771, Cir. E, Instrument Div., 36 pp.
- (18) Koschmieder, H. 1934. Methods and results of definite rainfall measurement, III Danzig Report. U. S. Monthly Weather Rev. 62: 5-7, illus. (Trans. by R. J. Martin.)
- (19) Kraebel, C. J., and Sinclair, J. D. 1940. The San Dimas experimental forest. Amer. Geophys. Union Trans. 21: 84-92, illus.
- (20) Nipher, F. E. 1878. On the determination of the true rainfall by elevated gages. Amer. Assoc. Adv. Sci. Proc. 106-108.
- (21) Pagliuca, S. 1934. The measurement of precipitation on a windy mountain summit. Amer. Geophys Union Trans.

Part II, 385-389.

- (22) Pers, R. 1932. Relation entre les données pluviométriques et les précipitations totales recueillies par un bassin: Introduction a l'étude theorique de la stéréopluviométrie. Météorologie 75: 101-106, illus.
- (23) _____, 1932. Note complémentaire sur la stéréopluviométrie. Météorologie 75: 106-113.
- (24) Röstad, A. 1924. Über die Wirkung des Nipherschen Schutztrichters. Met. Ztschr. (Braunschweig) 41: 240-243.
- (25) Salter, M. de Carle S. 1921. The rainfall of the british isles. 295 pp. illus., London.
- (26) Stevenson, Thomas. 1842. On the defects of rain gauges with description of an improved form. Edinb. New Phil. Jour. 33:17.
- (27) Storey, H. C. 1939. Topographic influences on precipitation. Sixth Pacific Sci. Cong. Proc. 4: 985-993, illus.
- (28) _____, and Hamilton, E. L. 1943. A comparative study of rain gages. Amer. Geophys. Union Trans. 24: 133-141, illus. (Processed.)
- (29) _____, and Wilm, H. G. 1944. A comparison of vertical and tilted rain gages in estimating precipitation on mountain watersheds. Amer. Geophys. Union Trans. 25: 518-523, illus. (Processed.)
- (30) Wicht, C. L. 1944. Improvements in the gauging of rainfall. So. African Forestry Assoc. Jour. 12: 19-28, illus.
- (31) Wilm, H. G., Nelson, A. Z., and Storey, H. C. 1939. An analysis of precipitation measurements on mountain watersheds. U. S. Monthly Weather Rev. 67: 163-172, illus.