

27 雨量と流量と(Ⅲ)

(宝川の流出機構について)*

菅 原 正 己

丸 山 文 行

§ 1. 前 加 き

河川の流出量と流域の雨量とを関係付けることは魅力的な問題である。

我々は、宝川本流(集水面積 1905.66 ha)について、

22 IX 14 (カスリン), 23 IX 15 (アイオン),

24 VIII 31 (キテイ), 17 VII 15

20 X 4, 20 X 8

の台風による洪水をとりあげ、いろいろと分析を行つた結果、時間雨量から、時間流出量を推定するひとつの方法を確立することができた。

Howard, L. Cook の総合報告, *The Infiltration approach to the calculation of surface runoff.* (Trans. Amer. Geophys. Union, 1946; 726-743) によれば、流出量の推定には、地表の滲透能の状態が重要な役割を演ずる。

*) これは、昭和27年1月に、統計数理研究所の談話会、及び
資源調査会水部会小委員会で開催したものである。

宝川で用いた方法は、滲透能を地下水に依存させ、中間流出1段、地表流出3段の機構を考えたもので、適当な出発条件のもとに、上記の6大洪水を、統一して把握することができた。

ここでとりあげられた機構が、他の河川で、また、小雨量の際に、どこまで保存できるかは、われわれのもつとも興味をひく課題である。

以下、

§ 2. では、宝川作業が始まるまでの沿革を述べ、

§ 3. で、確立された機構を説明した。

§ 4. では、2から3までの発展進化の模様を記録して置いた。

§ 5. は、後かきである。

§ 2.

この節では、宝川の資料がなぜ興味をひいたか、その筋道を示そう。

我々は、雨量と流量との関係を総合するために、一連の作業を行つてきた。宝川作業を行うまでの経過は、

雨量と流量と (II)

「新根川の洪水流量を流域諸地点の雨量から推定することについて」 菅原・丸山

統計数理研究所研究録

に発表した。まず、この内容のあらましを再記しよう。

我々のとりあげた流出機構は次のようであつた。

ある時間に P の雨量が降れば、それは指数函数的に流出する。即ち1時間毎に

$$(1-r)P, \quad (1-r)rP, \quad (1-r)r^2P, \quad \dots$$

の量の流出がある。

そこで時間雨量の列

$$\dots, P_{-3}, P_{-2}, P_{-1}, P_0, P_1, P_2, \dots, P_n, \dots$$

があるとき、時刻 n に於ける流出量 D_n は、過去の各時間の雨量の影響の総和として

$$D_n = (1-r)(P_n + P_{n-1}r + P_{n-2}r^2 + \dots + P_{n-i}r^i + \dots)$$

となる。

この場合流出機構を支配する因子は r だけである。この r をいろいろ変え、16年VII月洪水について、万場の雨量から神流川若泉の流量を推定し、実際の流量と比較したのが第1図である。

この試算の結果 $r = 0.70 \sim 0.80$ ぐらいで、非常に山の形が似てくることに気がついたのである。これに力を得て、他の支流について、また、他の年の洪水について、計算を行つて見た。

流量の観測は警戒水位を越えてから始まるので、増水初期の様子は不明であつたが、一応、この方法で、八斗島の洪水流量の規模を推定することができたのである。

室川の資料が手に入つた時は、我々の知識がこんな状態であつたので、まづ神流川方式を当てはめて見たのは当然であつた。

その結果、 $r = 0.5$ とすると適當であることがわかつた。

P として雨量の $\frac{1}{2}$ を用いると、ピークの絶対量もだいたい合ふ。

(第2図)

しかし、注意して見れば、神流川方式では説明のつかない次の諸欠点が目立つてくる。

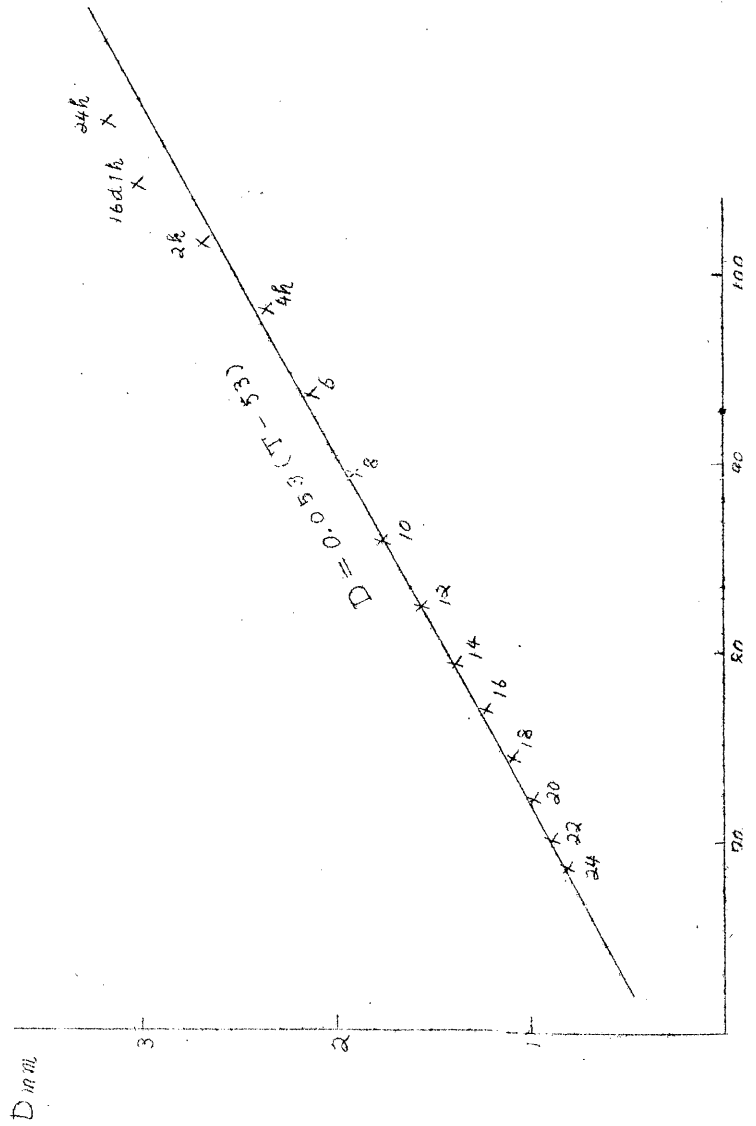
- (i) 増水がはやすぎる。
- (ii) 減水がはやすぎる。
- (iii) カスリンの2回目の山が伸びない。

この欠点を改善するには、降り始めの水を後期に持つてくる操作を機構に入れればよいだろう。

一方、 $T_i = \sum P_i - \sum D_i$ の表を作り、(雨の出納録で P

は収入、 D は支出、 T は差引残高) T と D の関係を見たところ、
 雨が降りやんでからは、一直線をなして減水することがわかった。
 (第3図)

第 3 図



これは、流出が指数関数で表せることを裏書きする。この直線の傾斜が $(1-r)$ を示すのである。

カスリンの直線は $D = 0.057(T-50)$ と表せるので、
 $r = 0.947$ となる。

そこで、降った雨を地上流出と地下に滲透するものと半々に分けた。即ち

$$P = \alpha P + \beta P, \quad \alpha(\text{地上}) = \beta(\text{地下}) = \frac{1}{2}$$

と分割し、 αP は $r = 0.5$ で流し、 βP は $r = 0.947$ で流すことにしたのである。(第4図)

これで減水工合はやや改善されたが、(i)、(iii)の欠点はいぜんとして残っている。この欠点は、 β が終始一定であるためではないだろうか。常識からいつて、 T が増えれば β は小さくなるはずである。

βP に関する水高を T_2 とし、 $\beta = \beta(T_2)$ の曲線を適当に定めることによつて、この要求は満されるであろう。

このような方針で、カスリンを土台にして、8回の試行錯誤の後に得られた曲線と、それによる推定流量を第5図に示した。

アイオンは、降雨開始時の土湿状態がカスリンと似ているためか、まず妥当な近似といえるが、キティは土地が乾燥しているためと、降雨の中肯休止があるため、前二者ほどはうまく合っていない。

この欠点はどうしたら除かれるだろうか。

室川の観測は信頼に値するから、流出機構に改善の余地があるのではないか。

これから本格的な計算になつたので、次章でまず、現在得られている機構について説明し、§4で再び、途中の経過を述べることにしたい。

§ 3. 流出機構を考える場合、滲透能をどう量的に表すかは苦心を要するところである。

特に、降雨初期の滲透能の変化、中間休止期の滲透能の恢復状況を機構にとり入れるのは難しい。

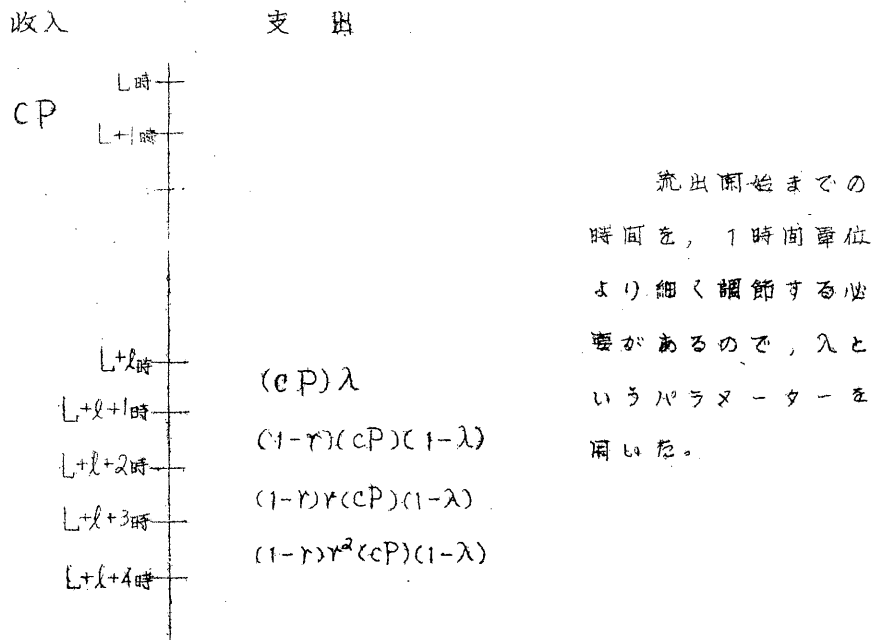
現在我々が室川でとっている方式は次のようなものである。

A. 降雨 P を地下滲透 $\gamma P = P_3$ 、中間流出 $\beta P = P_2$ 、地表流出 $\alpha P = P_1$ に分ける。

この振り分け後は各層独立な機構で流出させる。

以下、 γ 層、 β 層、 α 層 という言葉を使うことにする。

B. どの層に於ても、流出機構の基本的構造は次のとおりである。(第6図)



第 6 図

L 時から $L+1$ 時までには、この層に分配された雨量は、 $L+l$ 時から、上記のように流出させる。

従って、ある時間の流出量は、それまでの時間雨量列によ

る全部の影響が加算されたものである。

C. $\gamma P = P_3$ の行方.

この水は結局地下水に入るとする。

降雨開始時(計算出発時)の地下水量 $T_{3.0}$ は $400 D_0$ mm とする。

D. は原資料で基底流量といっているもので、出発時の流量である。

以後の流出は

$$l = 10, \quad \lambda = 0, \quad r = 0.9975$$

とする。

γ, P_3 の値は

$$\gamma = 1 - \alpha - \beta$$

$$P_3 = P - P_1 - P_2$$

として求める。

D. $\beta P = P_0$ の行方.

この水は

$$l = 0, \quad \lambda = 0, \quad r = 0.93$$

で流出させる。

$$\beta = \frac{1}{200} \{ 5 \text{時間前の } T_3 \}$$

とする。

E. $\alpha P = P_1$ の行方

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$$

と α 層を分割する。

α_0 期. T_3 が $T_{3.0} + 15 \text{ mm}$ になるまでは

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$$

とする。

α_1 期. $T_3 = T_{3.0} + 15 \text{ mm}$ になった時から

α_1 層が活躍を始める。

$$\alpha_1 = 0.35, \quad \ell = 0, \quad \lambda = 0.1, \quad r = 0.80$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = 0$$

この α_1 期になつてからの降雨 ΣP が 35 mm に達すると、次の α_2 期になる。

α_2 期. $\alpha_1 = 0$ となり、 α_2 層が活躍を始める。

このとき、今迄の $\alpha_1 P$ による既得雨量は、そのまま前の方式で流される。

$$\alpha_2 = 0.35, \quad \ell = 0, \quad \lambda = 0.2, \quad r = 0.50$$

$$\alpha_1 = \alpha_3 = 0$$

この α_2 期になつてからの降雨 ΣP が 55 mm に達すると、次の α_3 期になる。

α_3 期. $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ となる。

$$\alpha_3 = 0.30, \quad \ell = 0, \quad \lambda = 0.3, \quad r = 0.10$$

この層に於ける流出が、もつとも烈しい洪水を起す。

F. α_3 層が活躍中に、 α_2 層の流出が 0.1 mm 以下になつたら、その時から α_2 期の模様に戻る。

さらに α_1 層の流出が 0.1 mm 以下になつたら、 α_1 期の発生状態に戻る。

G. 中間休止期の恢復の仕方は、F 項に説明した方式による。

以上の機構で計算された結果を第7図に示した。

なお、断定的にはいえないが、 β 層の流出が 0.1 mm 以下になつたら、すべての計算は発生状態に戻つてよいと思われる。

§ 4. この節では、前節の機構が得られるまゝにとりあげられた。失敗例を列記して置いた。

第 1 期. この時期は II の最後に述べた機構で、 $\beta = \beta(T_2)$ の曲線を決定する作業が行われた。

第 2 期. $\beta = \beta(T_2)$ の方式では、キティのように中間
休止期がある場合、透過能の恢復が遅すぎるようであ
る。

$$T_1 = \sum P_1 - \sum D_1$$

とし、 $\beta = \beta(T_1)$ としたら、この欠点が補えるの
ではないだろうか。

14 回の試行錯誤の後に、カスリンについて、求めた曲線と、
推定流量とを第 8 図に示した。

この方式は、かえって悪い結果を示した。

第 3 前期. 以上の計算の結果、 $\beta = \beta(T_2)$ のほうが
本筋らしく思われたが、そのままでは、キティの透過
能の恢復が表現できない。

そこで、新たに中間層 W を設け、 βP は一旦 W 層に貯
蓄し、そこから一定の割合で地下水に送り込むことに
し、 $\beta = \beta(W)$ という方式を採用して見た。

この方法はキティではうまく行くように思われた。

(第 9 図)

第 3 後期 前の方法ではアイオンの後半にかなり欠損が
でてくる。そこで W の 1 時間増加量を制限し、それ
以上は地上に還元する方法を試みたがうまく行かなか
った。

第 4 前期 この時期には、W 層の機構を複雑にすること
はやめ、W 層と地下水とに満腹量を決め、それ以後の
降雨は地上浮水として早い速度で流出させることを試
みた。

パラメーターの数が増えたので、宝川作業のもつとも
暗中摸索の時代である。今振り返って見ても組織的
に記述することはできない。

第 4 後期 この時期も前期と同じ状態である。

ただ、地上波を初めから $r = 0.95$ と $r = 0.50$ に分割することを機構にとり入れた。

本質な進歩はひとつも見られないように思われた。

第 5 前期 宝川作業で本質的な進歩が見出された時である。

第 3, 第 4 期では、中間層 W から直接流出はさせなかった。この時になつて、降雨を分割後、どの層からも流出させるようにした。

こうすることにより、分割率が意外に単純化されることがわかってきた。

採用した r は $0.93, 0.80, 0.50, 0.10$ で最終機構と同様である。ただ、地上波の 3 層全部を始めから活躍させた。

第 5 中期 前期の機構に於て、 $r = 0.80$ の層を省き、 $r = 0.50$ の層と $r = 0.10$ の層の移行を最終機構のように行った。

この機構で基本的な構造は定まったといえる。

第 5 後期 $r = 0.80$ を復活させたもので、最終機構と同様である。

細部修整の時代で、ピーク後の小降雨の取扱い方が検討された。

§ 5. 後 加 き

初めに引用した H.L. Cook の総合報告によれば、地下透
能 β を時間と共に

$$\beta = \beta_{\min} + (\beta_{\text{start}} - \beta_{\min}) e^{-kt}$$

$$k = k(\beta)$$

の形で変化させることを提案している。

我々の到達した機構はこれと同じ系統であるが、時間経過とは直接推定式に入つてはいない。

地表流出については、H. L. Cook はあまりふれていないが、宝川の知識によれば、1本の指数函数では表せないようである。

恐らく、ある川には、その川固有の流出率 γ があるのであろう。機構そのものに関しては、次の又点はいぜんとして重要な課題である。

(i) 出発条件の表現方法。 地面のかわき方の推定

(ii) 降雨の止んだ期間中の滲透能の恢復

もし、全国各河川で、このような機構的考察がなされたならば、水文学理論のみならず、実際の水利用企画上、重要なよりどころを提供できるのではないだろうか。

この調査計画は、まったく、いろいろな河川で、Caseを一つ一つ当つて見て、帰納的に機構を作り上げて行くより方法がなく、今後に残された問題である。

終りに、宝川試験地の山田昌一氏、武田繁俊氏、はじめ観測者の方々に最大の敬意を表す次第である。

〔 附 記 〕

室川方式で採用した λ の半減期は次のとおりである。

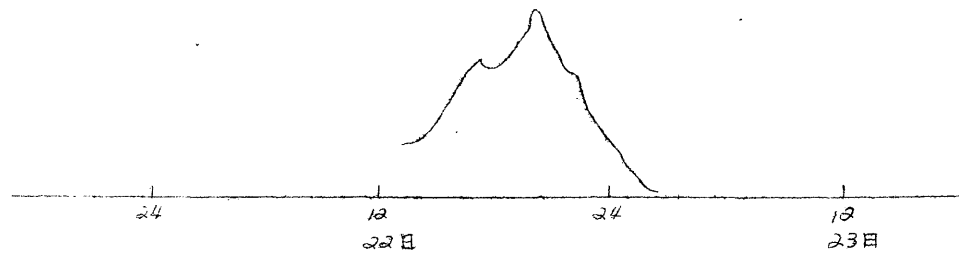
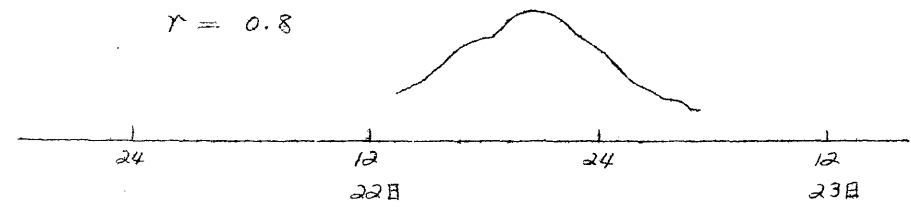
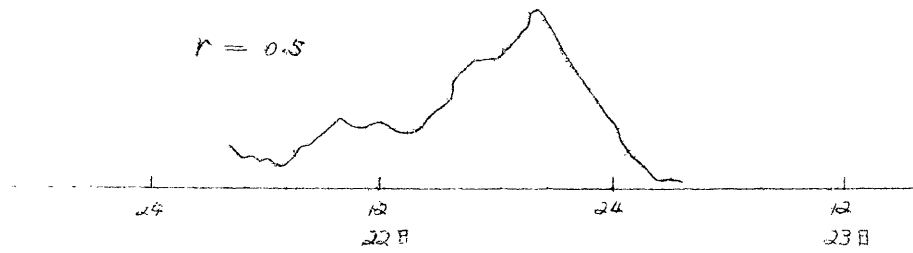
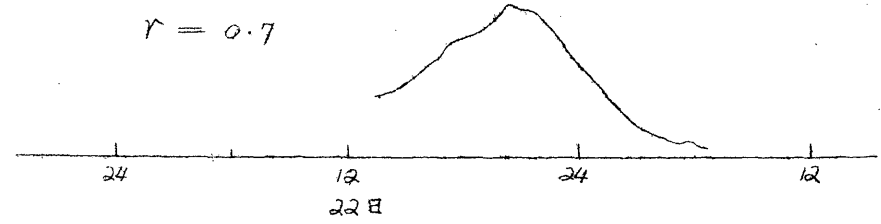
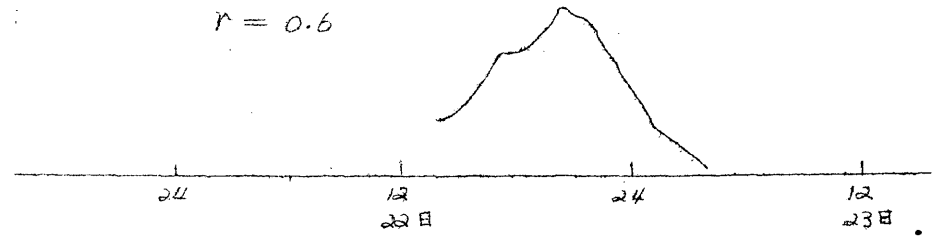
λ	半 減 期
0.9975	280 時間 = 12 日
0.93	9.55
0.80	3.10
0.50	1.00,
0.10	0.30 = 18 分

なお、室川方式によると、昭和 13 年 6 月の利根川洪水模様の説明がつかう。

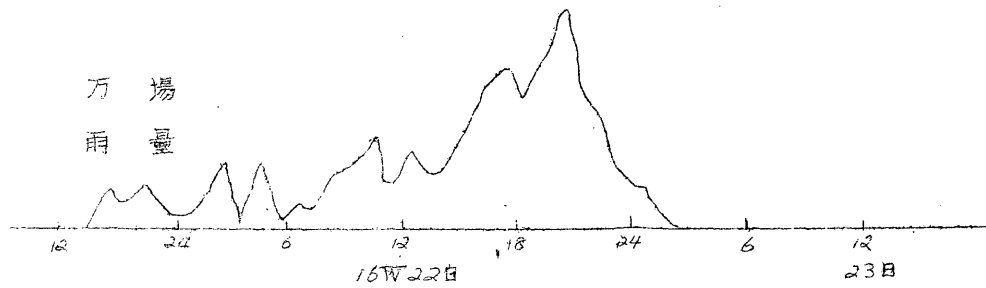
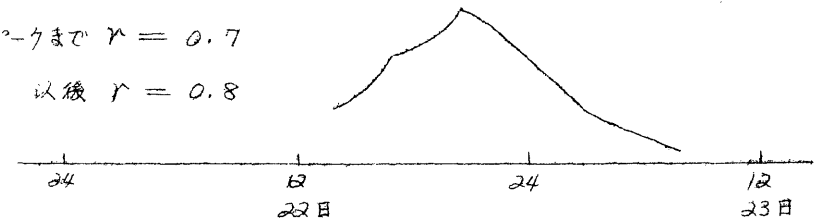
ほかの洪水についても検討を行つている。

第一図

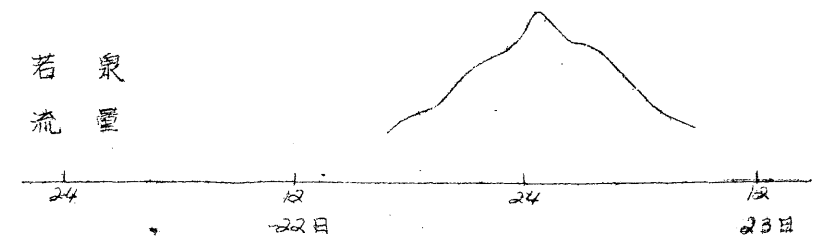
万場雨量より若泉流量の推定



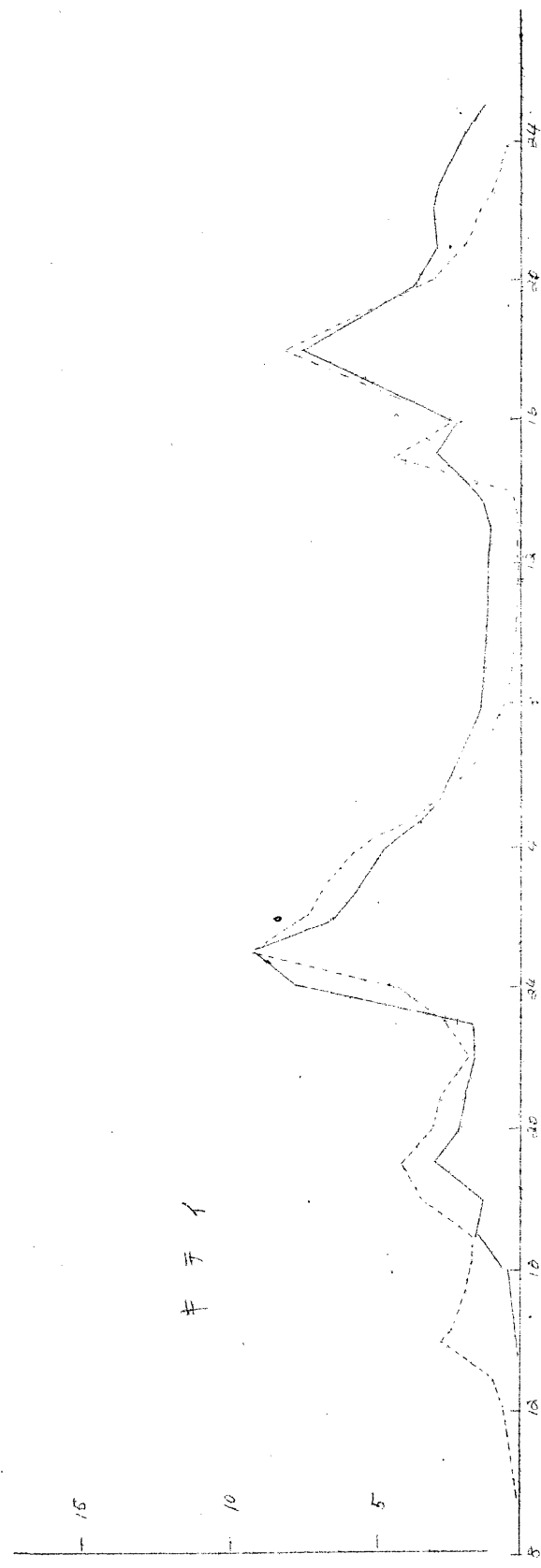
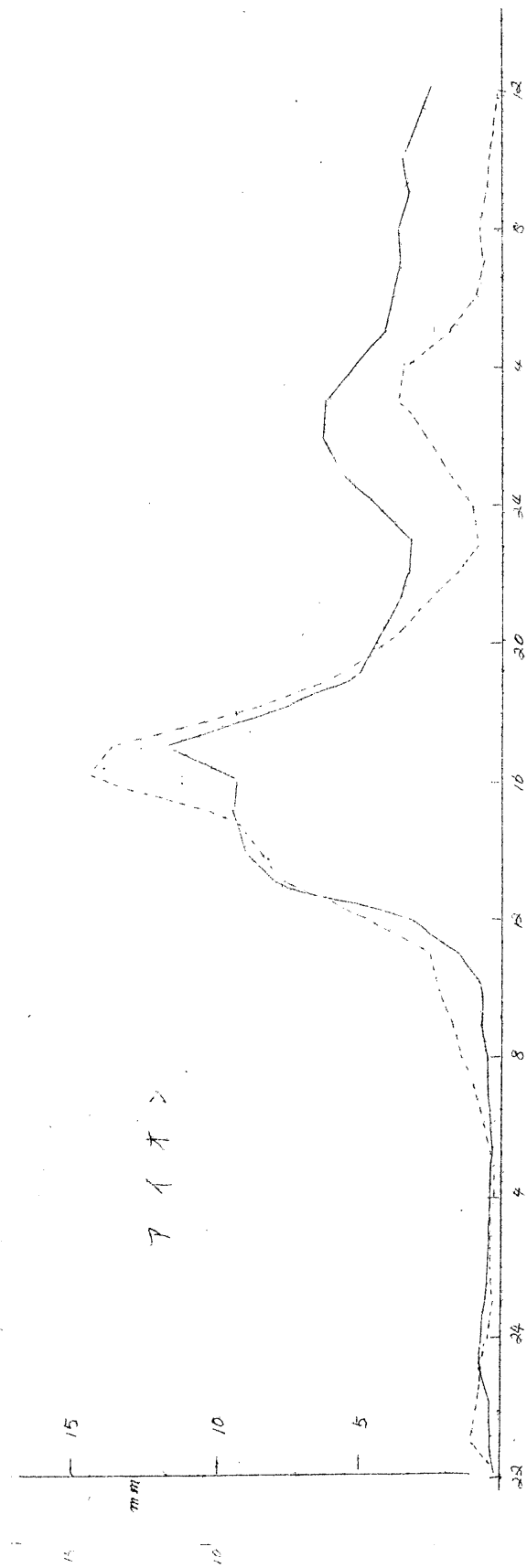
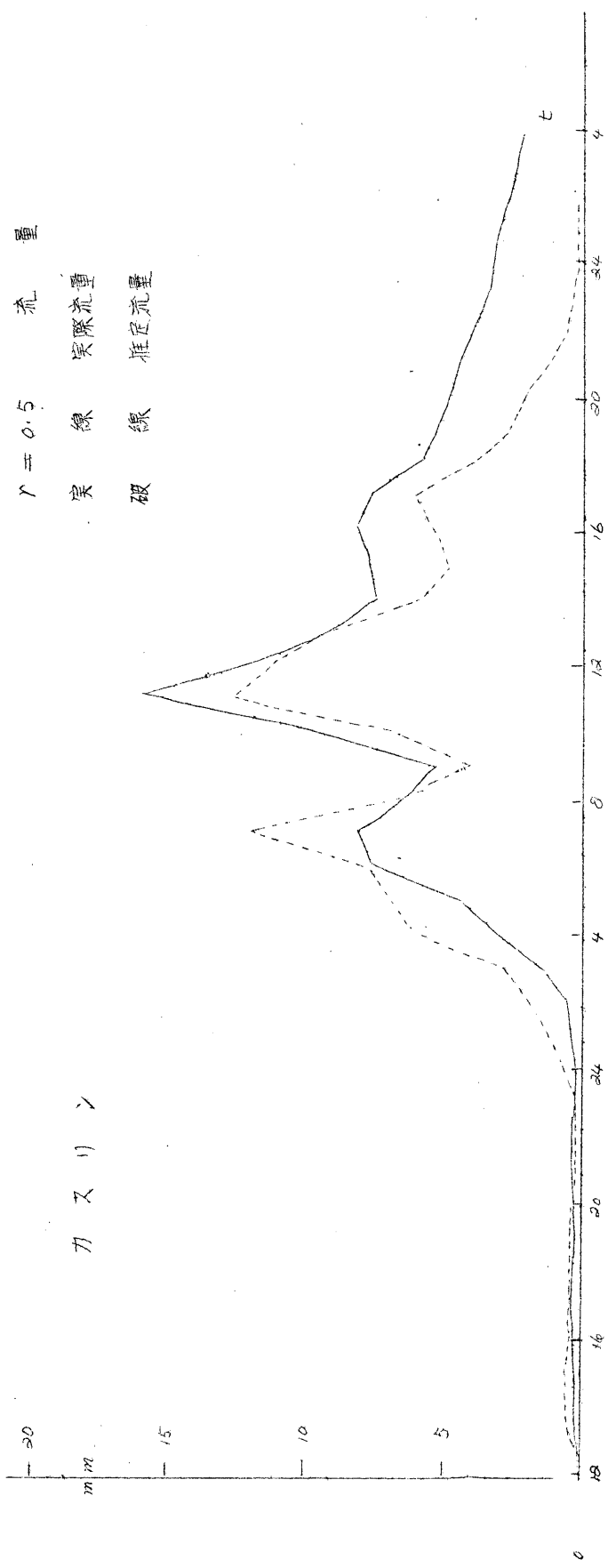
ピークまで $r = 0.7$
以後 $r = 0.8$



若泉
流量



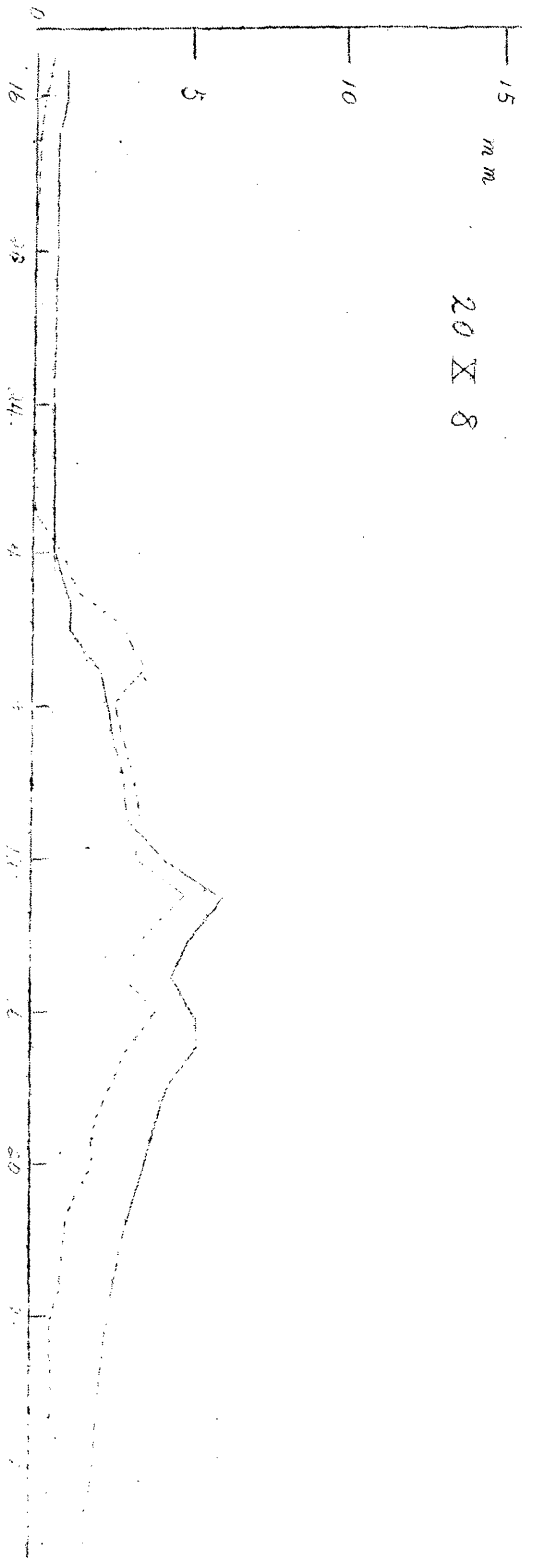
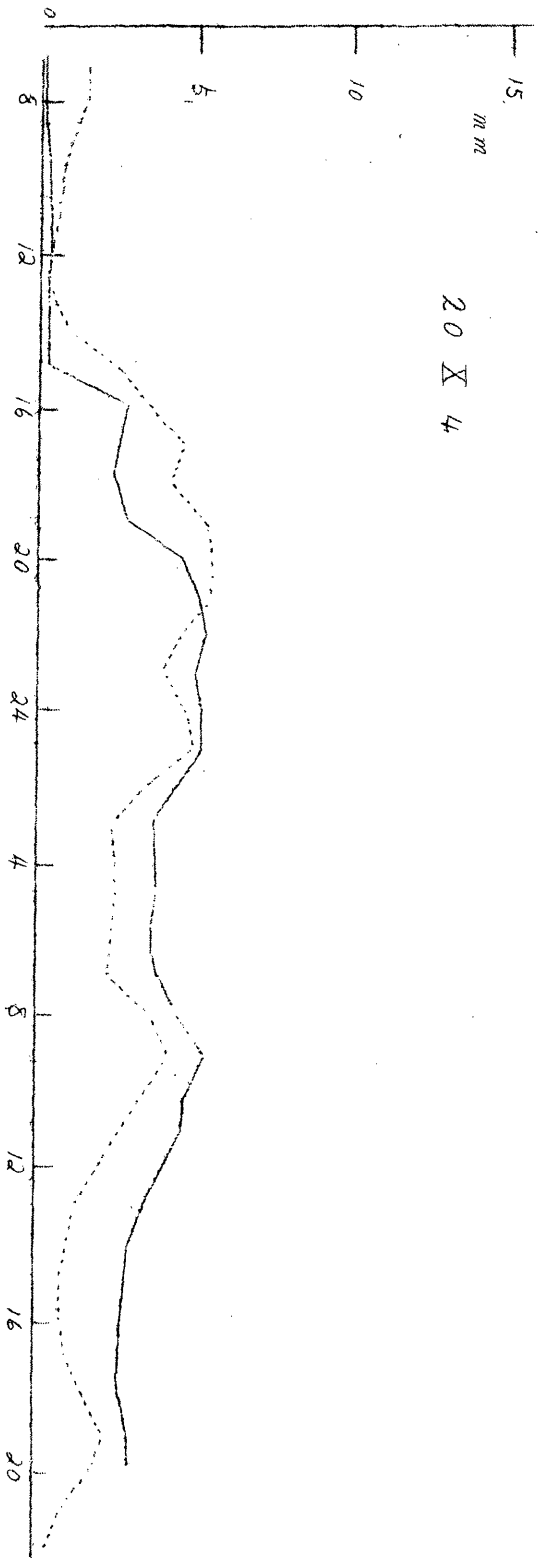
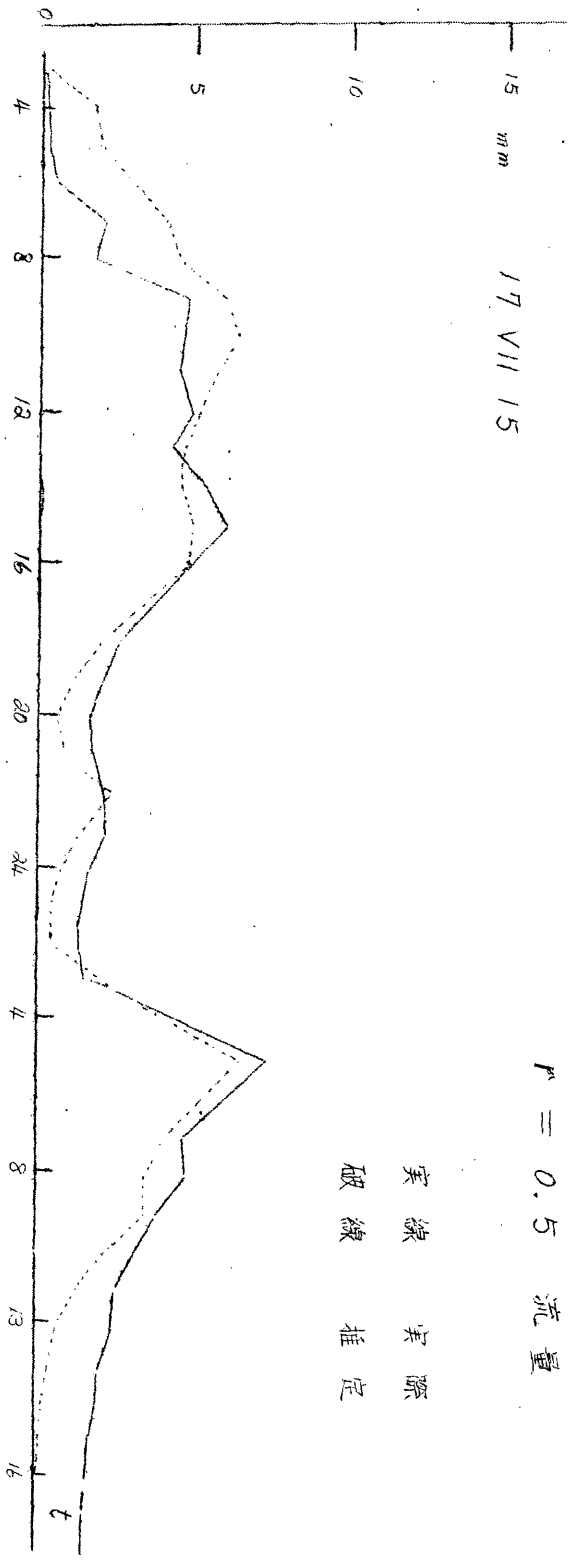
第2図—1 式方川流神



第 2 图 - 2

神 流 川 方 式

$\mu = 0.5$ 流量

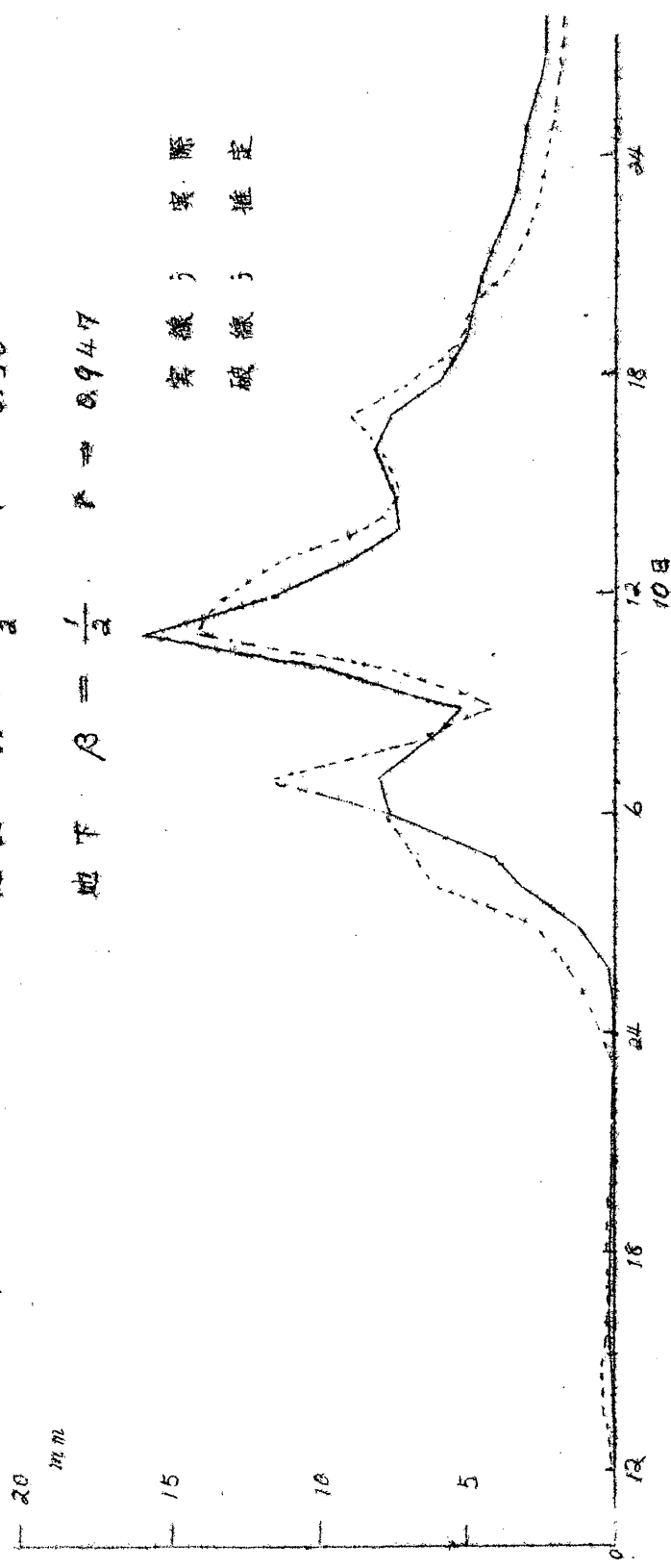


第4図

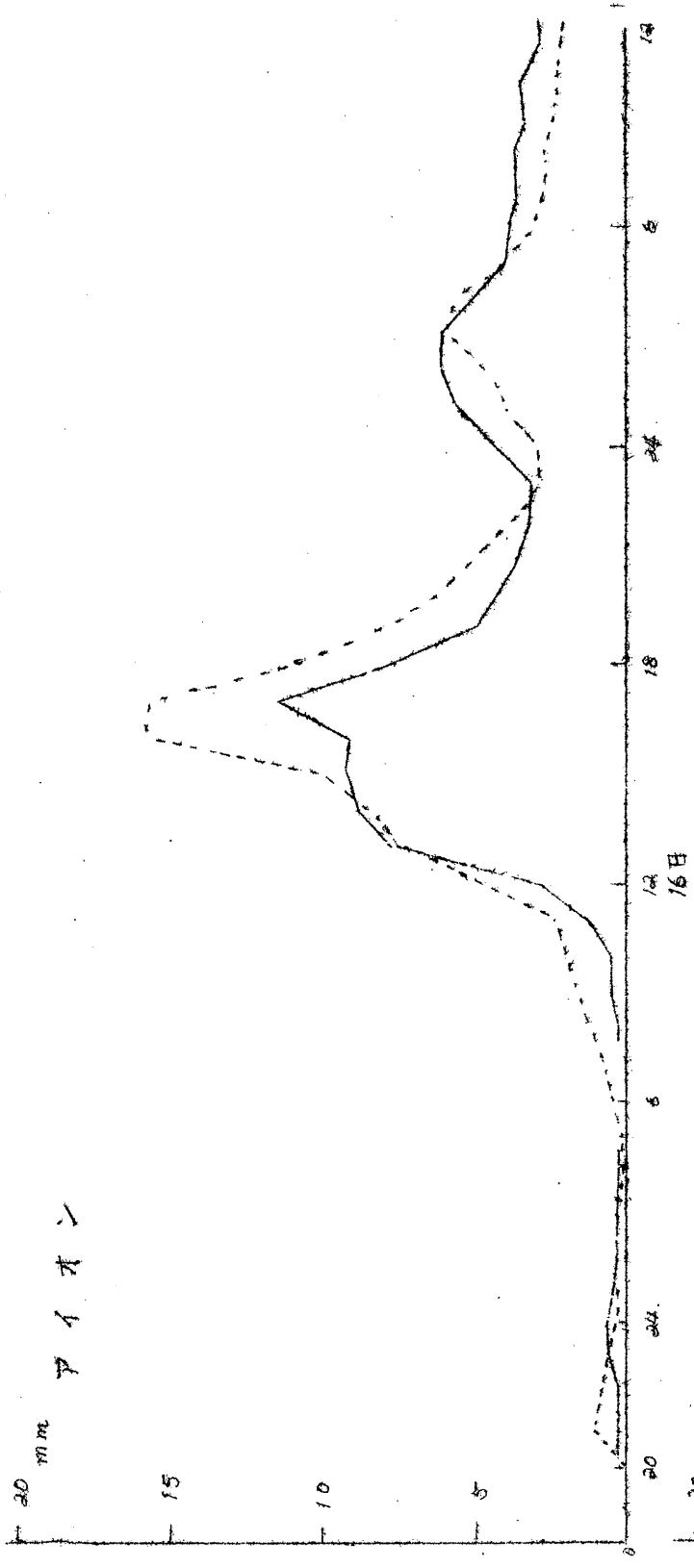
カスリン

地上 $\alpha = \frac{1}{2}$ $r = 0.50$

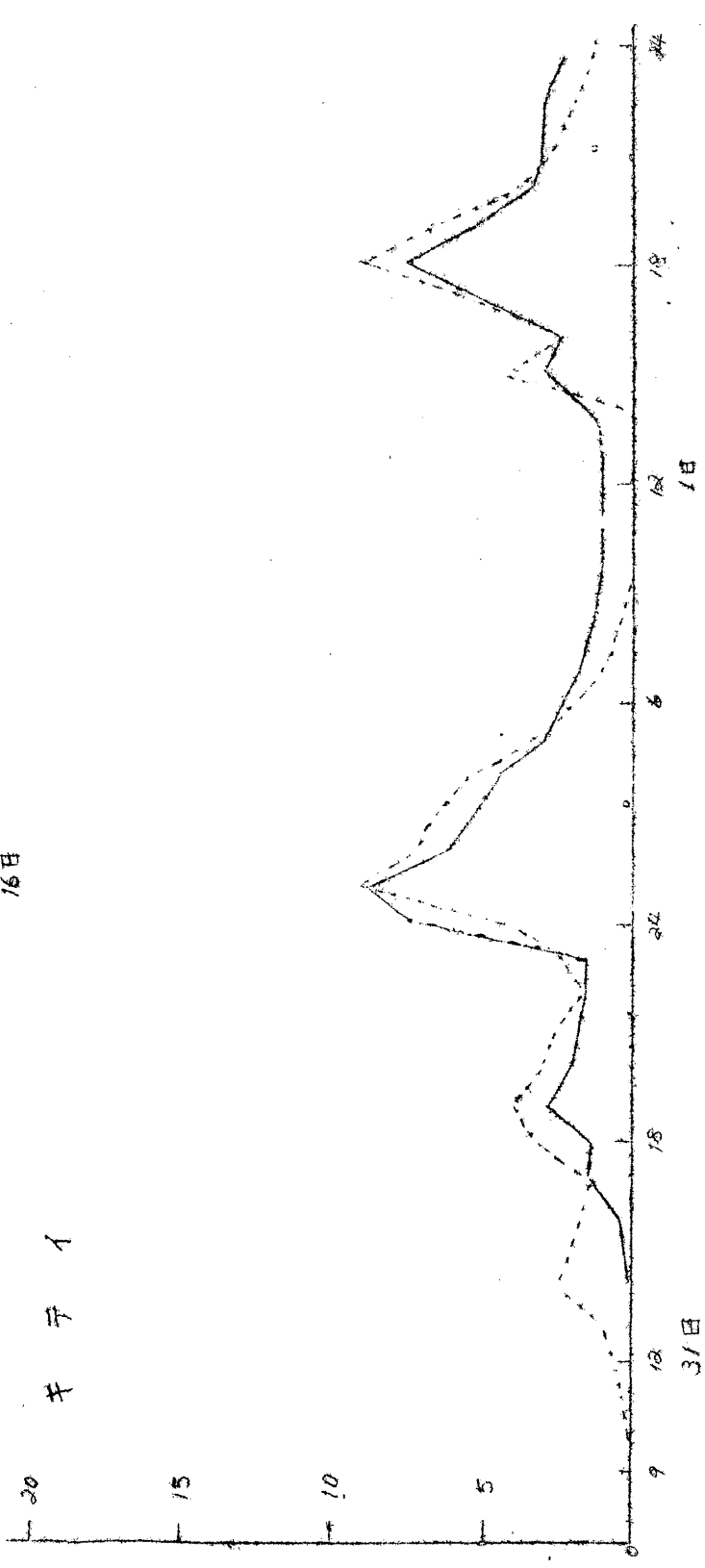
地下 $\beta = \frac{1}{2}$ $r = 0.947$



アイオン

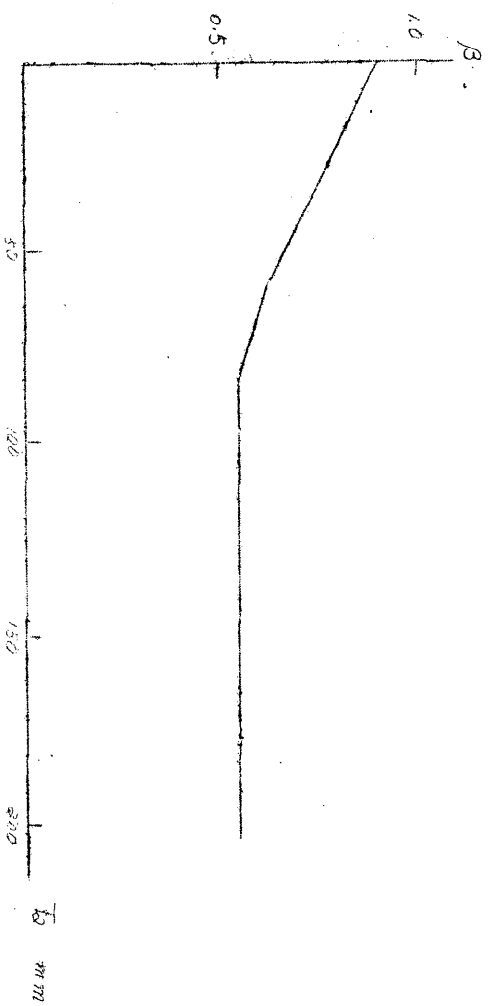
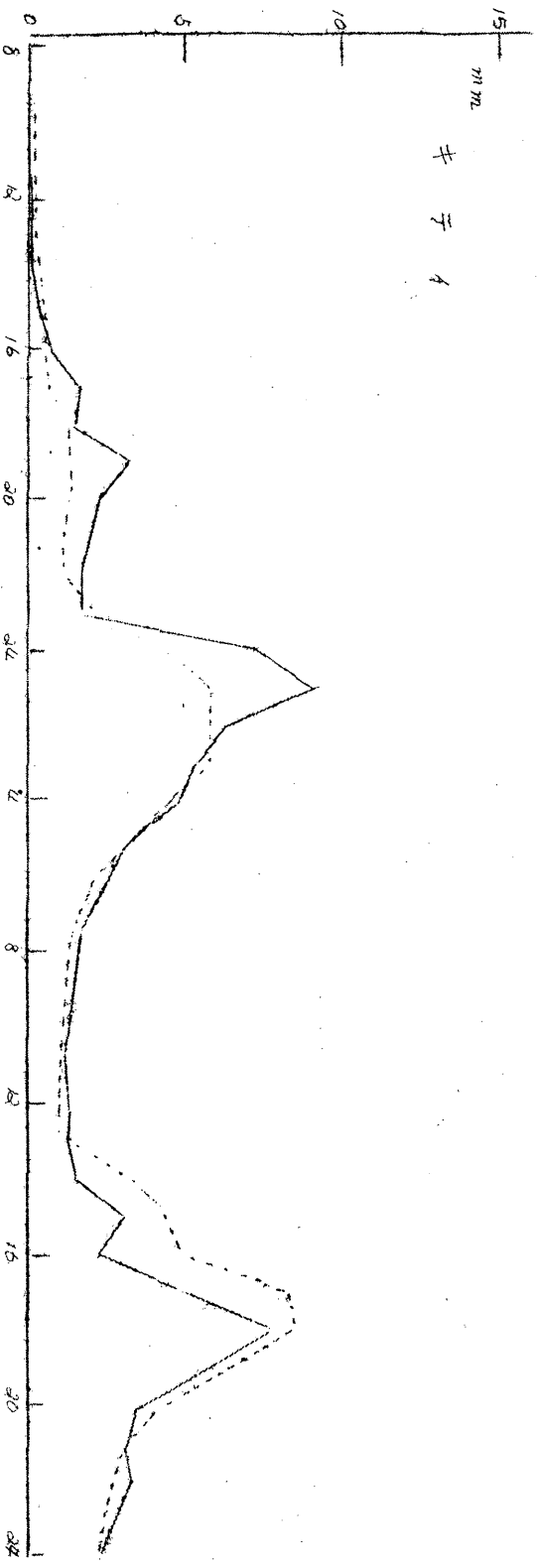
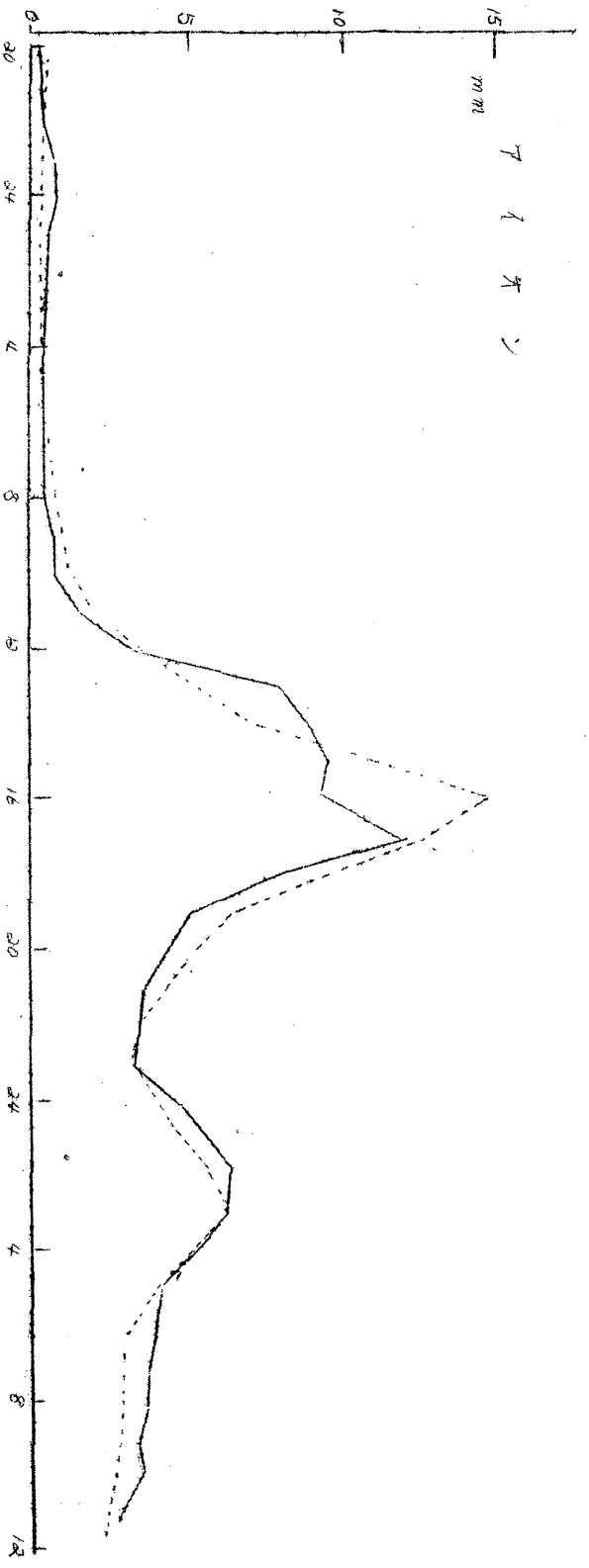
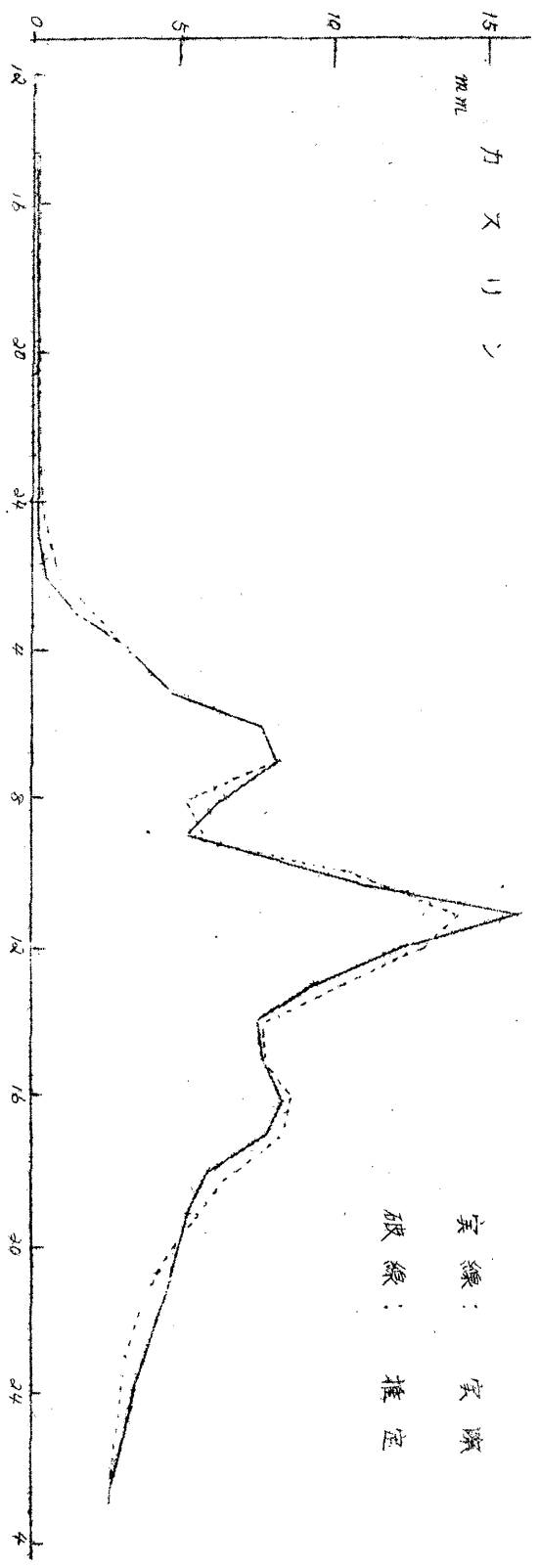


キリンイ

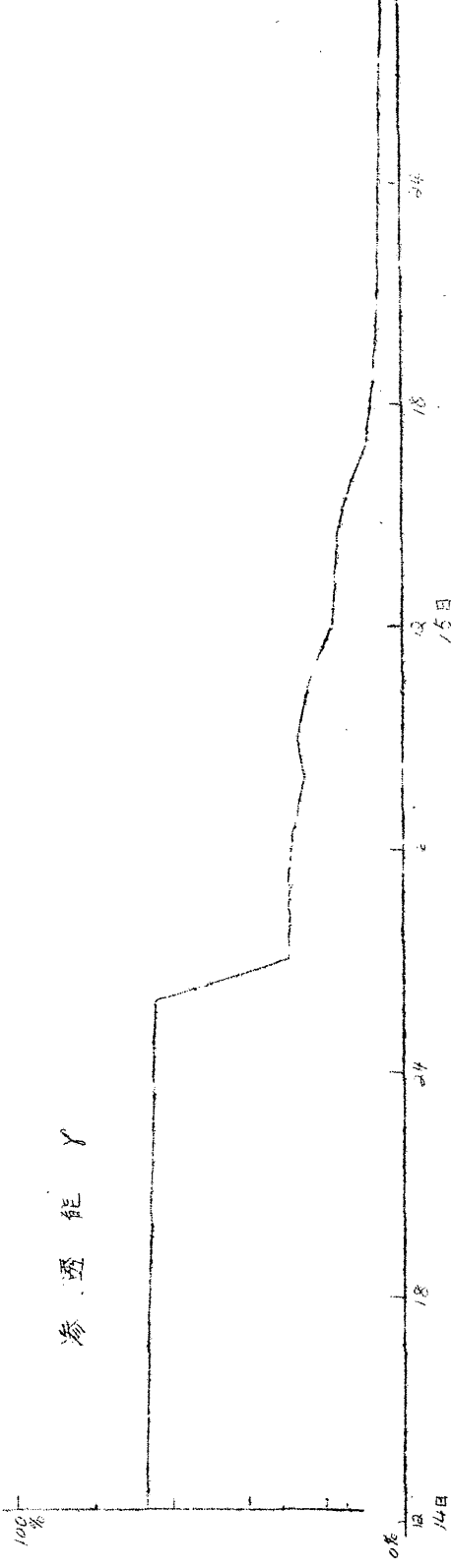
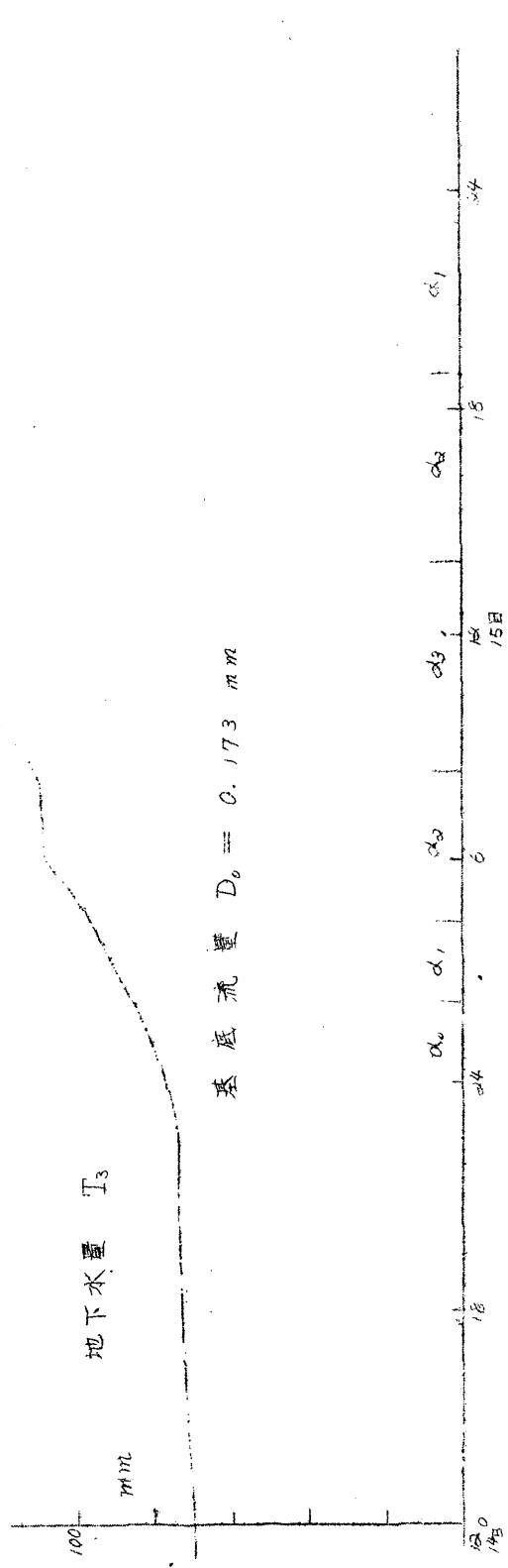
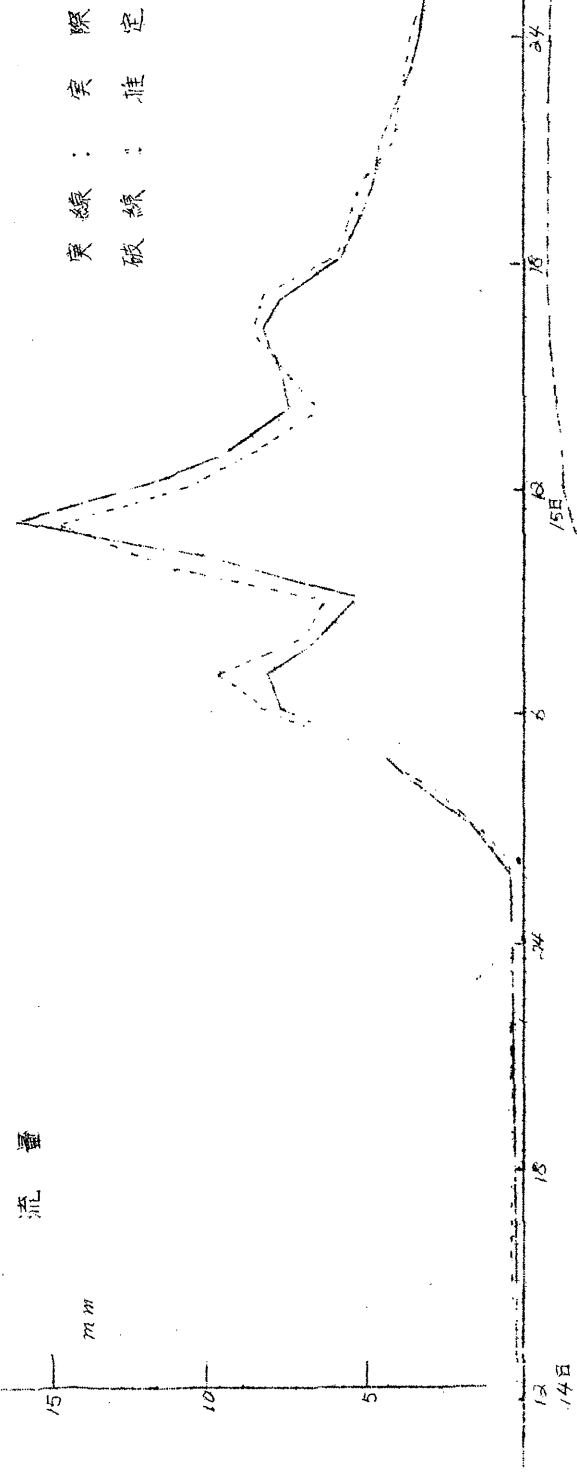
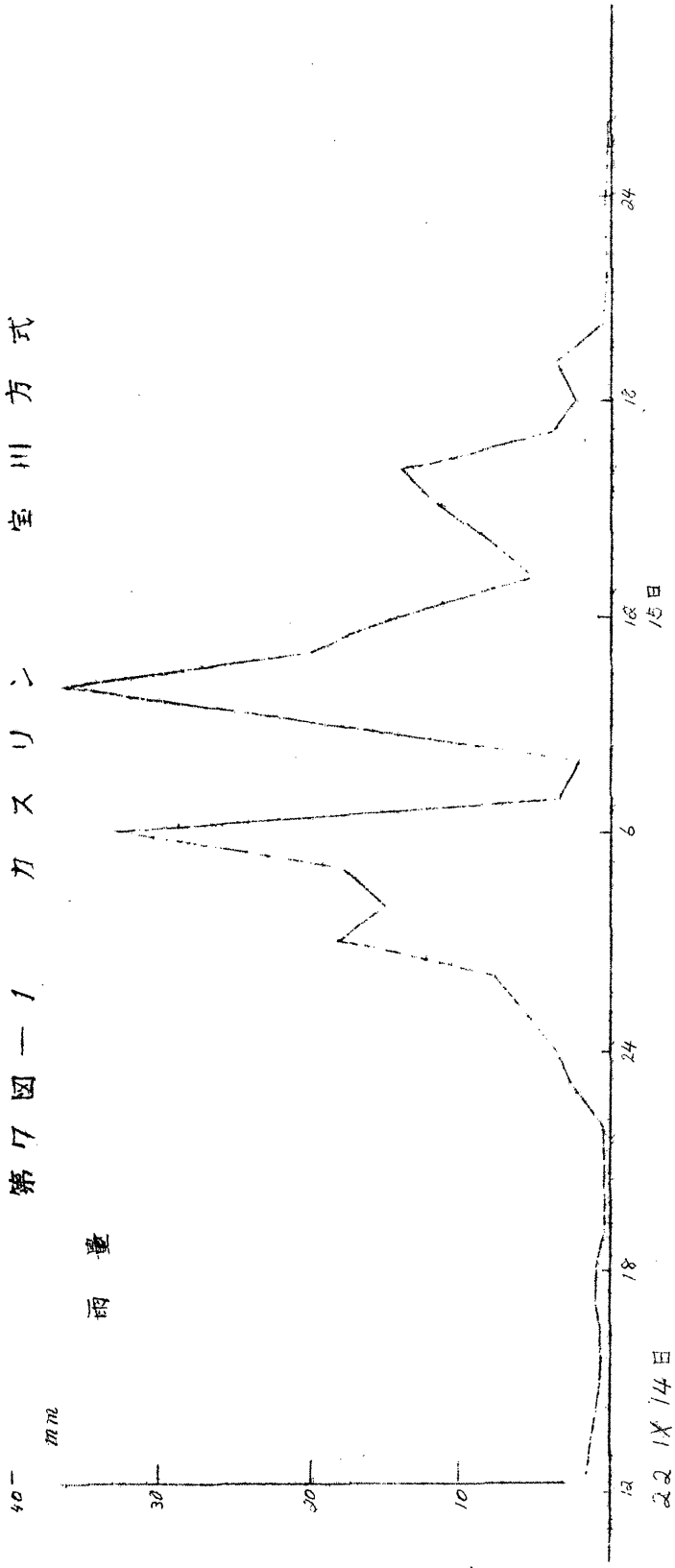


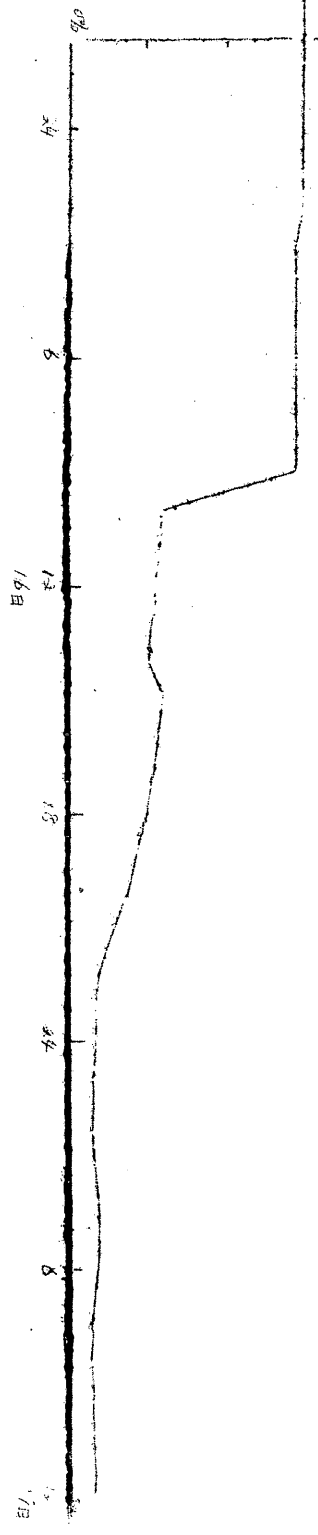
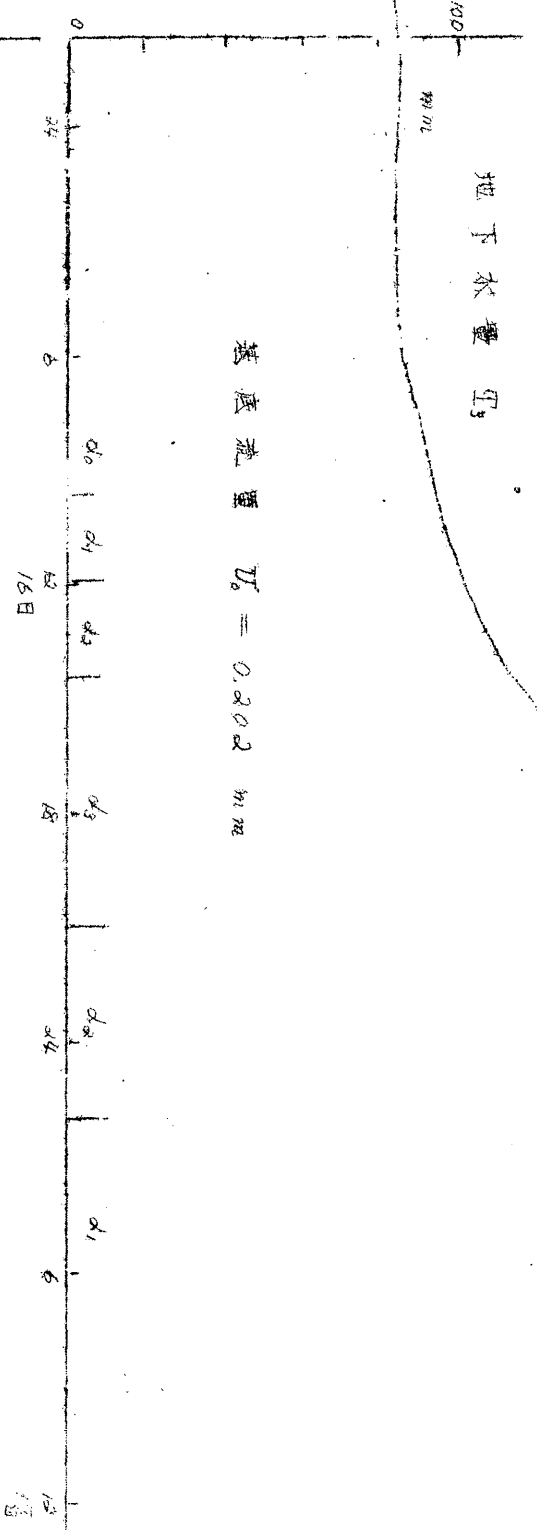
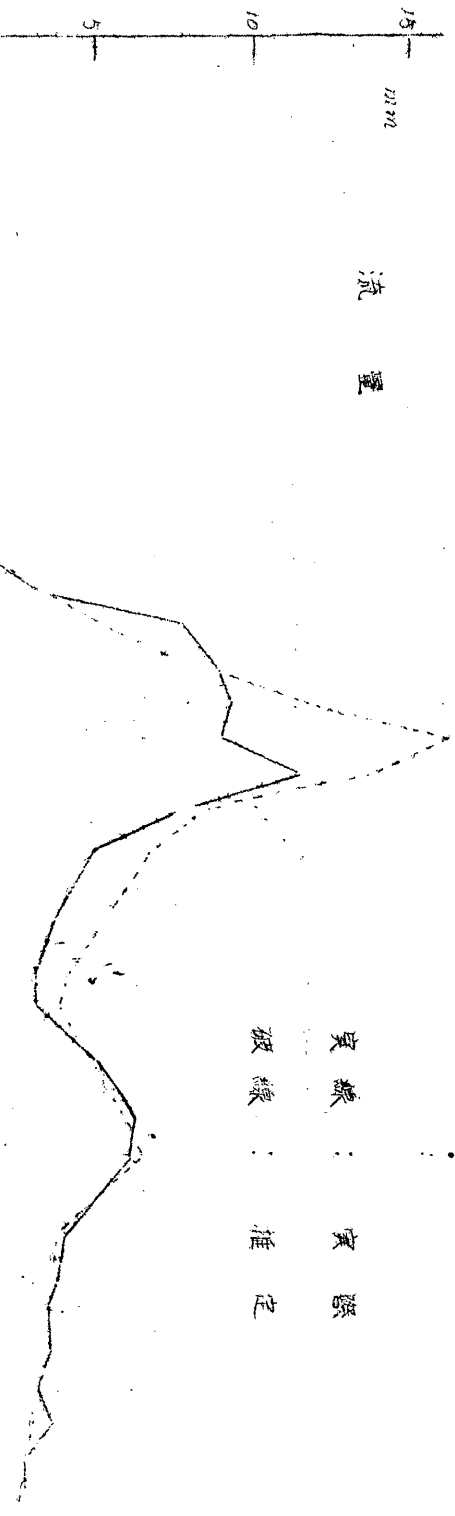
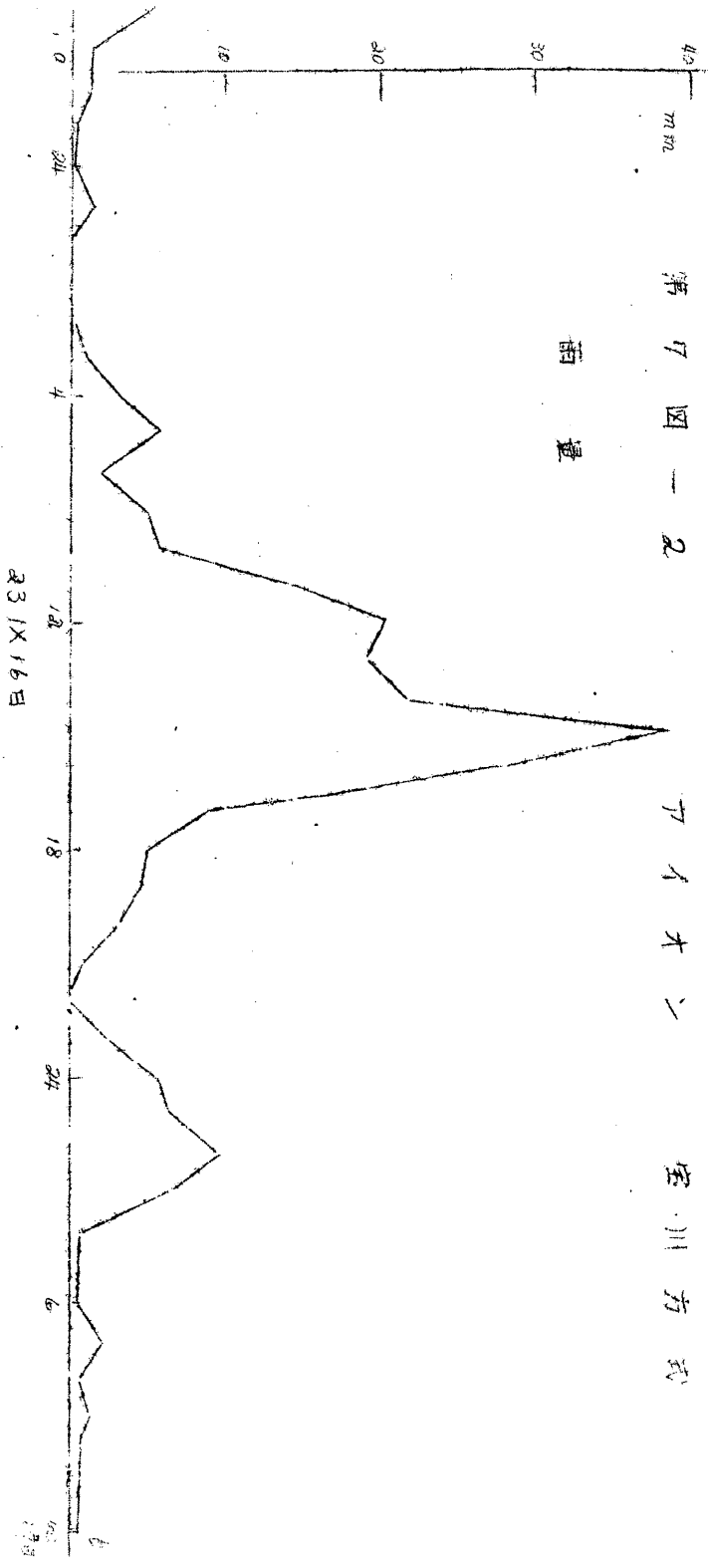
第 5 図

$\beta = \beta(T_0)$ 方式 流量

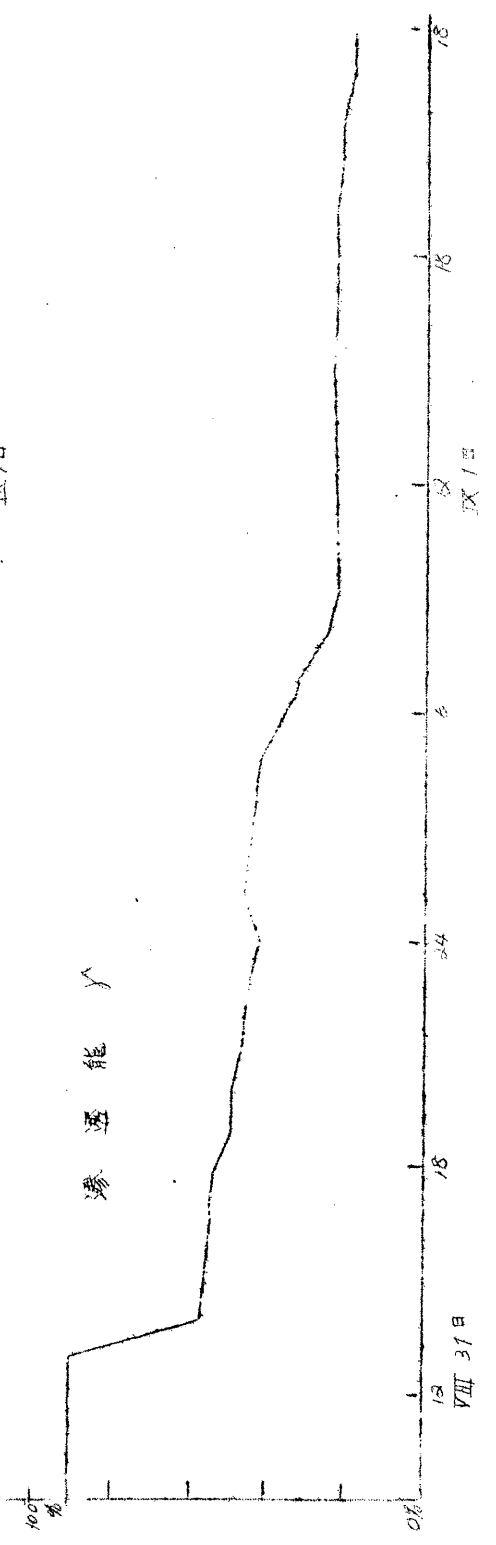
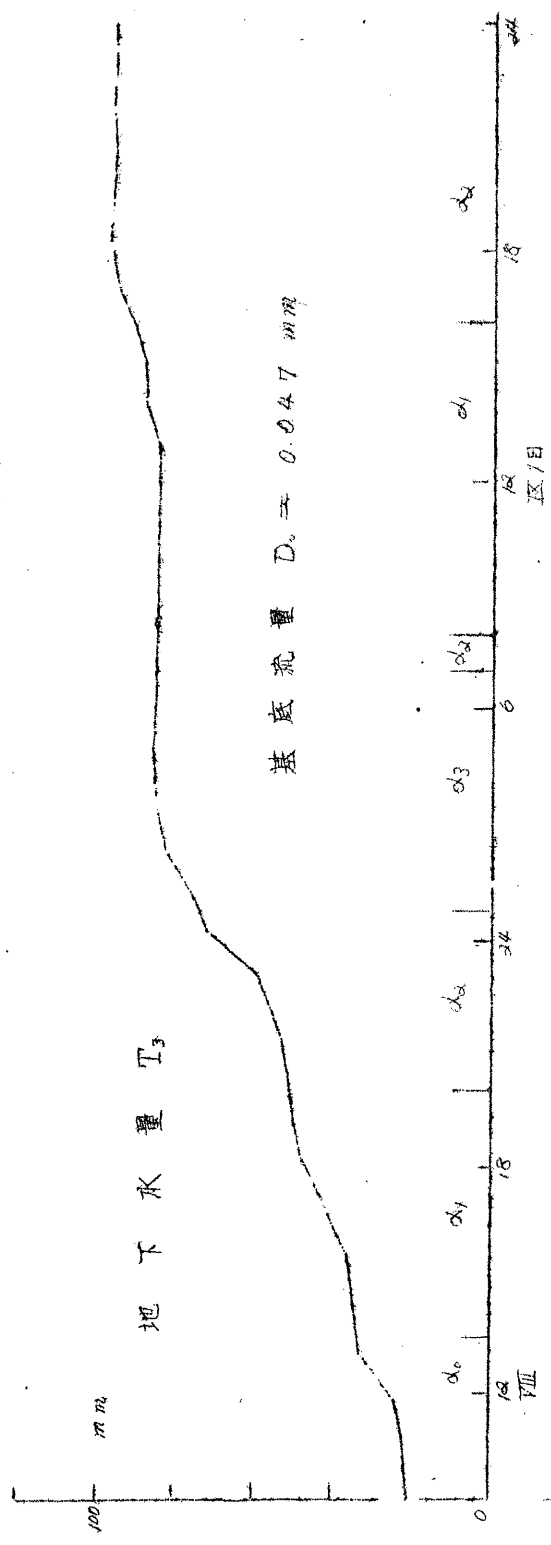
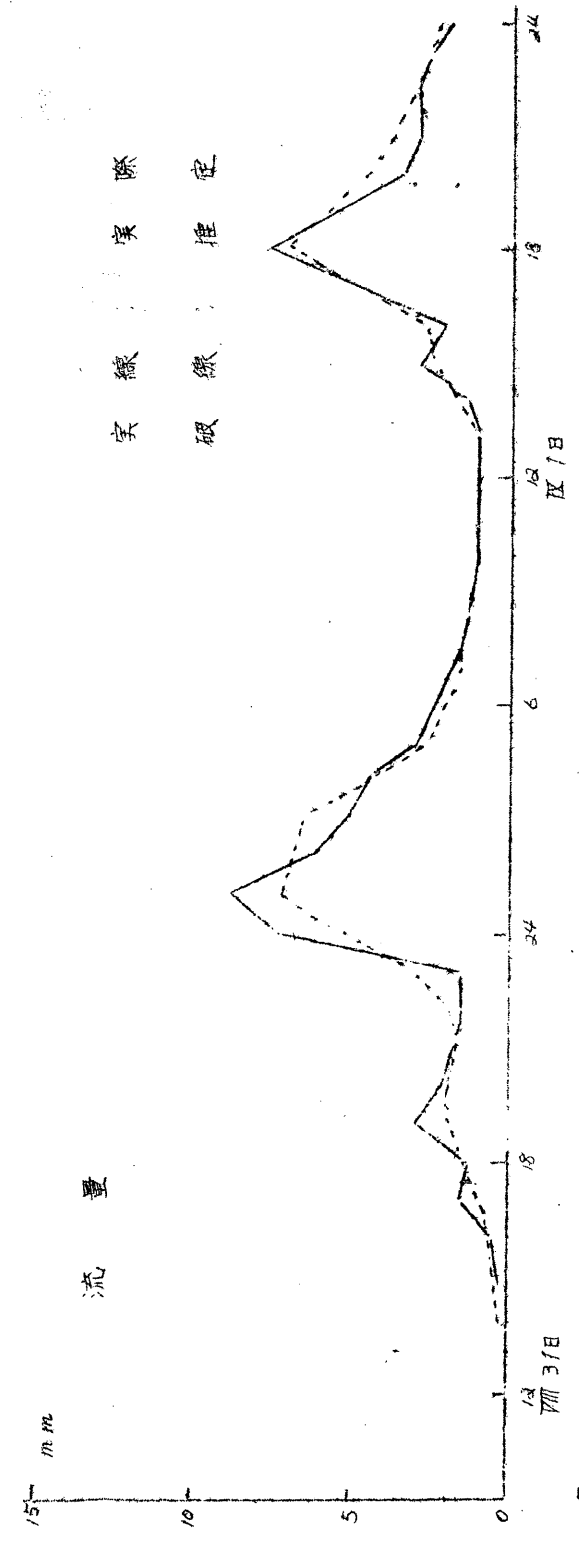
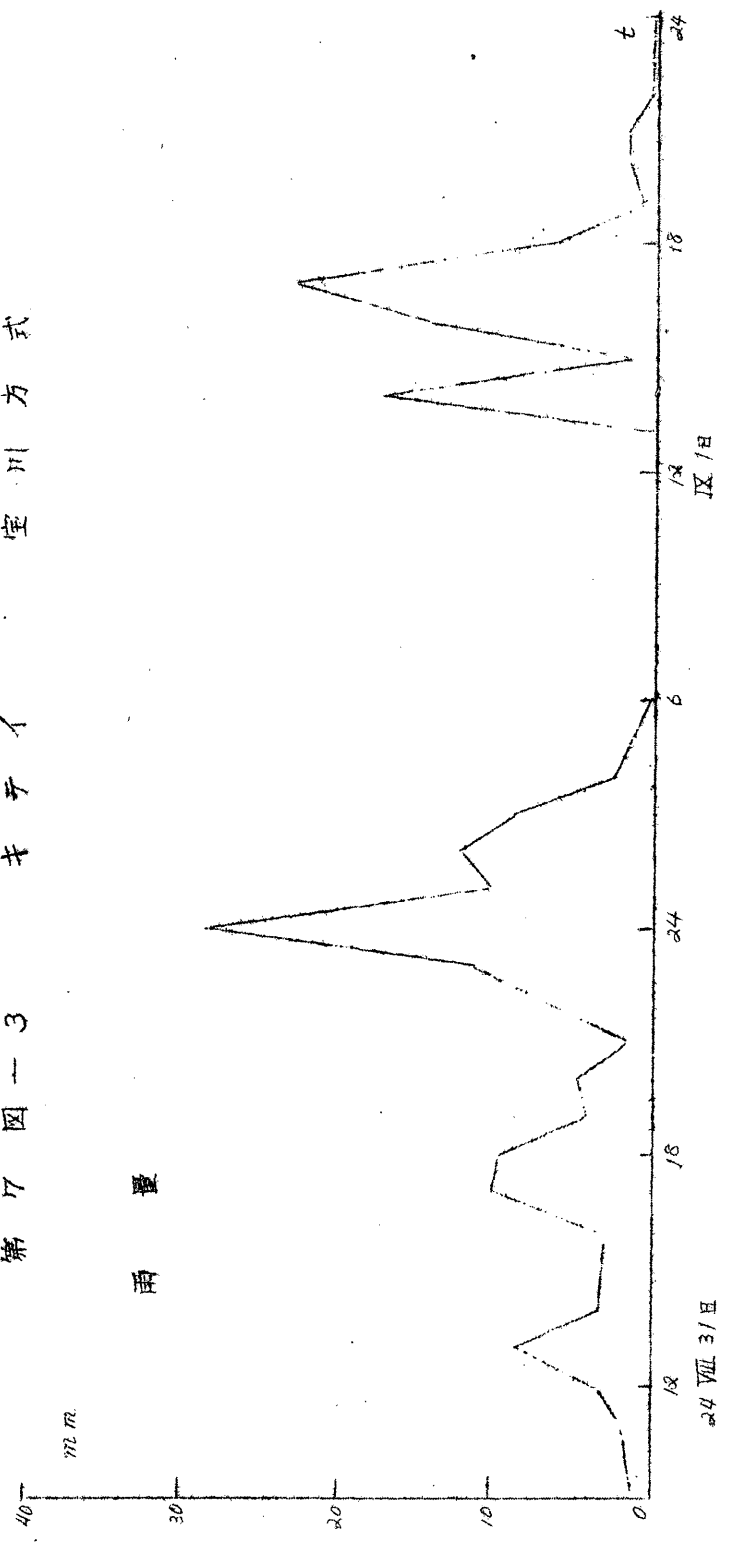


第7図-1 カスリン 室川方式

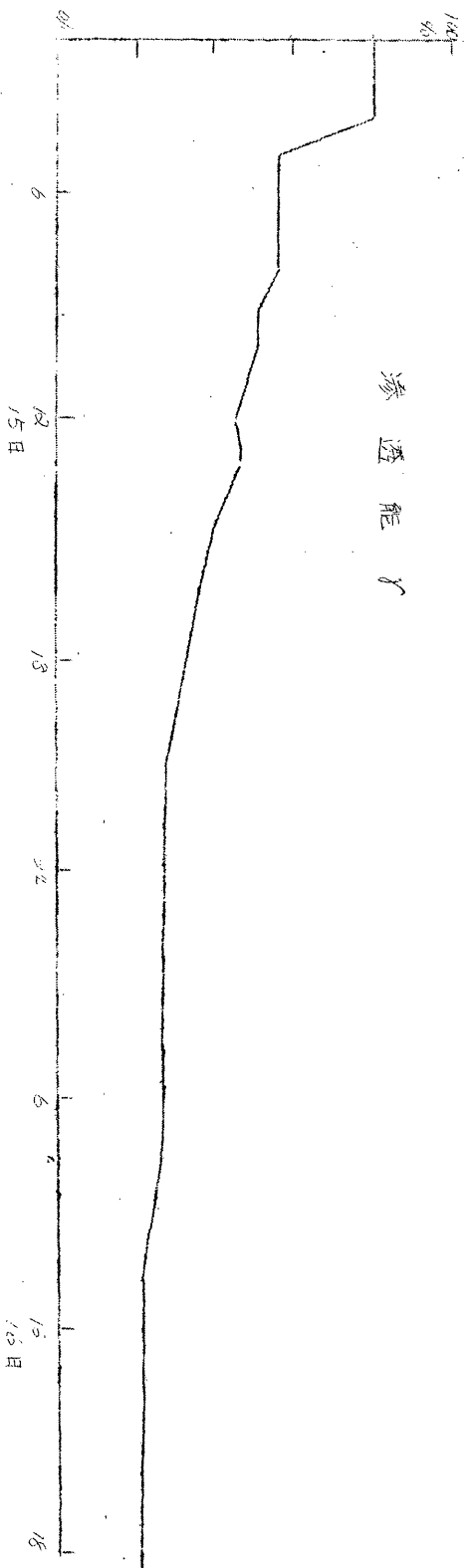
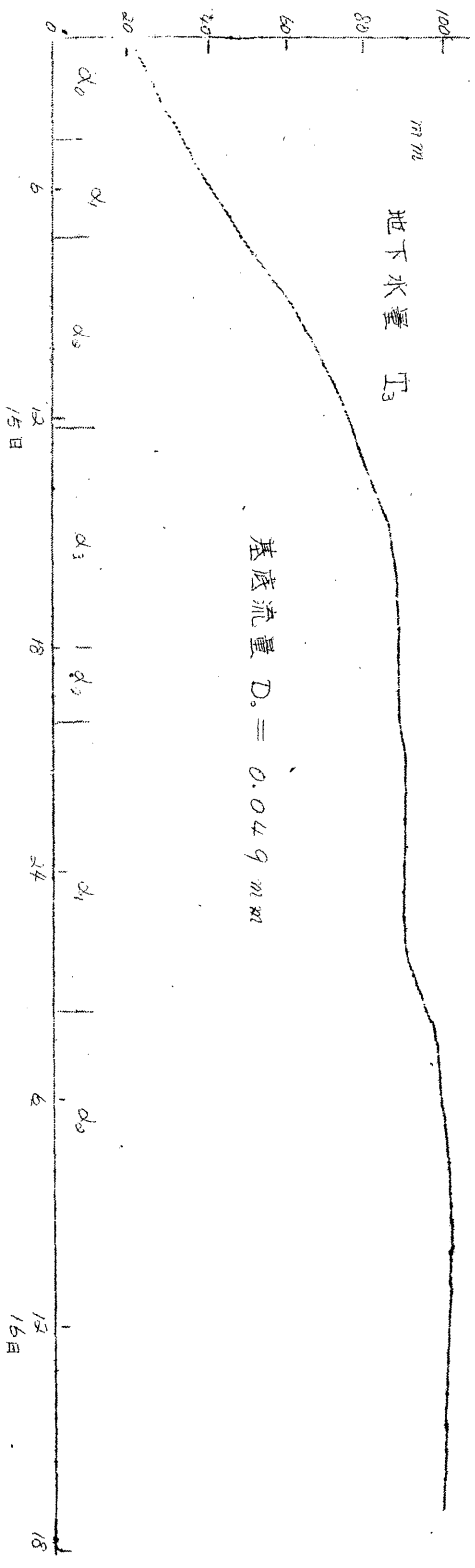
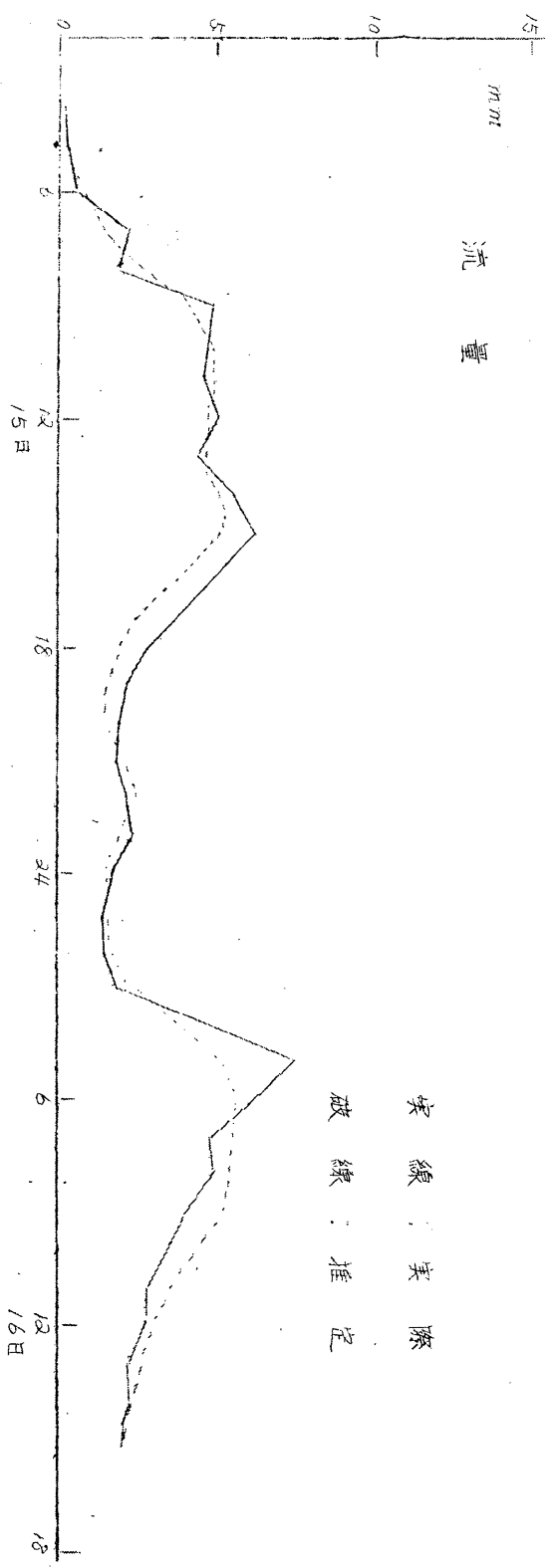
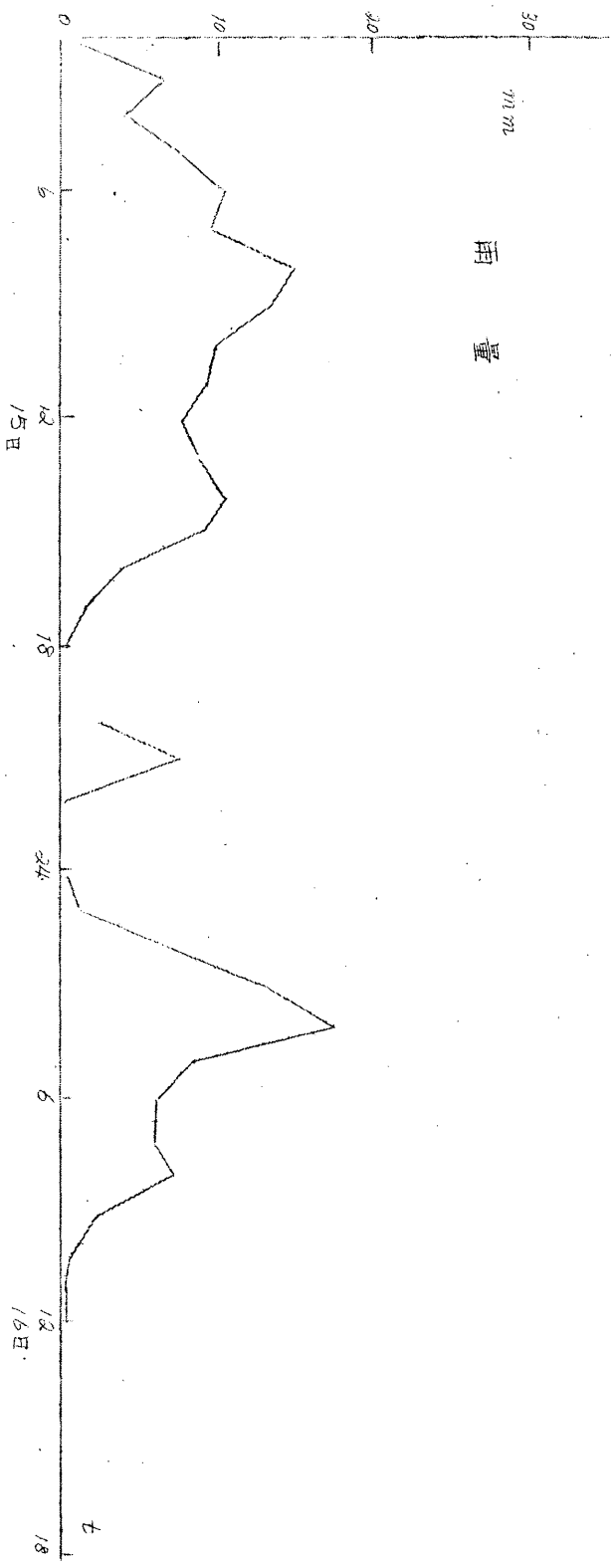


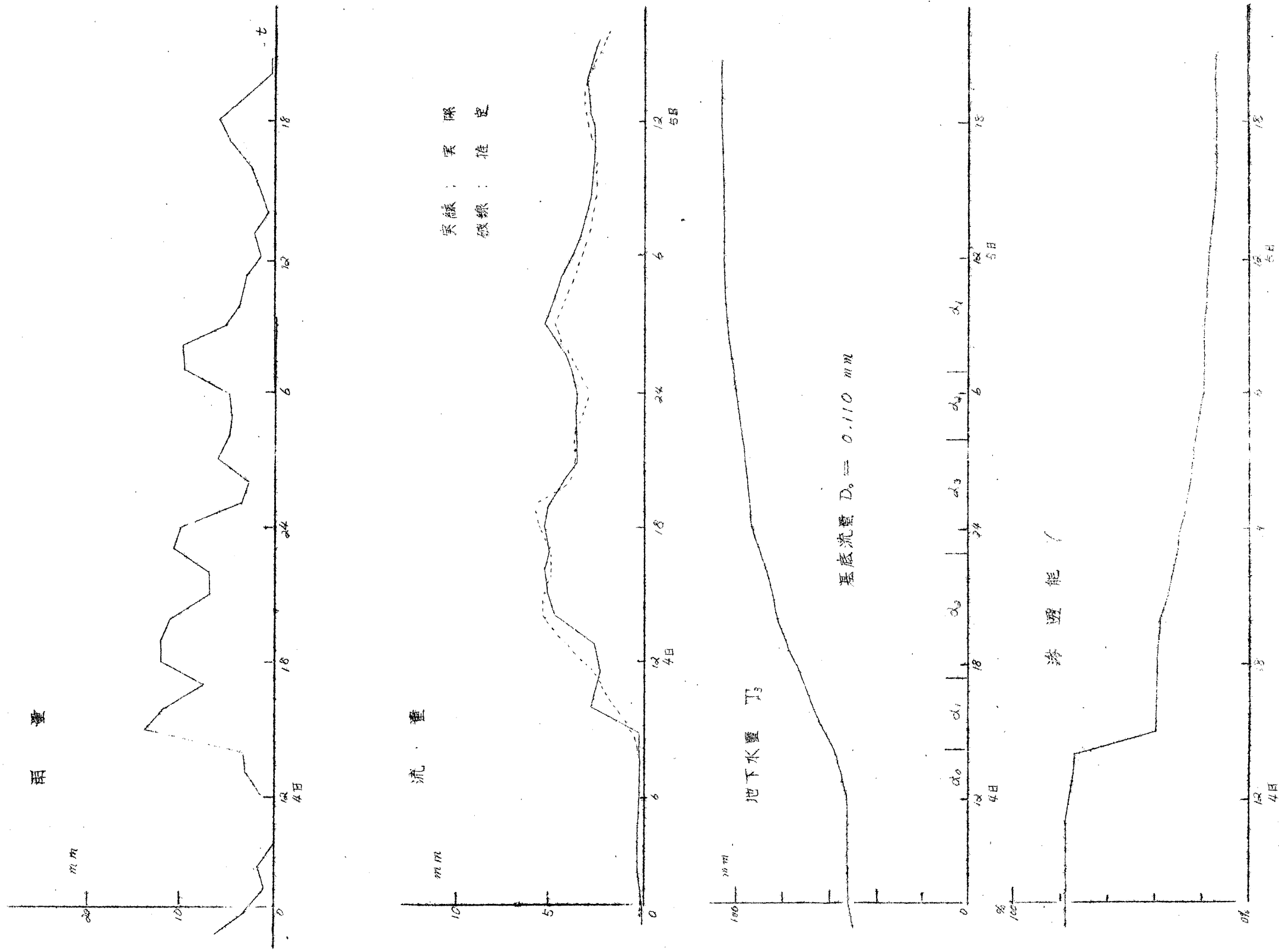


第 7 図 - 3 キ サ イ 宝 川 方 式



第 1 圖 - 4 17 VII 15 室川方式



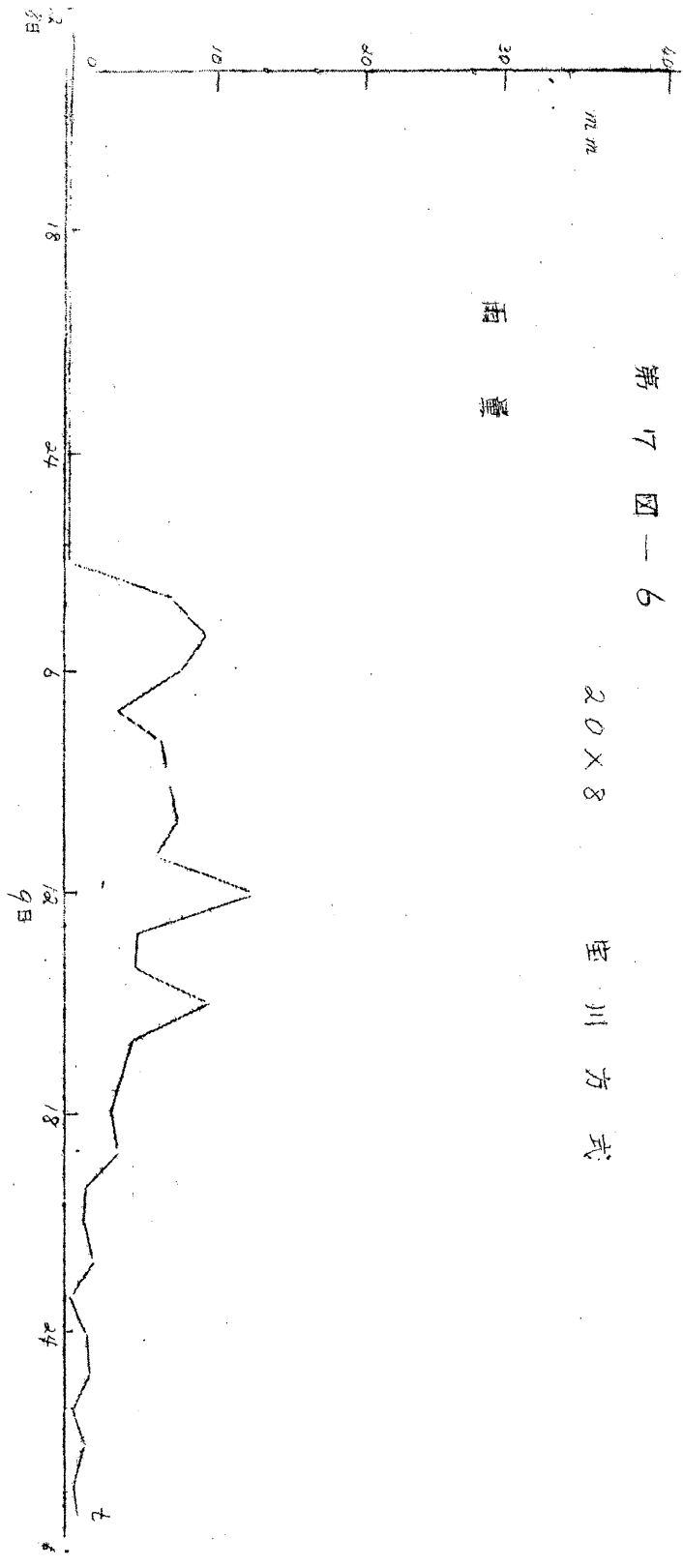


第 17 圖—6

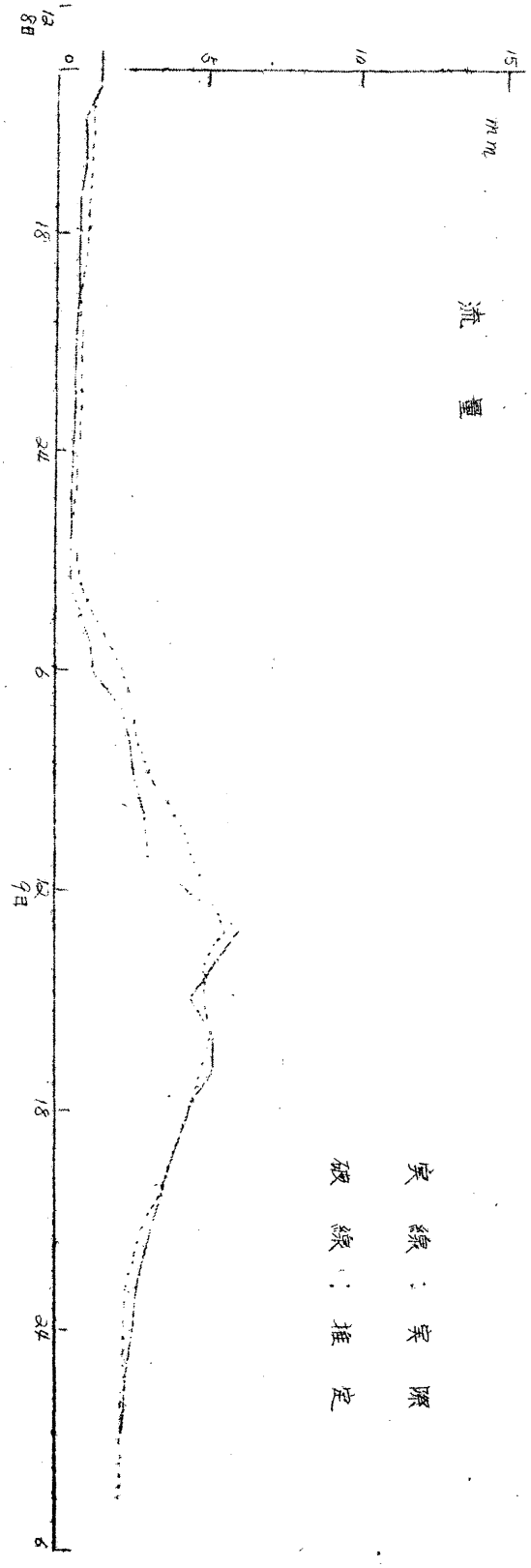
20X8

釜川方式

雨量

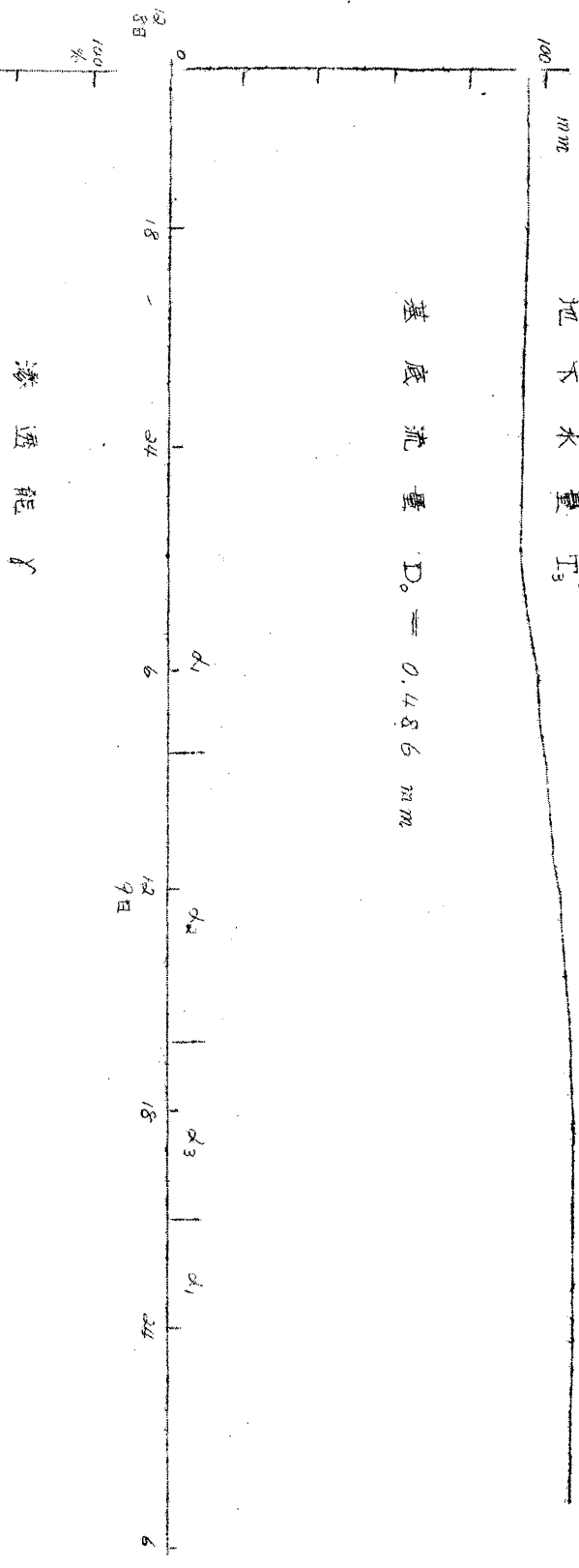


流量

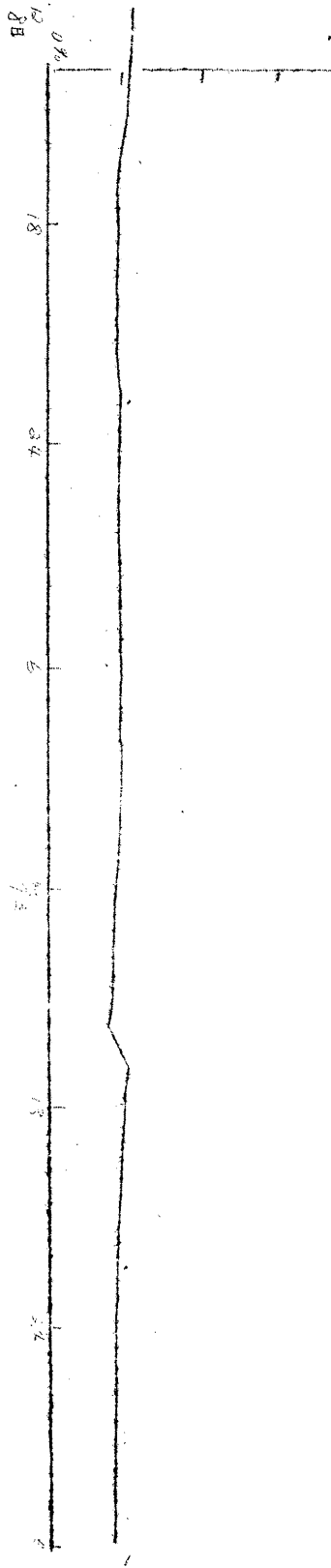


地下水量 T_3

基底流量 $D_0 = 0.486 \text{ mm}$



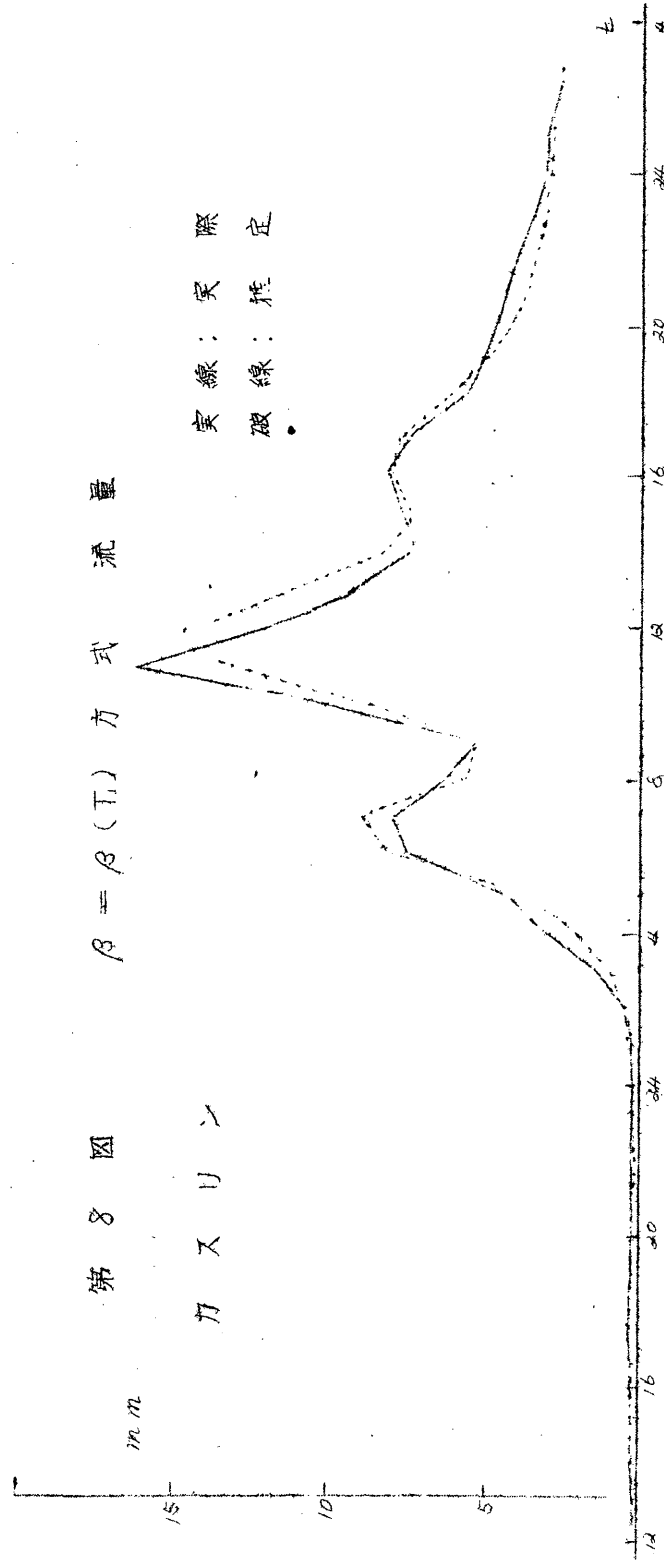
渗透能 γ



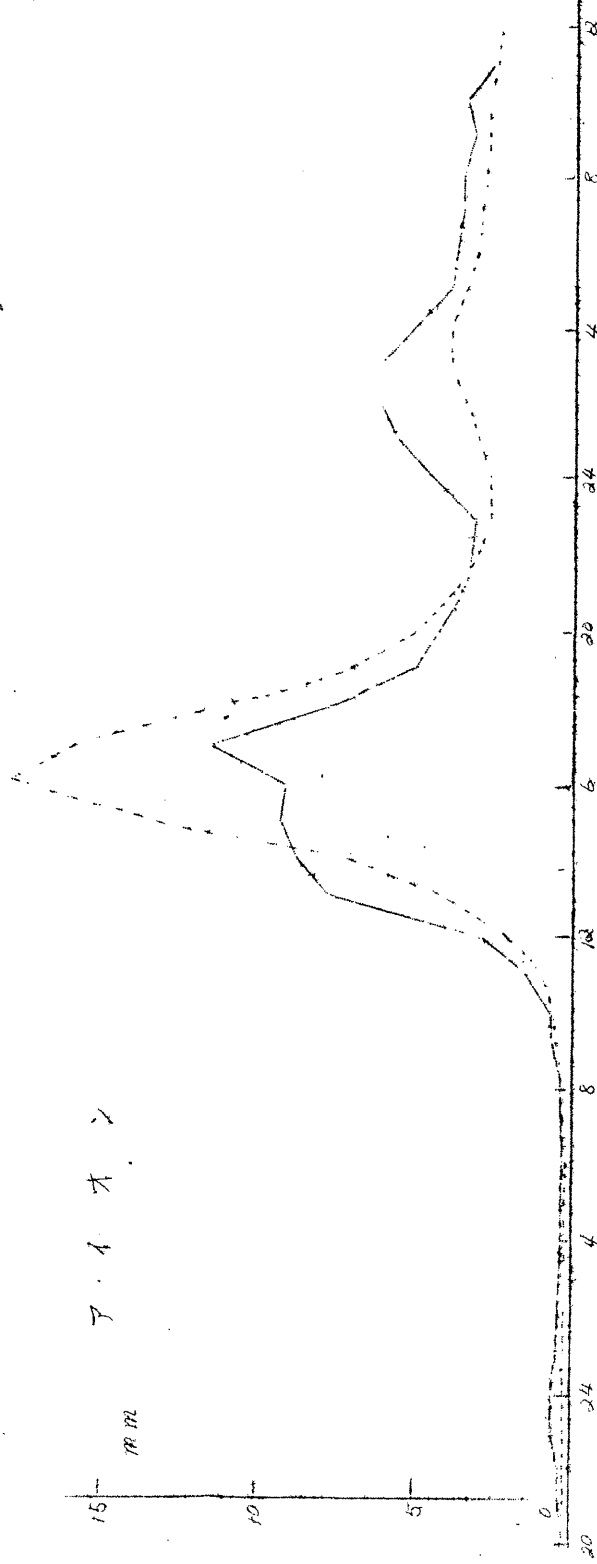
第 8 図 $\beta = \beta(T_1)$ 方式 流量

カスリン

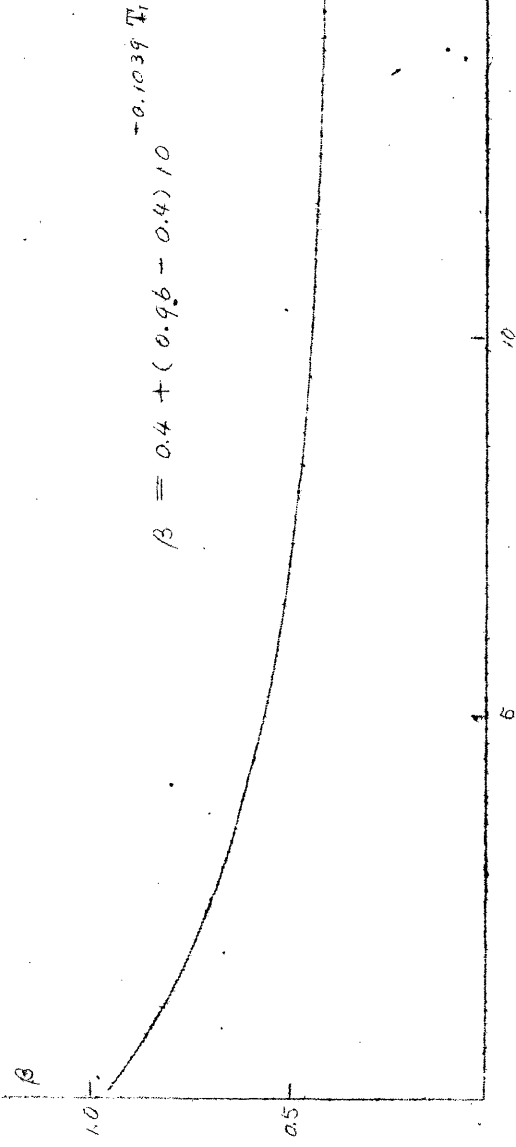
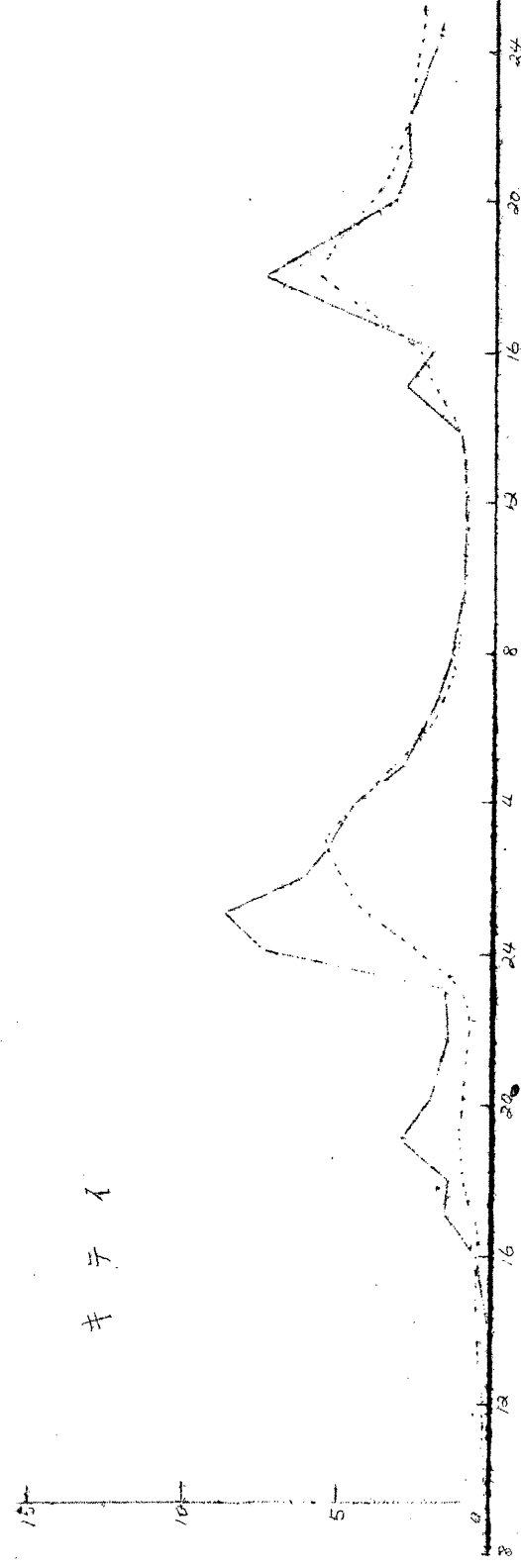
実線：実際
破線：推定



ア・イオン



キティ



T1 mm

