

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

01.10.-4

[技術情報室]

捨石堆積場周辺のラドン濃度に関する研究（3）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1992年 3 月

早稲田大学理工学研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂 1 - 9 - 13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術協力室

社 内 資 料
PNC 11615 92-002
1992年 3 月



捨石堆積場周辺のラドン濃度に関する研究 (3)

黒澤 龍平*

要 旨

人形峠事業所において、昨年度に引続き、捨石堆積場のラドン濃度及びその娘核種の濃度の測定等により堆積場寄与のラドン濃度を評価するための研究を実施した。

今年度は、事業所内またはその周辺の捨石堆積場において環境中のラドン濃度及びその娘核種濃度の連続測定を行い、両者の濃度の代表的な日変動パターンを把握した。この日変動パターンにより、日中のラドン及びその娘核種濃度の測定結果から平均的な平衡係数を推定するための手法について検討した。

また、事業所が実施しているTLDを用いた積算ラドン濃度モニタによる測定結果を利用して、堆積場からの寄与について調査検討した。

本報告書は、早稲田大学理工学研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：030D0177

事業団担当部課室および担当者：人形峠事業所 安全管理課 伊藤 公雄

* 早稲田大学理工学研究所



目 次

1. 緒 言	1
2. 目的と測定点の選定	2
3. 測定の方法	3
4. 測定結果	3
5. 測定値の検討	3
6. 結 言	21

捨石堆積場周辺のラドン濃度に関する 研究（３）

早稲田大学理工学研究所

黒澤 龍平

目

次

1. 緒言
2. 目的と測定点の選定
3. 測定の方法
4. 測定結果
 - F. 1 測定点配置図
 - F. 2～8 気象データ (F. 6' を含む)
 - F. 9～27 ヒーブリーチング場の測定値 (F. 21' を含む)
 - F. 28 ヒーブリーチング場の周辺図
 - F. 29～45 夜次表土堆積場の測定値 (同和工営前での気象データを含む)
 - F. 46 表土堆積場の周辺図
 - F. 47～68 夜次東の測定値
 - F. 69 夜次東の周辺図
5. 測定値の検討
6. 結言

1 雑言

大気中のラドンの濃度が時間的にも空間的にも変動していることは良く知られている。しかしながら局所的なラドン濃度の変動の予測はラドン濃度の変動要因が多いため困難である。

大気中のラドンは地殻中のラジウムから供給されるラドンと大気中を移動し対象となっている空間に流入する付加分と、ラドン自身の物理的減衰や垂直方向への渦流拡散や水平方向への流出などの減少分の合成によって構成されていることは容易に推測されるもののこれらの要因の各々についても情報が十分ではなく従って単純な分析では或る側面は説明し得ても総合的な評価は不可能である。

拾石堆積場のような局所的な空間でのラドン濃度は当然のことながら局所的なラドン供給量の影響を強く受けるが開放的な空間であるため、その空間から逸脱するラドンの量も多く両者の差となるので変動幅が大きい。またラドンから土が受けるであろう影響はラドンではなくその娘核種であることは良く知られている。しかしながら安定な空間におけるラドン濃度と娘核種濃度の関係は予測し得ないこともないが、開放的な空間の場合は高濃度で age of atmosphere の極端に小さなラドンを含む空気と濃度は低い age of atmosphere の大きなラドンを含む空気の合成となるため濃度予測のみならず測定値の解釈でも大変困難である。

このような研究のためには長時間連続的にラドンやその娘核種濃度を複数の測定点で測定すると共にそれらの変動の主たる要因である気象データを同時に求める必要がある。

平成3年度の研究では本研究室が独自に開発した測定器と数多くの学生を使い比較的長い時間にかつてラドンとその娘核種濃度を測定した。しかしながら天候だけは如何ともなし得なかったため種々の気象条件での測定値を求めるには至らなかったが或程度の条件下でのデータを得ることができた。その結果は予想された傾向のみならず予想外の変動も見られ将来の研究の方針を作る上に極めて重要な知見が得られた。また気象データとの関連についても従来常識的に大気安定度とラドン濃度の関係を考えられていたが局所的には局所的な大気の安定度を直接判定すべきでありまた当然のことながら地表付近の大気の移動を論議すべきことがわかった。さらに測定間隔や測定時間についても検討されるべきであり、被曝量評価であつて長時間の平均値が実態を必ずしも良く表しているとは限らず短時間毎の平均値やその時間的・空間的推移が重要性を帯びること

や変動の傾向についても考慮すべきことも明らかとなった。

またラドン娘核種個別濃度は被曝量評価のみならずラドンの消長を推定する際の基本的なデータとされているが、平衡(等価)ラドン濃度もしくは Potential Alpha Energy Concentration (PAEC) と ^{218}Po (RaA) 濃度が求められていれば上記の個別濃度が求められていなくてもほぼその役割をになうことが可能であることが示された。

2. 目的と測定員の選定

入形峠事業所内やその周辺の捨石堆積場内に設置した測定器によりその周辺環境中のラドン濃度やその娘核種濃度の代表的な日変動パターンを把握すると共に PAEC とラドン濃度の比即ち平衡係数を推定する方法を検討することを目的とした。またこの結果を TLD 方式などにより求められた平均ラドン濃度に適用し堆積場からの寄与を検討する。

この目的のため入形峠事業所内に3測定員を設定した。即ち局所的なラドンの発生が予想されるヒアリーチング場近くの捨石堆積場直上に第1測定員を選んだ。この地員はラドン湧出量が局所的に極めて高い。そのため特異的なラドン濃度の時間的変動と極端に不平衡なラドン娘核種個別濃度比を示す場合があることが予想された。この測定員の近くではあるがラドン湧出量がそれほど多くなくこの付近の地並に相当ししかもそれが広い範囲に分布していると考えられる測定員として夜次表土堆積場を第2の測定員として選んだ。第1と第2の測定員の間には高さ2~30mの尾根があり距離も2~300mあるので決して近傍にあるとは考えないが一応は目的に沿った測定員であると考える。第3の測定員は第1と第2と殆んど関係ないがラドンの局所的な湧出が予想され捨石堆積場の一つと考えられる地員として夜次東の地員を選んだ。この地員と第2の表土堆積場の距離は4~500mであるが中間に尾根と谷があり谷に相当する部分で気流が分岐することが予想され一応隔離されているものと考えられる。この地員は捨石堆積場と見なすことができないが北側が崖になり中の広い谷に面しているためか昼間グラフサンプリングで測定されたラドン濃度は極めて低いが TLD などによるラドン平均値は顕著に高く夜間の高ラドン濃度が予想されている員である。

これらの目的のために ラドン濃度と PAEC の連続測定 および 娘核種個別濃度測定

を行った。前二者は 3 セット準備できたが個別濃度測定器は 2 セットしか準備しなかった。

3 測定の方法

ラドン濃度は two filter 法による 30 分毎に求めた。

別紙参照 : P.4 ~ P.8

PAEC は 3 回もしくは 4 回法で 30 分毎に求めた。

別紙参照 - P.9 ~ P.19

個別濃度は 単体検出器による長時間サンプリング法と Σ us シンチレーション検出器による decay 法によって求めた。

4 測定結果

F.1 ~ F.69

5 測定値の検討

ヒューリーチン場についてはラドン濃度が非常に高い。これは測定長が最大のラドン湧出量を示す地帯の直上であったためである。最大は 600 Bq/m^3 に達する。また時間的変動も烈しく確かに夜明に非常に高くなるもの安定せず 1 時間程度で変動する。変動パターンは PAEC モーターで測った RaA の変動が平均化されているため実態を表はしていないものと思われる。RaA と Rn 濃度の比は 0.5 くらいであり平均滞留時間は 3 分以下と考えられる。従って平復係数は 0.18 ~ 0.05 と極めて小さい。捨石堆積場の場合も恐らく同様 0.1 前後であるように思われる。

これに対し表土堆積場はラドン濃度は最大でも 35 Bq/m^3 である。時間的変動はゆるやかでゆるい標準型のパターンを示す。しかし細部については夜明に高くなるというだけでなく夜 10 時頃にも高くなる場合が見られる。この地帯での濃度変化と DP における気象データと比較すると高度 1.5m ~ 10m の気温差と極めて相関が高いことがわかった。気温差が 0°C より小さくなるとラドン濃度は必ず高くなるが風向によっても変動するように思われる。風向とラドン濃度との相関は明瞭ではない。

夜次乗はラドンモーターのプリンターの故障のためかなりの部分が欠測となりラドン濃度の変化については完全に把握されていない。しかし 10 月 29 日の RaA 濃度から推定すると 1000 Bq/m^3 に達するものと思

two-filter 法によるラドン濃度連続測定

黒澤 龍平*・戸部 光則**・斎藤 淳**

On the Continuous Measurement of Radon Concentration by two-filter Method

Ryuhei KUROSAWA*, Mitsunori TOBE** and Atsushi SAITO**

(Received 1 October 1986)

We developed high sensitive two-filter method to estimate variation of radon concentration in environment. Setting filters on each side of cylinder-like vessel (internal capacity 12.6l). To remove radon daughters and dust in atmosphere, being set upstream filter (Whatman EPM-1000×3). In the cylinder, face of downstream side's filter (millipore AA), being set a silicon surface barrier type alpha detector. Analyzing the output pulse of the detector with multi channel pulse height analyzer, it become possible to count alpha activity of $^{218}\text{Po}(\text{RaA})$, $^{214}\text{Po}(\text{RaC}')$ and $^{212}\text{Po}(\text{ThC}')$, separately and continuously. So individual counts of RaA (corresponding to the radon concentration) can be estimated. Conversion factor from net counts of RaA to Radon concentration is given as following equation by calibration procedure. $R_n \text{ pCi/l} = 57.95 \times \text{RaA cps}$ (flow rate 8.313l/min). It shows good agreement with theoretical calculation. Detectable level (counting time 4000 sec) is estimated as 0.72 pCi/l based on the 50% confidence level. Measuring at the site of our laboratory give following result. It fluctuates from 0.07 to 0.21 pCi/l at outdoor, from 0.22 to 0.97 pCi/l at indoor. Maximum radon concentration is recorded at about 8:00 AM, but this concentration is rapidly reducing.

1. 緒 言

一般環境中のラドン濃度はグラフ・サンプリング*, または連続測定により求められる。グラフ・サンプリングによる方法は短時間でデータを得られるが、微小気象要素の影響が含まれるため、平均値や長期にわたっての変動を知る手段としては不向きである。また、プルトニウムなどのアルファ放射体を管理している施設のアルファ・ダストモニターのアラームレベルの設定値を施設内外に天然に存在している、ラドン及びラドン娘核種のようなアルファ放射体のレベル変動に対応させることが望ましい。さらに、施設内で衣服などに付着し問題となるラドン娘核種の振舞いについても、室内の状況やラドン濃度からある程度推定できるであろう。このような見地からラドン濃度の連続測定は必要であり、野外レベル程度のラドン濃度の変動までをとらえることが望ましい。

連続測定の手段としてはシンチレーションセルによるもの、電離箱によるもの、two-filter 法によるものなど

がある。シンチレーションセル法はセルは小さく、その構造や操作は簡単であるが、連続測定(グラフ・サンプリングの繰返し)の際にはデータの処理が煩雑になり、またラドン濃度が急激に低下していくような場合には、セルの内壁に付着するラドン娘核種による汚染のため、測定限界を急速に下げることができず、低ラドン濃度変化のはげしい環境には不向きである。電離箱法による連続測定には二重電離箱を用いる。そこにラドンを含んだ空気を流し、電場を与え電離箱内で生じたラドン娘核種は外側の電極に捕集、除去する必要がある。低ラドン濃度に対応させるには大形になりまた、中心電極へのラドン娘核種の付着を完全には防げないため、長時間の使用にはシンチレーション法と同様の欠点がある。そこでtwo-filter 法を利用することにした。

通常のtwo-filter 法¹⁾では ^{218}Po (RaA)を対象とする場合と、 ^{214}Po (RaC')を対象とする場合とがある。前者の場合、ラドン濃度に対する応答は早い¹⁾が、サンプリング時間は5~10分程度であり、後者においては応答が遅いかわりにサンプリング時間を45~60分と長くとれる。し

* 理工学研究所 Science and Engineering Research Laboratory, Waseda University

** 理工学研究所 後進課程 Science and Engineering, Waseda University

¹⁾ 測定時間内に適当な間隔でスポットサンプリングを繰返し、得られたデータよりラドン濃度の時間変動や平均値を求める手段。

しいずれを用いても、サンプリング終了のたびにフィルタを取り外し測定するという面倒な操作が必要になる。連続測定ではこれを繰返さねばならない。この点を良するため、サンプリング・フィルタに対向して半導体検出器を置くことにした。検出器からの信号を多重波分析器で計数すれば、RaA, RaC', ^{212}Po (ThC') をそれぞれ個別に計数できるようになるわけである。つまり、ラドン濃度との対応が最も早い RaA のみを計数することで、ラドン濃度が簡単に求まることになり、しかもフィルタ交換の必要がなく、長時間にわたっての連続計数が可能になり、低ラドン濃度の測定も可能となる。しかし、容器内で一次粒子として存在しているラドン娘種の拡散係数は、空気中の湿度によって変動するため、 α -filter 法は湿度の影響を受けると言われている。そこでこの影響を少なくするため、容器の内容積を小さくし流量を増加させ、容器内でのラドン娘核種の滞留時間を短くした。つまり、ラドン娘核種の容器内壁への拡付着量を減らすわけである。そのかわり、ラドン娘核種の生成量も減ってしまうため、測定時間が延びることとなる。しかし平均値を求める際には問題にならず、実面ではポータブルになり扱い易くなるという利点もある。この半導体検出器を利用した two-filter 法について告げる。

2. 構造

2.1 構造と特色

通常の two-filter 法は両端にフィルタを装着した円筒試料空気を流し、上流側フィルタにおいてラドン娘核種、浮遊塵などを除去し、上流側フィルタと下流側フィルタとの間で生成したラドン娘核種を下流側フィルタ(測定用フィルタ)で捕集する。このフィルタを取り外し、ラドン娘核種が放出する α 線を ZnS(Ag) シンチレーション検出器などで計数することによりラドン濃度を測定している。計数に利用する核種はすでに述べたよう RaA または RaC' である。この方法は連続測定に向かないので、測定用フィルタに対向する位置に半導体検出器を置き、出力パルスを計数することにより、連続測定と感度の上昇を試みた。

今回設計した測定装置の概略を Fig. 1 に示す。測定用フィルタ (millipore AA) と対向して表面障壁型半導体検出器 (ORTEC, CA-020-300-100, 有効検出面積 90 mm^2 , 空乏層厚さ $100\text{ }\mu\text{m}$) を設置したのが大きな特徴である。検出部を Fig. 2 に示す。検出器の検出面はラドン娘核種による汚染を防ぐため、厚さ $6\text{ }\mu\text{m}$ のアルミ箔でおおってある。検出器からのパルスを電荷有感前

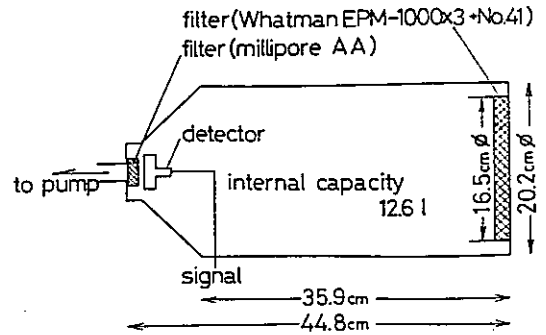


Fig. 1 Structure of two-filter cylinder

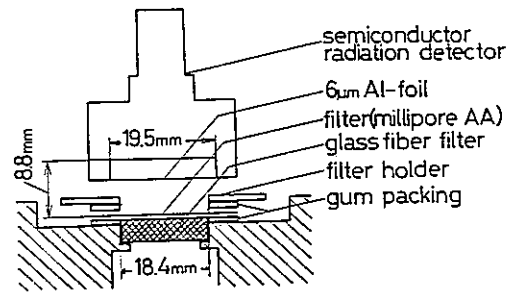


Fig. 2 Detector part of the cylinder

置増幅器 (NAIG D-201A) を通して多重波高分析器 (CANBERRA, SERIES 30) に入力している。得られた波高分布の例を Fig. 3 に示す。RaA と RaC' の α 線が比較的良く分離されていることがわかる。従ってラドン濃度の変化との対応が最も早い RaA のみを連続して測定 (サンプリングしながらの計数) することが可能である。更に上流側フィルタには大口径 (有効径 16.5 cm) の EPM-1000 を 3 枚重ねて使用 (この濾材の拡散付着機構により除去作用が行なわれていると考えられる) しているため、機械強度も充分あり、ラドン娘核種や浮遊塵のリークの可能性はまず考えられない。ところで本装置の流量は下流側フィルタ (millipore AA) の通気抵抗 (35 cm Hg 以上) に依存している。しかしながらこのフィルタを流れる空気中の塵は上流側フィルタでほぼ完全に除去されるため、塵による目づまりは全く起きない。一方、上流側フィルタはガラス繊維フィルタであるため、もともと通気抵抗が低く、そのうえ塵の保持容量が大きいので多少の塵が捕集されても本装置の採取系の相対的通気抵抗の変化はほとんどなく、従って流量の変化もほとんどない。採集した塵の性質によって異なるが、少なくとも 0.3 mg/cm^2 くらいの量の塵が顕著な流量変化なしに捕集できる筈である。空気中のダスト濃度はほとんどの場合 0.2 mg/cm^3 であり、従って本装置の流量 (8.3 l/min) から考え、600時間以上にわたって連続運転してもその流量変化は無視できる。事実、実験中の流量変化は全く見られなかった。

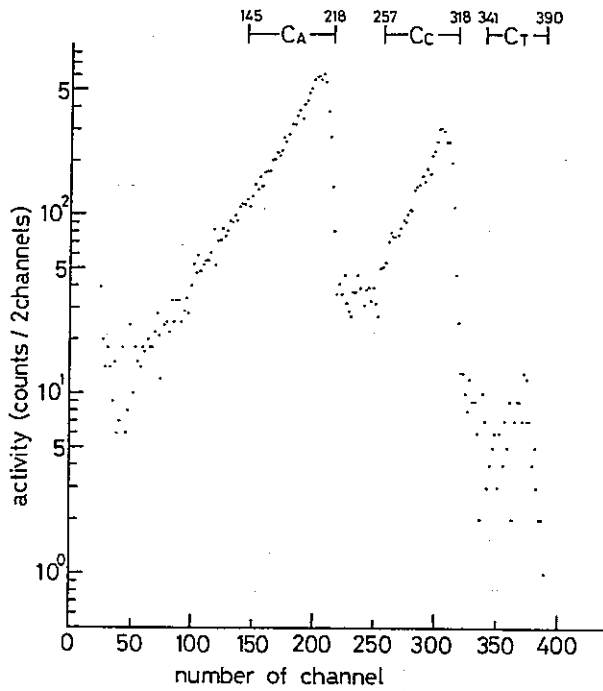


Fig. 3 Pulse height distribution

また特に粉塵の多い環境ではもっと粗な濾紙（例えば Whatman No. 41 など）を重ね、そのみを交換すれば、上流側の娘核種除去用のフィルタの目づまりを防止でき、上流側フィルタ、測定用フィルタの目づまりによる交換はまず必要ない。万が一上流側フィルタで娘核種のリークが起これば、RaC' チャネルの計数が急増するため、すぐわかる。そして、ラドン濃度が低い場合に考慮しなければならない²¹²Bi (ThC, 放出するα線のエネルギーがRaAのそれとほぼ同じなので両者の区別はできない) による計数はThC' の計数から補正できる。

2.2 RaA の測定用フィルタ到達量

測定容器内で生成した RaA はそのすべてが測定用フィルタに到達するわけではなく、一部は拡散により容器内壁に付着して失われ、また一部は放射性壊変により²¹²Pb (RaB), ²¹²Bi (RaC) などに変わってしまう。この両者を考慮して、到達量を計算した。ただし測定容器を円筒と近似した。

i) 器壁への拡散付着 容器内の空気の流れを plug 流と考えると、下流側フィルタ（以下測点）から x の距離にある粒子が測点まで到達する割合 n/n_0 ²⁾ は、

$$\frac{n}{n_0} = 1 - \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \mu^{1/2} + \mu \right) \quad (1)$$

ここで

$$\mu = \frac{\pi D}{Q} x$$

D : 拡散係数

x : 測点からの距離

Q : 流量

で表わされる。

ii) 放射性壊変による減衰 円筒内の微小体積 S_{dx} (S : 円筒の断面積) 中に存在する RaA のうち t 秒後も RaA として存在している量 σ は、

$$\sigma = C_n S e^{-\lambda_a t} dx = C_n S e^{-\lambda_a S x / Q} dx \quad (2)$$

ここで

C_n : ラドン濃度

λ_a : RaA 壊変定数

で与えられる。

(1)式と(2)式との積を円筒の全長 L にわたって積分した値が RaA の下流側フィルタへの到達量 n_a である。

$$n_a = C_n S \int_0^L e^{-\lambda_a S x / Q} \left(1 - 4 \sqrt{\frac{Dx}{Q} - \frac{\pi D x}{Q}} \right) dx \quad (3)$$

$\int_0^L e^{-\lambda_a S x / Q} \sqrt{\frac{Dx}{Q} - \frac{\pi D x}{Q}} dx$ はシンプソンの区分求積により計算した。

Fig. 4 に計算した流量と RaA 到達粒子数との関係を示す。

iii) 検出器への付着損失についての補正因子 f_s 本装置は測定容器内部に半導体検出器を内蔵しており (Fig. 1), ここへの RaA 粒子の付着は無視できない。そこで、検出面以外の部分については、空気が単位時間に Q だけ流入している充分大きな空間内の球体表面への拡散付着で³⁾、検出面とフィルタ面とが対向している部分については平行平板内の拡散付着⁴⁾で、付着損失割合を近似し両者の積を求めた。その計算結果を Fig. 5 に示す。

$$f_s = \frac{Q}{4\pi R D + Q} \times (0.915 e^{-\alpha} + 0.059 e^{-11.8\alpha} + 0.026 e^{-80\alpha}) \quad (4)$$

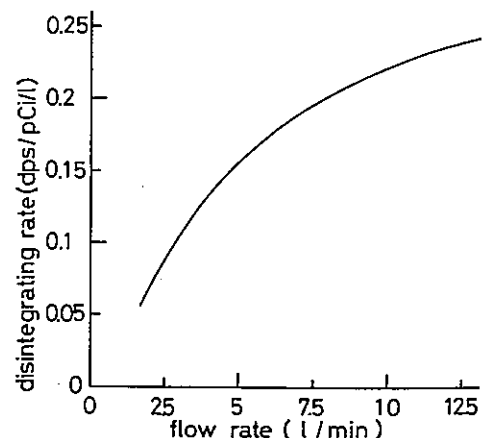


Fig. 4 Detectable count of RaA

ここで

R : 仮定した球体の半径

$$\alpha = \frac{3.77abD}{cu}$$

a, b, c : それぞれ平行平板の縦, 横,
平板間の距離の1/2

u : 流量

iv) 空気層及びアルミ箔による損失についての補正因子 f_w フィルタに沈着した RaA の放出する α 線で検出面への入射角が最大 (約 65°) になるものでも残存飛程は 0 に近くなるがなおエネルギーを有している。従って, $f_w=1$ と考えてよい。

v) 幾何学的補正因子 G 測定用フィルタは拡がりを持った面であり, また検出面と測定用フィルタとの間には 8.8 mm の距離がある。この補正因子を次の近似式²⁾で求めた。なお, 第 4 項以下は充分に小さく無視できる。

$$G = G_p - \frac{3}{16} b^2 \frac{a^2 Z}{D^3} + \frac{5}{32} b^4 \frac{a^2 Z}{D^5} \left(Z^2 - \frac{3}{4} a^2 \right) + \dots \quad (5)$$

ここで

$$D = (Z^2 + a^2)^{1/2}$$

$$G_p = \frac{1}{2} (1 - Z/D)$$

a : 検出面半径

b : 測定用フィルター半径

z : 両者の距離

vi) 多重波高分析器計算チャンネル数による非計数補正因子 η Fig. 3 の RaA のピークの低エネルギー側は RaB などが放出する β 線によるパルス波高と重なってしまうため, 全チャンネルを計数することができない。そこで, RaA の計数としてピークのチャンネル数から β 線によるカウントが入っていないと思われるチャナル数ま

でを対象とし, C_A チャンネルと呼ぶことにした。この部分が全チャンネルの 80% となるように下側のチャンネル数を設定した。

以上 4 つの補正因子の積が計数効率となる。従って正味計数率 N_a は

$$N_a = f_s \cdot f_w \cdot G \cdot \eta \cdot n_a = f_s \times 1 \times 0.132 \times 0.8 \times n_a \quad (6)$$

で表わすことができる。 f_s, n_a はそれぞれ Fig. 5, Fig. 4 で示したように流量の関数である。そこで流量と正味計数率との関係は Fig. 6 となる。

3. 較正と実測

3.1 較正

i) 較正 ラドンを IAEA から供給された標準ラジウム溶液を用いて較正した電離箱により決定し, それと比較して本装置の較正を行った。較正は 3 種類のラドン濃度についてそれぞれ 2 回ずつ, 計 6 回行った。流量はポンプの能力から 8.3 l/min となった。

ところで RaA の正味計数は次の 3 核種, RaA, RaC', ThC' が形成する 3 つの異なるピーク (Fig. 3) から算出した。RaA のピークには ThC の一部 (35.93%) が放出する α 線の計数も含まれている。しかし, この計数は ThC の娘核種である ThC' の計数から容易に推定することができる。また RaC' のピークの低エネルギー側は C_A チャンネルに入るなのでその補正を行わねばならない。その結果, 正味計数 C_{A_0} は,

$$C_{A_0} = C_A - 0.03819 C_C - 0.4505 C_T \quad (7)$$

ここで C_A, C_C, C_T はそれぞれ RaA, RaC', ThC' のピーク設定チャンネル (Fig. 3) の計数値

C_{A_0} をサンプリング時間 T で割った値が正味計数率となる。Fig. 7 にラドン濃度と正味計数率との関係を示す。図示した 6 データから換算定数は,

$$\text{ラドン濃度 (pCi/l)} = 57.95 \times \frac{C_{A_0}}{T_{(\text{sec})}} \quad (8)$$

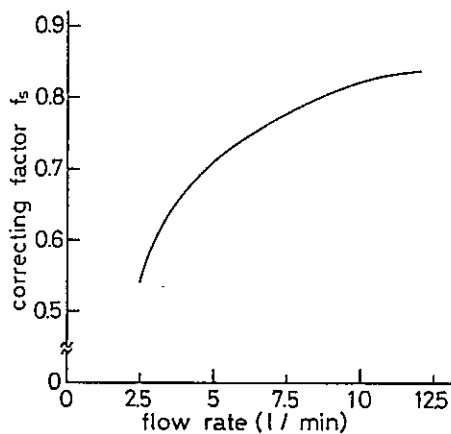


Fig. 5 Correcting factor of diffusion stick

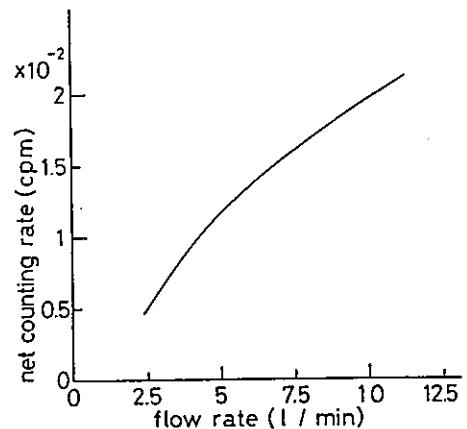


Fig. 6 Net counting rate per 1 pCi of Radon/l

となる。

ii) 流量と換算定数 流量を変えた場合には正味計数率が変わり (Fig. 6), 換算定数が変化する。その計算値と実測値を Fig. 8 に示す。

3.2 実測例

Fig. 9 に室内と屋外での実測結果を示す。室内の実測は1985. 1. 9~10に早稲田大学理工学研究所黒沢研究室の1階で、また屋外での実測は1984. 4.27~28に同所2階でそれぞれ行った。いずれの場合も明け方(8時頃)にラドン濃度は最高を記録し、以後急速に低下していることが読みとれる。

3.3 結果

(8)式において、正味計数 $C_{A_0} = 5$ カウントを検出下限と考え(相対誤差が大略50%), 測定時間を4000秒とった場合に対応するラドン濃度は0.072(pCi/l), 更に測定時間を2倍の8000秒とった場合には、0.036(pCi/l)が検出下限になる。従って野外などの低ラドン濃度にも充分

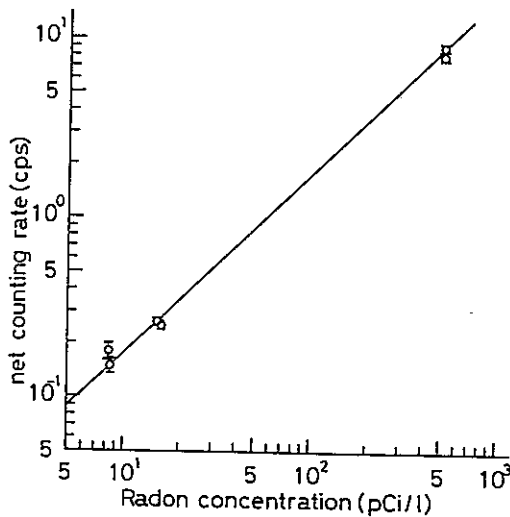


Fig. 7 Calibration of two-filter cylinder

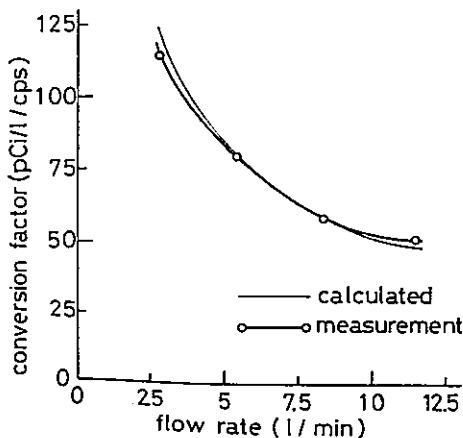


Fig. 8 Conversion factor for flow rate

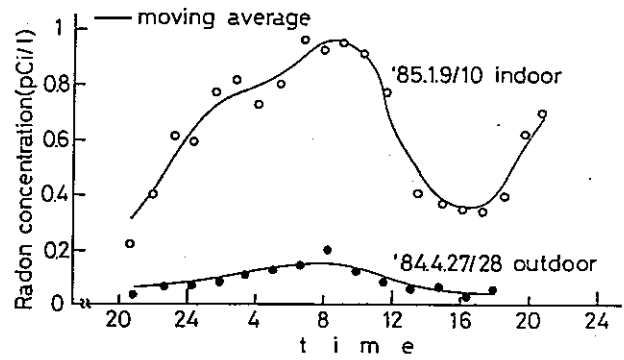


Fig. 9 Fluctuation of Radon concentration

対応できることがわかった。

4. 結 言

従来の測定法ではラドン濃度の瞬時値、もしくは非常に短い時間内の平均的な濃度しか求められなかった。またさらに検出容器の容積で事実上制約されるため、高い感度を得ることも困難であった。しかし、本装置によれば連続的な測定が可能であり、比較的長時間の、しかもあらかじめ設定することができる時間内の平均的な濃度が求められ、放射線対策上有効な数値が得られるのみならず、積算方式がとられているため測定装置の容積に比して高い感度を得られることがわかった。また測定地点を動かさない限り、測定に入手を要さぬばかりでなく、破損するおそれの多い入口側フィルタに事故が起きたとしても、 C_A チャンネルと C_C チャンネルの計数を比較することによって簡単に検出できるなど、測定の自動化を容易に達成する可能性があることも認められた。

以上から本測定方式はウラン鉱山の坑内や製錬施設のみならず、ラドン濃度が比較的高く、しかもその変動幅の大きい場所での放射線管理に極めて有効なものであると言えることができる。このような理由から現在、動力炉核燃料開発事業団東濃鉱山(岐阜県)坑内で、本方式による4系統の測定装置を試験中である。これらについては近日中に報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) J. W. Thomas and P. C. Leclare, Health phys., 18, 113 (1970).
- 2) J. Inghom, Aerosol Sci., 2, 117 (1971).
- 3) 高橋幹二, 基礎エアロゾル工学, p.52 (1972).
- 4) R. D. Cadle, Particle Size Determination, pp 289~290 (1955).
- 5) E. P. Steinberg, Interpretation of Counting Data, Appendix I, pp 61~62 (1956)

4. 3 3 回方式

(1) 基本原理

まず個別エネルギー弁別を行ない、RaA チャンネル、RaC' チャンネル、ThC' チャンネルの計数を求める。RaA チャンネルより RaA の濃度はただちに求められる。次に RaC' チャンネルの計数のうちフィルターに捕集されたときには RaA であったものの影響を差し引く。RaC' チャンネルのこの処理の後の数値はフィルターに RaB 及び RaC として捕集されたもののみによる数値となる。この処理を施した後の RaC' チャンネルの n 回目の数値を [n] などとする。RaB, RaC の崩壊定数を λb , λc とし時間間隔を T とし n 回目の RaB, RaC の濃度をそれぞれ $C b_n, C c_n$ などとすると、n 回目の計数 [n] は

$$\begin{aligned}
 [n] = & C b_n \lambda c \left[\frac{\lambda b T - (1 - \text{EXP}(-\lambda b T))}{\lambda b^2 (\lambda c - \lambda b)} \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda c T - (1 - \text{EXP}(-\lambda c T))}{\lambda c^2 (\lambda b - \lambda c)} \right] \\
 & + \sum_{k=1}^{n-1} C b_{n-k} \lambda c \left\{ \frac{(1 - \text{EXP}(-\lambda b T))^2 \text{EXP}(-\lambda b (k-1) T)}{\lambda b^2 (\lambda c - \lambda b)} \right. \\
 & \left. + \frac{(1 - \text{EXP}(-\lambda c T))^2 \text{EXP}(-\lambda c (k-1) T)}{\lambda c^2 (\lambda b - \lambda c)} \right\} \\
 & + C c_n \left\{ \frac{\lambda c T - (1 - \text{EXP}(-\lambda c T))}{\lambda c^2} \right. \\
 & \left. + \sum_{k=1}^{n-1} C c_{n-k} \frac{(1 - \text{EXP}(-\lambda c T))^2 \text{EXP}(-\lambda c (k-1) T)}{\lambda c^2} \right\} \quad (4-3-1)
 \end{aligned}$$

これに 1 回前と 2 回前の [n-1] と [n-2] の 3 つを使用して

$$[n]' = [n] - [n-1](\text{EXP}(-\lambda b T) + \text{EXP}(-\lambda c T)) + [n-2]\text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T) \quad (4-3-2)$$

という処理をして [n]' を求めると

$$\begin{aligned}
 [n]' = & C b_n \lambda c \left[\frac{\lambda b T - (1 - \text{EXP}(-\lambda b T))}{\lambda b^2 (\lambda c - \lambda b)} \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda c T - (1 - \text{EXP}(-\lambda c T))}{\lambda c^2 (\lambda b - \lambda c)} \right] \\
 & + C b_{n-1} \lambda c \left[\frac{(1 - \text{EXP}(-\lambda b T))^2}{(\text{EXP}(-\lambda b T) + \text{EXP}(-\lambda c T))(\lambda b T - (1 - \text{EXP}(-\lambda b T)))} \right. \\
 & \left. + \frac{(1 - \text{EXP}(-\lambda c T))^2}{(\text{EXP}(-\lambda b T) + \text{EXP}(-\lambda c T))(\lambda c T - (1 - \text{EXP}(-\lambda c T)))} \right] \\
 & + C b_{n-2} \lambda c \left[\frac{-(1 - \text{EXP}(-\lambda b T))^2 \text{EXP}(-\lambda c T)}{(\lambda b T - (1 - \text{EXP}(-\lambda b T)))\text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T)} \right. \\
 & \left. + \frac{-(1 - \text{EXP}(-\lambda c T))^2 \text{EXP}(-\lambda b T)}{(\lambda c T - (1 - \text{EXP}(-\lambda c T)))\text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T)} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \{-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2 \text{EXP}(-\lambda bT) \\
& + (\lambda cT - (1-\text{EXP}(-\lambda cT))) \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T)\} / \lambda c^2 (\lambda b - \lambda c) \\
& + C c^n \{ \lambda cT - (1-\text{EXP}(-\lambda cT)) \} / \lambda c^2 \\
& + C c^{n-1} \{ (1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2 \\
& - (\text{EXP}(-\lambda bT) + \text{EXP}(-\lambda cT)) (\lambda cT - (1-\text{EXP}(-\lambda cT))) \} / \lambda c^2 \\
& + C c^{n-2} \{ -(1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2 \text{EXP}(-\lambda bT) \\
& + (\lambda cT - (1-\text{EXP}(-\lambda cT))) \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T) \} / \lambda c^2 \quad (4-3-3)
\end{aligned}$$

となる。ここで注目すべきことはこの処理を行なえば (n-3) 回以前に捕集された娘核種の影響は全く消去でき n 回、(n-1) 回、(n-2) 回の 3 回分の濃度のみに依存する数値となることである。ここで n 回から (n-2) 回までの 3 回分の濃度が等しいとき、すなわち $C b_n = C b_{n-1} = C b_{n-2}$ 、 $C c_n = C c_{n-1} = C c_{n-2}$ とするとき $[n]'$ は

$$[n]' = (C b_n / \lambda b + C c_n / \lambda c) (1 - \text{EXP}(-\lambda bT)) (1 - \text{EXP}(-\lambda cT)) T \quad (4-3-4)$$

となる。(10) 式より $[n]'$ は RaB と RaC の原子の個数の和に比例する。すなわち RaB と RaC に依存する PAEC に比例するのである。よってこの $[n]'$ と RaA チャネルより求めた RaA の PAEC とを加え合わせれば全 PAEC を求めることが出来る。

さて具体的な PAEC のだしかたであるが、n 回目の RaA の PAEC を $PA(n)$ 、 RaC の PAEC を $PC(n)$ 、全 PAEC を $P(n)$ とすると

$$P(n) = PA(n) + PC(n) \quad (4-3-5)$$

ここで $PA(n)$ は RaA チャネルから求められるので $PC(n)$ について考える。(4-3-2) 式で処理した後の $[n]'$ を使用して

$$\begin{aligned}
PC(n-1) = [n]' / \{ (C b_n / \lambda b + C c_n / \lambda c) (1 - \text{EXP}(-\lambda bT)) (1 - \text{EXP}(-\lambda cT)) T \} \\
\times 1000 / 60 / (kD \times V) \quad (4-3-6)
\end{aligned}$$

という式で表わされる。ここで kD は検出効率、 V は流量 (l/min) である。でてくる PAEC の単位は平衡等価ラドン濃度 (Bq/m^3) である。ここで n 回目の計数を使用してでてくるのが n-1 回目の PAEC であるということに注意しなくてはならない。これも理由は特徴のところ述べる。

(2) 特徴

任意の時間間隔にも対応できるがある程度短い濃度変化に対応させるため通常 30 分としている。PAEC はその回の分の計数と 1 回前、2 回前の 3 回分の計数を使用して求められる。計算結果はその回と過去 2 回の 3 回分の平均の濃度となるが、(4-3-3) 式に示した各々の濃度の係数の分だけ荷重した平均の濃度である。時間間隔が 30 分の時のこの係数は表 4-3-1 に示す通りである。これより一応 3 回分の平均ではあるが主として n 回と $n-1$ 回の 2 回分の平均とみなしても差し支えないことが分かる。そういうわけで n 回目の計数 $[n]'$ から $n-1$ 回目の PAEC ができるのである。時間間隔を 30 分間で、1 回方式と同様に我々の研究室の PAEC モニターを使用して測定を行なったところ幾何効率、流量は同様に 1 mWL の時の誤差は 13 % 程度であった。時間間隔をこれより長くすると、計数は増すので誤差はこれよりも小さくなる。

表 4-3-1 (4-3-2) 式で処理した後の各々の濃度の係数 (時間間隔 30 分)

	RaB			
	$[n]$	$[n-1]$	$[n-2]$	$[n]'$
C n	101.6			101.6
C $n-1$	345.9	101.6		263.4
C $n-2$	305.3	345.9	101.6	40.9
C $n-3$	191.4	305.3	345.9	0
C $n-4$	55.3	191.4	305.3	0
	RaC			
	$[n]$	$[n-1]$	$[n-2]$	$[n]'$
C n	326.9			326.9
C $n-1$	346.4	326.9		80.9
C $n-2$	128.8	346.4	326.9	-106.5
C $n-3$	42.9	128.8	346.4	0
C $n-4$	15.1	42.9	128.8	0

(3) 補足

(4-3-2) 式に RaA の影響を差し引かず未補正の RaC' チャンネルの計数を使用した時には近似的に

$$[n]' \doteq (C_{an}/\lambda_a + C_{bn}/\lambda_b + C_{cn}/\lambda_c)(1 - \text{EXP}(-\lambda_b T))(1 - \text{EXP}(-\lambda_c T))T \quad (4-3-7)$$

となる。(4-3-7) 式は時間間隔 T がある程度長いときに成立する。それは RaA の崩壊定数 λ_a が λ_b, λ_c より 1桁大きいためである。ここで $[n]'$ は RaA と RaB と RaC の原子の個数に比例するので各娘核種の RaC' の α 線による PAEC に比例する。また RaA チャンネルの計数についても (4-3-2) 式によ

$$[n, A]' \doteq C_{an}(1 - \text{EXP}(-\lambda_b T))(1 - \text{EXP}(-\lambda_c T))T/\lambda_a \quad (4-3-8)$$

となる。これも上述の理由から近似的に成立する。(4-3-8) 式は RaA の原子数に比例する。時間間隔を 1 時間としたときに以上のことをふまえると RaA チャンネルに対する計数効率と RaC' チャンネルに対するその比を RaA と RaC' の放出する α 線のエネルギー比 0.78 倍するように波高選別をすれば個別エネルギー弁別をしないで 1 つの波高選別レベルを設定するだけですます方法も可能である。ただこれはこの次に述べる 4 回方式の 3 回方式における近似であるので正確に処理を行なう場合は、次の 4 回方式によらねばならない。

4. 4 4 回方式

(1) 基本原理

3 回方式と同様に個別エネルギー弁別を行ない RaA チャンネル、 RaC' チャンネル、 ThC' チャンネルの計数を求める。 n 回目の RaA チャンネルの計数を [n,A] などとし RaA の崩壊定数を λ_a 、時間間隔を T とし、 n 回目の RaA の濃度を C_{an} などとしたときに [n,A] は

$$[n,A] = C_{an} \left\{ \lambda_a T - (1 - \text{EXP}(-\lambda_a T)) \right\} / \lambda_a^2 + \sum_{k=1}^{n-1} C_{an-k} (1 - \text{EXP}(-\lambda_a T))^k \text{EXP}(-\lambda_a (k-1)T) / \lambda_a^2 \quad (4-4-1)$$

である。この [n,A] と n-1 回目の [n-1,A] を使用して

$$[n,A]' = [n,A] - [n-1,A] \text{EXP}(-\lambda_a T) \quad (4-4-2)$$

という処理をして [n,A]' を求めると

$$[n,A]' = C_{an} \left\{ \lambda_a T - (1 - \text{EXP}(-\lambda_a T)) \right\} / \lambda_a^2 + C_{an-1} \left\{ (1 - \text{EXP}(-\lambda_a T))^2 - (\lambda_a T - (1 - \text{EXP}(-\lambda_a T))) \right\} / \lambda_a^2 \quad (4-4-3)$$

となる。ここでもこの処理後には n-2 回以前に捕集された RaA の影響は全く消去でき n 回、 n-1 回の 2 回分の濃度のみ依存する数値となる。時間間隔を 20 分以上としたときにこの各々の係数を比較すると、 C_{an} の係数の方が C_{an-1} の係数より大となるのでこの処理より RaA の濃度を算出して差し支えないと考えられる。この方法を使用することのメリットは過去に捕集された RaA の影響を何回か前までも考慮しなくても良いことである。

次に RaC' チャンネルの処理であるが、 n 回目の RaC' チャンネルの計数を [n,C] などとし、濃度、崩壊定数は今まで使用していた表記を用いると [n,C] は

$$[n,C] = C_{an} \lambda_b \lambda_c \left[\left\{ \lambda_a T - (1 - \text{EXP}(-\lambda_a T)) \right\} / \lambda_a^2 (\lambda_b - \lambda_a) (\lambda_c - \lambda_a) + \left\{ \lambda_b T - (1 - \text{EXP}(-\lambda_b T)) \right\} / \lambda_b^2 (\lambda_a - \lambda_b) (\lambda_c - \lambda_b) + \left\{ \lambda_c T - (1 - \text{EXP}(-\lambda_c T)) \right\} / \lambda_c^2 (\lambda_a - \lambda_c) (\lambda_b - \lambda_c) \right]$$

$$\begin{aligned}
& n-1 \\
& + \sum_{k=1} C a n-k \lambda b \lambda c \{ (1-\text{EXP}(-\lambda a T))^{\pm} \text{EXP}(-\lambda a(k-1)T) \\
& \quad / \lambda a^{\pm} (\lambda b - \lambda a) (\lambda c - \lambda a) \\
& \quad + (1-\text{EXP}(-\lambda b T))^{\pm} \text{EXP}(-\lambda b(k-1)T) \\
& \quad / \lambda b^{\pm} (\lambda a - \lambda b) (\lambda c - \lambda b) \\
& \quad + (1-\text{EXP}(-\lambda c T))^{\pm} \text{EXP}(-\lambda c(k-1)T) \\
& \quad / \lambda c^{\pm} (\lambda a - \lambda c) (\lambda b - \lambda c) \} \\
& + C b n \lambda c [\{ \lambda b T - (1-\text{EXP}(-\lambda b T)) \} / \lambda b^{\pm} (\lambda c - \lambda b) \\
& \quad + \{ \lambda c T - (1-\text{EXP}(-\lambda c T)) \} / \lambda c^{\pm} (\lambda b - \lambda c)] \\
& n-1 \\
& + \sum_{k=1} C b n-k \lambda c \{ (1-\text{EXP}(-\lambda b T))^{\pm} \text{EXP}(-\lambda b(k-1)T) / \lambda b^{\pm} (\lambda c - \lambda b) \\
& \quad + (1-\text{EXP}(-\lambda c T))^{\pm} \text{EXP}(-\lambda c(k-1)T) / \lambda c^{\pm} (\lambda b - \lambda c) \} \\
& + C c n \{ \lambda c - (1-\text{EXP}(-\lambda c T)) \} / \lambda c^{\pm} \\
& n-1 \\
& + \sum_{k=1} C c n-k (1-\text{EXP}(-\lambda c T))^{\pm} \text{EXP}(-\lambda c(k-1)T) / \lambda c^{\pm} \quad (4-4-4) \\
& k=1
\end{aligned}$$

となる。これと $[n-1, C]$, $[n-2, C]$, $[n-3, C]$ の 4 つの計数を使用して

$$\begin{aligned}
[n, C]' &= [n, C] - [n-1, C] (\text{EXP}(-\lambda a T) + \text{EXP}(-\lambda b T) + \text{EXP}(-\lambda c T)) \\
& + [n-2, C] (\text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b) T) + \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c) T) + \text{EXP}(-(\lambda c + \lambda a) T)) \\
& - [n-3, C] \text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b + \lambda c) T) \quad (4-4-5)
\end{aligned}$$

という処理をして $[n, C]'$ を求める。 $[n, C]'$ は

$$\begin{aligned}
[n, C]' &= C a n \lambda b \lambda c \{ \{ \lambda a T - (1-\text{EXP}(-\lambda a T)) \} / \{ \lambda a^{\pm} (\lambda b - \lambda a) (\lambda c - \lambda a) \} \\
& \quad \{ \lambda b T - (1-\text{EXP}(-\lambda b T)) \} / \{ \lambda b^{\pm} (\lambda a - \lambda b) (\lambda c - \lambda b) \} \\
& \quad \{ \lambda c T - (1-\text{EXP}(-\lambda c T)) \} / \{ \lambda c^{\pm} (\lambda a - \lambda c) (\lambda b - \lambda c) \} \} \\
& + C a n-1 \lambda b \lambda c [\{ 1-\text{EXP}(-\lambda a T) \}^{\pm} \\
& \quad - (\text{EXP}(-\lambda a T) + \text{EXP}(-\lambda b T) + \text{EXP}(-\lambda c T)) (\lambda a T - (1-\text{EXP}(-\lambda a T))) \} \\
& \quad / \{ \lambda a^{\pm} (\lambda b - \lambda a) (\lambda c - \lambda a) \} \\
& \quad + \{ 1-\text{EXP}(-\lambda b T) \}^{\pm} \\
& \quad - (\text{EXP}(-\lambda a T) + \text{EXP}(-\lambda b T) + \text{EXP}(-\lambda c T)) (\lambda b T - (1-\text{EXP}(-\lambda b T))) \} \\
& \quad / \{ \lambda b^{\pm} (\lambda a - \lambda b) (\lambda c - \lambda b) \} \\
& \quad + \{ 1-\text{EXP}(-\lambda c T) \}^{\pm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -(\text{EXP}(-\lambda aT) + \text{EXP}(-\lambda bT) + \text{EXP}(-\lambda cT))(\lambda cT - (1 - \text{EXP}(\lambda cT)))\} \\
& / \{ \lambda c^2 (\lambda a - \lambda c)(\lambda b - \lambda c) \}] \\
+ C_{an-2} & \lambda b \lambda c [\{ (1 - \text{EXP}(-\lambda aT))^2 (\text{EXP}(-\lambda bT) + \text{EXP}(-\lambda cT)) \\
& + (\lambda aT - (1 - \text{EXP}(-\lambda aT))) \\
& \times (\text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b)T) + \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T) + \text{EXP}(-(\lambda c + \lambda a)T)) \} \\
& / \{ \lambda a^2 (\lambda b - \lambda a)(\lambda c - \lambda a) \} \\
& + \{ (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))^2 (\text{EXP}(-\lambda cT) + \text{EXP}(-\lambda aT)) \\
& + (\lambda bT - (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))) \\
& \times (\text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b)T) + \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T) + \text{EXP}(-(\lambda c + \lambda a)T)) \} \\
& / \{ \lambda b^2 (\lambda a - \lambda b)(\lambda c - \lambda b) \} \\
& + \{ (1 - \text{EXP}(-\lambda cT))^2 (\text{EXP}(-\lambda aT) + \text{EXP}(-\lambda bT)) \\
& + (\lambda cT - (1 - \text{EXP}(-\lambda cT))) \\
& \times (\text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b)T) + \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T) + \text{EXP}(-(\lambda c + \lambda a)T)) \} \\
& / \{ \lambda c^2 (\lambda a - \lambda c)(\lambda b - \lambda c) \}] \\
+ C_{an-3} & \lambda b \lambda c [\{ (1 - \text{EXP}(-\lambda aT))^2 \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T) \\
& - (\lambda aT - (1 - \text{EXP}(-\lambda aT))) \text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b + \lambda c)T) \} \\
& / \{ \lambda a^2 (\lambda b - \lambda a)(\lambda c - \lambda a) \} \\
& + \{ (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))^2 \text{EXP}(-(\lambda c + \lambda a)T) \\
& - (\lambda bT - (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))) \text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b + \lambda c)T) \} \\
& / \{ \lambda b^2 (\lambda a - \lambda b)(\lambda c - \lambda b) \} \\
& + \{ (1 - \text{EXP}(-\lambda cT))^2 \text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b)T) \\
& - (\lambda cT - (1 - \text{EXP}(-\lambda cT))) \text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b + \lambda c)T) \} \\
& / \{ \lambda c^2 (\lambda a - \lambda c)(\lambda b - \lambda c) \}] \\
+ C_{bn} & \lambda c [\{ \lambda bT - (1 - \text{EXP}(-\lambda bT)) \} / \{ \lambda b^2 (\lambda c - \lambda b) \} \\
& + \{ \lambda cT - (1 - \text{EXP}(-\lambda cT)) \} / \{ \lambda c^2 (\lambda b - \lambda c) \}] \\
+ C_{bn-1} & \lambda c [\{ (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))^2 \\
& - (\text{EXP}(-\lambda aT) + \text{EXP}(-\lambda bT) + \text{EXP}(-\lambda cT))(\lambda bT - (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))) \} \\
& / \{ \lambda b^2 (\lambda c - \lambda b) \} \\
& + \{ (1 - \text{EXP}(-\lambda cT))^2 \\
& - (\text{EXP}(-\lambda aT) + \text{EXP}(-\lambda bT) + \text{EXP}(-\lambda cT))(\lambda cT - (1 - \text{EXP}(-\lambda cT))) \} \\
& / \{ \lambda c^2 (\lambda b - \lambda c) \}] \\
+ C_{bn-2} & \lambda c [\{ (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))^2 (\text{EXP}(-\lambda aT) + \text{EXP}(-\lambda cT)) \\
& + (\lambda bT - (1 - \text{EXP}(-\lambda bT))) \\
& \times (\text{EXP}(-(\lambda a + \lambda b)T) + \text{EXP}(-(\lambda b + \lambda c)T) + \text{EXP}(-(\lambda c + \lambda a)T)) \} \\
& / \{ \lambda b^2 (\lambda c - \lambda b) \}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\{-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2(\text{EXP}(-\lambda aT)+\text{EXP}(-\lambda bT)) \\
& \quad +(\lambda cT-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))) \\
& \quad \times (\text{EXP}(-(\lambda a+\lambda b)T)+\text{EXP}(-(\lambda b+\lambda c)T)+\text{EXP}(-(\lambda c+\lambda a)T))\} \\
& \quad / \{\lambda c^2(\lambda b-\lambda c)\} \\
& +C_{bn-3} \lambda c [\{(1-\text{EXP}(-\lambda bT))^2 \text{EXP}(-(\lambda a+\lambda c)T) \\
& \quad -(\lambda bT-(1-\text{EXP}(-\lambda bT))) \text{EXP}(-(\lambda a+\lambda b+\lambda c)T)\} \\
& \quad / \{\lambda b^2(\lambda c-\lambda b)\} \\
& \quad +\{(1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2 \text{EXP}(-(\lambda a+\lambda b)T) \\
& \quad -(\lambda cT-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))) \text{EXP}(-(\lambda a+\lambda b+\lambda c)T)\} \\
& \quad / \{\lambda c^2(\lambda b-\lambda c)\}] \\
& +C_{cn} [\{\lambda cT-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))\} / \lambda c^2] \\
& +C_{cn-1} [\{(1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2 \\
& \quad -(\text{EXP}(-\lambda aT)+\text{EXP}(-\lambda bT)+\text{EXP}(-\lambda cT))(\lambda cT-(1-\text{EXP}(-\lambda cT)))\} / \lambda c^2] \\
& +C_{cn-2} [\{-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2(\text{EXP}(-\lambda aT)+\text{EXP}(-\lambda bT)) \\
& \quad +(\lambda cT-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))) \\
& \quad \times (\text{EXP}(-(\lambda a+\lambda b)T)+\text{EXP}(-(\lambda b+\lambda c)T)+\text{EXP}(-(\lambda c+\lambda a)T))\} / \lambda c^2] \\
& +C_{cn-3} [\{(1-\text{EXP}(-\lambda cT))^2 \text{EXP}(-(\lambda a+\lambda b)T) \\
& \quad -(\lambda cT-(1-\text{EXP}(-\lambda cT))) \text{EXP}(-(\lambda a+\lambda b+\lambda c)T)\} / \lambda c^2] \\
\end{aligned}
\tag{4-4-6}$$

という長い式になる。ここでも 3 回方式と同様にこの処理の後には n-4 回以前に捕集された娘核種の影響は全く消去でき、n 回、n-1 回、n-2 回、n-3 回の 4 回分の濃度のみ依存する数値となる。ここで n 回から n-3 回までの濃度を等しいとしたときに、すなわち $C_{an}=C_{an-1}=C_{an-2}=C_{an-3}$ 、 $C_{bn}=C_{bn-1}=C_{bn-2}=C_{bn-3}$ 、 $C_{cn}=C_{cn-1}=C_{cn-2}=C_{cn-3}$ とすると $[n,C]'$ は

$$\begin{aligned}
[n,C]' &= (C_{an}/\lambda a + C_{bn}/\lambda b + C_{cn}/\lambda c) \\
& \quad \times (1-\text{EXP}(-\lambda aT))(1-\text{EXP}(-\lambda bT))(1-\text{EXP}(-\lambda cT))T \tag{4-4-7}
\end{aligned}$$

となる。これより $[n,C]'$ は R_{aA} 、 R_{aB} 、 R_{aC} の原子の個数の和に比例することが分かる。すなわちこれは R_{aC}' の放出する 7.687 MeV の α 線による分の PAEC に比例する。よってこの $[n,C]'$ と R_{aA} チャネルから求められる R_{aA} の 6.00 MeV の α 線による分の PAEC の和をとり全 PAEC を求める。

さて具体的な PAEC のだしかたであるが、n 回目の R_{aA} の α 線による PAEC を $PA(n)$ 、 R_{aC}' の α 線による PAEC を $PC(n)$ 、全 PAEC を $P(n)$ とすると

$$P(n)=PA(n)+PC(n)$$

(4-4-8)

ここでの PA(n) と PC(n) は 3 回方式の時の PA(n) と PC(n) とは異なることに注意しなくてはならない。まず PA(n) については (4-4-2) 式で処理した後の [n,A]' を使用して

$$PA(n)=[n,A]' / ((1-EXP(-\lambda aT))T / \lambda a) \times 1000 / 60 / (kD \times V) \times 0.046487$$

(4-4-9)

という式で表わされる。ここで kD は検出効率、V は流量 (ℓ/min) である。でてくる PAEC の単位は平衡等価ラドン濃度 (Bq/m³) である。最後の 0.046487 という数値は RaA の濃度を平衡等価ラドン濃度になおす係数 0.10602 に RaA の α 線の影響だけにするために 6.00/(6.00+7.68) という数値すなわち RaA の α 線のエネルギーを RaA と RaC' の α 線のエネルギーの和で割ったものに乗じてでてきた数値である。

次に PC(n) についてであるが、(4-4-5) 式で処理した後の [n,C]' を使用して

$$PC(n-1)=[n,C]' / \{ (C_{an} / \lambda a + C_{bn} / \lambda b + C_{cn} / \lambda c) \times (1-EXP(-\lambda aT))(1-EXP(-\lambda bT))(1-EXP(-\lambda cT))T \}$$

$$\times 1000 / 60 / (kD \times V)$$

(4-4-10)

という式で表わされる。ここで kD は検出効率、V は流量 (ℓ/min) である。でてくる PAEC の単位は平衡等価ラドン濃度 (Bq/m³) である。ここで n 回目の計数を使用してでてくるのが n-1 回目の PAEC であるということに注意しなくてはならない。これも理由は特徴のところ述べる。

(2) 特徴

どのような時間間隔に対しても対応は可能であるがやはり濃度変化にも対応できるように 20 分あるいは 30 分以上が望ましい。今回はここまで短くできるということで 20 分としてみた。PAEC はその回と 1 回前、2 回前、3 回前の 4 回分の計数を使用して計算をする。結果としてはその回と過去 3 回の 4 回分の平均の PAEC 濃度となるが (4-4-6) 式の各々の濃度の係数の分だけ荷重のかかった平均となる。20 分の時のこの係数は表 4-4-1 に示す通りである。これより一応 4 回分の平均ではあるが主として n 回と n-1 回の 2

回分の平均とみなしても差し支えないと考えられる。3 回方式と比べるとこの方式の方が RaA の処理が簡単である。時間間隔を 20 分間で、1 回方式と同様に我々の研究室の PAEC モニターを使用して測定を行なったところ幾何効率、流量は同様に 1 mWL の時の誤差は 20 % 程度であった。

表 4-3-1 (4-4-6) 式で処理した後の各々の濃度の係数 (時間間隔 20 分)

RaA					
	[n]	[n-1]	[n-2]	[n-3]	[n]'
C n	2.3				2.3
C n-1	14.0	2.3			11.4
C n-2	18.9	14.0	2.3		4.2
C n-3	16.7	18.9	14.0	2.3	0.09
C n-4	12.6	16.7	18.9	14.0	0
C n-5	8.9	12.6	16.7	18.9	0
RaB					
	[n]	[n-1]	[n-2]	[n-3]	[n]'
C n	34.6				34.6
C n-1	141.1	34.6			102.8
C n-2	163.0	141.1	34.6		17.7
C n-3	136.5	163.0	141.1	34.6	-0.21
C n-4	100.9	136.5	163.0	141.1	0
C n-5	69.9	100.9	136.5	163.0	0

	RaC				
	[n]	[n-1]	[n-2]	[n-3]	[n]'
C n	160.6				160.6
C n-1	207.5	160.6			29.8
C n-2	103.4	207.5	160.6		-76.4
C n-3	51.5	103.4	207.5	160.6	0.88
C n-4	25.7	51.5	103.4	207.5	0
C n-5	12.8	25.7	51.5	103.4	0

はれる。PAECの時間的変動を見ると夜明のみならず午後7~8時の間にもピークが見られる。この間の気象データの気温差は0であり弱い気温の逆転層が見られるのでラドン濃度変化の指標としての気温差がこの地帯もカバーしていることが確かめられた。平衡係数は昼間大略0.2~0.1である。特に外的に10月30日19時のラドン濃度が極端に下がったため平衡係数は大きくなったがThC補正の影響のように思われる。ThCの計数が増加するとRaA channelの計数を混合しているThCの計数(両者のエネルギーが非常に接近しているため)を推定し差を小さくするためRaAの計数が低くなるためである。

以上から捨石堆積場の平衡係数は昼夜の差は殆んどなく0.1もしくはそれ以下であり、一方表土堆積場のよって一般環境に近い環境では昼間は0.8~0.7であり夜間は0.6~0.4の範囲にあることがわかった。

ラドン濃度の変化と高度差8.5mにおける気温差は極めて顕著であり今後これが指標の一つになり得ると思える。任意の地帯で測定し得る気温差は高度差で3m程度に対する数値であり測定は可能である。あつても大気の安定性の指標となし得るか否かは検討を要する。

また空中電場の影響を調査する予定であったが測定予定地帯の頭上に高圧線が通っておりその交流が誘導されたため準備した測定器は使用できなかった。現在準備した装置で測定可能なならば再度検討したいと考えている。

ラドン濃度と風向の間に関係があるように思われるが地表風のデータではないため解析上多少問題が残った。この場合の風向は大気の安定性と直接関係しているように思われる。本来必要なデータは地上風でラドンを含んだ空気の移動量の評価を行う考えであった。今後考慮しなければならぬ点である。

6. 結言

本研究の直接的で主要な目的は 現在問題とされている 捨石堆積場、長期間測定は平均ラドン濃度と平衡等価ラドン濃度 (ECRN) との関係 (平衡係数) の推定である。これについて、人形峠事業所ヒューリーナク場と同夜次東での測定値から求められた推定値には時刻に関する因子はなく 調査期間を通じて 0.1 以下であった。従ってこれらの測定値と類似の構造の堆積場であれば PAEC もしくは ECRN は平均ラドン濃度の 0.1 倍を超えぬと考えることが出来る。しかしながら 測定対象となる空間に他の空間から流入するラドンの量とその地質でのラドン湧出量とのバランスによって この数値は変動する。殊に前者が多い場合には 平衡係数は大きくなり しかも 時刻の因子が加わるようになる。その代表的パターンを示している例が 同巻土堆積場での測定値で 0.5~0.7 を示している。従って 平衡係数の推定を行うのであれば 上記のどの形に属するのかを何等かの測定による推定は行わなければならない。これについては後述する。

或る環境での被曝量評価を考慮して ラドンに係わる環境の評価のためには 次の濃度の測定が必要である。その第1は PAEC (ECRN) である。PAEC については 全粒核種の PAEC とその free 成分の PAEC の両者が必要である。第2は ラドン濃度であり 第3は PAEC 測定時における RaA 濃度である。この理由を以下に述べる。

全粒核種 (ラドンモニタにも同じであり これを弁別して測定するべき原則である。) の PAEC は被曝量評価の primitive な基本であり 直接的には ラドン濃度より重要な量である。このうち free 成分は呼吸と共に吸入された時の呼吸器管内の付着量や分布は 非付着成分とは著しく異なることは良く知られている。従って別に評価されるべき量である。さらには 非付着成分である RaA と同様の RaB および RaC とは 僅かではあるが 粒径分布を異にし 呼吸器内の付着部位が多少違はかりでなく RaA と RaC の放出する α 線のエネルギーが異なるため 基底細胞に与えるエネルギーは両者の和とは異なるため 本来分離して評価すべき量である。一方 ラドンは親元素であり 或る空間での空気条件による PAEC の変化を推定する上で 重要な量であるばかりでなく、平衡係数が 0.1 以下 殊に 0.05 以下の場合は 被曝量評価に組み入れるべき量である。(ラドン濃度の 0.01 倍を PAEC = ECRN に加算する)

一方 PAEC の評価法には ラドン粒核種の個別濃度から評価する方法と 直接 PAEC を求める方法とがある。後者の方法については 本報告にも述べられている。これについては 次のように考えている。

ラドン粒核種の個別濃度は ラドンとその粒核種との不平衡状態を表しているばかりでなく、二種類以上のラドンを含む空気の混合状態の指標になるものと思はれる。通常測定される粒核種は 比較的

放射平衡状態に近いが濃度はそれぞれ高くない娘核種群と RaA の存在比のみが高くその濃度が高い娘核種群の混合と考えられ、そのため合成された娘核種の存在比は RaA が顕著に高く RaB と RaC は比較的近い値をとる。同一の測定点では RaA の濃度が低くなるに従い RaB と RaC の濃度比は 1:1 に近づく。これは局部的に生成したラジンの娘核種の大部分は RaA で RaB と RaC を殆んど含まないが、それに付加されるラジンの娘核種の RaB と RaC は同様のメカニズム (混合のメカニズム) が繰返されるため 1:1 に近くなり大略 1:0.9 ~ 1:0.7 の範囲になることが多い。従って同一測定点で何回か測定された測定値を整理し検討すればこの混合比を推定することは可能である。この推定は必ずしも娘核種の個別濃度を導くことも RaA の濃度と RaB と RaC の PAEC から推定できる。前者の個別濃度の連続測定は不可能ではないが測定系が可動部分(カ)を含んだ装置になるばかりでなく感度を高くする中から容量の大きな採取装置(ポンプ)を準備することになるため軽量化し難くまた高価でもある。しかし後者の装置は可動部分を殆んど含まず採取速度も比較的速くする中から軽量化が可能で比較的安価ではなない。しかし RaB と RaC の比を直接求められないため 1 日以上連続測定を行いその濃度変化から推定するか補助的な娘核種個別濃度を 2-3 回並行に行う必要がある。この場合 RaA の濃度が重要であって単にラジン濃度と PAEC のみからでは平衡係数は求められてもラジン娘核種の平衡状態を推定することはできない。

このような状況は長時間の積算型の PAEC モーターでも同様である。通常この種の PAEC モーターは質量や水の制限から単に PAEC のみを表示する場合が多いが環境用に使うのであれば RaA 濃度を別に測定する必要がある。さらに環境での PAEC から人が受けている被曝量評価を求める目的があれば勿論であるが本報告からも明らかのように PAEC の時間的変化も顕著なので長時間の平均値では不十分である。人の被曝量のみならず対象となる個人が携行すれば良いが環境値の測定も含めれば 8 時間(1/3 日) ~ 12 時間(1/2 日)の積算値が求められなければならない。このような性能で独立した電源で動作するモーターがあれば(積算型の)連続型のモーターと組み合わせることによって多くの測定点でより有効な測定値を得ることができ問題となる点の詳細で立体的な解析が可能になるであろう。

当研究室で開発し製作した PAEC 連続モーターは基本的に RaA 濃度と RaB と RaC の PAEC とを別々に求め RaA 濃度を PAEC に変換した後両者を合算して全 PAEC を求めている。従って前述の種々の目的に使用し得るものと考えられる。本報告の PAEC や RaA 濃度はこの装置を使用し前述した意味から両者をデータに加えて、free 成分の連続測定もフィルターをメタルスクリーンに変更するだけで可能であるが

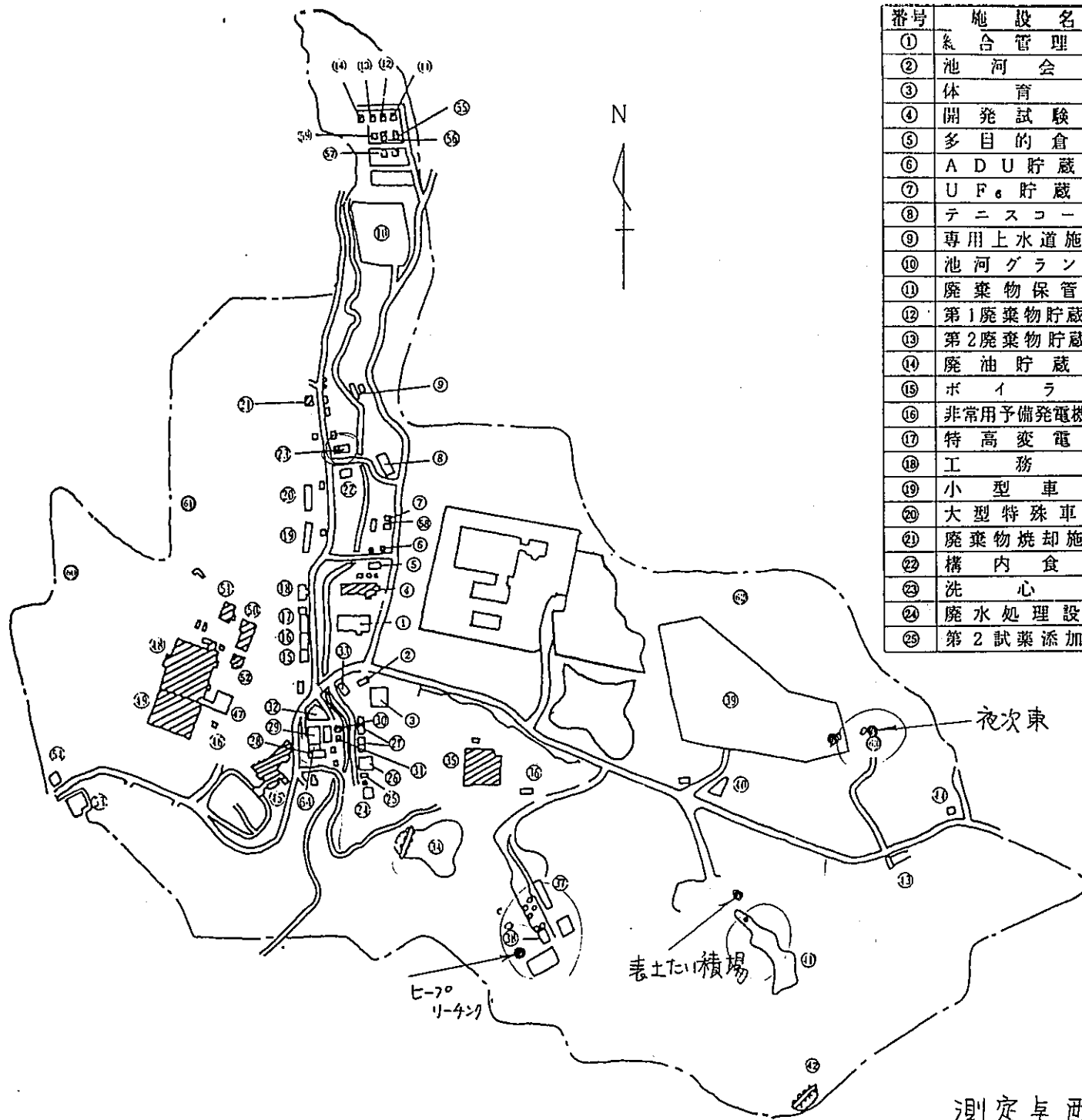
必要な台数を準備する余裕と時間がなく free 成分を測定対象から除外した。

前述の考えのもとに当研究室は次のような測定装置を製作中である。それは同一空気試料においてフィン核種の free 成分 (R_{aA} と $R_{aB}+R_{aC}$ の 2 成分の PAEC とし表示する), free 成分以外の全核種の PAEC (R_{aA} , $R_{aB}+R_{aC}$ および $T_{hB}+T_{hC}$ の 3 種の PAEC とし表示する) およびフィンとロン濃度 (フィンは R_{aA} と R_{aC} の activity より 2 種, ロンは T_{hA} と T_{hC} の activity より 2 種の計算法で求める) を測定する装置である。この装置は中部事業所で使用している装置の改良型と見なすことができる。同一空気を対象として測定するため試料差がなく信頼し得る値が得られる。この装置は野外での使用を考慮 battery でも作動するように構成されさらに各データより測定と同時に on line で濃度計算値が得られるようにする予定である。この装置が稼働すれば極めて有効なデータの収集が可能であるが当研究室で組み立てるとしても 300 万円以上の費用を要するものと思われている。

一方 PAEC 積算型モニターについても当研究室で「硝酸セルロース」を利用した測定装置を完成した。このモニターは 8 時間の積算で R_{aA} 濃度で 5.8 Bq/m^3 ($\pm 50\%$), フィンの EC_{RN} で 0.45 Bq/m^3 ($\pm 50\%$), ロンの EC_{TN} で 0.027 Bq/m^3 ($\pm 50\%$) まで求めることが可能である。6 本の Ni-Cd 電池 (単一型) を使用し 1.2ℓ/分の流速で 10 時間 (実用上 8 時間で打ち切り) 作動するように設計した。単一型とは云え 6 本の電池はやや重く携帯には必ずしも適当とは言えないが野外に設置するのならば全く問題はない。適当なタイマー (装置 3 台を) と組み合わせれば 24 時間を 3 分割に PAEC 評価が可能でありさらに大型の battery と組み合わせれば同一時間帯について何日分 (3 日分程度) かの積算値が求められる。

以上述べてのように平成 3 年度の測定値から平衡係数と評価対象との関係やその特徴およびフィン濃度や PAEC の時間的変動パターン等には関連する気象条件など非常に重要な結論が導かれ、これらには信頼性のある安全評価や環境評価のための資料が得られたと考えている。

終りに長期間の測定にわたり種々の面で的人身事業所の関係者のサポートを感謝する。



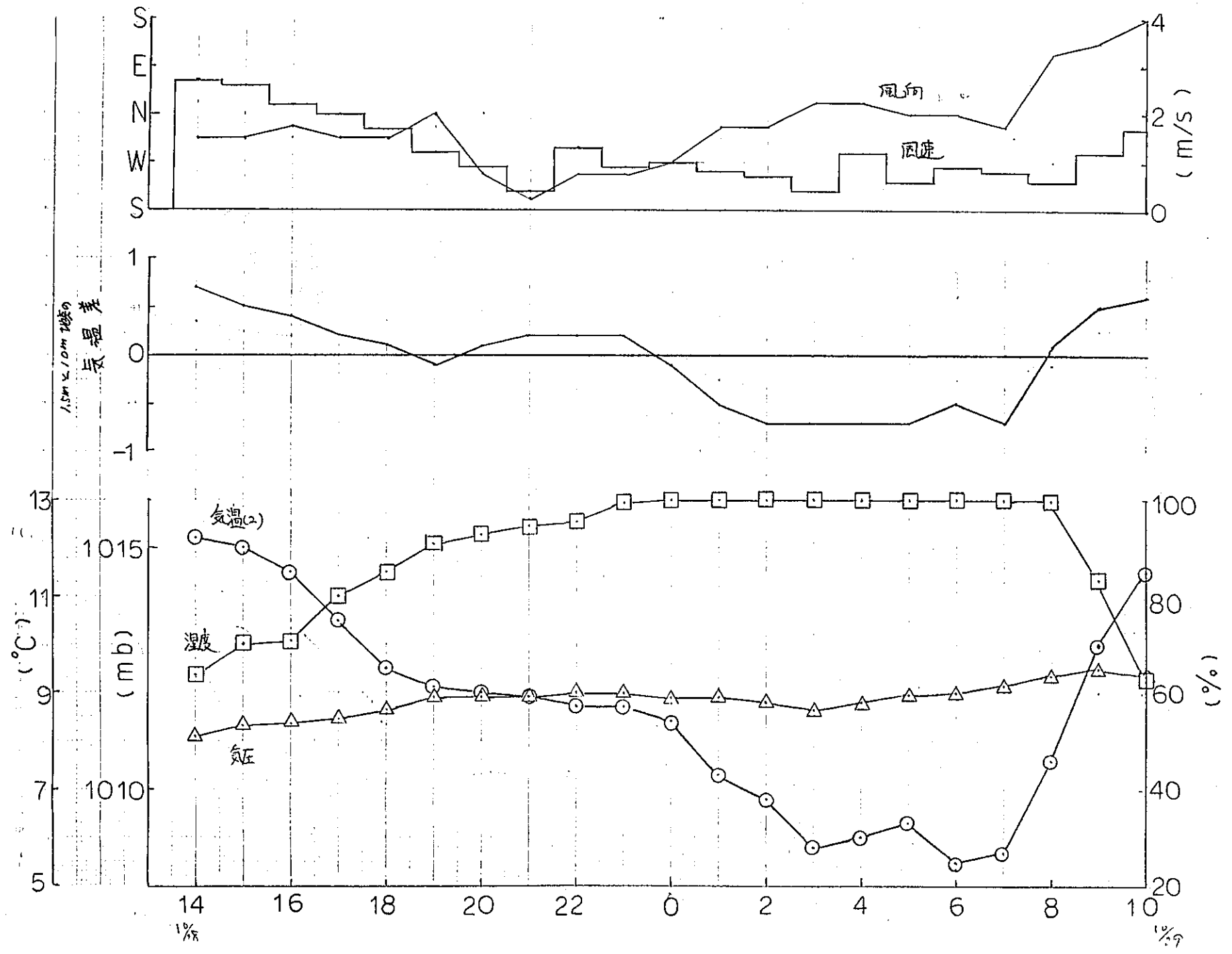
番号	施設名	番号	施設名	番号	施設名
①	総合管理棟	⑳	第4.第5沈殿池	㉕	第2ウラン貯蔵庫
②	池河会館	㉑	サンドフィルタ	㉖	廃水処理棟
③	体育館	㉒	第1沈殿池	㉗	展示館
④	開発試験棟	㉓	第2沈殿池	㉘	正門警備所
⑤	多目的倉庫	㉔	サンドフィルタ	㉙	第3廃棄物貯蔵庫
⑥	A D U貯蔵庫	㉕	生活排水処理設備	㉚	第4廃棄物貯蔵庫
⑦	U F。貯蔵庫	㉖	第1放流水槽	㉛	第5廃棄物貯蔵庫
⑧	テニスコート	㉗	第2放流水槽	㉜	洗濯場
⑨	専用上水道施設	㉘	夜次鉱さいたい積場	㉝	第6廃棄物貯蔵庫
⑩	池河グラウンド	㉙	製錬転換施設	㉞	峠4号坑捨石たい積場
⑪	廃棄物保管庫	㉚	製錬警備所	㉟	峠5号坑捨石たい積場
⑫	第1廃棄物貯蔵庫	㉛	浸出槽	㊱	夜次1号坑捨石たい積場
⑬	第2廃棄物貯蔵庫	㉜	第1イオン交換施設	㊲	夜次北1号坑捨石たい積場
⑭	廃油貯蔵庫	㉝	夜次露天採掘場跡	㊳	第1試薬添加室
⑮	ボイラ室	㉞	夜次1号沈殿池		
⑯	非常用予備発電機室	㉟	夜次露天採掘表土たい積場		
⑰	特高変電室	㊱	夜次2号えん堤		
⑱	工務棟	㊲	夜次1号えん堤		
⑳	小型車庫	㊳	東門警備所		
㉑	大型特殊車庫	㊴	製錬施設		
㉒	廃棄物焼却施設	㊵	P P 警備所		
㉓	構内食堂	㊶	技術管理棟		
㉔	洗心館	㊷	O P - 1 主棟		
㉕	廃水処理設備	㊸	O P - 2 主棟		
㉖	第2試薬添加室	㊹	第1ウラン貯蔵庫		

凡 例

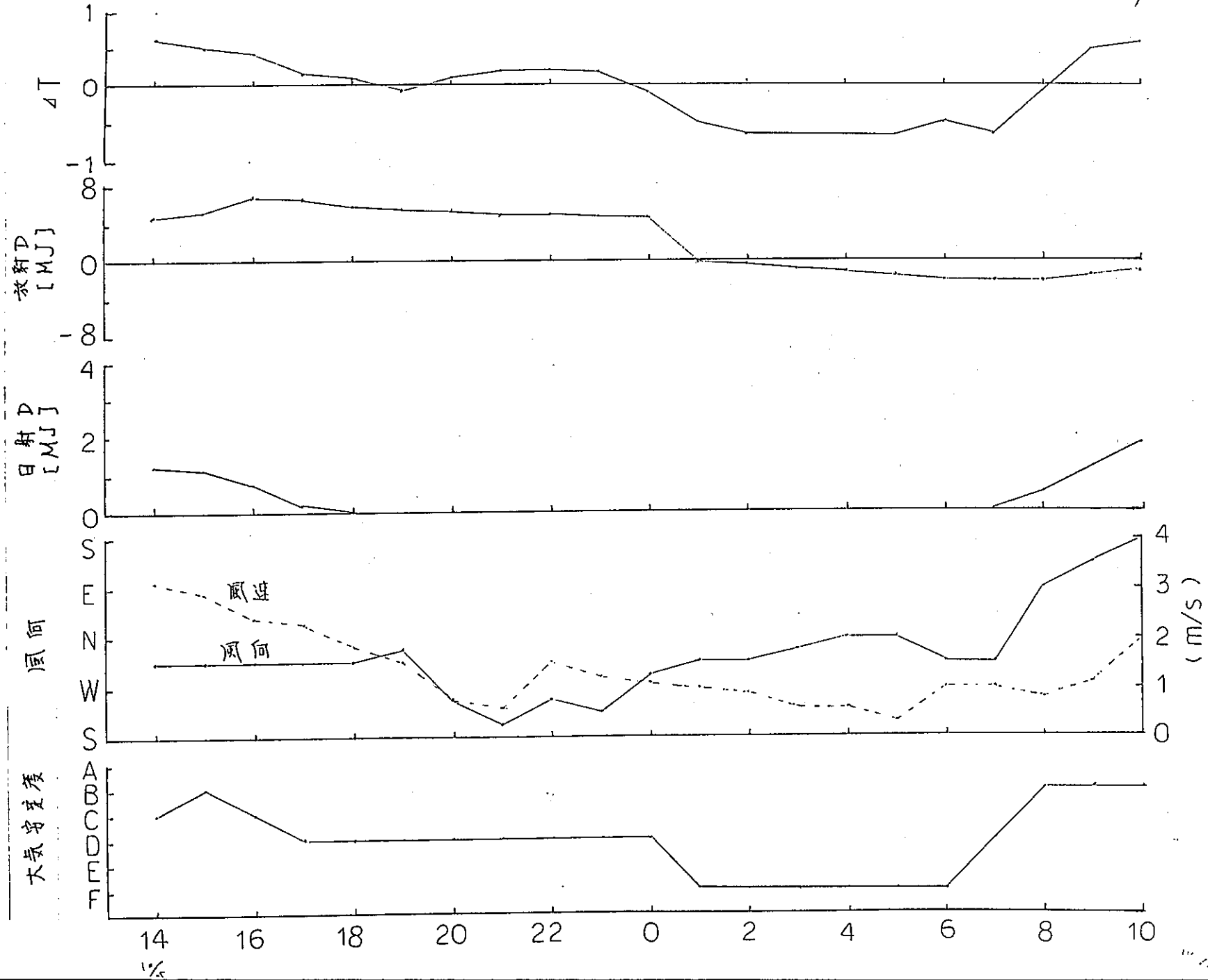
○ 人形峠鉱山周辺監視区域

▨ 管理区域

◎ 表中番号の二重丸は鉱さい又は捨石たい積場を示す。

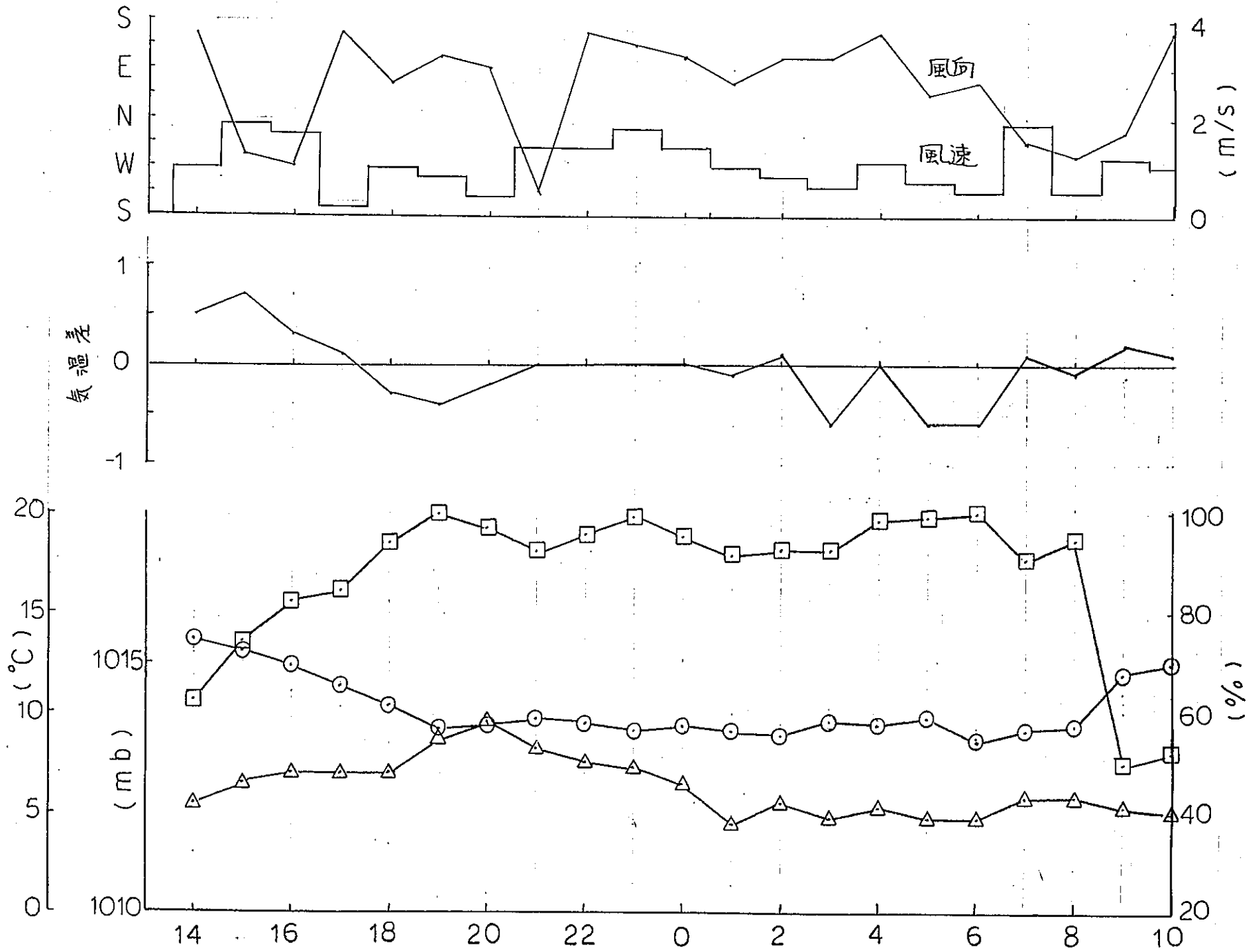


DP. 10.28~10.29

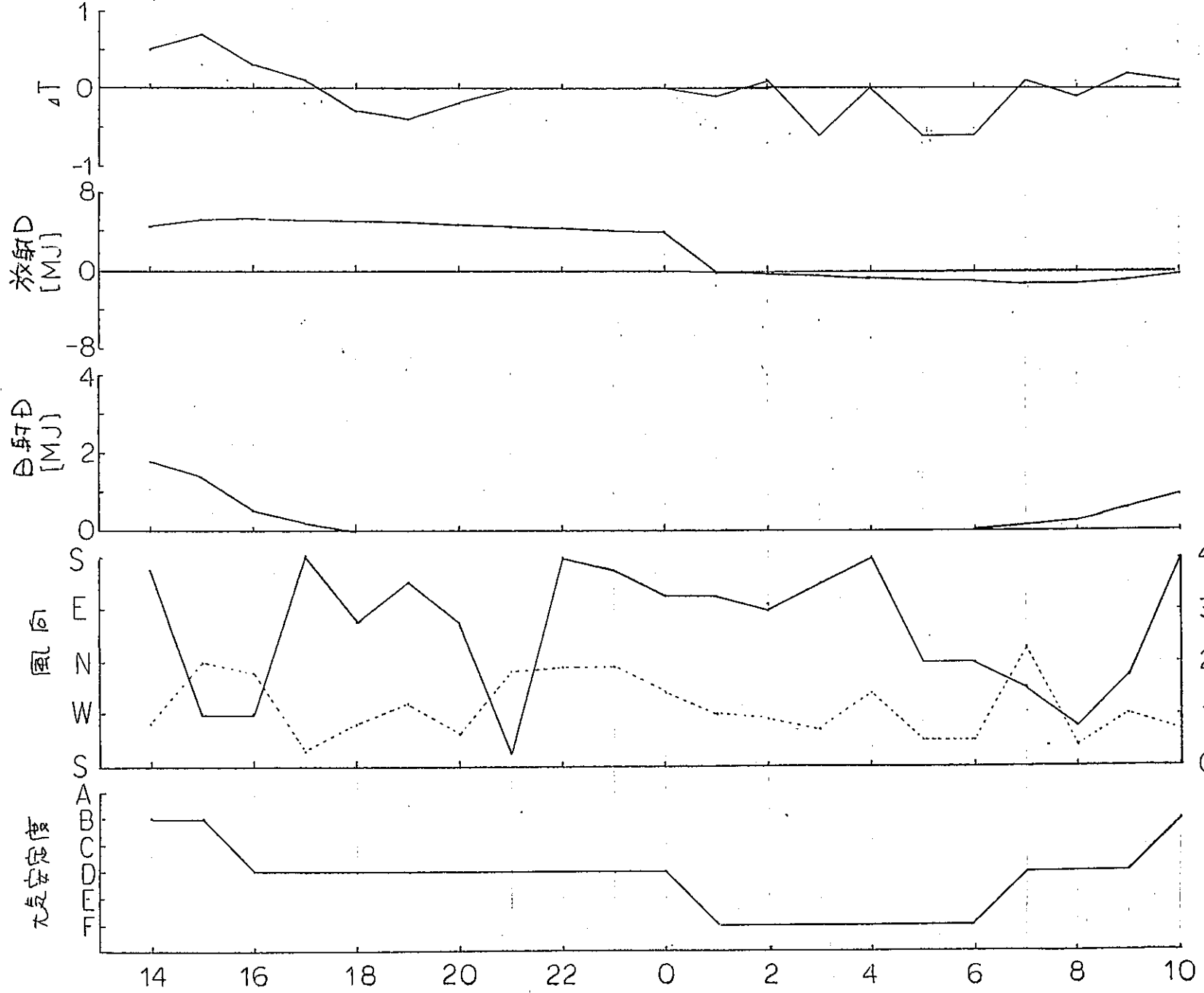


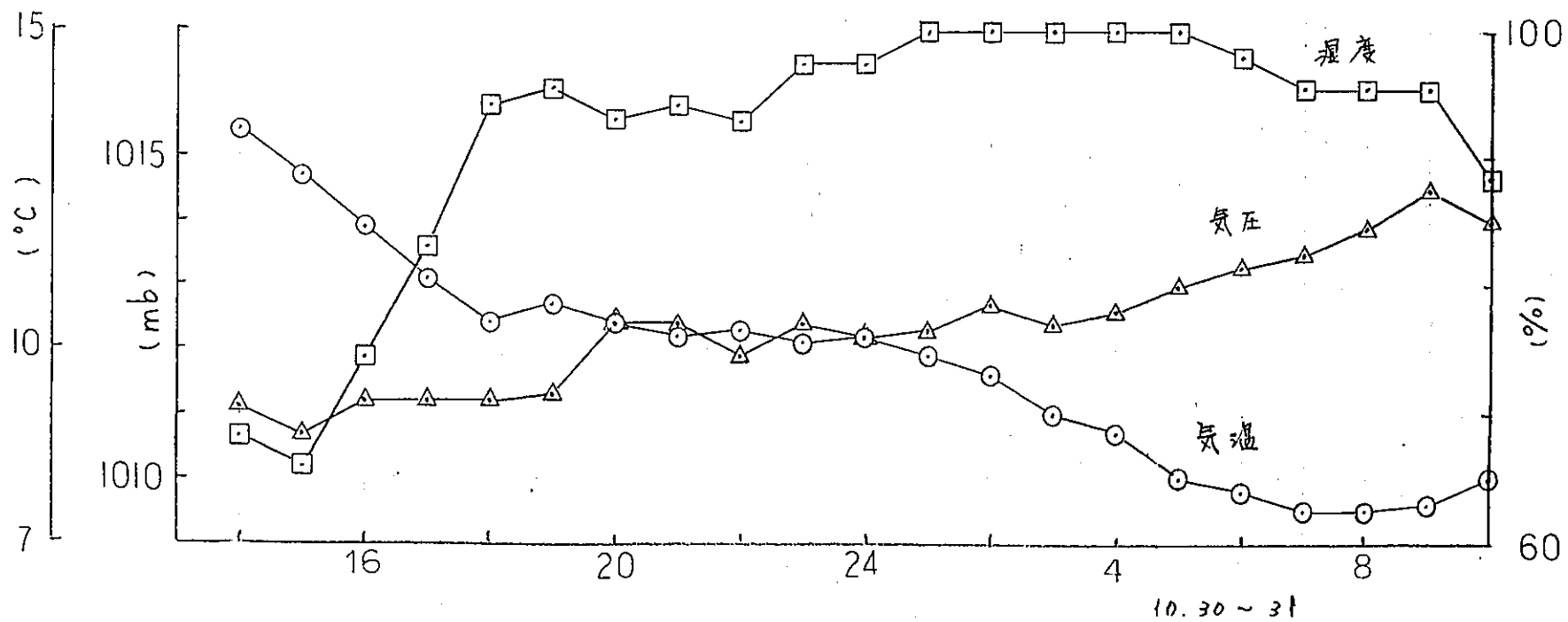
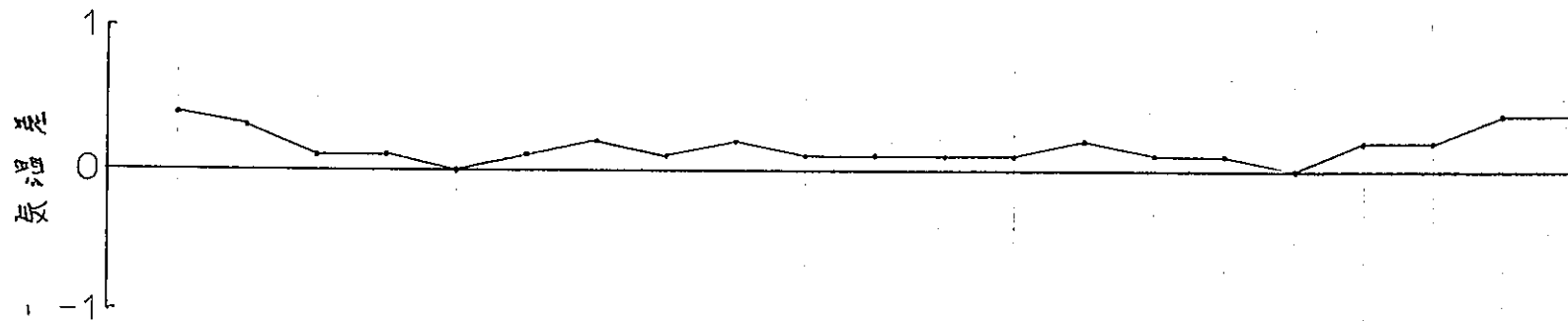
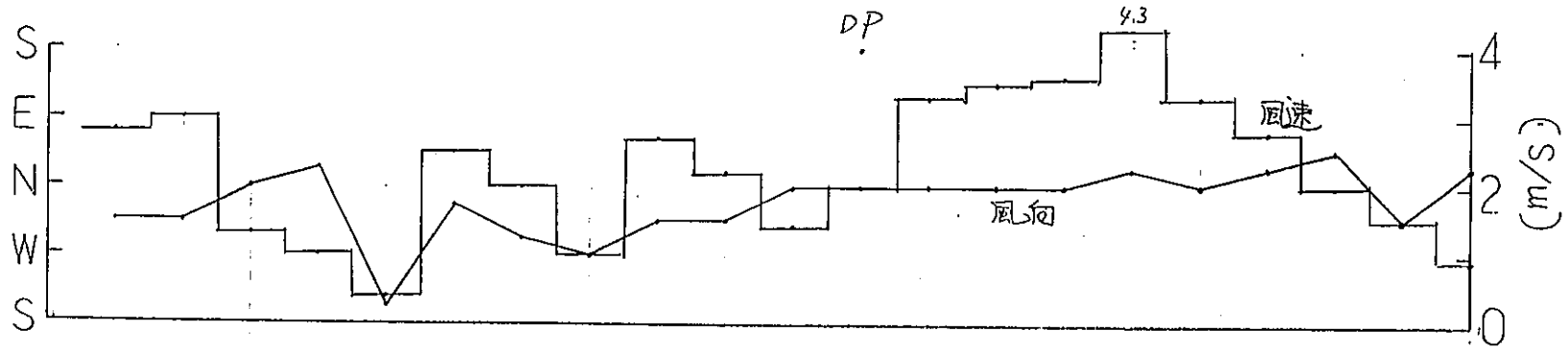
DD

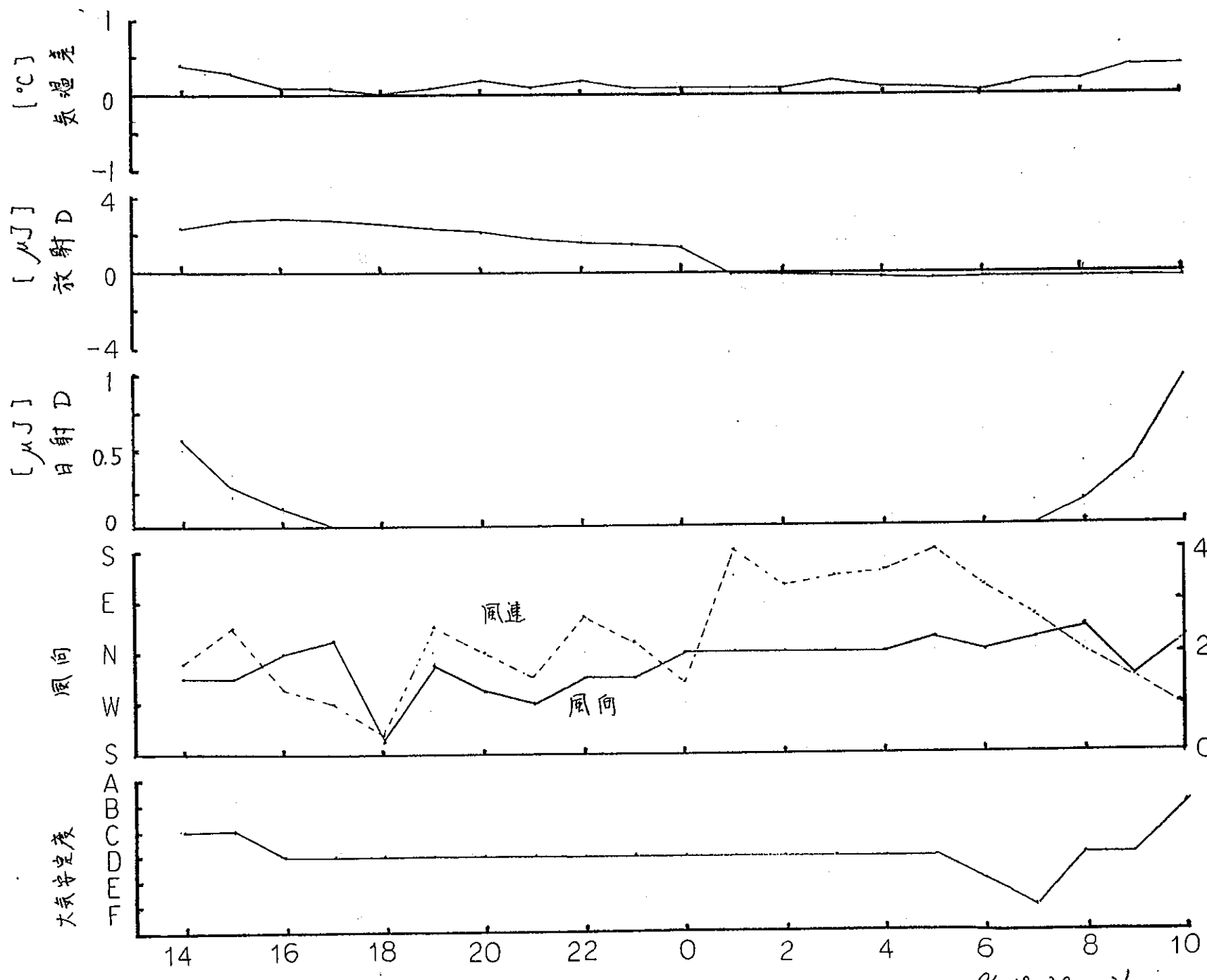
10/29 ~ 30



10/29-30

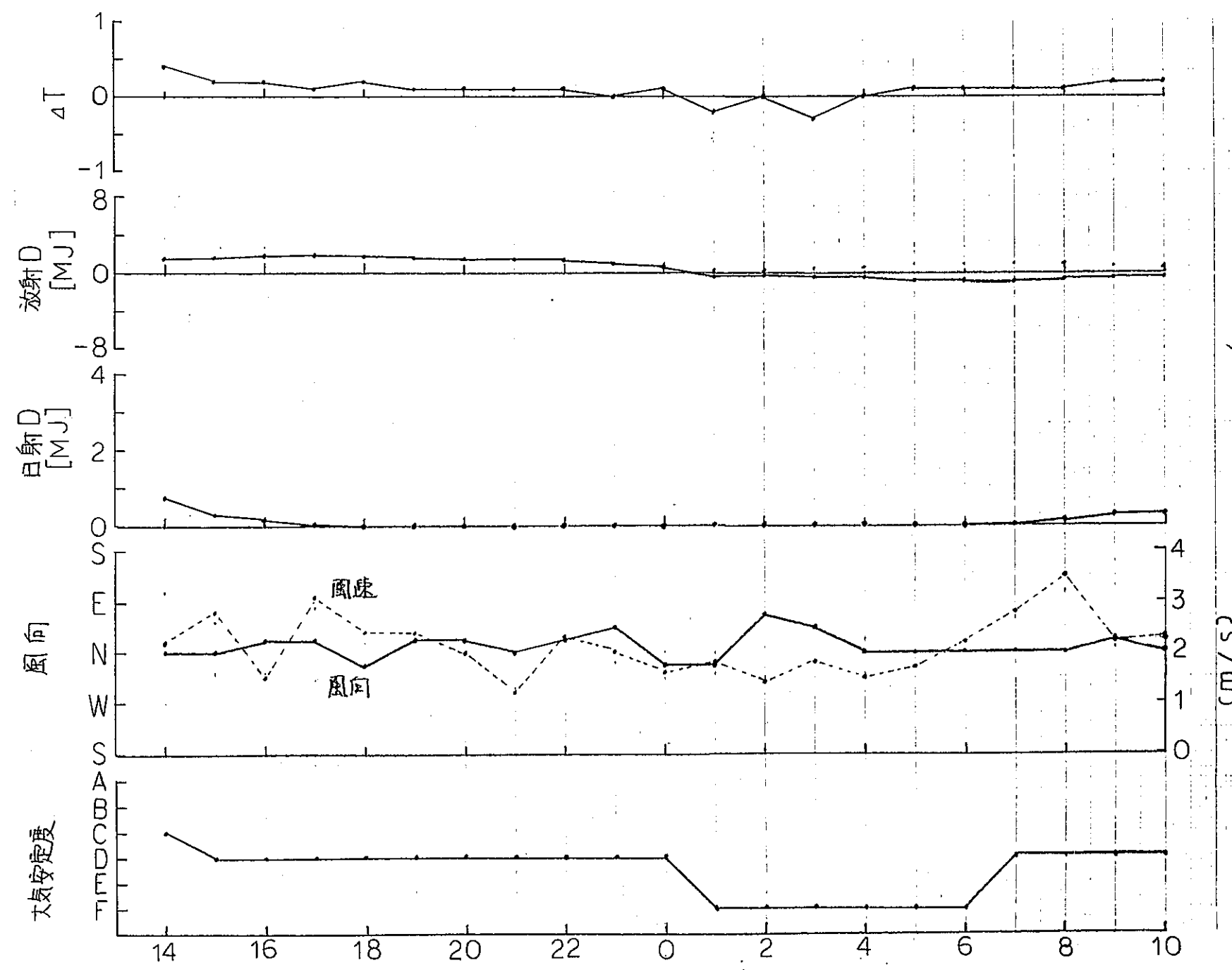






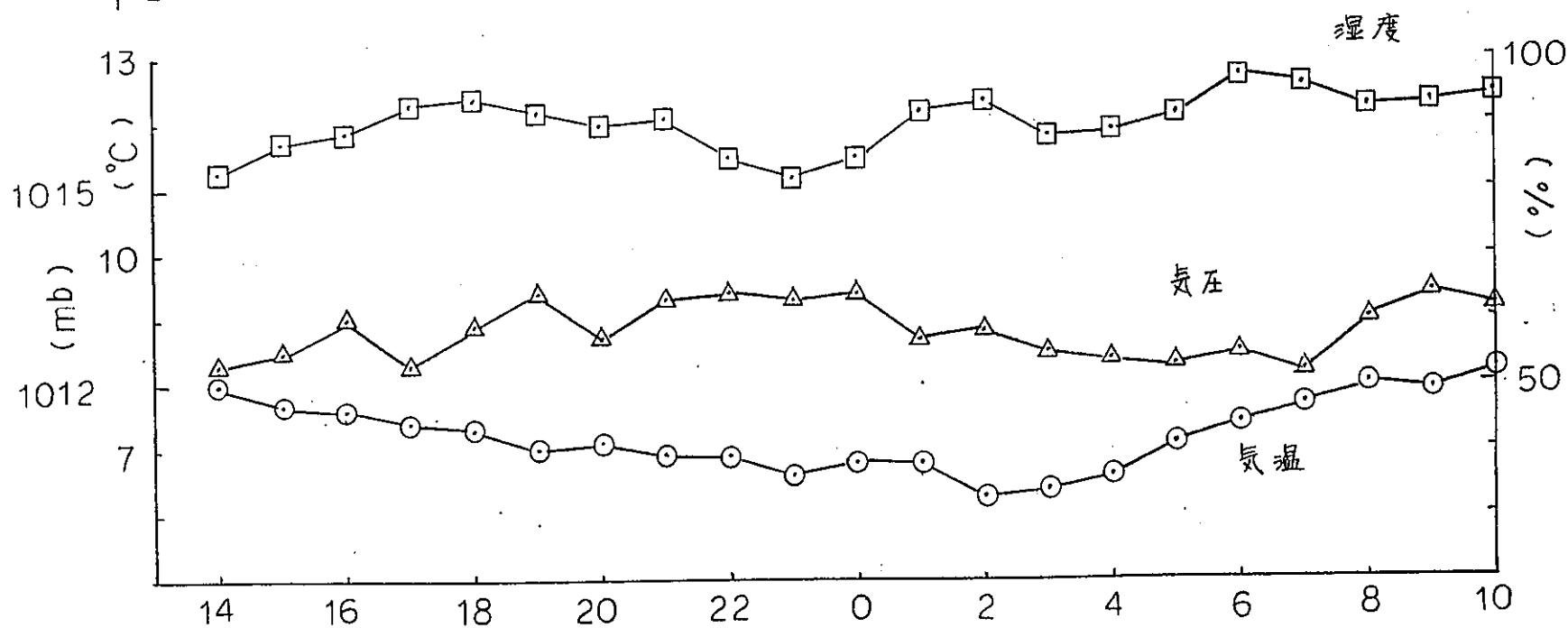
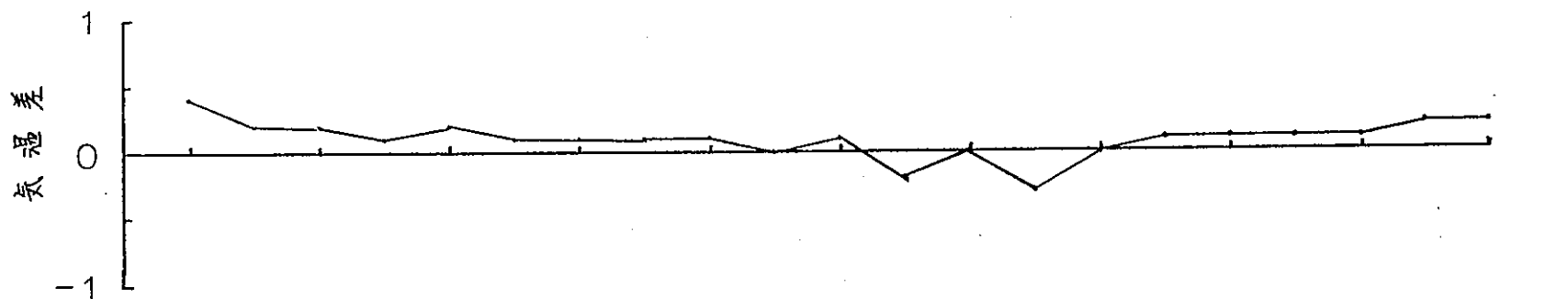
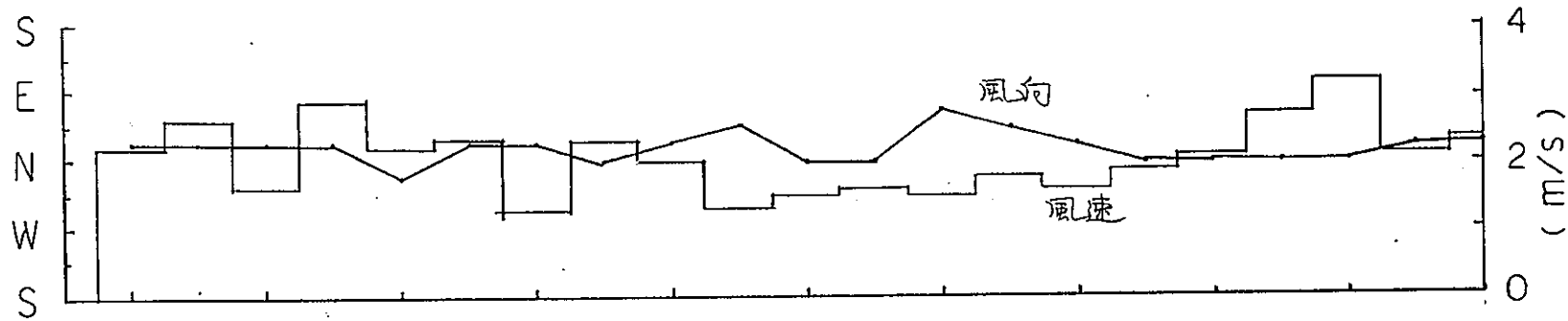
01.10.30 ~ 31

10/31 ~ 11/1

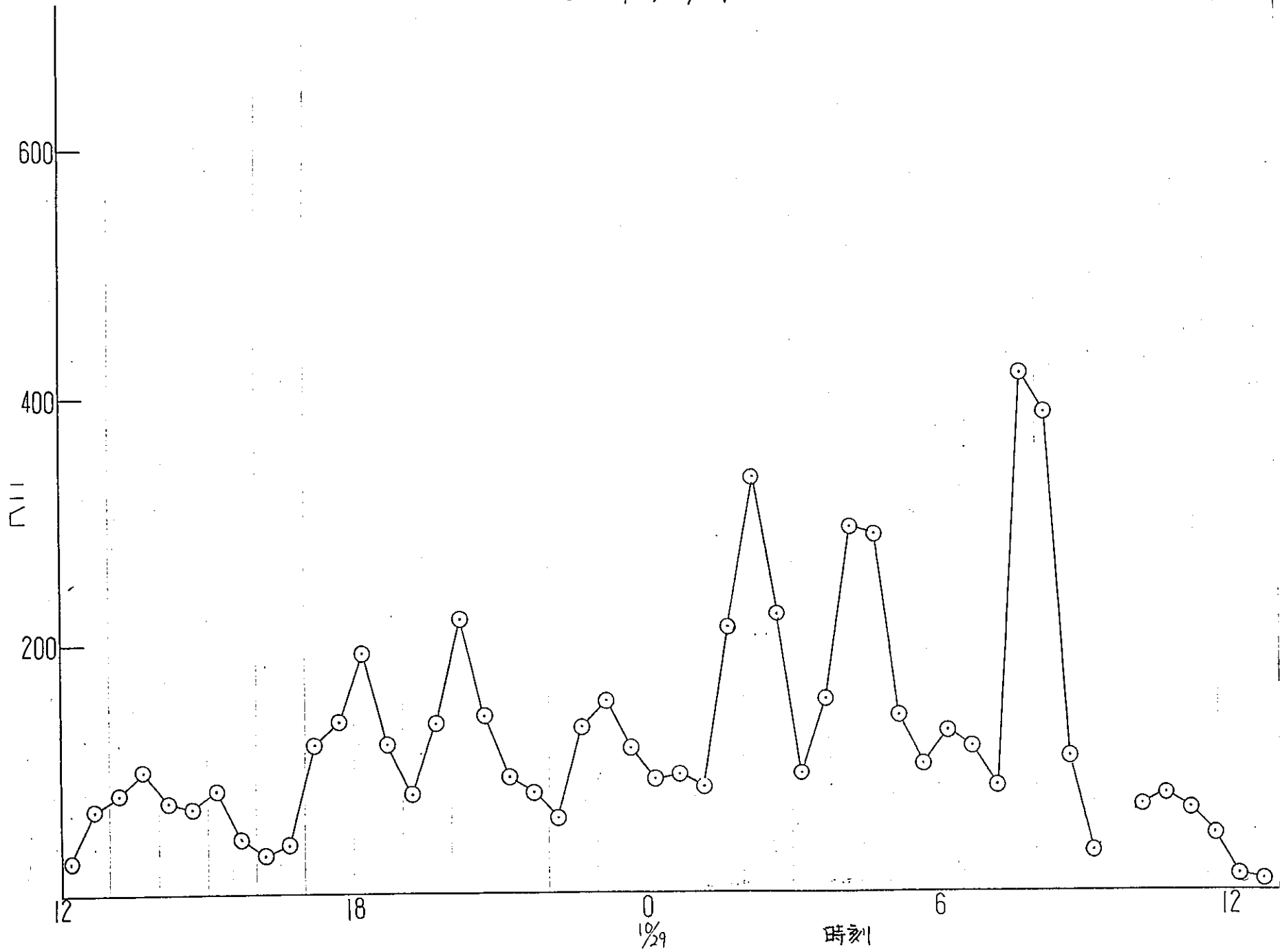


DP

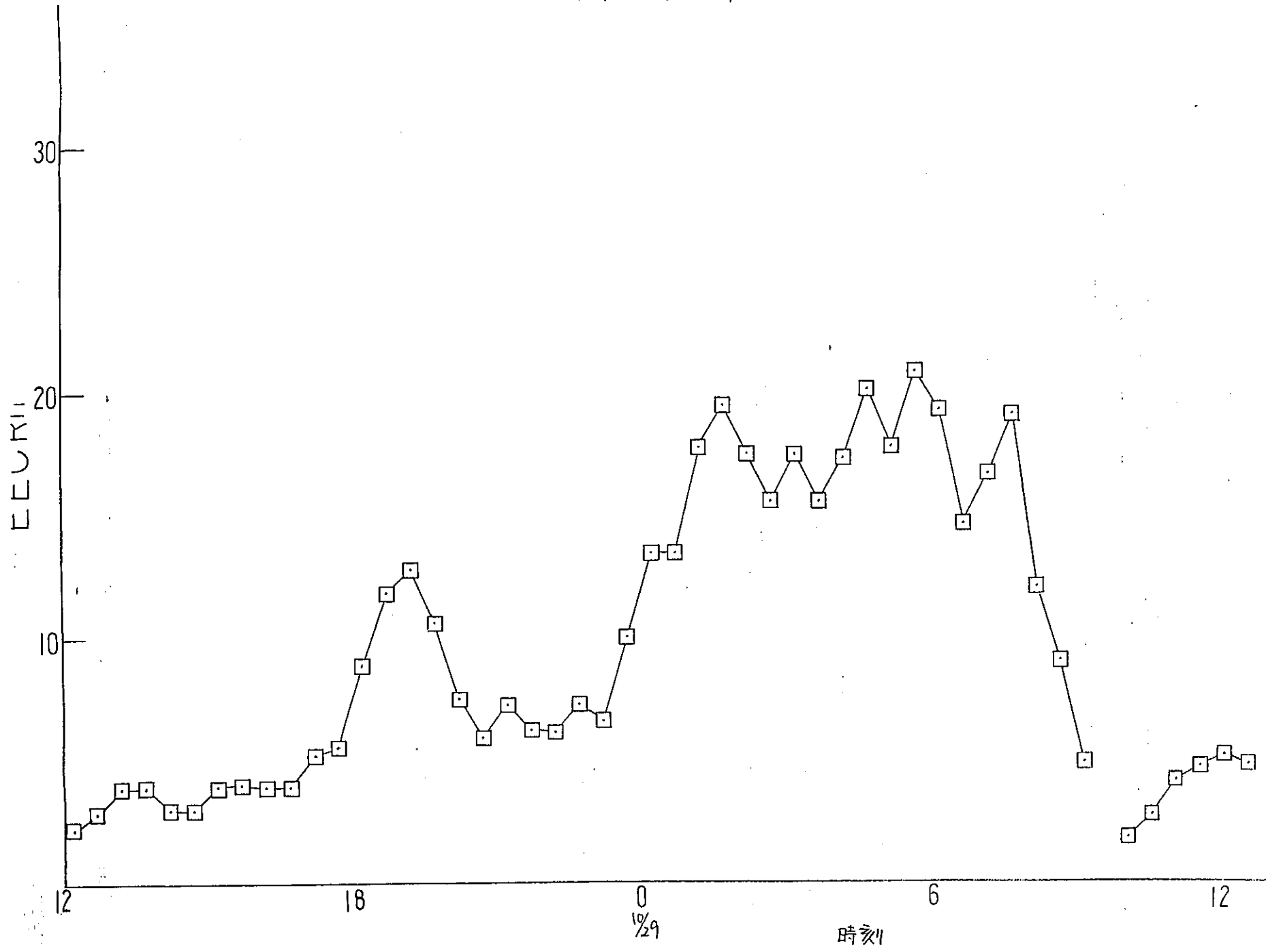
10.31 ~ 11.1



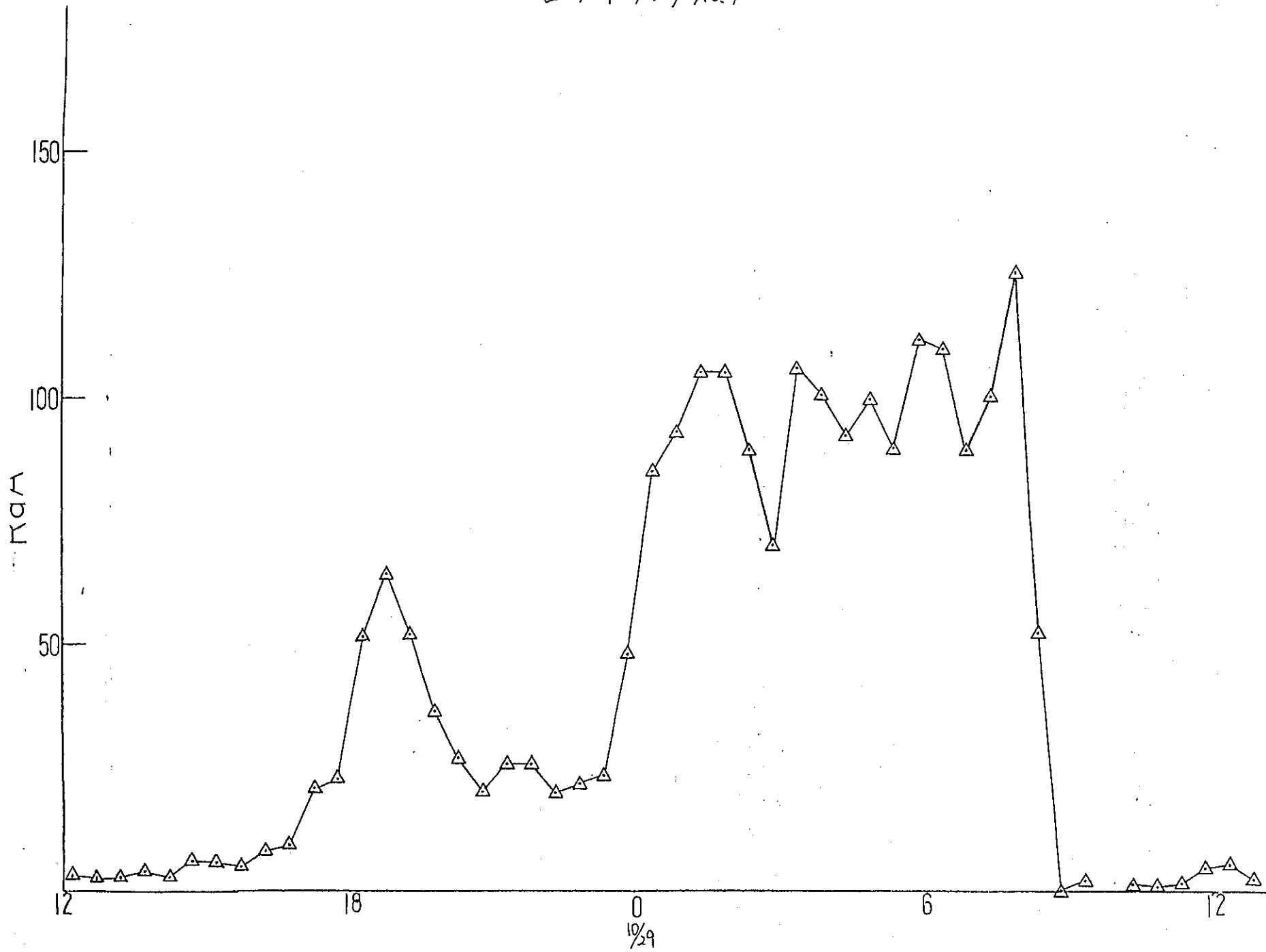
ヒーティング No.1



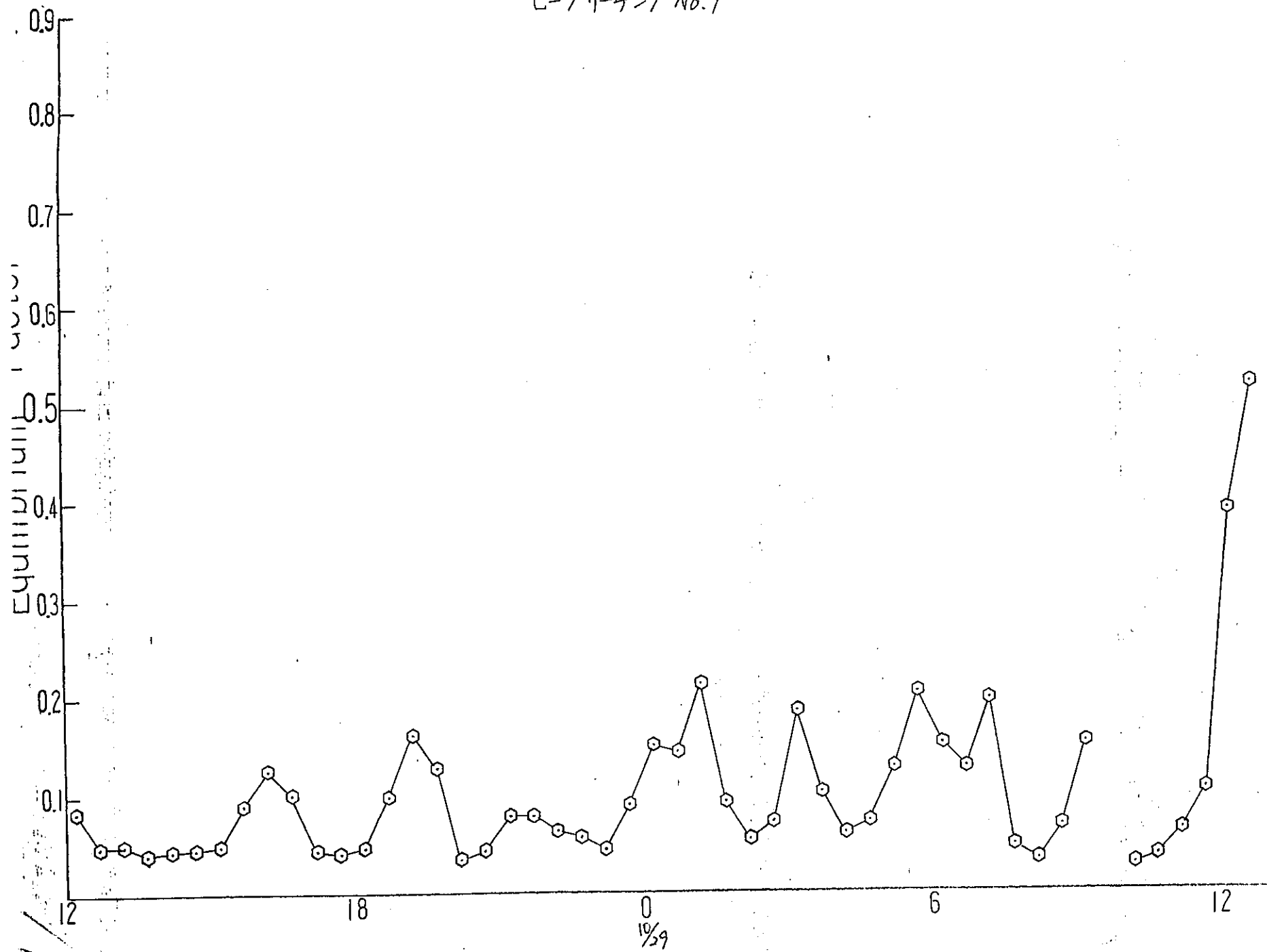
ヒ-701-4>7 No.1



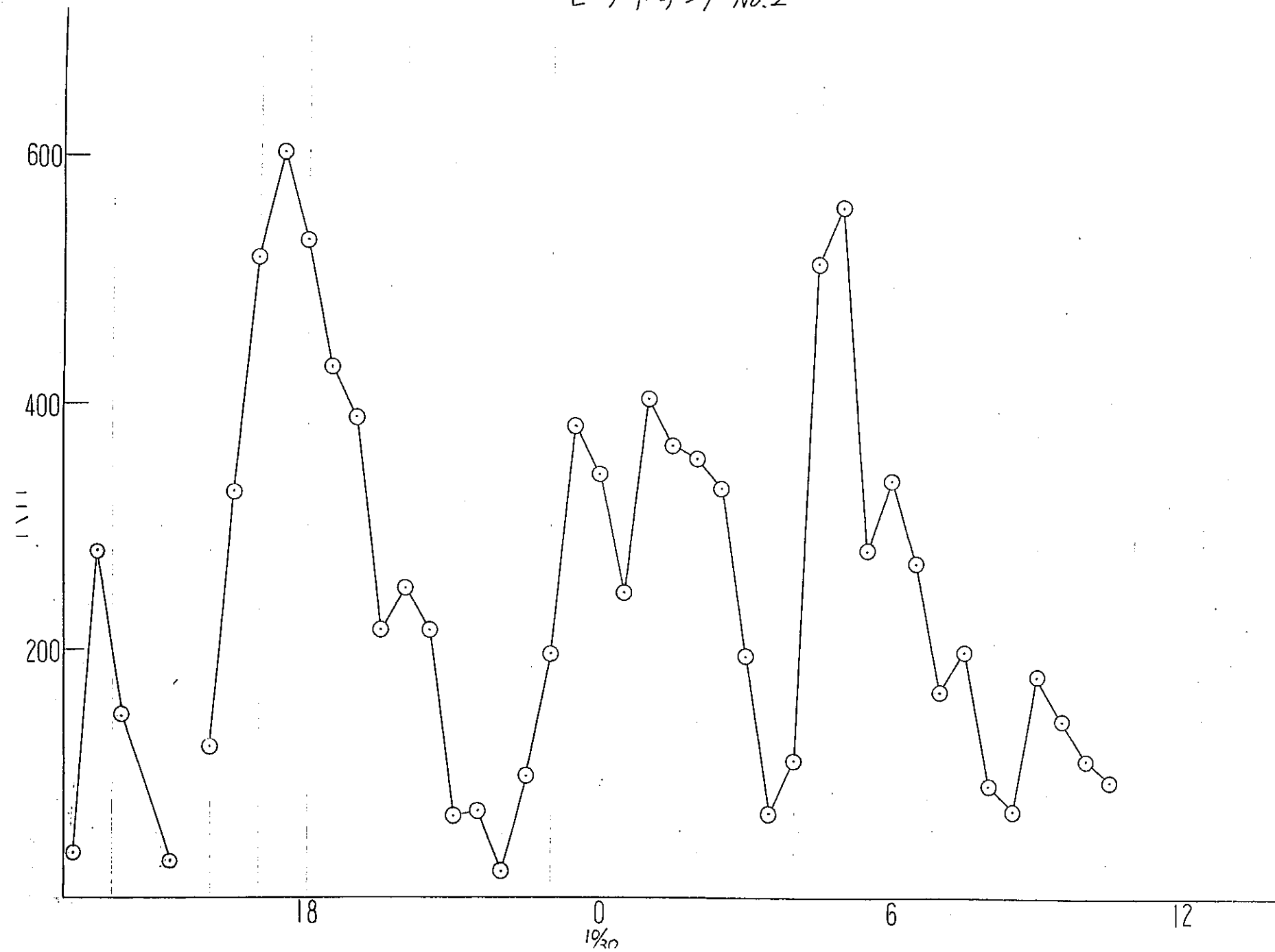
7-7011-4>7 No.1



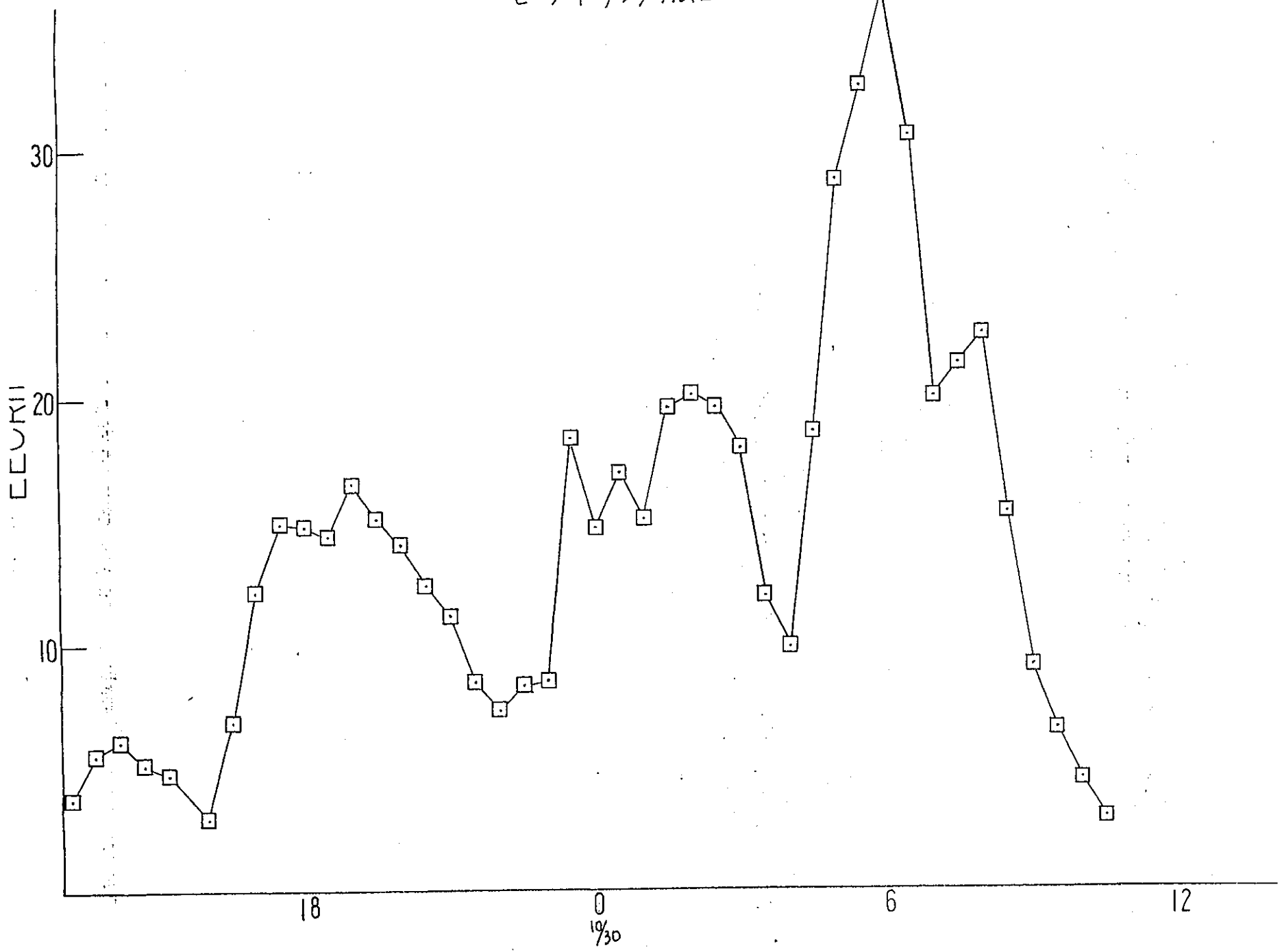
ヒ-7°11-4>7 No.1



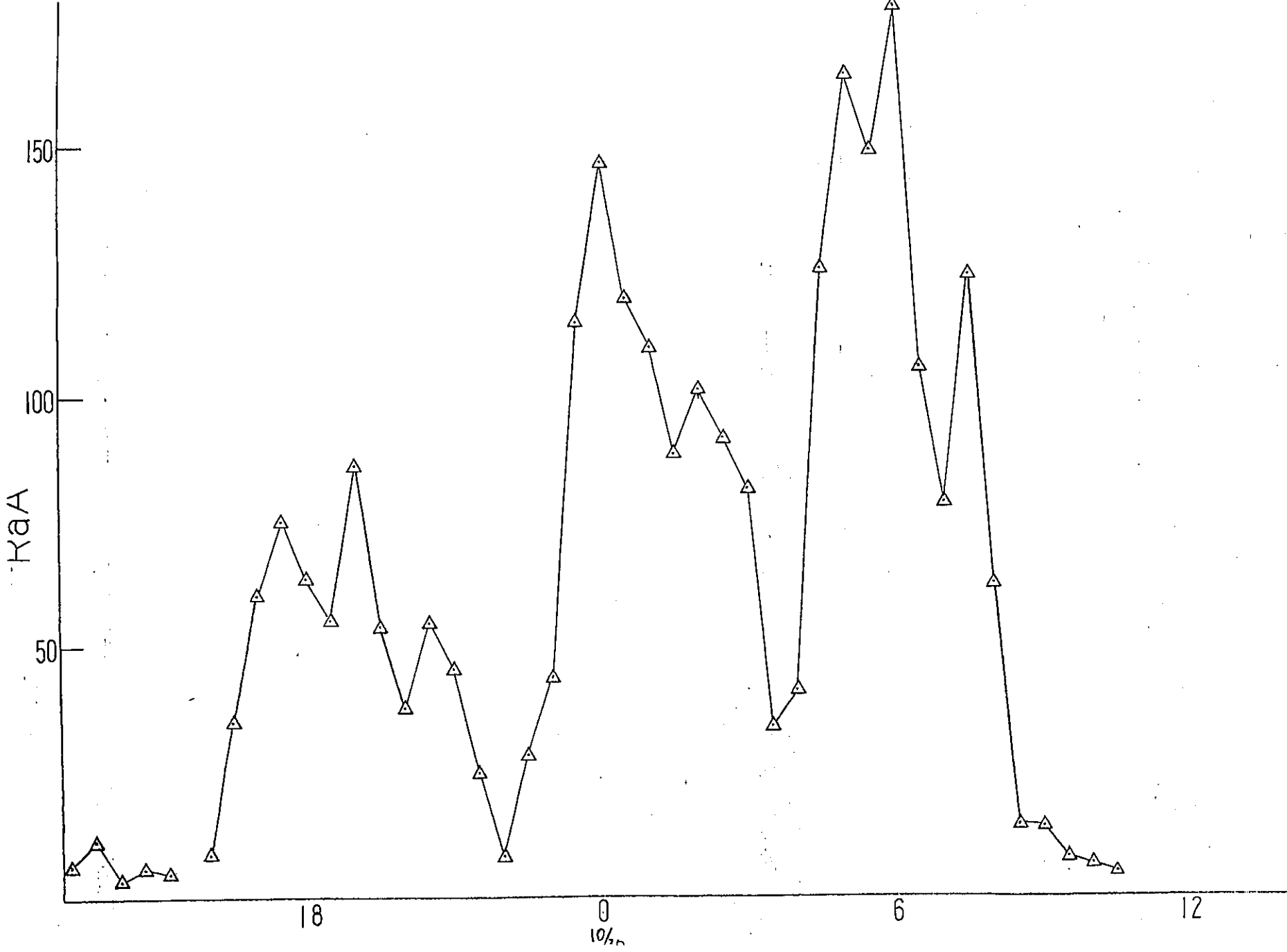
ヒ-ア-リ-チ-ン No.2



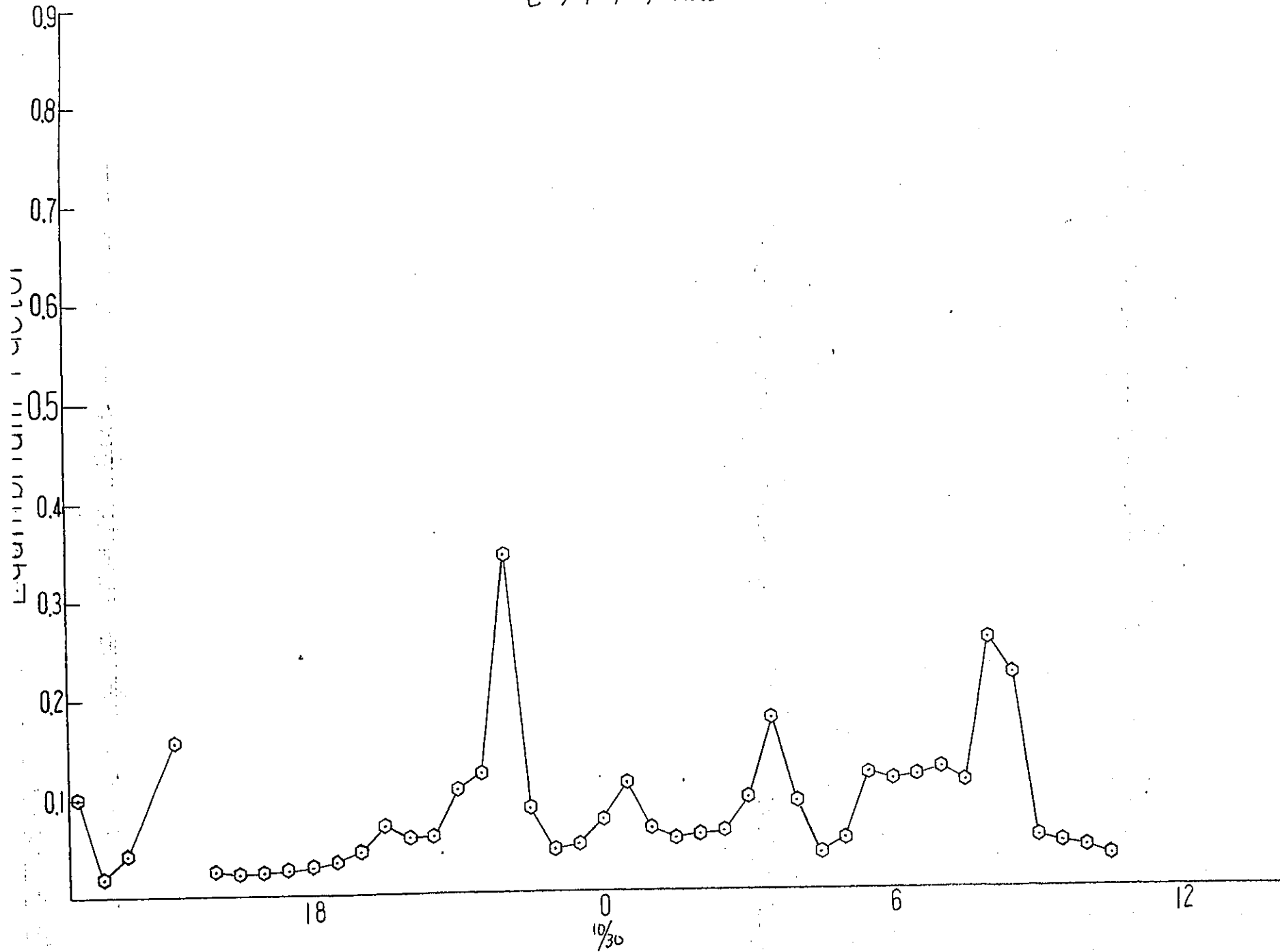
C-701-47 No.2

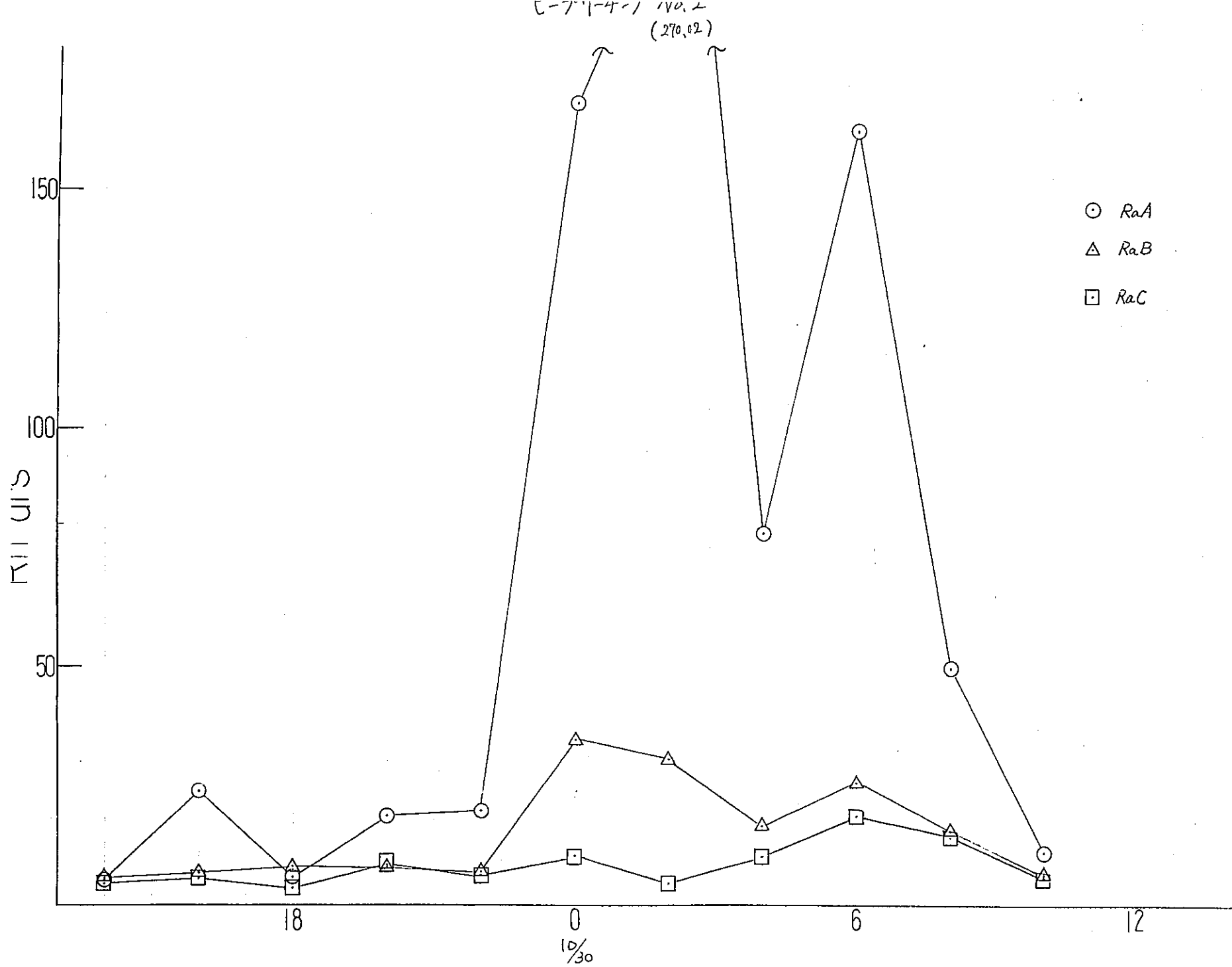


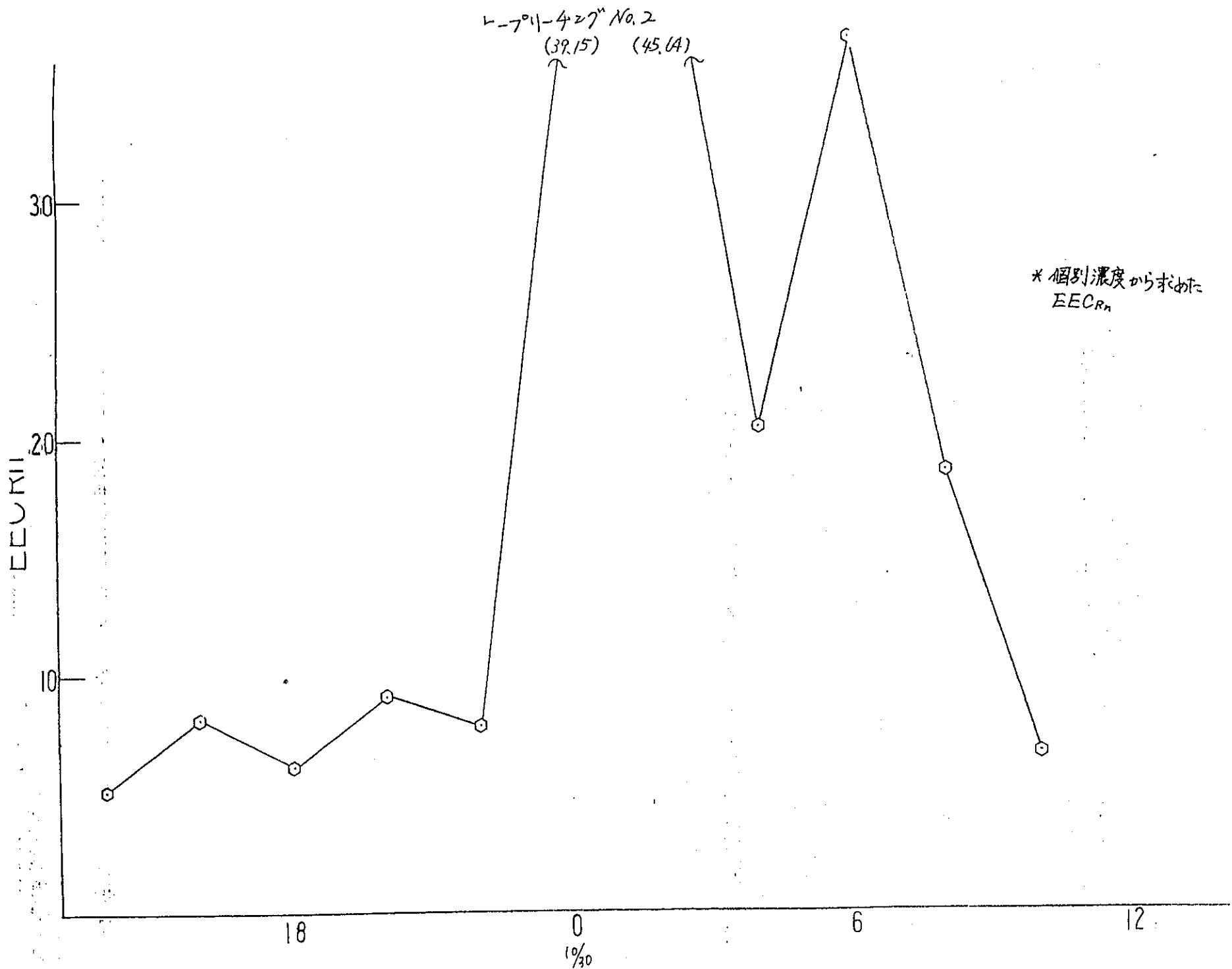
ヒ-7⁰¹-4>7" No.2



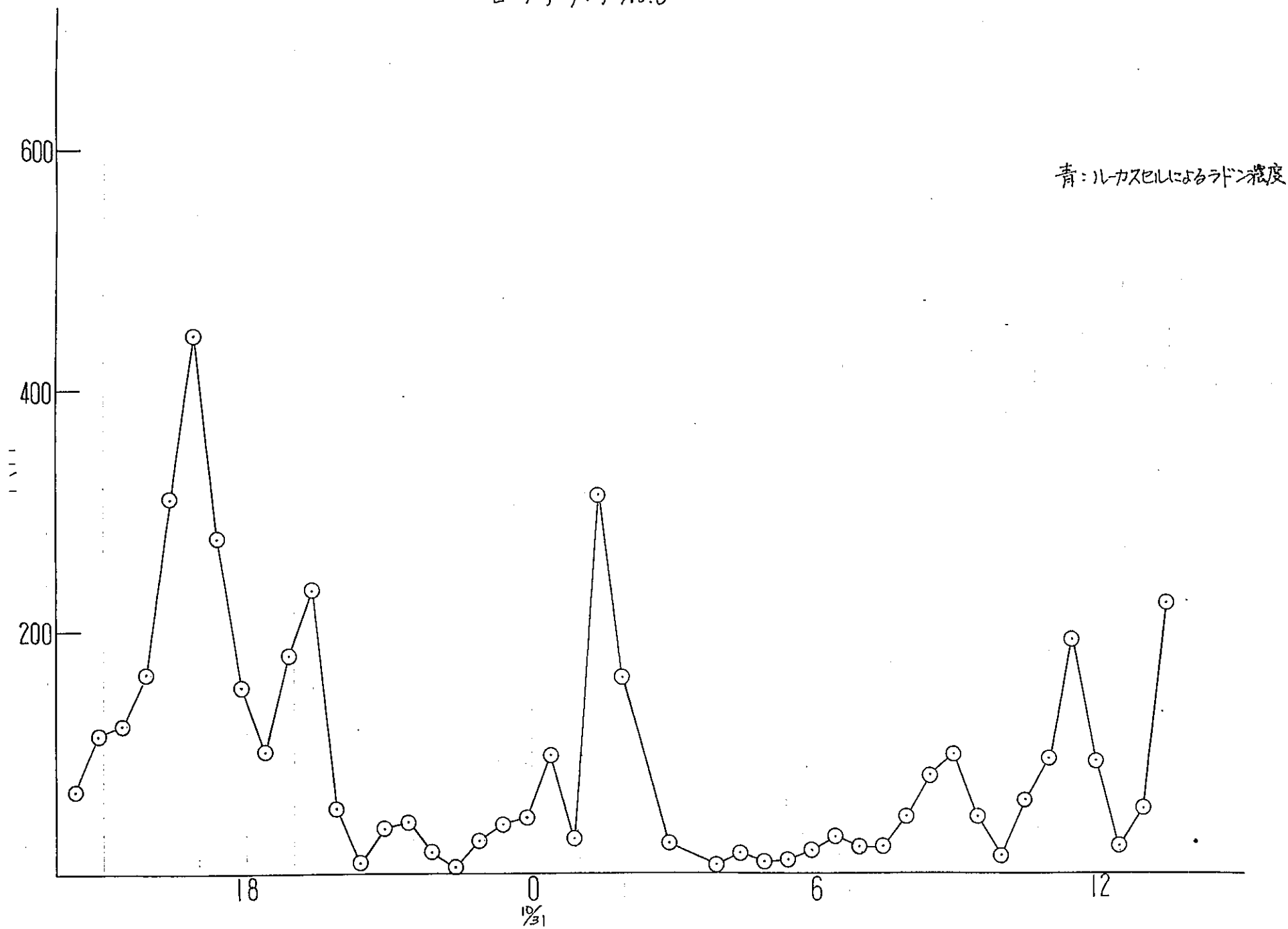
ヒ-701-4-7 No.2



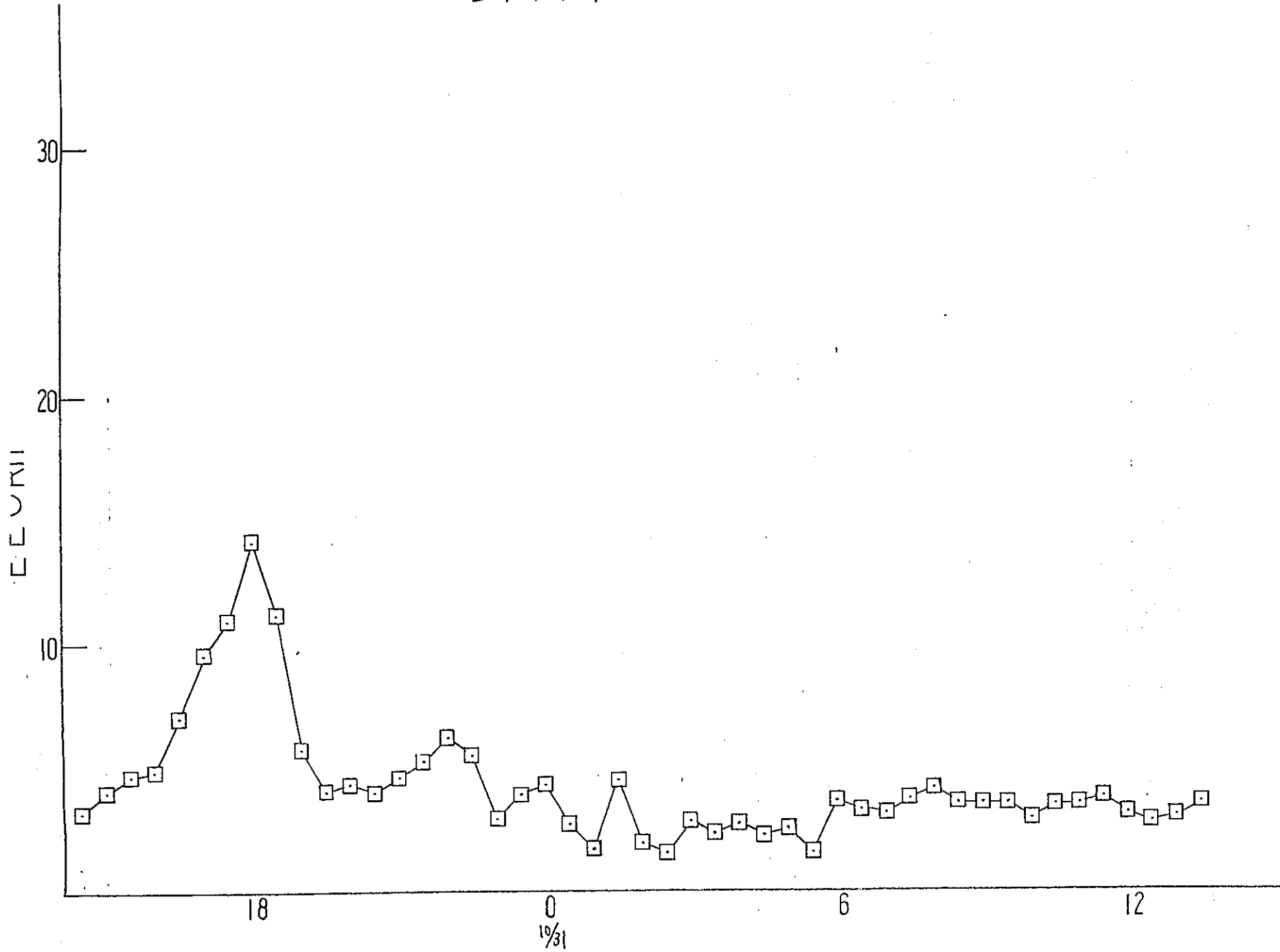




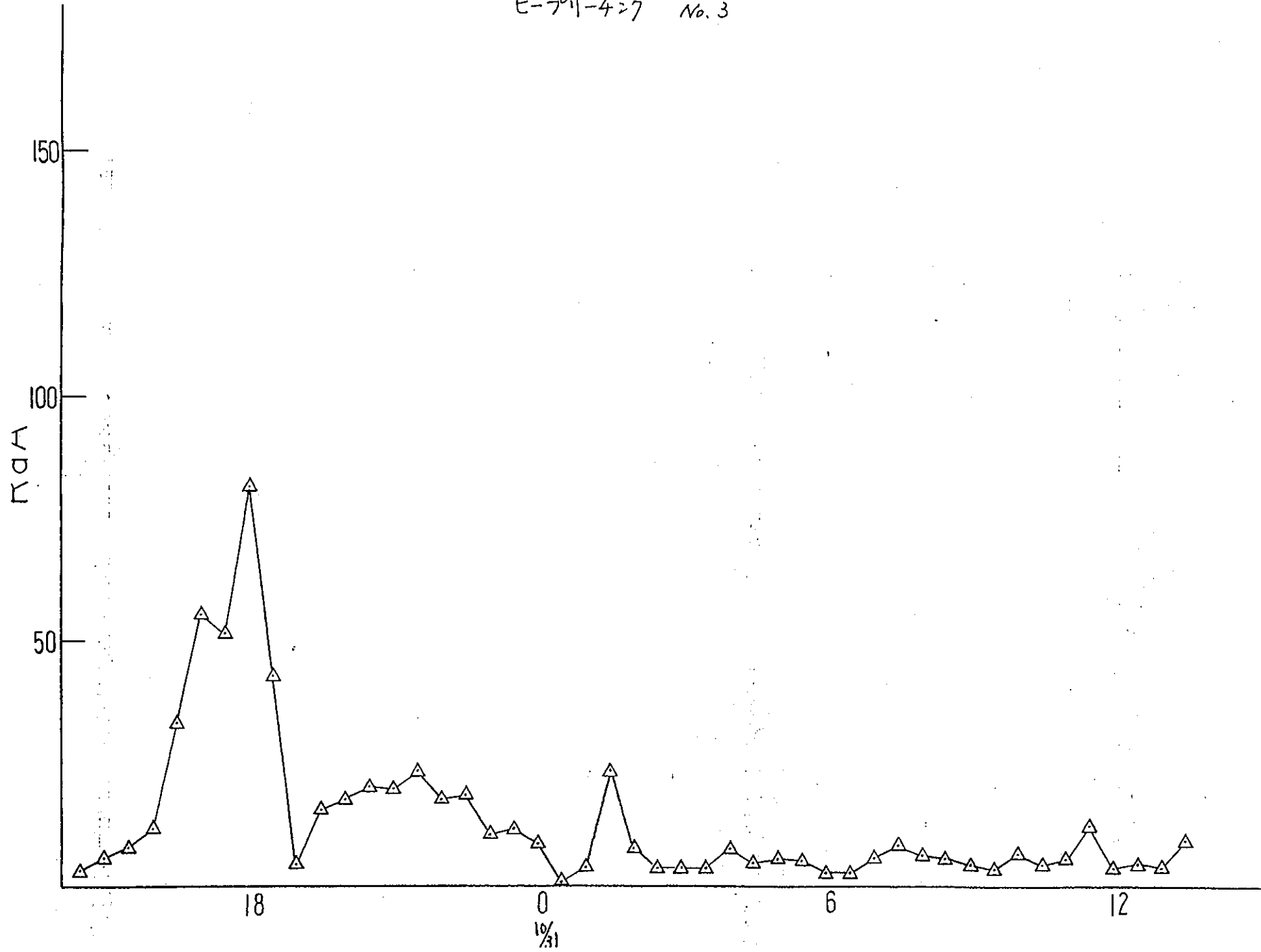
レプリカ No.3

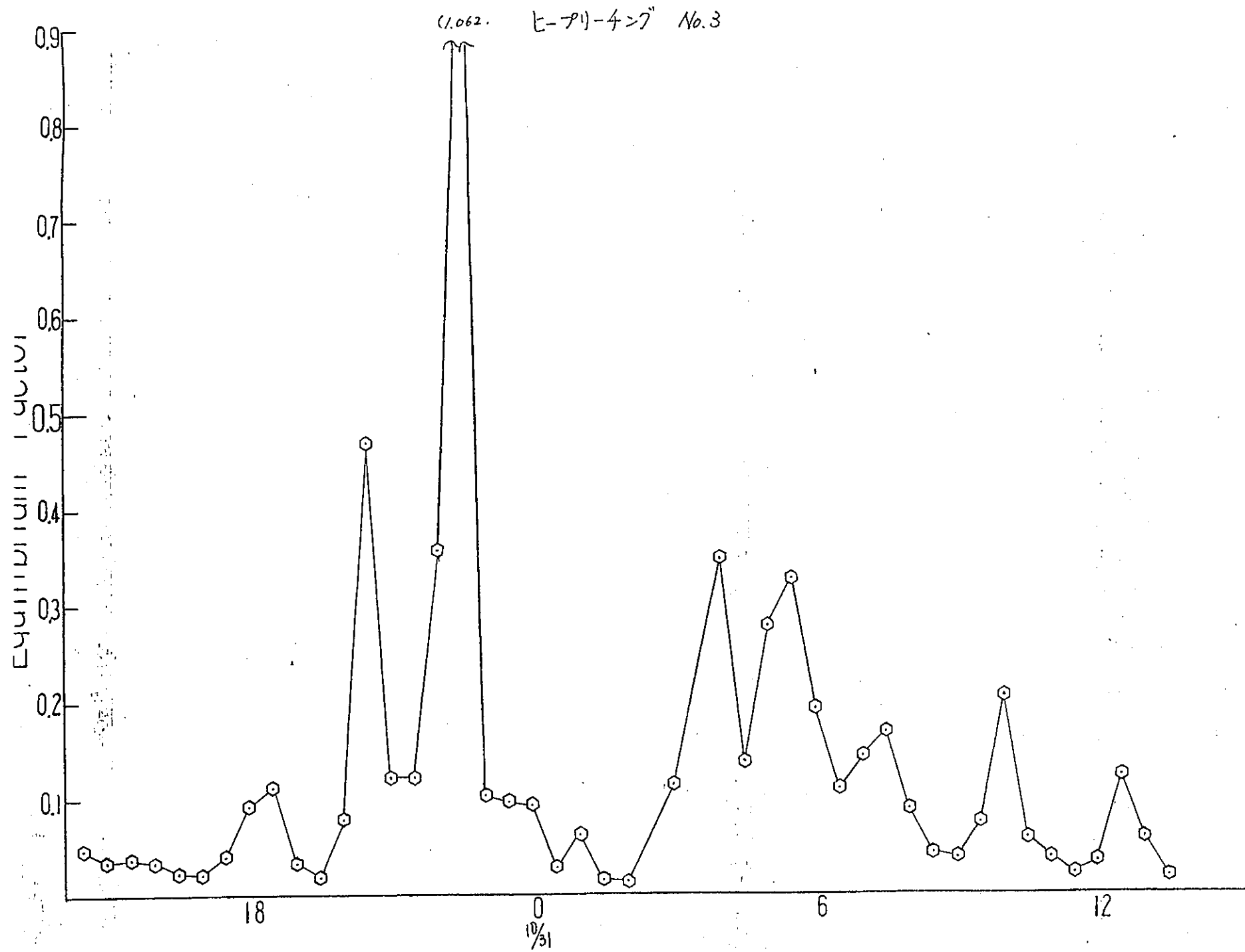


ヒ-、11-4>7" No.3

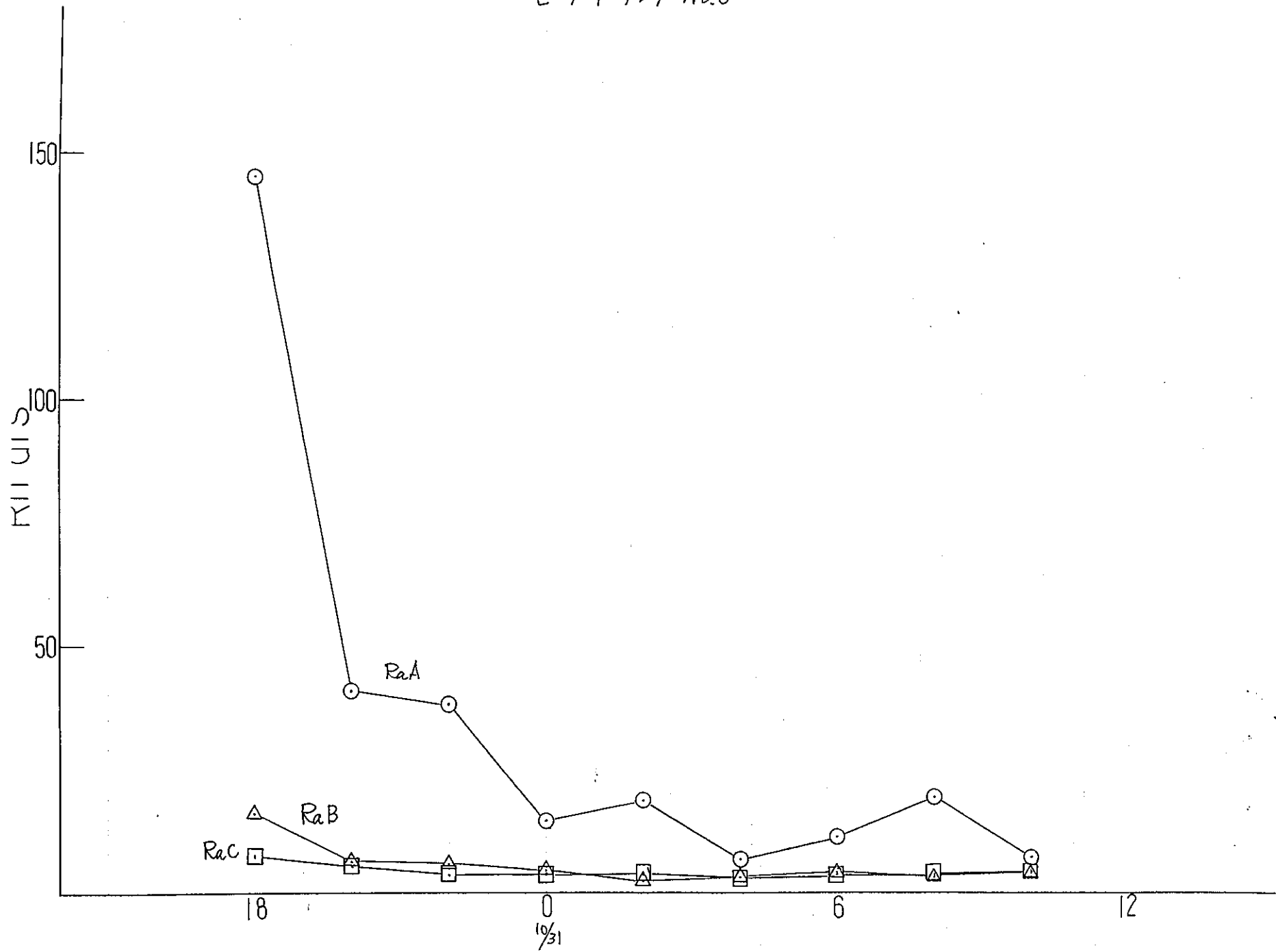


ヒープリ-4>7 No. 3

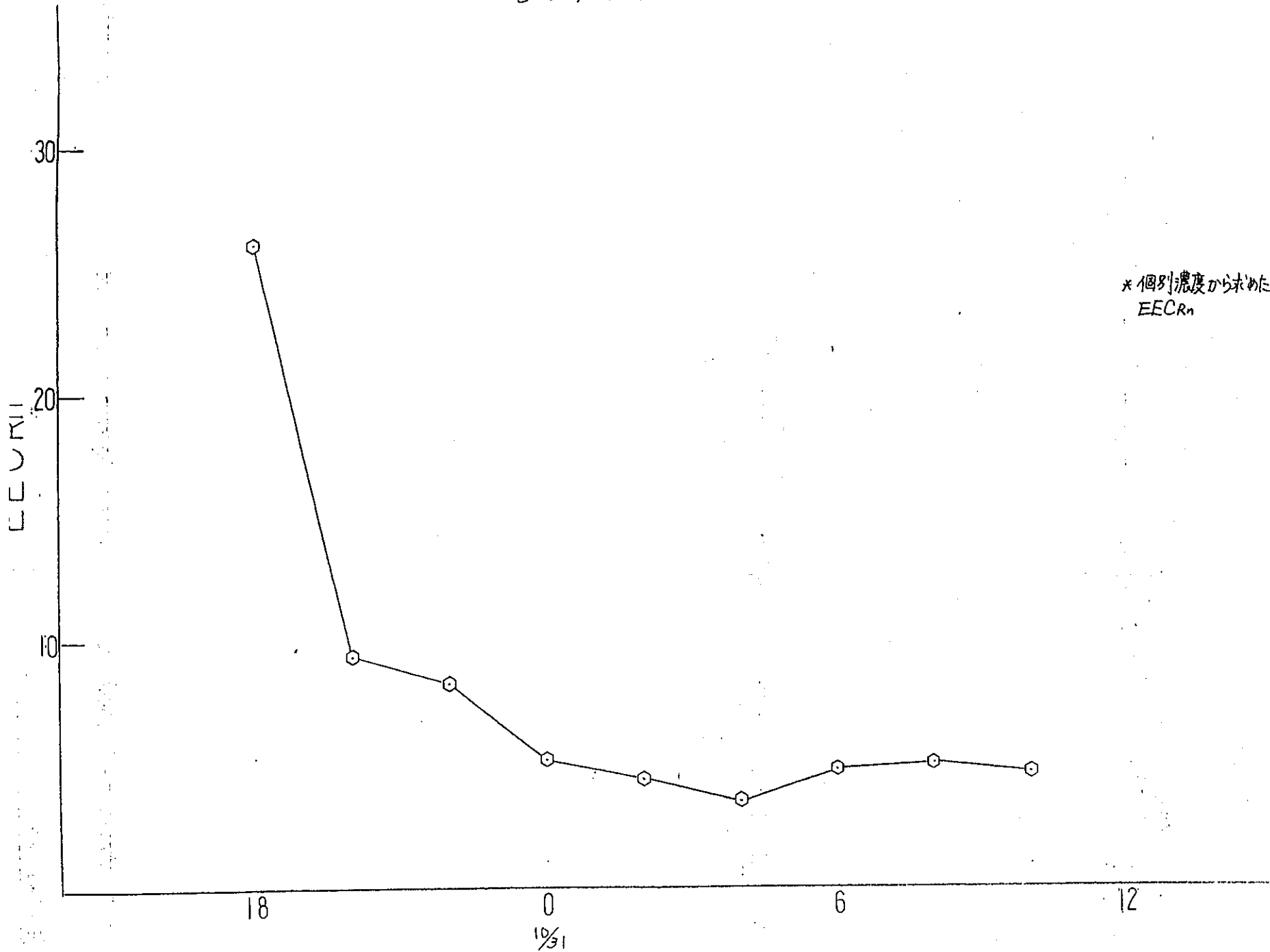




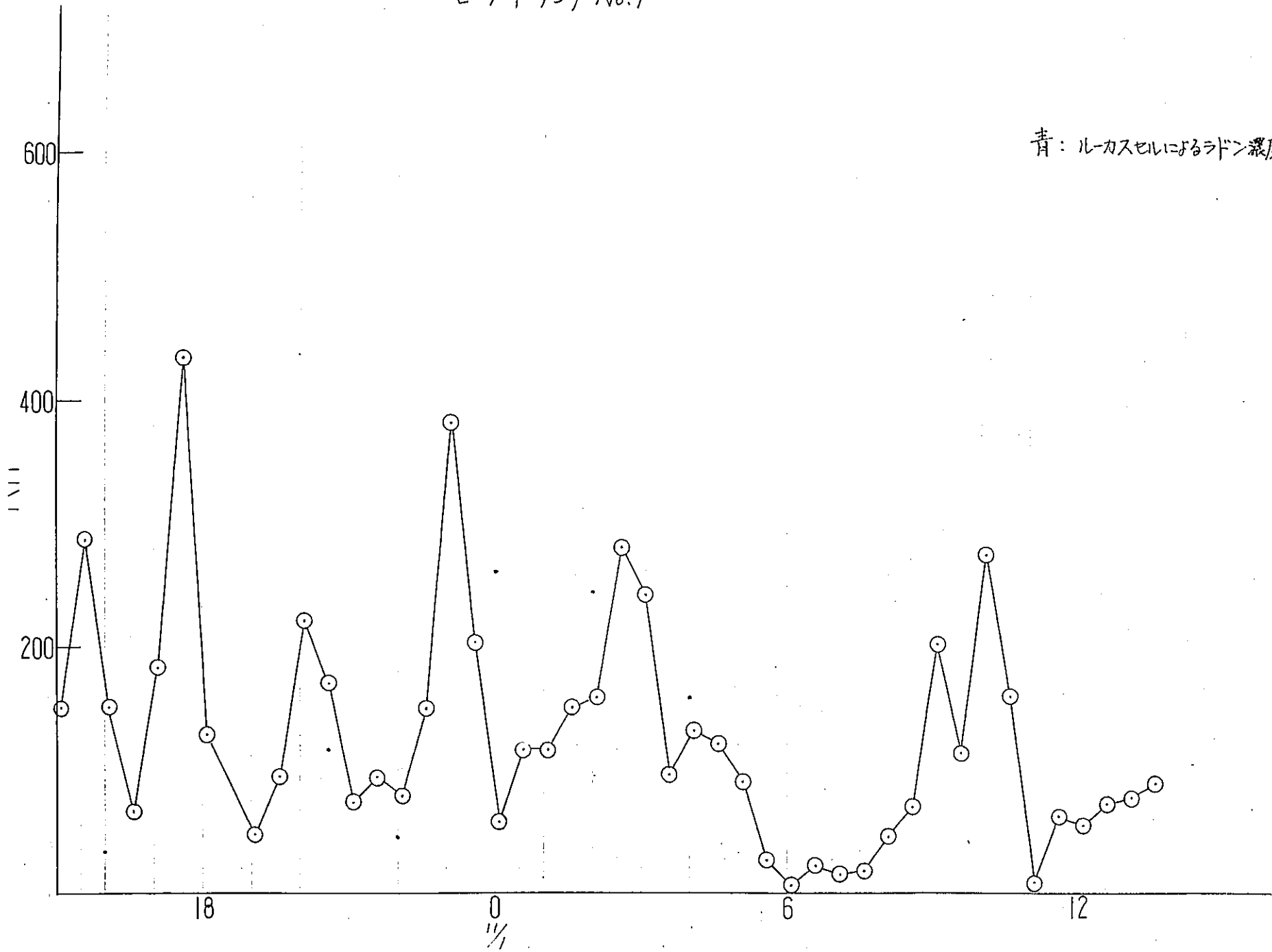
E-7°4-4>7" No.3



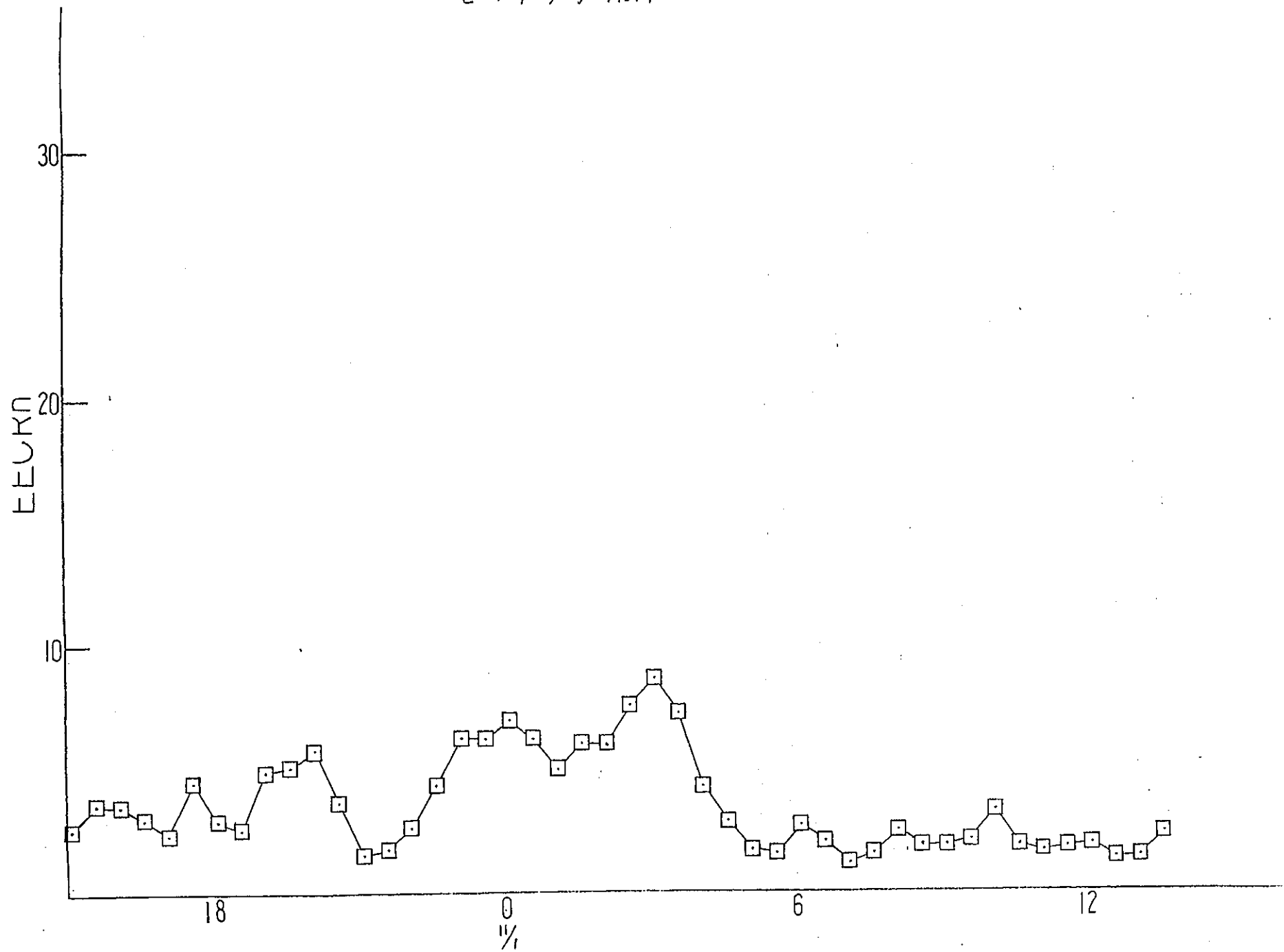
「アクリ-4-ン」 No.3



ヒーティング No.4

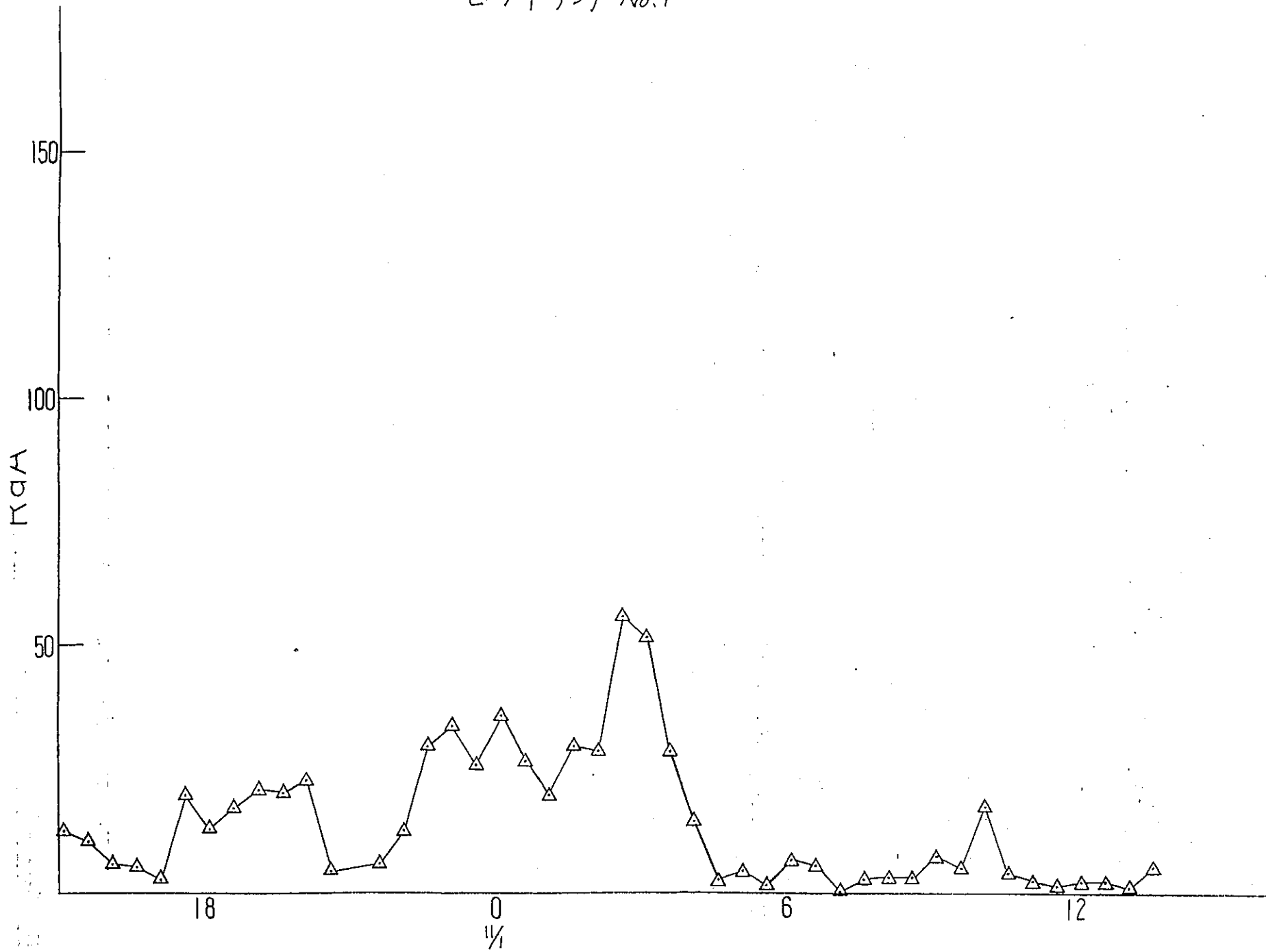


ヒート-4>7 No.4

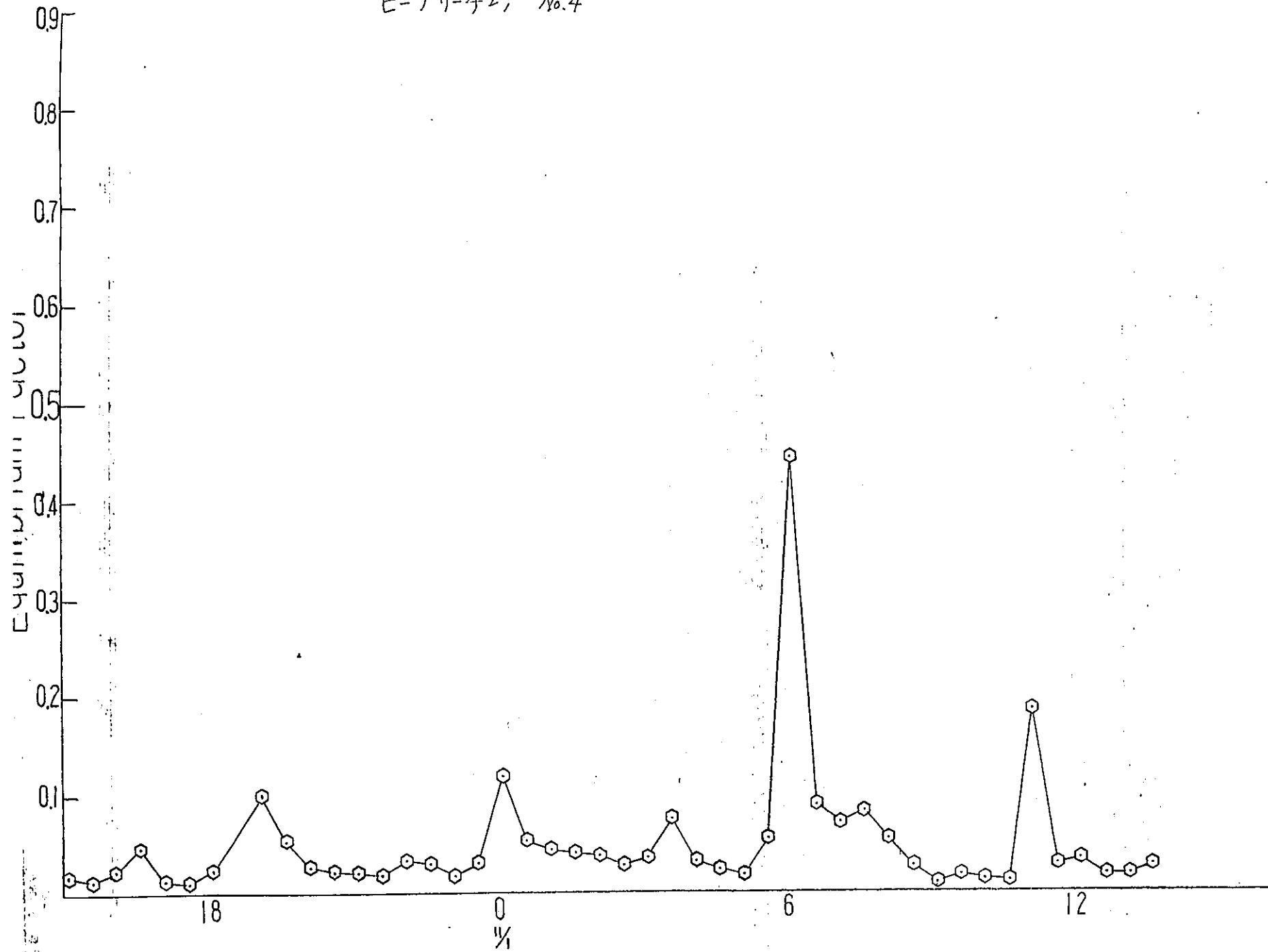


ヒーティング No.4

ヒーティング No.4



ヒ-7°リ-42, No.4

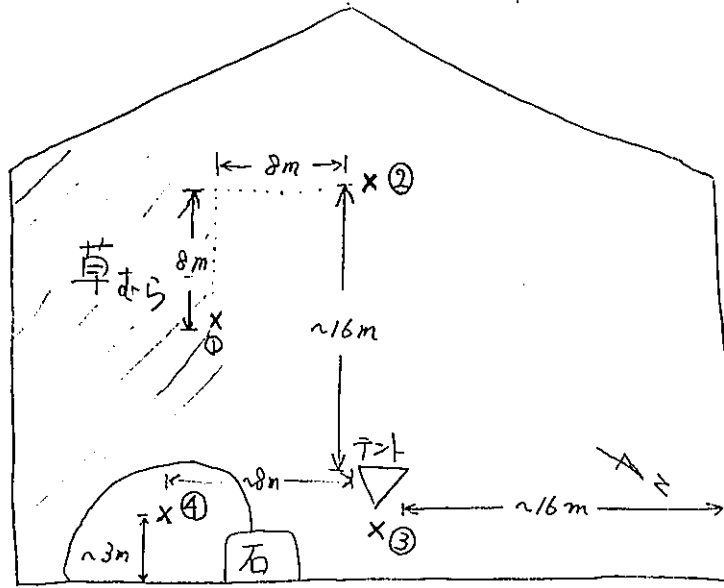


人形峠データ '91

γ線量率 [mR/hr] の測定点の位置について.

No. 1

・ヒープリーチングの脇



駐車場

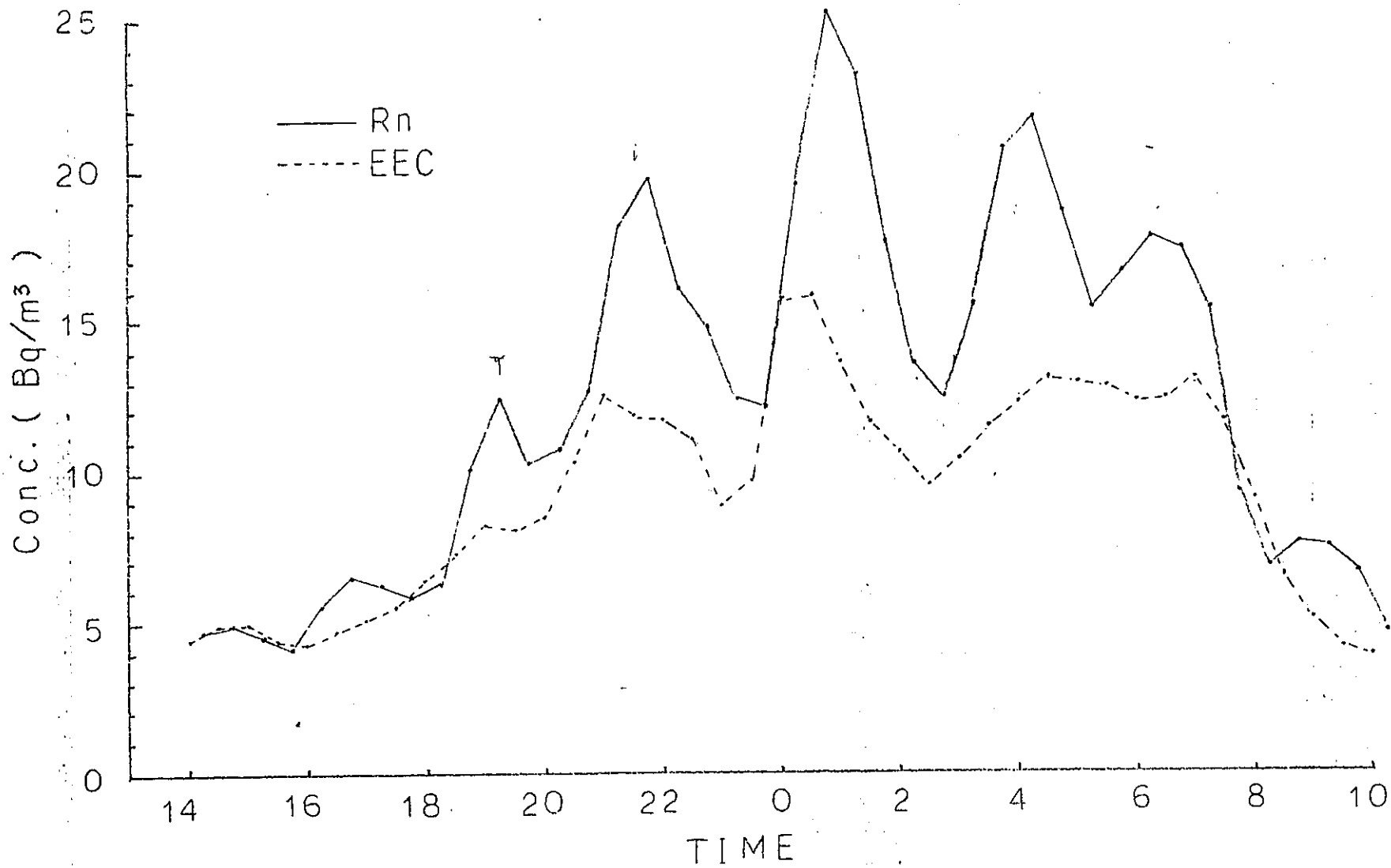
建物

R_n 湧出量
[$Bq/m^2 \cdot sec$]

γ線量率
[mR/h]

- ① $2.0 \times 10^{-5} \pm 1.5 \times 10^{-3}$ 0.23
- ② $4.1 \times 10^{-4} \pm 1.0 \times 10^{-3}$ 0.19
- ③ $7.1 \times 10^{-1} \pm 1.2 \times 10^{-2}$ 0.18
- ④ $2.2 \times 10^{-1} \pm 6.7 \times 10^{-3}$ 0.07

※ T_n 湧出量 なし.

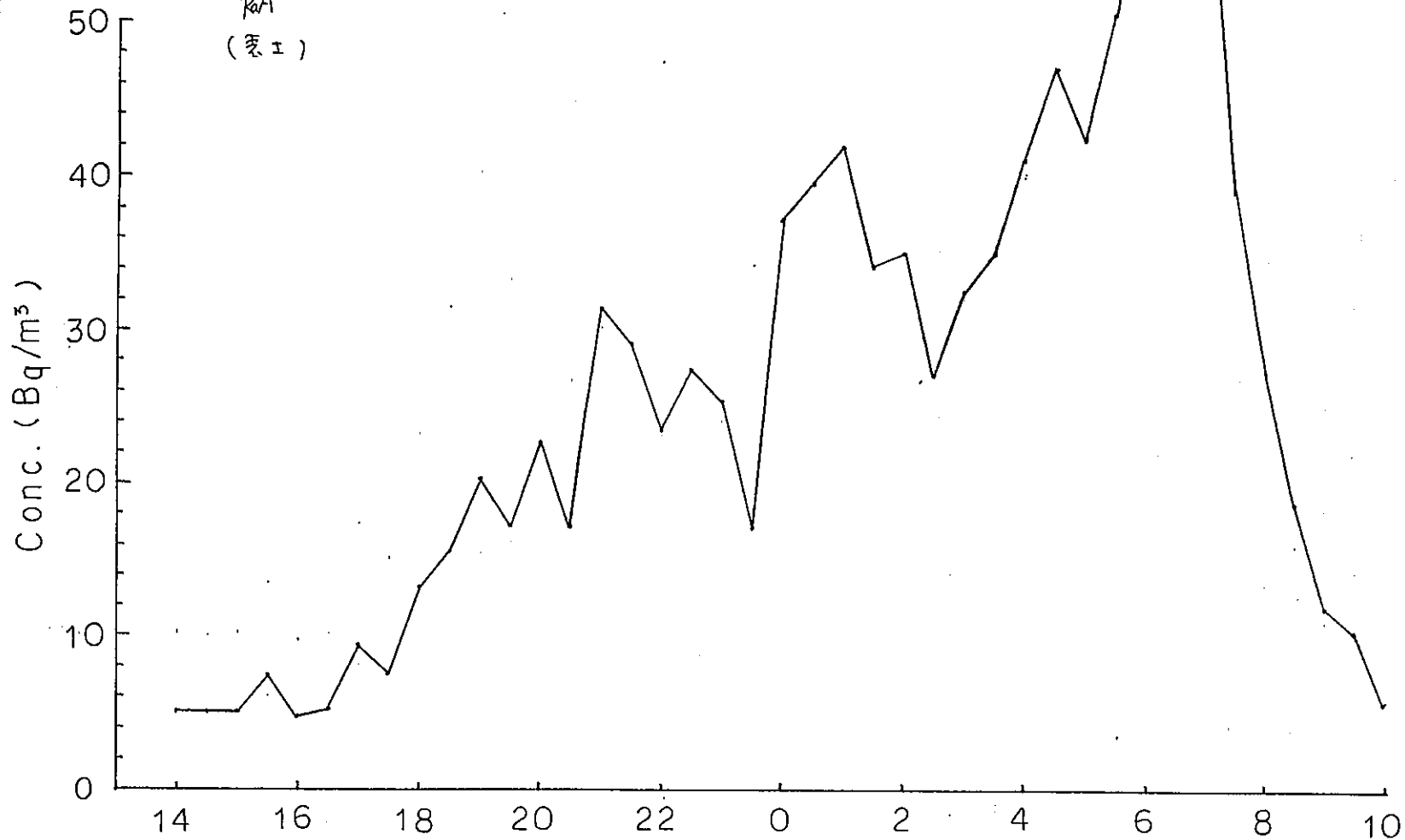


(注) 1. 91. 10. 28 ~ 10. 29

連続 Sampling

PaA

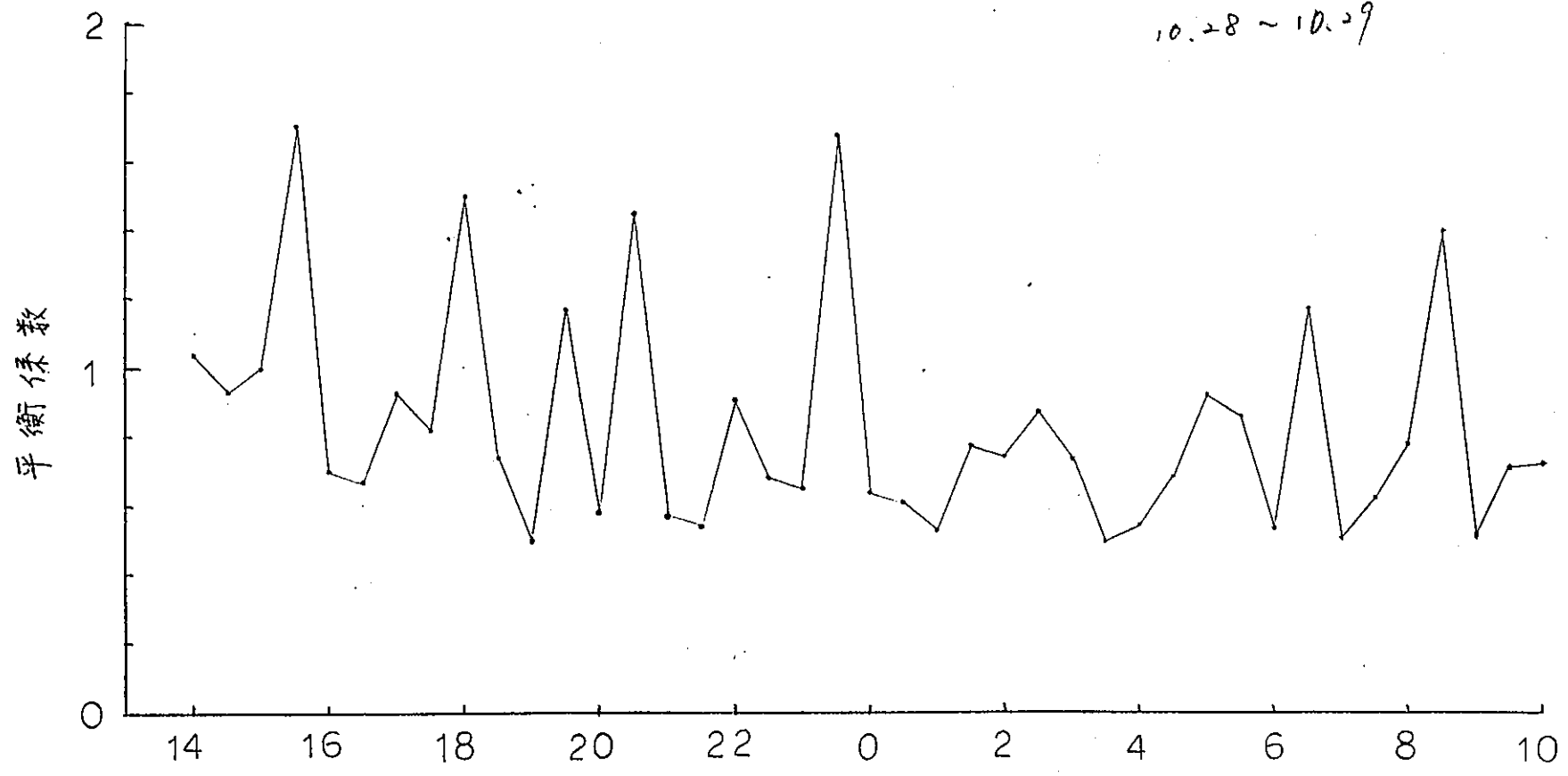
(表工)

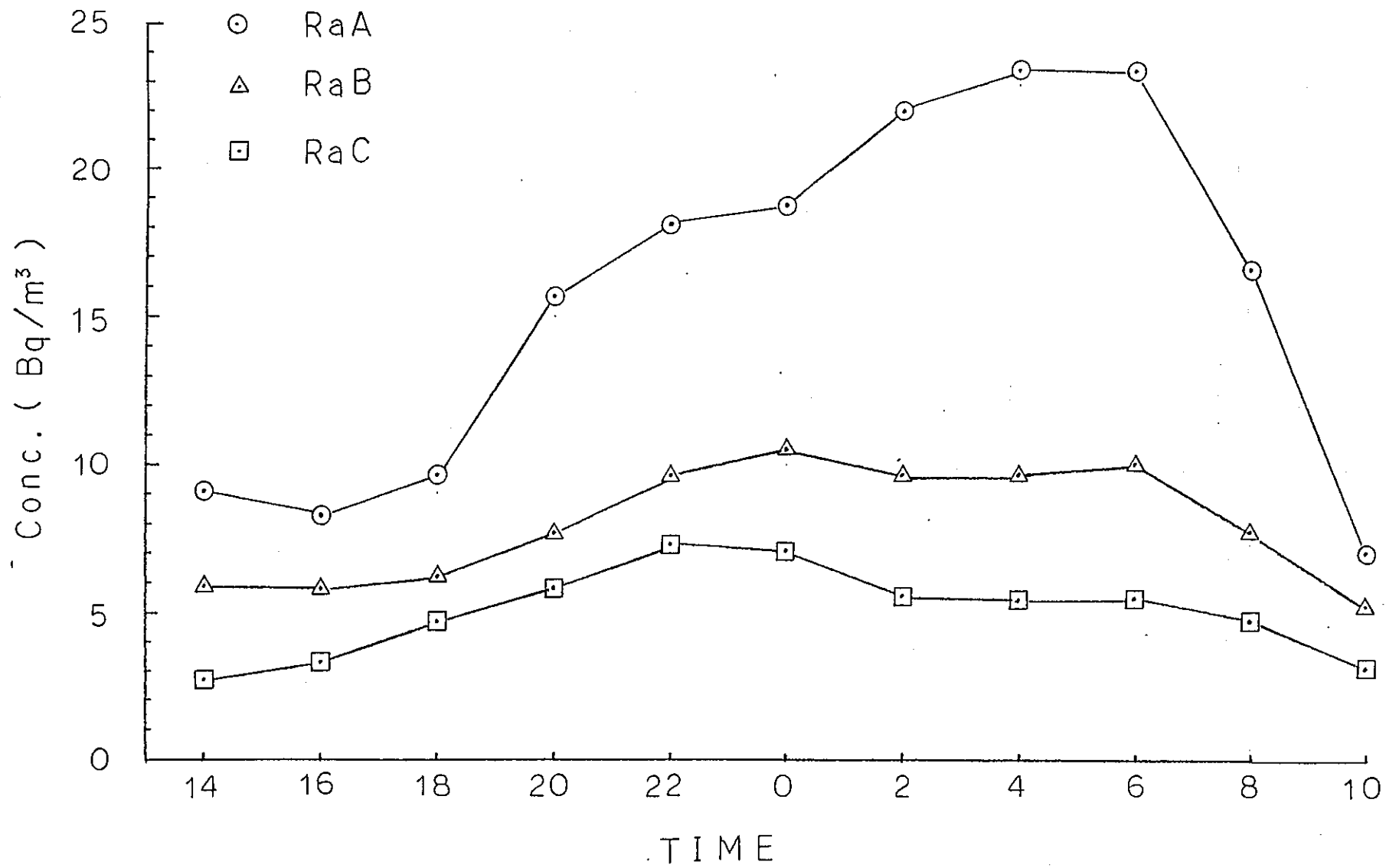


10.28 ~ 29

表工堆積場

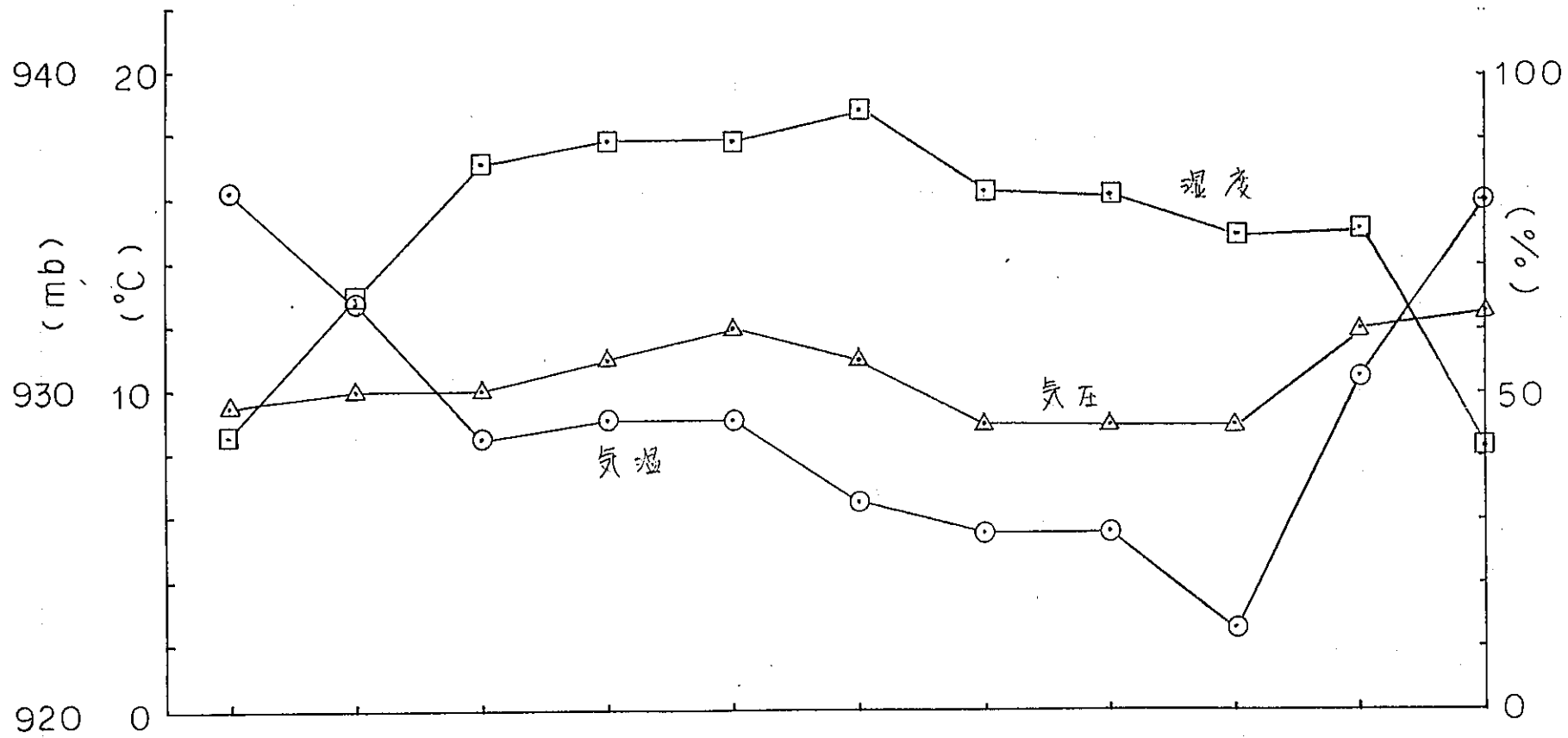
10.28 ~ 10.29



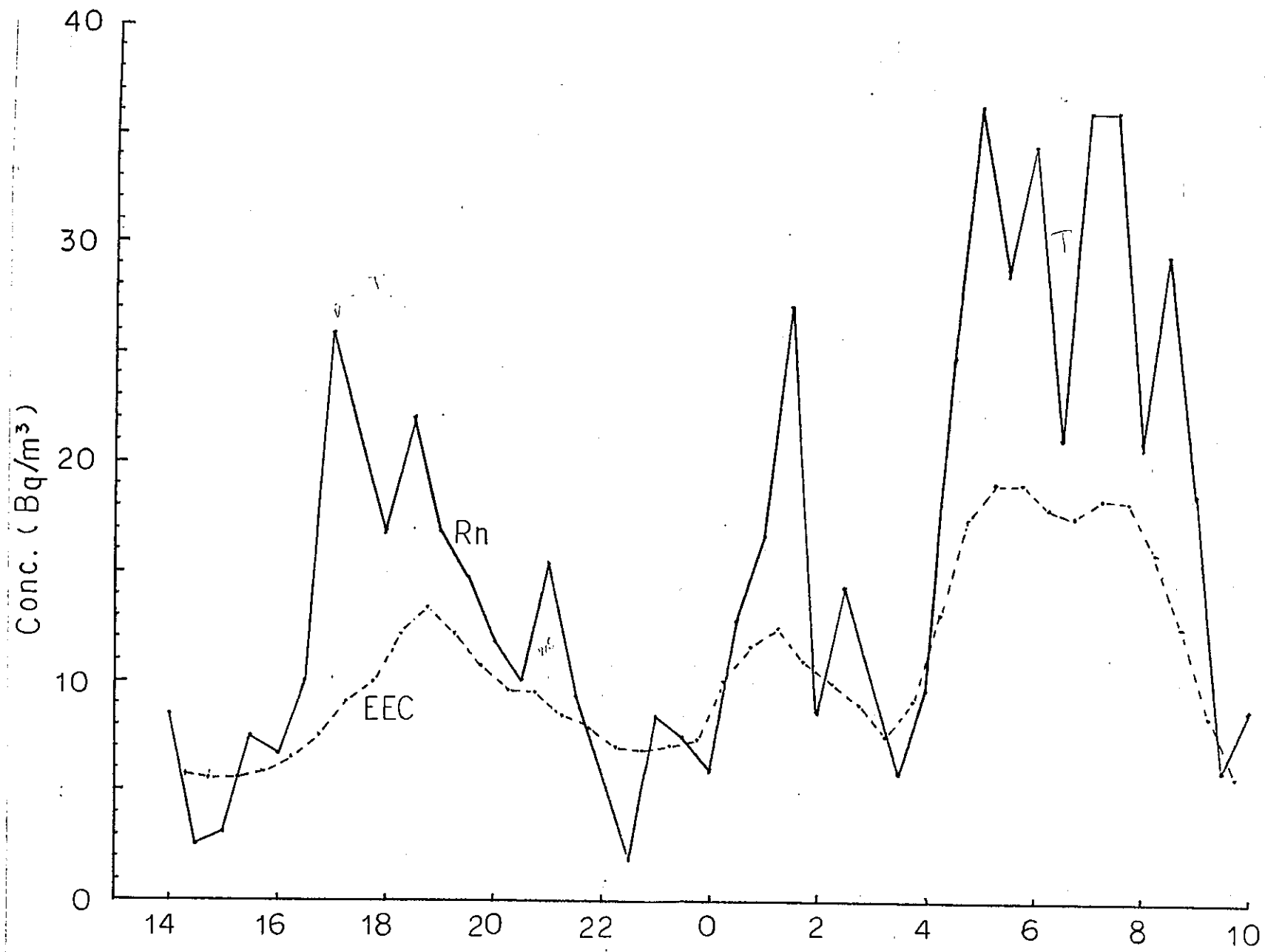


図小. 91. 10. 28 ~ 10. 29

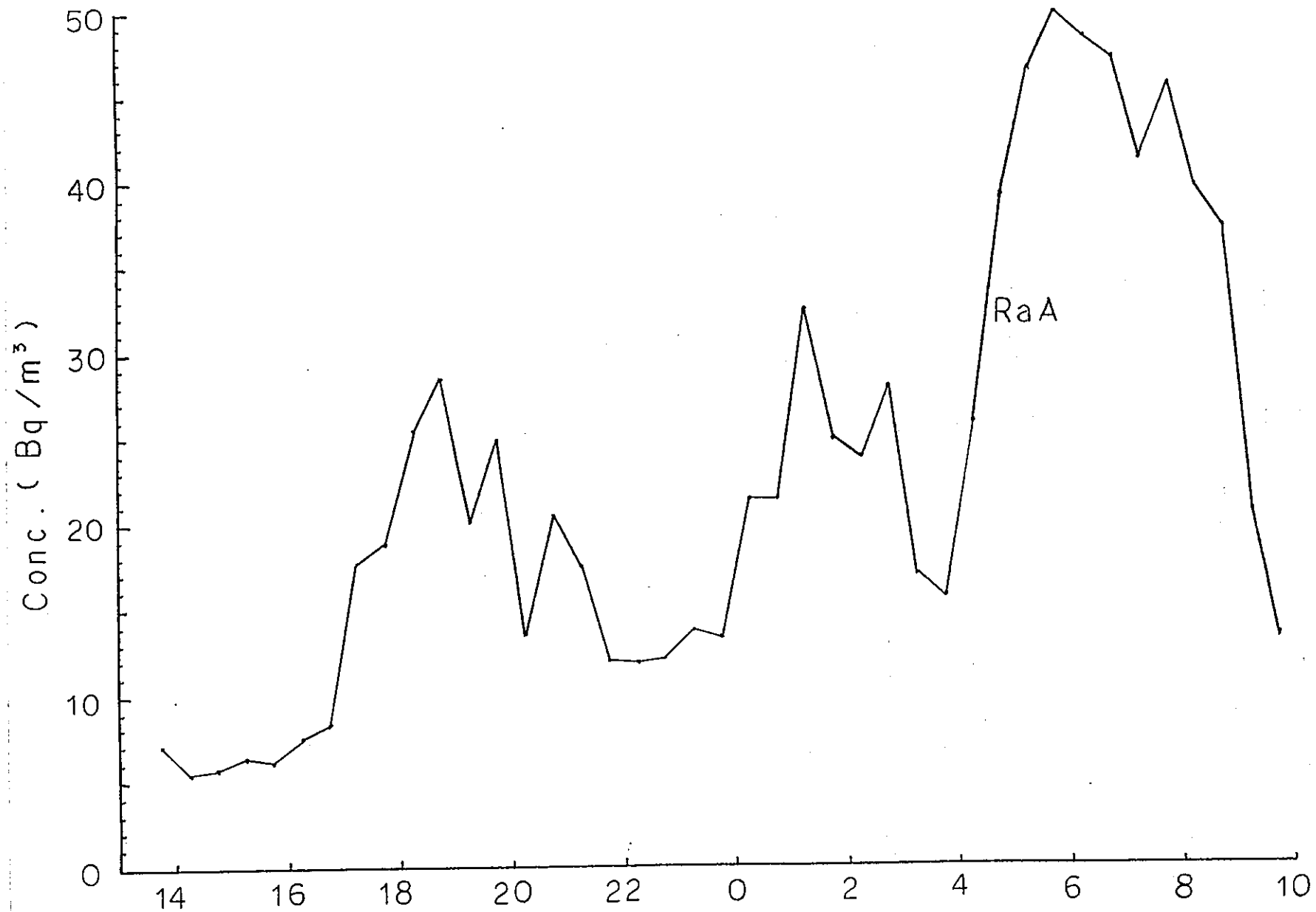
S
E
N
W
S



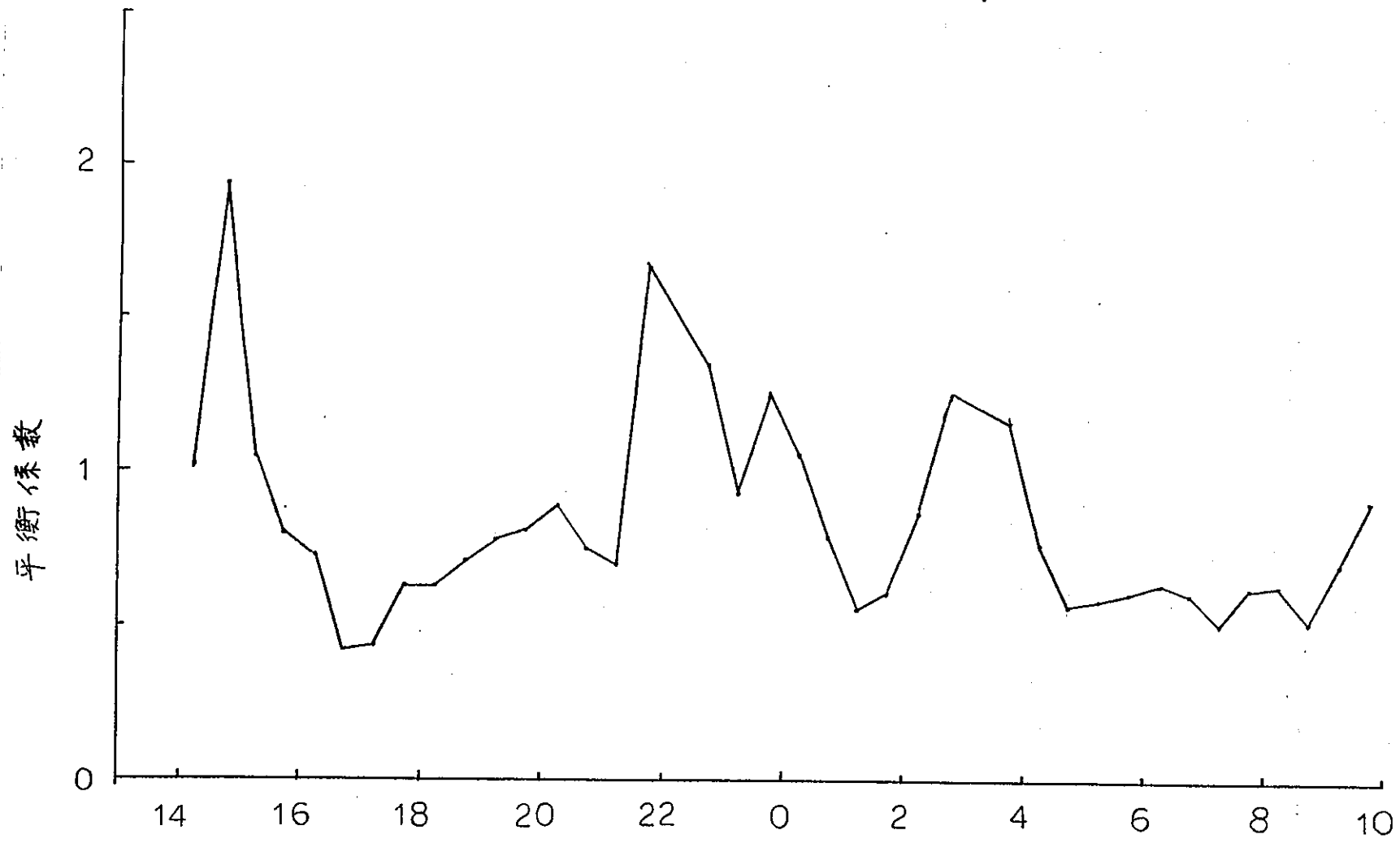
岡山 91.10.28~29



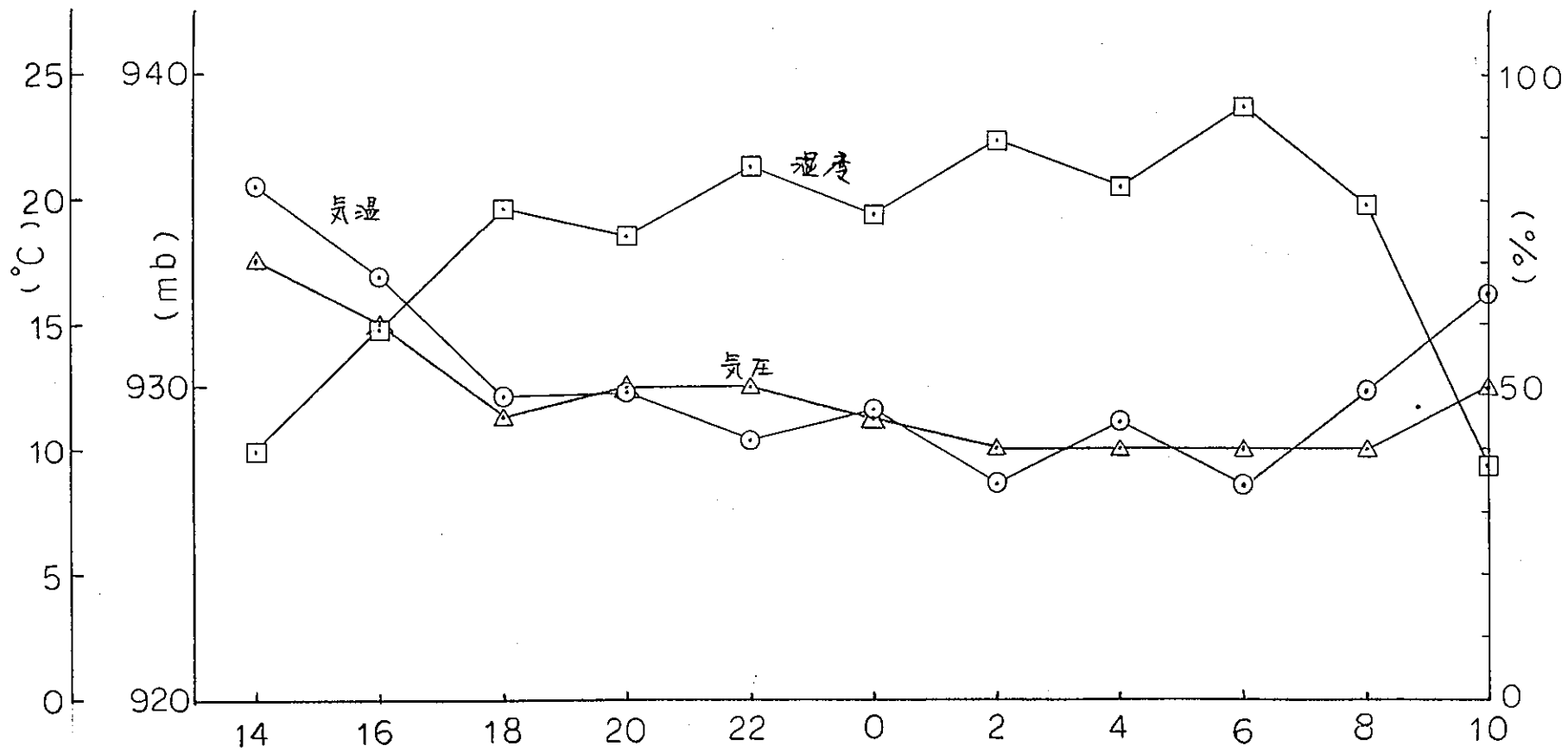
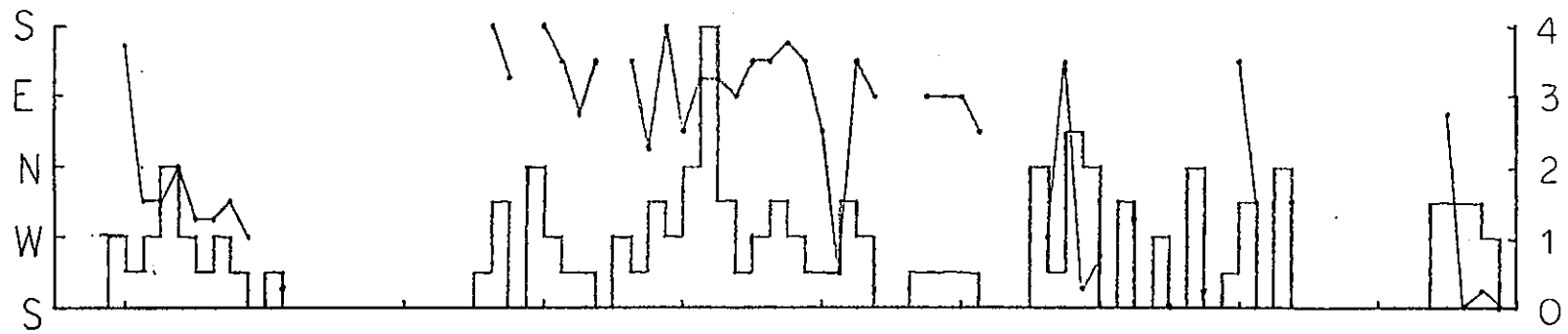
岡山. 表土堆積場 91.10.29~30



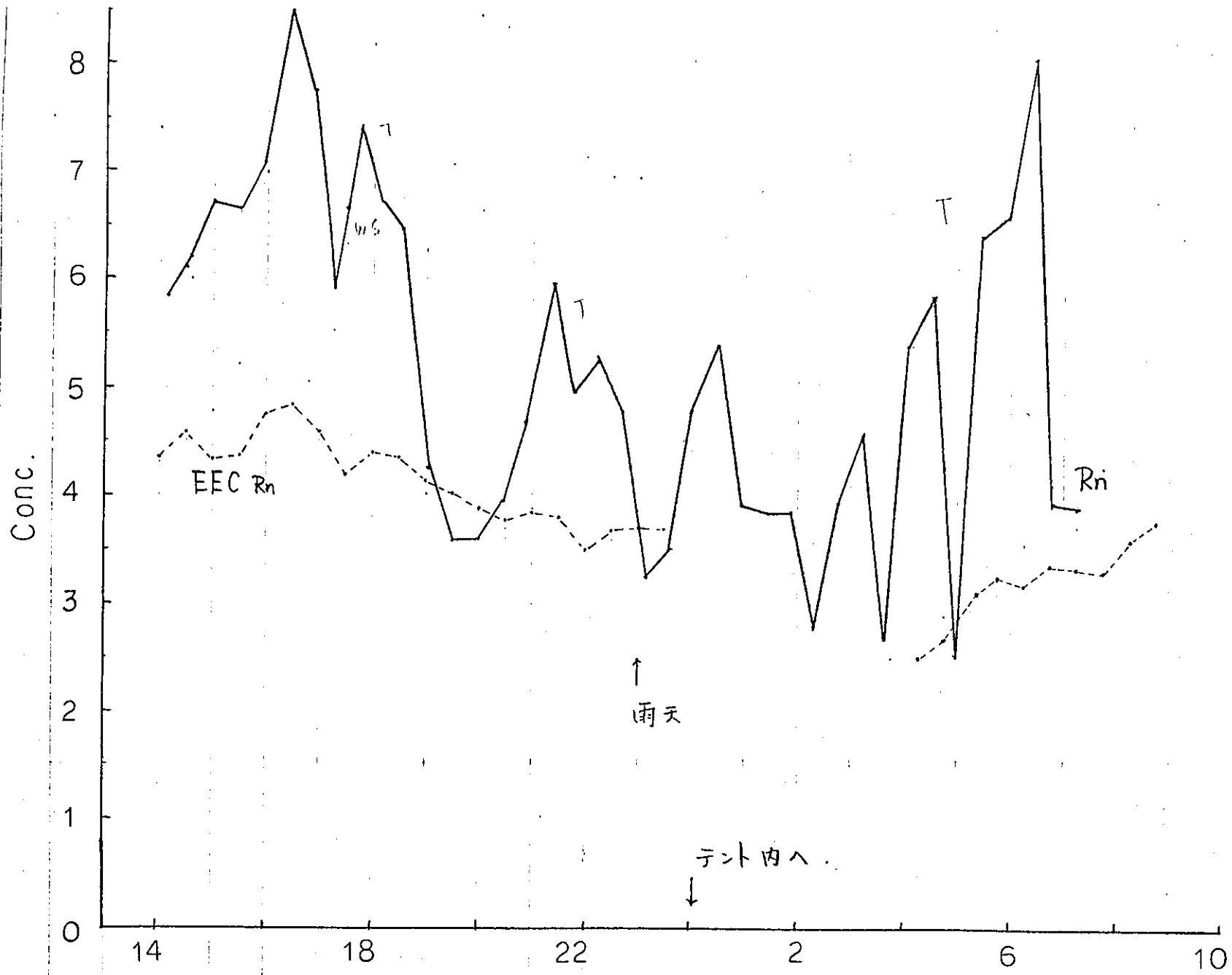
表土堆積場 91.10.29 ~ 30



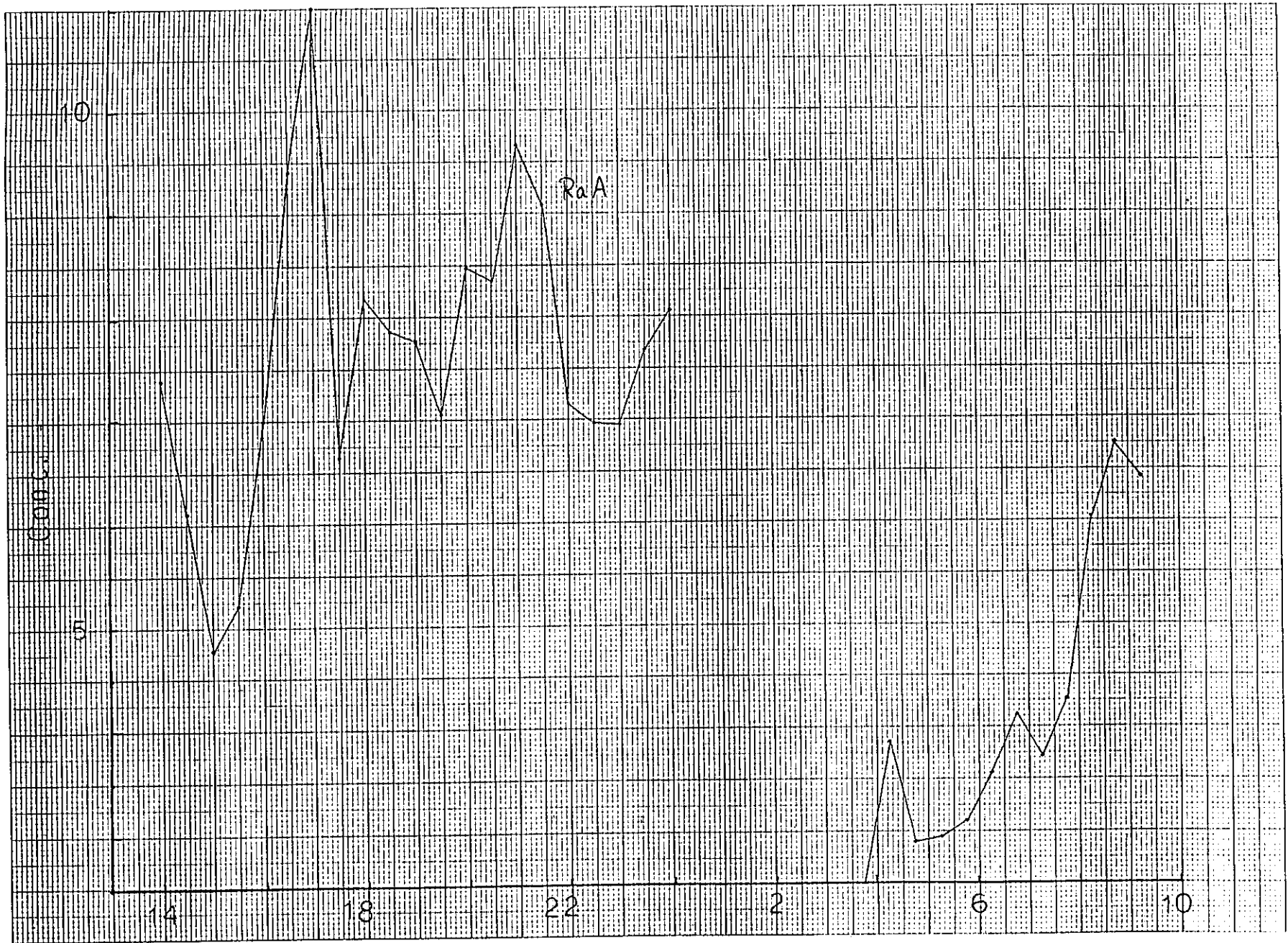
巷士堆積場 61. 10. 29 ~ 30



表土堆積場 91. 10. 29-30



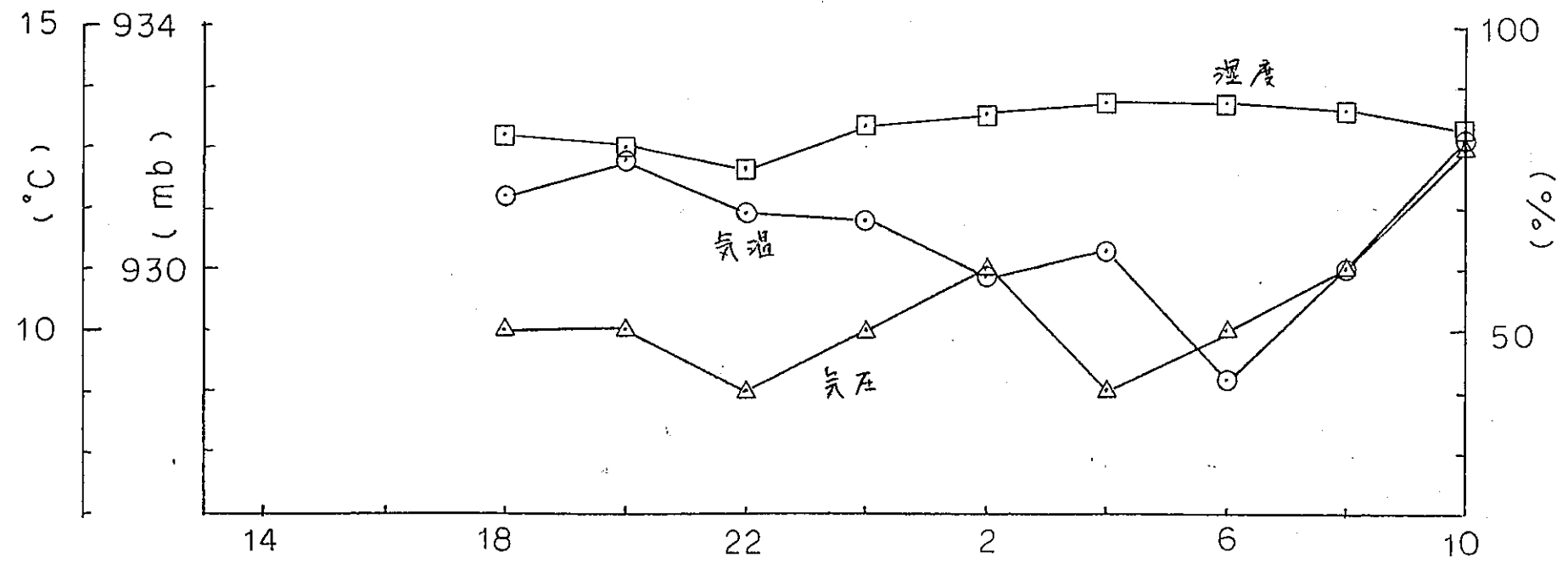
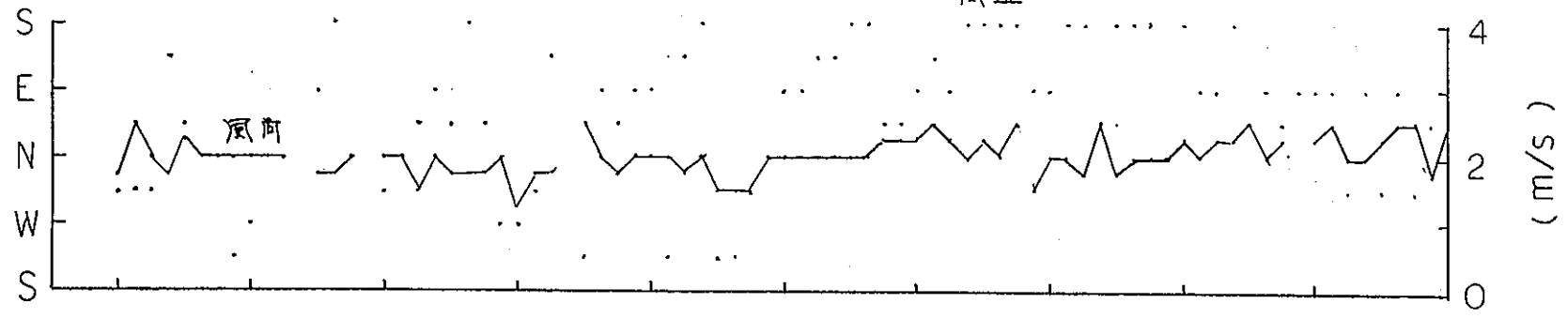
表土堆積場 91.10.30~31



表土堆積場 10.30~31

表土堆積場 10/30 ~ 31

風速



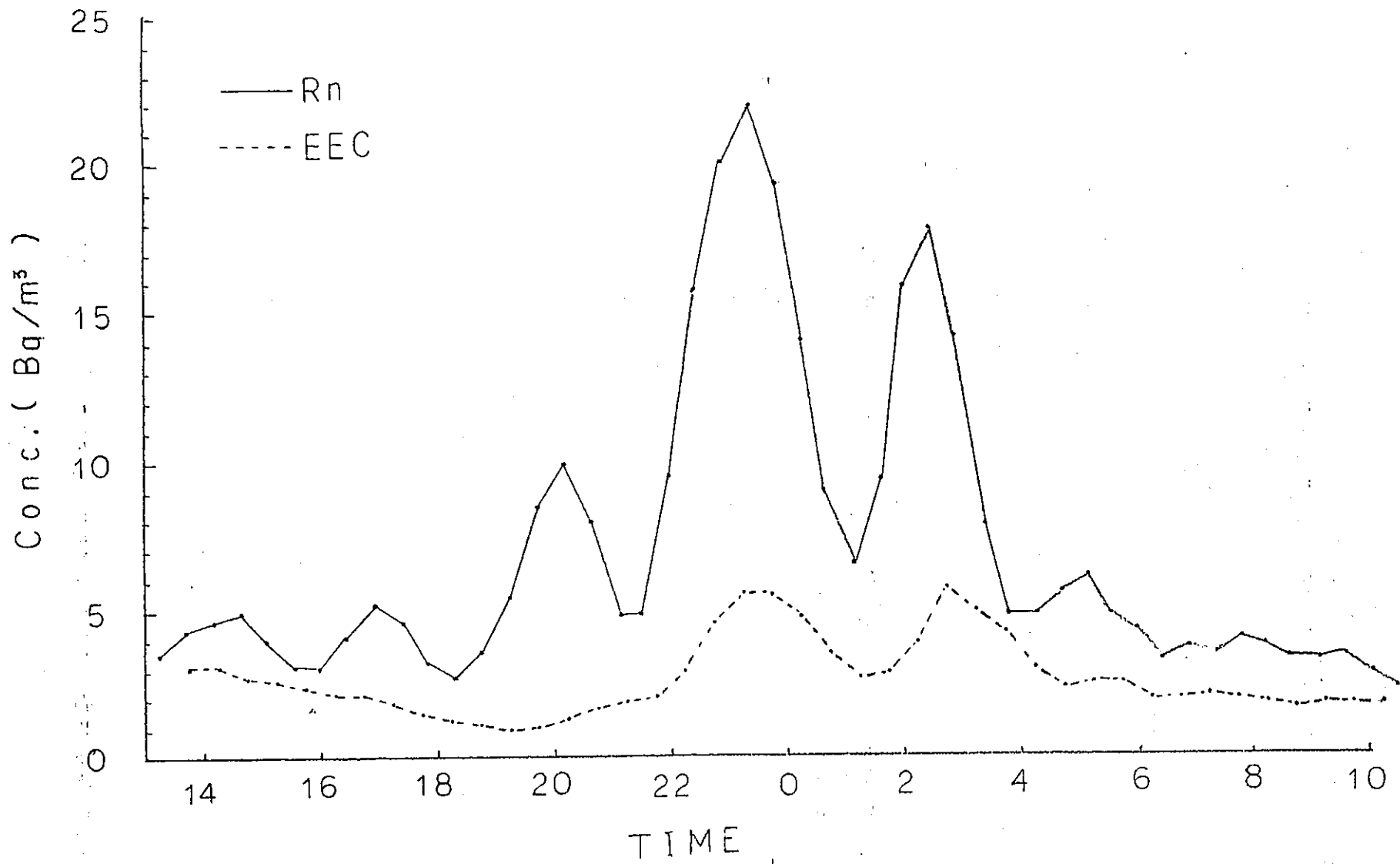
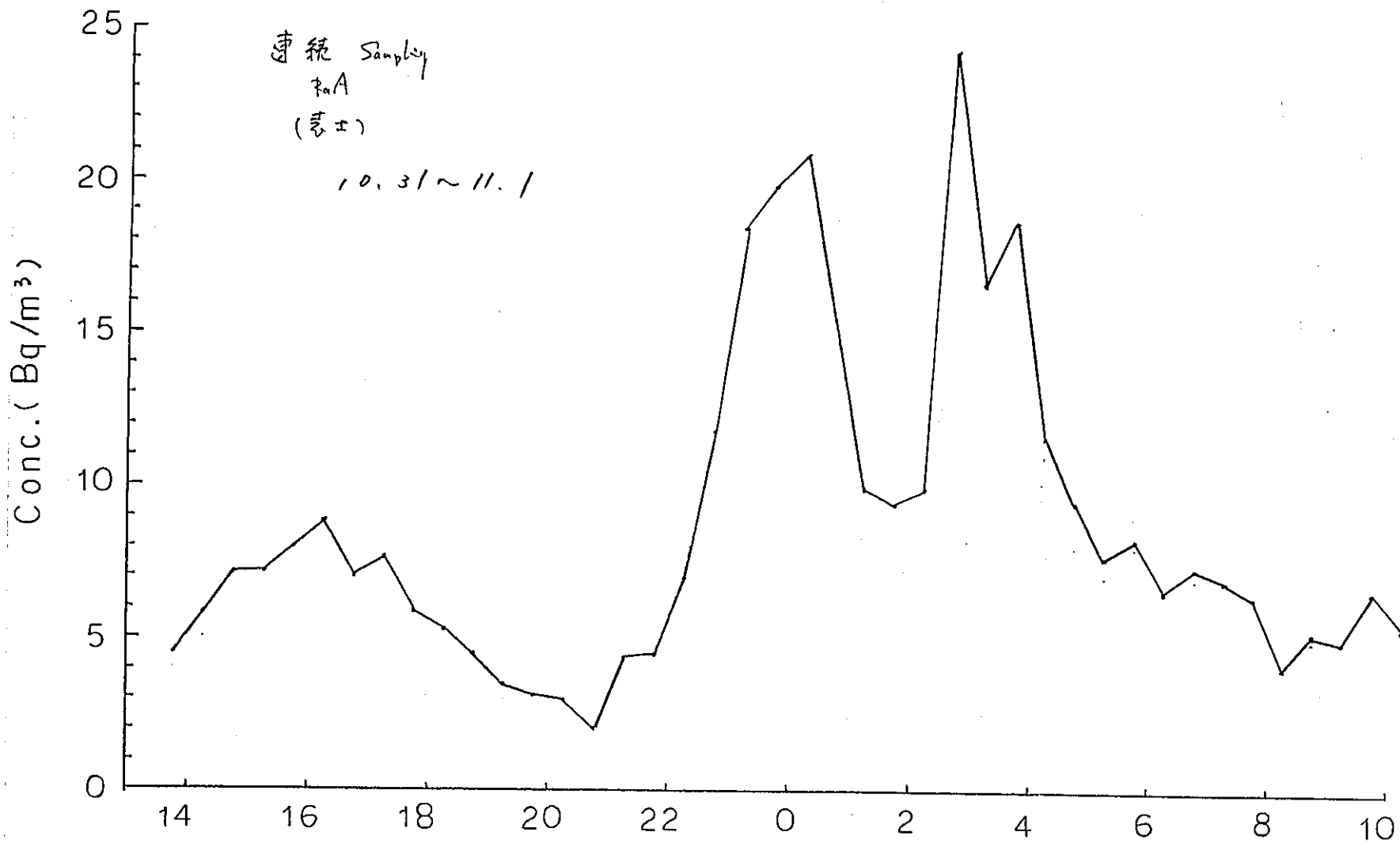
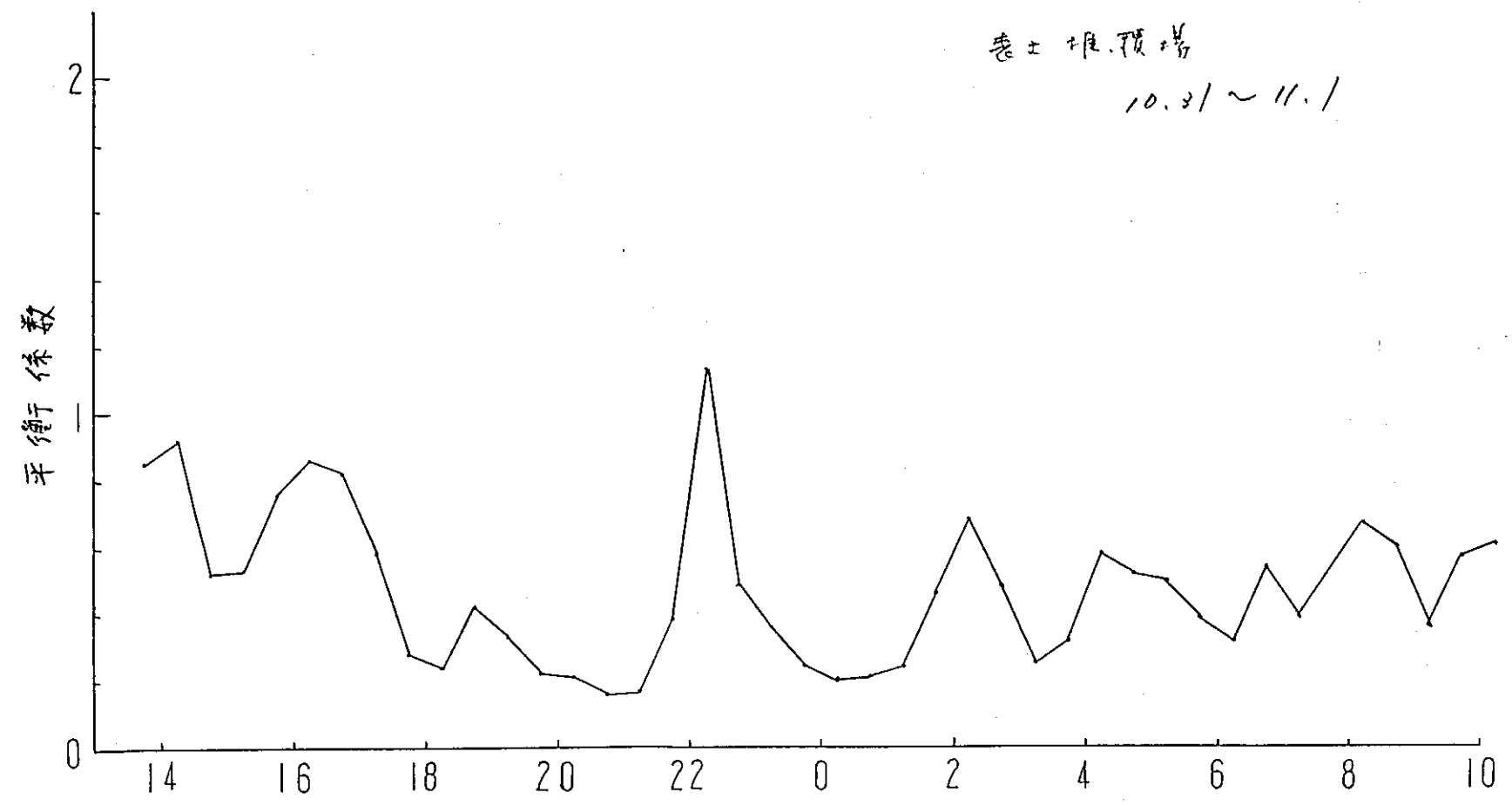
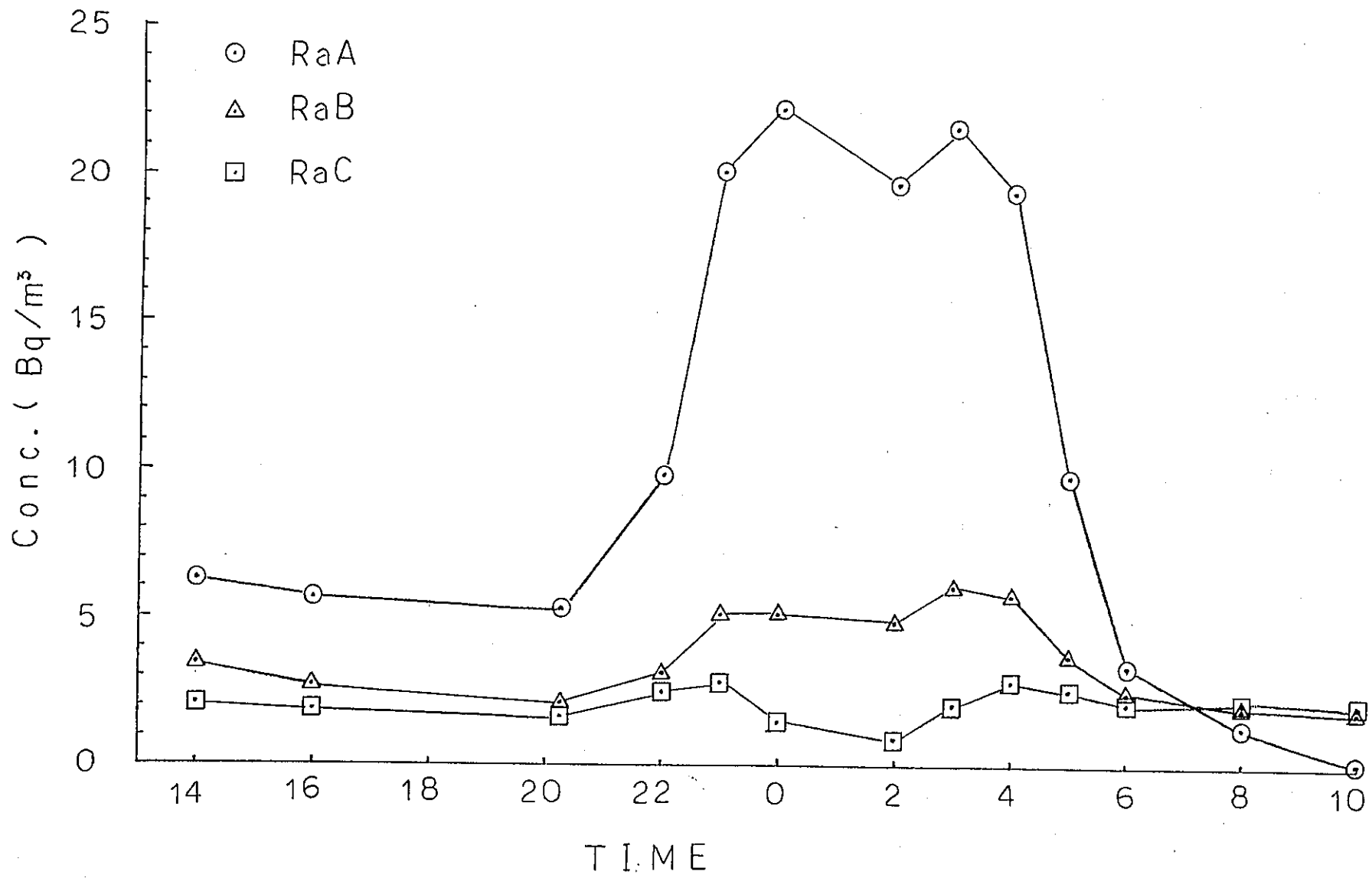


図 1 91. 10. 31 ~ 11. 1

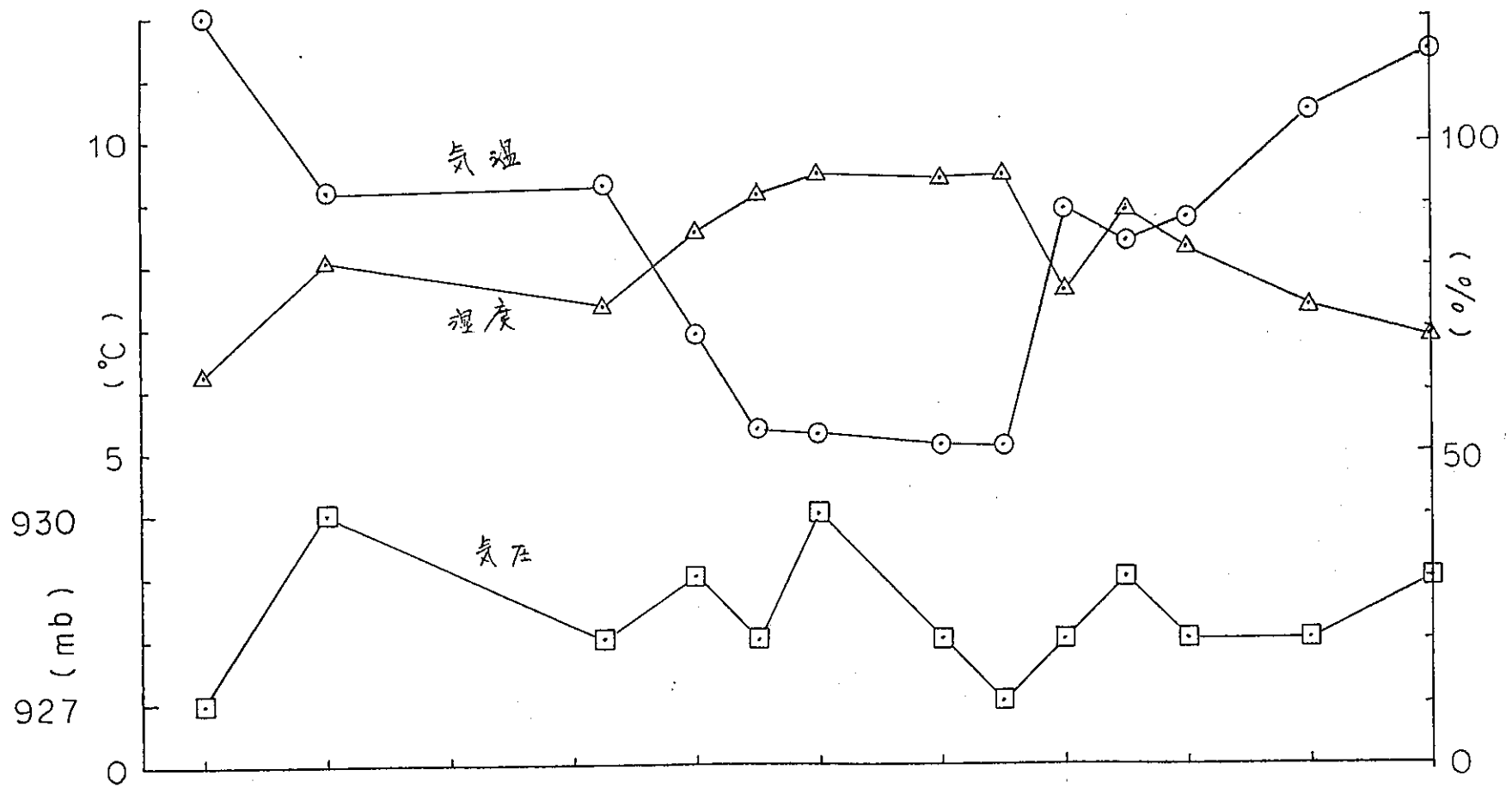
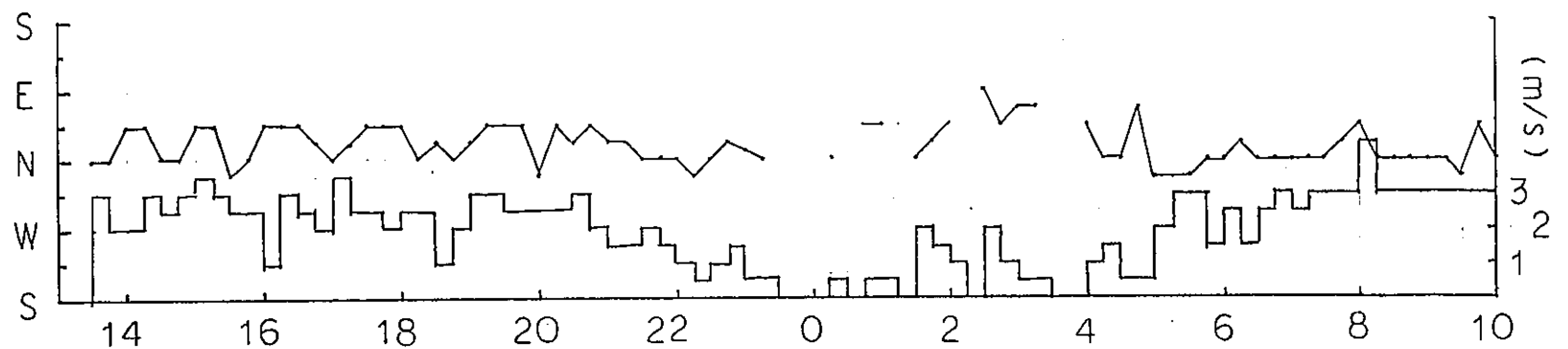


表土堆積場
10.31 ~ 11.1



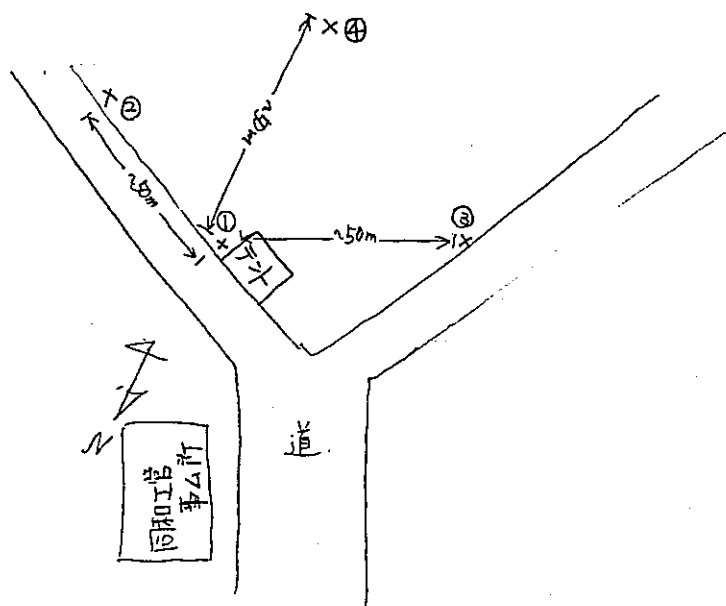


深小. 91. 10. 31 ~ 11. 1



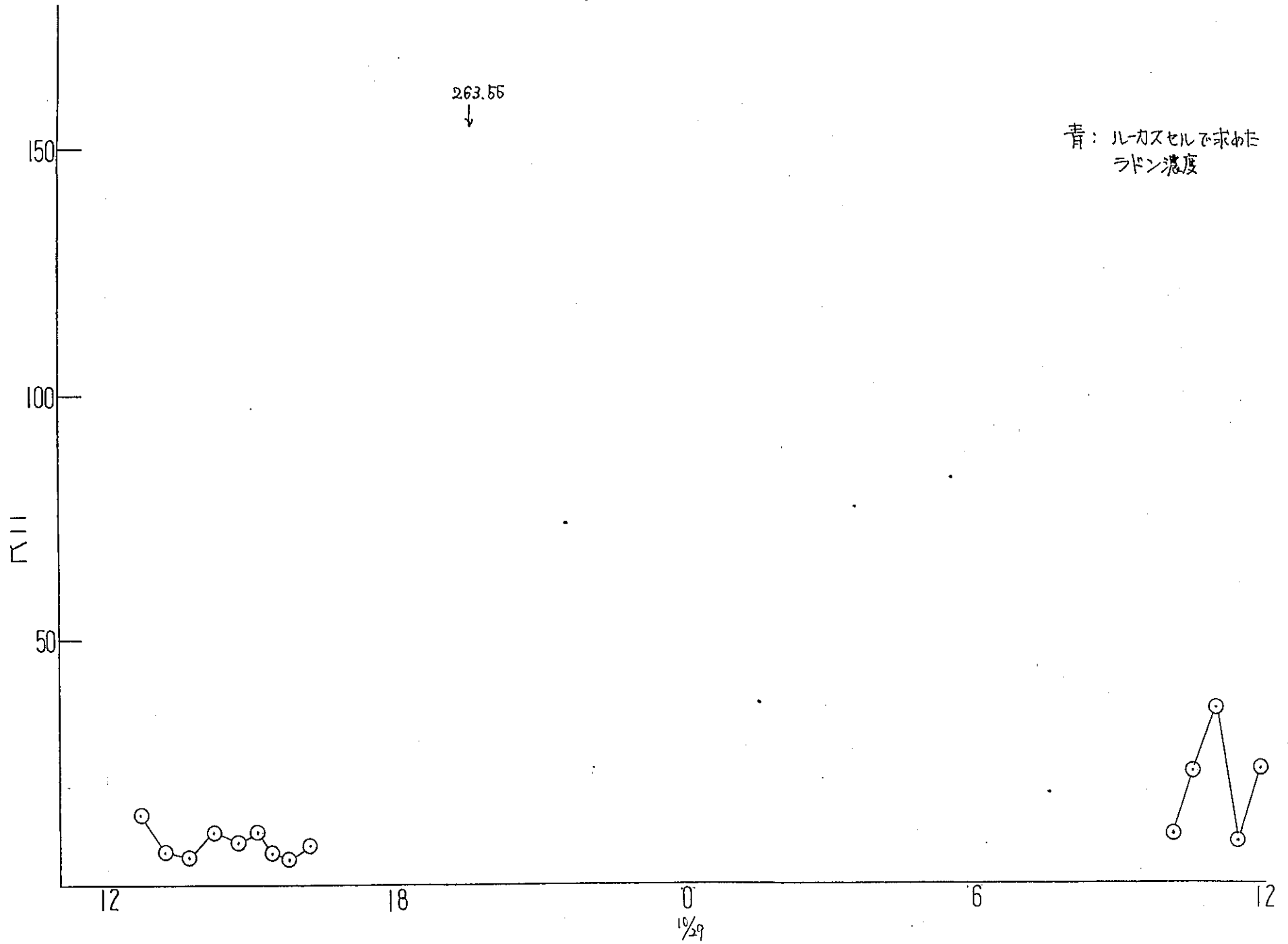
岡山 91.10.31~11.1

表土堆積場

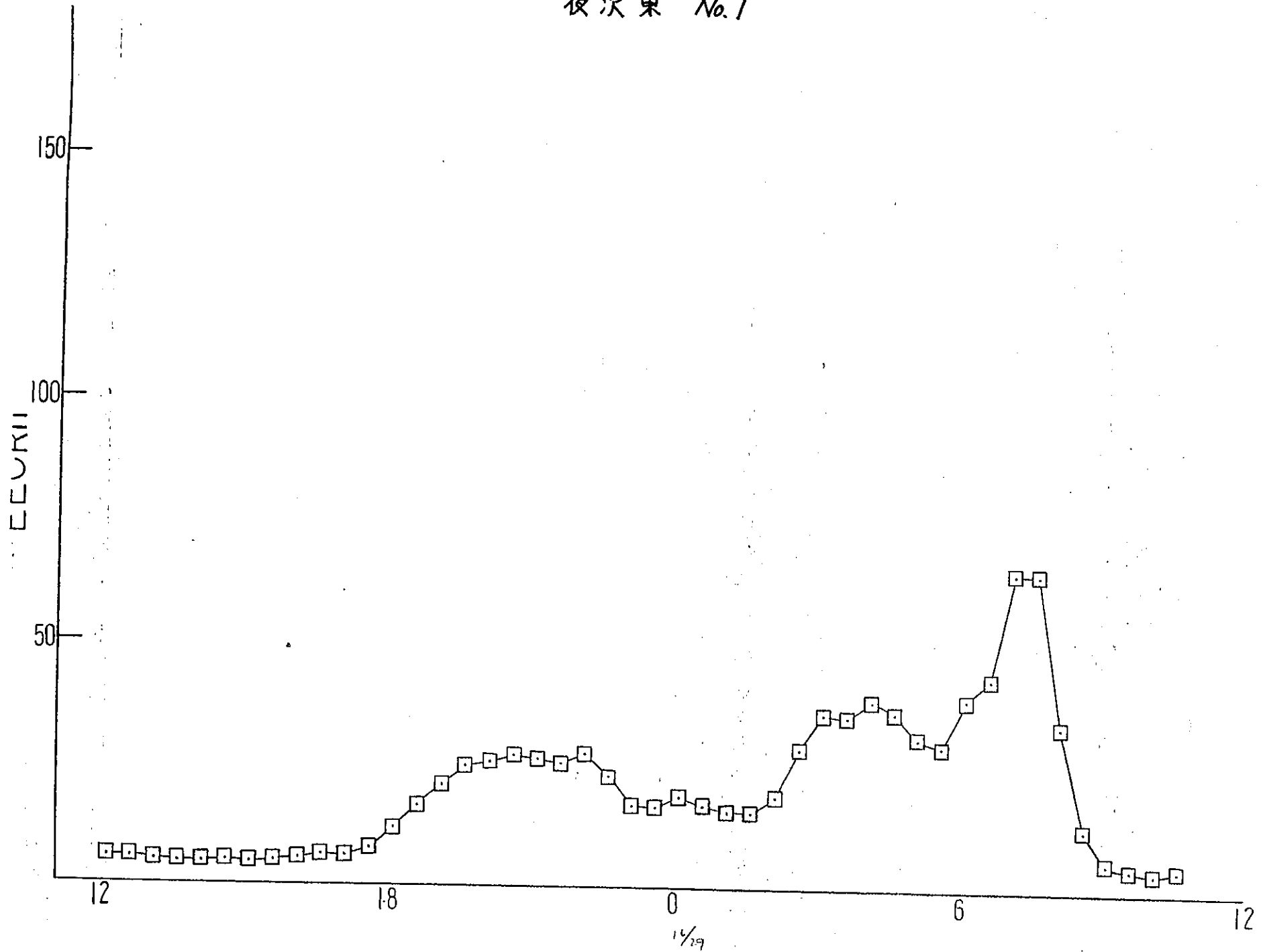


	R_n 湧出量 $Bq/m^2 \cdot sec$	T_n 湧出量	γ 線量率 mR/hr
①	$4.9 \times 10^3 \pm 5.0 \times 10^4$	$6.9 \times 10^1 \pm 3.3 \times 10^1$	0.024
②	$2.4 \times 10^3 \pm 5.0 \times 10^4$	$3.4 \times 10^1 \pm 2.1 \times 10^1$	0.024
③	$8.5 \times 10^3 \pm 1.2 \times 10^3$	$4.1 \times 10^1 \pm 2.4 \times 10^1$	0.024
④	$8.1 \times 10^3 \pm 1.1 \times 10^3$	$5.3 \times 10^1 \pm 2.6 \times 10^1$	0.024
平均	$5.6 \times 10^3 \pm 4.0 \times 10^4$	$4.9 \times 10^1 \pm 1.3 \times 10^1$	

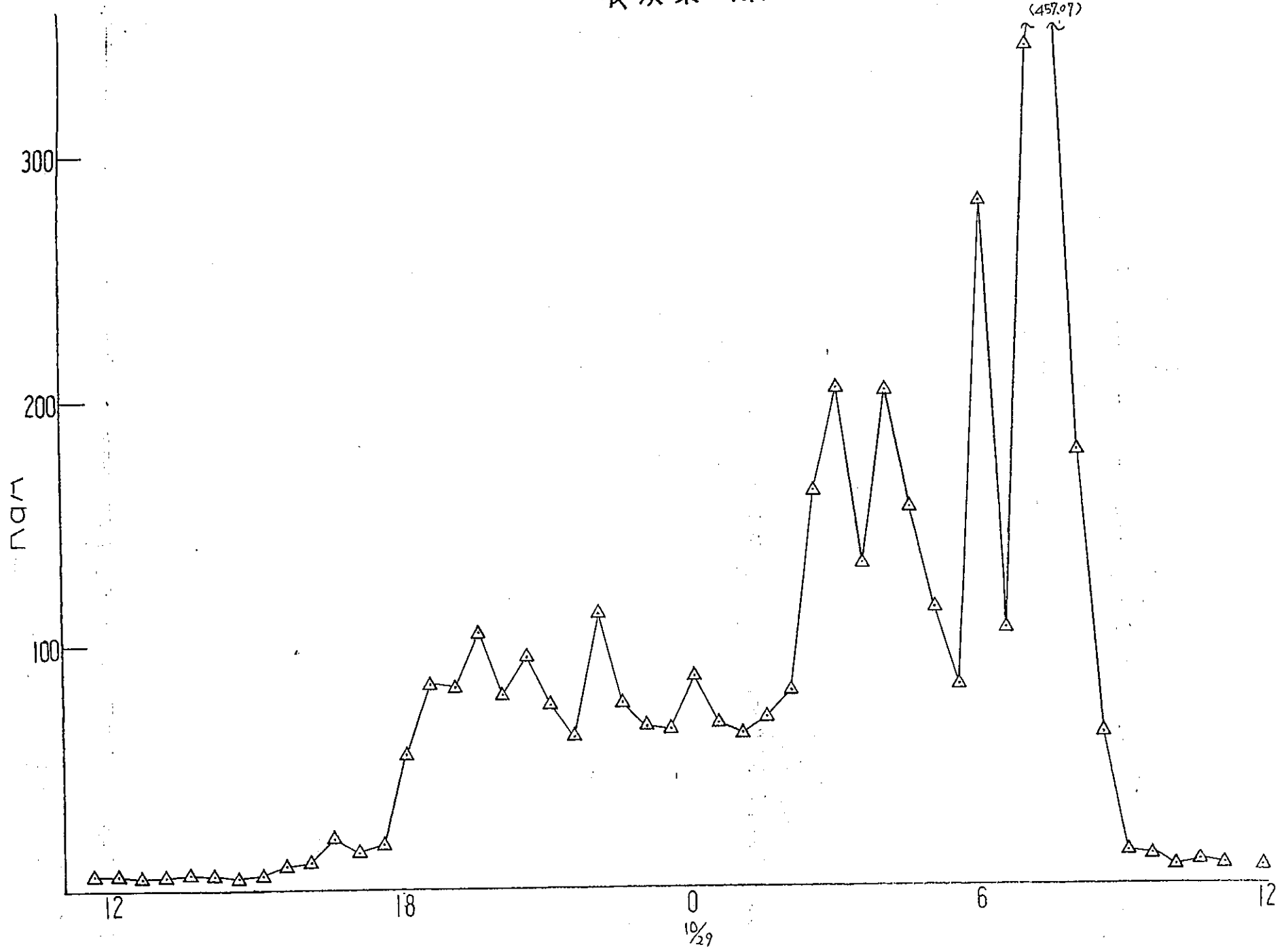
夜次東 No.1



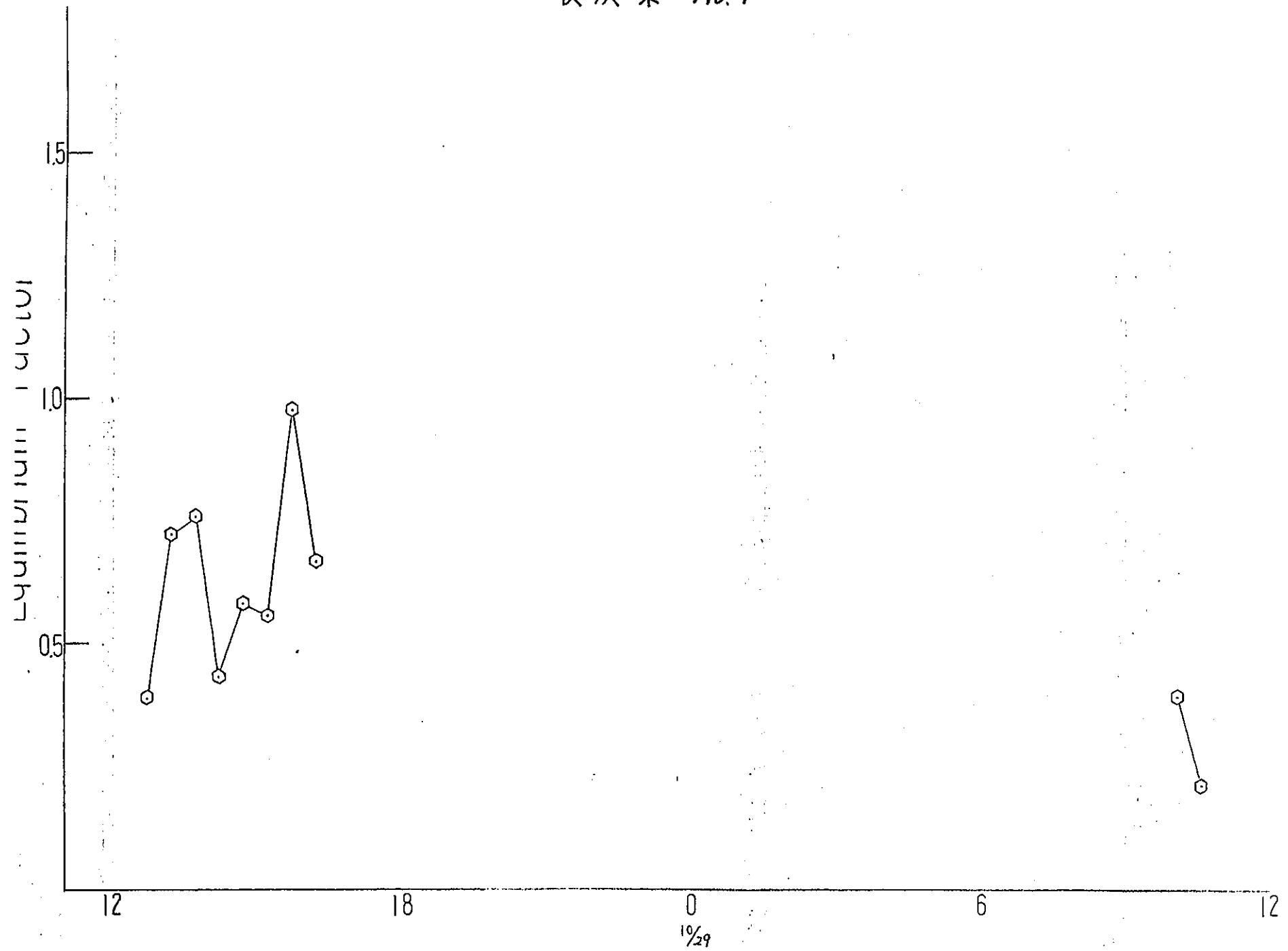
夜次東 No.1



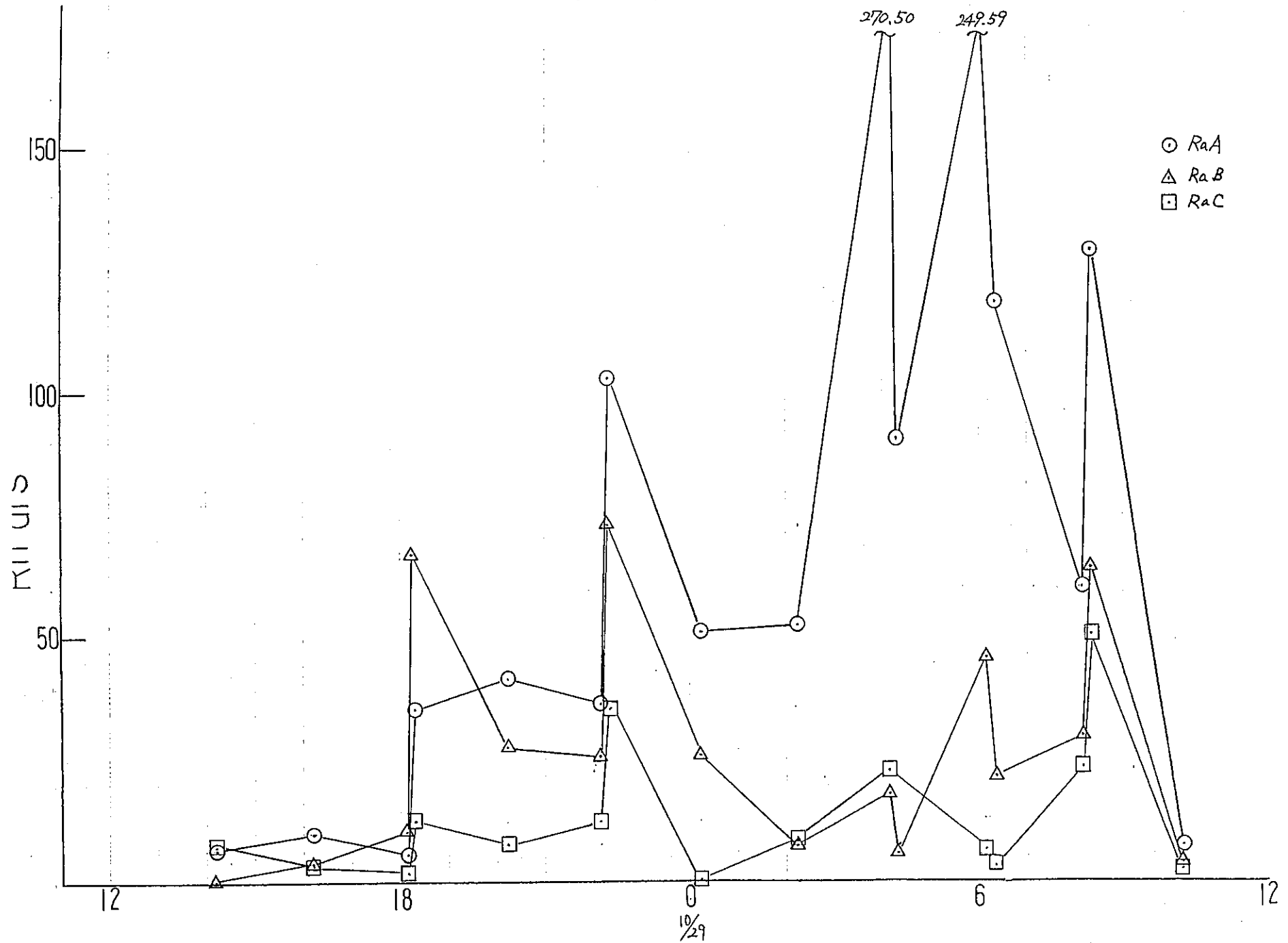
夜次東 No. 1



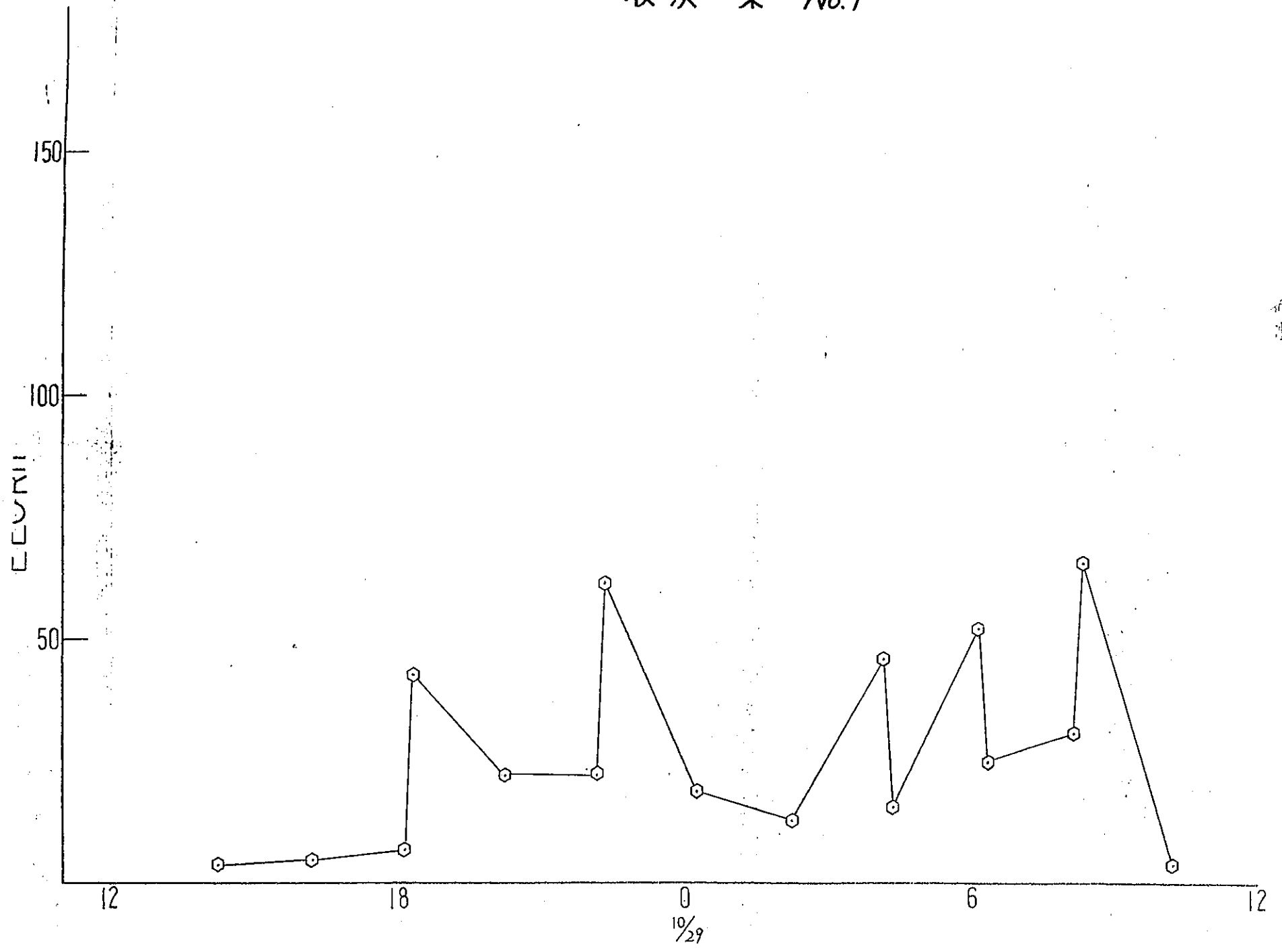
夜次東 No. 1



夜次東 No.1

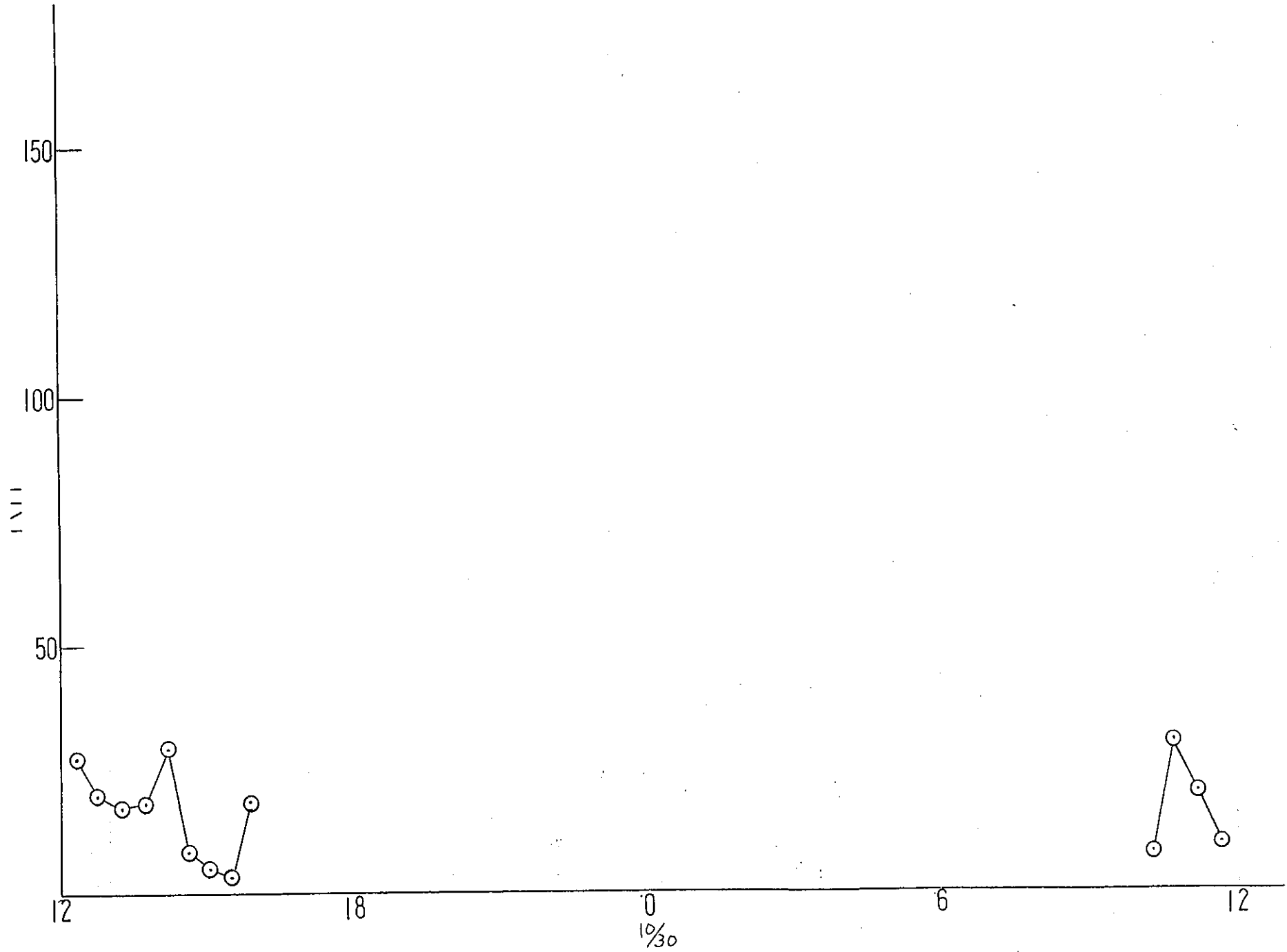


夜次 東 No.1

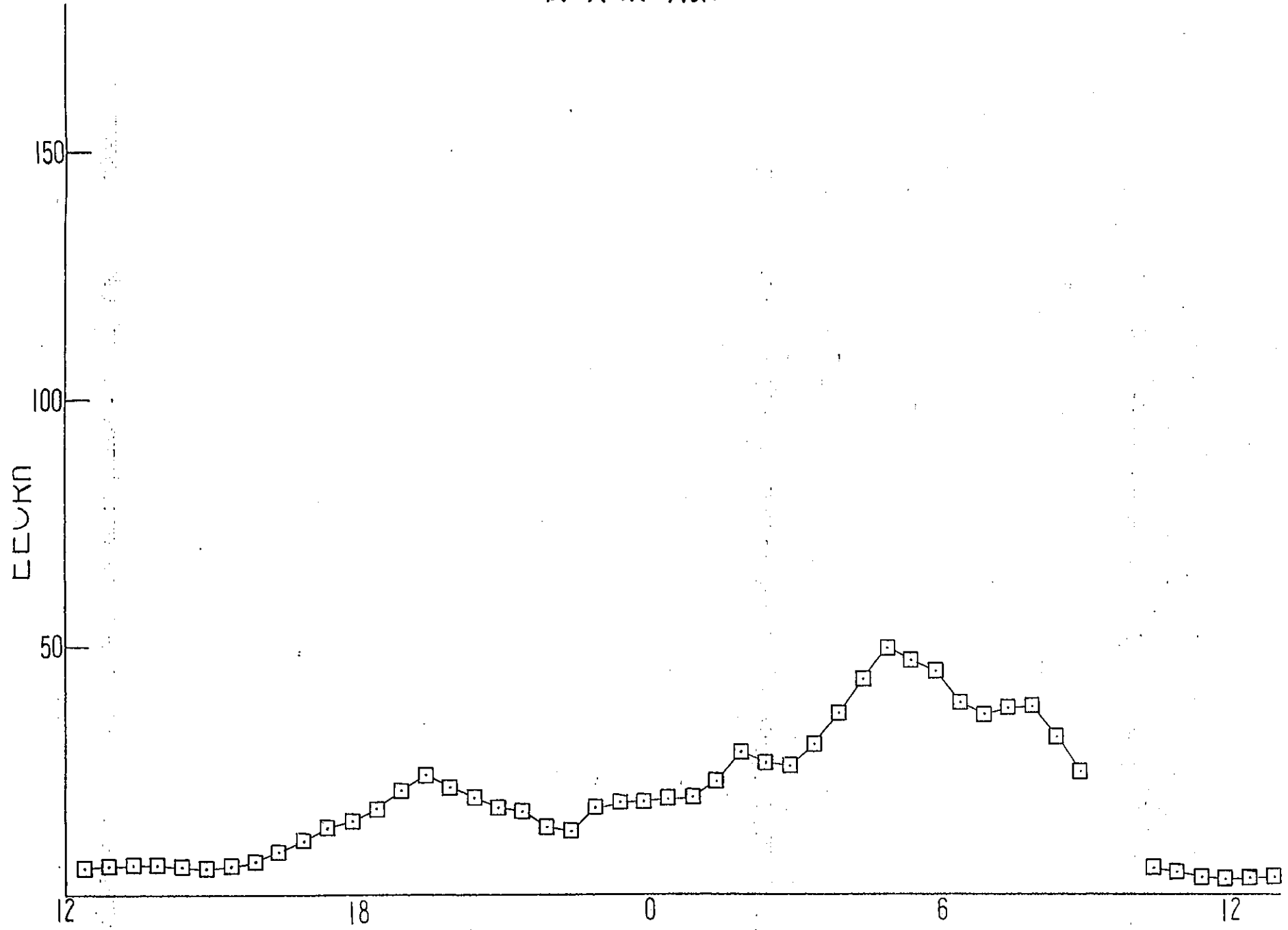


平均
濃度

夜次東 No.2

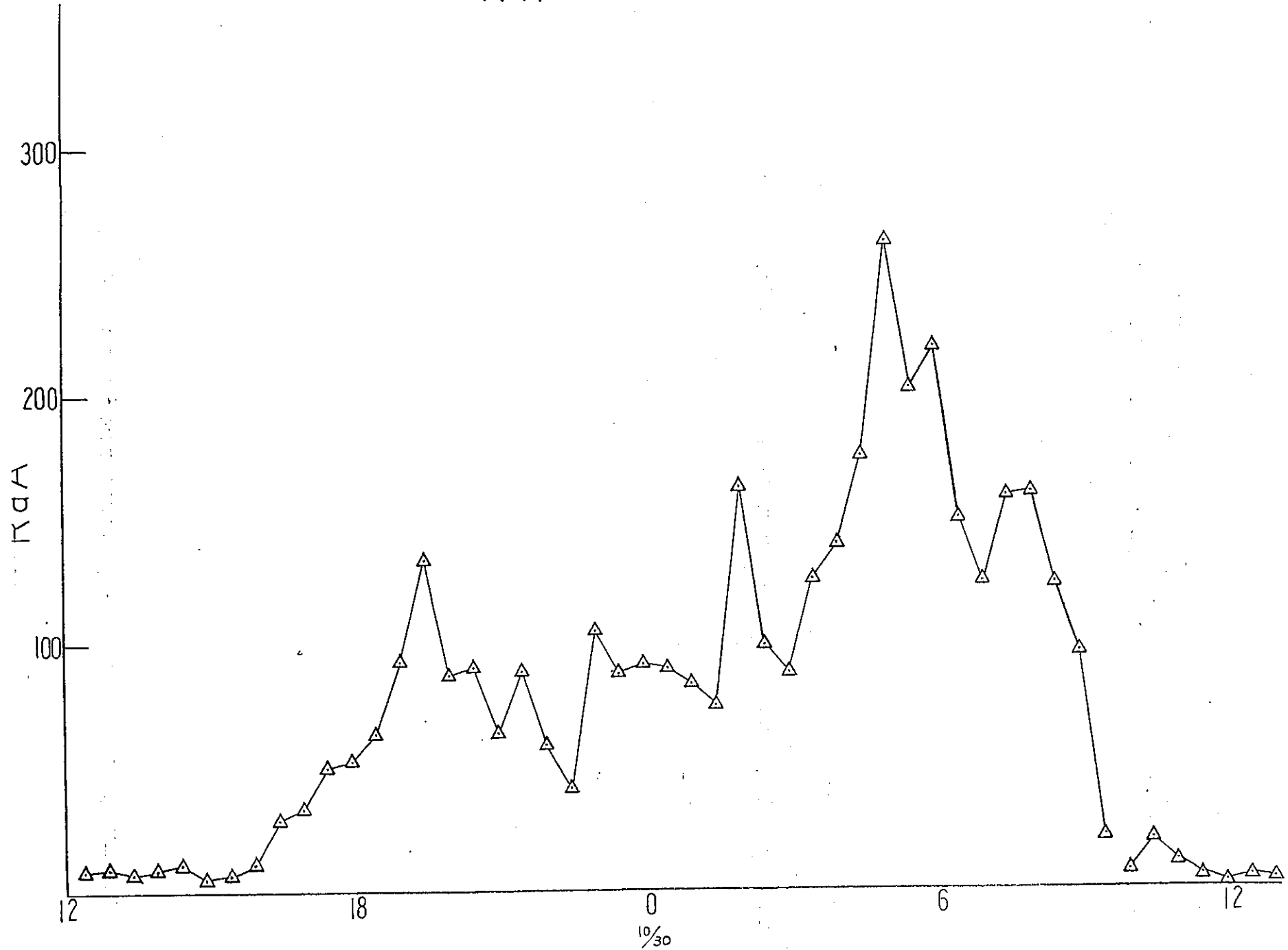


夜次東 No.2

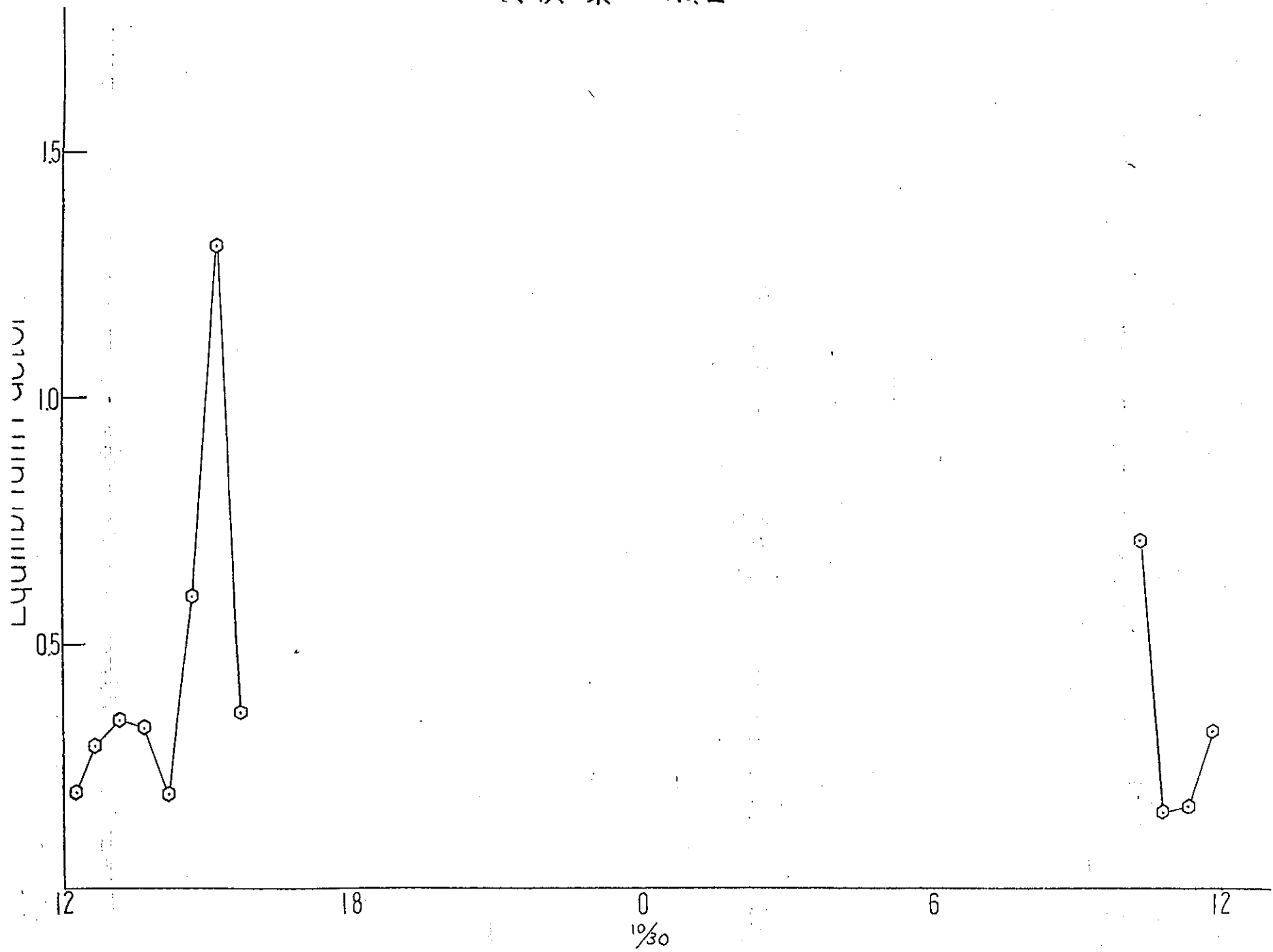


30B?

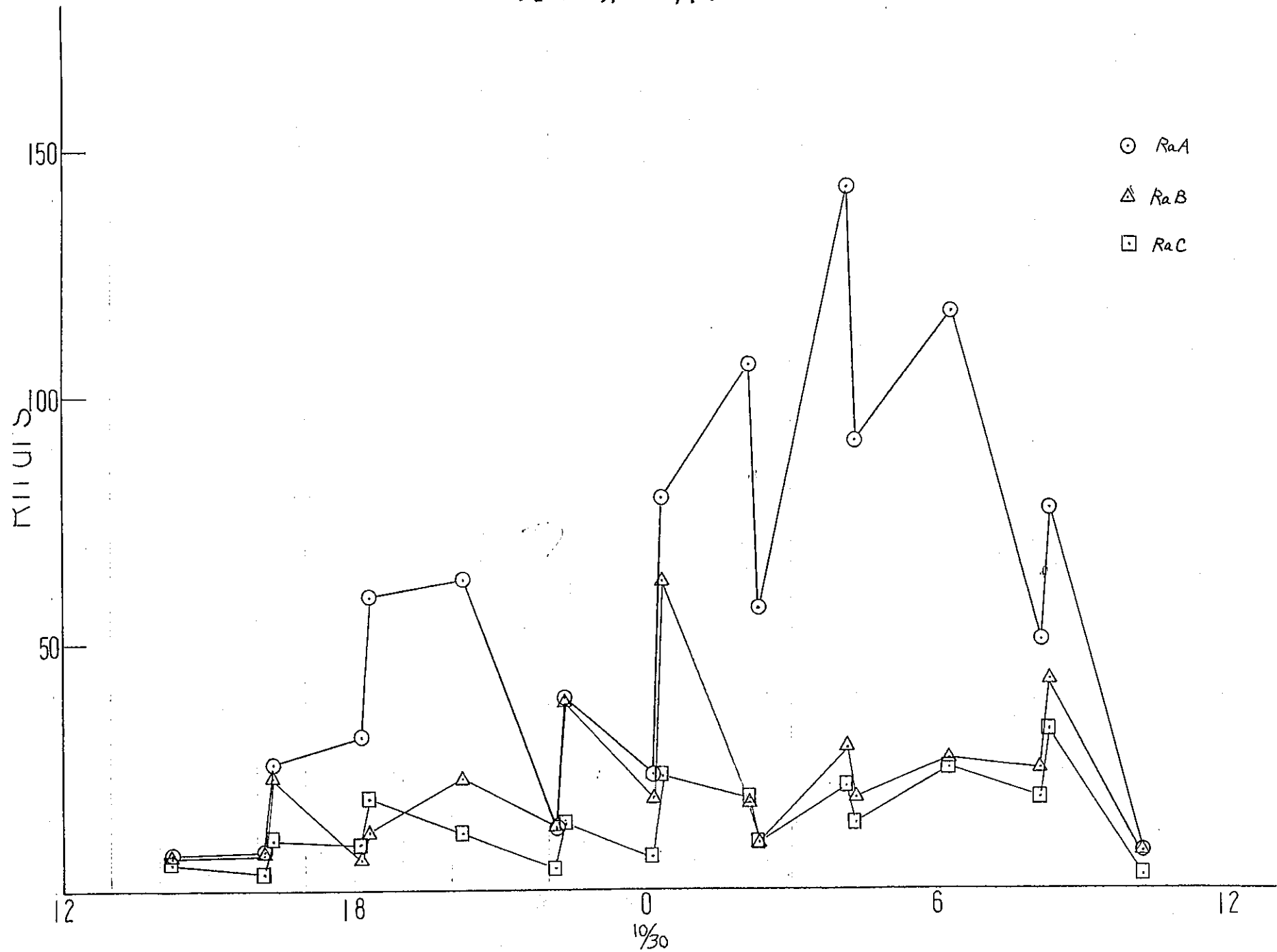
夜尺東 No.2



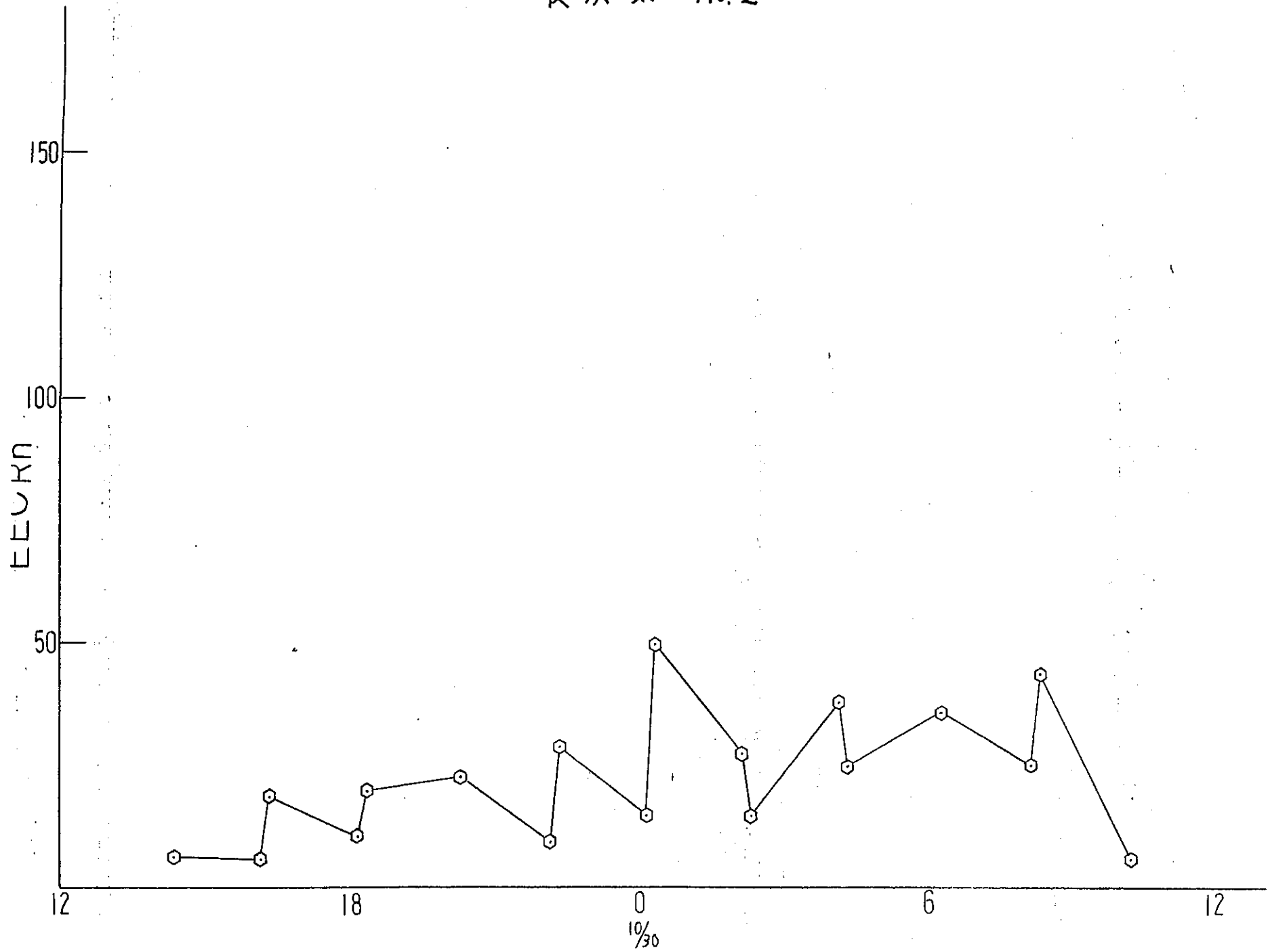
東次 No. 2



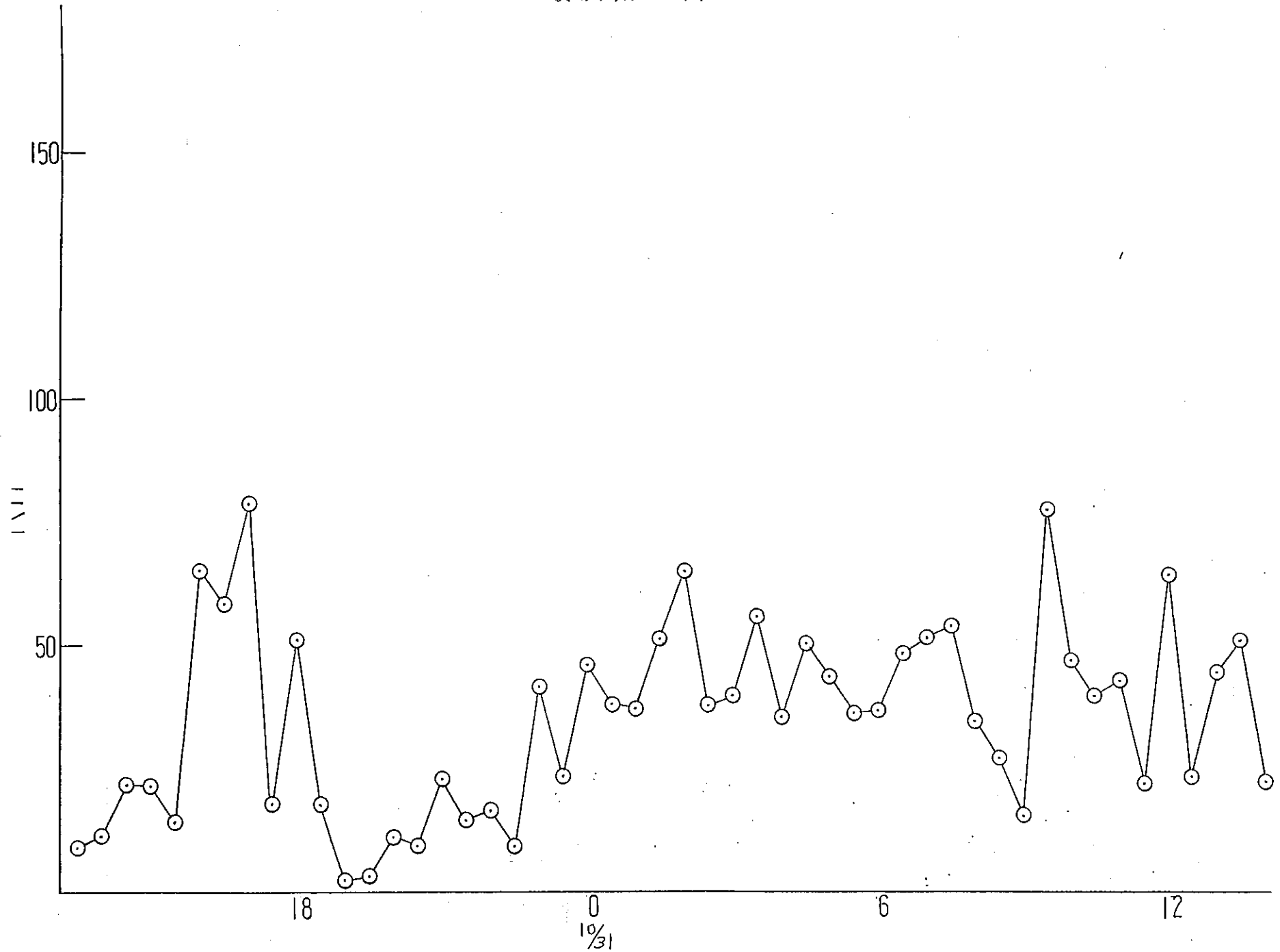
夏次東 No. 2



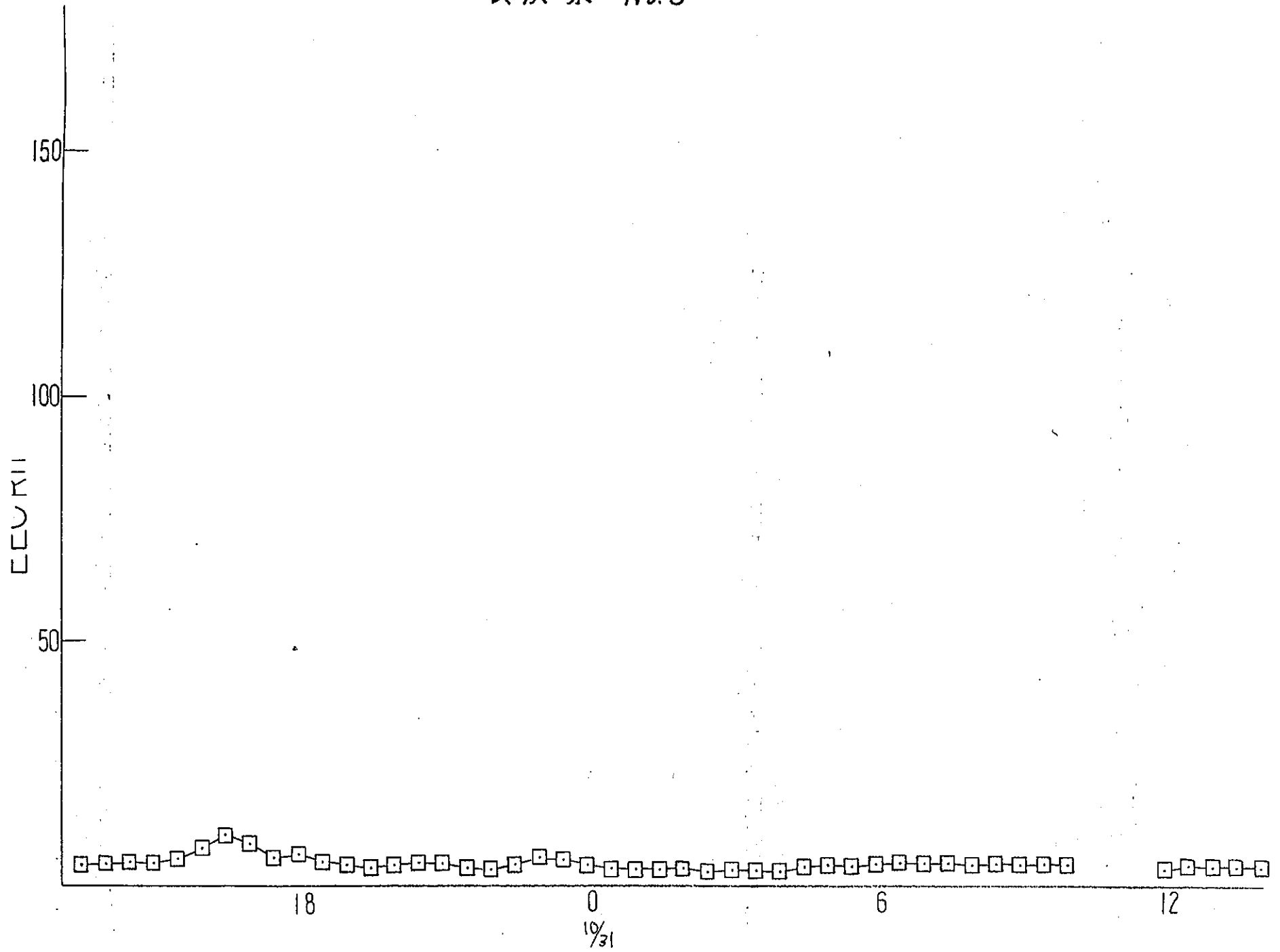
夜次東 No. 2



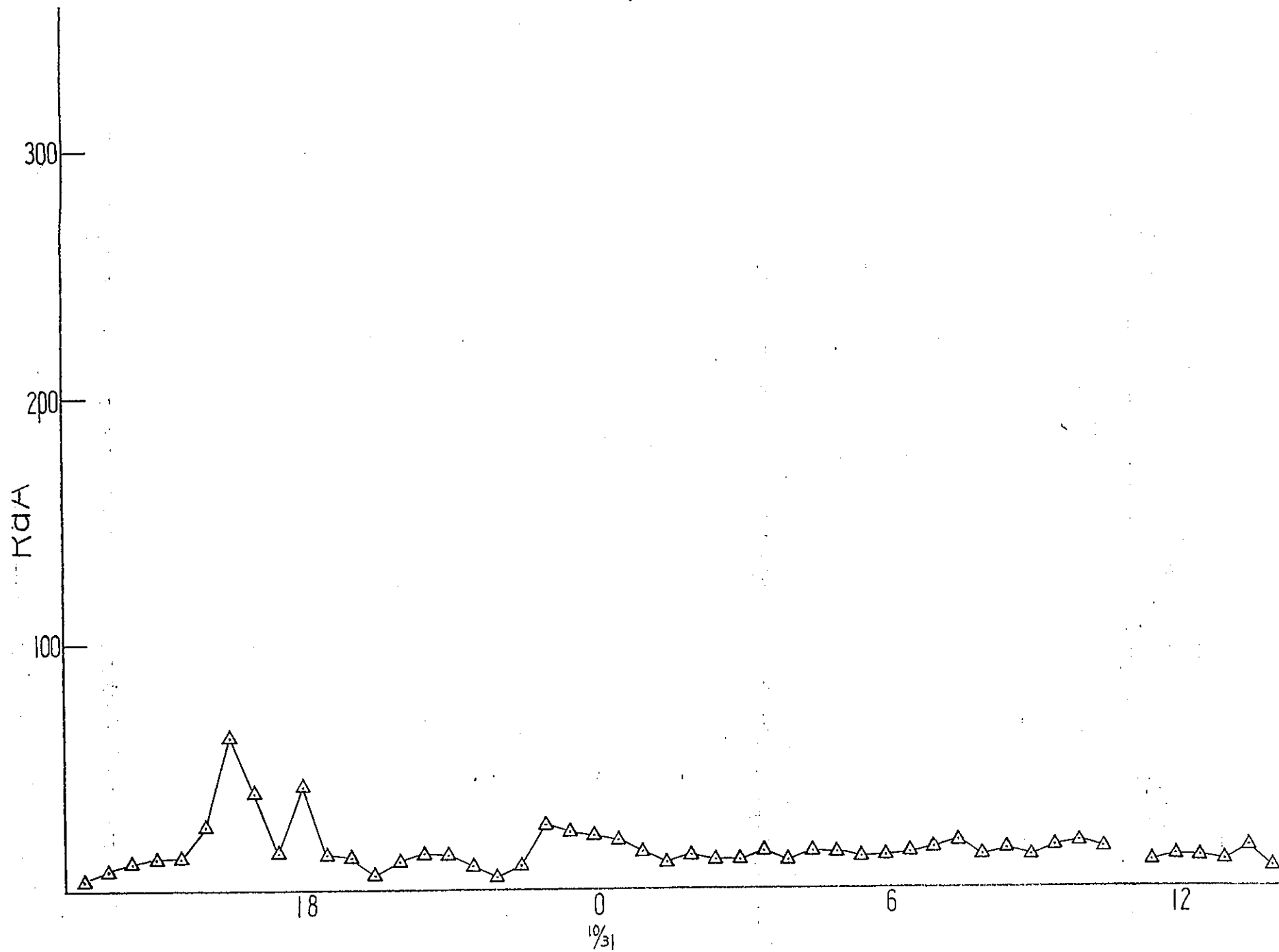
夜次東 No.3



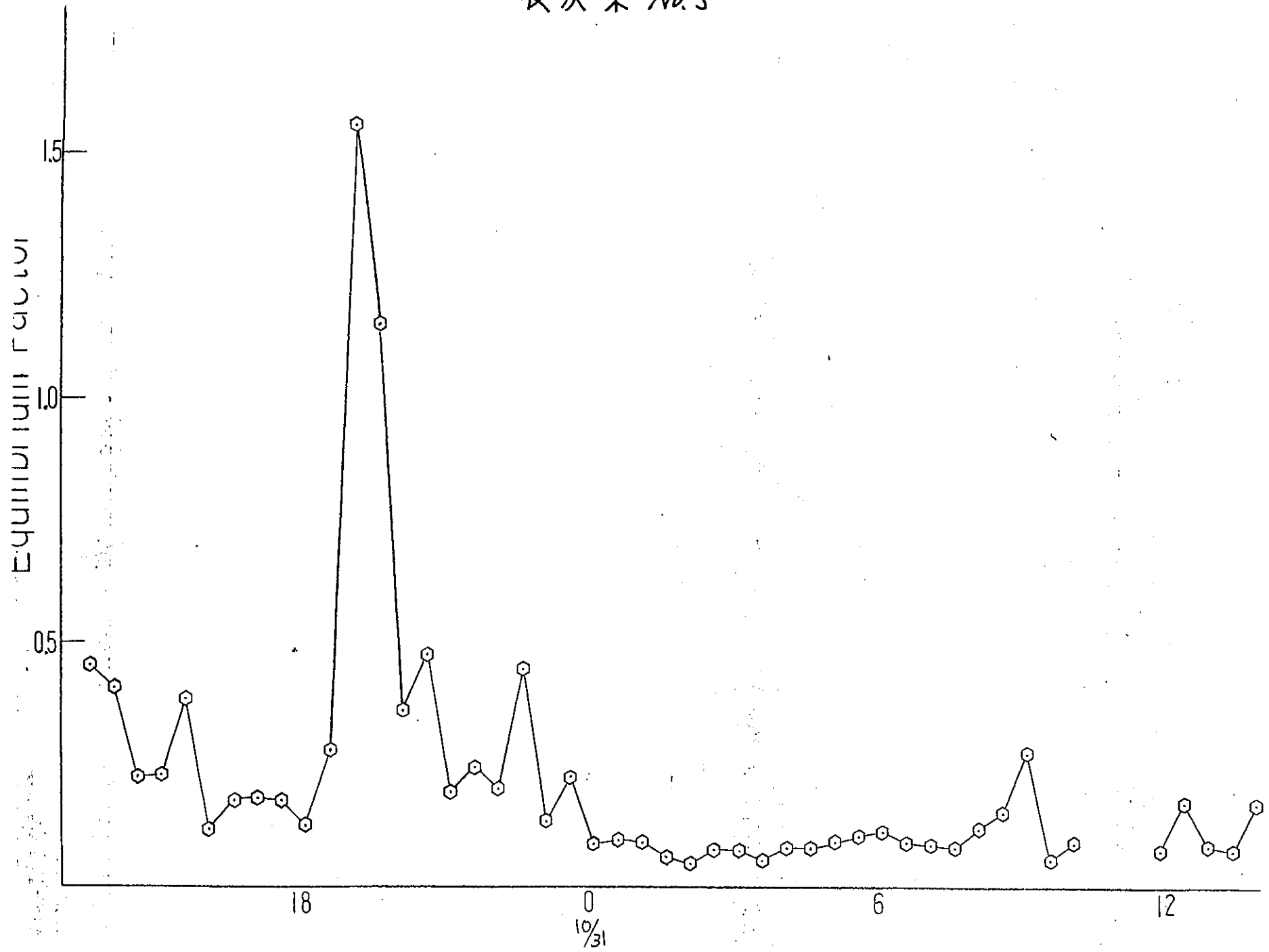
衣次東 No.3



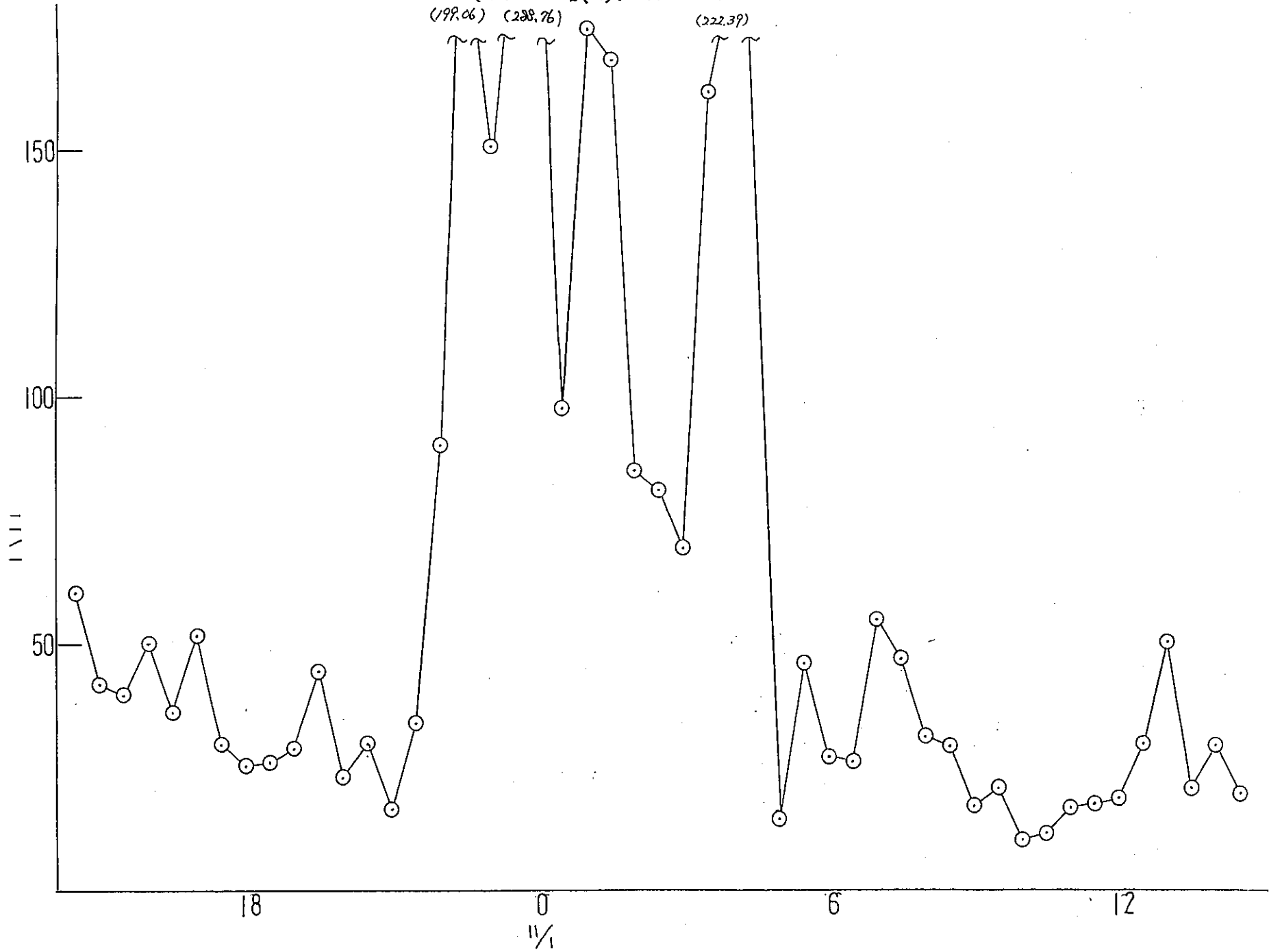
夜次東 No.3



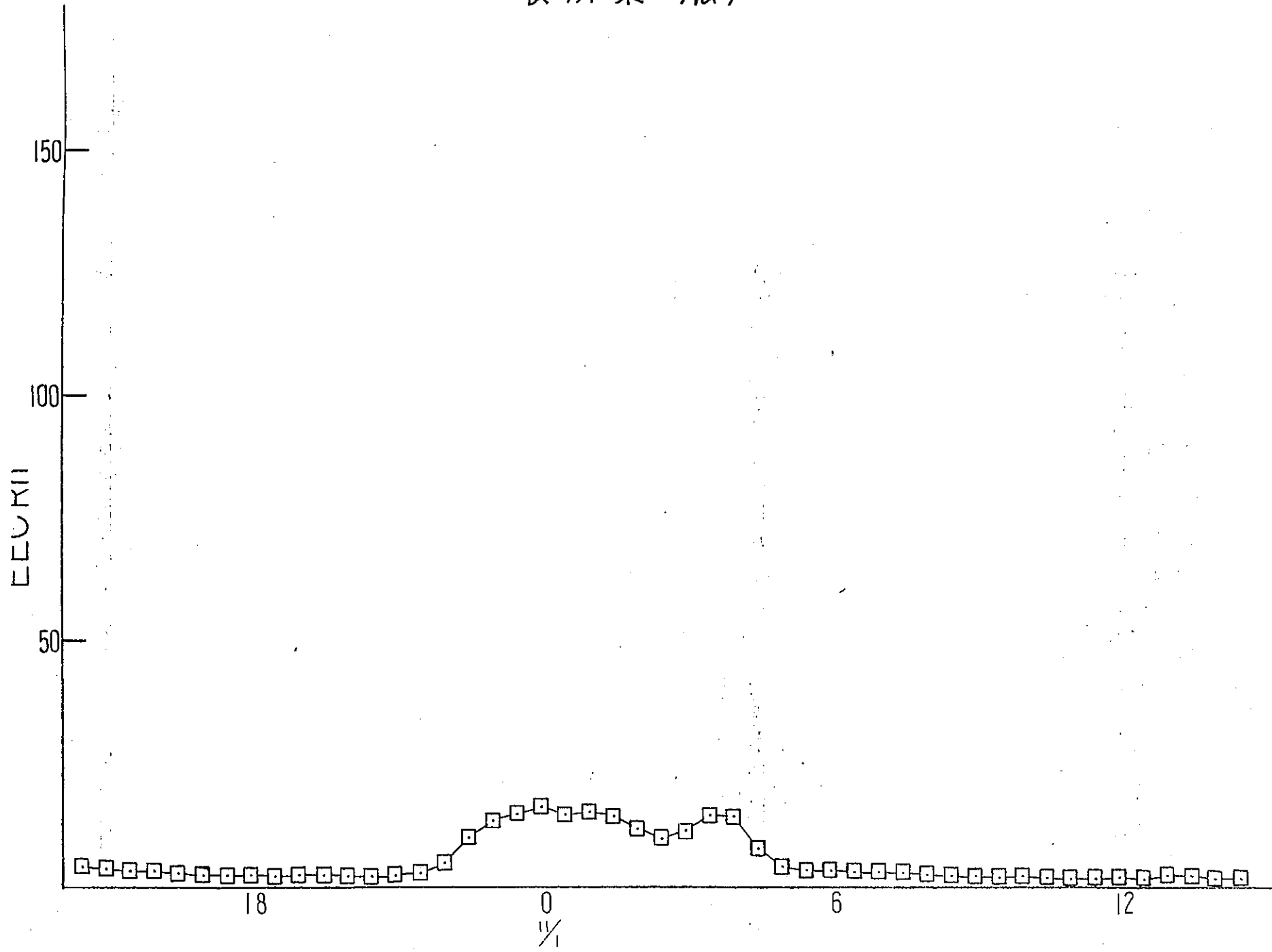
夜次東 No.3



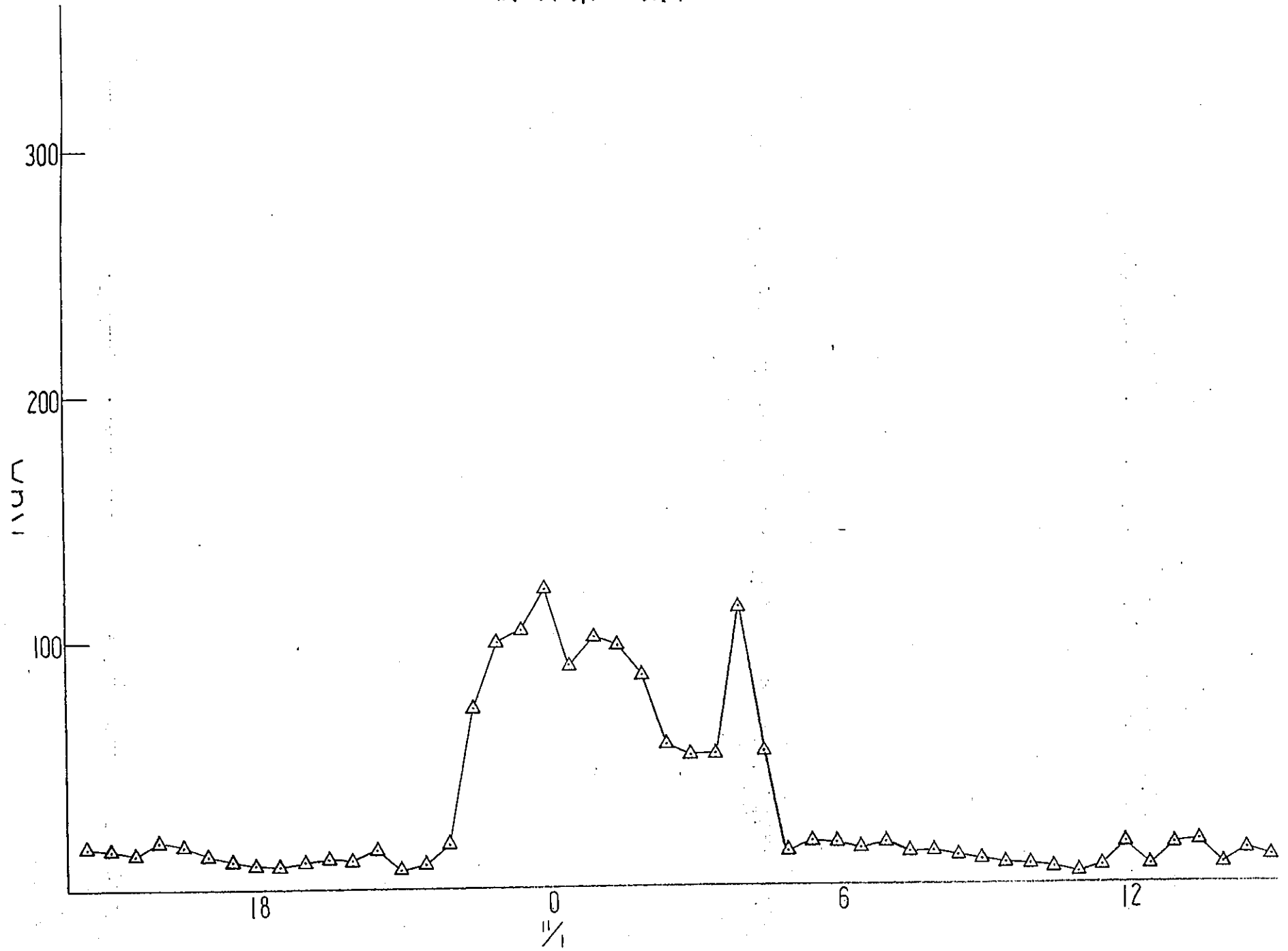
夜次東 No.4



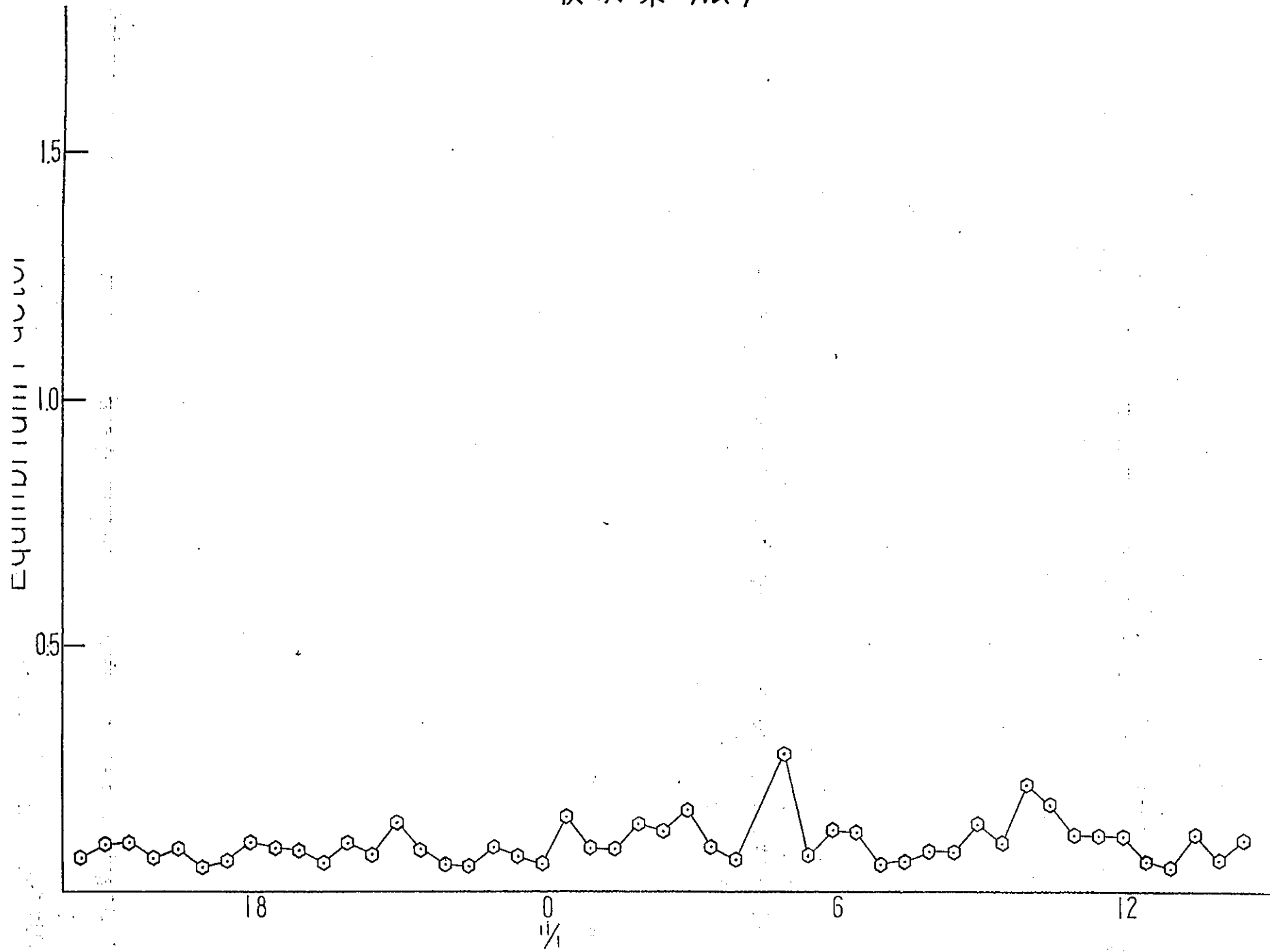
夜次東 No.4



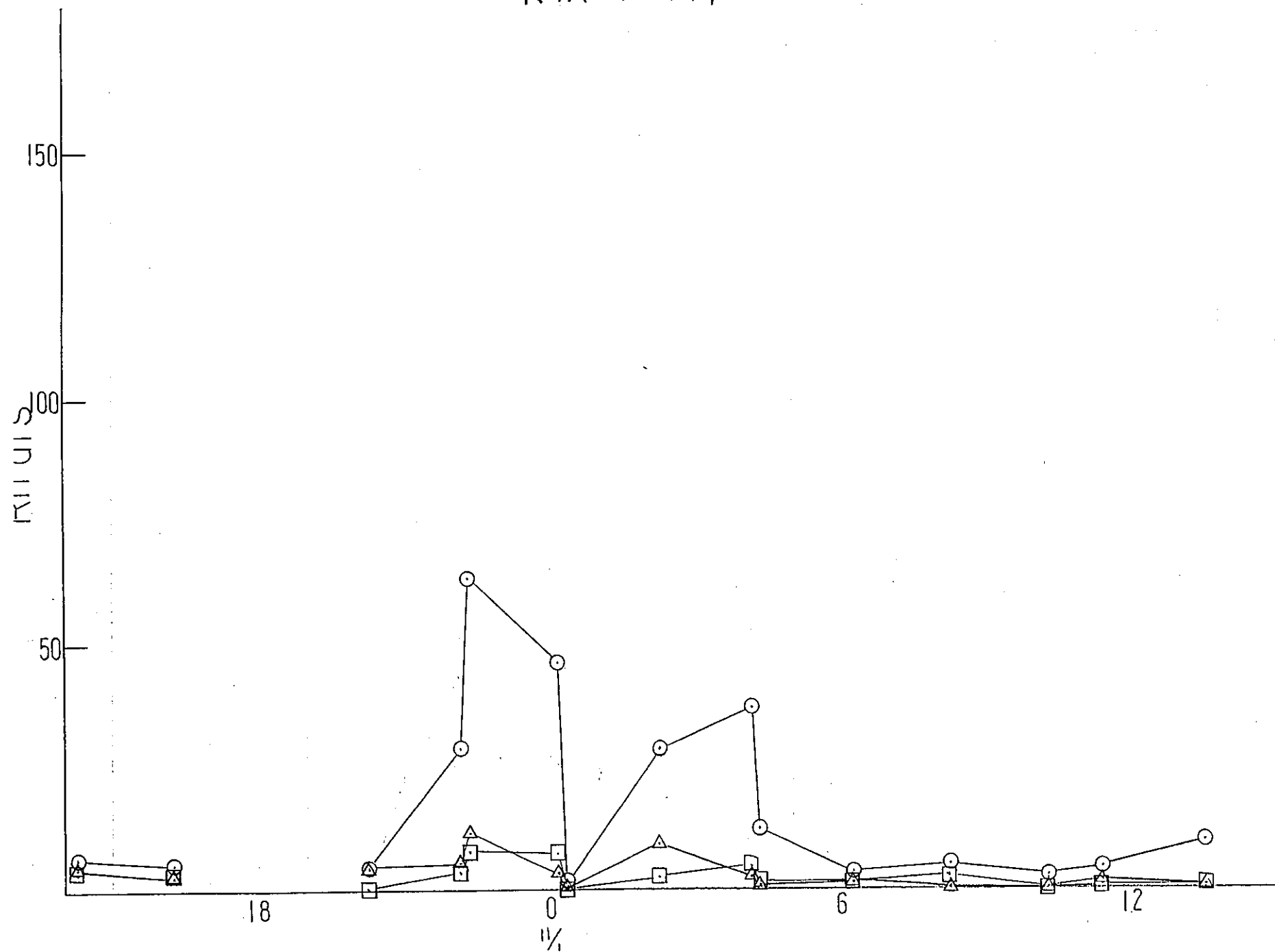
次東 No.4



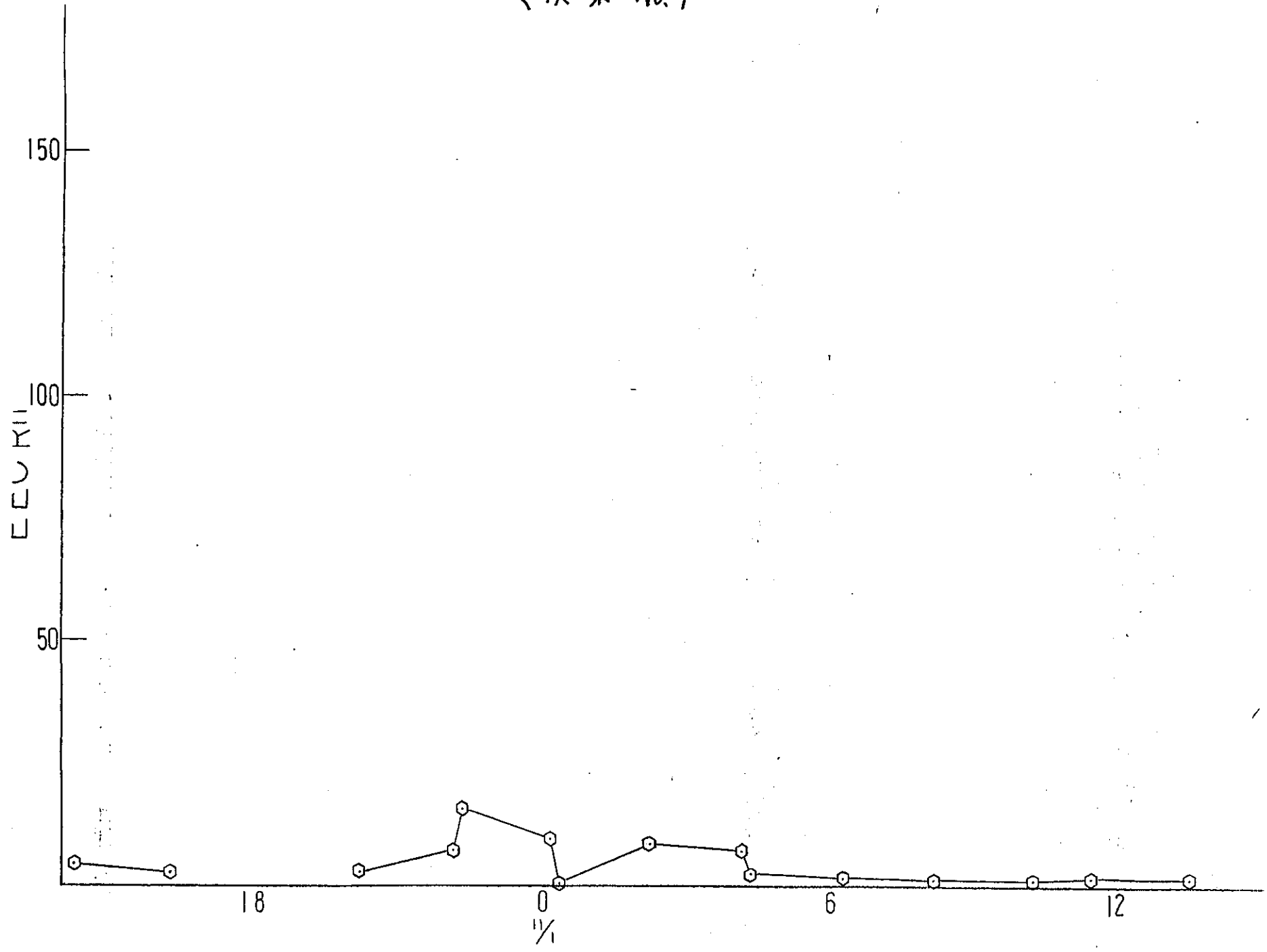
夜次東 No.4



夜次東 No. 4

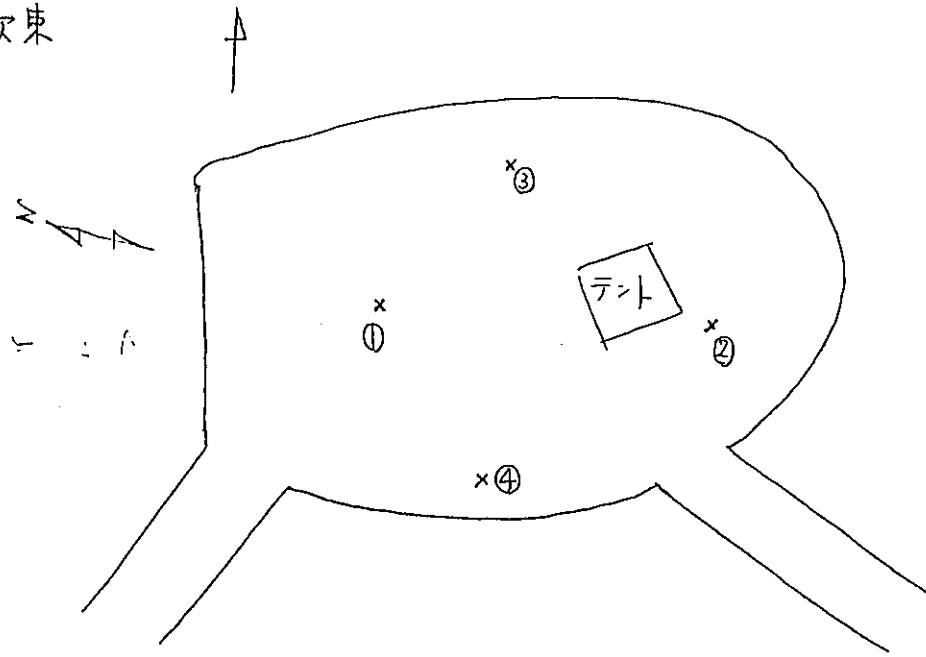


次東 No.4



15/2/71

・夜次東



10572.6 ± 180.05

3.06 ± 22.7

$E 1 \times 2 15.0$

	R_n 湧出量 $Bq/m^2 \cdot sec$	T_n 湧出量	γ 線量率 $mR/hr.$
①	$3.2 \times 10^{-2} \pm 2.4 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-3} \pm 3.7 \times 10^{-1}$	0.026
②	$2.3 \times 10^{-2} \pm 1.8 \times 10^{-3}$	$9.8 \times 10^{-1} \pm 3.9 \times 10^1$	0.19
③	$2.9 \times 10^{-2} \pm 2.6 \times 10^{-3}$	$0.0 \pm 2.6 \times 10^1$	0.011
④	$4.9 \times 10^{-2} \pm 2.4 \times 10^{-3}$	$0.0 \pm 4.2 \times 10^1$	0.015
平均	$3.3 \times 10^{-2} \pm 1.6 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^1 \pm 1.7 \times 10^1$	

616145

F69