

# 単位操作としてのイオン交換

山 本 寛

## 1. まえがき

イオン交換は分離手段の一つとして現在広く使われているほか、触媒用、医療用としても使用されている。

イオン交換をいわゆる単位操作として扱う場合基礎となるものは平衡関係と交換速度である。交換平衡に関する研究は従来極めて多く、イオン交換研究の大部分を占めているが、この方面の紹介は山辺氏が担当されるので本稿では交換速度だけについてふれることとし、ついで現在行なわれ、または研究されているイオン交換操作について概説する。

## 2. イオン交換における物質移動係数

イオン交換反応は液相-固相系もしくは気相-固相系の界面における異相系反応であるから、その物質移動の機構から考えて速度の問題はやや複雑である。交換機構から交換速度を決定する因子として次の三つを考えることができる。

1. 固相に接した流体境膜内における交換物質の分子拡散速度
2. 固相表面もしくは内部における交換反応速度
3. 固相内における交換物質の拡散（移動）速度

1 と 3 には交換に与るイオンと交換によって生じたイオンの両者が含まれる。

上記の 3 因子のうちの最も遅いものが全体の交換速度を決定するが、通常のイオン交換操作では交換の初期で

は 1 が支配的であるが、交換が進むに従って 3 の影響が大きくなるのが普通であり、2 が律速因子となることはまれである。

### (1) 境膜における物質移動

律速因子が境膜におけるイオンの分子拡散にあるときには交換速度は近似的に次の式で表わされる。

$$dq/dt = k_f S(c - c^*) \quad (1)$$

境膜の物質移動係数  $k_f$  は次元解析から次式で示される。

$$k_f S d_p / \bar{v} = \text{const} (Re)^n (Sc)^m \quad (2)$$

稀薄水溶液でのイオン交換では  $Sc$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ , はだいたい一定とみなせるから上式は近似的に  $k_f \propto \bar{v}^{1-n}$  と書くこともできる。

イオン交換における  $n$  の値は第 1 表<sup>9)</sup>に示すように研究者によって必ずしも一致していないが、だいたい 0.5 が正しいと考えてよい。ただしこれらの  $k_f$  の値はすべてイオン交換が進むにしたがって増大する固相内拡散の影響をも含んだ全イオン交換過程の平均値である。

### (2) 粒子内における物質移動係数

均一な球形イオン交換樹脂粒内における拡散について次式

$$\partial q / \partial t = D_i \partial^2 q / \partial r^2 \quad (3)$$

で定義された平均内部拡散係数  $D_i$  は樹脂の種類および架橋度によって異なり、スルホン化フェノール・フォルムアルデヒド系の樹脂 Amberlite IR-1 については 1 価陽イオンで  $2 \sim 3 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{sec}$  程度で大体溶液相の分子拡散係数の約 0.15 倍<sup>3, 4)</sup>、2 価イオンで  $7 \sim 10 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、3 価イオンで

$3 \sim 4 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ <sup>4)</sup> の測定値がある。またスルホン化ポリスチレン樹脂系の Dowex 50 についてはジビニルベンゼンの含有率によって値が異なり、Boyd 氏<sup>9)</sup>らの測定によれば 8% DVB では値はだいたい Amberlite IR-1 と同じ、12% DVB では  $25^\circ\text{C}$  で  $\text{Na}^+$ ,  $2.9 \times 10^{-7}$ ;  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $2.9 \times 10^{-8}$ ;  $\text{Y}^{3+}$ ,  $3.2 \times 10^{-9}$ ;

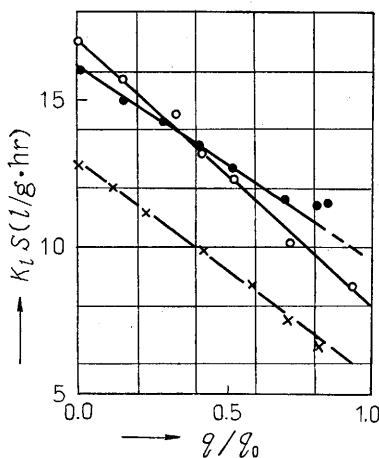
第 1 表

イオン交換剤	液系	Re 範囲	n	文献
ゼオライト (14~28メツシ)	水, Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	6~24	1.0	1
ゼオライト (20~30メツシ)	水, Cu <sup>2+</sup>	0.7~3.5	1.0	7
スルホン化炭質交換剤	水, Ag <sup>+</sup>	0.9~4.0	0.5	8
Amberlite IR-1 (70~80メツシ)	水, Na <sup>+</sup> , CsCl	0.7~1.8	0.5→0	3
Amberlite IR-120 (13~30メツシ)	水, Cu <sup>2+</sup>	3~6.7	0.5	21
Amberlite IR-1 (40~50メツシ)	水, Rb <sup>+</sup> , KCl	43~337	0	4
Amberlite XE-77	水, Cu <sup>2+</sup> , Cr <sup>3+</sup> , Zn <sup>2+</sup>	0.4~7.0	0.5	12
Dowex-50 (20~50メツシ)	水, Fe <sup>3+</sup>	0.1~0.7	0.5	17
ダイヤイオン K (24~40メツシ)	硬水	0.8~20	0.45	26
Amberlite IR-120	水, Ag <sup>+</sup>	5.6~33	0.44	2
Nalcite HCR (0.6~0.7 mm)	水-Na <sup>+</sup>	0.2~2.3	0.5	19
Amberlite IR-120	水, -Ca <sup>2+</sup>	0.5~2.4	0.45	31
Chempro C-20	水, Li <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	0.05(約)	0.5	13

Th<sup>4+</sup>,  $2.2 \times 10^{-10}$  となっている。同氏等の報告にはまた陰イオン交換樹脂についての値も示されている。

イオン交換の  $D_i$  は上記のように吸着の場合と異なり常に液相の拡散係数より小さい値を示す。

通常のイオン交換の条件では律速因子としては液膜支配がほとんど大部分であるが、この場合でも交換が進行するに従って内部拡散の影響が相当に現われてくる。第1図は Selke 氏<sup>22)</sup> による  $Ag^+ - H^+$  交換の研究で交換量が液膜基準の総括容量係数におよぼす影響を示したものである。



第1図

### (3) イオン交換反応速度

通常のイオン交換操作では充填層内で交換が行なわれている部分(交換帯とよぶ)の任意の一点では平衡に到達していないのが普通である。

イオン交換反応は可逆反応であるから、速度式は正および逆方向の速度の差で表わされる。通常の操作条件では正の速度係数が逆方向のそれに較べてはるかに大きく、化学反応速度は拡散速度に較べて速やかである。このためにこれが律速因子になることはほとんどない。

しかし極めて流速の小さい条件で操作するクロマトグラフでは層内の各点での平衡到達速度が問題になり、反応速度式における液相濃度および交換量の項が平衡点近くでは大きく到達速度に効いてきて、このために漏出曲線の形に影響が現われてくる場合もある<sup>9)</sup>。しかしさらに流速の小さい条件では流れ方向の混合の影響の方がさらに大きくなってくる。

## 3. 充填層におけるイオン交換の理論

### (1) 充填層内の流れ方向のイオン濃度分布

固定床の漏出特性、移動床の所要層高を求めるには充填層内の流れ方向のイオン濃度分布をしる必要がある。濃度分布は半径方向の流速一定として、充填層の微小層高についての物質精算式および平衡関係  $q=f(c)$ , そ

の場合の律速因子から定まる 2. に述べた速度式のうちのいずれかとの連立偏微分方程式を解くことより求めることができる。

それぞれの 3 因子が律速の場合の各一般解を解析的に求めることはできないが、簡単な平衡関係を仮定した場合の解は充填層の伝熱と類似に求められている。しかしこの方面の理論の進歩は比較的近年のことに属する<sup>23)</sup>。

Vermeulen, Hiester 両氏<sup>25)</sup>は直線平衡曲線即ち  $q=k_d c$  の場合について各因子がそれぞれ律速の場合の諸解を統一して次のような一般式で与えられることを示した。

$$x = J(N, ZN) \quad (4-a)$$

$$y = 1 - J(ZN, N) \quad (4-b)$$

ここに

$$J(s, t) = 1 - \int_0^s e^{-t-cI_0(2\sqrt{t, \xi})} d\xi$$

また Vermeulen 氏<sup>25)</sup>は平衡関係を

$$r = \frac{N(Q-q^*)}{q^*(1-N)} = \text{const} \quad (5)$$

のような関係を満足する場合の交換反応速度律速の場合について Thomas 氏<sup>23)</sup> が導いた次の解は、式中の  $N_R$  を適当にとることによって、いずれの因子が律速の場合にも適用できることを示した。

$$x = \frac{J(rN_R, ZN_R)}{J(rN_R, ZN_R) + e^{(r-1)N_R(Z-1)} [1 - J(N_R, rZN_R)]} \quad (6)$$

上式は  $r=1$  すなわち直線平衡曲線の場合には式 4-a に帰着し、 $r \ll 1$  の場合、このことは平衡曲線が凸かつ彎曲度が大きいことを意味するが、この場合はイオン交換に好ましい条件であり、層内に一定層高の交換帯が形成される。式 6 にこの条件を入れれば上記の条件に基づいて別個に導かれた次の Walter 氏<sup>27)</sup> その他の研究者の式に帰着する。

$$\frac{1}{1-r} \ln \frac{x}{1-x} = N_R(Z-1) \quad (7)$$

また  $r \gg 1$  の場合は平衡曲線が凹型で、イオン交換には好ましくない条件であって、交換帯幅は層内を進行するにしたがって増大するが、式 4-a にこの条件を代入すると独立にこの場合について導かれた次の式に帰着する<sup>27)</sup>。

$$x = \frac{(r/Z)^{1/2} - r}{1-r} \quad (8)$$

### (2) 流れ方向の混合が漏出曲線におよぼす影響

流れ方向の混合は漏出曲線の傾斜を小さくするよう作用をする。工業的なイオン交換操作条件ではこの影響は無視することができるが、クロマトグラフのように流速の小さい条件では問題になる。

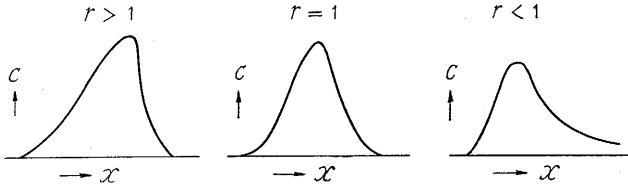
Lapidus-Amundson 両氏<sup>16)</sup>, Wicke 氏<sup>28)</sup>らの研究によればこの場合の漏出濃度  $x$  は次の式で与えられる。

$$x = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v v^2 \epsilon}{E S V}} \frac{V - V_{\text{stoic}} - v \epsilon}{v \epsilon} \right\} \right] \quad (9)$$

ここに  $E$  は有効混合係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) である。

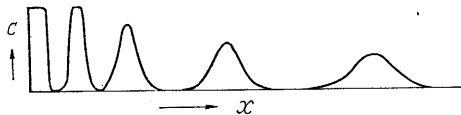
#### 4. イオン交換クロマトグラフ展開の理論

クロマトグラフの溶離過程において、バンドが相互分離に必要な十分な層高を通過したのちの各イオンの濃度分布曲線は、平衡関係に従って第 2 図のように三つの異なった形を示す。図はこれを定性的に示したものである。



第 2 図

このような濃度分布曲線を与える一般的な基礎理論式は 2. にのべたのと全く同じ方法で導かれ、 $r = \text{const}$  の条件では式 4 を吸着および脱着両過程に適用してそのまま使うことができる<sup>11,14,15</sup>。もし分離に与るイオン濃度が溶離濃度に対して極めて稀薄であるときにはほぼ  $r=1$  の条件を満足する。一般のクロマトグラフ展開の場合にはこの条件を満足することが多い。この場合の濃度分布曲線の一つのイオンに着目すれば、バンドが層内を進行するに従ってその幅を増し、高さが低くなる。第 3 図はこれを定性的に示したものである。



第 3 図

$r=1$  として式 4 を吸着および脱着過程に適用すると

$$C_A'/C_{A0}' = J(N_R, ZN_R) - J(N_R, Z'/N_R) \quad (10)$$

この場合の濃度分布曲線  $C_A'/C_{A0}'$  はまた Gauss 曲線で近似することができる<sup>20,28</sup>。すなわち

$$\begin{aligned} C_A'/C_{A0}' &= \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \sqrt{N_R} (\sqrt{Z} - 1) \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{erf} \sqrt{N_R} (\sqrt{Z'} - 1) \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{N_R}(\sqrt{Z'}-1)}^{\sqrt{N_R}(\sqrt{Z}-1)} e^{-\eta^2} d\eta \quad (11) \end{aligned}$$

Glueckauf 氏<sup>10</sup>は今までの理論が充填層を連続とみなしているのに対し、イオン交換樹脂粒はある大きさをもつことから、充填層は流れ方向に有限微小層高を有する数多くのステージからなり立つものと考えられることとして、Mayer-Tompkins 氏<sup>19</sup>の方法を修正して比較的簡単なクロマトグラフ展開の計算法を示した。この方

法は前記の理論よりも容易に実用計算に使うものでかなり便利である。詳細は同氏の論文を参照されたい。

#### 5. イオン交換装置

現在工業的に使われている装置はほとんど全部固定床で、操作は回分式である。硬水軟化もしくは完全脱塩装置などの設計は、樹脂の交換容量をそれぞれの会社で定めた値をとり、これと処理すべき液中の 1 サイクル当りのイオン量とから簡単に計算している。工業規模のイオン交換装置では再生レベルをきめれば液流速などの操作条件はほとんどきままっていることと、それらの条件の下では交換層層高は大体 10 cm 以下であり、したがってこの部分の未飽和交換容量は固定床全体の容量に較べて無視できる程度に小さいのが普通である。したがって特に漏出性の問題になる特定イオンを除いては上記の方法による設計で十分であり、特定イオンについては別個に同様の設計法が準備されている。これらを総合して最終的な樹脂量と層高の決定がなされる。

固定床の設計については実用上このような方法で全く差支えないが、連続イオン交換では層高は理論的には交換帯部分に相当するだけあれば足りることになり、設計は固定床程簡単にはゆかない。以下に代表的な連続イオン交換法のいくつかを概説する。

##### (1) ミキサー・セトラー法

抽出における向流多回抽出法と同じ操作を行なうものでミキサーとセトラー各 1 個が 1 組となり、何個かの組を並べて 1 系列をくむ。この方法は固体のイオン交換樹脂を用いて行なうことも可能であるがむしろ別稿で述べた液状イオン交換体を使った方が有効である。固体樹脂粒を使った RIP 法はこの分類には属さないがやや共通する点がある。

ミキサー・セトラーの所要組数  $N$  は蒸留における Mc Cabe-Thiele 法と同様に求めることができ<sup>30</sup>、また液相内のイオン交換に与えるイオン濃度が再生に用いるイオンの濃度に較べて極めて小さい時には

$$N = \frac{\ln \left[ \frac{A-r}{A(1-r)} \right]}{\ln A} \quad (12)$$

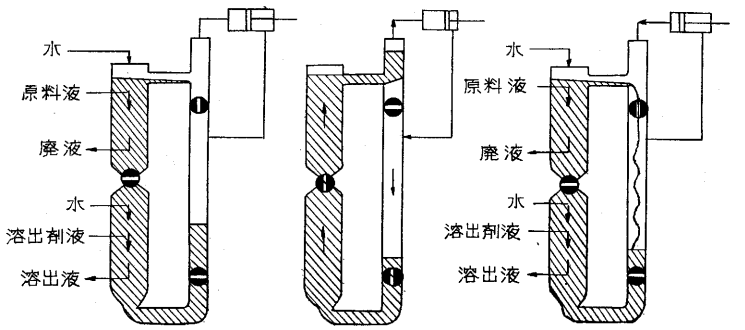
で求めることができる<sup>30</sup>。

ただし

$$A = \frac{Hq_0 Q}{F C \Sigma} ; r = \frac{x_0 - x_N}{x_0 - x_N^*} = A \frac{y_{N+1} - y_1}{y_{N+1} - y_1^*}$$

##### (2) 移動床法

樹脂層を液と向流して上方に移動させる方式と下方に移動させる方式とがある。樹脂層は液流速を大きくとれる点、気泡、固形物の付着などの障害を少なくしうる点などの理由から下方から上方へ移動させる方が好まし



第4図

く、この方法によっているものにパルスを与えて移動を行なう Higgins の方法がある。この方法はイオン交換を原子力分野に用いるために米国オークリッジ国立研究所で開発された方式で、わが国では原子燃料公社でウランの精鉱処理の試験工場の中の一工程として採用している。第4図は作業の要領を示したもので、左側の塔が交換塔、右側の管が樹脂循環用の管である。交換塔の上半は吸着部、下半は再生および洗滌部である。樹脂の循環は右上方のポンプで液にパルスを与えることにより樹脂層を持ち上げて行なう。ポンプの作動と弁の開閉によって図に示した三つの過程を行ない1サイクルを構成する。移動床の所要層高は式7から計算できるが、物質移動係数が判れば(第2章(1)参照)図式計算から NTU を求めて計算することもできる<sup>30)</sup>。

(3) 流動層法

向流多段式または向流多回式の流動層法によるイオン交換は筆者等の研究室で研究中であるが、この方法はイオン交換樹脂を触媒として使用する際にも有用であると考えられる。所要ステージ数はミキサー・セトラーの場合と類似に求められ、図解法によるのも簡単である。

(4) 液-液抽出塔方式

この方式は液体イオン交換体を使う場合に用いられる方式で、従来すでに抽出装置として開発されているものを使えばよい。装置としては前記ミキサー・セトラーのほかに充填塔があるが、後者の一形式として原子力分野で開発されたパルスカラム法はこの目的に特に適している。この方法は充填塔もしくは棚段塔で向流液-液抽出を行なう場合塔底にポンプでパルスを与えることにより連続相と分散相の接触を通常の充填層もしくは棚段塔より改善したもので所要塔高を著しく低くすることができる。したがって放射性物質を取り扱う場合には大きな利点を有するものである。

以上単位操作としてのイオン交換について極めて概略的な記述を行なったが、各節の詳細については参考文献を参照されたい。(1959. 12. 26)

記号

- C = イオン濃度
- C<sub>Σ</sub> = 全イオンレベル
- D<sub>i</sub> = 式3で定義される内部拡散係数
- d<sub>p</sub> = 樹脂の平均粒径
- E = 流れ方向の有効混合係数
- F = 液流速 (容積/時間)
- H = 分配係数 (trace condition) の q = Hc
- k<sub>a</sub> = 分配係数 q = k<sub>a</sub>c
- k<sub>f</sub> = 境膜物質移動係数
- m, n = 実験常数

N = モル分率

N = ミキサー・セトラーのステージ数 (ミキサー数) (式12の中の)

N = 移動単位数 (NTU) 境膜拡散律速の時: N<sub>f</sub> = k<sub>f</sub>Svε/F; 粒内拡散律速の時: N<sub>p</sub> = k<sub>p</sub>SDvε/F (k<sub>p</sub> = 粒内物質移動係数, D = Qρ<sub>b</sub>/C<sub>Σ</sub>ε, ρ<sub>b</sub> = 充填密度)

N<sub>R</sub> = 反応速度律速の場合の移動単位数 (NRU)

N<sub>R</sub> = k<sub>r</sub>Qvρ<sub>b</sub>/F (k<sub>r</sub> = 反応速度律速の場合の物質移動係数)

q = 樹脂層内のイオン濃度

Q = 樹脂流速 (式12の中のA中の)

Q = 樹脂層の最大交換容量

r = 半径

r = 式5で与えられる平衡関係パラメータ

R<sub>e</sub> = レイノルズ数 d<sub>p</sub>v̄ρ/μ

S = 有効物質移動面積 単位充填容積当りの

S<sub>c</sub> = シュミット数 = μ/ρD (D = 液相の分子拡散係数)

S = イオン交換塔の断面積 (式9の中の)

t = 時間

v = 充填容積 (式9の中の)

v̄ = 充填層の中の平均線流速

V = イオン交換塔に流した液量

V<sub>stoic</sub> = 右式で表される量 V<sub>stoic</sub> = q<sub>0</sub>\*ρ<sub>b</sub>v/C<sub>Σ</sub>

x = C/C<sub>Σ</sub>

y = q/Q

Z = (V - vε)/V<sub>stoic</sub>

ε = 空隙率

η = 積分変数

μ = 粘度

ρ = 密度

添字

1...N = ステージ数

0 = 入口

\*=平衡

'=溶離開始時からの値

A=イオン A

文 献

1) Beaton, R.H. & Furnas, C.C., Ind. Eng. Chem., **33** 1500 (1941)  
 2) Bieber, H. et al, Chem. Eng. Progress, Symposium Series, **50** 17 (1954)  
 3) Boyd, G.E. et al, J. Am. Chem. Soc., **69** 2849 (1947)  
 4) Boyd, G.E. et al, ibid **69** 2836 (1947)  
 5) Boyd, G.E. & Soldano, B.A., ibid **75** 6091, 6107 (1953)  
 6) Dryden, D.A. et al, Chem. Eng. Progress **49** 191 (1953)  
 7) Du Domaine, J., et al, Ind. Eng. Chem. **35** 546 (1943)  
 8) Ekedahl, E. & Sillen, L.G., Arkiv. fur Kemi Geol., **25 A** No.4 (1947)  
 9) Glueckauf, E. & Coates, J.I., J. Chem. Soc., **1947** (1315)  
 10) Glueckauf, E., "Ion Exchange and its Applications," Soc. Chem. Ind. (1955) 38  
 11) Goldstein, S., Proc. Roy. Soc., **A 219** 151, 171 (1953)  
 12) Hagerty, F. & Bliss, H., Ind. Eng. Chem., **45** 1253 (1953)  
 13) Hiester, N.K. et al, Chem. Eng. Progress, Sym-

posium Series, **50** 63 (1954)  
 14) Hiester, N.K., Ph D thesis, Univ. of California (1949)  
 15) Hiester, N.K. & Vermeulen, T., J. Chem. Phys. **16** 1087 (1948)  
 16) Lapidus, L. & Amundson, N.R., J. Phys. Chem., **56** 984 (1952); Amundson, N.R., Ind. Eng. Chem., **48** 26 (1956)  
 17) Mar, B.W. & David, M.M., A.I.Ch.E.J., **2** 381 (1956)  
 18) Mayer, S.W. & Thompkins, E.R., J. Am. Chem. Soc., **69** 2866 (1947)  
 19) Michaels, A.S., Ind. Eng. Chem., **44** 1922 (1952)  
 20) Rosen, J.B., J. Chem. Phys. **20** 387 (1952)  
 21) Selke, W.A. & Bliss, H., Chem. Eng. Progress **46** 509 (1950)  
 22) Selke, W.A., "Ion Exchange Technology" Academic Press. 1956 56  
 23) Thomas, H.C., J. Am. Chem. Soc., **66** 1664 (1944)  
 24) Vermeulen, T. & Hiester, N.K., Ind. Eng. Chem. **44** 636 (1952)  
 25) Vermeulen, T. "Advance in Chem. Eng." Academic Press (1957) 180  
 26) 渡会正三, 大武信一, 化学機械 **17** 351 (1953)  
 27) Walter, J.E., J. Chem. Phys. **13** 229 (1945)  
 28) Wicke, E., Kolloid-Z. **86** 167, 289 (1939)  
 29) 山本寛, 化学機械, **17** 245 (1953)  
 30) 山本寛, "新化学工学講座," 日刊工業新聞社 (1958)  
 31) 山本寛, 生産研究, **11** 69 (1959)

3 月 号 予 告

ロクーン特集第1号

生研におけるロクーン観測について…福 田 武 雄  
 生研以前の経過の概略……………中 川 重 雄  
 33年度, 34年度ロクーン研究経過…平 尾 収  
 ロクーン実験研究の概要……………岡 本 智  
 ロクーン用ランチャー……………戸 田 康 明  
 " (改装について)…岡 本 智  
 ロクーンの放球について……………石 井 千 尋  
 水素ポンペ運搬車と水素充填について  
 ………………岡 本 智  
 気球について……………八 木 寿 道 ほか  
 ロクーン用気球の強さに関する  
 二三の問題について…大井光四郎ほか  
 焼切装置とタイマーについて……………中 村 円 生  
 補助気球用ナイロン・ロープ焼切装置  
 ………………戸 田 康 明  
 ダミーロケットおよびロクーン各部の  
 温度測定について……………戸 田 康 明 ほか  
 シグマ3型ロケットの飛しょう性能…玉 木 章 夫 ほか  
 シグマ3型ロケットと飛しょう  
 について…戸 田 康 明 ほか  
 ロクーンに使用したテレメータ  
 について…斎 藤 成 文 ほか  
 本庄実験用ロクーンテレメータ送信機  
 ………………倉 茂 周 芳 ほか

本庄実験用ロクーン  
 テレメータ受信装置…倉 茂 周 芳 ほか  
 青森実験用ロクーンテレメータ送信機  
 ………………倉 茂 周 芳 ほか  
 青森実験用ロクーン  
 テレメータ受信装置…倉 茂 周 芳 ほか  
 テレメータ装置について……………高 橋 健 一  
 上昇速度計および排風速度計と  
 その測定結果…岡 本 智  
 ロクーン排風計および上昇速度計に  
 ついての風洞試験……………玉 木 章 夫 ほか  
 精密高度計・精密差圧計について…岸 上 元 彦 ほか  
 推進軸加速度計および計測結果……………中 村 円 生 ほか  
 姿勢ジャイロについて……………岸 上 元 彦 ほか  
 太陽電池のロクーン実験……………高 橋 健 一  
 成層圏よりの天頂輝度の偏光観測…斎 藤 国 治 ほか  
 ロクーンによる宇宙線測定の経過…宮 崎 友 喜 雄 ほか  
 沖付海岸の気象および  
 航跡 (ゾンデ観測を含む) ………………北 岡 竜 海  
 ロクーン実験場の選定……………下 村 潤 二 朗  
 警備について……………下 村 潤 二 朗  
 ロクーン飛揚実験における通信連絡…高 中 泓 澄