

〔講演：キャピラリー電気泳動と生命解析科学〕

## CZE エレクトロフェログラムの標準化

廣川 健・育田夏樹・吉山竜也・岡本 光  
芝山貴幸・真鍋雄生

## SUMMARY

Although chromatography is widely utilized, it is behind the other analytical methods from the viewpoint of the standardization of the data. This is because usual chromatograms are strongly dependent on the used hardware. Capillary electrophoresis is not either the exception: The obtained electropherograms are also dependent on the hardware such as capillary length, capillary inner surface, applied voltage, and thermostating capacity etc, even if the same background electrolyte and the same sample is used. We have developed a conversion method of the time-based electropherograms of capillary zone electrophoresis (CZE) into the mobility-based ones by removing contribution of electroosmotic flow considering temperature rise caused by Joule heating. The conversion method also contained correction for delay of migration time caused by relaxation of potential gradient at sample plug. In this paper, after discussing the factors affecting migration time of CZE, electropherograms of rare-earth ions obtained using different migration voltage were converted to demonstrate utility of our method proposed for standardization (data transfer). The conversion method was also successfully applied to electropherograms of several cations obtained by using field enhanced sample stacking.

Key words: CZE (capillary zone electrophoresis), electropherograms, conversion, standardization, stacking.

## はじめに

クロマトグラフィーは広く利用されているが、得られるクロマトグラムはハードウェアに著しく依存するため、データの標準化という面で、他の機器分析法に比べ、立ち後れている。キャピラリー電気泳動法 (CE) も例外ではなく、得られるエレクトロフェログラムは試料・電解液条件が全く同じであっても、キャピラリー長、キャピラリー内部表面 (電気浸透流に影響)、印加電圧、温度調節能力などのハードウェアに依存する。このため、異なる装置で測定されたエレクトロフェログラムの相互比較は時間軸に関して意味を持たないのが普通である。一方、エレクトロフェログラムの縦軸は、例えば UV/VIS 検出器を使用した場合、吸光度という規格化された数値で相互比較が可能

であるので、なんらかの方法により時間軸を変換し、相互比較が可能なパラメーターを採用すれば、エレクトロフェログラムの標準化が可能になる。

CEにはそれぞれ特徴ある種々のモードが存在するが<sup>1,2)</sup>、キャピラリーゾーン電気泳動法 (CZE) の場合<sup>3,4)</sup>、分離の基本原理はある支持電解液条件下における試料成分間の実効移動度差である。実効移動度は同じ温度で同じ支持電解液が使用される限り一定である。また CZE の分離の場は自由溶液系であり、複雑な液-固相互作用を考慮しなくてよいため、上述のハードウェア依存性を除去できる可能性がある。しかしながら、通電によりジュール熱が発生するので、キャピラリー内の温度は温調装置の設定温度より上昇することは避けられない。また分離場の電位勾配は試料の組成に応じて変化し、これらはしばし

Standardization of electropherograms of CZE.

Takeshi Hirokawa, Natsuki Ikuta, Tatsuya Yoshiyama, Hikaru Okamoto, Takayuki Shibayama, Yuuki Manabe; 広島大学大学院工学研究科物質化学システム専攻応用化学講座応用分析化学

Correspondence address: Takeshi Hirokawa, Department of Applied Chemistry, Chemistry and Chemical Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1, Kagamiyama, Higashi-hiroshima 739-8527, Japan.

第 51 回日本電気泳動学会総会・招待講演

ば泳動時間の再現性を悪化させる。

我々は、ジュール熱による温度上昇を考慮しながら電気浸透流の寄与を除去することによって、時間ベースのCZEエレクトロフェログラムを移動度ベースのフェログラムに変換する方法を開発した<sup>5,6)</sup>。この変換法は、電位勾配の緩和による泳動時間の遅れの補正も含んでいる。電位勾配の緩和とは泳動初期に高い電位勾配のゾーンが生成し、その電位勾配が徐々に平均値(印加電圧/キャピラリー長)に漸近するように減少する現象を言い、特にスタッキング効果を利用して低濃度試料を分析する場合に著しい。実効移動度を横軸とする標準化されたエレクトロフェログラムではハードウェアや試料依存性をかなりの程度まで消去でき、異なる装置間でのデータ比較およびデータベース化に有用であると考えられる。

本論文では、まずCZEエレクトロフェログラムの標準化を検討するにあたって重要となる泳動時間の再現性について述べる。ついでこれらを考慮した「標準化のための変換法」の原理について述べ、希土類混合試料などを用いて具体的にデータ標準化の有用性を示す。

### キャピラリー電気泳動法における 泳動時間の再現性について

#### 1. 泳動時間に影響する因子

泳動時間の再現性は、CZEによる定性・定量の精度に直接かかわる重要な因子の一つである。この再現性は種々の実験的な理由のほか、CZE分離系の性質に起因する原理的な因子によって影響を受ける。CZEでのイオンの泳動速度( $v_{mig}$ )は次式のように電気泳動速度( $v_{ep}$ )と電気浸透流速度( $v_{eof}$ )の和として与えられる。

$$v_{mig} = v_{ep} + v_{eof} = (\bar{m} + \epsilon\zeta/\eta)E \quad (1)$$

ここで $\bar{m}$ はある試料成分イオンの実効移動度、 $E$ は分離キャピラリー内の電位勾配(印加電圧/キャピラリー全長)、 $\epsilon$ 、 $\zeta$ 、 $\eta$ はそれぞれ溶媒の誘電率、キャピラリー内壁のゼータ電位、溶媒の粘度である。

試料の泳動時間 $t_{mig}$ は次式で与えられる。

$$t_{mig} = l/v_{mig} \quad (2)$$

ここに $l$ はキャピラリー末端から検出器までの距離(キャピラリー有効長)である。キャピラリー全長が同じでも $l$ は装置メーカー毎に異なる。1式・2式から明らかなように、 $t_{mig}$ には種々の因子が関与している。これらの因子の特性のため、仮に $l$ や他の実験条件を一致させたとしても $t_{mig}$ は必ずしも一致しない。この理由について、以下詳しく述べる。

#### 2. 温度制御の影響

1式中の $\bar{m}$ 、 $\epsilon$ 、 $\zeta$ 、 $\eta$ は、程度の差はあるが全て温度依存性を示す。したがって、再現性のよい電気泳動分析を行うためには温度制御が最も重要である。しかし、キャピ

ラリーチャンバーの温度をある一定値に制御することは可能であっても、通電により発生するジュール熱によるキャピラリー管内の温度上昇は避けられない。このため移動度・浸透流が変化し泳動時間の再現性が影響を受ける。図1にキャピラリーチャンバーの温度を一定値(25°C)に制御し、印加電圧を変化させて測定したランタニドイオンのエレクトロフェログラムを示す。もし管内の電解液の温度が一定であるならば1式で表される移動速度は印加電圧に比例するはずであるが、図1を注意深く見ると、例えばKイオンの泳動時間は電圧変化に対して非線形な変化を示している。これはジュール熱の発生による温度上昇が原因である。すなわち印加電圧を高くするとキャピラリー管内の温度が恒温槽設定温度(図1では25°C)より上昇し、その結果、支持電解液の粘度 $\eta$ が小さくなり移動速度が大きくなったと解釈できる。このような場合、成分イオンの移動度が温度上昇とともに増加するためオームの法則が成立せず、泳動電流は電圧の変化に対して直線的に変化しなくなる(図3参照)。

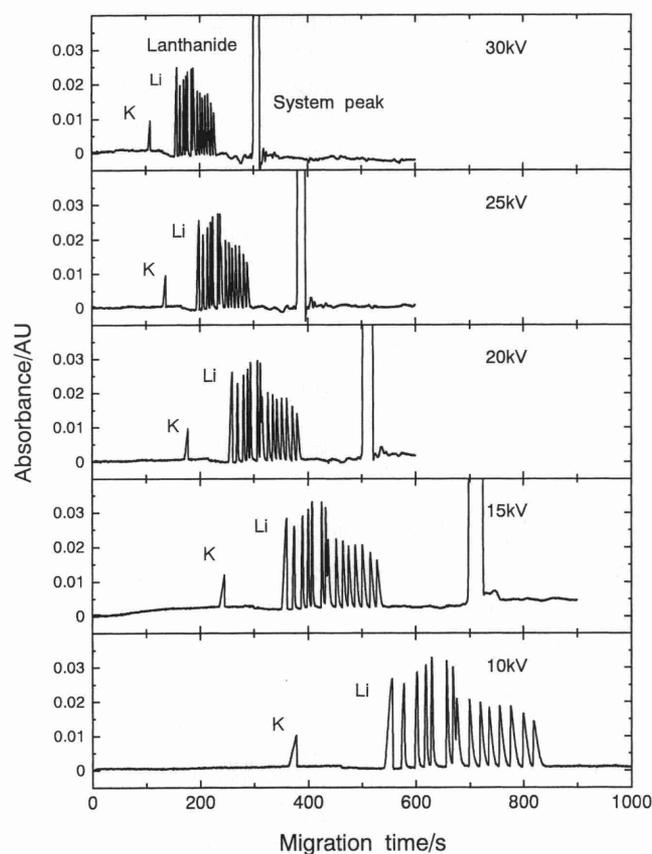


図1. ランタニド混合試料(14種ランタニド 45 mg/l, Li 15.5 mg/l, K 30.4 mg/l, 全て塩化物)のエレクトロフェログラム。

実験条件: 支持電解液, クレアチニン 30 mM +  $\alpha$ -ヒドロキシイソ酪酸 4 mM, 酢酸を加えて pH 4.8; 装置, CAPI-3100 (大塚電子) UV 間接吸収法 ( $\lambda=220$  nm), シリカキャピラリー, 75  $\mu$ m I.D.  $\times$  70 cm (有効長 57.7 cm); 印加電圧, 30~10 kV; 泳動槽設定温度, 25°C; 注入条件, 落差法 (20 mm, 60 sec).

同一の装置・キャピラリー・支持電解液を使用した実験であっても、図1のように異なる電圧条件で得られたフェログラムを比較して、なんらかの定性・定量の知見を得ることは従来不可能とされてきた。異なる装置間でのデータ比較は印加電圧を含め実験条件を統一すればある程度可能と思われるが、キャピラリー内部の温度は温調の方式に依存するので、他の実験条件を一致させたとしても  $t_{mig}$  は必ずしも一致しない。標準化という観点からすると、基準温度への変換が必要となる。

### 3. 電位勾配の緩和

CZE で良好な泳動時間再現性を得るには、温度のほか、1式中の電位勾配  $E$  が一定でなければならない。CZE では通常定電圧駆動で分析が行われるため、平均電位勾配の制御は容易である。しかし、キャピラリー管内の局所的な変化は制御できない。すなわち、試料の移動度が支持電解液中の co-ion と同じ移動度である場合を除きキャピラリー内部の電位勾配は試料に応じて変化するだけでなく、試料の濃度やカウンターイオンの移動度・試料注入量に応じて泳動中にかなり大きく変化し、泳動時間に影響する。しかし、このような電位勾配の変化はシャープなピークを得るためには不可欠である。もし支持電解液と試料溶液との間に電位勾配の差がなく、泳動中も保たれるようなことがあれば、試料はピーク状にならず、拡散のため注入プラグが台形状になったピークが観察されるのみである。

我々のシミュレーションによれば、特に希薄な試料を注入した場合やカウンターイオンの移動度が支持電解液のそれに比べて大きい場合には  $E$  の時間変化は無視できず、泳動時間の再現性に重要な影響を及ぼすことがわかった。特に CE の低感度を補うため希薄試料を大量注入し stacking 効果を利用する場合、電位勾配の変化は長時間にわたる点が問題である。また後述するように、希薄溶液の注入は局所的な電気浸透流の変化を伴い、これも再現性に悪影響を及ぼす。このような場合、同一装置・同一実験条件を使用した場合でも、標準試料のエレクトロフェログラムをもとに実試料を分析する際、分析精度低下の原因となる。

この現象は泳動時間を遅らせるように作用するが、低濃度試料を扱うときは後に述べるように同時に電気浸透流速度が上昇する現象が付随するので、結果的に分離ウィンドウが狭くなるという現象が見られる。この点については後述する。

### 4. 浸透流速度の変化

シリカキャピラリー表面のシラノール基は解離してアニオン化し、1式における  $\zeta$  の原因となる。シリカ表面とは逆にキャピラリー内の溶液はプラスに帯電し、泳動電圧の印加に伴い負極に移動する（電気浸透流）。シラノール基は弱酸性（pK は 5~6 程度）であるため、電気浸透流移動度には pH 依存性がある。イオン強度が一定の場合、

pH が 8 以上では浸透流移動度は最大となり、逆に 3 以下になると移動度はかなり小さくなる。 $\zeta$  はイオン強度が小さいほど大きいので、支持電解液や試料のイオン強度に影響を受ける。さらに  $\zeta$  はシラノールの密度と直接関係するから、キャピラリーの製法やロット・前処理（コンディショニング）の方法などによっても変化することに注意する必要がある。

同一装置・同一実験条件での再現性にもっとも大きな影響を与えるのはキャピラリーの交換であろう。同じ製造ロットのキャピラリーに交換し、同じようにコンディショニングを行ったとしても、長時間使用したキャピラリーの表面状態は変化しているので、同一の浸透流速度を期待することは困難である。

図2に希土類イオンを試料としてアルカリ洗浄後の泳動時間の変化を示した。図2から明らかなように、アルカリ洗浄後に pH=4.8 の支持電解液を使用して測定を繰り返すごとにシステムピークの出現時間が遅くなるのが確認できる。これは、キャピラリー内壁の状態が各ランの前後で異なり、イオン化したシラノール基がしだいに少なくなってくるため、その結果  $\zeta$  が小さく（すなわち、 $v_{eof}$  が小さく）なり、結果としてシステムピークの出現時間が遅

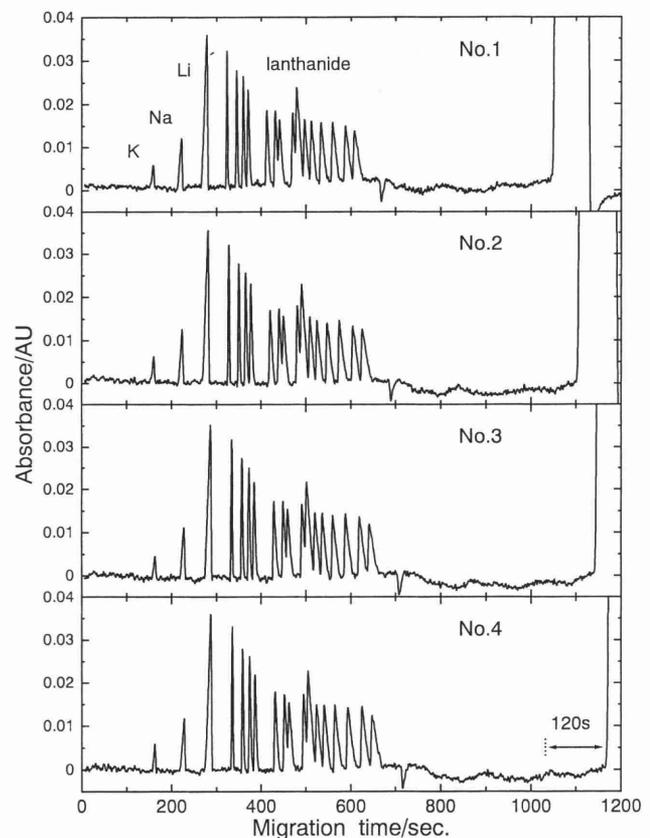


図2. ランタニド混合試料（14種ランタニド+Y 50 mg/l, K, Na, Li, 全て塩化物）のエレクトロフェログラム。

測定前に 10 mM NaOH を減圧下 300 秒流した後、水で 300 秒支持電解液で 300 秒洗浄、各測定後は支持電解液で 300 秒洗浄。

れることになる。このように、浸透流には履歴現象が見られるので注意を要する。この現象の影響を抑えるためには、測定前に毎回アルカリ洗浄を行うことが有効である。なおスタッキング効果を期待して低濃度の試料を大量に注入した場合、同じキャピラリー・支持電解液であっても試料プラグ部の浸透流速が増加するため、全体の浸透流速も増加する。

エレクトロフェログラムの標準化のための  
変換法 (温度係数法)

以上述べたように、CZEにおける時間軸の再現性には種々の要素が関与しているため、旧来のエレクトロフェログラムを使用する限りハードウェア依存性は避けられない。この点を改善し、異なる条件でのデータ比較を可能にする方法として、従来いくつかの方法が提案されている。LeeとYeungは通電した電流量を横軸とする方法を提唱している (Migration index, MI)<sup>7)</sup>。この方法は温度変化をかなり吸収するよい指標であるが、厳密には温度依存性のある溶媒の粘度と支持電解液の比電導度の項が残っている。さらにより深刻な問題として、浸透流の変化に対応できない。すなわち1式で $\zeta$ が異なる系では相互比較ができない。この点を改良するため、LeeらはAdjusted Migration index (AMI) という概念を導入し、電気浸透流速で移動するシステムピークまたは中性マーカーのMIに対する相対値を取ることによってこの問題を回避しようとした。しかしAMIにも依然として温度依存性のある項が残っており十分とは言えない。さらに、こうして得られた指標の物理的意味が希薄である。

このような問題を回避するため、我々はある参照温度における1式の移動度 ( $\bar{m}$ ) を横軸とすることを検討してきた。我々は既にこのための変換法として、いくつかの方法を提案している。その変換法の優劣等については文献6) に詳しい。ここでは温度係数法について簡単に述べる。

従来法では実効移動度は次式で求められる。

$$\bar{m} = v_{ion} / \bar{E} = \frac{l/t - v_{eof}}{V/L} \quad (3)$$

ここに  $v_{ion}$  はあるイオンの電気泳動速度、 $\bar{E}$  は平均電位勾配 ( $\bar{E} = V/L$ )、 $l$  はキャピラリー有効長、 $v_{eof}$  は移動度0の物質のピークもしくはシステムピークの泳動速度 ( $v_{eof} = l/t_{eof}$ ,  $t_{eof}$  はピークの泳動時間)、 $V$  は印加電圧、 $L$  はキャピラリー全長である。

図1に示したエレクトロフェログラムを3式を用いて変換し、図3に示した。図より明らかなように、3式を使用して得られる実効移動度は分離キャピラリー内の支持電解液温度での実効移動度である。その温度は分離キャピラリーを納めたサーモスタットの温度より必ず高い。図3中の

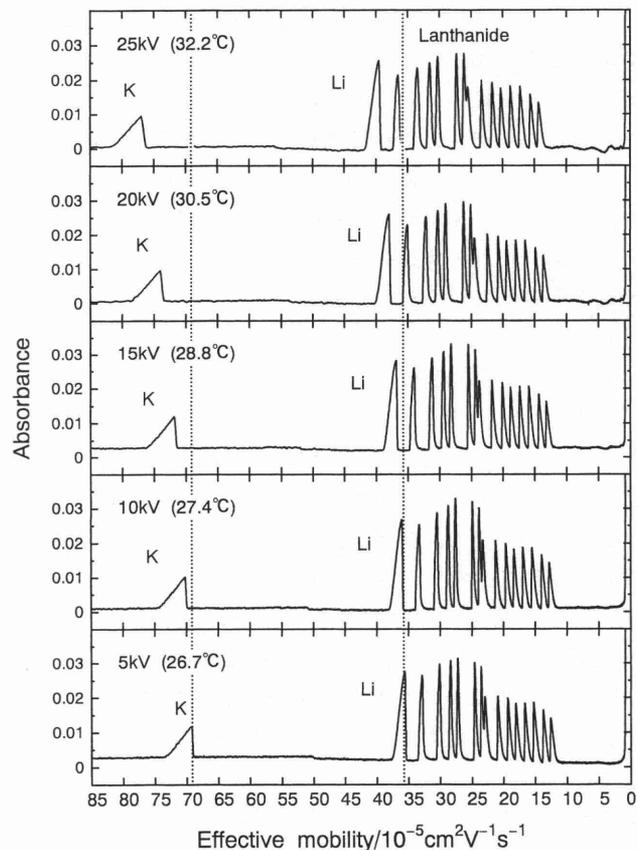


図3. 図1のランタニド混合試料のエレクトロフェログラムを従来法で移動度に変換。

印加電圧, 25~5 kV; 他の条件は図1と同じ。

温度は  $K^+$  の移動度の温度依存性から推定した値である。このように3式による変換は泳動電流の大きさやキャピラリーの冷却方法などにより影響を受けるので、標準化には有用でない。例えば電気伝導度計において25°Cの値への換算が伝導度の対温度直線性を利用して行われるように、移動度についても同様な換算を簡単に行うことができれば便利である。

3式による変換の別の欠点は、暗黙のうちに分離システムの電位勾配  $\bar{E}$  が一定であると想定している点である。既に我々が明らかにしたように、試料成分の泳動速度を支配する支持電解液の電位勾配は、泳動開始時平均電位勾配よりしばしば低く、電気泳動の進行とともにしだいに平均電位勾配に漸近する (電位勾配の緩和)<sup>8)</sup>。この結果、泳動時間は理想的な状態 (すなわち泳動時間中系の電位勾配が平均電位勾配に等しい) に比べ、遅れることになる。電気回路の保護のため泳動電圧は数秒かけて所定の電圧に到達するようプログラミングされていることもあるが、もちろんこのような効果も泳動時間の遅れの原因となる。

我々の変換法 (温度係数法) はこれらの二点 (キャピラリー内温度上昇と電位勾配の緩和) を考慮したもので、次式で表される。

$$\bar{m} = l / \{(t - \tau)E\} - m_{eof} \quad (4)$$

ここで  $\tau$  は電位勾配の緩和効果を補正する泳動時間の遅れ,  $m_{eof}$  は電気浸透流移動度である.

一方, イオンの移動度は温度に対してほぼ直線的に比例して増加するため次式が成立する.

$$\bar{m} = m_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (5)$$

ここに  $\alpha$  は温度係数であり, イオンにより微妙に異なるが 0.02 程度の値をとり, イオンによらないとみなしてよい. したがって 4 式と 5 式から次式を得る.

$$m_0 = [l / \{(t - \tau)E\} - m_{eof}] / (1 + \alpha \Delta T) \quad (6)$$

ここで,  $\tau$ ,  $1 + \alpha \Delta T$ ,  $m_{eof}$  は未知数である. これらを求めるためには, 移動度が既知の 3 種のピークの泳動時間が必要である. 本報中の変換例では, 2 種の内標準試料およびシステムピーク (あるいはノニオンのピーク) をこの目的に使用している. 内部標準の移動度は既知でなくてはならない. 我々は移動度がよく知られている単純なイオンを内部標準に使用し, 絶対移動度をイオン強度補正して使用している. またできる限り目的試料を挿むように選ぶほうがよい. 詳細については文献 6) を参照されたい.

図 1 に示したフェログラムを温度係数法で変換し, 図 4 に示した. 図 4 の全てのフェログラムが大変よく一致しており, 本変換法の有用性が明らかである. 図 2 に示したような比較的わずかな時間のずれを起こしている場合, 変換して得られたフェログラムの横軸はほぼ完全に一致する.

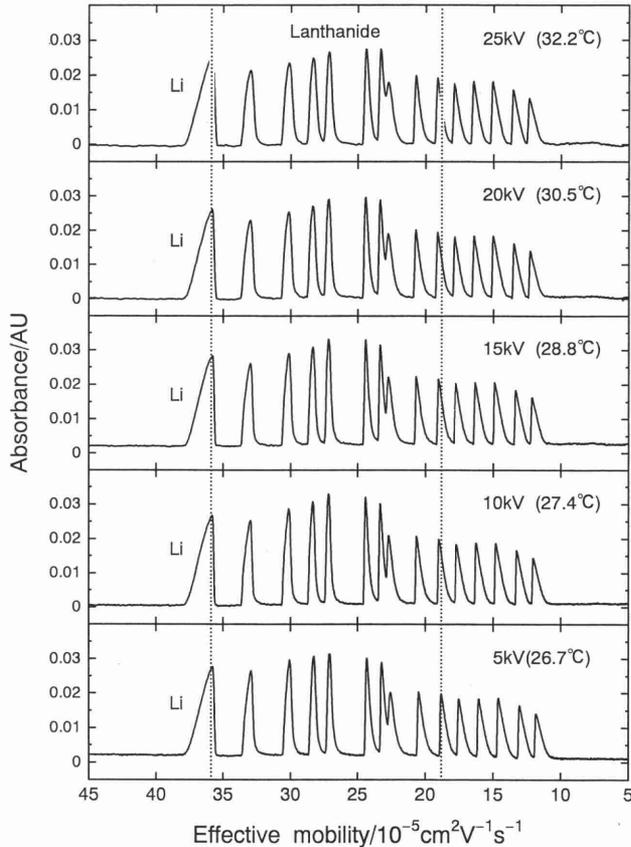


図 4. 温度係数法により図 1 のランタニド混合試料のエレクトロフェログラムを移動度に変換.

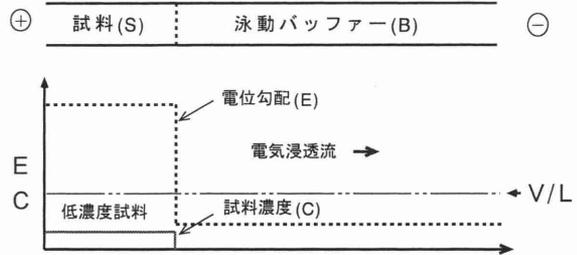
### スタッキング効果を利用して得られた エレクトロフェログラムの変換

CE 法の欠点の一つである低濃度感度を補うため, しばしば希薄な試料を大量に注入し CE 分析が行われる. この場合, 図 5 に示したようにスタッキング効果<sup>9,10)</sup>と呼ばれる前濃縮が試料プラグと支持電解液の界面で起こる. すなわち, この場合, 試料溶液の電気伝導度は支持電解液より低いので, 試料プラグ部の電位勾配は大きくなり, 支持電解液の電位勾配は平均の電位勾配よりはずっと小さくなる. その結果, 試料はプラグ部を迅速に移動するが界面で停滞するので, 結果的に試料成分の濃縮が起こる.

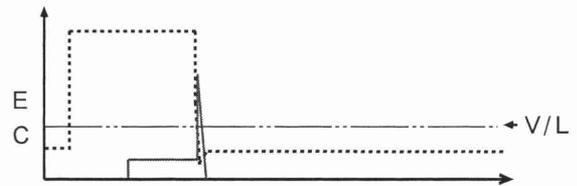
この現象は希薄試料の分析に有用であるが, 既に報告されているように<sup>11,12)</sup>, 移動度の小さい試料成分の泳動時間は希薄試料の体積に逆比例し短縮し, 定性・定量の支障となることが知られている.

図 6 に 0.06 mM の試料についてスタッキングにより得られたエレクトロフェログラム (泳動電圧 10 kV, キャピラリー 40 cm) を示した. 試料の注入には落差法を使用し 25 mm で 20 秒から 260 秒とした. Hagen-Poiseuille 式によれば, 試料注入量は 11~139 nl, 試料プラグ長は 0.24~3.15 cm, そして試料中の各成分量は 0.64~8.34 pmol と推定された. テスト用混合試料の電導度は 25.6

#### 1) 試料充填



#### 2) 泳動開始 (界面で濃縮)



#### 3) 濃縮完了

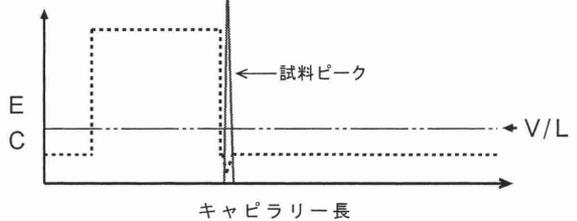


図 5. CZE におけるスタッキング効果の模式図.

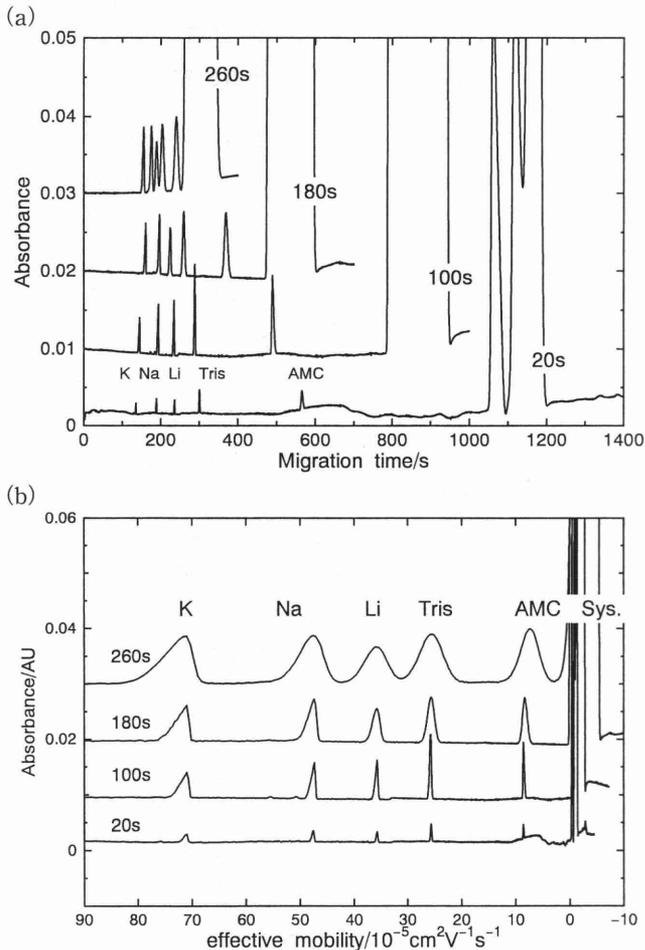


図6. 5種カチオン混合試料 (KCl, NaCl, LiCl, Tris,  $\epsilon$ -アミノカブロン酸, 各 0.06 mM) の実測エレクトロフェログラム (a) および移動度軸に変換したエレクトロフェログラム (b).

実験条件: 支持電解液, クレアチニン 30 mM, 酢酸を加えて pH 4.8; 装置, CAPI-3100 (大塚電子) UV 間接吸収法 ( $\lambda=220$  nm); シリカキャピラリー, 75  $\mu\text{m}$  I. D.  $\times$  40 cm (有効長 27.7 cm); 印加電圧, 10 kV; 泳動槽設定温度, 25°C; 注入条件, 落差法 (25 mm).

$\mu\text{Scm}^{-1}$ , 支持電解液のそれは  $0.861 \text{ mScm}^{-1}$  であるから, この系では強いスタッキング効果が期待される. 図 6 a は落差法により試料注入時間を 20 秒から 260 秒まで変化した時の実測フェログラムである. 図 6 a より明らかなように, K ピークの泳動時間は比較的良好に一致しているものの, システムピーク (試料プラグ部) の出現時間が試料の導入量に逆比例して短縮している. この実験では 260 秒試料を導入した場合, 分離ウィンドウが狭くなって分離時間が不足し, Li と Tris 間でベースライン分離ができなくなっている.

図 6 a に示した実測エレクトロフェログラムを 6 式を用いて変換するにあたり,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$  と System peak の先端の移動度をそれぞれ  $70.9 \times 10^{-5}$ ,  $35.7 \times 10^{-5}$ ,  $0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  とした. 前 2 者の値は各イオンの 25°C における絶対移動度<sup>13)</sup> を使用した溶液のイオン強度で補正して

得た理論値である<sup>14)</sup>. 6 式を用いると, 図 6 b に示したような移動度を軸とするフェログラムが得られた. 注入量が多くなると一致の程度は低下するが, それは定性分析を妨害することではなく, 本変換法の有用性が改めて確認できた.

図 6 a では注入体積の増加とともにシステムピークが非常に早く移動するようになる一方,  $\text{K}^+$  の泳動時間はむしろわずかに遅く移動するようになっている. この現象はどのように説明できるのであろうか?

CZE において, 試料成分の移動速度は電気泳動速度 ( $v_{ep}$ ) と浸透流速度 ( $v_{eof}$ ) の和で与えられる. 浸透流速度の寄与を分離用キャピラリーを試料プラグ部と泳動バッファー部に分けて, それぞれの浸透流移動度を  $m_{eof,p}$  および  $m_{eof,b}$  とすると, 移動速度は次式で与えられる.

$$v_{mig} = v_{ep} + v_{eof} = m_{s,se} E_{se} + (m_{eof,sp} E_{sp} l_{sp} + m_{eof,se} E_{se} (L - l_{sp})) / L \quad (7)$$

ここで  $m_{s,se}$  は泳動バッファーにおける試料 S の移動度,  $E_{se}$ ,  $E_{sp}$  は泳動バッファーおよび試料プラグの電位勾配,  $l_{sp}$ ,  $L$  はそれぞれプラグ長とキャピラリーの全長である. 印加した電圧  $V$  は次式で与えられる.

$$V = E_{sp} l_{sp} + E_{se} (L - l_{sp}) = E_{av} L \quad (8)$$

ここに  $E_{av}$  は平均電位勾配である. 8 式を 7 式に代入すると次式を得る.

$$v_{mig} = m_{s,se} E_{se} + m_{eof,sp} E_{av} + (m_{eof,se} - m_{eof,sp}) E_{se} (L - l_{sp}) / L \quad (9)$$

ここで, 第 1 項は泳動バッファー中での試料の移動速度, 第 2 項・第 3 項は浸透流速度である. 9 式において  $l_{sp}$  が  $L$  に漸近した場合を考えると, 第 1 項・第 3 項は 0 に漸近する. 結局, 全ての成分イオンの移動速度は  $m_{eof,p} E_{av}$  に, 泳動時間はキャピラリー有効長 ( $l_{eff}$ ) /  $m_{eof,p} E_{av}$  に漸近することになり, 移動度の大きい  $\text{K}^+$  では泳動時間が遅れ, 移動度の小さいイオンでは泳動時間が早まることになる.

希薄な電解液のイオン強度は低く, キャピラリー壁のゼータ電位は高くなるため,  $m_{eof,sp}$  は  $m_{eof,se}$  よりずっと大きい. その結果, 図 6 a に示したように, システムピークの泳動時間は短縮することになり, カチオンに対する分離ウィンドウはプラグ長の増加とともに狭くなる. なお,  $L - l_{eff}$  より長い試料プラグを導入すると, プラグ部がまだ検出中に一部キャピラリーから抜けるため浸透流の小さい部分が増え, 実際には移動速度が  $m_{eof,p} E_{av}$  に到達することはない.

### おわりに

以上述べたように, 従来用いられてきた時間を横軸とする CZE のエレクトロフェログラムはハードウェアに依存

するが、基準温度 (25°C) における移動度を横軸とすることによりハードウェアに依存しない、したがって、装置間でも互換性のあるエレクトロフェログラムを得られることを示した。このことは実際に異なる CE 装置を用いて確認済みである。なお定量分析に関してはスペースの都合により割愛させていただいたが、検出時の見かけの速度をピーク面積に乗じることで良好な互換性を得ることができる。本報ではカチオンのみを扱ったが、CZE であればもちろんアニオンにも適用可能である。

#### 文 献

- 1) キャピラリー電気泳動; 基礎と実際. 本田 進, 寺部 茂編. 講談社, 1995.
- 2) Foret F, Krivankova L, Bocek P. Capillary zone electrophoresis. Weinheim: VCH, 1993.
- 3) Mikkers FEP, Everaerts FM, Verheggen ThPEM. J Chromatogr 1979; 169: 11-20.
- 4) Jorgenson JW, Lukacs KD. Anal Chem 1981; 53: 1298-302.
- 5) Ikuta N, Yamada Y, Hirokawa T. Electrophoresis 2000; 21: 360-6.
- 6) Ikuta N, Yamada Y, Yoshiyama T, Hirokawa T. J Chromatogr A 2000; 894: 11-7.
- 7) Lee TT, Yeung ES. Anal Chem 1991; 63: 2842-8.
- 8) Ikuta N, Sakamoto H, Yamada Y, Hirokawa T. J Chromatogr A 1999; 838: 19-29.
- 9) Quirino JP, Terabe S. J Chromatogr A 2000; 902: 119-35.
- 10) Shihabi ZK. J Chromatogr A 2000; 902: 107-17.
- 11) Beckers JL, Ackermans MT. J Chromatogr A 1993; 629: 371-8.
- 12) Hirokawa T, Ikuta N, Yoshiyama T. J Chromatogr A 2000; 894: 3-9.
- 13) Hirokawa T, Nishino M, Aoki N, Kiso Y, Sawamoto Y, Yagi T, Akiyama J. J Chromatogr 1983; 271: D 1-D 106.
- 14) Robinson RA, Stokes RH. Electrolyte solutions. London: Butterworths, 1959.