

地殻変動をはかる

角 皆 潤

意外に思われる方が多いかもしれないが、地震のようないわゆる「地殻変動」の研究と分析化学との接点が多い。しかもその重要性は昨今の研究の進歩で非常に大きくなっている。現在地震発生過程の物質科学的解析を目的に、日本近海で海底下に存在する地震発生帯まで到達する深部掘削が計画されている。この中でも分析化学に寄せられている期待は非常に大きく、掘削後の孔内の水の長期化学モニタリングの実現が検討されている。その具体的な中味は荒唐無稽で実現が不可能なことものように見えるが、そのように見えてしまうのは今までそのような需要がなく、分析化学の専門家が誰も挑戦してこなかったのも大きな原因である。本格的に検討を進めていけば不可能ではないと考えている。

地震発生前の地下水の変動

大地震にはよく前兆現象があると言われる。例えば「大地震発生の前日にナマズが大ジャンプした」という話である。社会常識ではこのような前兆はあってもおかしくないと考えられる人は多いだろうが、科学的には大部分が「前兆」とは見なされないのが普通である。なぜなら、大部分の前兆現象については科学的に有意な変化であるかどうかを客観的に証明できないためである。

ある変化（前兆）が科学的に有意であることを証明するためには、少なくともその変化が現れる以前に、しかも変化が現れた期間の何倍もの間、客観的で信頼できるデータを取っておかなければならない。地震発生前日以外はその前何年にもわたってナマズが大ジャンプしている日がなかったことを日々ナマズから目を離さず客観的に記録していた人はいない。この「客観性」を満たして前兆の存在を証明したのは化学である。

最も有名な事例は1966年に旧ソ連ウズベク共和国のタシケント地方で起きた地震（M=5.5）の前の地下水中のラドン濃度の変化である。この町では安全性の観点から地下水中の放射性物質の濃度の計測が定期的に行われていた。このデータを地震発生後に検証したところ、ラドンをはじめとした溶存成分の濃度が地震の直前に急激に変化していた¹⁾。ラドンは一般に地殻岩石中の空隙に高濃度に封入されている気体である。これが増えたということは地震発生前に地殻の中に（おそらく微小な）亀裂が生成して、中にあったラドンが放出されたというシナリオが考えられる。

日本でも同様の事例がある。1995年におきた兵庫県南部地震に際して、震源地である神戸市内で揚水され、日々飲料用としてペットボトルに封入され市販されていた地下水があった。これを地震後に製造年月日（＝揚水日）ごとに回収して、中に溶けていた保存性の良い成分（塩化物イオンなど）を分析した

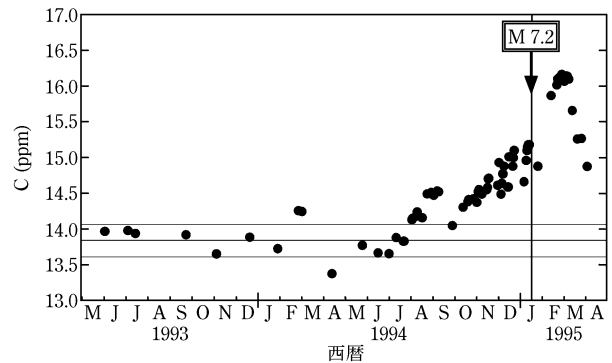


図1 1995年兵庫県南部地震発生前後の神戸市内の地下水中の塩化物イオン濃度の時間変化

ところ、組成が約半年前から変化していた²⁾(図1)。

このように地殻内部の比較的浅部を震源としたいいくつかの地震については、その前兆的な変動の存在が化学によって証明されてきており、巨大地震の発生直前の準備過程や地殻内の状態変化の開始時期などに新しい知見をもたらした。しかし、これで地震の予知や発生過程の解析が飛躍的に進んだかと言えば必ずしもそうではなかった。最大の原因は地震震源と地下水との間の距離である。震源は浅くて10 km前後、一方地下水の帯水層のほうは深くて0.5 km、普通は0.1 km程度であり、両者の間の距離は地下水が通常移動するには何10年もかかる距離なのである。となれば観測された地下水の異常は、未知の地震発生準備過程の直接の影響と考えるよりも、地殻応力や観測されない微小地震など他要因の変動の結果もたらされる二次的な結果に過ぎないと思えるほうが妥当に思えてくる。その場合、前兆が出現するかしないかはその要因次第であって、個別の地震の一つ一つに同様の変化が起こる保証がないことになる。また地下水の化学組成をモニターするよりも、その変化を媒介している「他要因」を探して計測したほうがもっと鋭敏に、かつ再現性良く地震の出現を予測し、あるいは発生過程を解析することを可能にするとも考えられる。

水と地震の関係

ところが最近になって、地震発生と水との関係がこれまで以上に注目されている。これは、前の章で述べた地震発生帯近傍における水の挙動ではなく、地震発生帯そのものにおける水の挙動である。

地震はそもそも、地球の表面に多数存在するプレートとプレートのぶつかり合いやこすれ合いが原因となっている。日本やチリのようなプレートの沈み込み帯と呼ばれる場所では、海

洋性プレートが大陸性プレートにぶつかって海溝から大陸性プレートの下に潜り込んでおり、その際の摩擦が他にはない巨大地震を引き起こす。その仕組みは以下のようなものである。

海洋性プレートの沈み込みに沿って、海洋性プレート上の水は粘土鉱物や含水鉱物として、あるいは結晶粒間や層間や空隙に取り込まれた形で地殻下部や最後はマントルへと運ばれている。しかし、すべてがマントルまで到達するわけではなく、大部分はその途中の様々な段階で脱水して両プレートの境界に放出されていると考えられている。脱水が進んでよりプレート境界が堅く固着すると、海洋性プレートは大陸性プレートを自らが進む下方向と一緒に引きずり込むようになる。しかし、剛体である大陸性プレートはそのままいつまでも引きずり込まれるわけではなく、やがてある程度応力がたまったところで元に戻ろうとして一気に反発する。これが地震性すべりであり、これが起こる場所を地震発生帯と呼ぶ(図2)。

しかし、海洋性プレートと大陸性プレートの境界はどこでも地震性すべりが起こるかというそうではない。脱水の具合によっては、非地震性のすべりで済む場合もあることがわかってきた。つまり、水が一種の「潤滑油」になって地震が発生しないですると滑っていく場所もあるのである。このような脱水現象の進み具合が地震のような破壊現象にどう影響するかという問題は、地球深部の地震発生を議論する上で非常に重要であるというのが共通の認識になりつつある³⁾⁴⁾。脱水の具合とそれによって起こる地震の大きさの関係がわかれば、もしかしたら人為的に地震発生予想箇所に水を出し入れしてたまった地震エネルギーを解放させたり、また地震発生そのものを非地震性すべりに変えて防いだりすることができるようになるかもしれない。

また地震発生に限らず、プレートの沈み込み帯の高温高圧下で起こる水の挙動は注目すべき研究対象となっている。高温高圧では含水鉱物はもはや安定ではなく、水を放出しマグマに溶解し、火山を生成する。これは水の特筆すべき性質で、わずかに1~2%程度の含水量でケイ酸塩鉱物・岩石(例えば、石英、玄武岩やかんらん岩)の融点が数100度から200度も下がる。また粘性率も急激に下がる。そのほか、水は様々な物質を溶かして流動するため、地殻やマントルにおける物質の循環にも大きく寄与すると考えられている。

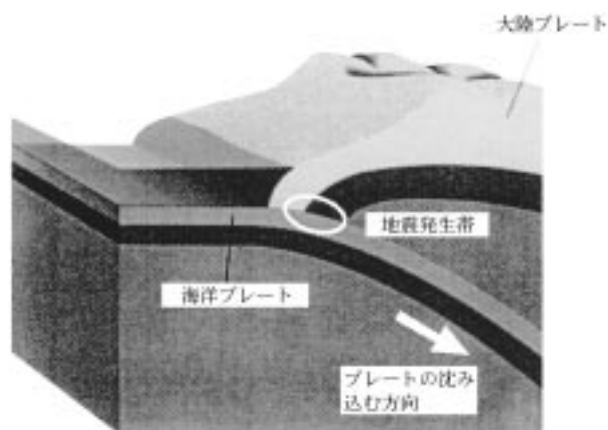


図2 プレート沈み込み帯における地震発生のイメージ図

地震発生帯掘削孔における長期化学モニタリングの意義

今年、海洋科学技術センターの地球深部探査船「ちきゅう」が新しく進水した(図3)。これは海底下に科学目的の掘削を行う船で、プレート沈み込みによって生成する地震発生帯まで掘削する能力がある。沈み込み帯では、深さ5~10km弱で地震発生帯となる。これまでの技術ではせいぜい海底下3kmを掘削するのがやっとであった。この最新の掘削船は、海底下7kmの掘削が可能になるように設計されている。計画では2007年にも日本近海において地震発生帯までの到達を目指した深部掘削が、日本近海の南海トラフという海洋プレートの沈み込みに伴う地震発生帯(図4)で開始される³⁾⁵⁾。

このような深部掘削によって、これまで専門家の想像の中だけの産物であったプレート沈み込みに伴う水の状態変化や、これと地震発生帯との関係が実試料によって解析可能になるだろう。しかし掘削で得た試料によって解析できるのは、実はプレート全体から見ればほんの一部にしか過ぎない掘削孔内の試料の中に現在ある水の量とその存在状態の解析だけである。もちろんこれはこれで人類史上初の快挙となるだろうが、地震と水との関係に関する一連の魅力的でかつ難しい問題、例えば、1 どこから脱水したどれほどの量の水が何処へ向かって流れ出るのか、2 脱水が定期的にかかるのかそれともイベント的に起こるのか、3 脱水の直接の引き金になっているのは何か、4 脱水量と地震の大きさの関係、などの本質的な解決には、さらに研究手法の工夫が必要である。

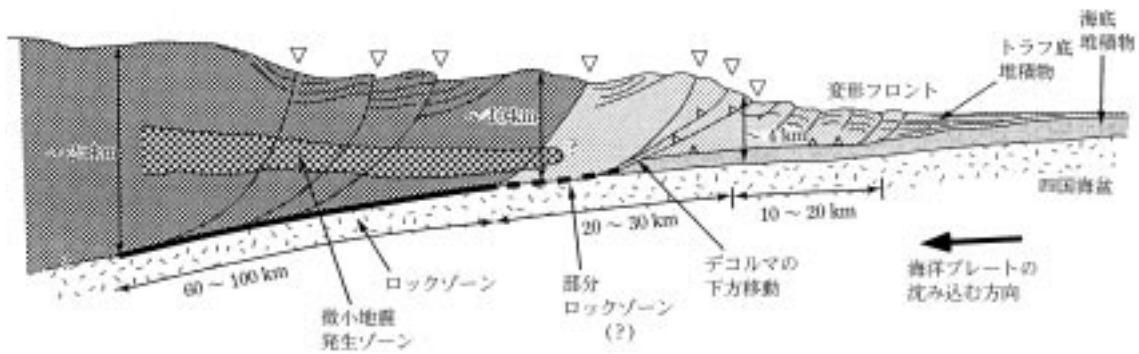
その解決のために、掘削後の孔を利用した長期孔内計測が計画されている³⁾⁶⁾。掘削孔は掘削直後は海水や掘削時に使用した泥水に満たされてしまうが、ケーシング(図5参照)に適宜穴を開けておけば、やがて周囲から脱水した水が孔内に流入してくる。その流入量やさらに流入量の時間変化を長期に連続に観測することで、先ほどの問題は解決できると期待される。

孔内計測の問題点と化学計測による解決

課題は流体移動を検出するときのその検出方法と、水の起源の解明方法である。プレート境界から脱水して流入する水の流入量は、孔内を埋める海水の量に対して非常に小さいことが予



図3 科学掘削研究船「ちきゅう」完成予想図¹⁾。



文献 10) を一部改変。印は巨大地震時に動く可能性のある派生断層。

図 4 日本近海海底（南海トラフ域）における地震発生帯の模式断面図

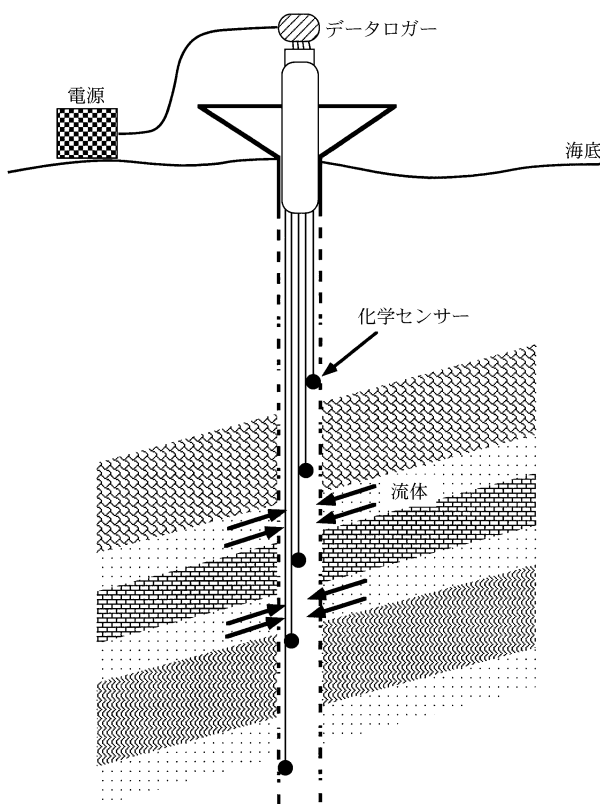


図 5 孔内化学モニタリングのイメージ図。

想されている。ある試算では、掘削孔の中の孔内水が周囲の岩石圏と平衡な自然の状態に戻るのに 60 年以上かかるという試算もある。水圧や温度といった物理計測だけでは水の流入量はもちろん、その有無に関してすらも情報が得られる保証はない。しかも、その水がどこから来るかという点を物理計測のみから考察することは非常に難しい。

そこで着目されているのが、化学計測である。化学成分を適切に選択すれば、それは非常に高感度な水の流入に対する指標になる。海水にはほとんど存在しないが、岩石圏から脱水してくる水には多量に含まれることが予想される成分は多い。特に酸化・還元状態の変化に敏感な成分（Fe や CH_4 ）や、寿命は短いですが岩石中での微小破壊を鋭敏に反映する成分（ Rn や H_2 ）

などは有用な指標となってくれる可能性が高い。

一つの例を挙げて検証してみたい。今、孔内を埋める海水が温度 200 度、塩濃度 35 パーミル、メタン濃度 1 mmol/kg とする。つまり、温度以外は底層海水と考える。これにプレート境界から放出された流体が混入したとする。ここで混入してくる流体の化学組成として、沖縄トラフなどで見られる海底熱水を代用して考えてみたい。温度 350 度、塩濃度 20 パーミル、メタン濃度 1 mmol/kg とする。もし流体が 1% 混入してくれれば、温度は 1.2 度上昇するので、通常の温度計でもなんとか検出可能である。しかし、これが 0.01% になると温度は 0.012 度しか上昇せず、現在の通常の温度計では検出が難しくなってしまう。通常は潮汐やノイズの変動が加わるため、かなり絶望的である。しかしメタンの場合は、1% 混入で濃度が 10000 倍以上に、0.01% でも 100 倍以上に増加し、余裕を持って検出可能である。これが化学の有利な点である。しかし化学ならなんでも良いわけではない。先の例で塩濃度を指標に選んでしまうと、1% 混入で 0.15 パーミル減少、0.01% 混入で 0.0015 パーミル減少ということではほとんど役に立たない。「適切な」化学項目の選択が重要なのである。また温度では、流体が高温だったか低温だったかという情報しか与えてくれないが、メタンであれば、それが還元環境からきたことも同時に教えてくれる。流体の起源考察の束縛条件としても大いに役に立つ。

化学計測の課題

では実際どうやって化学を測るのか？ 筆者はいろいろ調べたが、現状ではそのまま使用に耐え得るようなセンサーは存在していない。何が問題なのか整理してみたい。

まず最も難問なのは、掘削孔内の環境に耐えなければいけないという点である。予想されている一番最悪の環境は温度 200 度以上、圧力 900 気圧以上となる。また、環境と同様に問題なのは長期間の安定性である。現場は孔の入口部分でも水深 2500 m で、気軽に引き上げてメンテナンスや部品の交換・補充にはいけない。少なくとも数年のオーダーで安定に、しかもキャリブレーションなしで稼働してくれないと現実的なセンサーにならない。また、大きさも掘削孔に放り込めるような小型のものでなければならない。現実的なのは直径 10 cm 以下である。さらに問題なのは、掘削孔内の化学組成が予想がつか

ないという点である。主成分は海水に近い（つまり海水程度の高塩濃度）となっていて、かなり還元的な雰囲気であることも予想されるが、それが具体的にどの程度還元的なのかわからない。ある程度広範囲の濃度レベルに対応できなければならない。しかし、だからといって精度をおろそかにもできない。変動幅も予想がつかないので実現できる限り高精度である必要がある。

化学計測実現のために

現段階で最も可能性の高い形を考えてみたい。まず第一の制約として、回路・IC 類に掘削孔内の高温環境に耐えられるものを用意するのは非常に難しいと思われるので、センサー部のみを深部に投入し、データロガー部や電源は海底付近に設置する分離式のもの現実的だろう（図5）。この形のほうが小型化にも好都合である。この意味で現在手近な所に存在する海洋測器の小手先の改良では対応は難しい。専用のものを一から開発する必要があると思われる。

表1には各種センサーの計測の意義と実現の可能性を筆者が独断と偏見でまとめたものである。なお、この表の「実現の可能性」はあくまで海底付近での環境（温度3度程度・圧力250気圧程度）での実現の可能性で、掘削孔内深部で予想されている一番最悪の環境まで想定したものではない。現状では全滅だろう。このままでは孔内化学計測はアイデアだけで終わる可能性も非常に高いと思われる。

しかし、なぜすぐに使用可能なセンサーがないか考えてほしい。これは、高温・高圧・高塩濃度という環境が化学センサーにとって実現を難しくしているという側面もあるだろうが、実際にはこれまでもあまり需要がなく誰も作って（いや考えてすら）いないという点が非常に大きいと思う。表1で実現の可能性大とした化学センサーは、海底の湧水をターゲットに研究者が個人レベルで努力して開発したものであるか、さもなくば一般海洋環境観測用に企業が開発したもののの中に、たまたま海底下に応用可能なものがあったというだけである。

宇宙船パイオニア・ビーナス号が温度460度、圧力90気圧の金星大気中にセンサーを降下させて、金星大気には硫酸粒子が大量に含まれることや、水素中の重水素含有量が地球に比べて非常に高いことを明らかにしたのは、今から25年近くも昔のことである⁷⁾⁸⁾⁹⁾。当時考えられる最高の英知を結集し、さらに時間とお金をかけてこの信じがたい測定を実現した。今後、海底下における現象に多くの人々の目が向くことで、掘削孔の化学観測も実現する可能性は大いにあると思う。

最後に拙文を読まれた方で、興味を持たれる方、情報やアイデアの提供可能な方の出現を期待していることをお伝えしておきます。関連する専門分野の多くの方の協力なしには、この話は前には進まないことは間違いありません。よろしく申し上げます。

謝辞

本稿の執筆にあたって多くの方に情報を寄せていただきました：蒲生俊敬様（北海道大学）、木下正高様（JAMSTEC）、五十嵐丈二様（東京大学理学部）、紀本英志様（紀本電子工業）、岡村慶様（京都大学）、中村光一様（産総研）。この場を借りて御礼申し上げます。また、本稿の執筆にはIODP国内推進委員会掘削・計測専門部会の孔内計測検討

表1 各種化学センサーの意義と情報量（有用性）、および掘削孔内もしくは海底設置の形で連続観測実現の可能性一覧*

項目	流体移動に対する感度	情報量（有用性）	「海底観測」実現の可能性	コメント
塩濃度（電気伝導度）				安定度・実績十分で簡便。しかし流体移動に対する感度低い。
ラドン（放射線）				岩石破壊の高感度指標で実績もそこそこある。しかし堆積物や岩石が主要放出源であり、掘削孔観測ではその補正方法が悩ましい。
Eh				還元性流体の高感度指標で実績有り。酸素・硫化水素を測定しているのと意味は同じ。
濁度				安定度・実績十分で簡便。
酸素				感度低い。長期安定性は不安。
pH				何を表しているのかわからない
硫化水素				保存成分ではないため指標としてはあまり有用でない。
Fe・Mn				感度は高い場合と低い場合の両方がある。長期測定には改良必要。
栄養塩				生物的環境の指標。でも感度は低い。
メタン				現在あるものは水深2000メートルまででしか使えず応答性も悪い。改良必要。
水素			×	岩石破壊の高感度指標だが、現場観測は無理。工夫すれば可能かもしれない。
希ガス同位体比			×	流体の起源考察の最高の指標だが、現場観測は無理。
メタン炭素同位体比			×	流体の起源の良い指標だが現場観測は無理。
水同位体比			×	流体の起源の良い指標だが現場観測は無理。

* 完全に角皆の独断と偏見に基づいています。関係者の皆さん、お気を悪くされたらごめなさい。意義や可能性の高い物を最高五つ星で表現。

ワーキンググループ（座長 篠原雅尚）における議論が大変役に立ちました。関係者の皆様にこの場をお借りして御礼申し上げます。

文献

- 1) V. I. Ulomov, B. Z. Mavashev: The Tashkent earthquake of 26 April 1966, pp. 188-192, (1971), (Acad. Nauk Uzbek SSR FAN).
- 2) U. Tsunogai, H. Wakita: Science, 233: 61 (1995).
- 3) 木村 学, 末広 潔, 平 朝彦, 徳山英一, 金田義行編: “沈み込み帯地震発生帯: その物質科学と深海掘削”, p. 186 (2002), (海洋出版: 月刊地球, 号外, 第36巻).
- 4) 笠原順三, 鳥海光弘, 川村雄行編: “地震発生と水 沈み込み帯の地震と水が関わる物質科学”印刷中 (2002), (東大出版会)
- 5) <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/odinfo/navi.html>
- 6) <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/odinfo/technical.html>

- 7) C. T. Russell : "Venus and Mars : Atmospheres, Ionospheres and Solar Wind Interactions". (edited by J. G. Luhmann, M. Tatrallyay and R. O. Pepin) p. 225 (1992), (American Geophysical Union, Washington).
- 8) D. C. Donahue, T. M., J. H. Hoffman, R. R. Hodges, Jr. : Science, 216 630 (1982).
- 9) R. G. Knollenberg, D. M. Hunten : J. Geophys. Res., 85 8039, (1980).
- 10) 平成 12 年度科学技術振興調整費「南海トラフにおける海溝型巨大地震災害軽減のための地震発生機構のモデル化・観測システムの高度化に関する総合研究」報告書.
- 11) 平 朝彦, 木村 学, 末広 潔, 徐 垣, 金田義行, 倉本真一 : 月刊地球, 号外, 36 7 (2002).



角 皆 潤 (Urumu TSUNOGAI)

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 (〒060-0810 札幌市北区北 10 条 8 丁目) 東京大学大学院理学系研究化学専攻博士課程修了。博士 (理学)。現在の研究テーマ 安定同位体比を指標にした大気・海洋・地殻における揮発性成分の挙動と起源。主な著書 “海と環境 海が変わると地球が変わる”(分担執筆)(講談社) 趣味 合唱と温泉。

E-mail : urumu@ep.sci.hokudai.ac.jp

主な分析関係欧文誌の URL

Analytical Biochemistry http://www.academicpress.com/ab	Journal of Chromatography B http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/2/6/8/9/
Analytical Chemistry http://pubs.acs.org/journals/ancham/index.html	Journal of Chromatographic Science http://www.j-chrom-sci.com/
Analytica Chimica Acta http://www.elsevier.nl/locate/inca/502681	Journal of Electroanalytical Chemistry http://www.elsevier.com/locate/issn/00220728
Analytical Letters http://www.dekker.com/servlet/product/productid/AL	Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies http://www.dekker.com/servlet/product/productid/JLC
Analytical Sciences http://wwwsoc.nii.ac.jp/jsac/analsci.html	Journal of Separation Science http://www.wiley-vch.de/publish/en/journals/alphabeticIndex/22591
The Analyst http://www.rsc.org/analyst	Journal of Trace and Microprobe Techniques http://www.dekker.com/servlet/product/productid/TMA
Bulletin of the Chemical Society of Japan http://www.chemistry.or.jp/journals/bcsj	LC-GC - The Magazine of Separation Science http://www.lcgcmag.com/
Chemistry Letters http://www.chemistry.or.jp/journals/chem-lett/index.html	Microchemical Journal http://www.elsevier.nl/locate/microc
Chromatographia http://www.chromatographia.de/	Mikrochimica Acta http://link.springer-ny.com/link/service/journals/00604/index.htm
Clinical Chemistry http://www.aacc.org/ccj/	Rapid Communications in Mass Spectrometry http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jtoc?ID=4849
Clinica Chimica Acta http://www.elsevier.com/locate/cca	Separation and Purification Methods http://www.dekker.com/servlet/product/productid/SPM
Environmental Science & Technology http://pubs.acs.org/hotartcl/est/est.html	Solvent Extraction and Ion Exchange http://www.dekker.com/servlet/product/productid/SEI
Fresenius' Journal of Analytical Chemistry http://gort.ucsd.edu/newjour/f/msg02349.html	Spectrochimica Acta A http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/2/5/4/3/6/
Food Additives & Contaminants http://www.tandf.co.uk/journals/tf/0265203X.html	Spectrochimica Acta B http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/2/5/4/3/7/
Journal of the American Society for Mass Spectrometry http://www.elsevier.com/homepage/saa/webjam/	Talanta http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/2/5/4/3/8/
Journal of Analytical Atomic Spectrometry http://www.rsc.org/jaas	Trends in Analytical Chemistry http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/2/6/9/5/
Journal of Analytical Chemistry (Zhurnal Analiticheskoi Khimii) http://www.maik.rssi.ru/cgi-bin/journal.pl?name=anchem&page=online	
Journal of Analytical Toxicology http://www.jatox.com/	
Journal of AOAC International http://www.usaco.co.jp/products/sub/aoac.html	
Journal of Chromatography A http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/2/6/8/8/	

(上記雑誌のホームページへは、本会ホームページ(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jsac/>)においてもリンクサービスを始めています。学会トップページ リンク ぶんせきタイトルサービスの順にアクセスするか、または次の URL で直接リンクページにアクセスできます。 <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jsac/titleservice.html>)