

科学機器としての限外顕微鏡 — 発明後の諸科学への波及 — *

永 平 幸 雄

1) はじめに

19世紀末、コロイド化学は、「コロイドは溶液かそれとも懸濁液か」という根本的な命題で論争が行われていた。その論争の解決を阻んでいたのは、コロイド粒子の多くが光学顕微鏡の可視化の限界を越えていたことであった。その意味で、科学機器としての顕微鏡の能力がコロイド化学の発達を押しとどめる障壁となっていたのである。

1903年に発明された限外顕微鏡は、この障壁を取り払い、コロイド化学の基礎固めを行い、さらにはその隆盛期をもたらすとともに、「分子の实在性」論争¹⁾の解決につながったブラウン運動の研究に有力な実験手段を与えた。この限外顕微鏡の事例にみられるように、科学の歴史はまた、科学機器の発達史、発明史でもあり、それらを無視しては科学の発達の構造は語れない。

科学機器と科学の発達に視点をすえた科学史研究は非常に重要であると思われる。そのような研究は数少ないが、宮下晋吉氏は、実験装置それ自身に理論があると考え、ウイルソン霧箱史でそれを展開している²⁾。日野川静枝氏は、加速器の歴史を解明している³⁾。

ここで取り上げる限外顕微鏡の場合、科学機器産業との関わりの中で生まれてきたこと、技術的な課題がその発明の動機となったこと等、実験機器の歴史として、これまでの研究とは違った別の興味深い研究課題を備えている。

前報では、限外顕微鏡の発明に至る経過の中で、特に学説史を中心として詳

* 本稿の一部は、1992年5月に行われた第39回科学史学会にて発表したものである。また、この研究の一部は、文部省の科学研究費・一般研究C(1991~1993年度)にて行われたものである。

細に分析したが⁴⁾、本稿では、主として、限外顕微鏡の発明後の諸科学への波及の状況を顕微鏡学の学術誌の索引を利用しながら説明していく。

2) 光学顕微鏡の限界と限外顕微鏡

1861年、T.Grahamは、物質をコロイドとクリスタロイドに区別し、コロイドを定義した⁵⁾。それ以降、コロイドの研究が進むとともに、そもそも「コロイドとはなにか」、溶液なのか、懸濁液なのか、という根本的な疑問が生じ、19世紀末に論争が盛んになった⁶⁾。その論争の解決を妨げていた1つの要因が、光学顕微鏡の解像度の限界であった。コロイドの世界は、光学顕微鏡では見ることのできない大きさの世界であった。

19世紀を通じて、光学顕微鏡は大きく発展していった。当初、顕微鏡は、装置を改良していけば、どんなに小さな物でも見えるようになると考えられていたが、やがて、光の波動性による可視化の限界がE.Abbeによって示された。それによると、顕微鏡の分解能は、以下の式で決まる。

$$d = \frac{0.61 \lambda}{n \sin u}$$

ここで、 λ は使用する光の波長、 n は2つの媒体の間の屈折率、 u が鏡口角である。 d は、顕微鏡によって2点として観測できる最小距離である。したがって、この d を小さくするには、 λ を小さくする、すなわち波長を短くする。また n を大きくしたり、 u を大きくすればよいのである。こうして、1872年には、Abbeはレンズとプレパラートの上にセダー油を入れた液浸法を使って解像度を上げることに成功するし、1904年には、A.Kohlerは紫外線顕微鏡を完成させる。しかしながら、こうした試みにも関わらず、光学顕微鏡の理論的限界以上のものを見ることは不可能であった⁷⁾。

光学顕微鏡のこの可視化の限界に1つの道を開いたのが、R.ZsigmondyとH.Siedentopfによって発明され、1903年に発表された限外顕微鏡である⁸⁾。従来の光学顕微鏡が、対象物を透過してきた光を見るのに対して、光を対物レンズと直角な方向から照射し、その反射光を観察するのである。こうすることによって、透過光では見ることのできなかつた微小粒子が、夜空に輝く星のよう

に、形を見分けることは出来ないという欠点はあるものの、その存在を観察することができる。

1920年、王立協会で開かれたRoyal Microscopical Societyその他3団体の共催によるシンポジウム「顕微鏡、そのデザイン、構造および応用」では、限外顕微鏡の部門で次のように述べられている⁹⁾。

直接照射での顕微鏡観察の限界は、約 $1/4,000\text{mm}$ 、紫外線照射およびプロモナフタレン液浸法を使った場合は $12/100,000\text{mm}$ となる。これより小さい粒子の観察は、限外顕微鏡段階と名づけられる。H.Siedentopfによれば、おおよそ $4/1,000,000$ から $6/1,000,000\text{mm}$ の直径の粒子が観察できる。その大きさは複雑な化合物の分子の大きさに非常に近く、ある場合には、その大きさに届く。

したがって、強力な光の強さと暗い視野が条件として整えば、人間の可視の限界を越えるような分子を見ることのできる可能性、および分子間の引力と斥力の役割を明らかにする希望が、研究者の前に出現する。ただし、限外顕微鏡粒子の明るさは、その直径の6乗で減少し始める。

このように限外顕微鏡による微小物質の可視化への期待が述べられている。

3) R.ZsigmondyとH.Siedentopfの共同作業の成立

前報で述べたように、R.Zsigmondy¹⁰⁾は、コロイドは溶液か懸濁液かで、L.VaninoおよびK.Stoecklとの間で激しい論争を行っていた。そうした中で、コロイド粒子を実際に顕微鏡で観測する必要にせまられた。そこで、簡単な試作実験の後、JenaのZeiss光学工場の研究員であったH.Siedentopf¹¹⁾と協力して限外顕微鏡の製作にあたることになった。R.Zsigmondyは金ルビーガラスの作成、H.Siedentopfは限外顕微鏡の作成に分担した。R.ZsigmondyとH.Siedentopfがどのようにして知り合い、どのようにして機器の製作を進めていったのかはわからない¹²⁾。R.Zsigmondyは1897年から1900年までの3年間、JenaのSchottガラス工場に努めていたこと、着色ガラスの開発にたずさわっていたことが、H.Siedentopfと知り合い、Zeiss光学工場への出入りを容易にしたのかもしれない。ともかく、当時顕微鏡および光学機器において世界的にトップクラスにあったZeiss社およびその顕微鏡研究者の協力は、限外顕微鏡の発明

に大きな寄与がなされたことは疑いない。

R.ZsigmondyとH.Siedentopfの共同による限外顕微鏡の発明にいたる経過は次のようにまとめることができる。

- ①R.ZsigmondyとH.Siedentopfの両方とも、JenaのSchottガラス工場およびZeiss光学工場という、当時の世界的な先端をいく科学機器メーカーの研究者であった。
- ②限外顕微鏡の発明の動機は、光学機器に使用する着色ガラス、金ルビーガラスの開発という、科学機器の改良に伴う技術的課題である。
- ③より優れた金ルビーガラスの開発をめざすなかで、「コロイドの本質」論争という科学的な課題に達した。
- ④その論争を解決するために、光学顕微鏡の可視限界を越える装置を作る必要にせまられた。
- ⑤そのような装置を作る方向として、コロイドを識別する有名な方法であるチンダル現象が利用された。これも「コロイド」に関わる科学的な論争の延長線上にある。
- ⑥限外顕微鏡を作る技術的条件は、Zeiss光学工場とその工場の顕微鏡研究者であったH.Siedentopfによって整えられた。

4) 限外顕微鏡の発明後の装置の改良

1903年のR.ZsigmondyとH.Siedentopfの論文¹³⁾に載せられた限外顕微鏡の装置図は次頁の図1である。

今日スリット限外顕微鏡と呼ばれるものである。レンズおよびスリットで光束を狭く絞り、対象物に入射する。出きる限り迷光を取り除き、光が照射された箇所以外は完全な暗視野にすること、強い光線が入射できるようにすること、光線の集束状態がよいことが大切で、そのためのいろいろな工夫がなされている。

限外顕微鏡は科学機器として、光学顕微鏡の限界を越えるものとして市場価値のあるものである。科学機器メーカーであるZeiss光学工場で、工場の研究者であったH.Siedentopfにより製造されたのであるから、早くから商品として

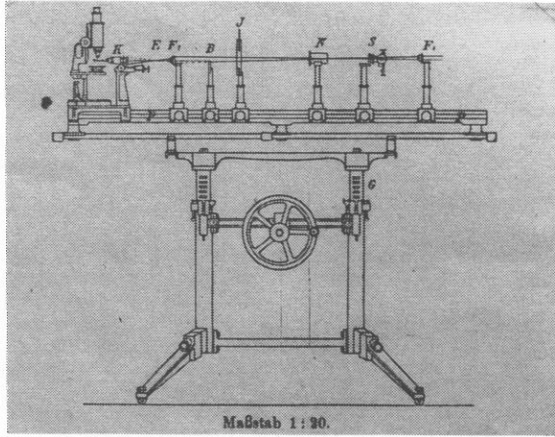


図1 1903年に発表された限外顕微鏡の装置図¹⁴⁾

の改良がなされていった。図2はZeiss社が1904年に発表した限外顕微鏡の装置図である¹⁵⁾。1903年のR.ZsigmondyとH.Siedentopfの論文に掲載された装置図と比べると、小さくなっているし、照射装置も備えられ、また液体や気体を流して観察できるように改良されている。いわゆる市販科学機器としての形態が備わってくる。

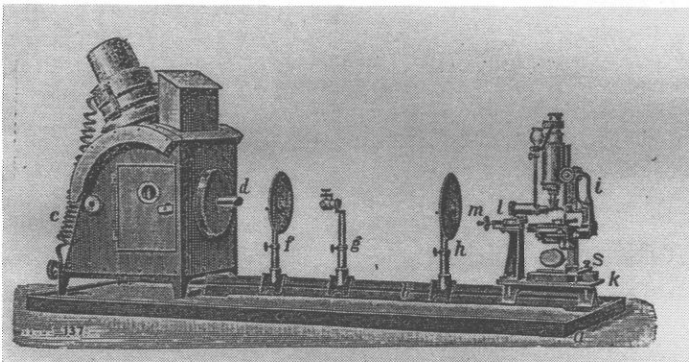


図2 Zeiss社の1904年のスリット限外顕微鏡¹⁶⁾

他方、装置のさらなる簡便化が求められる。Zeiss社の限外顕微鏡は光学用の台架が必要であったが、A.CotonとH.Moutonは試料を載せる台で光を屈折

させ、試料の下方から光があたり、全反射して、プリズムの他端に逃げるように装置を工夫した¹⁷⁾。これで光学用台架は不必要になり、装置はさらにコンパクトになる。

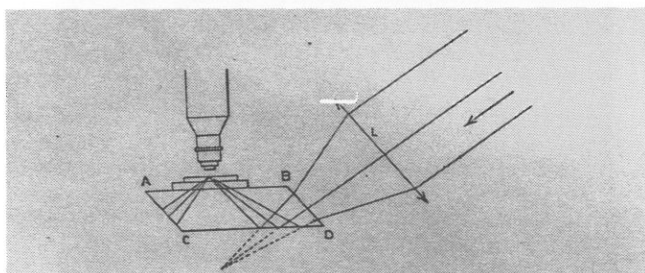


図3 A.CotonとH.Moutonの反射集光器¹⁸⁾

従来の顕微鏡とは全く別に限外顕微鏡を購入するのは、資金的に大変である。従来の顕微鏡に付属装置として、特別な集光器を付け、それで限外顕微鏡に変わるのであれば、非常に便利である。A.CotonとH.Moutonの反射による照射装置はその可能性を引き出した。1907年には、H.Siedentopfがパラボロイド集光器¹⁹⁾を、C.Reichertも類似の反射集光器²⁰⁾を発表している。パラボロイド集光器では、放物面の上側を切りとったもので、光は面で反射して上部の試料で散乱光となるのである。

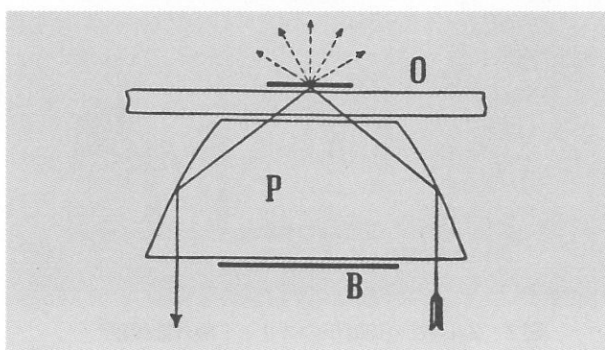


図4 パラボロイド集光器²¹⁾

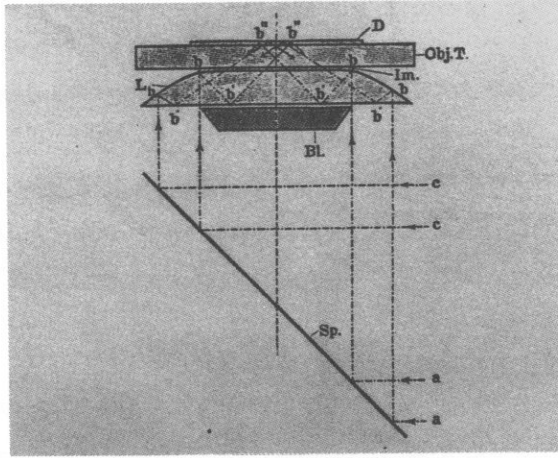


図5 C.Reichertの集光器²²⁾

1910年には、H.Siedentopfは、パラボloid集光器に比べて厳密な使用条件が要求されるが、さらに強いコントラストをもつ暗視野照明が得られるカーデイオイド集光器を発表した²³⁾。

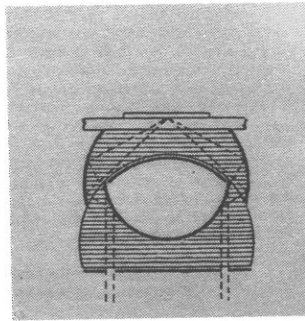


図6 カーデイオイド集光器²⁴⁾

より強いコントラストをもつこと、より小さい装置であること、他の顕微鏡と装置を共用できること、このような方向に発展していったのである。

5) 顕微鏡の学術誌でみた限外顕微鏡関係記事数の年推移

ある分野で発明の必要にせまられ、その発明の技術的条件が存在し、実際に

発明にたどりつき、さらにはそれが科学機器メーカーから市販されていく時、それは、他の諸科学の研究の有力な研究機器になる可能性を持つ。限外顕微鏡の場合、光学顕微鏡の可視化の限界を越える機器として、他の諸科学にどのように取り入れられ、活用されていったのであろうか。

できるかぎり、さまざまな諸分野の科学の領域への利用を調べてみるために、J.Royal Micro.Soc.に載せられている限外顕微鏡関係の記事を追跡してみた。J.Royal Micro.Soc.は1878年にイギリスで創刊されたが、顕微鏡関係の雑誌の中で最も古い。その6年後に、ドイツでZeitschrift für Wissenschaftliche Mikroskope und Mikroskopische Technikが発刊される。

J.Royal Micro.Soc.は、装置としての顕微鏡学の研究、顕微鏡の技術的改良、顕微鏡のさまざまな応用の紹介等を内容としている雑誌である。他の学術雑誌に掲載された顕微鏡関係の雑誌の内容を要約した抄録誌の役割もはたしている。このことから、限外顕微鏡の他の諸科学への利用を追跡するには最も適当な雑誌といえよう。

1904年から1920年までのJ.Royal Micro.Soc.の索引の中で、H.Siedentopf、R.Zsigmondy、Ultramicroscope、Dark field microscope という4つの語のいずれかの語を含む記事を列举し、その内容を検討してみた。

図7は、それに掲載された限外顕微鏡関係の記事数の年推移をみたものである。限外顕微鏡が発表された年、1903年以後しばらくは記事は多いが、7年後の1910年を頂点として急激に減少していつているのがわかる。

それらの記事の内容を分類してみると、装置に関する記事は18件、コロイド化学で13件、医学生物学関係で8件、そのほかには、単行本の紹介記事2件、限外顕微鏡の総説記事1件となる。

J.Royal Micro.Soc.が、顕微鏡関係の新しい発明や改良、顕微鏡に関わる科学的研究、顕微鏡の新しい応用、これらの紹介を内容としている。このことは限外顕微鏡の場合にもあらわれている。装置に関する記事は18件あるが、この装置の改良の重要なものは、1903年の限外顕微鏡の発明の7年後、1910年のカーディオイド集光器まで続く。装置の改良は、新しい応用をさまざまな研究分野にもたらす。その応用の結果がまたJ.Royal Micro.Soc.に紹介される。しかし、

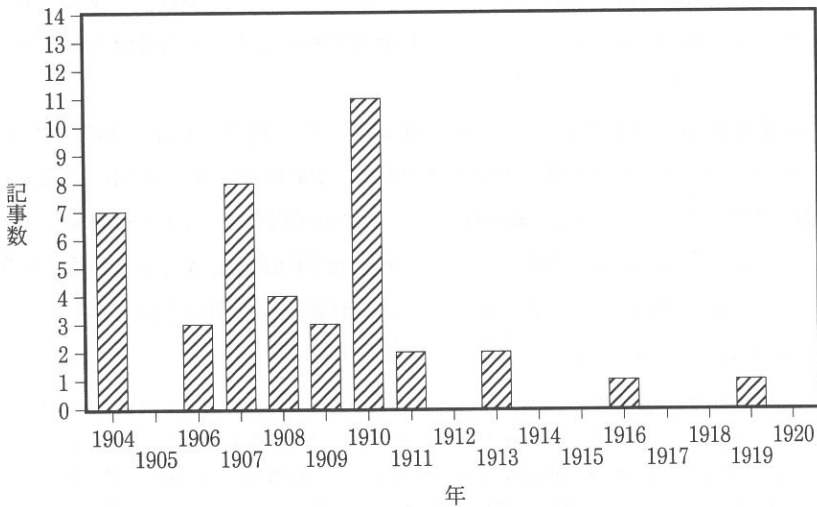


図7 J. Royal Micro. Soc. に掲載された
限外顕微鏡関係の記事数の年推移

装置の改良が終了すれば、その応用に関する記事はなくなる。上記の限外顕微鏡関係の記事数の年推移の図で1910年以降、記事が年に1ないし2になっているのはそのためである。これ以降は、限外顕微鏡はとりたてて索引に載せるほど目新しいものでなくなり、普通に使われる科学研究機器となる。したがって、1910年以降、限外顕微鏡が利用されなくなったのではなく、むしろ科学機器として一般化したとみる方がよいであろう。

単行本は2冊書かれたが、コロイド化学関係は1907年にあらわれ²⁵⁾、医学生物学関係は1910年に²⁶⁾あらわれている。単行本が出版されたことは、限外顕微鏡に研究者の注目が集まり、まとまった情報を多くの研究者が必要としたことを意味している。しかも、ある程度、限外顕微鏡を使った研究が進み、知識の蓄積がないと、書物にはならない。そのような時間的關係から、限外顕微鏡の発明の4年後、7年後に単行本が出版されたとみることができる。

6) 限外顕微鏡の他の諸科学への利用

限外顕微鏡の発明は、当然他の諸科学の進歩を促す科学機器として働くが、

どのような研究分野に影響を及ぼしたであろうか。先の記事数でみると、医学生物学の分野、およびコロイド化学の研究分野がその主な応用分野となっている。

医学生物学への利用については、早くからその利用が意図されていた。H.Siedentopfは、限外顕微鏡が発表された年、1903年にJ.Royal Micro.Soc.に「限外顕微鏡粒子および限外顕微鏡バクテリアの可視化」と題する論文²⁷⁾を発表して、医学への応用の意欲を示している。光学顕微鏡では見えない微小細菌に対して威力を発揮できる顕微鏡として、限外顕微鏡に期待をかけたのである。Siedentopfは、その論文で、次のように述べている²⁸⁾。

限外顕微鏡細菌の実験はもっと見込みあるものだったに違いない。今のところ私は、そのような限外顕微鏡細菌が実際に見えたとは確信をもって言うことは出来ないが、私の実験がその細菌を可視化する完璧な可能性を示しており、その結果、存在が予測されている細菌を実際に発見できるかもしれないと言えると思う。

Zeiss社に勤めるH.Siedentopfとしては、より市場価値のある、より多くの研究者や医者に使用される方向へ限外顕微鏡の利用を促していこうとするのは当然といえる。

光を対象物の横方向から照射し、その散乱光をレンズで見るという方法は、光学顕微鏡の可視化の限界を越える微小粒子を観察することが出来るという点で、限外顕微鏡と呼ばれる。しかし、それはまた、光学顕微鏡でも見えるような大きな対象物に使用すると、暗い背景の中に対象物がくっきりと浮かんで見える暗視野照明装置となる。これも普通の光学顕微鏡とは異なる観察結果を与えた。次の図はClosterium Acerosumを光学顕微鏡で観察した図と暗視野照明装置で観察した図である²⁹⁾。

暗視野照明の利点は、染色と固定化が不必要なことであった。つまり生きた細胞をそのまま観測できるという非常に有利な特徴を持っていた。普通の顕微鏡では固定化と染色が必要なため、それによって、細胞組織が変性し、顕微鏡で見ているものがもとの細胞と全く異なったものとなっていないかという問題がつきまとった。さらに固定化や染色の作業は一定の時間を必要とする。このような事情のため、生きた細胞をそのまま観察できる暗視野照明は、生物

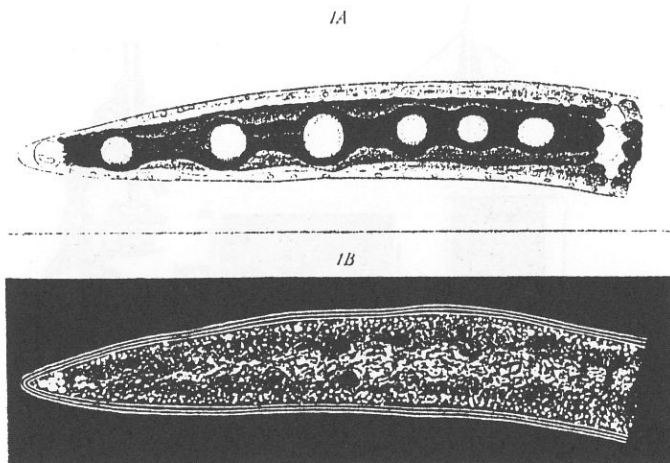


図8 上図はClosterum Acrosorumの通常の照明による図で
下の図は暗視野照明による図³⁰⁾

細胞の観察という点で期待された。そのような利点をいかした事例として図9の梅毒の初期診断のための暗視野照明装置があげられる³¹⁾。

限外顕微鏡は、もともとコロイド化学上の中心問題、「コロイドは溶液か懸濁液か」という疑問を解決するために発明されたものである。この限外顕微鏡により、R.Zsigmondyは、自ら支持していた溶液説を放棄せざるをえなくなった。コロイドが限外顕微鏡でようやく見える程度の大きさをもつ微粒子が媒体中に分散した不均一系であることが判明したのである。その後、1906年には、最初のコロイド化学の学術雑誌 *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*が発刊され、1907年には、Wo.Ostwaldが分散度の概念を使って、コロイドを定義し直し³²⁾、コロイド化学の基礎がここに築かれ、コロイド化学の高揚期を迎えるのである。

7) まとめ

- ①限外顕微鏡の発明後、約7年間は、装置の改良、新しい応用方法の開発が行われた。それ以降はコロイド関係の実験機器として一般化していった。

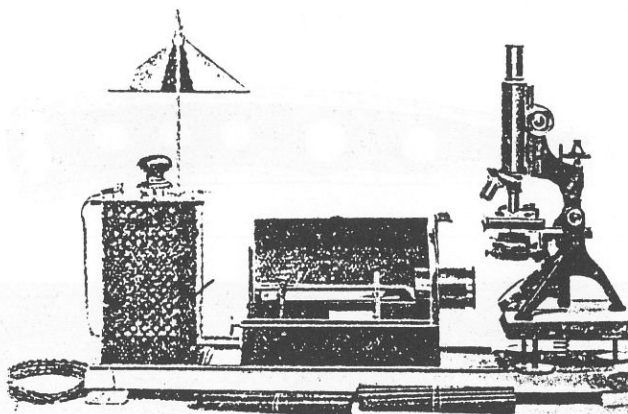


図9 梅毒の初期診断のための暗視野照明装置³³⁾

- ②科学機器メーカーであるZeiss社と関係をもって開発された限外顕微鏡は、市場性を考え、当初から医学、生物学関係への応用をめざしていた。その分野での研究例も多い。
- ③限外顕微鏡は、当初スリット型として作られたが、汎用性を確保するため集光器の改良へも進んでいった。
- ④限外顕微鏡は、光学顕微鏡の可視限界を越える科学機器として期待されていた。

註

- (1) 杉山滋朗「19世紀末の原子論論争と力学的自然観」『科学史研究』Vol.16 (1977)
- (2) 宮下晋吉「実験装置論の試みとしてのウイルソン霧箱史 (I) —1875年から1900年まで—」『科学史研究』Vol.14 (1975) pp.145—153
- (3) 日野川静枝「ベータトロン装置理論史」『科学史研究』Vol.17 (1978) pp.12—22
- (4) 永平幸雄「限外顕微鏡の発見とコロイド懸濁液説—溶液説論争 (I) PictonとLinderの溶液説」『大阪経済法科大学総合科学研究所年報』Vol.6 (1987) pp.16—25, および「限外顕微鏡の発見とコロイド懸濁液説—溶液説論争 (II) BarusとSchneiderの懸濁液説」『大阪経済法科大学総合科学研究所年報』Vol.8 (1989) pp.101—109, さらに「限外顕微鏡の発見とコロイド懸濁液説—溶液説論争 (III) R.Zsigmondy」『大阪経済法科大学論集』Vol.38 (1989) pp.65—86

- (5) T.Graham: "Liquid Diffusion Applied to Analysis", *Phil. Trans.*, Vol.151 (1861) pp.183-224, 立入明訳『コロイドの発見』第1章、高分子化学協会出版部 (1949) pp.13-124
- (6) コロイド化学史に関しては、立入明訳『コロイドの発見』第2章、「コロイド学の発達」高分子化学協会出版部 (1949) pp.127-254, または立花太郎「コロイド次元の世界—その探求の歴史」『コロイド化学—その新しい展開』共立出版 (1981)
- (7) 黒柳準 『光学発達史』(1950) 誠文堂新光社
- (8) H.Siedentopf and R.Zsigmondy: "Über Sichtbarmachung und Größenbestimmung Ultramikroskopischer Teilchen, mit besonder Anwendung auf Gold rubingläser", *Ann. Phys.*, [4] 10 (1903) pp. 1 - 39, 永平幸雄訳「コロイド化学の原典 (7) 限外顕微鏡 H. ジーデントップとR. ジグモンディ "限外顕微鏡粒子の大きさの決定と可視化、特に金ルビーガラスへの応用"」『大阪経済法科大学論集』44 (1991) pp.109-137, 47 (1992) pp.103-112
- (9) F.S.Spiers ed. "The Microscope Its Design, Construction and Applications" *J. Royal Microscopical Soc.*, (1920) p.28
- (10) Josef Reitstötter: "Richard Zsigmondy as Man and Teacher", *Jenaer Rundschau* (1966) No. 6 pp.334-337
- (11) H.Gause: "Henry Siedentopf und die Mikroskopie" *Jenaer Jahrbuch* (1969/70) pp.57-68
- (12) H.Gause: "The Slit Ultramicroscope after Siedentopf and Zsigmondy an historical and optical study", *Jenaer Rundschau* (1966) No. 6 pp.327-333
- (13) 文献 (8)
- (14) *Ibid* p. 7
- (15) Firm of Carl Zeiss: "Beschreibung der Einrichtungen zur Sichtmachung ultramikroskopischer Teilung" *Catalogue* (1904)
- (16) *Ibid*
- (17) A.Cotton and H.Mouton: "Ultra-microscopic Objects" *Revue Generale des Science* 23 (1903) pp.1181-1191
- (18) *Ibid*
- (19) H.Siedentopf: "Siedentopf's Paraboroid Condenser; a New Method for Dark-field Illumination" *Zeitschr. wiss. Mikrosk.*, 24 (1907) pp.24-25
- (20) C.Reichert: "Description of a New Reflecting Condenser by means of which Ultramicroscopic Particles are made visible" *Munchner Med. Wochenschrift* No.51 (1906)
- (21) 文献 (19)
- (22) 文献 (20)

- 23 H.Siedentopf : "Aplanatic or Cardioid Condenser for Dark-ground Illumination" *Zeitschr.wiss.Mikrosk.*, 26 (1910) pp.391-410
- 24 *Ibid*
- 25 A.Cotton et H.Mouton : *Les Ultramicroscopes et les Objects Ultramicroscopiques*, Paris, (1907) 232p
- 26 N.Gaidukov : *Dunkelfeldbeleuchtung und Ultramikroskopie in der Biologie und in der Medizin*, G.Fischer, Jena, (1910)
- 27 H.Siedentopf : "On the Rendering Visible of Ultra-Microscopic Particles and of Ultra-Microscopic Bacteria" *J.Royal Microscopical Society* (1903) pp.573-578
- 28 *Ibid* p.577
- 29 文献 (26)
- 30 文献 (26) Tafel 5
- 31 C.H.Mills : "Improved Apparatus for Dark-ground Illumination in the Early Diagnosis of Syphilis, etc" *Lancet* (1916) p.716
- 32 Wo.Ostwald : "Zur Systematik der Kolloide" *Kolloid-Zeitschrift* (1907) pp.291-300, 331-341, 永平幸雄訳「コロイド化学の原典(4) コロイド状態 Wo.オストワルド「コロイド状態について」『大阪経済法科大学論集』30 (1987) pp.25-59
- 33 文献 (31)