

筑波大学

技術報告

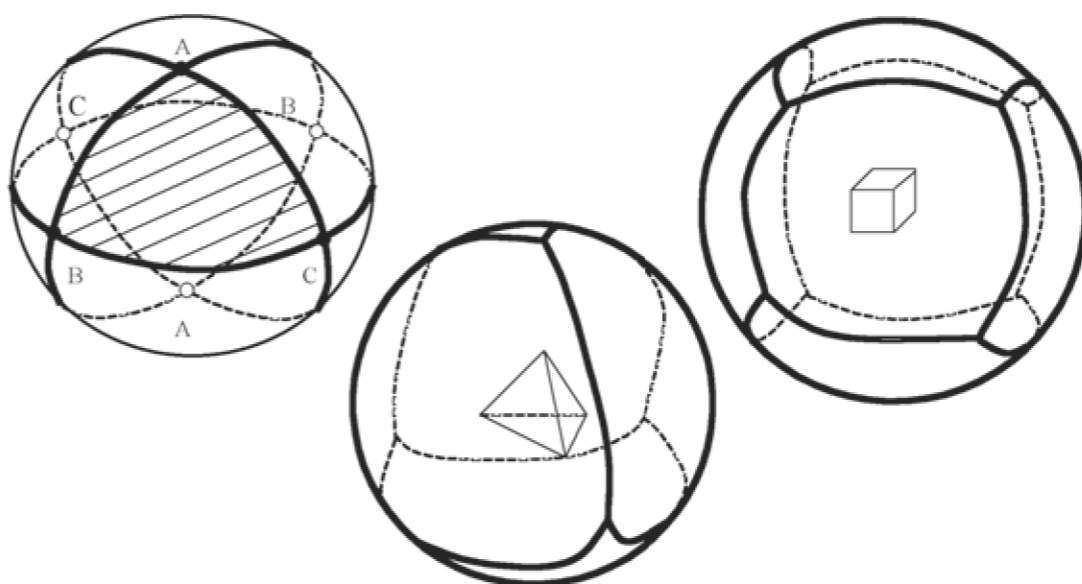
No. 27

TECHNICAL REPORT, UNIVERSITY OF TSUKUBA

2007

第6回筑波大学技術職員技術発表会報告集

<http://www.tech.tsukuba.ac.jp/2006/>



『筑波大学技術報告』No. 27 の発刊によせて

筑波大学では、技術職員の業績を広く学内外に紹介すること等を目的として、『筑波大学技術報告』を長年継続して刊行してきており、本年度は No. 27 が発刊されるはこびとなりました。

今回の報告書は、「第6回筑波大学技術職員技術発表会」（平成19年3月14日開催）における発表論文等及び技術職員からの投稿論文により構成されております。これは、教育・研究支援活動により多忙な日常業務の中で、本学の技術職員が創意工夫をこらした、長期間にわたる研鑽や努力の成果を報告するものです。

また、6年前から行われている技術発表会は、法人化後、技術職員が各部局に分属されることになったにもかかわらず、全学的な活動として継続的に充実発展してきております。技術発表会への積極的な参加・発表の奨励・啓発や学外者の参加を呼びかける広報活動など、今後のあり方の議論も含めて、技術発表会の開催や運営に関して大きな努力が払われています。

技術職員の職務は、実験科学等の教育・研究の支援活動に限られたものではなく、教材の作成、教育・研究機器の設置・維持調整、資料の整理、その他教育・研究活動の広い範囲に亘っています。特に最近では IT 技術の発達に伴うネットワークの利用等において、技術職員の協力は、一層重要な役割を果たしています。その一方で人件費抑制等の影響を受けて職場環境が厳しくなりつつある中で、多くの技術職員がこれらの役割を果たすべく頑張っている状況を是非ご理解いただきたいと思います。

本報告書の刊行により、本学技術職員の業績を広く学内外に紹介し、各方面より忌憚のないご意見や、ご指導、ご助言、激励等を頂くことが出来ればと願っております。技術職員の育成と技術力の一層の向上のために、各方面のご支援をよろしくお願いいたします。

2007年3月

筑波大学副学長（研究担当） 瀧田宏樹

目 次

『筑波大学技術報告』No. 27 の発刊によせて 瀧田宏樹 筑波大学副学長（研究担当）	i
--	---

技 術 発 表 会 報 告 集

献体業務及び解剖実習時の環境改善について ー感染症防止及びホルムアルデヒド対策ー 矢部一徳、瀬谷祐一 人間総合科学等支援室（医学系）	1
赤血球内変性ヘモグロビンの定量分析の試み： アセチルフェニルヒドラジン処理ヒト赤血球による検討 佐藤晶子 人間総合科学等支援室（医学系）	6
多重免疫組織化学染色標本の定量的解析法の開発 秋山佳代、矢部一徳、須藤伝悦 人間総合科学等支援室（医学系）	8
大学実験室の作業環境測定の精度管理の試み ー有機溶剤の固体捕集・ガスクロマトグラフ測定法についてー 柏木保人 組織・人事部環境安全管理室	14
水素中の CO 選択酸化反応触媒（ K_2CO_3 -Rh/SiO ₂ ）の調製法と 透過型電子顕微鏡観察 伊藤伸一 数理物質科学等支援室（物性・分子工学専攻）	20
水温負荷法による体表温測定の試み 鷺野谷秀夫 病院総務部医事課中央診療	26
類別式としてのオイラー標数について 間宮精一 数理物質科学等支援室（物性・分子工学専攻）	30
Webmail IMP の日本語化 木村博美 研究基盤総合センター（応用加速器部門）	34
Maestro3 クラスタネットワーク用基板の設計 小野雅晃 システム情報工学等支援室（装置開発班）	37
木材加工における研磨について 田所千明 生命環境科学等支援室（農林工学系）	45

装置の監視システムの開発に向けて ー様々な研修を通してー 嶋頼子 プラズマ研究センター	50
顕微鏡画像の遠隔監視システム ーガラス包有物の水素分析ー 大和良広 研究基盤総合センター（応用加速器部門）	55
医学安全管理室の業務とその役割 櫻井秀子、文随和美、渡邊祐子 人間総合科学等支援室（医学系）	63
ウニの室内飼育系の確立 土屋泰孝 生命環境科学等支援室（下田臨海実験センター）	66
電波実験の工夫と考案 鈴木秀則 システム情報工学等支援室（技術系統括）	69
正面旋盤による大径パイプの両端面加工の工夫 内田豊春 研究基盤総合センター（工作部門）	72
精密加工用仮止め接着剤により樹脂薄板を固定しての 立フライス盤切削加工の試み 小林浩三 人間総合科学等支援室（医学系）	76
微弱信号分光に於けるノイズ環境の一例について 松山英治 数理物質科学等支援室（物性・分子工学専攻）	79

技 術 報 告

ワイヤ放電加工機を使った加工 石川健司 研究基盤総合センター（工作部門）	83
空気中の放射性同位元素濃度測定 松尾邦夫 アイソトープ総合センター	87
筑波大学プラズマ研究センター防災訓練実施記録 平田久子 数理物質科学等支援室（物理学専攻）	91

第6回筑波大学技術職員 技術発表会報告書

開催日：2007年3月14日

会場：筑波大学臨床講堂



第6回筑波大学技術職員技術発表会の公式ウェブサイト
<http://www.tech.tsukuba.ac.jp/2006/>

献体業務及び解剖実習時の環境改善について ～感染症防止及びホルムアルデヒド対策～

矢部一徳、瀬谷祐一

筑波大学人間総合科学等支援室（医学系）
〒305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

近年シックハウス症候群を代表とする有機化学物質に対する過敏症について社会的問題となっており、この有機化学物質が及ぼす人体への影響についての早急な対策が求められている。医学・歯学における解剖学実習についても、実習に供されるご遺体は、防腐、感染防止のために多くの有機化学物質が使用されてきた。ホルムアルデヒドを主とするこれらの処置液が長年使用されており、実習中のホルムアルデヒド曝露が懸念される^[1]。本学医学専門学群解剖学実習のために行っている感染症防止、ホルムアルデヒド対策を献体業務と共に紹介する。

1. はじめに

筑波大学には正常、病理、法医の3つの解剖がある。

(1) 正常解剖

医師・歯科医師になるため、医学・歯学の学生が正常な人体の構造を十分に理解するために行われる解剖。実習は解剖学の教授または助教授の責任と指導のもとで、学生が実際にメスを持つて行う。

(2) 病理解剖

医師が診療していた患者が死亡した場合、その病変や死因を明らかにするために行われる解剖。

(3) 法医学解剖

変死体を対象として、変死の原因や死亡の状況など、行政上または司法上必要な医学的事項を明らかにするために行われる解剖。

これらの解剖時には感染症防止、防腐処置、標本保管のためにホルマリン（35～38%ホルムアルデヒド水溶液）が使用されている。

ホルムアルデヒドは人に対して発癌性の高い物質とされており、シックハウス症候群に代表されるアレルギー症状、化学物質過敏症を引き起こすことが報告されている^[2, 3]。

これらの解剖に携わる研究者や作業者に対してはホルムアルデヒドに対する十分な注意と対策が必要である。

2. 正常解剖

2.1 献体とは

「自分の死後、遺体を医学・歯学の教育と研究のために役立てたい」という意思を持った方が、生前から大学またはこれに関連した団体に名前を登録しておき、亡くなられた時、遺族あるいは関係者がそ

の意思に従って遺体を大学に提供することが「献体」といわれる行為である。

平成16年の調査では、全国に献体篤志家団体が61団体あり、献体登録者の総数は198,000名を越え、そのうちすでに献体された方は約70,074名に達している（平成16年3月現在 日本篤志献体協会調べ）。

筑波大学への遺体の提供は、この献体篤志家団体の1つ「筑波大学白菊会」により成り立っている。

2.2 正常解剖での献体の重要性

医学・歯学教育の基礎を履修する目的である正常解剖は、献体によって解剖が行われており、正常解剖以外は献体によって行われる解剖ではない。「医学及び歯学の教育のための献体に関する法律」により献体の定義、意思の尊重が明確にされ、献体による死体の解剖が明記されている。

解剖学実習が行われるためには、献体を志す篤志家団体の存在は重要なものである。

3. 筑波大学白菊会

3.1 筑波大学白菊会について

医学・歯学の各大学には名前は異なるが篤志家団体が存在する。筑波大学では「筑波大学白菊会」が組織されている。

筑波大学白菊会は昭和49年6月に「白菊会筑波大学支部」として発足した。昭和58年4月から250名の会員を有する「筑波大学白菊会」として東京の白菊会本部（平成16年3月解散）より独立した。

筑波大学白菊会への登録は自分の意思と家族の承諾によって行われている。現在では、献体時のトラブルを避けるためにも登録の際に次のような制限を設けている。

60歳以上であること

家族全員の承諾を取ること

ドナー登録をしていないこと

年間40名の募集

県内在住（県外の方はなるべく住所地の大学へ登録をしていただく）

実際の献体は感染症の有無、交通事故やその他の事故によって献体できない場合もある。

筑波大学白菊会の入会者総数は1679名、生存会員は802名である（平成19年1月現在）。平成7年より登録の制限をしているため生存会員の人数はこのところ800人ほどで安定している。これまでの遺体提供総数は1085名、内筑波大学白菊会会員は662名である。会員、献体数を図1に示した。

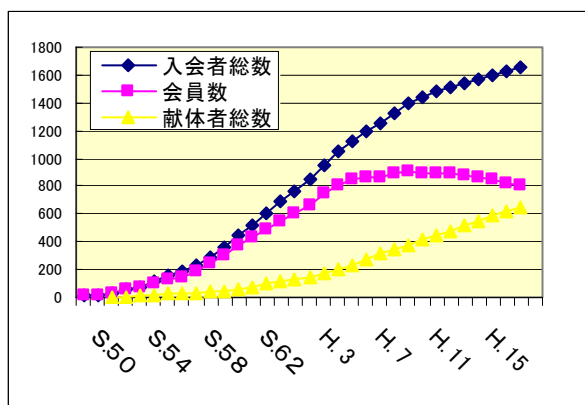


図1. 筑波大学白菊会会員の動向

平成7年より入会者数の制限を行っているため会員数は800人強を維持している。

3.2 会員・解剖体のデータベース化

白菊会登録者、献体者はデータベース化して管理されており、家族や各大学からの問合せに対して迅速な対応が可能である。

「医学及び歯学の教育のための献体に関する法律に基づく正常解剖の解剖体の記録に関する省令」により解剖体については記録の記載事項が義務付けられている。それらの項目も印刷することによって保存、提出ができる（図2、図3）。

本学で保管する標本について、平成16年度よりすべての会員に対して「標本保管のお願い」を通知し、承諾を得た方からの標本作製、保管を行っている。標本保管承諾者や標本管理も会員及び献体者のデータベースに含まれており一括管理を行っている。

図2. 白菊会会員原簿

ファイルメーカーProを使用し、会員のデータベース化を行った。

4. 感染症対策

4.1 遺体処置時における作業者の対策

実習のための防腐処置を行う我々作業者は、遺体に初めに接するため次のような点に注意している。

献体される方の死因、病歴、感染症の有無を確認する。感染症にかかっている方は献体をお断りする場合もある。

体液、血液の付着の可能性がある献体者の衣服はすべて感染性廃棄物として処理する。

処置に使用する解剖衣や器具等は、できる限りディスプレイ製品を使用する。それ以外の解剖器具は洗浄液、オートクレーブを用いて消毒・滅菌処理を行う。

4.2 感染症対策用解剖台の導入

防腐処置には、動脈からホルムアルデヒドを主成分とする固定液を注入する方法を用いる。処置の最中は作業従事者が最も病原体に感染の危険があるため、バイオハザード対策用解剖台（白井松器械株式会社）を使用している（図4、図5）。

この解剖台は、処置時に遺体から発する骨粉等のエアロゾルなどが舞い上がり、浮遊することを制御するため、給気を天井面より解剖台にダウンフローし、均一のエアの流を作る工夫がなされている。解剖台側面からエアを吸引することにより遺体を囲むエアカーテンが作られる。吸引されたエアは屋外に設置された空気清浄システムを通して、室外に排気される。空気清浄システムのフィルターユニットには、プレフィルター、High Efficiency Particulate Air (HEPA) フィルター、活性炭フィルターが使用されており、周辺環境への感染防止対策も併せて行っている。

図3. 献体者原簿

ファイルメーカーProを使用し、献体者のデータベース化を行った。遺体の状況、実習使用年度など検索が可能である。

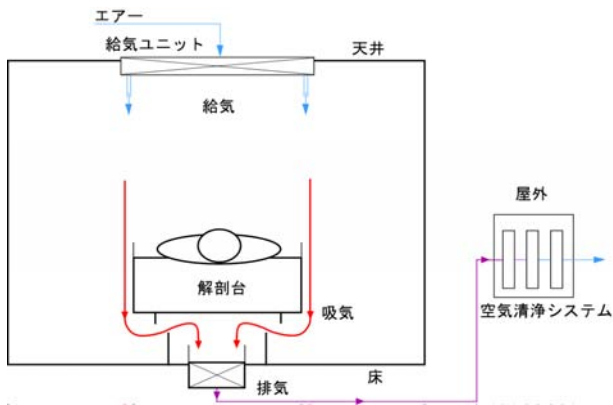


図4. バイオハザード対策用解剖台システム
フローチャート

解剖台上の遺体を天井からの給気と床からの吸気により取り囲み、病原体等の拡散を防止する。吸気はフィルターユニットを通して屋外に排気される。



図5. バイオハザード対策用解剖台
解剖台上の蛍光灯外側より給気される。

4.3 急速遺体防腐処理装置の使用

灌流固定後、急速遺体防腐処理装置（加藤萬製作所）の中に遺体を2週間浸漬させる（図6）。この装置は固定液を37℃に加温し遺体表面から浸透固定させるための装置で、灌流固定だけでは不十分な部位を完全に固定させるものである。実習中の遺体の固定不良による病原体感染を防ぐために導入した。

2週間後、遺体は乾燥防止のためネル布とビニールシートで覆いロッカーに保管する。本装置導入以前は、ビニールシートの中に固定液を数リットル入れていた。そのため実習使用時にホルムアルデヒド廃液や布、ビニールシートなどの廃棄物の処理に苦慮した。現在は保存液を必要とせず、ロッカーから出した遺体を直接実習に使用している。廃棄物の点でも効率がよかった。



図6. 急速遺体防腐処理装置

タンク内には固定液が入っており、密封し、37℃に加温される。

5. ホルムアルデヒド対策

5.1 文部科学省通達

劇物に指定されているホルムアルデヒドは無色の揮発性物質であり、目や鼻、喉、皮膚への刺激により、粘膜刺激症状、アレルギー症状、シックハウス症候群、鼻咽頭癌を生じさせることが報告されている^[4]。

文部科学省では2001年2月当時の国立大学医学部歯学部事務部長宛に実習室内のホルマリン濃度の計測依頼を、更に同年4月には「系統解剖実習時の環境向上について」の通達を出した^[5]。それによると以下の事が記載されている。ホルマリン使用時には、その濃度に応じて室内の空気環境の改善に努めること。特に実習室内は多数の学生が同時に曝露される可能性があるので、換気扇や空気清浄機等で出来る限りの清浄化に努めること。ホルムアルデヒド濃度及び実習時・遺体処理時における毒性を低減させるよう手段を講ずるよう努めること。学生にはホルムアルデヒドの防腐、保存効果及び有害性、防護方法、廃棄方法について文章をもって理解させること。

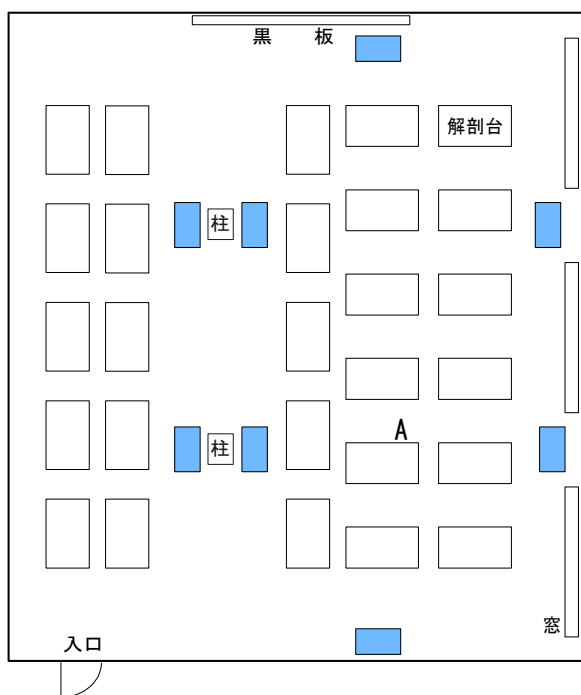


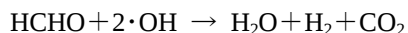
図7. 解剖実習室内配置図

■ 部分は光触媒環境浄化装置の設置場所、A はホルムアルデヒド濃度測定点を示す。

5.2 実習における対策

従来、解剖実習では学生に対して、白衣、マスク、薄手の手袋を使用するよう指導し、実習室は強制排気を行っていた。しかし、室内環境は季節や温度によって変化し、それだけでは対処できないと思われる。実際、目や鼻、皮膚への刺激、不快感を訴える学生が毎年現れている。

文部科学省の通達を受け、本学解剖実習室でのホルムアルデヒド対策として、光触媒環境浄化装置SSC-50E(盛和工業)を8台実習室に設置した(図7, 図8)。この装置は光触媒セラミックフィルターと強力な紫外線で、効率的に光触媒分解を行う。光触媒反応は酸化チタンに紫外線(380 nm 以下)を当てることにより水と酸素から活性酸素(ヒドロキシルラジカル; $\cdot\text{OH}$)を発生させ、ホルムアルデヒドを水、水素、二酸化炭素に分解する。



光触媒方式は、有機物質(雑菌の死骸まで)を分解するので吸着飽和することがない。光触媒フィルターは細菌やウイルスにも有効で、二次感染等を防止し、有機化合物のエチレン、ホルムアルデヒド、エーテル、アンモニア等も分解する。室内空気循環型であるため特別の設置作業も必要としなかった。

防腐処置液の見直しも行った。これまで防腐液には、ホルマリン10%、グリセリン10%、フェノール6.25%、アルコール45%の水溶液を使用していたが、



図8. 光触媒環境浄化装置

紫外線により活性酸素が発生し、ホルムアルデヒドを水、水素、二酸化炭素に分解する。

フェノールの使用を取りやめた。劇物であるフェノールは、防カビの目的で使用されていたが、ホルムアルデヒドの光触媒分解効果が妨げられる恐れがあり、また人に対しても皮膚、粘膜に強い刺激作用があるため使用を中止した。

直接的なホルムアルデヒド曝露を減らすため、実習中に、乾燥防止及び防腐のため噴霧使用しているカルボール液からのホルムアルデヒドの使用を取りやめた。現在、乾燥防止のために2%グリセリン液を使用している。

5.3 廃棄方法

遺体処置時に血液、体液と共に流れ出る防腐液は排水されないよう解剖台のトラップを塞ぎ、吸水性の良い産業用ワイパーに吸収させ、二酸化塩素(ClO_2)液を噴霧する。ワイパーは感染性医療廃棄物として指定の袋に入れ集積所に集め廃棄業者に引き渡される。使用している二酸化塩素は消臭、殺菌に効果が高いとされている。

実習中に遺体から出た防腐液は、実習台の下に液回収用のバケツがあり、その都度、学生によって所定の回収容器に集められる。これら回収液と臓器等標本保存のために使用されていたホルムアルデヒド液は、固形物を取り除くため布でろ過し、10リットルのポリタンクに入れ、学内環境安全管理室の処理方法に従って有機廃液として処分する。

6. まとめ

大学内での化学物質過敏症の症例が多数発生している状況下において、学生、教職員を化学物質障害から守ることは重要な問題である。特に気化したホ

ホルムアルデヒドによる曝露被害を受けやすい解剖学実習室の環境改善は重要な課題である。

1983 年 WHO はホルムアルデヒドの室内環境基準値を 30 分平均値で 0.08 ppm 以下と勧告している。旧厚生省は、「建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行令」で学校内においても 1 m³につき 0.1 mg (濃度換算 0.08 ppm) 以下の基準値を定めている^[6]。これは、環境衛生上良好な状態を維持するという観点から定められた一般環境基準である。

2002 年厚生労働省は「職域における室内空気中のホルムアルデヒド濃度低減のためのガイドライン」を発表した^[7]。その中で、「職域における屋内空気中のホルムアルデヒドの濃度を 0.08 ppm 以下とすること。ただし、ホルムアルデヒド等を製造し、又は取り扱う作業場であって、作業の性質上 0.08 ppm 以下とすることが著しく困難な作業場（特定作業場）については 0.25 ppm 以下とすること」を指導している。

解剖実習室においては解剖実習という特殊事情での学生、教職員の環境であり、一般的環境と異なるため、労働基準での基準値である 0.25 ppm 以下とするよう対策をとることが必要である。

本学実習室においても、解剖遺体上におけるホルムアルデヒド濃度を測定した。測定はガステック社製ガス検知管（採取器 GV-100 / HCHO 0.05-1.0 ppm 用、0.1-40 ppm 用）を用い、実習台からの距離 30 cm、高さ 1 m の場所で測定した。

遺体を覆っているビニールを取り、1 時間後に測定したところ最高で 0.3 ppm であった。光触媒環境浄化装置を作動したところ、3 時間後には 0.25 ppm まで抑えることができた。その後更に、強制排気を行い 0.15 ppm となった。

光触媒環境浄化装置は循環式のため、風量を強くすると遺体から発するホルムアルデヒドを共に送風してしまい、一時的に 0.4 ppm と上昇してしまったが、風量を弱くすることによりその効果を確認できた。

今後の対策として、発生源となる遺体のホルムアルデヒド濃度低減が考えられる。その一つとして、ホルムアルデヒド固定後の遺体をアルコール槽に浸漬し、アルコール置換を行う方法が他大学で行われている。実習中刺激臭がほとんど無く環境が改善さ

れているとの報告もあった^[8,9]。しかしながら本学においては浸漬期間、アルコール槽の設置問題などがあり簡単ではない。

現在のところホルムアルデヒドに替わる有効な防腐剤はないため、いかにホルムアルデヒドの使用量を減らすか更なる検討が必要である。

謝辞

本報告書作成や、業務改善及び遂行にあたり多大なるご協力をいただきました人間総合科学研究科基礎医学系 久野節二教授に感謝いたします。ホルムアルデヒド濃度測定に関しましては環境安全管理室 柏木保人技術専門職員にご協力をいただき感謝いたします。

参考文献

- [1] 佐々木昭彦, 田中かづ子, 前田亨史, 金子信也, 田中正敏, 西山慶治, 八木沼洋行. 解剖実習におけるホルムアルデヒド曝露について, J. Natl. Inst. Public Health 52 (2003) 64-69.
- [2] 工藤雄一郎, 進士永子, 相澤好治. ホルムアルデヒドの健康影響, 産業医学ジャーナル 25 (2002) 104-108.
- [3] 馬島徹. シックハウス症候群, 呼吸と循環 53 (2005) 739-743.
- [4] 岩澤聡子, 野見山哲生, 大前和幸. ホルムアルデヒドと発がん, 産業医学ジャーナル 28 (2005) 84-87.
- [5] 文部科学省高等教育局 医学生及び歯学生の系統解剖実習時の環境向上について (通知), 高医教第 4 号 (2001).
- [6] 建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行規則 (昭和四十六年一月二十一日厚生省令第二号) 建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行令, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S45/S45SE304.html>
- [7] 職域における屋内空気中のホルムアルデヒド濃度低減のためのガイドラインについて, 厚生労働省 (2002) <http://www.mhlw.go.jp/houdou/2002/03/h0315-4.html>
- [8] 児玉公道. 技術職員の作業環境改善と適切な実習体作成のために, 第 48 号篤志献体 第 23 回献体実務担当者研修会記録 (2006) 73.
- [9] 熊木克治, 臼井聡. ホルマリン浸出法 (ホルマリン・アルコール置換法) の試み, 第 48 号篤志献体, 第 23 回献体実務担当者研修会記録 (2006) 74-75.

赤血球内変性ヘモグロビンの定量分析の試み： アセチルフェニルヒドラジン処理ヒト赤血球による検討

佐藤晶子

筑波大学人間総合科学等支援室（医学系）

〒305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

Heinz 小体は、赤血球内で変性ヘモグロビンが沈殿して形成され、ニューメチレン青等の超生体染色により染色される。この Heinz 小体の存在は、ヘモグロビンの変性が赤血球内で生じたことを示す指標となるが、変性ヘモグロビンの量を推定することは困難であった。

今回、アセチル・フェニルヒドラジンの酸化作用により生じた赤血球内変性ヘモグロビンの、フローサイトメトリー（FACSort, BD Biosciences）による自然蛍光検出（Ex 488 nm, Em 530±15 nm）を試み、赤血球内変性ヘモグロビンの定量分析が可能か否か、従来法の超生体染色と比較し検討した。

健康人によるヘマトクリット（Hct）低下検体を作成して、Hct 正常検体（Hct = 45%）をコントロールとし、アセチル・フェニルヒドラジン反応の経時的変化を 6 時間まで観察した。両者とも反応時間に比例して赤血球の蛍光は直線的に増加した。Hct 低下検体は、Hct 正常検体に比較し強い自然蛍光を認め、赤血球内で高いヘモグロビン変性を生じていることが確認できた。

また、健康人希釈検体によるアセチル・フェニルヒドラジン反応（4 時間）では、フローサイトメトリーによる蛍光測定と超生体染色法による Heinz 小体 score 5 陽性率は正の相関を示した。

このフローサイトメトリーによる測定法は、アセチル・フェニルヒドラジンにより誘発されたヘモグロビン変性を、平均蛍光強度を用いて客観的に解析することができ、超生体染色法に比較し、より精密な分析が行えた。この赤血球の緑色蛍光検出は、赤血球内のヘム喪失に起因した変性ヘモグロビンの新しい定量分析の 1 つになると推察された。

1. はじめに

赤血球には生体内で酸素と二酸化炭素の運搬を担うヘモグロビンが含まれており、赤血球成分の約 2/3 は水分で残り約 1/3 はヘモグロビンから成る。ヘモグロビン濃度に関しては、シアンメトヘモグロビン法がヘモグロビン定量の国際標準法として用いられている。また近年、廃液処理等で問題がないノンシアン法としてラウリル硫酸ナトリウムヘモグロビン測定法等もある。変性ヘモグロビンについては、通常溶血液による等電点電気泳動や高速液体クロマトグラフィーによるヘモグロビン分画の分析、あるいは超生体染色による赤血球内の Heinz 小体の有無により証明が行われているが、個々の赤血球内の変性

ヘモグロビンの定量分析に関しては、あまり検討がなされていない。

不安定ヘモグロビン症の 1 つである Hb köln 赤血球は、酸化変性を起しやすく、ヘム喪失に起因してヘモグロビンの変性をきたし分解産物の fluorescent yellow pigment が赤血球内に蓄積され、特に Heinz 小体に一致して強い緑色蛍光が認められることが知られている。先に筆者らは、Hb köln 症において、体内循環中のヘモグロビン変性の蓄積にともない赤血球の自然蛍光の増強を経験し、フローサイトメトリーによる検出と蛍光顕微鏡による観察について報告した^[1,2]。今回、その経験を応用してフローサイトメトリーによる赤血球内の変性ヘモグロビンの定量分析について検討した。

アセチル・フェニルヒドラジンは、赤血球内のヘモグロビンの酸化変性を誘発することが知られており、Heinz 小体生成試験として不安定ヘモグロビン症等の診断検査法として活用されている。このアセチル・フェニルヒドラジン反応により生じた変性ヘモグロビンのフローサイトメトリーによる測定（Ex 488 nm, Em 530±15 nm）を試み、この方法が新しい赤血球内の変性ヘモグロビンの定量測定法として活用可能か否か、塗抹標本による超生体染色による生成 Heinz 小体の観察と比較して検討した。

2. アセチル・フェニルヒドラジン反応による検討

2.1 対象

健康人の EDTA 採血による末梢血液を用いた。アセチル・フェニルヒドラジンによる赤血球への影響は、血液のヘマトクリット（Hct）値が低いほど強いことが、超生体染色等による観察で知られている。今回、ヘモグロビン異常症は稀な疾患であり、自己血漿を添加して Hct 値の低下検体（Hct = 25%, 17%）を作成し、ヘモグロビン異常症の血液の代りとした。また、コントロールは健康人血液 Hct = 45% とした。

2.2 Heinz 小体生成試験

リン酸緩衝液（pH 7.6）にアセチル・フェニルヒドラジンとグルコースを加えて溶解し、アセチル・フェニルヒドラジン溶液を作成する。75×10 mm の試験管に 2 ml のアセチル・フェニルヒドラジン溶液と血液 100 μl を加え、数回混和し、37℃で反応させた。2 時間ごとにその一部を採取し、フローサイトメトリ

一による蛍光測定および塗抹標本を作成し超生体染色用とした。

2.3 フローサイトメトリーによる蛍光測定

Heinz 小体生成試験前（新鮮血）では、血液に生食液を加え遠心洗浄し、再浮遊させ測定用とした。Heinz 小体生成試験後の検体は、その一部をとり洗浄せずにそのまま測定した。FACSort (BD Biosciences) を用いて、赤血球 1 万個を測定し、FL1 検出器:BP 530 / 30 nm による赤血球の蛍光検出を行った。解析には Quest を用いた。

2.4 超生体染色法

末梢血液をガラス染色毛細管（ニューメチレン青；キャピロット，テルモ社）に入れ混和し 15 分間反応させ、塗抹標本を作製した。Heinz 小体を有する赤血球の判定は、Heinz 小体生成試験に準じて行った。赤血球中の Heinz 小体の数により「0～5」に分類し、Heinz 小体が 5 個以上のものを「score 5」として分類し陽性率を求めた。

2.5 アセチル・フェニルヒドラジン反応における経時的变化

各 Hct（17%, 25%, 45%）ごとに 3 サンプルを用意し、6 時間までアセチル・フェニルヒドラジン反応を行い、それぞれのサンプルをフローサイトメトリーによる 2 重測定を行った。アセチル・フェニルヒドラジン反応の対照として生食に浮遊させた赤血球では、自然蛍光の増加は認められなかったが、アセチル・フェニルヒドラジン反応群では、反応時間に比例して赤血球の自然蛍光は直線的に増加した。コントロールの Hct = 45% の蛍光値に比較し、Hct = 25% 検体では平均 1.28 倍、Hct = 17% 検体は平均 1.41 倍の蛍光強度の増加を認め、Hct 値が低い試料ほど自然蛍光の強度は高値を示した。

超生体染色では、アセチル・フェニルヒドラジン反応前（新鮮血）では、各サンプル（Hct = 17%, 25%, 45%）共に Heinz 小体を有する赤血球は認められなかった（Heinz 小体陽性率 = 0%）。2 時間反応後では、微細に染色された Heinz 小体を有する赤血球が認められたが、陽性顆粒かどうか判定が難しいものもあった。4 時間反応後では、陽性顆粒は小円形に明瞭に染色され、赤血球内に 1～2 個のときは比較的同じ大きさの Heinz 小体であったが、陽性顆粒が増加するに従い、大小不同の Heinz 小体が赤血球内に認められた。6 時間反応後では、さらに陽性顆粒の数は増大した。また、Hct 値が低い試料ほど Heinz 小体数 (score 5) も増加を示した。

健康人血液の自己血漿を添加し、Hct を 17%～45% に調整した試料の 4 時間反応によるフローサイトメトリーの赤血球の自然蛍光強度と超生体染色法による Heinz 小体 5 個以上を有する赤血球 (score 5) の比率を比較した。両者の結果は、相関係数 $r = 0.65$ 、回帰曲線 $y = 0.998x + 20.1$ となった。

ヘモグロビンは 4 分子のヘムと 4 分子のグロビンから成る複合蛋白である。正常ヘモグロビンに比べて、ヘム喪失やサブユニット解離を生じやすい不安定ヘモグロビン症は、容易に酸化変性をおこし立体構造を維持できずに不溶性となり、最終産物である Heinz 小体を生ずる。従来、Heinz 小体の証明は、ニューメチレン青等の超生体染色を用いて行われ、アセチル・フェニルヒドラジンの酸化誘発剤による Heinz 小体生成試験（4 時間反応）の判定法としても活用されている。変性ヘモグロビンの集合体の Heinz 小体は赤血球内に類円形の封入体として観察され、その陽性率 score 5 の比率 (%) により、不安定ヘモグロビン症やグルコース 6 リン酸脱水素酵素欠乏症等の鑑別に用いられている。この Heinz 小体の個数による判定法は、疾患鑑別法としては優れていると思われるが、今回の生成された Heinz 小体では大小不同（変性量の相違）が認められ、個数による判定法では Heinz 小体の大きさの反映は難しく、健康人の赤血球内の変性ヘモグロビン量を適切に評価することは難しいと推察された。

その点、フローサイトメトリー測定では、短時間に多数の赤血球の自然蛍光を測定し分析することが可能であり、Heinz 小体生成試験の 6 時間までの観察では直線的な蛍光強度の増加が認められた。アセチル・フェニルヒドラジンの赤血球への影響は、血液の Hct が低いほど強いことが知られており、フローサイトメトリーによる測定でも同様に蛍光強度による相違を認め、超生体染色による従来の Heinz 小体陽性率 (%) による判定法に比較し、精密な分析を行うことができた。また、健康人希釈検体によるフローサイトメトリーの蛍光測定値と超生体染色法による Heinz 小体 score 5 陽性率は正の相関を示し、ヘモグロビン崩壊の 1 つの評価法として有用と思われた。このフローサイトメトリーによる赤血球の緑色蛍光検出は、赤血球内のヘム喪失に起因した新しい変性ヘモグロビンの定量法の 1 つになると推察された。

参考文献

- [1] 佐藤晶子，櫻井秀子，フローサイトメトリーによる不安定ヘモグロビン (Hb Köln) のスクリーニング検査法，第 4 回筑波大学技術職員技術発表会報告集 (2005) 38-41.
- [2] S. Sato, et al., Pseudoreticulocytosis in a patient with hemoglobin Köln due to autofluorescent erythrocytes enumerated as reticulocytes by the Cell-Dyn 4000, Lab. Hematol. 10 (2004) 65-67.

多重免疫組織化学染色標本の定量的解析法の開発

秋山佳代¹、矢部一徳²、須藤伝悦³

筑波大学人間総合科学等支援室（医学系）

〒305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

小動物や人の組織切片に分布する生理活性物質などの様々な化学物質を、組織全体にわたり細胞レベルで定量し画像化する Brain Mapping Analyzer を開発した^[1,2]。この装置を用いて、同じ切片上に混在する複数の物質の分布を同時に測定して相関的に解析する、世界で初めての方法を開発した^[3,4]。今回、ラット脳の同一切片から三種類の物質を個別に定量し、それらの分布を比較解析した例を報告する。

1. はじめに

蛍光免疫組織化学染色法は、抗原抗体反応を利用して、組織切片上での標的化学物質の分布を詳細かつ正確に検出する手法である。スライドガラス上で、切片内に局在する標的化学物質（抗原）に、蛍光物質を標識した抗体を反応させて、蛍光顕微鏡下で蛍光物質の分布を通して分析するものである。

私共は、免疫組織化学染色した切片の蛍光強度分布を定量し画像化する Brain Mapping Analyzer を開発した^[1,2]。この装置は、落射蛍光顕微鏡の光路にピンホールを挿入しており、切片内の微小な領域だけを照射して、そこから発せられる蛍光だけを選択的に測定することができる。さらに、切片を載せた電動ステージをコンピューター制御の下で二次元方向に移動させて、切片全面をスキャンしながら蛍光強度分布を分析する。ステージの可動範囲が広いので、一度に小動物や人の脳切片全体を分析することが可能である。光検出器として高感度の光電子増倍管をセットしており、テレビカメラを用いた画像解析法や電気化学検出器を用いた高速液体クロマトグラフィー法と比べて、少なくとも 4 桁以上微細で正確な分析結果を得ることができる。

今回 Brain Mapping Analyzer を用いて、同一切片上に複雑に混在する複数の物質の分布を定量し、それらを相関的に解析する方法を開発した^[3,4]。一例として、ドーパミン（神経伝達物質の一つ）の合成を律速段階で調節するタイロシン水酸化酵素（TH）と、この酵素活性を調節しているカルシウム／カルモジュリン依存性プロテインキナーゼ II（CaMKII）及びカルモジュリン（CaM）のラット脳内での分布を解析し^[3]、先に報告した CaM 依存性のドーパミン合成メカニズム^[5,6]を組織化学的に再確認した。

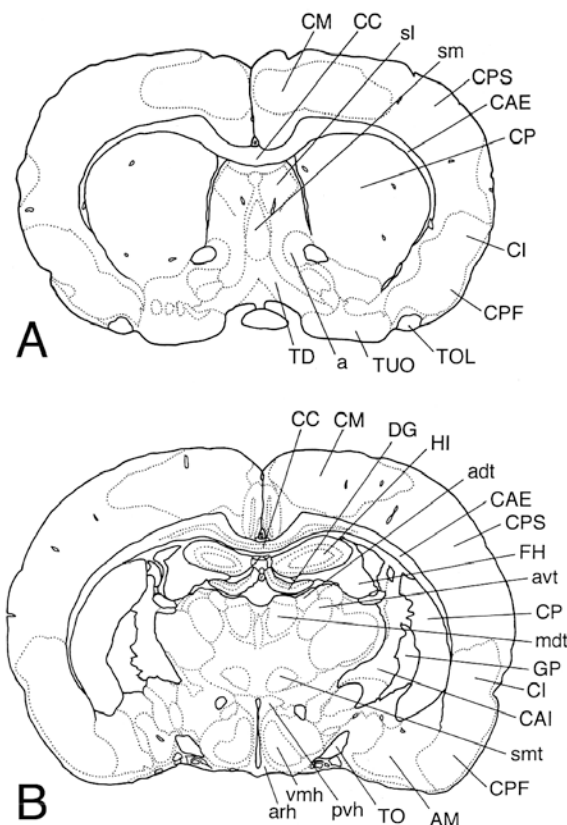


図 1. 分析したラット脳領域

耳孔線より吻側へ約 8.0 mm (A) 及び 5.1 mm (B) のラット脳の冠状切片を分析した。

図中の略字は以下の通りである： a, 側坐核; adt, 視床（背側前核）; AM, 扁桃; arh, 視床下部（弓状核）; avt, 視床（腹側前核）; CAE, 外包; CAI, 内包; CC, 脳梁; CI, 島皮質; CM, 運動皮質; CP, 線条体; CPF, 梨状皮質; CPS, 1 次体性感覚皮質; DG, 歯状回; FH, 海馬采; GP, 淡蒼球; HI, 海馬; mdt, 視床（背内側核）; pvh, 視床下部（室傍核）; sl, 外側中隔核; sm, 内側中隔核; smt, 視床（内側下核）; TD, 対角帯; TO, 視索; TOL, 外側嗅索; TUO, 嗅結節; vmh, 視床下部（腹内側核）

2. 方法

2.1 脳の固定及び切片作製

定量的な免疫組織化学標本を作製するには、組織を細部まで均一に固定する必要がある。心臓から固定液を注入し、血管系を通して全身に固定液を循環させて速やかに灌流固定を行った。

¹ E-mail: akiyamak@md.tsukuba.ac.jp; Tel: 029-853-3330

² E-mail: yabek@md.tsukuba.ac.jp; Tel: 029-853-3231

³ E-mail: dsutoo@md.tsukuba.ac.jp; Tel: 029-853-3113

(1) Wistar ラットを麻酔し、心臓の動脈側からリン酸緩衝生理食塩水 (PBS, 100 ml) を注入して、静脈側から全身の血液を脱血した。(2) 続いて、新しく調製した固定液 (4%パラホルムアルデヒドと 0.2%グルタルアルデヒドを含む PBS 溶液, 250 ml) を灌流し、全身を固定した。(3) 脳を取り出し、厚さ約 5 mm のブロックに分割し、4°Cの固定液中で 5 時間、後固定した。(4) 脳ブロックを PBS で 1 時間 (15 分×4 回) 洗浄後、5%ショ糖を含む PBS 溶液に 4°Cで 12 時間浸漬した。この操作は、凍結操作時に組織内に氷が発生して、組織が損傷するのを防ぐものである。(5) 凍結標本用の包埋剤に脳を包埋し、ドライアイス上で凍結した。(6) クリオスタットで 20 μ m の厚さに薄切し、ゼラチン・クロム明礬溶液でコーティングしたスライドガラスに貼り付けた。ゼラチンのコーティングは、反応中にスライドガラスから切片がはがれるのを防ぐ役目を持つ。本実験では、耳孔線から吻側へ約 8.0 mm (図 1 A) 及び約 5.1 mm (図 1 B) の切片を用いた。

2.2 免疫組織化学染色

同一切片を、TH、CaMKII 及び CaM の各抗体を用いて、イソチオシアン酸フルオレセイン (FITC) 標識の 2 抗体法による蛍光免疫組織化学染色を行った。各抗体の濃度は予備実験から決定した。免疫組織化学染色の操作手順を以下に示す。

(1) スライドガラスに貼り付けた切片を PBS で洗浄し、包埋剤を充分に取り除いた。(2) 標準血清を切片にのせ、4°Cで 2 時間反応した後、PBS で洗浄した。(3) 標的物質に対する抗体 (第 1 抗体) を切片にのせ、4°Cで 12 時間反応した後、PBS で洗浄して未反応の抗体を除去した。(4) FITC で標識した第 2 抗体を切片にのせ、遮光下の室温で 3 時間反応した。(5) 遮光下で数時間、PBS を交換しながら丁寧に洗浄した。未反応の抗体が切片上に残ると分析値に誤差が生じるため、充分に洗浄する必要がある。(6) 10%グリセリン PBS 溶液で封入し直ちに分析した。標本の保管は、4°Cの暗所で行う。

最初に TH の抗体で切片を染色し、蛍光強度を測定した。次に、PBS 中で丁寧にカバーガラスをはずし、CaMKII に対する抗体で染色して、標本を同じ座標にセットして測定した。同様に、同じ切片を CaM に対する抗体で染色し、同一座標下で測定した。2 番目以降の染色操作は、全て遮光下で行った。

各物質の蛍光強度の分析後、切片をニッスル染色或いはアセチルコリンエステラーゼ染色し、脳アトラスを参照して各部位を同定した。

2.3 分布分析

蛍光免疫組織化学染色した脳切片の全領域を、Brain Mapping Analyzer によって、20 μ m 間隔で約 25 万〜31 万領域に分割して測光した。最初に染色した物質 (TH) のデータは、染色後の測定から直接得られた。2 番目以降に染色した物質 (CaMKII と CaM) のデータは、各物質の染色前後の蛍光強度値の差から得られた。即ち、各領域の 2 回目と 1 回目の蛍光強度値の差から CaMKII のデータが得られ、3 回目と

2 回目の蛍光強度値の差から CaM のデータが得られた。これらのデータをコンピューターによって画像化し、同一切片内の各物質の分布の違いを検討した。

この方法では、切片をステージの同じ位置に正確に再配置する必要がある。その手法として、スライドガラスの端に三点のマークを付け、最初の測光の際に、これらのマークの座標値を測定しておく。次に、2 回目以降の測光で、ステージの微動装置を調節して、マークを正確に同じ座標にセットした。この操作による再配置の誤差は、1 μ m 未満であった。

測光条件は、以下の通りである。励起波長 420-490 nm、干渉フィルター 530 nm、光電子増倍管の印加電圧 850 V、対物レンズ 20×/0.75 (倍率/開口数)、視野絞り 20 μ m、測光絞り 100 μ m、測光間隔 20 μ m、測光スピード 100 領域/秒。なお、液厚 100 μ m の 1 mM 硫酸キニーネから発せられる蛍光強度を 100 として相対的な蛍光強度値を求めた。

3. 結果

3.1 各物質の分布

図 2 に、ラット脳の各領域における TH、CaMKII 及び CaM の分布図を示した。図 3 には、これらの分布を比較した図を示し、さらに図 4 には、各物質の実際の蛍光強度値を示した。TH、CaMKII 及び CaM は脳のほとんど全ての領域で観察されたが、その分布は各物質により異なっていた。

TH の分布： 線条体、視床下部、嗅結節、側坐核に高レベルで分布していた。線条体の吻側領域では、背外側から腹内側へ向かう濃度勾配が観察され、背外側部は腹内側部に比べて約 70%高レベルであった。

CaMKII の分布： TH や CaM に比べて、領域によるレベルの差が大きかった。海馬、大脳皮質、線条体、側坐核、嗅結節、外側中隔核、扁桃に高レベルの分布がみられ、海馬のレベルが最も高かった。視床下部は、低〜中レベルであった。線条体吻側領域では、背側及び腹側部のレベルが中央部に比べて約 35%高かった。

CaM の分布： 他の二物質に比べて、比較的均一に分布していたが、大脳皮質、視床下部、嗅結節、海馬、側坐核、線条体には高レベルで分布していた。線条体吻側領域では、背外側部や腹側部のレベルが中央部よりも高かった。

3.2 三物質の分布の比較

TH、CaM、CaMKII は、線条体、側坐核及び嗅結節において共に高レベルで分布していた。線条体では特に、吻側背外側部と尾側部の領域において、全ての物質が極めて高いレベルを示した。運動皮質においても、三物質は比較的高レベルであった。

視床下部では、TH と CaM レベルが非常に高く、特に弓状核は強く染色されていたが、CaMKII レベルは低かった。海馬の CaMKII レベルは著しく高いが、TH と CaM は中〜高レベルであった。CaMKII レベルは外側中隔核で高く、対角帯で低かったが、TH と CaM は両領域とも中レベルであった。

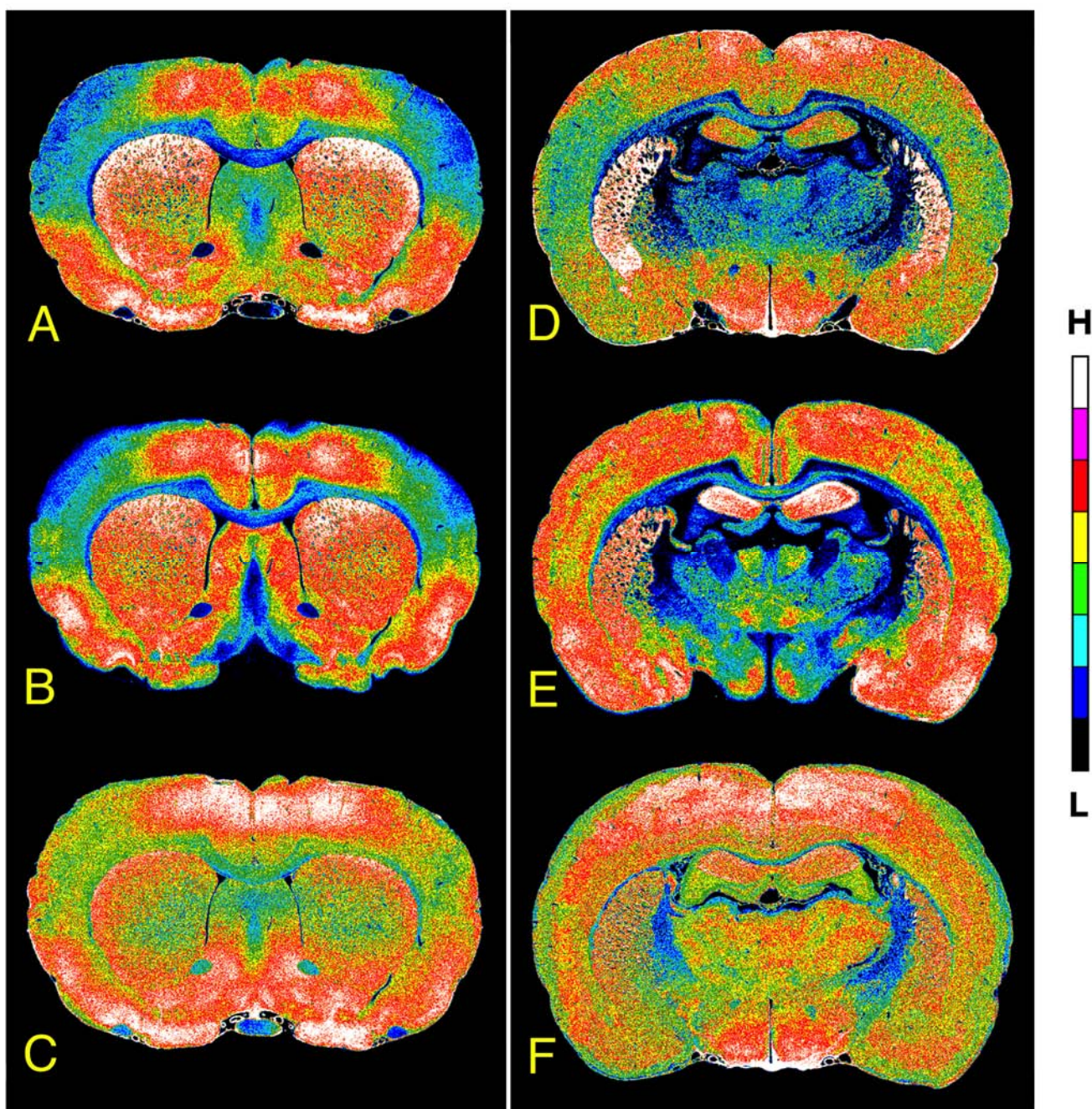


図2. 同一組織標本から得られた3つの異なる神経化学物質の定量的分布図

三重に染色したラット脳切片の免疫組織化学標本から、Brain Mapping Analyzer によって、TH (A, D)、CaMKII (B, E) 及び CaM (C, F) 分布の定量的データを抽出した。A-C は図 1A の領域、D-F は図 1B の領域での切片を分析したものである。ラット脳切片を 20 μm 間隔で測光し、約 25 万領域 (A-C) 及び約 31 万領域 (D-F) における各物質の濃度分布を検出した。得られたデータを 8 段階のレベルに分類し、カラー表示した。

(*Brain Res.* **933** (2002) 1-11 より引用)

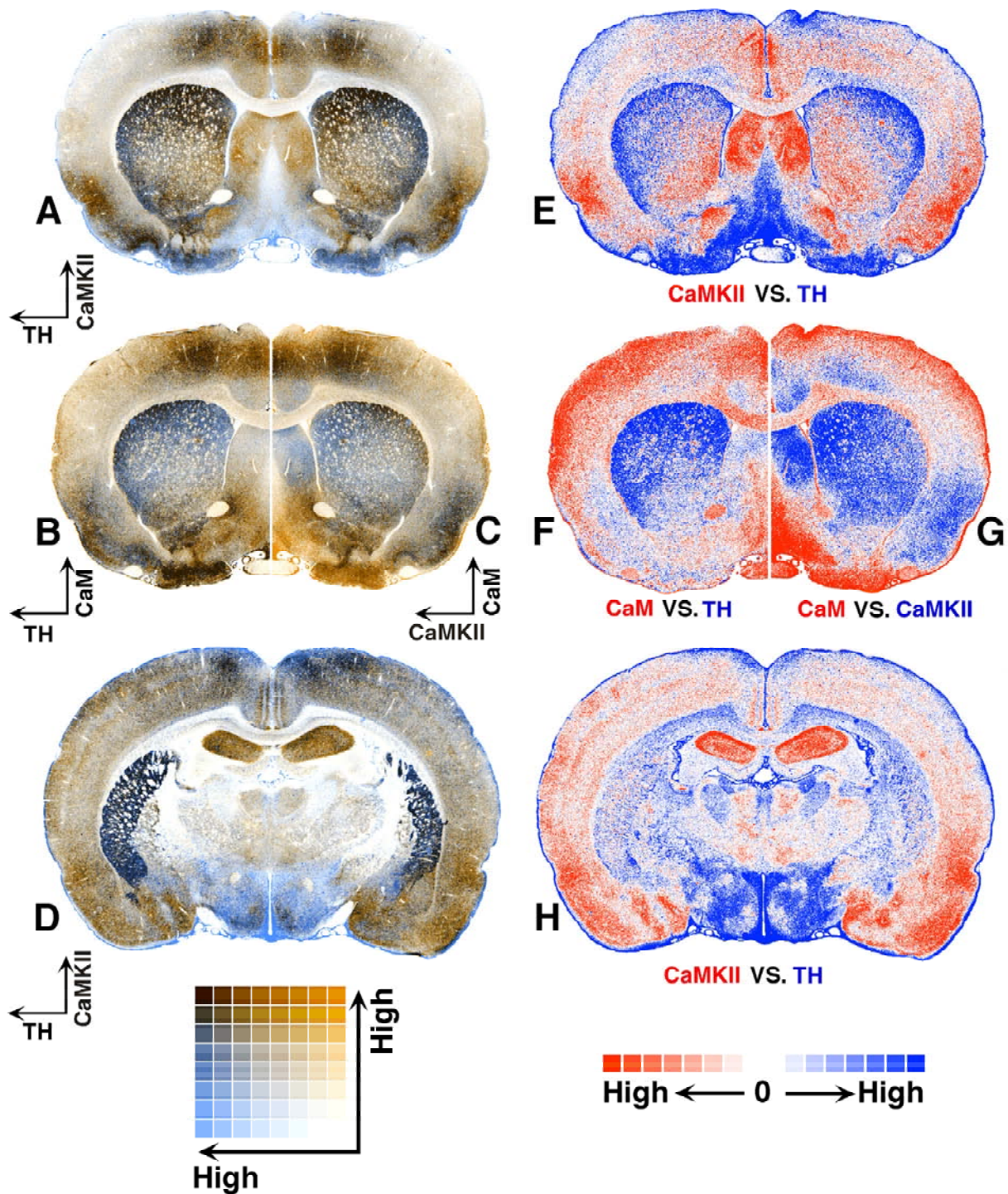


図 3. 同一組織標本内での複数の神経化学物質の比較解析

図 2 に示した TH、CaMKII 及び CaM のデータを用いて、物質間での分布の比較解析を行った。A-C 及び E-G は図 1A の領域、D 及び H は図 1B の領域での切片を解析した結果である。

A-D: 2つの物質の分布を同一座標上で比較した。各物質の蛍光強度を青又は黄の濃淡で 8 段階に分割し、それらを組み合わせた 64 色で表示している。A 及び D: TH (青) と CaMKII (黄)、B: TH (青) と CaM (黄)、C: CaMKII (青) と CaM (黄) の分布の関係を比較している。

E-H: 同一座標上における 2つの物質間の濃度差を、相対的に赤と青の濃淡で各 8 段階に表示した。E 及び H: TH に比べて CaMKII レベルが高い領域を赤で示し、CaMKII に比べて TH レベルが高い領域を青で示している。同様に、CaM (赤) と TH (青) の分布の差を F に、CaM (赤) と CaMKII (青) の分布の差を G に示している。

(Brain Res. 933 (2002) 1-11 より引用)

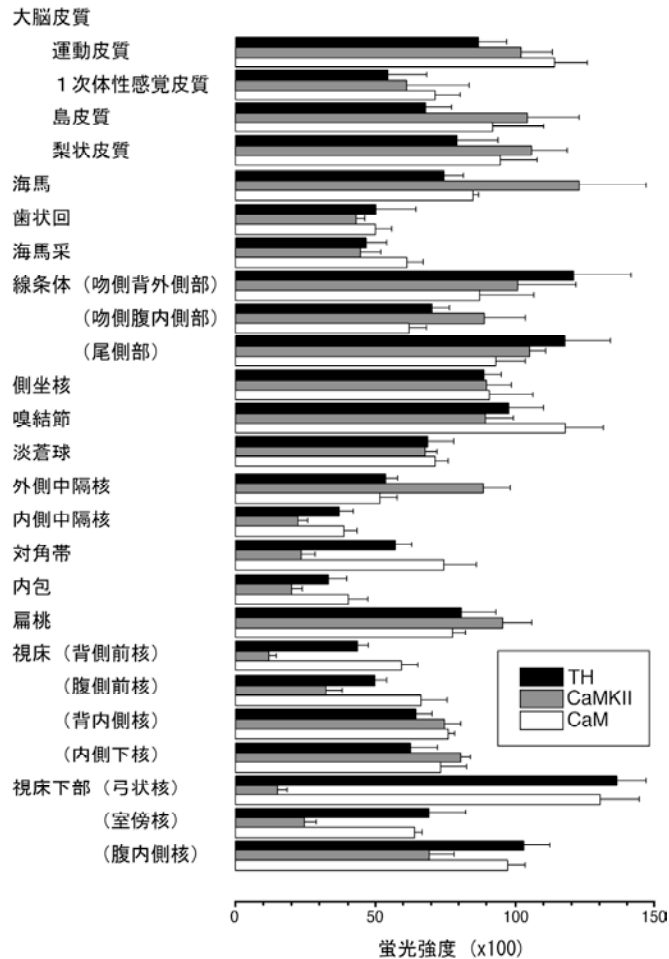


図4. 各脳領域における TH、CaMKII 及び CaM の免疫組織化学的蛍光強度値

三重免疫組織化学染色したラット脳切片から Brain Mapping Analyzer によって各物質の濃度を抽出した。10 匹のラットから同一領域の切片をそれぞれ 2 枚ずつ (合計 20 枚) 選んで分析し、各領域あたり約 1000-3000 個のデータを集め、平均値±標準偏差値を求めた。各領域のデータは、標準物質である 1 mM 硫酸キニーネの蛍光強度を 100 とした時の相対的蛍光強度値で示している。
(Brain Res. 933 (2002) 1-11 より引用)

4. 考察

神経伝達物質は、脳内の様々な情報を伝え、その働きを調節する重要な役割を担っている。脳の各部位の機能を知るためには、ドーパミンを始めとする神経伝達物質の分布を詳細かつ定量的に分析することが不可欠である。私共は、その分析法と装置の開発を行い、種々の物質の分布を細胞レベルで定量し画像化する、Brain Mapping Analyzer を完成した^[1,2]。この装置は、国内外の大学等で様々な研究に使用されている。

この装置を用いて実験を重ね、日常の生活を通して摂取されたカルシウムが脳内の CaM 依存系を活性化して TH を賦活化し、引き続き線条体や側坐核でドーパミンの合成能を亢進する事を、他に先駆けて解明した^[7-9]。この基礎的メカニズムを基に、脳内ドーパミン作動系に異常が示唆されている幾つかの疾病

を分析し、新たな発症機序の解明や予防法と治療法を開発するための基礎的データを提供してきた^[5, 6, 10-17]。

脳の構造と機能は極めて複雑で、しかも緻密であるため、部位が僅かにずれるだけで機能が異なっている。従って、脳の様々な機能や神経化学物質の相互作用を解析するためには、同一組織切片上で複数の物質の分布を定量することが不可欠である。これまで、同一切片上で各物質をそれぞれ異なる蛍光物質で標識し、定性的に観察する方法はあったが、それらを定量するのに良い方法がなかった。今回、Brain Mapping Analyzer を用いて、多重免疫組織化学染色の前後に同一条件下で蛍光強度を測定し、精密にその差を求めることにより、複数の物質の分布を定量的に比較解析することに成功した^[3,4]。

本法では、各物質を同じ蛍光物質 (FITC) で標識しているため、同一の励起波長と干渉フィルターを使用することができた。標本を同一条件下で測光することにより、正確な差を得ることができる。さらに、ピンホールを通して目的とする微小領域だけを照射し、各領域の照射時間も 0.01 秒と短いため、励起光による蛍光の退色がほとんど無く、多重測光の際に極めて再現性の高いデータが得られた。

本実験において、線条体と側坐核に、TH、CaM 及び CaMKII が共に高レベルで分布していた。本結果を既報の結果^{15,9)}と合わせて考えると、これらの領域におけるドーパミン合成は、CaM 及び CaMKII を介してカルシウムによって調節されることが示唆される。嗅結節と運動皮質においても、三物質が比較的高いレベルで分布しており、これらの領域においても、CaM 系を介して TH が活性化される可能性が示唆される。一方、視床下部において、TH と CaM は高レベルで分布していたが、CaMKII レベルは比較的低かった。このことから、視床下部における TH の活性化は、CaMKII 以外のプロテインキナーゼによって主に調節される可能性が考えられる。

5. まとめ

Brain Mapping Analyzer を用いて、同一組織切片上に分布する複数の化学物質の分布を定量し、相關的に解析する方法を開発した。一例として、ラット脳内の TH、CaMKII 及び CaM を解析し、線条体と側坐核において、三物質が共に高レベルで分布することを確認した。これらの領域において、カルシウムが CaM 系を介して TH を活性化し、ドーパミンレベルを増加させることが示唆される。

本法は、同じ組織内での複数の化学物質の相関作用を解析できるため、様々な脳機能や神経疾患等を研究する上で、極めて有効な手段になると考える。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (12922044, 13922045, 13922047, 14922050, 15922046, 17927001, 17928009 及び 18927001) の援助を受けて行った。

参考文献

- [1] 須藤伝悦, 秋山佳代, 前田一郎, 脳内神経伝達物質分布分析のための顕微測光装置システムの開発, 日本薬理学雑誌 91 (1988) 173-180.
- [2] D. Sutoo, K. Akiyama, K. Yabe, Quantitative mapping analyzer for determining the distribution of neurochemicals in the human brain, J. Neurosci. Methods 85 (1998) 161-173.
- [3] D. Sutoo, K. Akiyama, K. Yabe, Comparison analysis of distributions of tyrosine hydroxylase, calmodulin and calcium/calmodulin-dependent protein kinase II in a triple stained slice of rat brain, Brain Res. 933 (2002) 1-11.
- [4] D. Sutoo, K. Akiyama, K. Yabe, A novel technique for quantitative immunohistochemical imaging of various neurochemicals in a multiple-stained brain slice, J. Neurosci. Methods 118 (2002) 41-50.
- [5] D. Sutoo, K. Akiyama, Regulation of blood pressure with calcium-dependent dopamine synthesizing system in the brain and its related phenomena, Brain Res. Rev. 25 (1997) 1-26.
- [6] D. Sutoo, K. Akiyama, Regulation of brain function by exercise, Neurobiol. Dis. 13 (2003) 1-14.
- [7] D. Sutoo, K. Akiyama, M. Geffard, Central dopamine-synthesis regulation by the calcium-calmodulin-dependent system, Brain Res. Bull. 22 (1989) 565-569.
- [8] D. Sutoo, K. Akiyama, K. Yabe, K. Kohno, Multiple analysis of tyrosine hydroxylase and calmodulin distributions in the forebrain of the rat using a microphotometry system, Brain Res. Bull. 26 (1991) 973-982.
- [9] D. Sutoo, K. Akiyama, K. Yabe, Quantitative imaging of tyrosine hydroxylase and calmodulin in the human brain, J. Neurosci. Res. 63 (2001) 369-376.
- [10] K. Akiyama, D. Sutoo, Rectifying effect of exercise on hypertension in spontaneously hypertensive rats via a calcium-dependent dopamine synthesizing system in the brain, Brain Res. 823 (1999) 154-160.
- [11] D. Sutoo, K. Akiyama, Effect of cadmium or magnesium on calcium-dependent central function that reduces blood pressure, Arch. Toxicol. 74 (2000) 1-4.
- [12] K. Akiyama, D. Sutoo, The mechanism by which exercise reduces blood pressure, In: Frontiers of the Mechanisms of Memory and Dementia, T. Kato (Ed.), Elsevier, Amsterdam (2000) 109-110.
- [13] D. Sutoo, K. Akiyama, Opposite effects of calcium and magnesium on the central blood pressure regulation in the spontaneously hypertensive rats, Jpn. J. Pharmacol. 86 (2001) 366-368.
- [14] D. Sutoo, K. Akiyama, Neurochemical changes in mice following physical or psychological stress exposures, Behav. Brain Res. 134 (2002) 347-354.
- [15] D. Sutoo, K. Akiyama, The significance of increase in striatal D₂ receptors in epileptic EL mice, Brain Res. 980 (2003) 24-30.
- [16] D. Sutoo, K. Akiyama, Music improves dopaminergic neurotransmission: demonstration based on the effect of music on blood pressure regulation, Brain Res. 1016 (2004) 255-262.
- [17] D. Sutoo, K. Akiyama, Daily exercise and stress on brain function, In: Trends in Exercise and Health Research, R. L. Swan (Ed.), Nova Science, New York (2005) 23-48.

大学実験室の作業環境測定の精度管理の試み ～有機溶剤の固体捕集・ガスクロマトグラフ測定法について～

柏木保人

筑波大学組織・人事部環境安全管理室
〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

大学実験室における有機溶剤についての作業環境測定の精度管理のために、大学実験室で取り扱われている多品種の有機溶剤の混合標準ガスの調製法を検討した。調製した有機溶剤の混合標準ガスを用いて、活性炭吸着/二硫化炭素溶出/ガスクロマトグラフ(GC)測定を行い、有機溶剤の回収率を求め、測定操作を評価した。

1. はじめに

平成16年度から国立大学法人化に伴い労働安全衛生法の適用を受け、有機溶剤(第一種、第二種)を、日常的に、または定期的に取り扱う実験室には有機溶剤中毒予防規則に基づき、局所排気装置、プッシュプル換気装置又は密閉装置の設置、六ヶ月に一度の作業環境測定などが義務づけられている。一般的に、大学の実験室は、産業界の製造現場及び取り扱い現場とはかなり異質である。つまり、教育研究の現場においては、人的な流動性、取り扱い物の質的及び量的な変動性が著しい特徴が挙げられる。また、有機溶剤等の取扱いの有害業務は、年度ごとに、また季節的にも変動している。このような教育研究現場の特殊な作業環境における気体中の有機溶剤濃度の定量を、学内の作業環境測定士が行うにあたり、測定の精度、つまり、その正確さ及び精密さを確保するために、大学実験室の実状に即した測定操作の基本的な検討を行った。具体的には、大学実験室では、少量・多品種の有機溶剤が同時に取り扱われているために、複雑な組成の混合有機溶剤の測定となる場合が多い。そこで、事前に混合有機溶剤の活性炭・シリカゲルへの固体捕集挙動を確認できる方法を確立しておくことは測定の精度管理のために重要である。本報告では、市販のミゼットインピンジャーを標準ガス発生管として用い、混合有機溶剤の標準ガスの調製方法を検討した。そして、有機溶剤の混合標準ガスについての活性炭吸着捕集挙動を調べた。

2. 作業環境測定の概要説明

2.1 関係法令

労働安全衛生法第65条第1項に「事業者は、有害な業務を行う屋内作業場その他の作業場で政令で定めるものについて、厚生労働省令で定めるところにより、必要な作業環境測定を行い、その結果を記録しておかなければならない。」とあり、労働安全衛生法施行令第21条に粉じん、特定化学物質、有機溶

剤などに関する10種類の作業場について作業環境測定の義務を規定している。測定の実施に当たっては、労働安全衛生法第65条第2項に、厚生労働大臣の定める作業環境測定基準に従って行うことを規定している。また、作業環境測定法第3条の規定により、10種類の作業場所のうち、粉じん、放射性物質、特定化学物質、鉛、有機溶剤の各々に関する5種類の指定作業場所については、作業環境測定士または作業環境測定機関に測定させる義務を規定している。

2.2 測定のデザイン・サンプリング

作業環境管理の対象として、有害物質の分布状況、作業者の行動範囲から単位作業場が確定される。その単位作業場についてA測定(空気中の有害物質濃度の空間的及び時間的な変動の平均的な状態を把握する測定)とB測定(有害物質の発散源近くの作業者が最大の暴露を受けると考えられる場所と時間で行う測定)が行われる。A測定の測定点は、原則として、単位作業場内に引ける6m以下の等間隔の縦線と横線の交点である。測定点数は一つの単位作業場について5点以上を設定しなければならない。A及びB測定の各測定点において、床上0.5～1.5mの呼吸域の空気を10分以上かけて所定量採取する必要がある。

3. 実験方法

3.1 試薬及び装置

活性炭吸着管: 柴田科学製標準活性炭管(前層: 100 mg 活性炭, 後層: 50 mg 活性炭)。ガスクロマトグラフ: ジーエルサイエンス製 GC-4000 ガスクロマトグラフ(FID)。極性カラム: 液相 PEG20M (10%)、Chromosorb W (AW-DMCS 処理、60/80 メッシュ)、2 m×3 mm φ。無極性カラム: G-100 カラム(液相 OV-1、膜厚 2.0 μm、40 m×1.2 mm φ)。

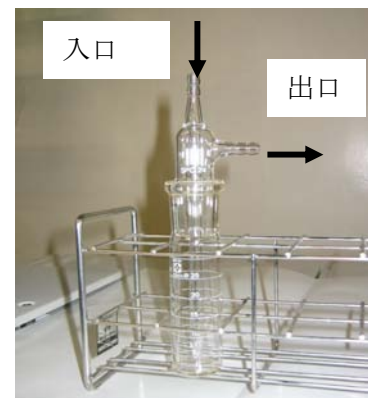


図1. ミゼットインピンジャー

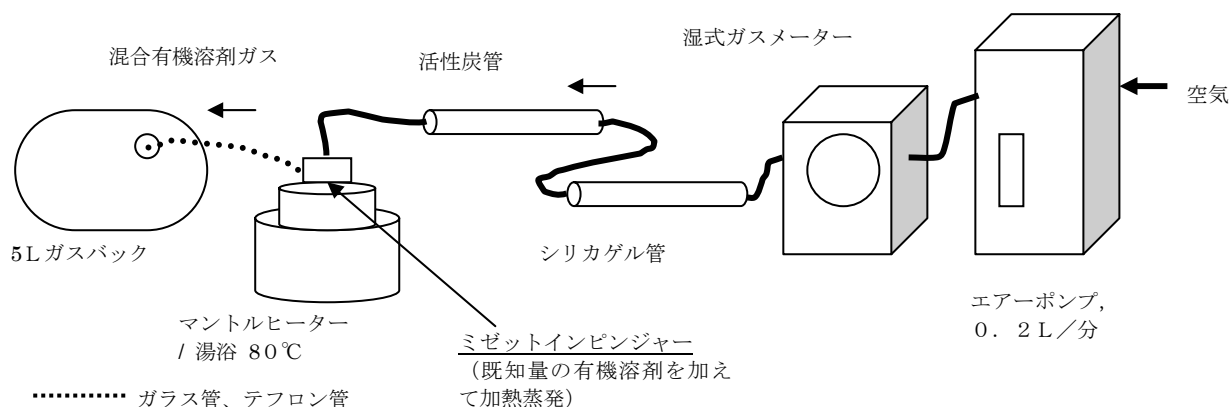


図 2. 有機溶剤の混合標準ガス調製の説明

ジーエルサイエンス製オートインジェクター (ASI-240) を用いて測定試料 1.0 μ l を注入した。ミニポンプ: 柴田科学製 MP- Σ 30 を用いて空気を採取した。ガスバック: 5 L テドラーバックを使用した。湿式ガスメーター: シナガワ製 W-NK-0.5A。エアーポンプ: ジャーレルアッシュ製還元気化水銀原子吸光用 (ADB2)。試薬は、すべて特級品または同等品を用いた。

3.2 有機溶剤の混合標準ガスの調製方法

3.2.1 有機溶剤の標準ガス調製の器具構成

図 1 に示した市販のミゼットインピンジャー、湿式ガスメーター、エアーポンプ、活性炭管、シリカゲル管、マントルヒーターで加温した湯浴 (80℃)、5 L ガスバック、ガラス管、テフロン管を図 2 のように連結し、有機溶剤の混合標準ガスを調製した。

3.2.2 混合有機溶剤標準ガスの調製手順

① 氷浴に漬けて冷却したミゼットインピンジャーの分岐管のガス入り口の内管に 10、50、または 100 μ l のマイクロシリンジを用いて所定量の各有機溶剤を正確に入れる。

② ミゼットインピンジャーの分岐管のガス入り口側に清浄空気の送気チューブ、分岐管のガス出口側にテフロン管及びガラス管で 5 L ガスバックに連結する。

③ エアーポンプで 0.2 L/分の流速で清浄空気をガスバックに送気開始し、直ちにミゼットインピンジャーを 80℃の湯浴に漬けて、加熱する。

④ 20 分間後に清浄空気の送気を停止し、湿式ガスメーターの目盛から送気空気量を読み取り、添加した有機溶剂量から調製した各有機溶剤ガス濃度を計算する。

⑤ ガスバック内の混合有機溶剤ガスが室温になり、均一になるまで密栓して静置する。

⑥ 次に、調製した混合有機溶剤の標準ガスをガスタイトシリンジを用いて所定量分取し、既知量の清浄空気を入れたガスバックに注入口から注入し、混合標準ガスを希釈してから、使用に供する。

3.3 有機溶剤の保持時間の確認

有機溶剤中毒予防規則が規定する第一種有機溶剤は 7 物質、第二種有機溶剤は 40 物質である。平成 17 年度に実施した筑波大学での有機溶剤取り扱い調査では有機溶剤 20 物質が取り扱われていた。そこで、強極性液相カラムと無極性カラムを使って、これらの 20 物質の有機溶剤の各々のカラムでの保持時間を測定した。

3.4 有機溶剤の作業環境測定操作

単位作業場内の測定点で、所定量の空気を活性炭管を通して 10 分間ミニポンプで吸引して、有機溶剤を吸着捕集する。活性炭管のガラス管を割って、活性炭を取り出し、5 ml バイアル瓶に移し入れる。次に、2.0 ml 二硫化炭素を入れてテフロン膜セプタム付のキャップで密栓し、振とう機で 2 時間振り混ぜ、有機溶剤を溶離する。溶離液約 1 ml をオートインジェクター用のバイアル瓶に移し入れて、試料液 1.0 μ l を FID-ガスクロマトグラフ測定に供する。濃度の定量は、溶離溶媒の二硫化炭素にマイクロシリンジで各々の有機溶剤を添加して、測定濃度範囲の標準液を調製し、検量線法で行った。

4. 結果及び考察

4.1 各有機溶剤の GC 保持時間

筑波大学の実験室で取り扱われている有機溶剤 (特定化学物質のベンゼンを含む。) のガスクロマトグラムにおける分離ピークの保持時間を測定し、各有機溶剤の分離挙動を調べた。その結果を、表 1 に示した。いくつかの成分のピークが重なっており、無極性カラム (G-100) と極性カラム (PEG 20M) を併用して測定することが必要であると分かった。

4.2 高濃度混合有機溶剤の活性炭吸着挙動

活性炭の気相吸着平衡は、単一成分のガスの場合と複数成分のガスの場合を比べた時に、吸着挙動が変化することが知られている。この吸着実験では、高濃度のトルエン (飽和蒸気濃度の 1/7~1/14 濃度)、

クロロホルム (飽和蒸気濃度の 1/50～1/100 濃度) の二成分系の混合標準ガスを使って、作業環境測定に日常的に使用される活性炭管の前層 (100 mg) と後層 (50 mg) への吸着捕集の回収率を求めた。その結果、採取空気量、流速が過大の場合には、トルエンが優先的に吸着され、クロロホルムは吸着妨害を受けることがわかった。しかし、採取空気量、流速を半分にすると高濃度のトルエン、クロロホルムが活性炭管に定量的に捕集された (表 2)。

表 1. 有機溶剤の GC 保持時間

G-100 カラム		PEG 20M カラム	
40-85℃(3 分), 85℃一定		40-100℃(3 分), 100℃一定	
ピーク成分	min	ピーク成分	min
メタノール	2.18	エチルエーテル	1.2
アセトン	2.47	ヘキサン	1.2
イソプロピルアルコール	2.51	CS ₂	1.7
エチルエーテル	2.53	アセトン	2.37
ジクロロメタン	2.62	テトラヒドロフラン	2.9
CS ₂	2.72	酢酸エチル	3.09
メチルエチルケトン	2.98	メタノール	3.32
2-ブタノール	3.04	メチルエチルケトン	3.32
ヘキサン	3.14	ジクロロメタン	3.55
酢酸エチル	3.14	イソプロピルアルコール	3.57
テトラヒドロフラン	3.29	ベンゼン	3.76
クロロホルム	3.35	トリクロロエチレン	4.34
1-ブタノール	3.53	クロロホルム	4.68
ベンゼン	3.58	2-ブタノール	4.71
トリクロロエチレン	3.95	トルエン	5.20
DMF	4.72	酢酸ブチル	5.59
トルエン	4.89	1-ブタノール	6.73
酢酸ブチル	5.6	p-キシレン	6.94
クロロベンゼン	6.46	o-キシレン	7.99
p-キシレン	7.11	クロロベンゼン	8.97
o-キシレン	7.78	DMF	14.27

表 2. 高濃度混合標準ガスの吸着挙 (CS₂, 1.5 ml)

混合溶剤標準ガス I		混合溶剤標準ガス II	
トルエン	クロロホルム	トルエン	クロロホルム
5000ppm	5000ppm	2500ppm	2500ppm
採取量 2.63 L (0.2L/min)		採取量 1.00 L (0.1L/min)	
前層回収率 63.0 %	前層回収率 8.6 %	前層回収率 76 %	前層回収率 92 %
後層回収率 19.0 %	後層回収率 23.7 %	後層回収率 0 %	後層回収率 0 %
全回収率 82.0 %	全回収率 32.3 %	全回収率 76 %	全回収率 92%
実測濃度 4100 ppm	実測濃度 1600 ppm	実測濃度 1900 ppm	実測濃度 2300 ppm

トルエン、クロロホルムの飽和蒸気圧は、各々 28 mmHg、195 mmHg である。これらを体積百万分率 (ppm) で示すと、各々 3.68×10^4 ppm、 2.57×10^5 ppm に相当する。トルエンの管理濃度は 50 ppm、クロロ

ホルムの管理濃度は 10 ppm に定められていることから、トルエン、クロロホルムの飽和蒸気濃度は、それぞれ管理濃度の 736 倍、25700 倍になっていると推計できる。このように、開放系での、有機溶剤の加温等による蒸気発生は極めて危険である。

4.3 低濃度混合有機溶剤の活性炭捕集/CS₂ 溶離/ガスクロマトグラフ測定

4.3.1 二成分混合標準ガスの測定

5 L ガスバックに調製したクロロホルム、P-キシレンの低濃度混合有機溶剤標準ガスを、0.4 L/分の流速で活性炭管を通して吸引して有機溶剤を捕集し、回収率を求めた。その結果を表 3 に示した。

表 3. 二成分の低濃度混合有機溶剤ガスの回収率

混合溶剤標準ガス III		混合溶剤標準ガス IV	
クロロホルム 19.6 ppm	p-キシレン 9.80 ppm	クロロホルム 19.7 ppm	p-キシレン 9.74 ppm
採取量 3.8 L		採取量 4 L	
実測濃度 16.9 ppm	実測濃度 7.51 ppm	実測濃度 21.1 ppm	実測濃度 7.72 ppm
回収率 86.2%	回収率 76.6%	回収率 107%	回収率 79.3%

4.3.2 五成分混合有機溶剤標準ガスの測定

ヘキサン、アセトン、酢酸エチル、ジクロロメタン、クロロホルムの 5 成分の混合有機溶剤標準ガスを同じ濃度となるように、五つの 5 L ガスバックに調製して、各々のガスバック内の標準ガス成分を活性炭管に捕集定量し、各成分の回収率を求めた。その結果を、表 4 に示した。また、図 3 にガスクロマトグラムを示した。

同じ濃度になるように混合標準ガスの調製を試みたところ、希釈清浄空気量を一定にすることができなかったため、標準ガス濃度にばらつきが生じた。

しかし、五つの標準ガスの各成分の平均濃度は 9.78 ± 0.04 ppm (R.S.D. 0.44%) であり、各成分の回収率のばらつきを評価するにあたり、ほぼ一定として扱っても良いと考えられる。

この有機溶剤 5 成分は、ある実験室で頻繁に使用されている組み合わせである。図 3 に示したように、各成分の分離性は、かなり良好である。アセトン以外の 4 成分の平均回収率は、概ね 90% 近傍であり、良好であった。有機溶剤の固体捕集法では、活性炭に吸着捕集した有機溶剤は、二硫化炭素で溶離する方法を用いることが多い。しかし、二硫化炭素による脱着率は、極性の大きな有機溶媒については低下することが知られている。アセトンは、親水性の極性溶媒であることから、アセトンのみが、回収率 67.5% と低くなったと考えられる。また、五つのガスバック内の混合標準ガス成分の各回収率のばらつきも小さく、測定の精密さも良好であった。

4. 4 混合有機溶剤の評価法

仮に、単位作業場内で、5成分の有機溶剤を取扱っている場合に、ある測定点における、各成分の実測濃度が c1、c2、c3、c4、c5、また、各成分の管理濃

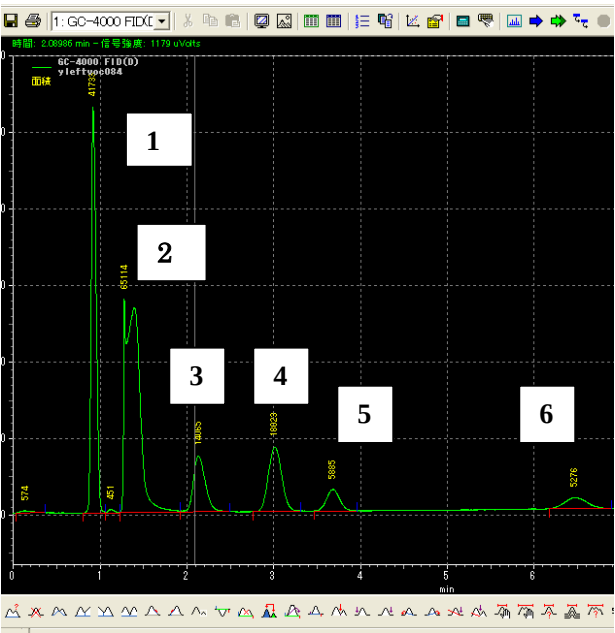


図 3. 五成分混合有機溶剤標準ガスのクロマトグラム

1：ヘキサン、2：二硫化炭素、3：アセトン
4：酢酸エチル、5：ジクロロメタン、6：クロロホルム
液相：PEG 20M 10%、オープン温度 55℃（一定）

度が E1、E2、E3、E4、E5 とすると、各成分の実測濃度と各々の管理濃度との比の総和

$C = c1/E1 + c2/E2 + c3/E3 + c4/E4 + c5/E5$
を計算する。そして、この値を、その測定点での混

合有機溶剤の総合的な濃度値とし、作業環境評価計算が行われることになっている。したがって、混合有機溶剤についての管理濃度は 1 になる。

例えば、ある測定点でのクロロホルム、エチルエーテルの実測濃度が、各々 10 ppm であった場合には、各実測濃度と各々の管理濃度の比の総和の換算値

$C = 10/10 + 10/400 = 1 + 0.025 = 1.025$

が、この測定点の混合有機溶剤の総合的な濃度になり、管理濃度を超えていることになる。この場合、同じ実測濃度でも、エチルエーテルの測定点での濃度への寄与は 0.025 となり、非常に小さくなる。このように、作業環境の評価への各有機溶剤成分の寄与は、その成分の管理濃度の値によって大きく影響を受ける。この場合を、人の臭気感覚で考えると、同じ実測濃度でも、クロロホルムはエチルエーテルに比べて無臭に近く、評価計算法と逆転して感じるようになるであろう。この場合には、管理濃度を超えていることから、測定点にリスクがあると指摘できるが、クロロホルムが存在せずに、エチルエーテルだけであったとすると、臭気をかなり感じるにもかかわらず、低いリスク評価になってしまうと考えられる。

表 5 には、平成 18 年度の有機溶剤の取り扱い調査に基づき、筑波大学で取り扱われている有機溶剤を列挙し、これらの性状と管理濃度も示した。有害性の大きい第一種有機溶剤の管理濃度は、低い濃度に決められているので、注意が必要である。

ただし、ベンゼンは有機溶媒であるが、特定化学物質であり、混合有機溶剤のように、実測濃度と管理濃度との比を用いない、実測濃度で評価される。また、ベンゼンの管理濃度は、発ガン性等の有害性により、1 ppm（質量濃度 3.2 mg/m³）と厳しい値である。取り扱いに注意が必要である。

4.5 作業環境の評価計算方法の概要

作業環境評価基準（厚生労働省告示第 192 号、平成 13 年 4 月 27 日改正）の第 2 条、第 3 条に、測定結果

表 4. 五成分の低濃度有機溶剤標準ガスの回収率

標準ガス	成分の調製濃度 ppm	ヘキサン		アセトン		酢酸エチル		ジクロロメタン		クロロホルム	
		実測濃度 ppm	回収率、%	実測濃度 ppm	回収率、%	実測濃度 ppm	回収率、%	実測濃度 ppm	回収率、%	実測濃度 ppm	回収率、%
V	9.72	8.46	87.0	6.53	67.2	8.92	91.8	9.08	93.4	10.3	105.4
VI	9.78	8.15	83.3	6.74	68.9	8.75	89.5	8.24	84.3	11.4	116.4
VII	9.79	8.46	86.4	6.74	68.8	8.58	87.6	8.76	89.5	10.7	109.3
VIII	9.84	8.77	89.1	6.99	71.0	9.22	93.7	8.76	89.0	10.7	108.7
IX	9.77	8.15	83.4	6.02	61.6	8.44	86.4	8.76	89.7	10.5	107.5
平均回収率、%			85.8		67.5		91.8		89.2		109.5
回収率の標準偏差			2.48		3.56		3.45		3.24		4.2
相対標準偏差、%			2.9		5.3		3.8		3.6		3.8

の評価法、計算式が規定されている。ここでは、作業環境測定結果を受け取った時に、その結果を理解して、作業環境測定の実施を、実験室のリスクアセスメントとして有効に活用するために、作業環境評価法の概要説明を加える。

一日間 A 測定の実測濃度（又は混合有機溶剤の換算値）C は、対数にして、標準偏差 $\log \sigma$ 1、平均値 $\log M$ を計算する。そして、経験的に分かっている日間変動を考慮して、図 4 右の正規分布の標準偏差 $\log \sigma$ を、 $\log^2 \sigma = \log^2 \sigma_1 + 0.084$ により計算する。

濃度分布の上限 5% に相当する濃度が、第一評価値 EA1 になるので、図 4 右の正規分布に示すように、

$$\log EA1 = \log M + 1.645 \times \log \sigma$$

の上式で、第一評価値 EA1 が求まる。

この第一評価値 EA1（上限 5% の濃度）が、管理濃度 E に等しい時を、第一管理水準といい、この時に成り立つ式

$$\log E = \log M + 1.645 \times \log \sigma$$

で描ける曲線が、図 5 の第一管理水準の曲線になる。作業環境が良好な評価の「第一管理区分」とは、第一評価値 EA1 が、管理濃度 E 未満の状況を言う。つまり、

$$\log EA1 < \log E$$

が成り立つ図 5 の左端の領域内に、その測定結果（ σ, M ）で決まる点が入る。

図 4 左に示したように、対数正規分布形の有害物質濃度の算術平均値が、第二評価値 EA2 になる。

数学的に、対数正規分布の算術平均 [C] は、

$$\ln [C] = \ln M + 1/2 \times \ln^2 \sigma$$

で求まる。そして、第二評価値 EA2 が管理濃度に等しい時を、第二管理水準と言う、つまり、

$$[C] (= EA2) = E \text{ である。}$$

従って、第二管理水準では、

$$\ln E = \ln M + 1/2 \times \ln^2 \sigma \text{ となる。}$$

常用対数で書き表すと、

$$\log E = \log M + 1.151 \times \log^2 \sigma$$

であり、この式で図 5 の右の曲線が描ける。作業環境が、最も悪い評価の「第三管理区分」は、第二評価値が、管理濃度を超えている状況を言う。つまり、

$$\log EA2 > \log E = \log M + 1.151 \times \log^2 \sigma$$

で示される図 5 の右端の領域内に、その測定結果（ σ, M ）で決まる点が入る。最後に、良好でない要改善作業場の第二管理区分は、

$$\log EA2 \leq \log E \leq \log EA1$$

で示される図 5 の真ん中の領域内に入る点（ σ, M ）で示される。

表 5. 筑波大学で取り扱われている有機溶剤の性状と管理濃度

有機溶剤名称	密度	分子量	沸点℃	飽和蒸気圧 mmHg	管理濃度 ppm
クロホルム	1.48	119.4	61	195	10
トリクロエチレン	1.476	131.4	87	74.3	25
クロロベンゼン	1.106	112.6	132	11.8	10
DMF	0.945	73.1	153	3.7	10
1-ブタノール	0.808	74.1	117	6.47	25
ヘキサン	0.655	86.2	69	151	40
トルエン	0.862	92.1	111	28	50
p-キシレン	0.857	106.2	138	8.7	50
o-キシレン	0.876	106.2	144	6.6	50
ジクロロメタン	1.307	84.9	40	436	50
2-ブタノール	0.803	74.1	100	17.6	100
酢酸ブチル	0.876	116.2	127	81.3	150
メタノール	0.786	32	65	125	200
イソプロピルアルコール	0.781	60.1	82	43.4	200
メチルエチルケトン	0.798	72.1	80	90.5	200
酢酸エチル	0.891	88.1	77	96.9	200
テトラヒドロフラン	0.881	72.1	67	182	200
エチルエーテル	0.708	74.1	35	535	400
アセトン	0.785	58.1	56	230	500
ベンゼン	0.879	78.11	80.1	95.2	1

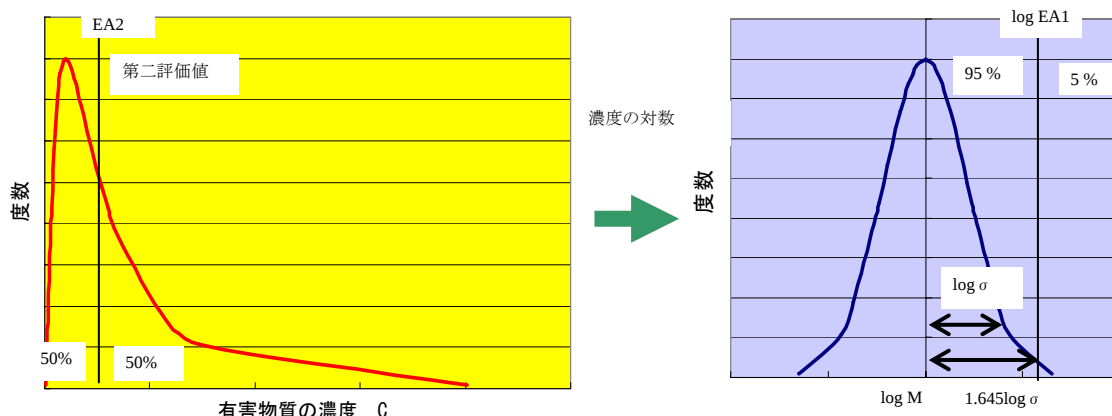


図 4. 単位作業場内の有害物質の濃度分布（対数正規分布型[†]）

C: 有害物質濃度, M: 幾何平均, σ : 幾何標準偏差, EA1: 第一評価値, EA2: 第二評価値

[†]: 単位作業場内における有害物質の濃度分布は、時間的にも空間的にも左図のグラフのように低濃度側に偏った形になることが多い。そして、有害物質濃度を対数変換した値の分布は右図のグラフのような正規分布型に近くなる。

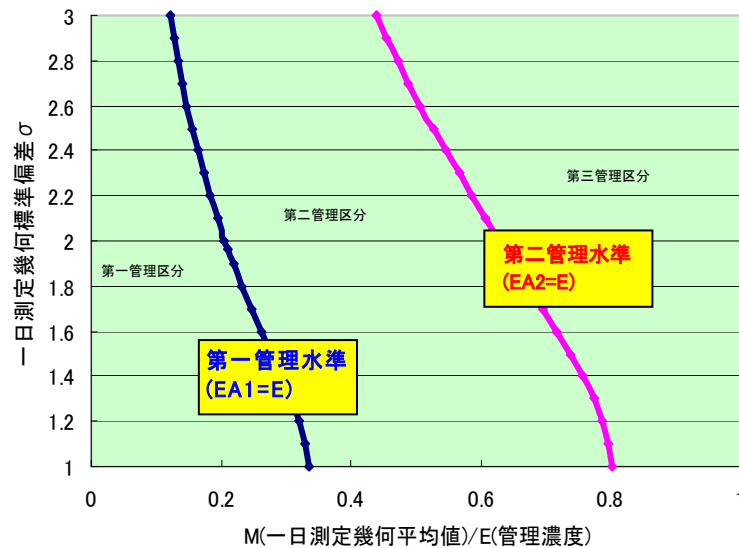


図 5. 管理区分と管理水準^{††}(一日間の A 測定)

M、 σ 、EA1、EA2：図 4 と同じ。E：管理濃度。

第一管理水準： $\log E = \log M + 1.645 \times \log \sigma$ で描ける曲線、第一管理と第二管理の境界。

第二管理水準： $\log E = \log M + 1.151 \times \log^2 \sigma$ で描ける曲線、第二管理と第三管理の境界。

††：品質管理の手法と同じように、作業場における気体中有害物質濃度の測定結果から求まる(σ 、M)を点で示して、管理水準との隔たりの程度から、直感的に、作業環境の良否を判断することができる。

参考文献

- [1] 厚生労働省安全衛生部環境改善室編：作業環境測定ガイドブック 5，有機溶剤関係，日本作業環境測定協会（平成 10 年 6 月）。
- [2] 厚生労働省安全衛生部環境改善室編：労働衛生管理とデザイン・サンプリングの実務，日本作業環境測定協会（平成 15 年 4 月）。
- [3] 松村芳美，活性炭による有機、無機化合物の気相吸着，表面，29 (1991) 76。
- [4] 深堀すみ江，多田治，菅井勤，環境中の有機溶剤蒸気の測定－活性炭管法における回収率についての実験的研究－，労働科学，3 (1987) T21。

水素中の CO 選択酸化反応触媒 (K_2CO_3 -Rh/SiO₂) の調製法と 透過型電子顕微鏡観察

伊藤伸一

筑波大学数理物質科学等支援室 (物性・分子工学専攻)
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

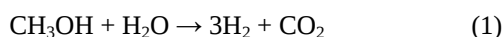
概要

燃料電池用水素製造過程で生成する一酸化炭素 (CO) を選択的に酸化除去する触媒の調製法と、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察の結果について報告する。

二酸化ケイ素担持ロジウム触媒 (Rh/SiO₂) にアルカリ (カリウム) を添加した K_2CO_3 -Rh/SiO₂ 触媒は、水素過剰雰囲気中で CO をほぼ完全に酸化した。この触媒を調製する際に、どの段階でアルカリを添加するかが重要であることがわかった。最も高活性であった触媒は、三硝酸ロジウム ($Rh(NO_3)_3$) 溶液と炭酸カリウム (K_2CO_3) 溶液の逐次含浸法により調製したものであった。この触媒は TEM 観察によると、他の触媒にはみられない特異な “Fish-egg” 構造を持っていた。また、Rh とアルカリとの相互作用により CO 選択酸化反応の高い活性が得られたことがわかった。

1. はじめに

地球温暖化対策のひとつとして、燃料電池の普及が進められている。自動車などの移動体へ搭載するものとしては、固体高分子形燃料電池がその始動性や軽量さから適している。燃料となる水素は、式 (1) で示したメタノール (CH_3OH) の水蒸気改質反応などにより生成される。しかし、メタノールの一部は式 (2) で示した分解が起こり CO を生成する。改質ガスには通常、1~2 vol% の CO が含まれる。



燃料電池の電極に使用される白金 (Pt) は CO を強く吸着するため、燃料水素ガス中に CO が存在すると発電性能が低下してしまう。CO 濃度の許容範囲はおよそ 10 ppm 以下である^[1,2]。純粋な Pt 電極に比べて、Pt-Ru 合金を用いた電極においても、100 ppm 以下であることが要求される^[3]。したがって、改質ガス中の CO を酸化除去する必要がある。しかし、水素過剰雰囲気での CO 酸化反応は、水素が優先的に酸化してしまうことから非常に難しい。そこで、CO 酸化に選択的な触媒が必要である。

触媒とは、化学反応の速度を変化させる物質である。担持貴金属触媒とは比表面積の大きい固体 (担体という) 上に貴金属の微粒子を分散及び固定 (担持という) したものである。担体には、二酸化ケイ素 (SiO₂) や三酸化二アルミニウム (Al₂O₃) あるいは炭素 (C) などがあり、比表面積は数十から 1000

m²/g 以上のものまである。SiO₂ に Rh を担持した触媒を Rh/SiO₂ のように表す。

Oh と Sinkevitch は Al₂O₃ に担持した貴金属触媒が、水素過剰雰囲気での CO 選択酸化反応に有効であることを報告している^[4]。また、これまでの研究で、担持 Rh 触媒に Nb₂O₅ やアルカリを添加したものがこの反応に高活性を示すことが報告されている^[5-8]。アルカリ添加 Rh/SiO₂ 触媒を用いた場合、水素が 75 vol% 存在する過剰雰囲気での CO 選択酸化反応では、CO 濃度は 10 ppm 以下にまで減少した^[6-8]。また、最近このアルカリの添加効果は担持 Pt 触媒にもみられることがわかった^[9-11]。

Rh/SiO₂ 触媒に、アルカリ (特にカリウム (K)) を添加する場合、その最適な K/Rh 比は 3 であることがわかった^[7,8]。さらに、カリウムを添加する場合、触媒調製のどの段階が最も効果的かを調べた結果、 $Rh(NO_3)_3$ 溶液を SiO₂ 担体に含浸し、乾燥後に K_2CO_3 溶液を含浸する方法 (逐次含浸法) が最適であることがわかってきた^[8]。この触媒を透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察したところ、他の触媒に見られない特異な構造が見られた。ほとんどの Rh 微粒子は均一な大きさ (2 nm) で、多くの Rh 微粒子が寄り集まった集合体が見られた。しかも、これらの微粒子は互いに離れて存在している。このような構造は、まるで魚の卵のように見えることから “Fish-egg” 構造と名づけた^[8]。これは、触媒の調製時に担持成分である Rh とカリウムが相互作用した結果と考えられる。また、この触媒が水素過剰雰囲気での CO 選択酸化反応に高活性であることから、Rh とカリウムの相互作用がこの反応に深く関与していることがわかった。

本報告では、カリウムを添加した Rh/SiO₂ 触媒 (これ以降 K_2CO_3 -Rh/SiO₂ とあらわす) の調製法と TEM 観察の結果について検討した結果を報告する。また、水素中の CO 選択酸化反応の結果についても報告する。

2. 実験

2.1 触媒調製

今回用いた SiO₂ 担体は触媒学会参照触媒委員会から提供された JRC-SIO-7 (BET 比表面積 : 81 m²/g) を 900℃ で予備焼成 (3 時間) した後使用した。

カリウムを添加していない Rh/SiO₂ 触媒は、SiO₂ 担体 1 g に Rh(NO₃)₃ 溶液 (Rh: 1.05×10⁻² g/ml, pH = 0.8, 1.9 ml) を含浸 (incipient wetness) し、110℃で一晩乾燥後、500℃で 3 時間マッフル炉により空気焼成した後、反応前処理として 500℃水素還元を行った。触媒の Rh 担持率は 2 wt% とした。

カリウム添加触媒は以下の 3 つの方法により調製した。逐次含浸法 (Sequential impregnation, 以下 (SI) と表記する)、共含浸法 (Co-impregnation, 以下 (CI) と表記)、および逐次焼成法 (Sequential calcination, 以下 (SC) と表記) である。Rh 担持率はすべて、2 wt%、K/Rh 比は 3 に統一した。逐次含浸法では、SiO₂ 担体 1 g に Rh(NO₃)₃ 溶液 1.9 ml を含浸 (incipient wetness)、乾燥後に K₂CO₃ 溶液 (K₂CO₃: 4.03×10⁻³ g/ml, pH = 11.0, 10 ml) を滴下しながら乾燥 (蒸発乾固) し、全量を滴下後、110℃で一晩乾燥し、500℃で 3 時間空気焼成した。共含浸法では、SiO₂ 担体 1 g に Rh(NO₃)₃ 溶液と K₂CO₃ 溶液を混合した溶液を含浸 (蒸発乾固) したのち、110℃で一晩乾燥後 500℃で 3 時間空気焼成した。逐次焼成法では、SiO₂ 担体 1 g に Rh(NO₃)₃ 溶液を含浸 (incipient wetness) し、110℃で一晩乾燥後、一度 500℃で 3 時間空気焼成した後、K₂CO₃ 溶液を滴下しながら乾燥 (蒸発乾固) し、全量を滴下後、110℃で一晩乾燥し、500℃で 3 時間空気焼成した。いずれの触媒も、反応前処理として 500℃水素還元を行った。

2.2 透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察

約 10 mg の触媒をメノウ乳鉢で粉碎後、5 ml の蒸留水に分散させ超音波を 1 分間照射した後、粘着処理をほどこしたマイクログリッド (試料用支持膜) 上にマウントした。

観察は本学医学系電子顕微鏡室にある、TEM (JEOL 100CX) を利用した。Rh 微粒子の平均粒子径は、1 つの試料につき 1850 個の微粒子の粒子径を測定し volume-area 平均 (d_{VA}) を計算し、分散度 (D) を求めた^[12, 13]。分散度とは、触媒微粒子の全金属原子数に対する表面原子数の割合である。Rh の場合、粒子径が 1.098 nm で分散度が 1 (最大) となる。平均粒子径と分散度との関係は以下の式で示される。

$$D = 1.098 / d_{VA}$$

2.3 水素吸着量、CO 吸着量測定

触媒のキャラクタリゼーション (ガス吸着量などの特性を明らかにすること) として水素吸着量、CO 吸着量測定を真空系吸着装置 (到達真空度: 1×10⁻⁵ Pa) を用いて行った^[12, 14]。用いた触媒量は 150 mg で、触媒の前処理は測定装置内で 500℃水素還元を行っ

た後、真空脱気処理を 450℃で 1 時間行った。水素吸着測定は室温において水素を導入し、1 時間後、吸着平衡圧力 500 ~ 1000 Pa の範囲で測定した。CO 吸着量についても同様に行った。吸着量の測定結果から、H/Rh, CO/Rh を求めた。

2.4 水素中の CO 選択酸化反応

反応は常圧固定床流通式反応装置を用いて行った。用いた触媒は 25 mg で、SiO₂ 75 mg と混合し、内径 6 mm の石英反応管につめ、前処理として 500℃水素還元を行った。反応ガス組成は、CO: 0.2 vol%, O₂: 0.2 vol%, H₂: 75 vol%, He バランスで、全流量は 100 ml/min とした。ガスの分析は TCD ガスクロマトグラフ (Shimadzu GC-8A) を用いた。反応活性は CO 転化率と、酸素 (O₂) 転化率で示した。また、選択性は次式で示したように、反応した酸素が CO の酸化に消費された割合で表した^[5-10]。

$$S\% = \frac{\text{酸化した CO}}{\text{反応した酸素}} \times \frac{1}{2} \times 100$$

3. 結果と考察

図 1 に 500℃還元後の Rh/SiO₂ 触媒と K₂CO₃-Rh/SiO₂(SI) 触媒の TEM 写真を示した。図 1 (a) に示したように、アルカリ (カリウム) を添加していない Rh/SiO₂ 触媒では 10 nm 程度の Rh 粒子が確認できた。これらの Rh 粒子は比較的大きく、低分散であった。また、粒子径分布も広いことがわかった。一方、逐次含浸法により調製した K₂CO₃-Rh/SiO₂(SI) 触媒は、図 1 (b) に示したようにきわめて特異的な構造を持っていることがわかった。Rh 粒子径は 2 nm 程度と小さく均一で、高分散である。また、これらの Rh 微粒子が寄り集まった集合体を形成している (図 1 (b) 中央)。しかも、それぞれの Rh 微粒子は、密集しているにもかかわらず、互いに離れて存在している。この特異的な構造は、まるで魚の卵のように見えることから、“Fish-egg” 構造と名づけた^[8]。単独で存在している Rh 微粒子もあるが、いたるところにこの特異な構造が見られることが、この触媒の大きな特徴のひとつである。なお、どのような機構で “Fish-egg” 構造が生成するかについては、現在検討中である。Rh/SiO₂ 触媒と比較するために、Rh 微粒子の粒子径分布を求めた結果を図 2 に示した。アルカリを添加していない Rh/SiO₂ 触媒では、分布が比較的広く 10 nm 程度の粒子も見られた。一方、K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI) 触媒では、Rh 粒子径の分布は非常に鋭く、7 nm を超えるものは見られなかった。担

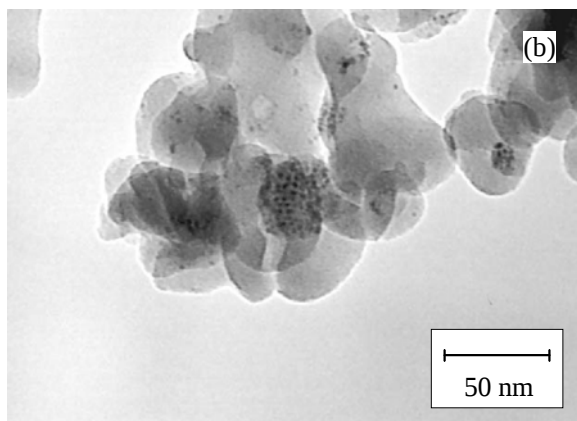
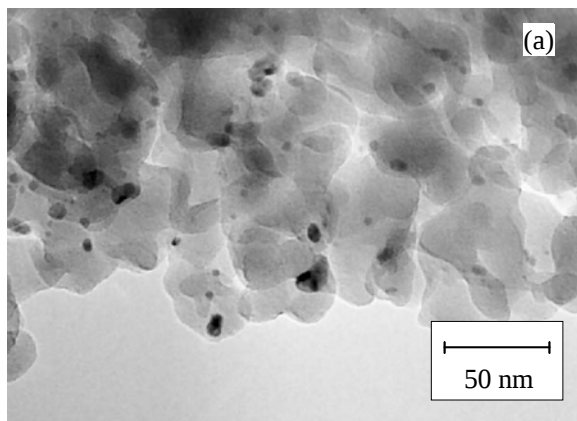


図 1. 500°C還元後の触媒の透過型電子顕微鏡写真
(a) Rh/SiO₂、(b) K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI).

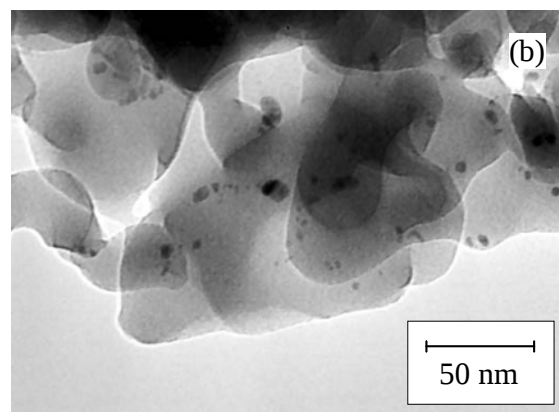
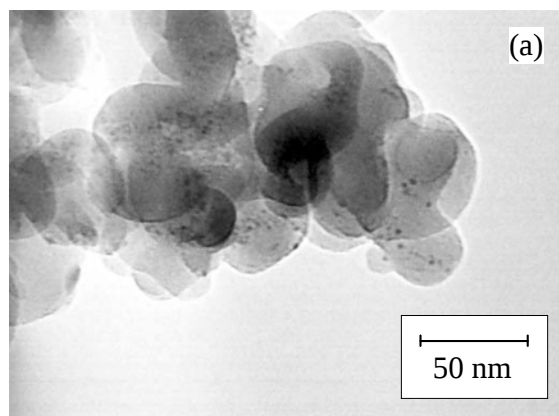


図 3. カリウム添加方法の違いによる K₂CO₃-Rh/SiO₂ 触媒の透過型電子顕微鏡写真
(a) K₂CO₃-Rh/SiO₂ (CI)、(b) K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SC).

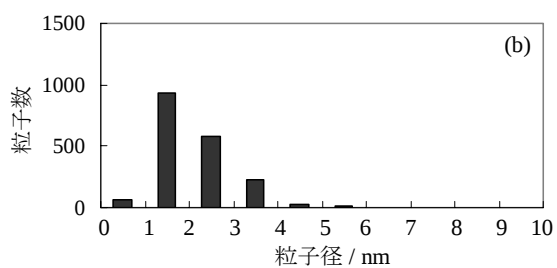
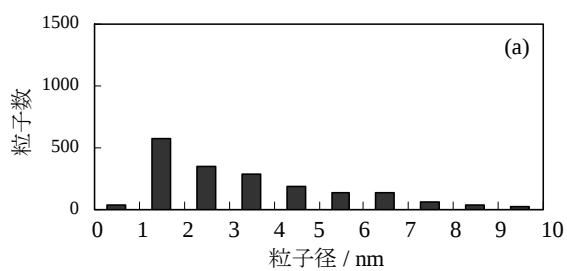


図 2. Rh/SiO₂ 触媒と K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI) 触媒の Rh 粒子径分布
(a) Rh/SiO₂、(b) K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI).

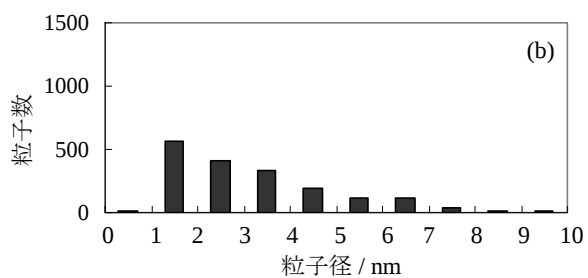
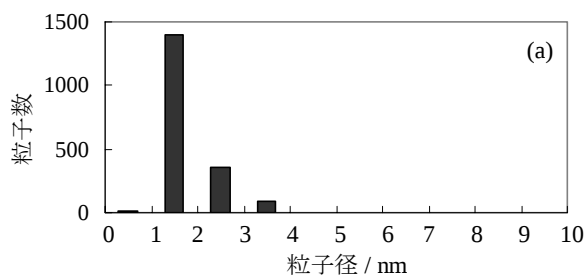


図 4. K₂CO₃-Rh/SiO₂ (CI) と K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SC) 触媒の Rh 粒子径分布
(a) K₂CO₃-Rh/SiO₂ (CI)、(b) K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SC).

持貴金属触媒の場合、貴金属粒子径が小さいほど、全金属原子数に対する表面原子数の割合が高く、望ましいとされる（高分散触媒）。それは、触媒反応が触媒表面でのみ起こることから、バルク（塊）中に存在する原子が少ないほど貴金属を有効利用できるためである。この観点から、Rh/SiO₂触媒にカリウムを添加したことはポジティブな結果をもたらしたといえる。

図3にカリウムの添加方法を変えたRh/SiO₂触媒の透過型電子顕微鏡写真を示した。図3(a)はRh(NO₃)₃とK₂CO₃の混合溶液をSiO₂担体に含浸（共含浸）したK₂CO₃-Rh/SiO₂(CI)触媒である。Rh微粒子は非常に高分散であり、その粒子径も均一であった。このことから、アルカリ（カリウム）の存在がRh微粒子の形成に深く関与していることがわかった。一方、Rh(NO₃)₃溶液を含浸し、乾燥、焼成した後、K₂CO₃溶液を含浸後、乾燥、焼成した触媒K₂CO₃-Rh/SiO₂(SC)（逐次焼成）は、図3(b)に示したように、カリウムを添加していないRh/SiO₂触媒とほとんど変化がないことがわかった。Rh粒子径は比較的大きく、粒子径も均一ではなかった。図4に、粒子径分布の測定結果を示した。

図4(a)に示したように、Rh(NO₃)₃とK₂CO₃の混合溶液をSiO₂担体に含浸（共含浸）したK₂CO₃-Rh/SiO₂(CI)触媒では、Rh粒子径は非常に鋭い分布であることがわかった。数えた微粒子1850個のうち、1395個が1~2 nmの粒子径であり、これは全体のおよそ75%に相当する。また、4 nmを超えるものはほとんどなかった。このことは、Rh(NO₃)₃とK₂CO₃を混合溶液とすることで、溶液のpHが上昇し、Rh錯体の状態が変化したことによるものと考えている^[8]。一方、Rh(NO₃)₃溶液をSiO₂担体に含浸後、一度焼成を行った後、K₂CO₃溶液を含浸し、再び焼成した逐次焼成K₂CO₃-Rh/SiO₂(SC)触媒では、図4(b)に示したように、Rh微粒子の分布は、カリウムを添加していないRh/SiO₂触媒とほとんど同じであった（図2(a)参照）。これは、TEM写真からもわかる

ように、一度焼成した触媒はRh微粒子の粒子径が固定されてしまい、カリウムの添加によって溶け出したりしない、安定な状態になっているものと考えられる。

今回、検討した4種類の触媒のTEM観察結果からRh微粒子の平均粒子径(d_{VA})を求め、分散度(D)を算出した。また、水素吸着量(H/Rh)、CO吸着量測定(CO/Rh)の結果を表1にまとめた。カリウムを添加していないRh/SiO₂触媒のRh平均粒子径は6.2 nmであった。また、この結果から算出した分散度は0.18でRhは低分散であった。また、水素吸着量、CO吸着量はそれぞれ0.14と0.15であった。一般的に分散度(D)とH/Rh、CO/Rhはよく一致するが、この結果も同様であることがわかる。一方、カリウムを添加した触媒では、異なる結果が得られた。逐次含浸法により調製したK₂CO₃-Rh/SiO₂(SI)触媒ではRh微粒子の平均粒子径は2.8 nmでRh/SiO₂触媒に比べると、分散度が0.18 → 0.39と向上していることがわかった。水素吸着量は0.42で分散度にほぼ一致した。しかし、CO吸着量は0.16とかなり低い値を示した。これは、水素は吸着するが、COは吸着できないRhの吸着サイトが存在することを示している。おそらく、Rhとカリウムとの相互作用によりRhの電子状態が変化しているのであろう。一般にCOの金属表面への吸着は、COの5σ軌道の電子が金属に流れ込み、金属のd軌道の電子がCOの反結合性軌道に移行（逆供与）しπ結合を作るというBlyholderモデルで説明できる^[15,16]。カリウムを添加した触媒では、水素吸着量に比べてCOの吸着が抑制されることから、カリウムの存在がRhの電子状態を変化させていると考えられる。ここで、カリウムの添加効果は2つあることを確認しておく。1つは触媒調製時におけるRhの微粒子化であり、もう1つはRh電子状態の変化である。共含浸法により調製したK₂CO₃-Rh/SiO₂(CI)触媒では、Rh微粒子の平均粒子径(d_{VA})は今回用いた触媒中もっとも小さく2.2 nmであった。また、分散度(D)は0.50、水素吸着量(H/Rh)は0.52であったが、CO吸着量(CO/Rh)は著しく抑制され、わずか0.01であった。この触媒は、調製時にRh(NO₃)₃とK₂CO₃を混合溶液として用いることから、Rhとカリウムがより強く相互作用していると考えられる。逐次焼成法により調製したK₂CO₃-Rh/SiO₂(SC)触媒では、Rhの平均粒子径は5.5 nmであり、カリウムを添加していないRh/SiO₂触媒とほぼ同じであった。分散度に対して水素吸着量は、ほぼ一致したが、CO吸着量は0.00であり、著しく抑制された結果となった。（ただし、CO吸着量が完全に0ではなかった。）これは、Rh(NO₃)₃溶液を含浸、乾燥後に焼成したことで、RhはSiO₂担体に固定され、カリウムを添加しても粒子径については、まったく影響を受けなかったと考えられる。また、CO吸着量がほとんどなかったことについては、Rh微粒

表 1. 触媒のキャラクタリゼーションの結果

触媒 ^{a)}	d_{VA} (nm) ^{b)}	D ^{c)}	H/Rh ^{d)}	CO/Rh ^{e)}
Rh/SiO ₂	6.2	0.18	0.14	0.15
K ₂ CO ₃ -Rh/SiO ₂ (SI)	2.8	0.39	0.42	0.16
K ₂ CO ₃ -Rh/SiO ₂ (CI)	2.2	0.50	0.52	0.01
K ₂ CO ₃ -Rh/SiO ₂ (SC)	5.5	0.20	0.18	0.00

a) 500°C水素還元後、b) Rh微粒子の平均粒子径(volume-area 平均^[12, 13]：粒子径の3乗の総和を2乗の総和で除したものの)、c) 分散度(全Rh原子数に対する表面原子数の割合)、d) 全Rh原子に対する吸着水素原子の割合、e) 全Rh原子に対する吸着CO分子の割合。

子の表面のかかなりの部分がカリウムで覆われてしまったためと考えられる。

図 5 に水素中の CO 選択酸化反応活性の反応温度依存性を示した。Rh/SiO₂ 触媒は、90℃から CO 酸化が始まるが、130℃で CO 転化率が 85%になるものの、それ以上反応温度を上げて横ばいであった。酸素転化率をみると、130℃以上で 100%になっており、また選択率は 50%未満であることから、130℃以上で

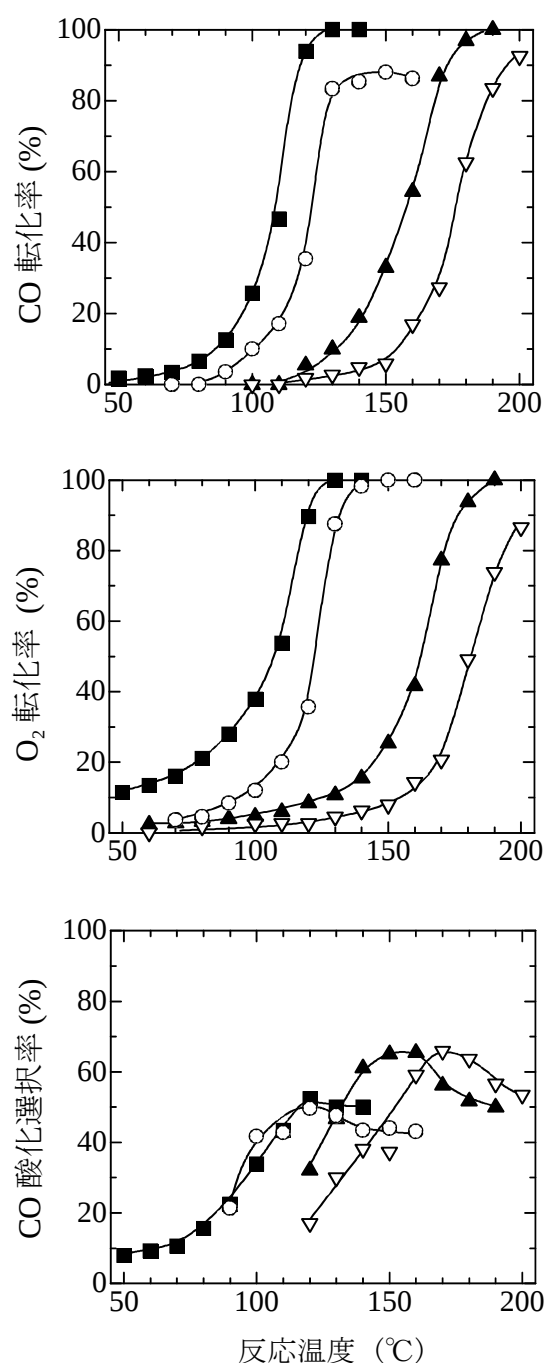


図 5. 水素中の CO 選択酸化反応活性の反応温度依存性

■ : K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI)、▲ : K₂CO₃-Rh/SiO₂ (CI)、
▽ : K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SC)、○ : Rh/SiO₂.

は水素の酸化が優勢となり CO 酸化が起こらないことがわかった。一方、最も高活性を示した触媒は、Rh(NO₃)₃ と K₂CO₃ 溶液を逐次含浸して調製した K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI) 触媒であった。CO 酸化反応は 50℃で始まり、CO 転化率は 130℃でほぼ 100%に到達した。TCD ガスクロマトグラフの検出感度を考慮すると、CO の残存濃度は 10 ppm 以下であることから、この研究の目的である CO 除去がほぼ完全に達成できたと考えられる。酸素転化率は 50℃では 10%程度であり低温領域では水素の酸化が優勢である（選択率が低い）。しかし、80℃付近から選択率は上昇し、130℃（CO 転化率が 100%）では 50%に到達した。（反応ガス組成から、CO が完全に酸化し、残りの酸素がすべて消費した場合、選択率は 50%が最大となる。） Rh(NO₃)₃ と K₂CO₃ の混合溶液を用いて調製（共含浸）した K₂CO₃-Rh/SiO₂ (CI) 触媒では、100℃付近から CO 酸化反応が始まり、130℃では CO 転化率は 10%程度で Rh/SiO₂ 触媒よりも活性は低かった。しかし、反応温度の上昇とともに CO 転化率も上昇し、190℃で 100%に到達した。選択率は 50%に到達した。Rh(NO₃)₃ を含浸後に一度焼成し K₂CO₃ 溶液を含浸し、逐次焼成した、K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SC) 触媒では、活性はさらに低いことがわかった。図には表示していないが、反応温度を 220℃に上げることで、CO 転化率は 100%に到達した。また、選択率は 50%に到達した。以上のことから、カリウムを添加した触媒は活性の差はあるものの、水素過剰雰囲気での微量 CO をほぼ完全に酸化除去できることがわかった。

カリウム（アルカリ）を添加するとなぜ、高活性が得られるかについては、次のように考えている。K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI) 触媒を用いた実験について、CO 酸化反応速度に対する水素分圧依存性、酸素分圧依存性を調べたところ、それぞれ 0.4 次、1.1 次で、いずれも正の次数であった^[8, 17]。このことから、水素、酸素の反応によって生成した表面 OH 種が CO 選択酸化に関与していると考えられる。反応メカニズムの詳細については現在検討中であるが、現段階では図 6 に示したように考えている。まず、触媒である Rh とカリウムとの界面に水素、酸素が解離吸着する。Rh 表面上で生成した OH 種はカリウムによって一時的に保持される。この OH 種と吸着した CO が反応し、中間体を経て CO₂ として脱離する。中間体については、図に示したものであると断定するのは難しく、推測である（反応速度が速いため、触媒表面上での滞在時間が極めて短く、したがって、赤外吸収スペクトルなどの測定が困難である）。一方、カリウムが存在しない Rh/SiO₂ 触媒の場合については、次のように考えられる。Rh 表面上で解離吸着した、水素と酸素が反応して生成した OH 種は、別に解離吸着した水素と直ちに反応し水として脱離する。水素の酸化が優先して起こるため、CO の酸化活性は低いと考

えられる。この表面 OH 種の関与については、担持 Pt 触媒にアルカリを添加した触媒を用いた研究においても、支持されている^[9, 10]。

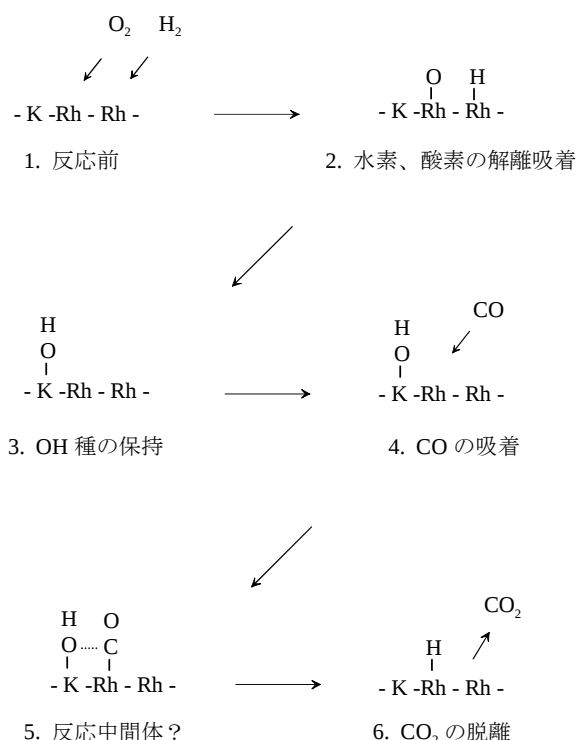


図 6. K₂CO₃-Rh/SiO₂ (SI) 触媒による水素中の CO 選択酸化反応モデル。

4. まとめ

Rh/SiO₂ 触媒にカリウムを添加した触媒は、Rh とカリウムとの相互作用により水素中の CO 選択酸化反応に高い活性を示した。カリウムの添加方法について、逐次含浸法、共含浸法、逐次焼成法の 3 つの方法を検討した結果、活性の序列は以下のとおりであった。

逐次含浸法 > 共含浸法 > 逐次焼成法

最も高活性を示した逐次含浸法による触媒は、透過型電子顕微鏡観察により、特異な構造（“Fish-egg”構造）を持っていることがわかった。Rh 微粒子の粒子径は均一かつ高分散であり、また、カリウムとの相互作用が発現した。この系については逐次含浸法が最適の調製法であるということがわかった。

今回の研究とは別に他の触媒系についても、第二成分を添加する方法として逐次含浸法は、本来の触媒成分の高分散化や第二成分との相互作用の発現が考えられ、高い活性、選択性を持つ触媒の調製が期待できる。

5. 謝辞

透過型電子顕微鏡観察についてご協力いただきました、筑波大学医学系電顕室の大野良樹氏に感謝いたします。触媒反応試験にご協力いただきました、筑波大学数理物質科学研究科、国森・富重研究室の田中久教氏、峯村雄治氏、栗山正俊氏、石田洋一氏に感謝いたします。数学的観点から、ご助言いただきました数理物質科学等支援室の間宮精一氏に感謝いたします。触媒調製の段階からさまざまなご助言をいただきました、東北大学多元物質科学研究所の亀岡聡助教授に感謝いたします。また、ご多忙中にもかかわらず本研究を御指導いただきました筑波大学数理物質科学研究科、富重圭一助教授、国森公夫教授に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] B. Höhle, M. Boe, J. Bøglid-Hansen, P. Bröckrliff, G. Colsman, B. Emonts, R. Menzer, E. Riedel, J. Power Sources 61 (1996) 143.
- [2] B. Rohland, V. Plzak, J. Power Sources 84 (1999) 183.
- [3] M. Iwase, S. Kawatsu, in: Proceedings of the First International Symposium on Proton Conducting Membrane Fuel Cells (1995) 12.
- [4] S. H. Oh, R. M. Sinkevitch, J. Catal. 142 (1993) 254.
- [5] S. Ito, T. Fujimori, K. Nagashima, K. Yuzaki, K. Kunimori, Catal. Today 57 (2000) 247.
- [6] H. Tanaka, S. Ito, S. Kameoka, K. Tomishige, K. Kunimori, Catal. Commun. 4 (2003) 1.
- [7] H. Tanaka, S. Ito, S. Kameoka, K. Tomishige, K. Kunimori, Appl. Catal. A: 250 (2003) 255.
- [8] S. Ito, H. Tanaka, Y. Minemura, S. Kameoka, K. Tomishige, K. Kunimori, Appl. Catal. A: 273 (2004) 295.
- [9] Y. Minemura, S. Ito, T. Miyao, S. Naito, K. Tomishige, K. Kunimori, Chem. Commun. 2005, 1429.
- [10] Y. Minemura, M. Kuriyama, S. Ito, K. Tomishige, K. Kunimori, Catal. Commun. 7 (2006) 623.
- [11] C. Pedrero, T. Waku, E. Iglesia, J. Catal. 233 (2005) 242.
- [12] K. Kunimori, T. Uchijima, M. Yamada, H. Matsumoto, T. Hattori, Y. Murakami, Appl. Catal. 4 (1982) 67.
- [13] J. R. Anderson, Structure of Metallic Catalysts, Academic Press, New York (1975).
- [14] Z. Hu, H. Nakamura, K. Kunimori, Y. Yokoyama, H. Asano, M. Soma, T. Uchijima, J. Catal. 119 (1989) 33.
- [15] G. Blyholder, J. Phys. Chem. 68 (1964) 2772.
- [16] 服部英, 多田旭男, 菊池英一, 瀬川幸一, 射水雄三, あたらしい触媒化学, 三共出版, 東京, 1982.
- [17] 伊藤伸一, 博士論文「担持貴金属触媒における第二成分の添加効果と C₁ 化学反応への応用」(筑波大学), (2005) 175.

水温負荷法による体表温測定を試み

鷲野谷秀夫

筑波大学病院総務部医事課中央診療
〒305-8576 茨城県つくば市天久保 2-1-1

概要

体表温を測定できるサーモグラフィーは、医療分野等で広く利用されている。しかし、サーモグラフィー測定時の状況で、皮膚温は大きく変化し、正確に測定をすることができなかった。そこで、より正確な測定をするため、実験を行い有用な成果が得られたので報告する。

1. はじめに

サーモグラフィーは、人体や動物などから放出される赤外線を計測し、温度分布を画像化する機器である。そのサーモグラフィーは、乳癌等、多くの病変の診断に利用されている。

サーモグラフィーを用いて、体表温度を測定する場合は、測定場所の室温および患者のそれまでに居た周囲温度が、大きくサーモグラフィー画像に影響を及ぼし、常に同一条件で体表温測定をすることは、非常に困難である。また、従来の方法として、同一条件で測定しようとするときは、温度と湿度を常に一定に保つことのできる、恒温恒湿室の設備等が最小限必要条件となる。しかし、このような施設があったとしても、季節的な変動による生体反応などにより、同一条件下での測定は、非常に困難な問題であった。

そこで今回、多くの施設で利用が可能である簡易な保温装置を作製した。その装置は、小さな環境条件をつくり、負荷により測定条件を一定にして、正確な測定を試みるものである。その装置を用いて、測定部位に多少の負荷を与えて、サーモトレーサ 6T67 を用い計測を行った。この実験結果から、体表温測定における環境条件の一定化及び、この実験により得られた知見について検討を行ったので報告する。また、皮膚温に特徴を持つ患者に対して、同様に応用を試みたので報告する。

2. 方法

測定実験には、日本電気三栄のサーモトレーサ 6T67 (図 1) を使用した。恒温装置は、200 W の水中用ヒーター 2 本、電子サーモスタット、温度計を用いた (図 2)。安全性を考慮し、プラスチックのコンテナを用いて、図 2 に示した各機材を取り付けた、水温負荷用の恒温水槽を作製した (図 3)。

実験 1

恒温装置の水槽を 25℃ に設定する。測定する部位である手は、濡れないようにビニール袋に入れて行う。負荷は、ビニール袋に入れた手を、その水槽に



図 1. サーモトレーサ 6T67



図 2. 水中用ヒーターと電子サーモスタット

30 秒間沈めて行った。サーモトレーサによる測定は、負荷をかける前と負荷をした直後、そして、測定する台の上に手を置いたまま動かさずに 30 秒後、1 分後、2 分後、3 分後、5 分後、8 分後の計測を同様に行う。その画像はサーモトレーサ 6T67 の、8 画像メモリ機能を応用して、4 画像のマルチ表示を行い、時間経過における皮膚温の変化について比較検討する。

実験 2

恒温装置の水槽を、30℃ にセットして、実験 1 と同様に測定し比較検討を行う。



図 3. 水温負荷用の恒温水槽

実験 3

恒温装置の水槽を、35℃にセットして、実験 1 と同様に測定し比較検討を行う。

実験 4

水温負荷をかけない例として、実験 1～3 と同様に、測定する台の上に手を置いたまま動かさずに 30 秒後、1 分後、2 分後、3 分後、5 分後、8 分後の計測を同様にを行い、水温負荷をかけた実験と比較検討する。

実験 5

冷え性の女性に対して、実験 1～3 と同様に 25℃、30℃、35℃の水温負荷による測定を行う。そして、同一人物に対する各温度の水温負荷による反応を画像記録して、比較検討を行う。

実験 6

瞬間冷却スプレーを用いて皮膚に負荷を与え、実験 1～5 と同様に測定を行う。そして、水温負荷による反応と比較し、その特徴を検討する。

実験 7

臨床への応用として皮膚科患者に対して、水温負荷を与え実験 1～3 と同様に測定を行い検討する。

3. 結果

実験 1

図 4 は、25℃の水温で負荷をかけた実験結果である。(1) の左上は、負荷をかける前の皮膚温の状態を示し、その下が負荷をかけた直後を示したものであり、まったく異なる画像を示している。そして、右

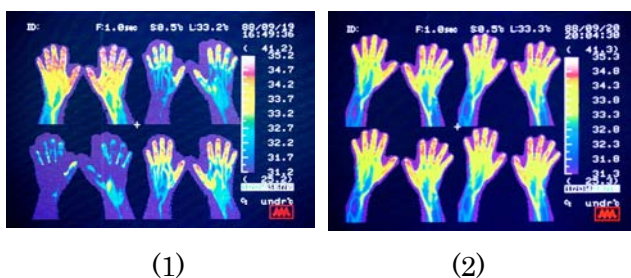


図 4. 25℃の水温負荷実験

上の画像は、30 秒後を示し、右下は、1 分後、次に (2) の左上が 2 分後、左下が 3 分後、右上が 5 分後、右

下が 8 分後を示している。この画像を観察すると、負荷直後は皮膚温低下が大きいことがわかるが、徐々に回復して約 2 分後には、負荷前と同様な温度に戻っている。しかし、3 分後からは、負荷前よりも上昇していることを示している。また、手の各部位を観察すると、まず指先の温度が上昇し、次に、手背の表在性の血管が上昇し、最後に手背全体が上昇していることが観察できる。

実験 2

図 5 は、30℃の水温で負荷をかけた実験結果である。画像を観察すると、25℃の水温負荷同様に約 2 分後には、負荷前と同様な温度に戻っている。しかし、その後は、大きな変化は観察できず、8 分後の測定終了まで、変化のない同様な画像を示している。

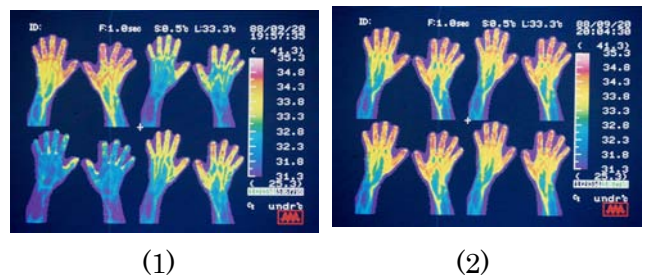


図 5. 30℃の水温負荷実験

図 6 は、35℃の水温負荷で行った症例の実験結果である。(1) の左下の負荷直後の像は、手背全体がほぼ均一に黄色の高い温度を示しているが、前例の 25℃ と、30℃ の負荷同様に (2) 左上の 2 分後には負荷前と同様の皮膚温を示している。また、

その後は、25℃ で行った実験同様に、2 次的な血管拡張を起こし、皮膚温が徐々に上昇している。

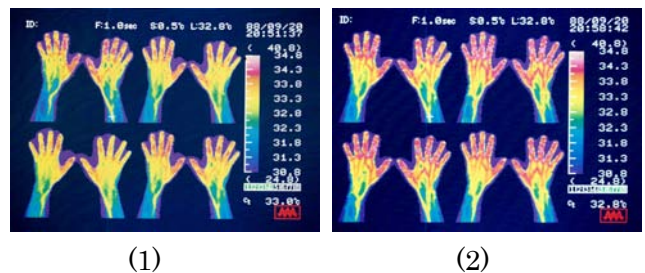
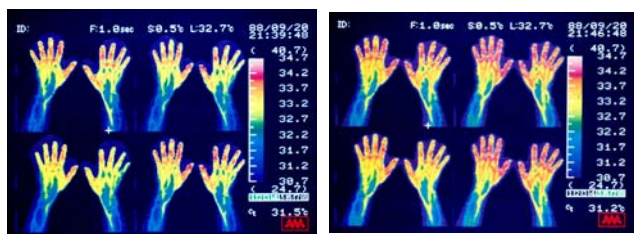


図 6. 35℃の水温負荷実験

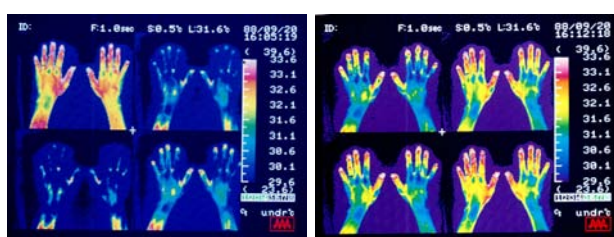
図 7 は、測定する板の上に手を乗せて、水温負荷をかけずに、その直後から 10 分間測定を行った画像である。測定法は、まず椅子に腰を掛けて両手を垂直に下げて、5 分間安静にしてから行った。(1) の左上の図は、板の上に手を置いた直後を示し、その下が 30 秒後、右上が 1 分後、右下が 2 分後であり、右上が 8 分後、右下が 10 分後を示している。直後から 2 分後までは、ほとんど変化はなく、皮膚温は安定している。しかし、(2) の 3 分後の画像では、手背の血管像が観察され、それから 10 分後まで徐々に皮膚温が上昇していることが分かる。



(1) (2)

図 7. 負荷をかけない例

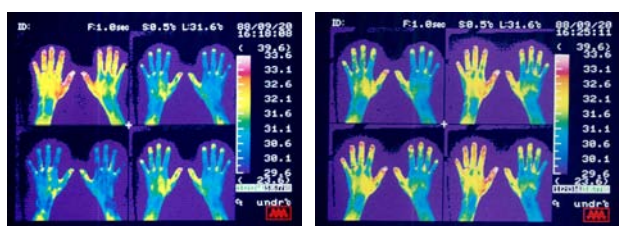
冷え性の女性に対して、各温度の水温負荷の実験を同様行った。図 8 は、25℃の水温で負荷をかけた実験結果である。測定法は、前例同様に直後から 8 分後の測定を行った。この実験では、負荷直後から皮膚温は上昇しているが、8 分経過した後でも負荷前の皮膚温に戻らず、負荷前よりも、皮膚温が戻っていないことが分かる。



(1) (2)

図 8. 冷え性に対する例

図 9 は、図 8 の女性を 30℃ の水温で負荷をかけた実験結果である。この画像を観察すると、25℃ の水温負荷同様に徐々に皮膚温は上昇しているが、8 分後でも元の温度に戻っていないことが分かる。また、(2) の右下で示された 8 分後の画像では、左手に比較して右手の温度が上がらず、左右の反応が同一でないことを示している。

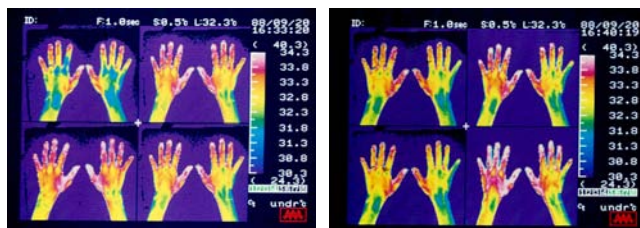


(1) (2)

図 9. 30℃の水温負荷

図 10 は、前例の女性の 35℃ の水温負荷による測定結果である。この画像は、前例の 25℃、30℃ の反応とは異なり、負荷直後の温まった手背が徐々に冷えていき、2 分後には負荷前に近い状態に戻っていることが観察できる。しかし、(2) に示されるように手背の皮膚温は、3 分後から 8 分後まで上昇を示して、

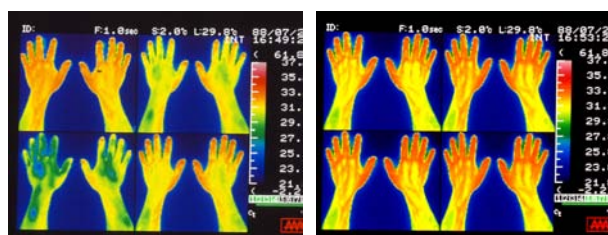
一回下がった皮膚温が、また上昇する特異な反応を示した。



(1) (2)

図 10. 35℃の水温負荷

次に、スポーツの際の怪我などに用いられる瞬間冷却スプレーを使用して、同様な実験を行った。図 11 は、瞬間冷却スプレーを約 10 cm の位置から 3 秒間スプレーをして、手背に負荷を与え、前例同様に計測を行った画像である。スプレーによる方法は、計測部位前面を、均一に負荷することは難しく、(1) の左下の画像に示されるように、スプレー直後には、冷却ムラが多く見られる。しかし、この冷却ムラは、1 分後から 8 分後までの画像では観察できず、一様に皮膚温が上昇している。これにより、不均一な負荷を与えても、水温負荷同様な結果が得られ、多少のムラがある負荷でも測定が可能であることが分かる。



(1) (2)

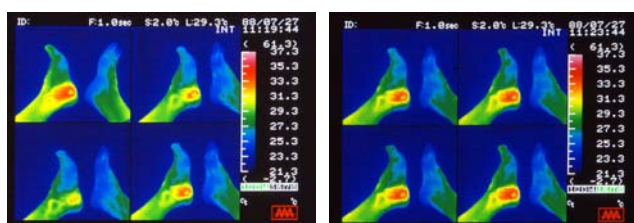
図 11. 冷却スプレーの負荷



図 12. 臨床診断メラノーマの臨床写真

図 12 は、皮膚科患者の臨床写真であり、臨床診断は、メラノーマである。図 13 は、図 12 に示した両

足を 25℃で 30 秒間負荷を与えて、6 分間の測定を行ったサーモグラフィー画像である。測定時間は、負荷前と負荷直後から 6 分後まで計測した。また、右足及び左足の正常部位の皮膚温が 25℃であったため、同様な水温で負荷を与えた。(1) の左下に示された負荷直後の画像は、負荷前と比較して足の裏全体が一樣な皮膚温を示している。そして、正常部位と病変部位は、正常部位が 6 分経過した後も、ほとんど変化していないのに対し、病変部位は急激に上昇し、6 分後には負荷前の皮膚温に戻っていることが観察できる。



(1) (2)

図 13. 30℃の水温負荷

4. 考察

サーモグラフィーによる体表温測定は、以前から医学分野で行われてきた分野ではあるが、測定する環境や測定方法等により一定化することは非常に難しく、また個人差もあるため、正確なデータを作成することは困難であった。そこで、測定する部位に、一定の負荷をかけてから、その後決まった時間に測定すれば、正確な情報が得られるものと考え実験を行った。しかし、測定する部屋の気温や、それに用いる台の温度などの環境の差においても、測定値は変化してしまい、安定した値を得ることが難しかった。

サーモトレーサ 6T67 には、時間経過を観察できるメモリ機能があるため、皮膚温の変化を詳細に記録することができた。そして、今回使用した恒温水槽は、丈夫で安全なコンテナを用い、電子サーモスタットと水中用ヒーターを用いたが、非常に正確な温度管理ができ、熱帯魚等の飼育のために作られたものなので、長時間の使用が可能であった。

従来の水温負荷は、冷水負荷が多く、4℃や 15℃に設定することが多かったため、痛みを訴える場合が多かった。しかし、今回行った温度は、25℃が環境温、35℃が皮膚温、そして 30℃はその中間温として設定し、もっとも身近に感じる温度を設定したため、患者に負担を掛けることは少ないと考える。

水温負荷の各実験では、血管の反応を示しやすい指先が先ず上昇していることから、水温負荷により二次的な血管拡張を起こして、皮膚温が上昇することが考えられる。また、この血管反応は、体温に近い軽度の負荷であっても、水の中に入れた際の圧迫や測定部位の位置の移動などによっても皮膚温が上昇することが分かった。そして、水温負荷をせずに行った実験では、測定に用いた台の上に手を乗せただけで皮膚温が上昇し、負荷をかけなくても皮膚温は変化した。これは、測定に用いたベニヤ板の台と、

手の温度に差があったため、生じたと考える。その熱伝導の差異により、手の平は冷刺激を受けて、二次的な血管反応を起こして皮膚温が上昇したものと考える。

冷え性の女性に対して行った実験では、25℃と 30℃で 8 分経過した後も負荷前の皮膚温に戻らず、二次的な血管反応も認められなかった。この結果から、冷え性の症状を持つ患者に対しては、皮膚温に近い水温負荷である軽度の温度刺激では、二次的な血管反応が起きにくいことが考えられる。しかし、35℃の体温に近い温度の実験結果では、皮膚温上昇を示す画像が得られ、冷え性の症状を持つ患者に対しては 35℃以上でなければ、二次的な血管拡張が起きにくいことが分かった。

瞬間冷却スプレーを用いた実験では、測定部位を一樣に刺激しなくても、1 分ほどの時間が経過すれば、同様な測定が可能なが分かった。これは、強力な冷刺激により、血管が急に拡張したために皮膚温が上がったと考える。

皮膚科患者の測定では、足が常に多種多様な負荷を受けているために、二次的な血管拡張がしにくく、健常部位の画像では大きな変化は観察されなかった。しかし、病変部位は異常に温度が高く、健常部位と比較して、負荷を与えてから負荷前の温度に戻る時間も非常に早かった。

5. まとめ

通常の部屋で使用できる簡易な恒温装置を作成して、測定部位に保温や冷却等の負荷を与えて実験を行った。その結果、多くの知見が得られ、有用なデータを得ることができた。しかし、サーモグラフィーの測定値は、測定する環境や測定方法で大きく変化するため、測定環境を統一することは、たいへん重要と考える。また、負荷に対する反応に個人差があるため、負荷温度の設定は非常に難しく、特に冷え性の患者には、注意が必要である。今回の実験では、負荷後の二次的な血管拡張による温度変化が大きく作用したことから、今後多くの症例に対して観察を行えば、有用なデータを得る可能性が示唆された。

今後は、皮膚温に特徴のあるレイノー症などの患者や、多くの病変に対して水温負荷によるサーモグラフィーの観察を行えば、病状を管理する上で貴重な資料となり、また多くの新知見が得られるものと期待される。

6. 謝辞

本報告にあたり、ご指導ならびにご助言をいただいた人間総合科学研究科の宮本俊和助教授に、感謝いたします。

類別式としてのオイラー標数について

間宮精一

筑波大学数理物質科学等支援室（物性・分子工学専攻）

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

私が常々興味を抱いているものの一つをここに紹介する。それは、高等数学でありながら、その導入部分は日常生活に見られる簡単な図形で始まり、又、式は 3 つの整数の和と差だけしか出てこない、このアンバランスさに大変好奇心を掻き立てられた。何故だろう？こんなことから何が導き出されるのだろうか？これがこの理論を学ぶ切っ掛けとなった。

私たちは、中学校で図形の合同と相似について学習した。日常生活において前者は紙幣のように全く同じものと、後者は獲物が遠くから近づいてくる時、同一の物であると認識することに対応している。

更に、これから示すことは、図形の構造的な違いだけに重点を置いた類別についてである。具体的には顔の表情が刻々と変化していても、同一人物であると認識することに対応している。

オイラー標数 $\chi(R) = (\text{頂点の数}) - (\text{辺の数}) + (\text{面の数})$ を使うと、比較的簡単にある特徴を持つ図形の類別が出来る。例えば、2 次元凸多角形の場合、オイラー標数 $\chi(R) = 1$ となる、そして 3 次元凸多面体の場合、オイラー標数 $\chi(R) = 2$ となる。このように、具体的に図形の頂点、辺、面の数を式に代入するだけで不変的な量が得られる（図 1）。

このような解り易い形態で不変量と類についての関係が見られることは稀なことである。

この事実はオイラーにより発見された。そして、ポアンカレが群の理論を導入し、オイラー標数は n 次元まで拡張されオイラー-ポアンカレの公式として表された。これがホモロジー論と呼ばれているものである。ここでホモロジー論について簡単に述べると、ある図形の面、辺、頂点それぞれ別々に数式化し、面と辺、辺と頂点それぞれの間に境界（変換）を定義する（図 2）。この定義により面の境界が辺の集合に対応され、辺の境界が頂点の集合に対応され、更に両者の関係が明らかになる。

そして、それぞれの群について適切な演算を行えば有効な利用が出来る。

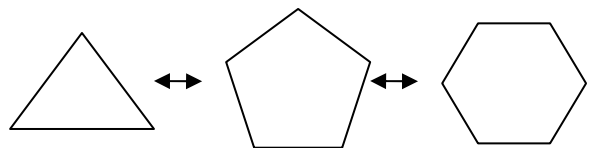
全体を大きく俯瞰（ふかん）すれば、定義が厳格でなく緩くなればなるほど図形の仲間が増えることが分かる。

ここでは、群の知識を使わず、初等数学でオイラー標数（3 次元凸多面体）について証明し、球に対しても成立することを示す。シュタイナーの証明など

いろいろな方法があるが、ここではルジャンドルの証明を用いる。

このホモロジー論の応用として、半導体の回路設計、ホモロジー解析（ホモロジーモデリングにより立体構造が知られていない蛋白質の構造を予測できる）、ホモロジー検索、ホモロジー類を計算することによって物体の形状の特徴を掴むことが出来る。

$$\chi(R)=1$$



$$\chi(R)=2$$

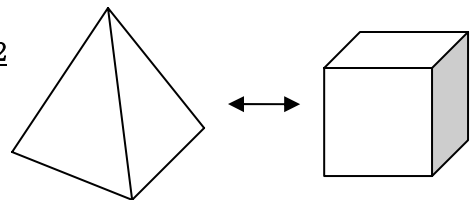
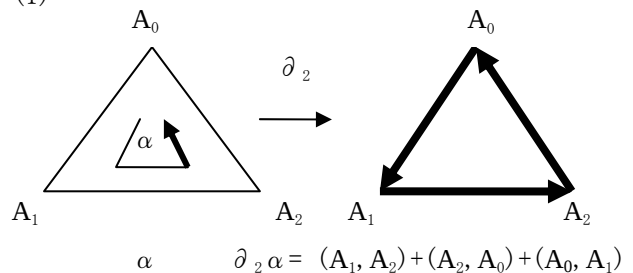


図 1. オイラー標数の等しい図形の例

(1)



(2)

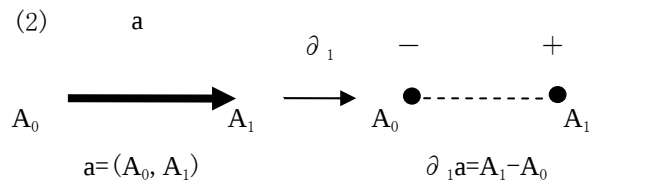


図 2. 境界（変換）

- (1) 方向付けられた面 α から方向付けられた辺 $\partial_2 \alpha$ への変換.
- (2) 方向付けられた辺から方向付けられた頂点 $\partial_1 a$ への変換.

1. はじめに

オイラーの定理(3次元凸多面体)について証明する。

オイラーの定理

Γ を空間 $E^{(3)}$ 内の任意の凸多面体とする。

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \cdots \Gamma \text{ の頂点の個数} \\ \mu \cdots \Gamma \text{ の辺の個数} \\ \nu \cdots \Gamma \text{ の面の個数} \end{array} \right\} \quad (1)$$

とおくと、そのとき

$$\lambda - \mu + \nu = 2 \cdots (2)$$

が成り立つ

オイラーの定理を証明するために次の準備をする。

補題 1

球面三角形 ABC において、その面積を $\triangle ABC$ で表すとき

$$\angle A + \angle B + \angle C = \triangle ABC + \pi \cdots (3)$$

補題 1 の証明

S を半径 1 の球面とする。一般に、この球の中心を通る平面によって球面を切って得られる球面の切り口を大円という。二つの大円のなす角 θ は、図 3 によって定義される。球面 S 上で、3 個の大円によって囲まれた部分を球面三角形という (図 4)。

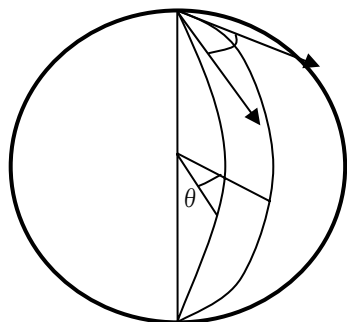


図 3. 二つの大円のなす角 θ

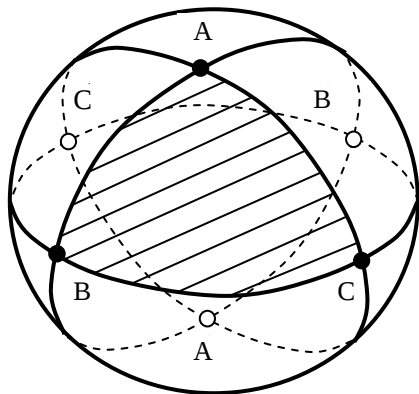


図 4. 球面三角形

弓形の部分の面積 α

$$\alpha = (\text{球の表面積}) \times \theta / (2\pi)$$

$$= 4\pi \times 1^2 \times \theta / (2\pi) = 2\theta \cdots (4)$$

$$2\angle A = \triangle ABC + \triangle ACB \cdots (5)$$

$$2\angle B = \triangle ABC + \triangle BAC \cdots (6)$$

$$2\angle C = \triangle ABC + \triangle CBA \cdots (7)$$

ここで (5)+(6)+(7) より

$$\begin{aligned} & 2(\angle A + \angle B + \angle C) \\ &= 3\triangle ABC + \triangle ACB + \triangle BAC + \triangle CBA \\ &= 2\triangle ABC + \triangle ABC + \triangle ACB + \triangle BAC + \triangle CBA \\ &= 2\triangle ABC + 2\pi \quad (\text{下線部分は半球の表面積}) \end{aligned}$$

$$2(\angle A + \angle B + \angle C) = 2\triangle ABC + 2\pi$$

$$\angle A + \angle B + \angle C = \triangle ABC + \pi$$

となり補題 1 を得る。

補題 2

球面凸 n 辺形 $A_1 A_2 \cdots A_n$ において、その面積を $\square(A_1 A_2 \cdots A_n)$ で表すとき (図 5)

$$\angle A_1 + \angle A_2 + \cdots + \angle A_n = \square(A_1 A_2 \cdots A_n) + (n-2)\pi \cdots (8)$$

補題 2 の証明

球面凸 n 辺形 $A_1 A_2 \cdots A_n$ は、球面三角形 $(n-2)$ 個に分割される。

補題 1 を $(n-2)$ 個の球面三角形に適用し、その和をとれば、補題 2 が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \angle A_3 A_1 A_2 + \angle A_1 A_2 A_3 + \angle A_2 A_3 A_1 = \triangle A_1 A_2 A_3 + \pi \\ \angle A_4 A_1 A_3 + \angle A_1 A_3 A_4 + \angle A_3 A_4 A_1 = \triangle A_1 A_3 A_4 + \pi \\ \angle A_5 A_1 A_4 + \angle A_1 A_4 A_5 + \angle A_4 A_5 A_1 = \triangle A_1 A_4 A_5 + \pi \\ \vdots \\ \angle A_n A_1 A_{n-1} + \angle A_1 A_{n-1} A_n + \angle A_{n-1} A_n A_1 = \triangle A_1 A_{n-1} A_n + \pi \end{array} \right.$$

$$\angle A_1 + \angle A_2 + \cdots + \angle A_{n-1} + \angle A_n = \square(A_1 A_2 \cdots A_n) + (n-2)\pi$$

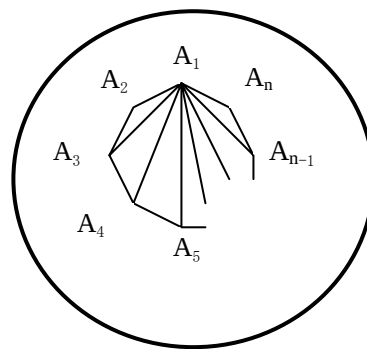


図 5. 球面凸 n 角形

オイラーの定理の証明(ルジャンドルの方法)

与えられた凸多面体 Γ の内部に 1 点 O を取る。

O を中心として、半径 1 の球面 S を作る。

Γ の表面上の各点 P に対して OP を結ぶ半直線を作り、これと S との交わりを Q とする。

この写像

$$\phi : P \rightarrow Q$$

を Γ の表面から球面 S への射影という。

射影 ϕ によって、 Γ の辺は S 上の大円の弧に写像される。かくして、 Γ の表面の射影として、球面 S の球面凸多角形への分割 Δ を生じる(図 6)。

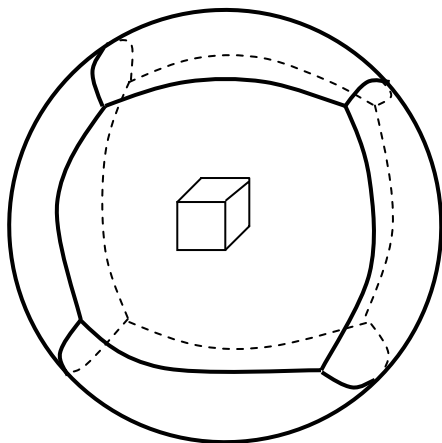


図 6. 六面体の球面への射影

特に、 Γ が凸多面体であることから Γ の頂点、辺、面が射影 ϕ によって球面の分割 Δ の頂点、辺、面にそれぞれ一対一に対応する。したがって Δ の頂点、辺、面の個数も、やはり λ, μ, ν である。球面の分割 Δ において、その面(球面多角形)を

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\nu$$

とし

$$\alpha_i \text{ の頂点を } A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{i n_i}$$

$$\alpha_i \text{ の辺を } a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i n_i}$$

とおく。

Δ における一つの頂点は、幾つかの面 α_i の頂点として重複して数えられ、また、 Δ における一つの辺はちょうど二つの面 α_i, α_j の共通の辺として二重に数えられる。

式(8)を α_i ($i=1, 2, \dots, \nu$) について作り

$$\angle A_{i1} + \angle A_{i2} + \dots + \angle A_{i n_i} = (\alpha_i \text{ の面積}) + (n_i - 2) \pi \quad \dots (9)$$

これを $i=1, 2, \dots, \nu$ について辺々加え合わせる。左辺の和 $\sum \sum \angle A_{ij}$ を加え合わせる順序を変えて、まず Δ の各頂点について加えれば、 2π となり、全体で λ 個の Δ の頂点について総和すれば

$$\sum_{i=1}^{\nu} \sum_{j=1}^{n_i} \angle A_{ij} = 2\lambda \pi \quad \dots (10)$$

を得る。右辺において

$$\sum_{i=1}^{\nu} (\alpha_i \text{ の面積}) = \text{球の表面積} = 4\pi \quad \dots (11)$$

また、 Δ の各辺は 2 度ずつ数えられるのであるから

$$2\mu = \sum_{i=1}^{\nu} n_i$$

となり、したがって

$$\sum_{i=1}^{\nu} (n_i - 2) \pi = (2\mu - 2\nu) \pi = 2(\mu - \nu) \pi \quad \dots (12)$$

を得る。よって(10)(11)(12)より

$$2\lambda \pi = 4\pi + 2(\mu - \nu) \pi$$

$$\lambda = 2 + \mu - \nu$$

$$\therefore \lambda - \mu + \nu = 2 \quad (\text{証明終})$$

2. つぎに

球に対してもオイラーの定理が成り立つことを示す。

第一段として、凸多面体として正四面体を選んで、前章で示した球面への射影をとると、正四面体の正三角形が球面三角形に変換される(図 7)。

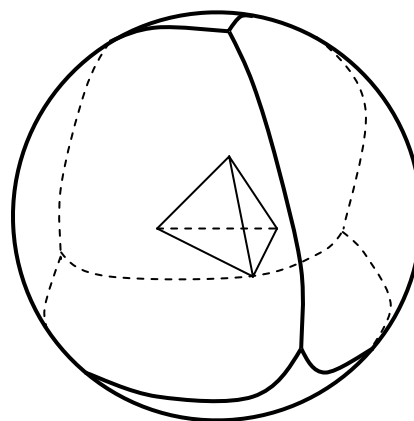


図 7. 正四面体の球面への射影

それぞれの球面三角形を分割する。まず、球面三角形 ABC 内に頂点 O を置き、辺 AB, BC, CA の中点を D, E, F とし、頂点 O から頂点 A, B, C, D, E, F に大円の弧となるように結ぶ。これで球面三角形は 6 分割される(図 8)。

そして、この球面分割を球に内接する凸多面体に変換するために、すべての頂点はそのまま球面上に置き、球面上の各辺と面に対応するように内接凸多面体を作る。これで球に内接する凸 24 面体を得る。

第二段として、この凸 24 面体を第一段と同じように球面へ射影し球面を 24 個の球面三角形に分割する。それぞれの球面三角形を第一段のように 6 分割し、球に内接する凸 144 面体を得る。

このような操作を n 回繰り返しても球に内接する凸多面体であるのでオイラーの定理よりオイラー標数は 2 となる。この操作をさらに $n \rightarrow \infty$ すると、この凸多面体は球に限りなく近づくので、球についてもオイラー標数は 2 となることを示せた。

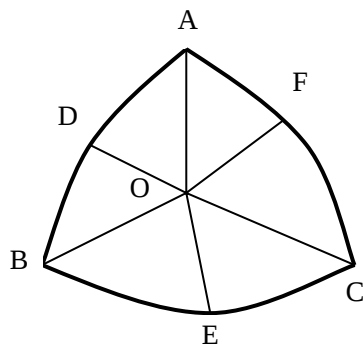


図 8. 球面三角形の分割

3. まとめ

これは、今年度、大学に於ける社会貢献事業として中学生を対象にした夏休み自由研究お助け隊に参加したときの課題について報告したものである。

これまでオイラーの定理の証明とそれが球に対しても成り立つことを示したが、これに興味を持たれて更に知識を深めたい方は、多様体論に進むと良いと思います。その際、集合論、特に群論についての知識があるとその理解は飛躍的に速くなります。そして読者が、これを良き道具として使いこなし多くの利益を得ることを期待しています。

参考文献

- [1] 河田敬義. 位相数学 基礎数学講座 21 巻, 共立出版株式会社 (1976) 1-129.

Webmail IMP の日本語化

木村博美

筑波大学 研究基盤総合センター（応用加速器部門）

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

IMP は horde.org がオープンソースで開発している web アプリケーションの一つです。私の職場では 2001 年頃に自分自身が学外から学内のメールサーバーにアクセスする必要から IMP version 2 を導入しました。この時、IMP は別の人 (trustbee.com) によって既に日本語化はされていましたが、その後はあまり更新されなくなってしまうため、PHP の勉強を兼ねて、自分で日本語化の作業を始めました。

作業の成果は私のホームページ (<http://www.tac.tsukuba.ac.jp/~hiromi/>) で公開しています。

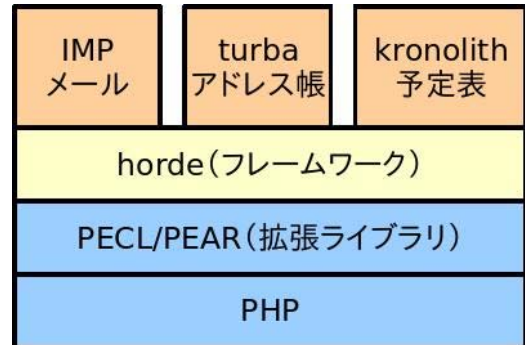


図 1. IMP の構造

1. IMP について

IMP は図 1 に示すように horde というフレームワーク上で動くアプリケーションであり、IMP 単体でも使用できますが、アドレス帳 (turba) や予定表 (kronolith) など他のアプリケーションと組み合わせ使用することができるようになっています。そして、個人毎の情報管理だけでなくグループウェアとしても使用できるように設計されています。ただし、別途 SQL サーバと IMAP サーバが必要です。

図 2 は現在私の職場で使用している最新版の IMP で、メールフォルダー内のメール一覧を表示した画面です。この画面左端に並んだアイコンをクリックすることで、他のアプリケーションや設定画面にワンタッチでアクセスできるようになっています。

2. 計算機環境

サーバ OS には以前から FreeBSD を使用しており、現在は 6.1-RELEASE で運用しています。Web サーバには apache-2.2.3 と PHP5.1.6 を使用しています。

IMP をインストールするためには、PHP の拡張ライブラリである PECL/PEAR モジュールを 10 個程度インストールしておく必要があります。そして horde をインストールし、次に IMP をインストールするという手順になります。この手順が FreeBSD ならば ports からインストールすれば、ほとんど make 一発で済んでしまいます。

作業は直接 サーバ上の php ファイルを編集して、ブラウザから結果を見るというやりかたで、不具合の原因箇所を探る際には print 文を挿入するという原始的な方法で行っています。

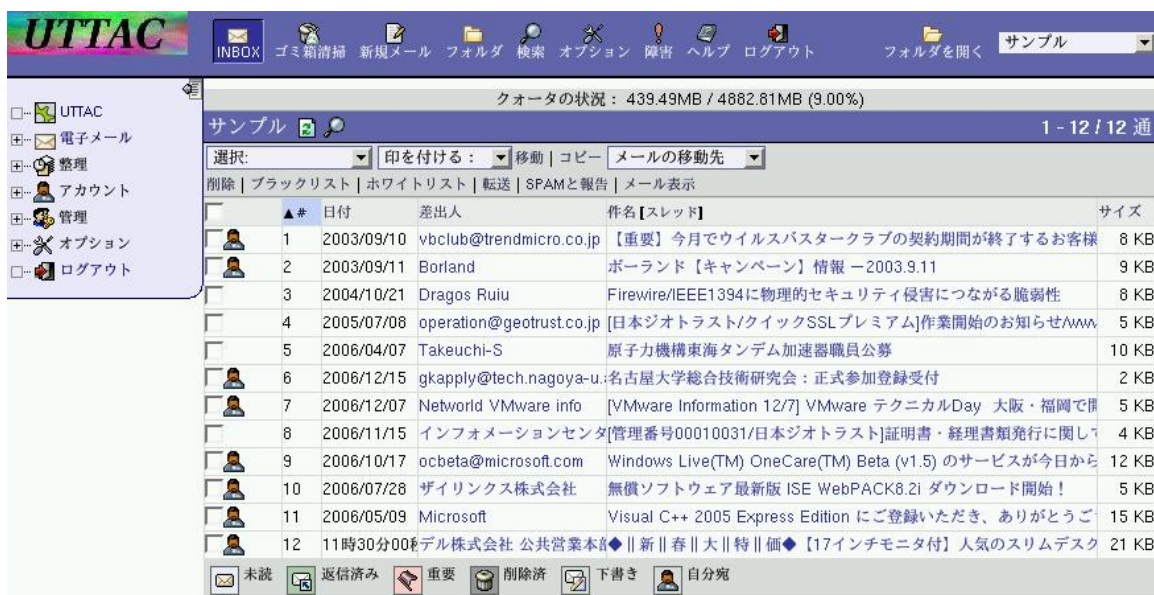


図 2. メール一覧表示画面

3. 経過

2003年2月に trustbee.com から IMP 3.1 の日本語版が公開されました。その時点では職場では未だ IMP 2 を使用していましたが、更新に備え、2003年10月から自分で IMP 3.2.2 の日本語化作業を開始しました。といっても、ほとんど IMP 3.1 のパッチを適用し、翻訳を更新した程度です。そして職場のサーバを IMP3 に更新し、その後はオリジナルの更新に合わせて IMP3 の日本語化作業を2005年11月まで行いました。

一方、2004年には IMP4 のテスト版が公開されたため、12月から IMP4 用の翻訳を開始しました。そして、2005年2月に IMP4.0 が公開されたので、日本語化の作業を開始しましたが、作業用サーバの障害等により中断し、作業を再開したのは2006年6月からでした。

IMP4 では文字エンコーディングに UTF-8 を優先的に使用するようになったため、パッチを一から作り直しました。2006年10月からは職場でも IMP4 を運用しています。

また、メール以外にもアドレス帳、予定表、メモなどのアプリケーションとの連携も強化されたので、それらの日本語化作業もするようになりました。図3はアプリケーションの一つ、予定表の画面です。



図3. 予定表画面

4. 作業内容

4.1 メッセージの翻訳

日本語化の第一歩はメッセージの翻訳です。翻訳すべき文字列はバージョンが上がる度に増えて現在では horde と IMP 合計で約 3000 行ありますが、IMP3 からはメッセージの処理に gettext¹ が使用されるようになったので、更新の手間はかなり少なくなりました。

メッセージは図4のように1つのファイルにまとまっているので、msgid の文字列を翻訳し、msgstr に記入していきます。

翻訳がひと通り終わったら、単純な翻訳ではメッセージの意図が伝わらない場合があるので、実際に画面に表示させて確認します。また、文字の長さが変わることによってレイアウトがずれてしまうこともあるので、その修正も行います。例えば、Import/Export は普通「インポート/エクスポート」と翻訳しますが、文字幅が倍近くになってしまいますので、代替案として「イン/アウト」を使用しています。

4.2 ブラウザへの対応

IMP 3 当時のブラウザは Unicode 対応が遅れていたために、言語毎に文字コードを固定して表示する方法を採用していました。言語に日本語を選択すると、英語以外の海外からのメールは文字化けしてしまい

```
#: framework/Form/Form.php:2387
#, php-format
msgid " (%s days ago)"
msgstr " (%s 日前)"

#: framework/Horde/Horde.php:1362
#, php-format
msgid " (Accesskey %s)"
msgstr "アクセスキー %s"

#: framework/Form/Form.php:2395
#, php-format
msgid " (in %s days)"
msgstr " (%s 日の内に) "
```

図4. メッセージファイルの一部

ましたが、多くの環境で日本語を表示することができました。

この時、日本語の文字エンコーディングには EUC-JP を使用するのが最善であることは日本人には知られていたのですが、horde.org に最初に日本語訳を登録した人が日本人でなかったためか、SHIFT-JIS で登録されていました。そこでパッチでは EUC-JP を使用するようにしていました。

IMP 4.1 では Unicode の UTF-8 エンコーディングを使用するようになり、日本語以外のメールも正しく表示されるようになりました。しかし残念ながら古いブラウザでは逆に文字化けするようになってしまいました。幸い firefox が色々な OS で使用できるので、古いブラウザを使っている人には、firefox を勧めています。

4.3 日本語メールへの対応

日本語メール送信時には JIS (iso-2022-jp) に変換する処理は最初から入っていましたが、ヘッダ (From, To, Subject) の日本語を mime エンコードする処理が入っていませんでした。その点は horde.org に知らせたのですが未だに直っていないので、パッチで解決しています。

また、IMP 以外のアプリケーションから通知のメールを送る機能があるのですが、そのメールは

¹ <http://ja.wikipedia.org/wiki/Gettext>

UTF-8 で送られてしまうので、やはりパッチで解決しました。

添付ファイル名が日本語の場合、ファイルを保存した時、ブラウザによってはファイル名が文字化けします。MSIE はファイル名を SHIFT-JIS で指定しなければなりません。Safari はどんなエンコーディングでも文字化けしてしまいますが、奥村先生のホームページ²に拠れば、PATH_INFO で渡せば良いということなので、試してみたのですが未だ成功していません。

また、添付ファイル名の中に空白、タブ、丸数字などがあるとブラウザによって保存の際の挙動が異なります。Firefox では保存したつもりでも保存されないことがありますので、それらの文字を排除するようにパッチで対応しました。

4.4 OS への対応

IMP4 になってから、日本語が所々で文字化けするようになりましたが、ある時 FreeBSD 特有だと気付きました。

```
$jstr = "¥xe7¥xa0¥x94";/*UTF-8 の研*/
setlocale(LC_ALL,"C");
print preg_match('/¥s/', $jstr) . ", ";
setlocale(LC_ALL,"en_US.UTF-8");
print preg_match('/¥s/', $jstr) . "¥n";
```

この文字列中の空白を検出する PHP コードを実行すると、Linux では "0,0" となりますが、FreeBSD では "0,1" となってしまいます。原因は、FreeBSD では UTF-8 locale の ctype データに Unicode のプロパティデータを使用しているからです。そのファイルの中で、

```
SPACE      0x0085  0x00a0
```

と定義されているので、2つ目の preg_match() が日本語文字中の 0xa0 に一致してしまうのです。もちろん preg_match で '/¥s/u' と UTF-8 であることを指定すればそうはなりません、実際のコードでは必ずしも UTF-8 の文字列が渡されるとは限らないので、そうすることはできません。そこで、locale を設定する時に

```
setlocale(LC_CTYPE,"C");
```

というコードを挿入することで回避しています。

5. 今後

管理者の設定画面 (図 5) やヘルプ画面の翻訳をしていますが、日本のユーザを増やすためには必要だろうと思います。また、未解決の問題がいくつかあるので、時間をみつけて解決したいと思います。更に、パッチを整理し、horde.org に取り入れてもらえるように努力したいと思っています。

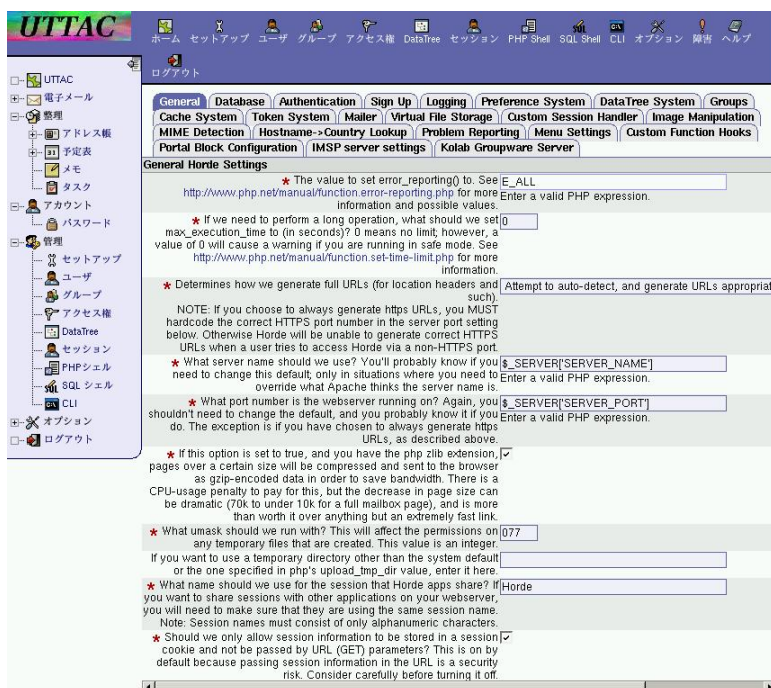


図 5. 管理者用設定画面

² <http://oku.edu.mie-u.ac.jp/~okumura/php/filename.php>

Maestro3 クラスタネットワーク用基板の設計

小野雅晃

筑波大学システム情報工学等支援室（装置開発班）

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

クラスタ型コンピュータ向けネットワーク Maestro3 用のプリント基板を設計し製作した。本報告では Maestro3 用プリント基板を設計、作製するための手順について述べる。プリント基板の使用部品の選定、回路図の作成、プリント基板のパターン設計、多層プリント基板の作製方法について詳述し、今回作製した 2 種類のプリント基板の構成を紹介する。

1. はじめに

筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻の和田研究室では、クラスタ型のコンピュータに使用するために、高速、高機能のアドイン・カード及びスイッチから構成される通信システムを開発している。

第 1 期には、200Mbps の IEEE1394 (i-LINK) を使用した第一世代の通信システム Maestro1 を開発した。次に、第 2 期には Maestro2^[1, 2] として第 2 世代の通信システムを開発した。

今回開発した 2 種類の基板は第 3 世代の Maestro システムとして開発されたものである。Maestro2 は FPGA (Field Programmable Gate Array) の回路をすべてスクラッチから作成したため、回路の設計およびシミュレーションの工程を経て動作のテストをするまでにかかなり時間がかかってしまった。Maestro3 は Maestro2 のアップバージョンとして基本構成はほとんど同一ではあるが 2 倍の性能を得ることを目標にして設計された。現在は Maestro2 の回路を今回使用した部品に適合するように変更してハードウェアテストを実行している。

Maestro3 の構成の概要を説明する。Maestro3 は、ネットワークインターフェース (NI) とスイッチボックス (SB) の 2 つの基板で構成される。NI はパーソナルコンピュータ (PC) の PCI-X バスに挿入して使用する基板である。NI は、片方向 6.4Gbps の LVDS (Low Voltage Differential Signalling) で SB の 1 つのポートに接続される。SB は最大 7 個の NI と LVDS で接続することができる。SB は NI から送られた通信パケットをルーティングする基板である。2 つの基板はクラスタコンピューティングに使用され、PC で計算したデータなどを他の PC に高速に伝送することが出来る。

今回の報告では Maestro3 用基板を作る際の使用に基づいた部品の選定、回路設計など基板の作製過程を説明し、Maestro3 の構成について報告する。

2. 一般的な基板の作製手順

一般的な基板の作製手順を以下に示す。

(1) 要求仕様を決定する。例えば “ホストのパーソナルコンピュータとのインターフェースに PCI-X の 133MHz を使用し、伝送線路には LVDS の伝送周波数 1GHz を使用する” などの仕様を決定する。

(2) 仕様に合致した使用部品を選定する。インターネットの検索や規格表などを使用して要求仕様にあった部品を選定する。

(3) 選定した部品の部品表を作成する。部品を選定後に、部品を購入可能かどうか調査し購入する。

(4) 部品表の作成と並列して、回路を検討し回路図を描き始める。

(5) 回路図が出来上がったら、プリント基板のパターンを設計する。

(6) パターンを設計しながら、高速信号については伝送線路シミュレーションを行い、波形品質を確認する。

(7) パターン設計終了後に、プリント基板を製造して部品を実装しハンダ付けする。

(8) 基板完成後の検査を行う。

今回はプリント基板のパターン設計、高速信号の伝送線路シミュレーション、プリント基板の製造、プリント基板への部品の実装、ハンダ付けは業者に依頼した。

研究室ではそれ以外の部分を担当した。筆者は部品の選定、部品のテスト、回路の検討を担当した。回路図の作成は青木圭一氏¹、部品表の作成は丸岡大記氏¹が担当した。

第 3 章から第 6 章では一般的な基板の作製手順について説明する。

3. 使用部品の選定

基板の使用部品を決定する際に、使えそうな部品のデータシート、ユーザズマニュアルに一通り目を通して、Maestro3 の仕様に準拠できるかを検討した。今回、目を通したマニュアル、データシート及びアプリケーションノートは 1000 ページ以上であった。次に、仕様を満たした部品が購入可能かどうかを検討する。その結果、部品がどこからも購入できない場合は再度部品の選定をやり直す。その過程を以下に詳しく述べる。

3.1 大学の研究室で基板を作製する場合の部品の選定について

大手メーカーのように購入数が多い場合は部品の入手は比較的簡単と思われるが、大学の研究室では購入数が少ないため、部品の購入が難しい場合がある。部品を販売する代理店が対応してくれない場合も多々ある。特に高性能プロセッサや特定用途 IC、電源用部品などの購入が難しい。汎用の SDRAM

¹ 筑波大学 システム情報工学研究科

(Synchronous Dynamic Random Access Memory) などモジュールでは購入が容易であるが、チップとなるとなかなか購入が難しい。今回 SDRAM は電源電圧が 2.5V のものを選定したため、最も購入に苦労した部品である。

3.2 部品の選定例

部品の選定、購入の一例として、電源の選定について説明する。電源は Maestro2 の時にはシリーズパスレギュレータを使用していた。シリーズパスレギュレータは回路が簡単で確実に動作するという利点がある。一方、電力の損失が大きく大電流での使用には向かないという欠点がある。Maestro3 では電流量の増加が予想されたためシリーズパスレギュレータではなく、電力損失面で有利なスイッチングレギュレータを選択した。スイッチングレギュレータは、電力効率が良いという利点があるが、部品点数が多く大電流の高周波スイッチングをするため、実装や部品選定が難しいという欠点がある。

例えばシリーズパスレギュレータだと外付け部品はバイパスコンデンサ程度であるが、スイッチングレギュレータではスイッチングレギュレータ IC、MOS FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)、コイル、バイパスコンデンサ、抵抗などの付属部品が必要となる。部品点数が増えるということは購入を検討する個数が増えるということである。業者への問い合わせでそれらの部品の購入について探してみると、スイッチングレギュレータ IC を購入できたとしても指定されたコイル、MOS FET を購入することは難しかった。検討の結果、Maestro3 では付属部品購入の困難を回避するためや電源の安定動作を図るために、大電流を必要とする電源は、なるべくスイッチングレギュレータ・モジュールを使用することにした。スイッチングレギュレータ・モジュールであれば電源の完成部品として比較的容易に購入することが出来る。更に部品点数も 1 個となるので購入と管理が容易になる。小電流しか必要としない電源は従来通りシリーズパスレギュレータを使用することにした。

次に今回重視した電源の仕様として立ち上がり時間がある。PowerPC プロセッサはコア電圧に+1.3V、IO 電圧に+2.5V の 2 電源を使用している。PowerPC プロセッサのデータシートにはすべての電源を 20msec 以内に立ち上げるという制限がある。この制限を満たすスイッチングレギュレータ・モジュールが必要である。NI の FPGA はコア電圧として+1.5V、IO 電圧として+2.5V、+3V、+3.3V の 4 電源を使用している。SB の FPGA は NI の FPGA から PCI-X または PCI バス用の+3V 電源を除いた 3 電源を使用している。FPGA の電源投入仕様はコア電圧のみ 200 μ sec から 50msec の間に立ち上げ、IO 電圧の立ち上げ仕様は規定されていない。

各デバイス電源仕様を考えながら比較的簡単に手に入る電源の検討を行った。FPGA などの IO 電源の内、+1.5V と +2.5V はエンピロン社の EN5360^[3] を選定した。この DC-DC スwitchングレギュレータ・モジュールは小型コンパクトで 6A の電流容量を持ち電源電圧を設定端子の設定により簡単に変更することができる。外付け部品は低 ESR (Equivalent Series Resistance) の入出力用バイパスコンデンサとソフト

スタート時間設定用のコンデンサのみ必要となる。EN5360 はソフトスタート時間設定用のコンデンサによって出力電圧の立ち上がり時間を変えることができる。現在は 15nF のコンデンサをつけているので、データシートによると出力電圧の立ち上がり時間は 1msec である。EN5360 は東京エレクトロニクス(株) から購入することができた。

PowerPC プロセッサのコア電圧用電源の仕様は 1.42GHz 動作時に最大消費電力が 30W である。最大消費電流は約 23A を消費する。かなり大電力を消費するので当初は最適なモジュールが見つからなかった。電子部品小売業者の RS コンポーネンツ (株) の Web サイトで検索したところ最大出力電流が 30A の ASTEC 社の ATH30T05-9J^[4] が使用できるということがわかった。出力電圧の立ち上がり時間はグラフより 5msec だった。ATH30T05-9J の外付け部品は、低 ESR の入出力用バイパスコンデンサと電源電圧決定用の抵抗である。

3.3 使用部品のテスト

ATH30T05-9J は今まで使用したことのない大電流の DC-DC スwitchングレギュレータ・モジュールであるため、バラックでテスト回路を作成してテストを行った。図 1 にテスト風景全景、図 2 に ATH30T05-9J の拡大図を示す。

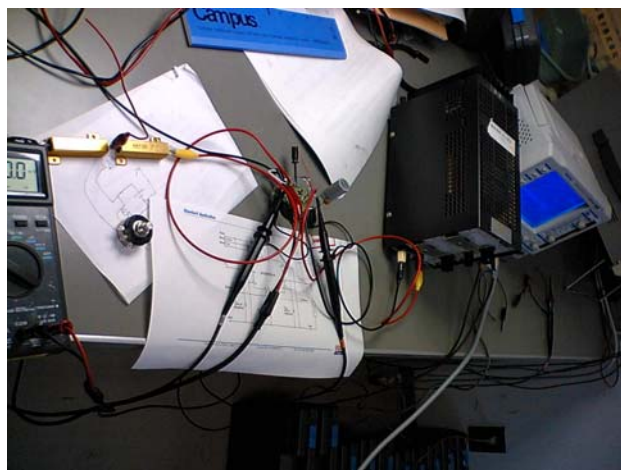


図 1. DC-DC スwitchングレギュレータ・モジュール (ATH30T05-9J) のテストの全景



図 2. DC-DC スwitchングレギュレータ・モジュール (ATH30T05-9J) の拡大図

図2で確認できる様に GND (GrouND) を電線で接続し、Track や Vo Sense などの信号線はテストのため IC クリップで接続した。

試験は主に入力電圧の立ち上がり後の出力電圧の立ち上がりをデジタルオシロスコープで測定した。

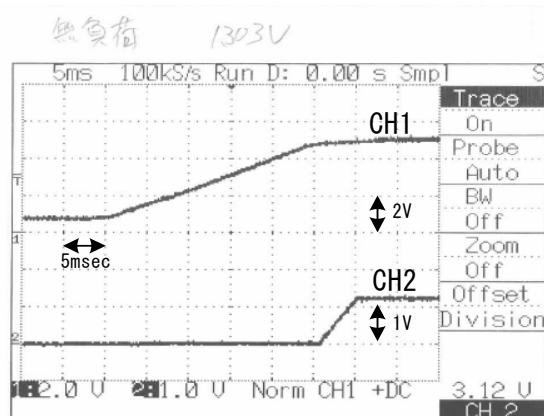


図3. ATH30T05-9J の入出力応答波形

図3にATH30T05-9Jの無負荷時の入出力応答波形のオシロスコープによる測定結果を示す。上のCH1が入力電圧(+5V)、下のCH2が出力電圧(+1.3V)である。図の横軸の1目盛は5msec、縦軸の1目盛はCH1が2V、CH2が1Vである。図3に示したように、出力電圧の立ち上がり時間は約5msecだった。デジタルマルチメータによる出力電圧値はVout出力端子を測定して1.303Vだった。その後負荷を10Ω、0.15Ω、0.1Ωと変化させてテストしたが、いずれの場合も入力電圧が安定してから出力電圧が立ち上がった。出力電圧の立ち上がり時間はいずれの負荷の場合も約5msecで変化がなかった。

4. 回路図の作成

使用する部品が決定したら、回路図CADで回路図を作成する。回路図CADには、サイバネットシステム社のOrCAD Captureを使用した。回路図作成の過程は回路図シンボルを作成することから始まる。回路図シンボルの作成は単調で手間のかかる仕事である。FPGAは数百ピンから千数百ピン程度の入出力ピンを持ち、しかもピンの定義が変更されることがあるため、シンボルの作成および更新が大変である。この手間を省くため、FPGA ツール Xilinx ISE の PAD 出力ファイルから OrCAD へインポートする機能を使用して、シンボルを作成することとした。これでFPGAのピンの定義を大きく変更しても、シンボルフایلを作り直すことができる。これで作成したシンボルは、必ずしも人間が見て見やすいものではないため、かなり修正を加えなければならない。しかし、初めから作り直すのに比べればよほどましである。

回路図シンボルの作成も部品購入の可否の影響を受ける。使用が決定していた部品が購入できないな

どの理由で再選定になるとシンボルも作り直しとなる。

その後、回路図シンボル間でピン間を線で接続していく。接続するためにはデータシート、ユーザーズマニュアルを読み、ICを熟知しなければならない。配線間違いをなくすために、回路図とは別に回路図チェック用にPowerPCプロセッサ周りなどの機能を書き出した配線表を作成した。さらにOrCADのDRC (Design Rule Check) 機能を使用して配線間違いを検出した。何千本もの配線の中で1本間違っているだけでも基板が動作せずに作り直しになる可能性がある。そのため緊張感を持って複数回の確認をしながら回路図を作成していった。

5. 基板のプリントパターン設計

基板のプリントパターンは基板設計用CADで業者が設計した。大まかな手順を説明する。

研究室で使用している回路図CADのOrCAD Captureからネットリストを出力する。そのネットリストを基板設計用CADにインポートすると配線が確定する。基板設計用に部品寸法、ピンの物理的配置の情報が反映されている基板設計用CADの部品シンボルを作成する。いろいろな部品の配置を考慮しながら部品シンボルを置いて行く。配置した状態で伝送線路シミュレーションを行い、波形を確認して配置を変更する。配置が決定したら部品シンボルのピン間をプリントパターンで配線する。その過程で配線が難しい場合は部品シンボルの配置を変更する。それも難しければ回路図に戻って配線を入れ替える。配線がおおむね終了したら、高周波信号を伝送するパターンは伝送線路シミュレーションを行う。その結果が悪ければダンピング抵抗の追加や配線の経路を変更するなどの対策をとる。最後にパターンのチェック、回路図CADのネットリストと基板設計用CADのネットリストが合っているかどうかチェックする。

次に特に設計の際に考慮した点について詳しく述べる。

5.1 配線の入れ替え

ダンピング抵抗として集合抵抗を使用する時は、配線を楽にまわせるようにピンを入れ替える場合がある。その場合はプリント基板の配線を担当する業者から配線変更の依頼が来るので、回路図を書き換えて変更したネットリストを送り、基板設計用CADに反映させる。

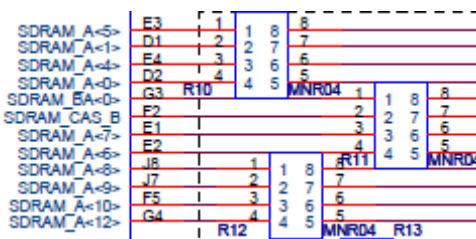


図4. SBの回路図の一部

図4はSBの回路図の一部である。図4の右側はFPGAのSDRAMアドレス(SDRAM_A)の出力ピンを表している。R10~R13のMNR04はダンピング抵抗

抗（集合抵抗）である。当初は SDRAM のアドレスピン(SDRAM_A<?>)は番号順に並んでいたが、基板のパターンを設計する上で、R10 などのダンピング抵抗を入れ替えるとパターン配線がしやすいとの指摘を業者から受けて変更した。具体的には FPGA の回路図シンボルを変更して、図 4 のように SDRAM_A<5>, SDRAM_A<1>, SDRAM<4>... というように不規則な配置に変更した。

回路図を修正した場合、回路図 CAD で変更されたネットリストを出力して業者に送り、もう一度基板設計用 CAD にインポートした。

5.2 伝送線路シミュレーション

BGA (Ball Grid Array) は最近の高速伝送基板の IC のパッケージとして定着している。BGA は入出力ピンが外から見えないパッケージであるためオシロスコプのプローブを当てて波形を観測することができない。インピーダンス制御可能なマイクロストリップラインやストリップラインは、一般的な高速信号を送る基板にプリント基板の配線として使用されている。それらを使用すると伝送線路シミュレーションによって設計段階で波形を予測できるので、より良い波形に整形することができる。波形を整形する方法としては、ダンピング抵抗などによってインピーダンスを合わせる方法やプリント配線の取り回しの変更などの方法がある。Maestro3 では主にダンピング抵抗の値や FPGA の出力電流値などを変更してインピーダンスマッチングを図った。

図 5～図 7 は PowerPC プロセッサのアドレス 29 ビットを FPGA がドライブしたときの伝送線路シミュレーション波形である。FPGA の IOB の設定は入出力信号レベルが LVCMOS25、出力電流値が 8mA である。青色の線が FPGA の出力ピンでの出力波形、赤色の線が PowerPC のアドレスピンでの入力波形を表す。図 5 は FPGA の出力ピンに 22Ω のダンピング抵抗を入れたときの波形、図 6 はダンピング抵抗を 33Ω とした時の波形、図 7 はダンピング抵抗を 47Ω としたときの波形である。波形の立ち下がり部分を比べてみると、ダンピング抵抗を 47Ω とした時の波形が入力電圧の低い方のスレッショルド (V_{inl}) 付近で乱れているのがわかる。次に、データシート^[5]に PowerPC プロセッサの入力電圧の Absolute Maximum Rating は $-0.3V$ to $OV_{dd} + 0.3V$ と記されている。ここで OV_{dd} は $2.5V$ なので、入力電圧の絶対最大定格は $-0.3V \sim 2.8V$ となる。ダンピング抵抗を 22Ω とした時の最大電圧に注目すると約 $2.8V$ なので入力電圧の絶対最大定格とほぼ同一である。この伝送線路シミュレーションの結果から、PowerPC プロセッサのアドレスバスのダンピング抵抗値は図 6 の 33Ω に決定した。

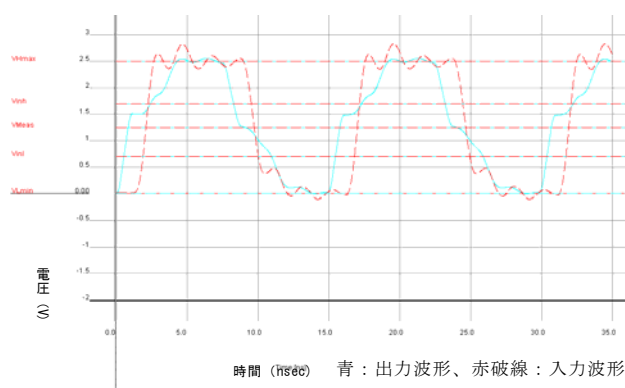


図 5. アドレス 29 ビットを FPGA がドライブしたときの伝送線路シミュレーション波形（ダンピング抵抗= 22Ω ）

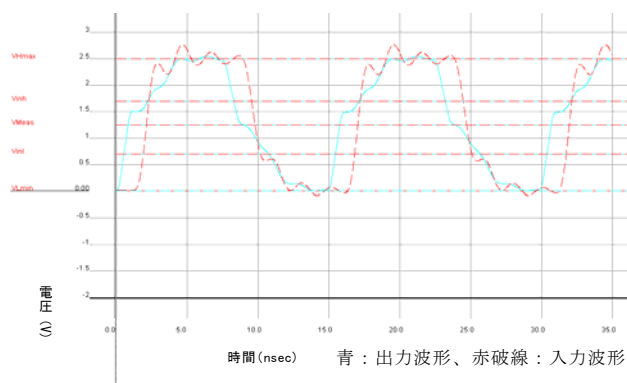


図 6. アドレス 29 ビットを FPGA がドライブしたときの伝送線路シミュレーション波形（ダンピング抵抗= 33Ω ）

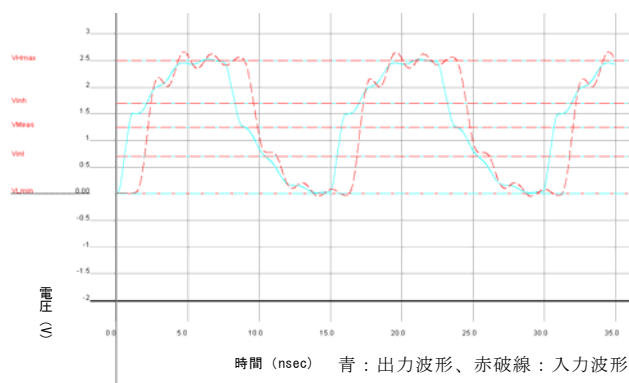
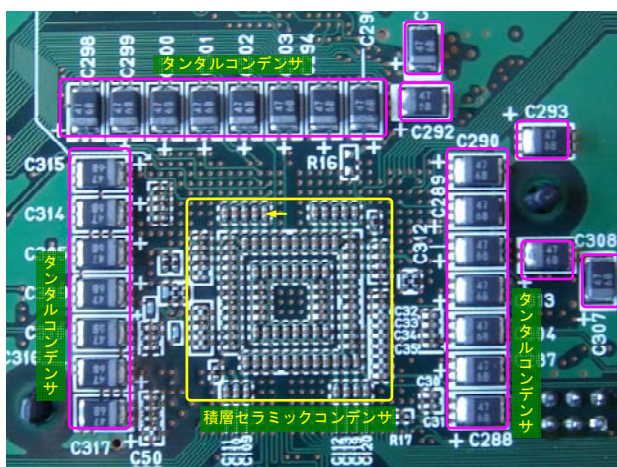


図 7. アドレス 29 ビットを FPGA がドライブしたときの伝送線路シミュレーション波形（ダンピング抵抗= 47Ω ）

5.3 電源周りの設計の注意点

最近 FPGA やプロセッサなどの IC のコアは大電流を必要とすることが多くなってきた。大電流を流すためには抵抗値の少ない電源、GND 配線が必要とされる。更にバイパスコンデンサについての考慮も必要とされる。負荷から離れた位置にある電源では、パターンのインダクタンス成分や抵抗成分などの影響により、高周波信号をスイッチングするための高

速な電流を流すことが出来ない。そのため電源を使用する IC の近傍に高速なバイパスコンデンサを配置して、バイパスコンデンサから高速な電流を供給する。これは IC の内部ロジックを駆動するコア電源だけではなく、周辺 IC との信号のやり取りのための電源である IO 電源にも当てはまる。IO 電源に最適なバイパスコンデンサを最適な位置に実装しないと、周辺 IC との信号のやり取り時にデータ誤りが生じるようになる。これは以前にわれわれが Maestro2 の基板の作製で経験したことである。Maestro3 の基板では、FPGA や PowerPC プロセッサの BGA パッケージの裏面へ表面実装パッケージの小さな積層セラミックコンデンサと、BGA パッケージの裏面の近傍にタンタルコンデンサを配置した。これらのコンデンサの配置を図 8 に示す。



の板を基板上においてクリームハンダを塗布すると、必要な部分だけにクリームハンダを塗布できる。部品をマウンタまたは手で基板に置いて、大きなオーブンのような炉（リフロー炉）に入れ加熱する。クリームハンダが溶けて部品がハンダ付けされる。この工程を裏面、表面と行う。ここでマウンタとは複数の部品を実装する機械を指す。次に DIP 部品のハンダ付けを行う。

最近大きな IC など、BGA という IC の下にハンダボールがあるパッケージがよく使われている。BGA は加熱されると BGA 裏のハンダボールと塗布されたクリームハンダが溶けて表面張力が発生し、その力で実装位置が自動補正される。

6.3 高周波信号伝送プリント基板設計上の注意点

通常の両面プリント基板ではインピーダンスは考慮されていないが、動作周波数が約 50MHz を超えるとプリントパターンも伝送線路としての考慮が必要となる。高速な信号を送送するプリントパターンはパターンの隣の層に基準面（GND などのベタパターン）を配置し、インピーダンスを制御可能な伝送線路として設計される。それは多層プリント基板の表面ではマイクロストリップライン、内層ではストリップラインと呼ばれている。マイクロストリップライン、ストリップラインともに基板の誘電率、パターンの厚さ、パターン幅によってインピーダンスが変化する。NI 基板、SB 基板は前述したパラメータを調整してインピーダンスが 50Ω になるように調整されている。良好な波形を送受信するためには、信号の送受信を行う各デバイスの入力、出力インピーダンスをなるべく 50Ω にあわせることが肝心である。

7. NI の構成

図 10 に NI のブロック図、図 11 に NI の写真を示す。NI は PowerPC プロセッサを搭載したインテリジェントな PCI-X カードである。

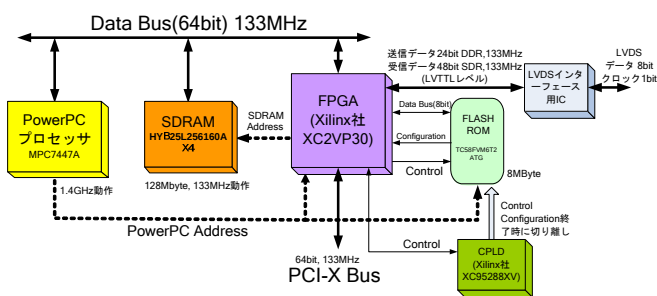


図 10. Maestro3 ネットワークインターフェース (NI) のブロック図

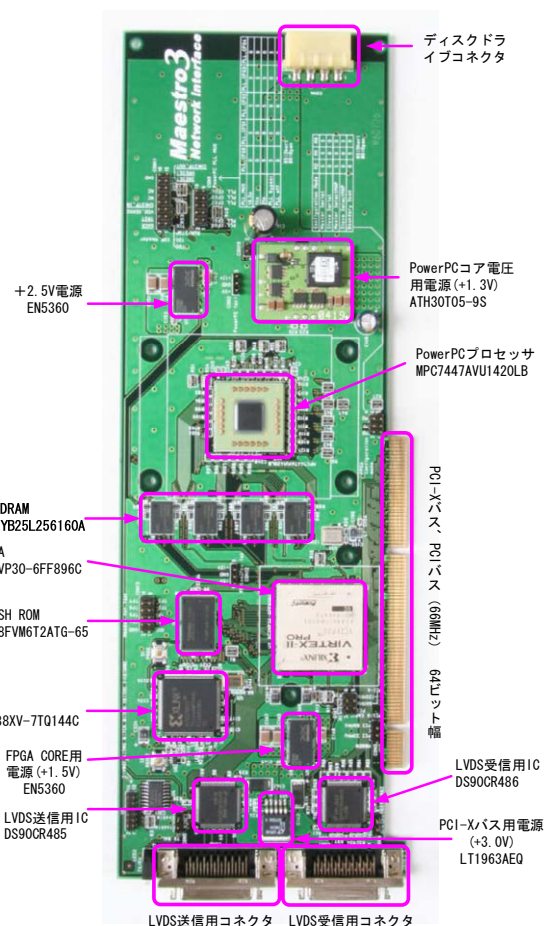


図 11. Maestro3 NI 基板写真

NIにはCPLD (Complex Programmable Logic Device)、FPGA、PowerPC プロセッサ、8MByte の FLASH ROM (Flash Read Only Memory)、128MByte の SDRAM、最大 6.4Gbps の LVDS インターフェース用の送信 IC 及び受信 IC が搭載されている。

FPGA は電源が ON になった時に内部回路が空のままなのでコンフィギュレーションが必要である。CPLD が電源 ON 時の FPGA のコンフィギュレーションを制御する。コンフィギュレーションの方式はスレーブセレクトマップである。この方式はコンフィギュレーション・データを FLASH ROM から 8 ビットずつ FPGA に転送できるため、迅速に FPGA をコンフィギュレーションすることが出来る。FPGA のコンフィギュレーションはその他、JTAG 端子経由でパーソナルコンピュータ上のツールから行うことができる。デバック時は JTAG 端子経由でコンフィギュレーションを行っている。

FPGAにはPCI-XまたはPCIバス^[6]のコントローラ、PowerPCコントローラ、FLASH ROMコントローラ、LVDSインターフェース回路、DMA 2 チャネル、SDRAMコントローラなどの制御、データパスといった主要な回路が搭載されている。

PowerPC プロセッサは最大動作周波数 1.4GHz 動作の Freescale 社製 MPC7447A である。このプロセッサは以前アップル社製のマックミニに使用されていた。PowerPC プロセッサから SDRAM や PCI バスへアクセスすることができる。PowerPC プロセッサの最大消費電力は 30W と大きいので PCI-X バスのカードエ

Maestro3 ハードウェアの特徴は PowerPC プロセッサ、SDRAM と FPGA のデータがバス接続されていることである (図 10 参照)。SDRAM のデータ出力は FPGA を介さずに直接 PowerPC プロセッサに伝わるためレイテンシを短縮することができる。また 1 組のデータ用ピンを FPGA に用意すれば良いので FPGA のピンを節約することができる。欠点としては 2 つある。1 つは共通バスであるため FPGA が SDRAM に転送している場合に PowerPC プロセッサがバスを使えないことである。もう 1 つは 133MHz で高速動作する信号線が 1 対 1 ではなくバス接続であるため信号波形が乱れやすいことである。事実、データバスは伝送線路シミュレーション時に一番波形整形に苦労した。

10. 謝辞

Maestro2 システムの開発に参加の機会を与えて頂いた、筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻の和田耕一教授に深く感謝いたします。また、共同制作者であるシステム情報工学研究科の青木圭一氏、及び Maestro3 に関する様々な作業をしていただいた丸岡大記氏に深謝いたします。PowerPC プロセッサや JTAG ICE、C コンパイラなどを提供していただいたフリースケール・セミコンダクタ・ジャパン株式会社の関係者の方々に感謝いたします。プリント基板の設計と製作、部品実装をお願いした A&D プリントエンジニアリング株式会社の担当者の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 小野雅晃, Maestro2 スイッチボックスの開発, 筑波大学技術報告 26 (2006) 42-47.
- [2] 小野雅晃, Maestro2 ネットワークインターフェースの開発, 筑波大学技術報告 25 (2005) 42-49.
- [3] EN5360 データシート, Enpirion Inc., Rev 1.0, 2005.
- [4] ATH30T05 Series データシート, ASTEC, REVISION 00(30APR2004).
- [5] MPC7447A RISC Microprocessor Hardware Specifications, Freescale Semiconductor, Rev. 4, 2005.
- [6] 小野雅晃, Xilinx 社製 FPGA を搭載した PCI ボードのシミュレーション, 平成 15 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告集 (2004) P-23.

木材加工における研磨について

田所千明

筑波大学生命環境科学等支援室（農林工学系）
〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

木材加工における研磨作業のうち、主に手を使った作業の要点について、これまでの経験等から得られた知識を基に述べる。木材を加工するための刃物について、研磨用具である砥石との関係により生じる研磨の難しさや、不具合への対処の仕方を考察した。木材の研磨では、研磨粒度の違いによる表面性状の変化を電子顕微鏡を用いて調べた。また、研磨粒度による木目の表れ方の違いと、摺り漆塗装の状態の違いを観察した。塗膜研磨については、限られた厚みの塗膜をいかに平滑に研ぎ破らずに研磨するか、その方法を検討した。

1. はじめに

ものづくりにおいて、材料と道具は密接な関係にある。人の手による加工では、道具は材料に従属したものであり、材料の持つ様々な特質に対応していなければならない。特に異方性の極みである生物材料（木材）の加工には、金属や高分子材料のような均一なものとは異なり、様々な加工工程にその特徴（生まれ付き）が現れるため、道具や手を上手く対応させなければならない。合理的な加工が求められる機械加工では、木材を可能な限り均一で等質な材料として扱い、圧倒的な力を用いた材料に従属しない加工となる。手による加工では、材料の違いを目で見、鼻で嗅ぎ、手で触れる等の五感より得られた情報から、備わった能力（体力・知力）を使い、それに応じた対応（加工）をすることで、個性のある製作となる。加工中は対象物と直接関わりながら、過去の経験を加味し加工状態に合わせて自身の動きを決める。

木材加工では工程ごとに異なった研磨作業があり、その良否が後の工程に影響を及ぼしている。それぞれの研磨技術については知られているが、研磨用具と被削材の関係およびその詳細について、これまでの経験を基に述べる。

2. 木材加工における研磨

2.1 研磨とは

研磨とは材料表面を平滑で光沢のある面に仕上げる加工である。表面処理加工の一分野である研磨には、主に機械研磨・電解研磨・化学研磨の3種類があり、木材加工では機械研磨が行われている。機械研磨では微小で連続した突起や微細な砥粒を表面に押しつけてこすり、物理的に被削材を研磨する。用いられる研磨用具には、やすり、砥石、金属粉を接着した研磨紙等がある。砥石や研磨紙には砥粒の大

きさ毎に番手と呼ばれる各種のものがあり、求める仕上がり状態により使い分けられている。

2.2 刃物研磨

木材を加工する刃物は刃先の鋭さが必要である。軟らかい木材を切削するには、わずかな刃先の摩耗が切削品質を低下させる。刃物の研磨には、やすりや砥石が用いられる。やすりは、のこぎりの目立て等に使われ、すり込み・仕上げ・上目やすりがある。砥石は天然・人工砥石があり、仕上げ研ぎ以外は人工砥石が使われている。研磨方法には機械と手による研磨がある。機械の研磨では、機械に取りつけて使用される刃物を研磨することが多く、やすりを往復運動させて研磨する帯のこの研磨や、回転する砥石に刃物を押付けて研磨する自動かんな盤用の刃の研磨が主なものである。手による研磨では、やすりを用いたのこぎりの研磨や、砥石を固定して刃物を往復させる、かんなやのみの研磨等がある。

砥石による水研ぎ研磨では、水の浸みた砥石面と切れ刃面による摩擦で、砥石成分がはく離し砥粒となり切れ刃面が研磨される。したがって、刃物を研磨しながら砥石も研磨される。この砥石面の減少により切れ刃面も変化してしまうため、砥石面の形状維持が重要となる。写真1は切れ刃面と砥石面が一致した結果、倒れなくなったかんな刃である。

2.3 木材研磨

木材研磨の目的は塗装のための素地調整が主なものであり、その素地研磨の出来不出来が製品の価値に影響を与える。製作中に生じたキズ、逆目、目違い等の欠陥を修正し、平滑にして、特有の木目を引



写真1. かんな切れ刃面と仕上げ砥石面との関係

中砥石で中研ぎしたかんなを仕上げ砥石で研磨し、切れ刃面と砥石面が互いに隙間無く接した状態となり、倒れなくなったかんな刃。

立たてる。研磨に用いられるやすりには、鬼目・すじ目と呼ばれるものがあり、荒削りに使われる。研磨紙は粒度が#12～#1200までの27段階に分かれているが、一般に使用される範囲は#120～#600である。そして、低い粒度から順次目的の仕上がり状態まで粒度を上げながら研磨する。研磨には水を使わない空研ぎが行われる。機械の研磨では布地に研磨材を接着したベルトサンダーが一般的で、研磨粒度#320までが主に用いられる。手による研磨では、形状による不適や熱による目詰まり等の機械の研磨に適さない場合や、工芸分野および銘木等に対して行われる。また、紫檀や黒檀等の硬い銘木を用いた唐木家具等では、#1,500位までの耐水研磨紙による水研ぎも行われる。

2.4 塗膜研磨

塗膜研磨の場合は塗装の仕上げ塗りの前処理として行われる。数回塗り重ねられた塗装面を耐水研磨紙を用いて水研ぎすることにより、仕上がった塗装面は、より平滑で光沢の有るものになる。

漆工芸における研磨作業は非常に重要である。塗りの前工程として下地作りがあり、下地材を数回塗り重ね研磨し下地を作る。そして漆を塗り、仕上げ塗りの前に研磨し、仕上げ塗りをする。漆塗りの仕上げには、上塗り後そのまま乾燥させた「塗立て仕上げ（花ぬり）」と下塗りを出さないように上塗りを研磨し、より平滑に仕上げる「呂色仕上げ」の2種類がある。塗立て仕上げには、ほこりを付けずに均一に塗る技術が必要である。呂色仕上げでは、研磨する塗膜厚さが数十マイクロメートルと薄いため、その厚さの範囲内で平滑に研磨する技術が求められる。仕上げられた塗装面が鏡面光沢を有するためには、平滑でキズの無いことが必要である。

漆の樹液（生漆：きうるし）を均一に攪拌しながら含まれる水分を無くして作られる木地呂漆は、塗られた時点では透明度が低く黒ずんで見えるが、時間の経過と共に透明になり、下の下地が見えるようになる。木材に木地呂漆を用いて呂色仕上げをした場合、時間とともに漆が透けて木目が見えるようになり、しっとりとした触感も加味され、漆塗りの特徴の一つとなっている。

2.5 刃物・木材・塗膜研磨の関係について

刃物・木材・塗膜それぞれの手による研磨の特徴

を表1に示す。研磨の目的では、刃物と塗膜研磨については表面の鏡面化が共通している。刃物の鏡面化は刃先の鋭さと同義である。被削材の硬さは金属材料である刃物が一番硬く、高分子材料の塗膜、次に生物材料の木材（節等を除く）の順となっている。研磨粒度については、刃物が#3,000以上までの広い範囲の粒度による研磨が行われ、木材では#600程度までの範囲、塗膜は#1,500位までの粒度範囲で、研磨目的の違いにより使い分けられている。研磨作業時の研磨方向については、刃物の場合は、求める刃先角となるように刃物を砥石面と平行に往復させる。木材では木材繊維の向きと同じ方向になるようにし、塗膜面では平滑に削られた下塗り研ぎ面と平行になるよう研磨する。

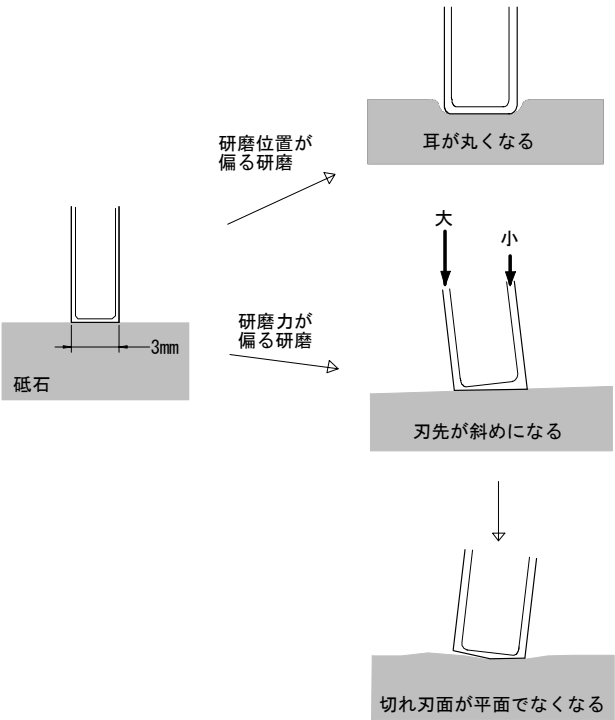


図1. 「一分のみ」の研磨

一分のみは刃幅3mmと狭いため、砥石面上の研磨位置や研ぐ力および切れ刃面の接地状態の偏り等により、刃面を平面で刃先が真直ぐな状態に研ぎ上げることが難しい。

	刃物研磨「砥石」	木材研磨「空研ぎ研磨紙」	塗膜研磨「耐水研磨紙」
目的	刃先の鋭利さ－鏡面化	木地調整－木目鮮明化	塗膜平滑－鏡面化
被削材の硬さ	硬	軟	中庸
研磨粒度	荒砥 — #240	荒研ぎ — #120	荒研ぎ — #600
	中砥 #400 — #1,500	中研ぎ #120 — #320	中研ぎ #800 — #1,000
	仕上げ砥 #3,000 —	仕上げ研ぎ #600 —	仕上げ研ぎ #1,500 —
研磨方向	切れ刃面の動きが砥石面と平行	木目に平行	下塗り面に平行

表1. 手による研磨形態の比較

木材を使ったものづくりの工程は、刃物により加工が行われ、次に組み立て前後に木材の研磨が行われ、塗装の後に塗膜の研磨が行われ、磨き上げられて完成となる。良く切れる刃物で木材を平滑に加工し、表面を研磨紙でより滑らかにし、その上に塗料を塗り、より細かな塗粒で研磨し、光沢のある製品に仕上げる。しかし、初期の刃物による加工に欠点がある場合、その後の木材研磨や塗装での補修は非常に時間と手間の掛かることとなり、負担が非常に大きい。次の木材研磨が不十分では塗装による補修に手間取ってしまい、最後の塗膜研磨での失敗は塗装のやり直しとなり時間の損失が大きい。

3. 研磨の詳細について

3.1 刃物研磨の詳細

一分のみ（幅 3 mm、奥行き 12 mm）のような幅の非常に狭い刃物の研磨時の不良について、図 1 に示す。幅の狭い刃物研磨では、通常の幅の研磨には現れにくい欠陥が顕著になる。絶えず砥石面を移動しながら往復動作を繰り返さないと、のみにとっては重要な耳（両刃先角）が丸くなってしまう。そののみを用いて穴を開けた場合、穴の角が正確に出来ず、ほぞ接合に不向きとなる。また接触面積が小さいため、力が集中することにより砥石面が凹凸になりやすい。研磨中砥石面の状態を出来る限り平面となるよう（刃物を研磨しながら砥石面も平面に研磨するよう）に、砥石面全体を使う研磨としなければならない。また、微小な幅であるため切れ刃面に均一に力を加えることが難しく、刃先が斜めになったり、切れ刃面が平面でなく凸面になりやすい。

研磨作業では研磨用具の磨耗は避けがたい結果である。刃物と共に研磨用具も減少するため、切れ刃面を平面に保つことが難しくなる。図 2 に示したものは、2 枚刃かんなにおける、かんな身と裏金の重なり合いの関係を示したものである。2 枚刃かんなは、木材細胞の配列の方向が切削方向と逆になる場合に起こる、逆目を止めるためのかんなである。裏金によって無理やり曲げられたかんな屑が、先割れを防ぎ切削面の荒れを防止する。そのため接合部分にはかんな屑が詰まりやすくなるので、隙間の無い接合にしなければならない。2 つの面が交わる場合、どちらも平面になっていないと隙間が出来てしまう。2 枚刃かんなのかんな身と裏金の研磨をする場合（裏押し等を含め）、砥石面は凹状態になり切れ刃面は凸

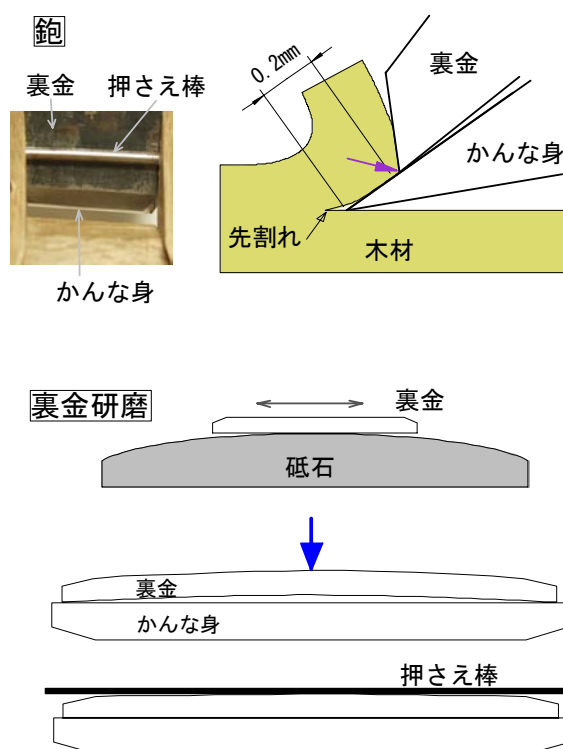


図 2. 刃物と砥石面形状との関係

砥石の形状をわずかに変えることにより、刃物の機能や性能が良好な状態となる（例えば鉄の研磨）。

状になりやすい。その対処法として、あらかじめ砥石面をわずかに凸状にして研磨をすることで研磨された裏金はわずかな凹状となり、押さえ棒により多少凸状態のかんな身でも隙間無く密着することが出来る。このように研磨用具表面を所定の形状にして研磨をすることにより、求める切れ刃面を得ることが可能である。

3.2 木材研磨の詳細

木材加工における木材の研磨は、欠点を補う事を目的とした消極的なものである。しかし、木材工芸（特に漆工芸）分野では、木目の美しさを表現するため、より精細な研磨が行われている。家具製作では研磨紙粒度 # 320 までの研磨だが、漆工芸では # 320 から順次 # 600 までの研磨が行われる。

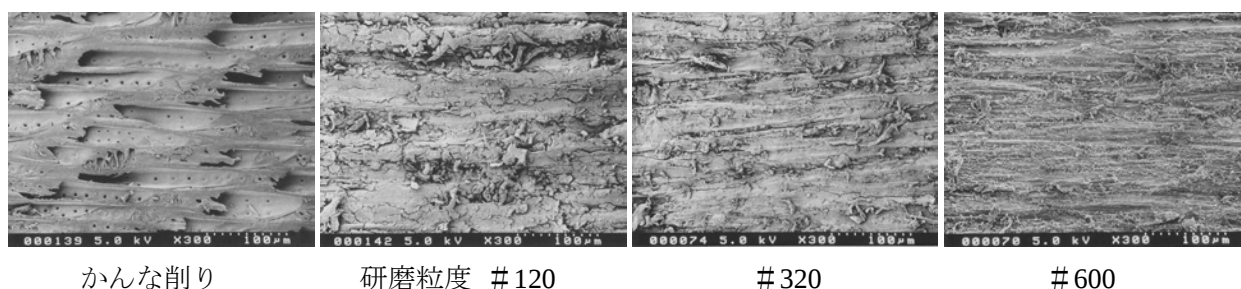


写真 2. 研磨面（ヒノキ）の走査型電子顕微鏡観察

よく研磨された刃物で切削されたヒノキ材の表面を研磨紙で研磨し、研磨粒子の大きさの違いによって変化する表面の様子を比較した。

写真 2 はかな削りと、研磨粒度 #120, #320, #600 で研磨したヒノキを、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて 300 倍で撮影し、表面性状を調べたものである。かな削りでは木材細胞 (仮道管) が斜めに切断され、その断面がはっきりと分かる。粒度 #120 では仮道管が押し潰され、千切れかけた細胞がまわり付いている。#320 の研磨は #120 に比べ凹凸が少なく細かな溝になっているが、仮道管の形がわずかに残っている。#600 はさらに細かく滑らかな表面になっているのが分かる。

写真 3 は研磨粒度 #120, #320, #600 の研磨紙により研磨したスギ材と、それに摺り漆をしたものを、デジタルカメラで撮影したものである。研磨粒度 #120 では放射組織による縞模様がぼやけて見え、研磨紙による傷が目立つ。#320 では #120 より縞模様が見えるようになり、傷も見えない。#600 は縞模様がはっきりと見え表面の滑らかさも分かる。また摺り漆 (拭き漆) をした場合、#320 では表面の凹凸箇所に漆が拭き残り、全体が黒っぽく汚い感じであるが、#600 では拭き残りが少なくきれいな仕上がりとなっている。

3.3 塗膜研磨の詳細

塗膜を研磨する場合、下塗りによる塗膜が平滑に研磨されている事が必要である。その下塗り面を基準に上塗りの研磨が行われる。

呂色仕上げにおいて、傾斜と凹凸のある大きな面積の塗膜表面を上から研いだ場合、下塗り研磨面に対して平行とはなりにくく、下塗り面を研ぎ出してしまう「研ぎ破り」となることが多い。これを防ぐ方法として、研磨面の端を残し中央だけをまず研磨し、最後に残った端を研磨する (図 3)。

また、木材に直接木地呂漆を塗り呂色仕上げをする場合、木地呂漆は乾燥が速いので、外側が先に乾

き内側が乾かないチヂミと呼ばれる状態になりやすい。したがって木地呂漆は厚く塗ることが出来ず、研ぎ破りをしないで研磨する研磨量が少なくなり、木地呂漆による呂色仕上げは難しくなる。

写真 4 は木地呂漆を用いた呂色仕上げの工程写真と研ぎ破りの写真である。凹凸とゴミのある塗装面を平面に研磨し、呂色仕上げを行ったものと、研ぎ過ぎた結果、下塗り面が出てしまったものである。

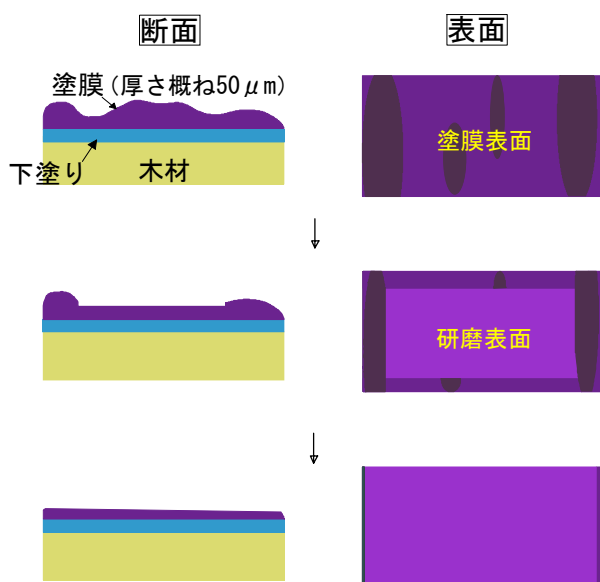
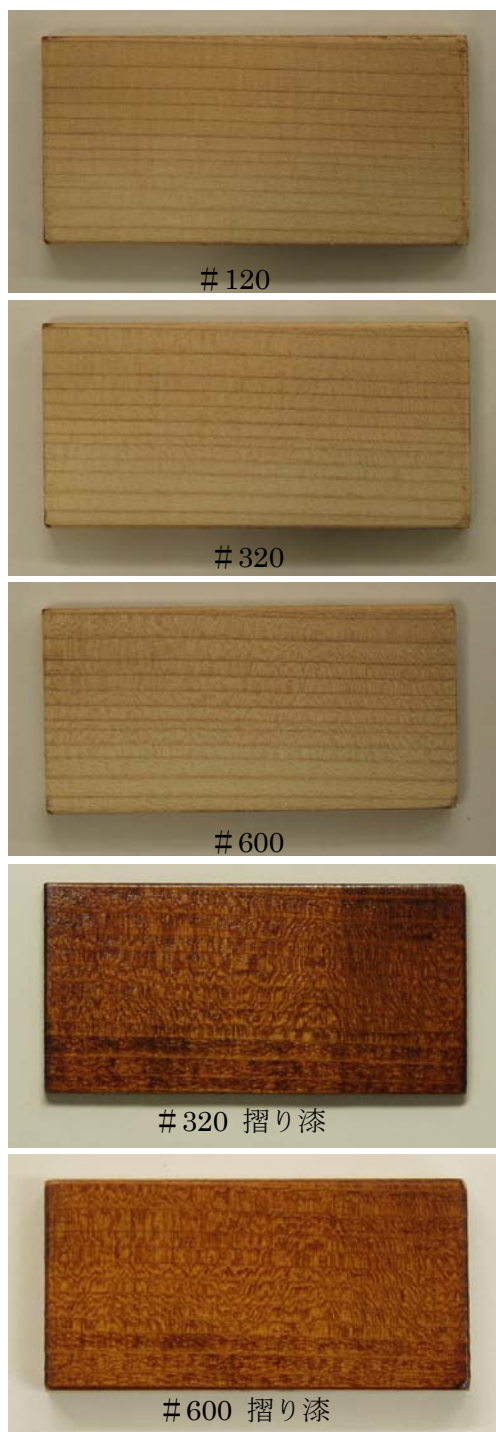


図 3. 呂色仕上げにおける研磨手順

薄い塗膜を平面に研磨する場合、凹凸のある面すべてを一度に研磨しようとする、傾いた面となり、研ぎ破りになりやすい。

写真 3. 研磨面と摺り漆 (スギ)

研磨粒度の違いによる木目の現れ方と、摺り漆をしたときの様子。



塗 り



研 磨



仕 上 げ



研ぎ破り

写真 4. 呂色仕上げの工程と研ぎ破り（木地呂漆）

凹凸のある塗膜面を平滑に研磨し艶出し仕上げを行ったものと、研磨時の研ぎ破り。

4. まとめ

機械による研磨は生産性が第一の目的であり、大きな刃物や大面積の研磨および同形状の多量な加工が可能である。誰でもバラツキのない同じ研磨結果が得られる。手による研磨は手加減による加工が出来、異なる条件毎のすばやい対応が可能である。また、

手による加工は加工工程を楽しむことが出来る。目標を決め、技を磨き、創意工夫をし、満足な結果が得られた場合、その達成感が人の気持ちを豊かにする。理想とする研磨結果を得ようと研磨に熱中することで、日常の時間軸とは別の時間軸に身を置くことが出来る。

装置の監視システムの開発に向けて ～様々な研修を通して～

嶋頼子

筑波大学研究事業部研究事業課（プラズマ研究センター）

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

プラズマ研究センターでは、プラズマ閉込実験を行っている。プラズマパラメータの上昇に伴い、制御装置側の状況の監視とデータの蓄積が課題となってきた。特に制御装置と運転室（実験棟）が別の建物にあることにより、ネットワークを使った監視システムが必要であった。昨年度の分子科学研究所での技術研究会で PIC (peripheral Interface Controller) と小型デバイスサーバ Xport を用いた装置の監視システムを知り、プラズマ研究センターでもこのシステムでの監視装置を提案した。システムの開発には、今まで受けた研修や他研究機関との交流が大いに役に立ったので、システム開発に向けての経緯を報告する。

1. はじめに

様々な製品の開発や、技術の向上により、技術職員も自らの技術力の向上と、分野を問わない開発力が求められる機会が多いのではないかと思います。しかしながら、業務が特殊であったり、時間がなかったり、また組織的に確立されていなかったりなどの理由で、技術力の向上に悩む事が多いのではないかと思います。私自身、装置の設計や運用において、悩んできた。技術力の向上の手段は、それぞれに工夫するしかないが、一つの手段として研修も有用であると考えている。今回、様々な研修を受け、一つのシステムの設計に至れた。

短時間大電力を得る為の電動発電機の担当をしているが、近年、様々な実験パラメータ（加熱シーケンス）で実験が行なわれるようになってきた。それに伴い、装置の状況を監視し、実験状況やショット番号などのデータと装置の状況の関係を調べる事が重要となっている。そこで、ネットワークを通じての監視システムを提案した。監視システムは、分子科学研究所（愛知県）にて昨年3月に行なわれた第17回分子科学研究所技術研究会で多くの報告がなされた PIC と Xport を用いてのシステムを取り入れた。監視するのは、プラズマ閉込装置のコイルに流れる電流を制御する装置の一部である直流電流アンプ（DCCT アンプ）の状況と、実験進行状況（通電までの残時間等）である。

DCCT アンプのバイアス電流値は、現在は職員が現場に数値を読みに行っている。DCCT アンプは職員が常時実験を監視・制御する実験棟とは別の建屋にある。職員がそれぞれのグループの仕事と実験の統轄作業を兼任していることから、いつでも何処でもアンプの値をモニターできる事を望んでいた。また、通電までの残時間や、ショット番号をネット

ワーク上に流す事により、安全な実験の遂行と、自由なデータ取り込みができるようになる。

このシステムを設計するのにデータベース（DB）や PIC に関する知識が必要であるが、今まで受けた研修や、行き詰って受けた研修など、他機関との交流が役に立った。受けた研修・技術交流を以下に示す。

- ・核融合科学研究所 技術交流
- ・筑波大学 情報処理化研修
- ・高エネルギー加速器研究機構 受け入れ研修

2. 核融合科学研究所 技術交流

2.1 核融合科学研究所

岐阜県にある大学共同利用機関法人自然科学研究機構・核融合科学研究所（NIFS）は、平成元年に文部省核融合科学研究所としてスタートした研究機関である。プラズマ研究センターも同じ分野なので様々な面で関わりも多い。

技術部は5課で構成され、人数は52人。研究所には大型のプラズマ実験装置があり、技術職員は装置建設に関しての施行管理や各種周辺装置の設計、製作、実験期間中は実験装置の運転、装置の維持・管理や新装置の開発、新しい装置の制御やデータ収集部の設計・製作またソフト開発なども行なっている。

2.2 技術交流

NIFS の技術部¹では、装置の設計・製作や、コンピュータのプログラム制作等を通して互いに技術の向上を目指す目的で技術交流が行なわれている。

技術交流の内容は交流プログラムにより分類される。技術部ホームページ（HP）より抜粋した交流プログラムを表1に示す。ほとんどの交流が関連業務に携わるもの、もしくは興味を示すものという条件で受ける事が出来る。担当者と連絡を取り合い、自分の希望・状況などを伝え実施することができる。

2.3 内容

電子回路工作を平成14年度に、パーソナルコンピュータ（PC）を用いた計測・制御技術を平成15年度に受けた。電子回路工作の時は1名での受講だった。私自身、電子回路の製作はあまりやったことがなく経験させて頂く意味での技術交流だった。その後、私がプラズマ研究センターで担当している計

¹ <http://etmikan.nifs.ac.jp/jap.html>

表 1. 技術交流プログラム (NIFS 技術部 HP より抜粋)

技術交流項目	交流人数	期間
NC 加工技術	1～2 名	3 日～1 週間
電子ビーム溶接加工	1 名	3 日～1 週間
電子回路工作	1～2 名	1～2 週間
PC を用いた計測・制御技術	1～2 名	1～2 週間
構造解析シミュレーション技術	1～2 名	1～2 週間
3 次元 CAD シミュレーション技術	1～2 名	1～2 週間
低温技術	1 名	3 日間
真空技術	1～2 名	1 週間
大電力高周波技術	1～2 名	2 週間
バースト放射線計測及び環境放射線監視技術	1～2 名	5 日間程度
PC を用いた大規模装置の制御技術	2～3 名	1 週間
メカトロニクス技術	2～3 名	1 週間
電子出版関連技術	会議形式	1 週間
安全衛生管理について	会議形式	2 日程度
技術組織について		

測装置の関係で「PC を用いた大規模装置の制御技術」のテーマで申し込んだ。内容は VisualBasic を用いた制御プログラムの作成である。プラズマ研究センターの実験状況は PostgreSQL を用いた DB サーバに保存されており、その DB と計測したデータを組み合わせて利用したい事などを伝えた。その結果、内容としては VisualBasic を用いた DB へのアクセスというものになった。他大学の方との 2 名での受講であったが、その方は装置の制御が目的で、2 日目以降は個別の内容で実施された。

研修の期間は 4 日間であり、VisualBasic の導入から PostgreSQL のインストール、実習を行なった。

DB というものがどのように構築されているか分からなかったが、インストールから経験する事により段々と理解ができた。また、研修は Windows マシンを用いて行い、access からの簡単な DB へのアクセスも経験した。その後、センターの DB へ実際にアクセスし修正なども行なえるようになった。

3. 筑波大学 事務情報化研修

平成 15 年度第 IV 期事務情報化研修 専門研修＝CGI 基礎 (PHP) コースを平成 16 年 2 月に受講した。受講のきっかけは、NIFS での技術交流の際に DB へのアクセスならば VisualBasic よりもこれからは PHP の方が楽だろうと雑談の中で出たことである。

3.1 内容

研修は、WebOffice などの業務の情報化・ペーパレス化に有用な Web 型のオンライン業務システムの開発促進のため、ホームページ作成に必要な PHP 言語の基礎的な知識及び開発技術を習得させる目的で、総務部情報処理課が開催しているものである。研修期間は 2 日で専門の講師による指導で、PHP の概要

から基本文法を学び、実践を通し掲示板を作っていくというものであった。テキスト 1 冊を 2 日で終わらせるというもので、内容は濃く、進むスピードも速かった。最後の掲示板の作成までは出来なかったが、Web アプリケーションというものを理解できた。

研修終了後、プラズマ研究センターのサーバで PHP を利用してみたが、PostgreSQL への接続は試せなかった。

4. KEEK 受け入れ研修

高エネルギー加速器研究機構² (KEK) では、他の研究機関・大学等の職員を受け入れての研修を行っている。平成 17 年度の筑波大学技術発表において、KEK の職員の方と知り合い、遠隔システムに興味があるならば、研修を受けてみないかとアドバイスいただいた。そこでどうしてもうまく動作しなかった PIC に関して 12 月に研修を実施してもらった。研修は通常の業務に影響が小さいよう、午前のみを 3 回行った。

4.1 内容

担当の方は PIC に詳しいわけではなかったが、シリアル通信等に精通しており、ピンの動作を 1 点 1 点 LabVIEW にて確認し、動作が何処まで正確であるかを確認した。LabVIEW を扱うのは始めてであったがプログラムの方法から教えてもらい、PIC の動作を知る事ができた。

午前のみという事で次回までに確認できたところまでを修正し動作を確認、更にプログラムを改造し研修と言う進め方で行った。次回研修までに実施する事が多く大変であったが、その分進みは速かった。

この研修で PIC のシリアル通信の部分が分かり、実際に PC と繋ぐところまで確認することができた。

² <http://www.kek.jp/ja/index.html>

5. 研修の成果

5.1 埋め込み SQL 用 C プリプロセッサによる DB の利用

NIFS での技術交流の際に少し PostgreSQL について触れてもらったので、それを参考にプラズマ研究センターの DB をコマンドで操作することからはじめた。この DB はショットの時間・加熱条件など実験状況が記入されているものである。

センターでは、プラズマ生成実験中はショットのトリガに合わせて様々なデータが、AD 変換機 (CAMAC) よりワークステーションにバイナリデータで送信される。したがってショット中のプラズマの様々なデータは、このワークステーションに蓄積されている。ユーザーは様々なデータを計算し解析している。データの中には常時監視し、その変動をつかむのが必要なものもある。装置の真空度もその一つで、通電中のある時間の値を Fortran で計算し、その変動を監視している。しかし、通電状況などは DB に保存される為、測定値と実験状況を手で書き写しながら監視をしている。

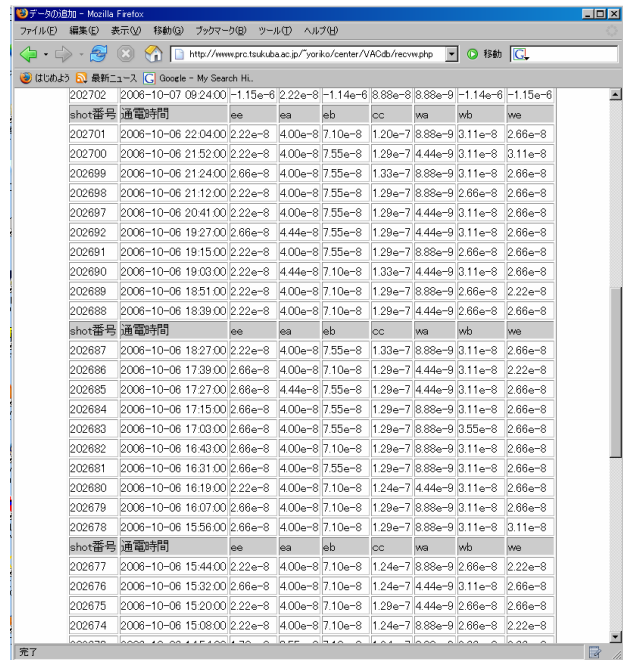
より安定した監視の為、データを組み合わせて新たな DB を作る事を考えた。PostgreSQL の参考書とインターネットで調べた結果、埋め込み SQL 用 C プリプロセッサ (ECPG) というものを使う事にした。これは C 言語から PostgreSQL へアクセスするというものである。ecpgtype.h と ecpglib.h の 2 つのライブラリを使用する。プログラムの記述は非常に簡単で、DB にアクセスする SQL のコマンドは `exec sql` に続けて SQL コマンドを記述するだけである。以下に、そのプログラムの一部を載せる。

```
/****** データベースに接続 *****/
/*何らかのエラーが発生した場合は関数 error_exit()
をコールする*/
exec sql whenever sqlerror do error_exit();
exec sql connect to
tcp:postgres://192.168.11.1:5432/DBname user NAME
using PW;
/*DB に書き込み*/
exec sql insert into vacdata
(indexno,shotno,ee,ea,eb,cc,wa,wb,we,datetime) values
(:indexno,:shotNO2,:EE,:EA,:EB,:CC,:WA,:WB,:WE,:
datetime);
exec sql commit;
exec sql disconnect;
```

Fortran で書かれた既存のプログラムを C 言語に書き換え `exec sql` の記述を追加し `sql` の拡張子を付けて保存する。ECPG を実行するとコンパイル可能な C ファイルが作成される。ショット番号が実験状況の DB とワークステーションのデータの両方に入っているのを、これを連携させ、通電時刻は実験状況の DB から取り込み、真空度はワークステーションのデータを計算している。これらのデータを新たな DB に入れている。コンパイルした C ファイルを動かすと、DB にはショットの進行に応じ新しいデータが書き込まれる。更にこの結果を Web に表示するようにした。表示している画面を図 1 に示す。項目の左か

らショット番号、通電時刻、7 箇所真空度を表している。表示するプログラムは PHP で書いており、大学の情報化研修の際に配られた参考書のプログラムをそのまま移植したものである。ただ、ECPG のプログラムがセグメンテーションエラーで止まってしまうことが度々あるため、現在 C 言語を勉強しながらプログラムを見直している。

DB にデータを保存することにより、新たに備考や、通電のタイミング以外のデータも加えることができる。また、PHP で表示する場合、サーバで JpGraph を動かせるようにすれば自動的にグラフ表示も行なう事ができるようになる。



shot番号	通電時間	ee	ea	eb	cc	wa	wb	we
202702	2006-10-07 09:24:00	-1.15e-8	2.22e-8	-1.14e-8	8.88e-8	8.88e-8	-1.14e-8	-1.15e-8
202701	2006-10-06 22:04:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	8.88e-8	3.11e-8	2.66e-8
202700	2006-10-06 21:52:00	2.22e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.29e-7	4.44e-8	3.11e-8	3.11e-8
202699	2006-10-06 21:24:00	2.66e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.33e-7	8.88e-8	3.11e-8	2.66e-8
202698	2006-10-06 21:12:00	2.22e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.29e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.66e-8
202697	2006-10-06 20:41:00	2.22e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.29e-7	4.44e-8	3.11e-8	2.66e-8
202696	2006-10-06 19:27:00	2.66e-8	4.44e-8	7.55e-8	1.29e-7	4.44e-8	3.11e-8	2.66e-8
202695	2006-10-06 19:15:00	2.22e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.29e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.66e-8
202694	2006-10-06 19:03:00	2.22e-8	4.44e-8	7.10e-8	1.33e-7	4.44e-8	3.11e-8	2.66e-8
202693	2006-10-06 18:51:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.22e-8
202692	2006-10-06 18:39:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	4.44e-8	2.66e-8	2.66e-8
202691	2006-10-06 18:27:00	2.22e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.33e-7	8.88e-8	3.11e-8	2.66e-8
202690	2006-10-06 17:39:00	2.66e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	4.44e-8	3.11e-8	2.22e-8
202689	2006-10-06 17:27:00	2.66e-8	4.44e-8	7.55e-8	1.29e-7	4.44e-8	3.11e-8	2.66e-8
202688	2006-10-06 17:15:00	2.66e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.29e-7	8.88e-8	3.11e-8	2.66e-8
202687	2006-10-06 17:03:00	2.66e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.29e-7	8.88e-8	3.55e-8	2.66e-8
202686	2006-10-06 16:43:00	2.66e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	8.88e-8	3.11e-8	2.66e-8
202685	2006-10-06 16:31:00	2.66e-8	4.00e-8	7.55e-8	1.29e-7	8.88e-8	3.11e-8	2.66e-8
202684	2006-10-06 16:19:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.24e-7	4.44e-8	3.11e-8	2.66e-8
202683	2006-10-06 16:07:00	2.66e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	8.88e-8	3.11e-8	2.66e-8
202682	2006-10-06 15:56:00	2.66e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	8.88e-8	3.11e-8	3.11e-8
202681	2006-10-06 15:44:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.24e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.22e-8
202680	2006-10-06 15:32:00	2.66e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.24e-7	4.44e-8	3.11e-8	2.66e-8
202679	2006-10-06 15:20:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.29e-7	4.44e-8	2.66e-8	2.66e-8
202678	2006-10-06 15:08:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.24e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.22e-8
202677	2006-10-06 14:56:00	2.66e-8	4.44e-8	7.10e-8	1.29e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.66e-8
202676	2006-10-06 14:44:00	2.66e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.24e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.66e-8
202675	2006-10-06 14:32:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.24e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.22e-8
202674	2006-10-06 14:20:00	2.22e-8	4.00e-8	7.10e-8	1.24e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.22e-8
202673	2006-10-06 14:08:00	2.66e-8	4.44e-8	7.10e-8	1.29e-7	8.88e-8	2.66e-8	2.66e-8

図 1. PHP によるデータ表示

ECPG を用いて新しく作った DB を PHP で表示した。

5.2 監視システムの設計と現状

KEK での研修などを通し PIC でのシリアル通信ができるようになり、Web からの DB のアクセスも分かってきたので、発電機周辺機器の状況を監視するシステムを考えた。

DCCT アンプの値の変動には、温度の依存性があるのではという意見が出ていた。そこで、温度とアンプ出力の両方を監視するシステムを設計した。設計したシステムを図 2 に示す。監視システムは、技術研究会での発表を元にワンチップマイクロコンピュータである PIC と Xport で構成し、PC 上のブラウザにて装置の状況を監視できるものと考えた。装置自体は整流器棟地下に設置されており、そこからの出力は整流器棟 1 階の制御盤の端子から取れるようになっている。地下の室温を温度測定素子 (LM35) で電圧値として取り出し、1 階の DCCT 出力と共に PIC で取り込むシステムである。PIC で取り込んだデータは Xport によりネットワーク上で監視できるよ

うにする。整流器棟には LAN は設置されていなかったもので、整流器棟と実験棟を光ファイバーでつなぐことにした。共同溝を通り実験棟と結ぶもので、140 m のケーブルを用意した。1 月に光ファイバーの設置を終えた。DCCT アンプの電流値は抵抗を接続し、端子間の電圧を計り、電流値を出している。PIC にてそのまま電圧を取り込むとアースの問題が出てくる為、絶縁アンプを入れる必要がある。現在は、クランプ式の小型電流センサーを使って DCCT アンプ側の配線に接することなく電流を測定することを検討している。電流計測の試験中の様子を図 3 に示す。測定対象の電流が 4 mA という微小であり、その 1% 以下の変動を知りたい為、分解能を考慮しなければならず、電子回路の問題が残っている。モニターした DCCT アンプの値を DB に入力する部分は JAVA で行なうため、JAVA の知識も習得する課題も残っている。

また、プラズマの計測機器の多様化などにより、従来の CAMAC に頼らない取り込みが増えてきたため、正確な実験の進行状況が必要となっていた。そこで、発電機を制御する PLC (Programmable Logic Controller) とリレーの出力を PIC に入れ、今まで監視デスク上と実験室でしか分からなかった、ショット番号・ショットまでの残時間を Xport でネットワーク上に流し、VisualBasic など自由に利用してもらうよう考えた。これにより、より正確に取り込みが行なえるようになり、更により安全に実験が行なえるようになる。現在、配線などを行ないながら、PIC

のプログラムを検討している。

課題点はいくつかあるが、NIFS でも Xport に関するシステムを考えていることから、技術交流を 2 月に行なう事になっており、共に勉強しあうことになっている。



図 3. 実験中の PIC

電流センサーの出力を PIC に取り込み、電流値を計算し、LCD に出力してテスターの値と比較する。

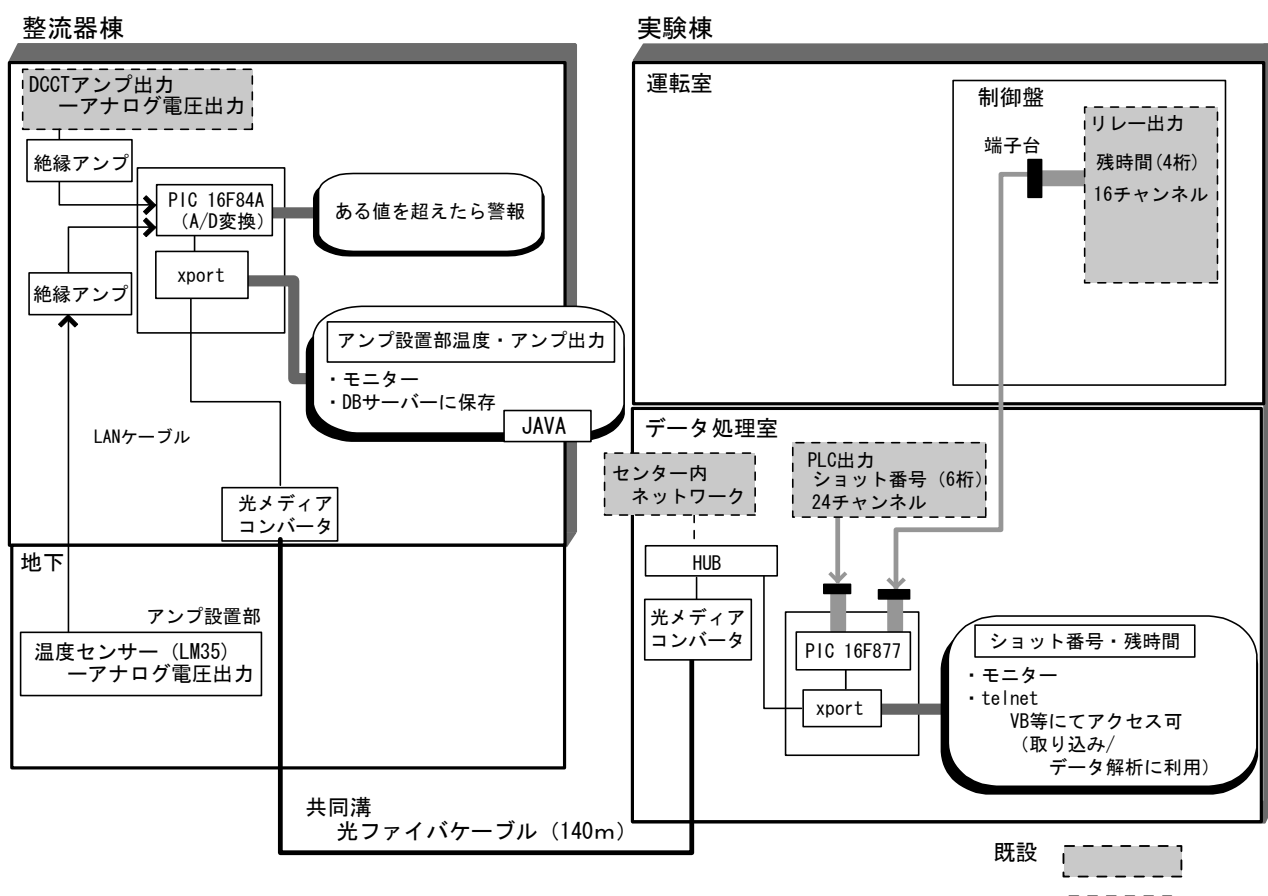


図 2. 装置の監視システム図

PIC にセンサーや PLC・リレーの出力を取り込み、Xport にてネットワーク上から装置の状態・実験状況を監視する。

6. まとめ

いくつかの研修を受け、監視システムの設計を行った。システム自体は新しいものではないが、装置の監視技術に関して全く知識のなかった状態から低価格でのシステムを設計できるようになった。最初はまばらに受けていた講習もどこかでつながり、今回のシステム構築にまで至る事ができた。

このシステムでは全て DB の利用と、Web でのモニターを前提にしており、この点では様々なサーバに対する設定が必要となる。これに関して実験的なサーバを利用する事ができ、設定に関してもほとんど管理者に依頼すれば可能であった。PLC の出力を取るにしても図面の見方も分からなかったが、担当教員の指導と技術職員の協力により図面の解読と接点の利用にこぎつけることができた。作業に関しても協力を頂いている。このような恵まれた環境もシステム設計が行なえた背景である。

技術力の向上には、様々な方法があり現在の社会ではインターネットでの情報収集も手である。今回のシステムでも ECPG や JpGraph などはインターネットで見つけた。しかしながら様々な研修を通し様々な方の意見を聞くことにより、自分自身が思っ

てもいなかったアイデアが思い浮かんだりするし、また仕事の励みになるのではないかなと思う。

研修や交流会、発表会等を通じ、得た知識を自分の職場で生かすには周囲の職員の協力なくしては出来ない事である。これからも、研修で得たものを業務に活かしていきたい。

謝辞

本報告書作成にあたりご指導頂いた板倉先生、周囲の技術職員の方、プラズマ研究センターの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 大津直史, 佐藤和弘, X-PORT を利用した携帯電話による装置監視の試み, 第 17 回分子科学研究所技術研究会講演報告書 (2006) 80-83.
- [2] Richard Stones, Neil Matthew, エキスパートから PostgreSQL 活用テクニック, 株式会社インプレス, 東京, 2002.
- [3] 後閑哲也, C 言語による PIC プログラミング入門, 株式会社技術評論社, 東京, 2002.

顕微鏡画像の遠隔監視システム ～ガラス包有物の水素分析～

大和良広

筑波大学研究基盤総合センター（応用加速器部門）

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

応用加速器部門では、マイクロビームによる岩石中のガラス包有物の水素濃度分析を行っている（図1）。第2回筑波大学技術職員技術発表会に於いて「地球科学試料中の水素分析のためのマイクロビーム制御システム及び照射試料駆動制御システムの開発^[1]」というタイトルで発表したシステムのうち、試料の照射位置を決定するために必要な顕微鏡をリモートで監視する装置について改良・改善を行った。

1. はじめに

これまで、ガラス包有物（図2）の観察やマイクロビーム（図3）の形成のためのモニターは、アナログの CCD カメラを顕微鏡（図4）に接続し BNC ケーブルで測定室から制御室にビデオ信号として送っていた。このため通常のテレビ画像と同じ 640×480 ピクセルの解像度しか得られず、画像に外来ノイズの影響も受けやすかった。しかし、今までよりも構造の複雑なガラス包有物を特定しマイクロビームの照射位置に合わせることが必要になったため、照明の高輝度 LED 化およびカメラのデジタル化を行った。これにより高照度・高解像度（1,024×768 ピクセル）の顕微鏡画像観察が可能となった。

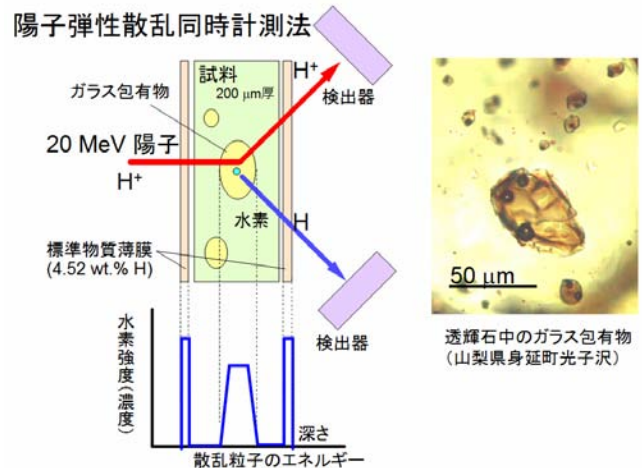


図1. 水素分析方法の概略

陽子弾性散乱同時計測法とは、固体試料に 20MeV の陽子線を照射し、試料中の水素により散乱された陽子と、同時にはじき飛ばされる試料中の水素を同時検出して、ppm～wt.%の水素を非破壊に定量する手法である。この手法では測定試料を既知水素濃度の標準物質で挟んで同条件で分析するため、両者の測定に関わる誤差を相殺することができ、高い正確度の定量が可能。

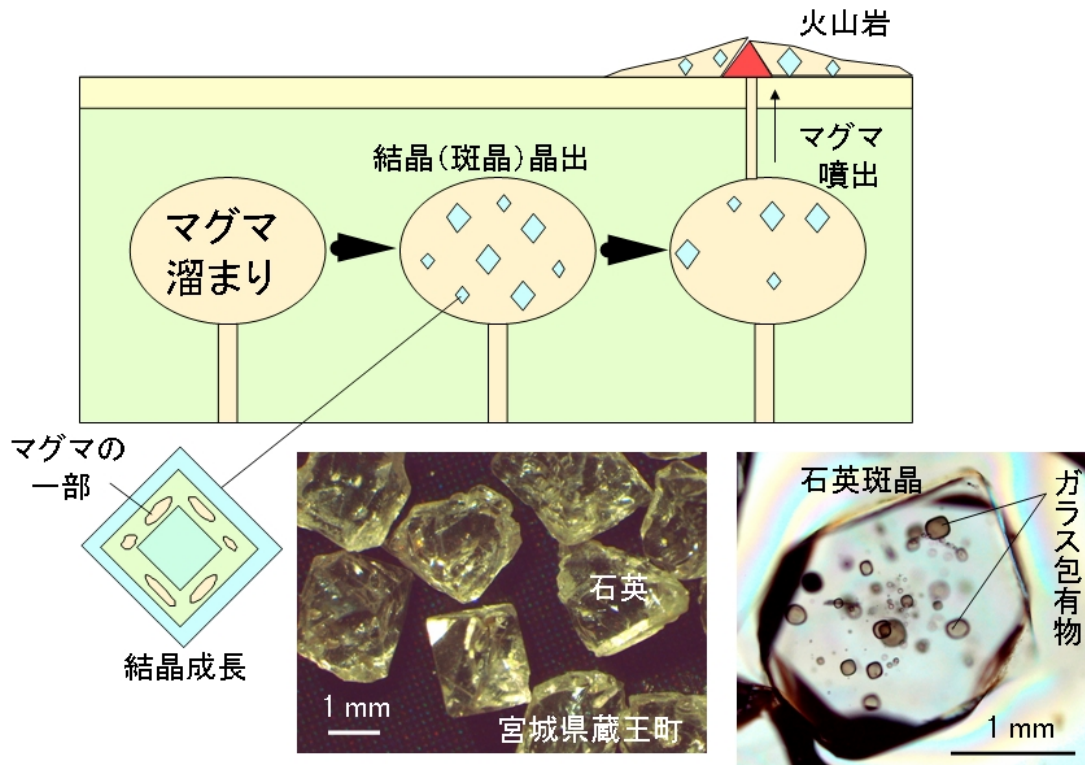


図2. ガラス包有物（メルトインクルージョン）

酸性火山岩の石英斑晶中に取り込まれた初期のマグマ物質
火山岩の包有物の揮発性物質の分析によって、島弧マグマの発生と揮発性成分の関係、地殻内部での水の挙動などの解明、ひいては火山噴火予知への貢献も期待される。

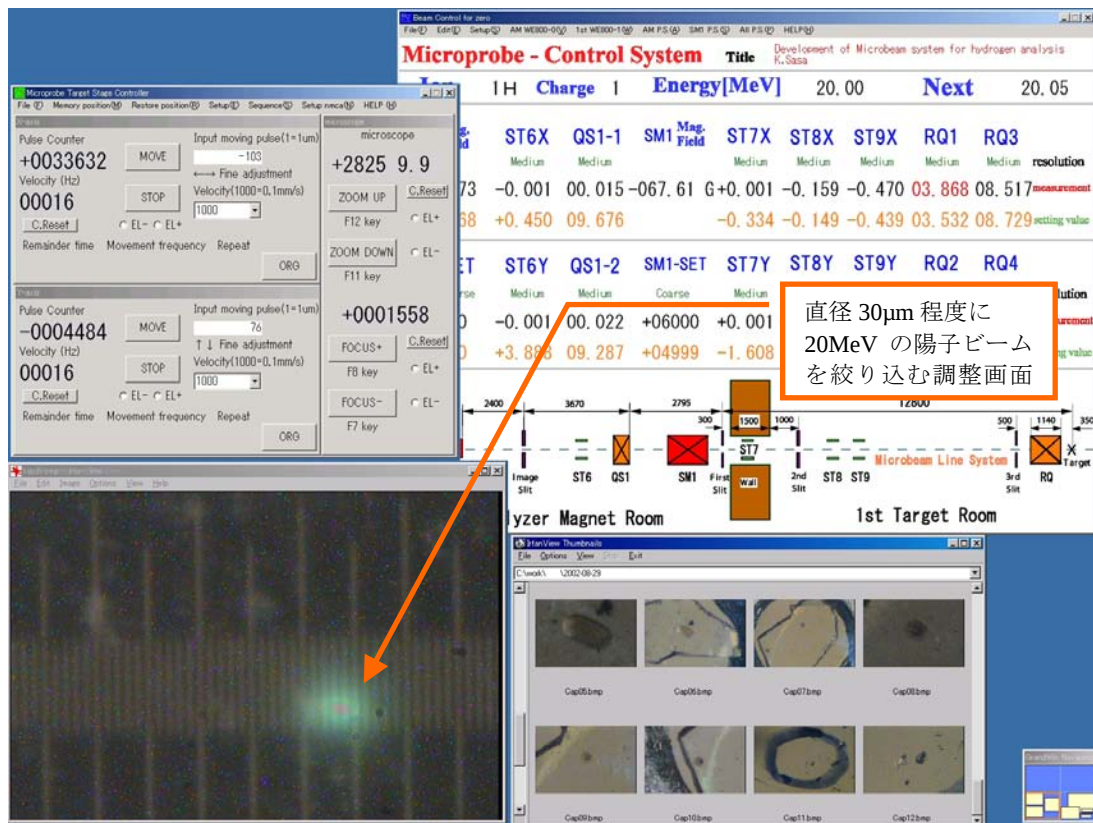


図 3. マイクロビーム形成

通常の実験で使用される加速イオンビームの収束直径は $\phi 1\sim 2\text{ mm}$ 程度である。
これをスリットや電磁石レンズで $\phi 10\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 程度まで試料に合わせ小さくしぼる操作を行う。

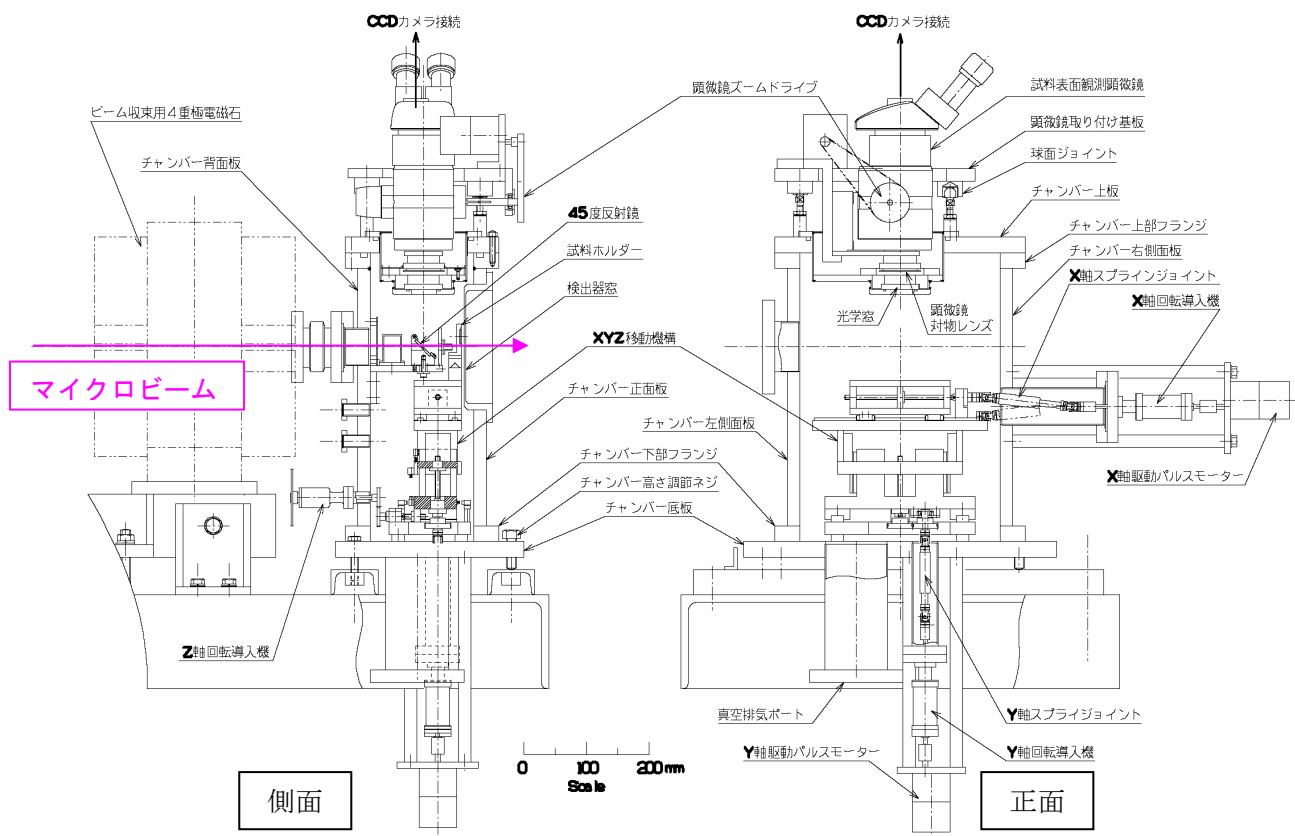


図 4 試料チャンバー・顕微鏡図面

2. 特殊な観察装置

本システムは、真空中を加速されたマイクロビームで試料の水素濃度を分析するため、通常の顕微鏡と異なり非常に複雑な構造をしている。図4の様に試料はXYZに動作するステージ（移動機構）上にマウントされビームを自在な位置に照射するため地面に対して垂直である。ところが高エネルギーのビームと同じ軸上に顕微鏡とカメラを置くことは不可能なので顕微鏡は地面に対して水平に設置されている。すなわち対物レンズと試料が90°ずれて設置されており45°のミラーによって遠くから観察する。さらに実体顕微鏡（Leica Microsystems MZ12₅）で14インチモニター表示時700倍程度の倍率を要求するので投影レンズ等が必要である。

この様な条件で鮮明かつ高解像度な画像を得るのは非常に難しい。

3. 照明の高輝度LED化

カメラの性能を調べるためたくさんのメーカーよりデモ機をお借りして顕微鏡での試料画像のチェックを行った。その過程で画像の不鮮明さに後方照明の照度の影響がかなり大きいことがわかったため、従来のハロゲンライト（Leica Microsystems CLS 150XD）で45°ミラーの反射光を使った照明から「超高輝度白色LED（日進電子工業（株）W3SP-28）+集光レンズ」をマイクロビームと同じ光軸に設置した照明に変更（図5）したところ、試料画像の鮮明さが増した。

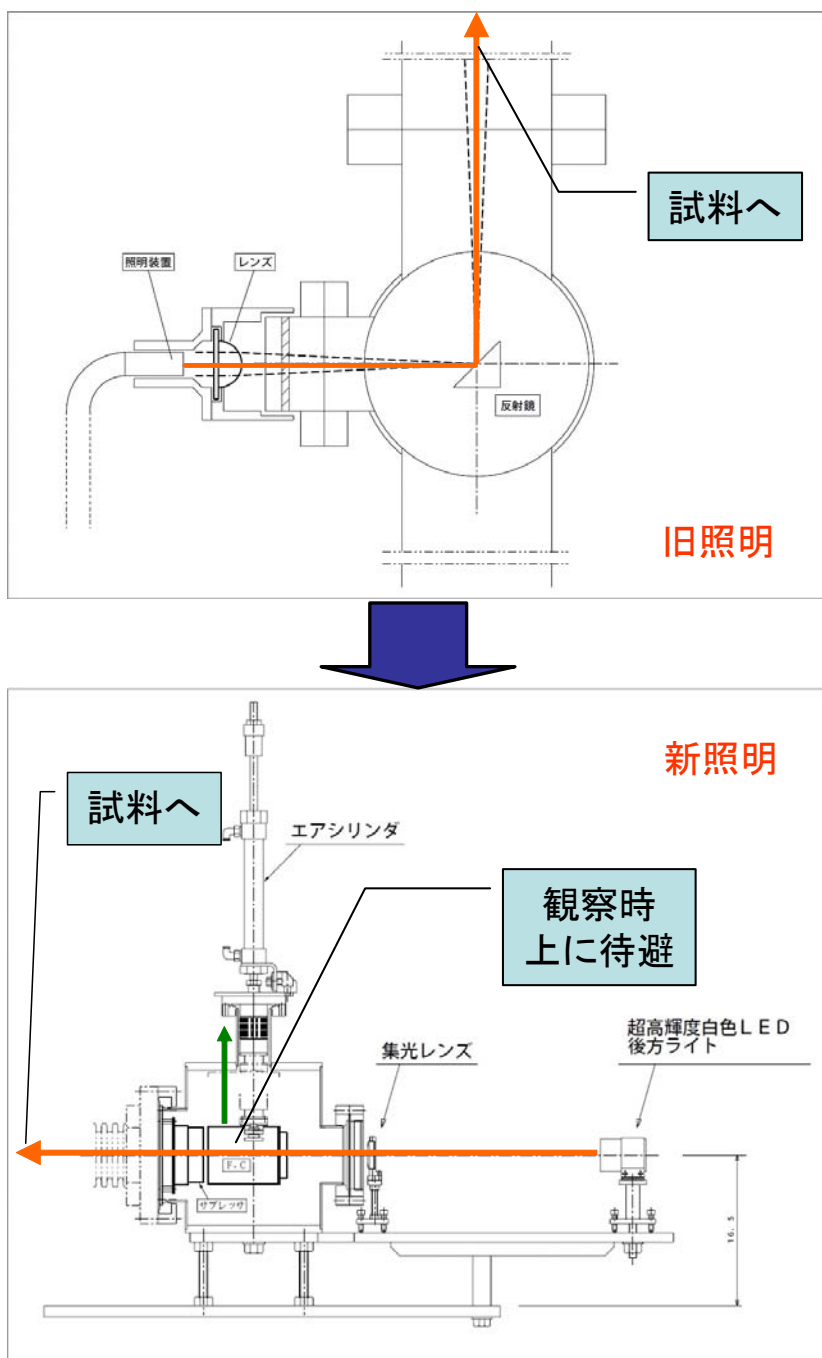


図5. 顕微鏡後方（試料透過光）照明の変更

4. CCD カメラのデジタル化

4.1 解像度の向上

本システムの導入まではアナログのCCDカメラを使用してきた。最初に顕微鏡と同時に設置されたのは 1/2 インチ CCD の Sony DXC-200A であった。これを用いてしばらく実験してみたところ、最低被写体照度と倍率が足りずビームトランスポートや包有物の位置設定が難しかった。そのため、1/3 インチ CCD で最低被写体照度が 2 桁感度の高い Moswell Co., Ltd. MS-560A と交換した所、照度・倍率とも飛躍的に改善した。このカメラを用いて数年は BNC ケーブルで測定室から制御室にビデオ信号として送った画像を、モニターテレビと PC のビデオキャプチャードを用いて観察・記録していた。

ところが、それまでの実験では比較的発見しやすい包有物(図6)ばかりを測定していたが、研究の進展により複雑な包有物(図7)を特定し測定しなければならなくなった。この条件をクリアするためには解像度の向上が必要であった。また、照度やゲイン、ホワイトバランスなどの画質調整が必要となき、アナログカメラは本体に付いているディップスイッチの設定が必要で実験中は現場に立ち入れない我々の環境では非常に不便であった。

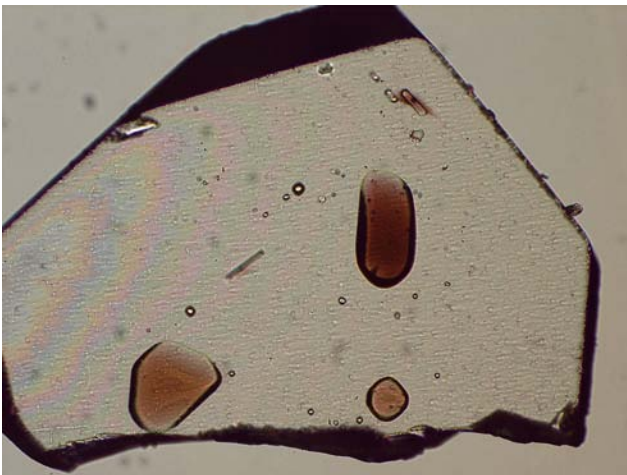


図 6. 試料 (宮城県荏田郡蔵王町円田土浮山 D)

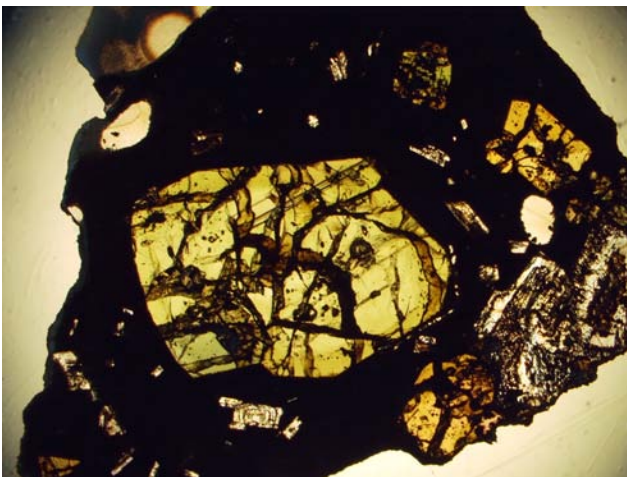


図 7. 試料 (山梨県中富町西島月見橋 3-2-A-A)

4.2 デモ機による評価と選定

4.1 の様な要求から顕微鏡用カメラの交換を検討し、以下のような多数のデモ機を使用して価格・性能の評価を行った。

Olympus DP12、浜松ホトニクス (株) C8484、(株) アートレイ Artcam-300MI, Artcam-200SH、(株) 日本ローパー QImaging RETIGA EXi、Nikon DS5Mc-L1、Sony XCD-X710CR, DFW-X710 で、価格性能比で最終的に Sony DFW-X710 を選定した。

顕微鏡の対物レンズの分解能の仕様限界、試料の傾きやミラーの角度なども少なからず観察映像の劣化に影響がある点を考慮し、実際の試料チャンバー顕微鏡にマウントした状態での評価が有効であった。

4.3 現場カメラ観察用 PC

測定室の試料チャンバー側近にも観察用モニターは必要で、現場で快適に動作し、リモート監視を行っても問題のないパフォーマンスである PC を予算範囲で選択した。PC とデジタル出力カラーカメラモジュール(4.2)のインタフェースには、観察・計測・キャプチャソフトウェア(Media Cybernetics Inc. Image-Pro Express5.1)が対応している IEEE1394 (Technoscope Co., Ltd. PFW-46) を採用した。

これにより、カメラ本体を操作しなくてもソフトウェアで照度やゲイン、ホワイトバランスなどをコントロールでき(図8)、マーキング、長さや面積の計測などが可能となった。

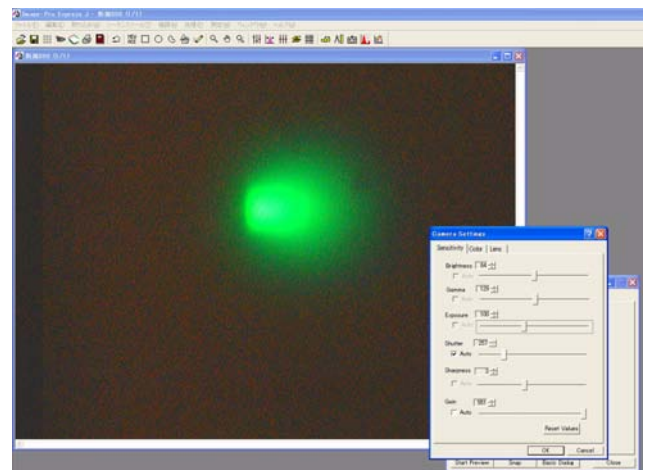


図 8. ソフトウェアによるカメラの画質調整

5. リモート監視

5.1 画像信号伝送方法の検討

1階にある測定室の水素分析用コース（ローカル）と2階にある制御室（リモート）（図9）は新しくケーブルを張る場合の経路が約40mである。これまでは既設のBNCケーブルを使用できたが、ローカルとリモートで顕微鏡画像を見たい場合PCが介在するとどうしてもデジタル信号ケーブルが必要である。そのため、CAT5 UTPケーブルで接続するUSB2エクステンダーやIEEE1394光伝送リピーター、IEEE1394ロングケーブルなどを検討したが、ローカル・リモートの切替がうまくいかない可能性が高かったため既設LAN配線（100BASE-TX）を用いた方法を検討した。

5.2 IP対応リモートKVM

ローカルとリモートで同じ画面及びキーボード、マウス操作ができれば良いだけなので、KVM（Keyboard/Video/Mouse switch）が遠隔で使えれば最も簡単にリモート監視が実現できると考え（図10）、既設LAN配線が利用できるKVM over IPユニット（日本ラリタン・コンピュータ(株) LARA Express）を使用してみた。

ところが、通常のアプリケーション利用程度であれば全く問題ないが、リアルタイム性を要求するビデオ画像を表示するためにはフレームレートが低すぎ、画像のリフレッシュノイズも酷かったため、顕微鏡画像の遠隔監視には全く利用できなかった。

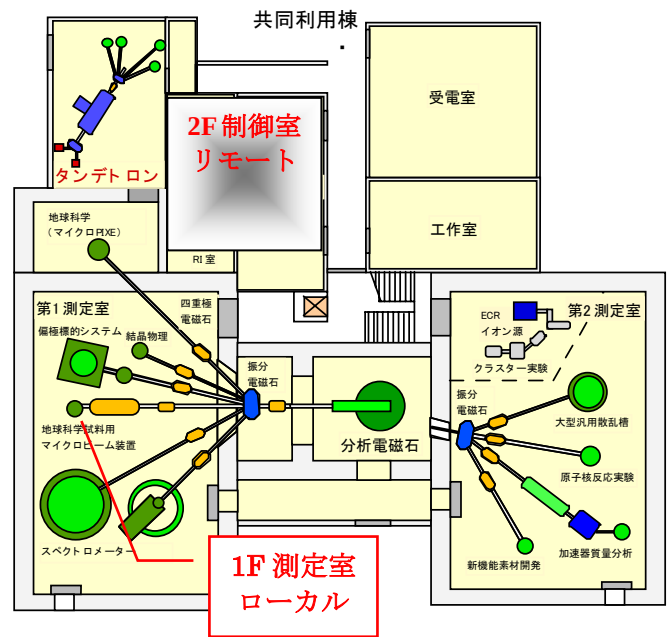


図9 ローカル・リモート位置関係
1階第1測定室0°コース試料チャンバーから
2階加速器制御室コントロールPCまでは遠く、
現場の顕微鏡画像を高解像度かつ劣化無く送る
にはデジタル化が必要。

1 階測定室

2 階制御室

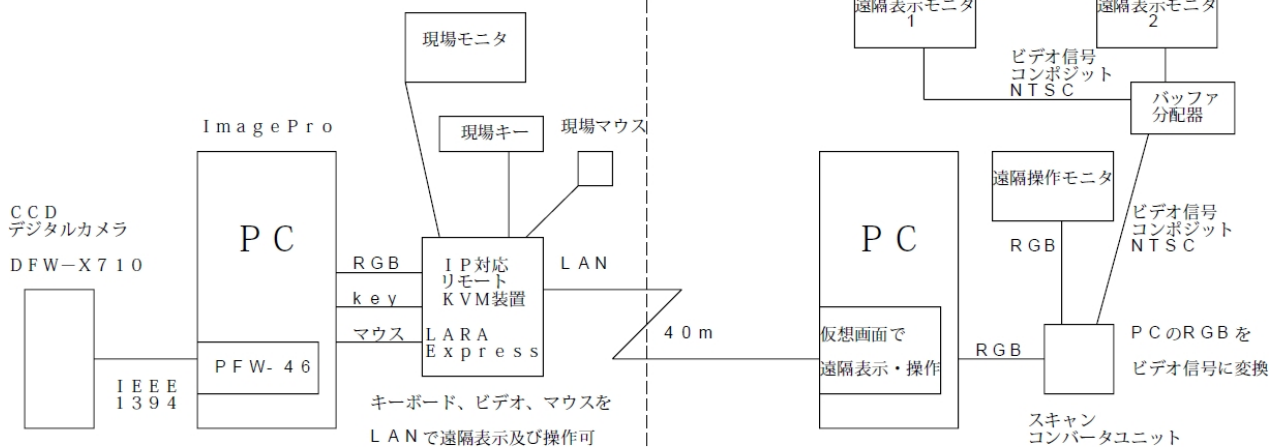


図10. KVM over IP ユニットでの接続図

5.3 UltraVNC

IP 対応リモート KVM の性能が期待外れだったため過去に遠隔制御用に使用経験のある UltraVNC¹ を使用して遠隔監視及びカメラコントロールを試した。画像のリフレッシュノイズは無いものの動画のフレームレート²が 5 fps 程度で、試料照射位置の決定には使用できるがマイクロビーム形成のためのリアルタイムモニターとしては使えなかった。

5.4 リモートデスクトップ

水素分析実験のための顕微鏡モニターとしては UltraVNC のフレームレートでも不満があり、Windows XP Professional に標準装備のリモートデスクトップを試した。結果は良好で、8 fps 程度のフレームレートが得られた。

5.5 ギガビット LAN による高速化

リモートデスクトップのフレームレートでもまだ、マイクロビーム形成のためには利用者のストレスが高かった。そこで、既設の情報コンセント 1 系統を専用で使用し、さらに測定室や制御室内の足りない部分には新規に STP ケーブルを敷設してローカル・リモート間の通信をギガビットネットワーク化した(図 11)。これにより、実効通信速度は 3 倍以上になり、動画のフレームレートが 12 fps 程度まで向上した。カメラ自身のフレームレートが Max. 15fps なので概ね良好な結果と言える。

また、ネットワークの設定をジャンボフレームに設定し速度の向上があるかテストしたが、ファイル転送などのスループットは向上したものの動画のフレームレートは変わらなかった。

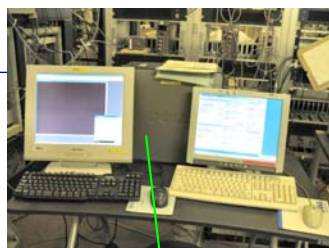
今後さらなるフレームレートの向上ができるか IgScope や PacketiX Desktop VPN などのソフトウェアでもテストする予定である。

水素分析顕微鏡モニターリモートシステム 2006

顕微鏡カメラ DFW-X710



0° コース
顕微鏡PC
DELL GX620



IEEE1394
400Mbps

Image-Pro
EXPRESS
Ver.5.1J
でモニター
&
コントロール



計算機室
ギガハブ経由

ギガビットLAN
実効速度200Mbps

AM室
情報コンセント
経由

ギガビットLAN
で
リモート
デスクトップ



2F コントロールPC
EPSON Direct
Endeavor Pro3300

ギガLAN化で 64Mbps → 200Mbps に3倍以上速度向上

図 11. ギガビットネットワーク化

「1F 測定室ローカル」から分析電磁石室 (AM 室) 情報コンセントまで (図 9 参照) と 計算機室ギガ対応スイッチングハブからコントロール PC までの間に CAT5e STP ケーブルをはり 顕微鏡画像を見やすくするためのフレームレートの向上ができた。

¹ http://kp774.com/soft/uvnc_jp/

² ここでのフレームレートは筆者の体感速度

6. 水素分析研究成果

本システムを使用した研究論文^[2]として、学会誌等 3 6、国際会議発表 8、口頭発表 1 1、学士論文 5、修士論文 2 が提出されている。

具体的な 2 例を以下に示す。

6.1 原爆放射線量再評価 DS02 のための 広島元安橋花崗岩の水素濃度測定

広島爆心直下の地でその姿をとどめていた元安橋（図 1 2）の花崗岩を水素分析し DS02 の評価データの 1 つとして分析結果を提供した。^[3-5]



図 1 2. 現在保存されている当時の元安橋の欄干

花崗岩中の水素の分布は一様ではないので岩石の薄片上で無作為に測定点を選び多数回の測定を行い平均値を求めた。測定した花崗岩は U4-1 のラベルがあり、南北に抜いたコアサンプルの北側から 4 番目、深さ 6~8 cm、上方の部分である。この花崗岩サンプルから厚さ 0.2 mm の薄片を 11 枚作成し測定を行った（図 1 3）。

測定結果は、 $0.29 \pm 0.11 \text{ wt. \% (H}_2\text{O)}$ で Iwatani ら^[6]の、灼熱減量法およびカール・フィッシャー法により求めた水素濃度と誤差範囲内で一致した。



図 1 3. 水素濃度分析のためにマウントした元安橋の薄片試料を含むチャンバー内試料ステージ

6.2 ガラス包有物の水素濃度測定

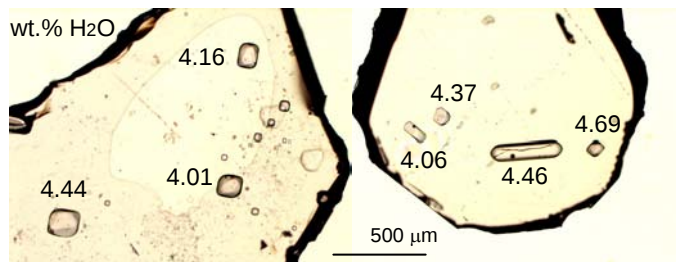
国内外の様々な試料を計測してきた。以下にこれまで測定した試料のリスト³を示す。

- 宮城県蔵王町 円田 土浮山高温石英
- 茨城県日立市 初崎
奥日光流紋岩類（白亜紀）
- 富山県東礪波郡城端町 細尾峠
月長石流紋岩（白中月長石流紋岩 24-25 Ma）
- 兵庫県多紀郡今田町 立杭
流紋岩（有馬層群 71-67 Ma）
- 静岡県田方郡修善寺町 柏久保
高温石英（白浜層群酸性凝灰岩 7-8 Ma）
- 秋田県雄勝郡雄勝町 荒湯 高温石英
- 滋賀県大津市藤尾町 小関峠
石英斑岩（比叡花崗岩体を貫く岩脈 白亜紀）
- 鹿児島県鹿児島郡桜島町 咲花平
- 兵庫県多紀郡丹南町 不来坂
流紋岩（有馬層群 71-67 Ma）
- 奈良県宇陀郡室生村 室生
流紋岩質溶結凝灰岩（7-10 Ma）
- 長野県更埴市 稲荷山
斜長石流紋岩（小川層下部 7.5 Ma）
- 神奈川県津久井郡津久井町 早戸川
玄武岩（15-16 Ma）
- 山梨県南巨摩郡南部町 上佐野
玄武岩質安山岩（5-6 Ma）
- 山梨県南巨摩郡身延町 光子沢
クロム透輝石^[7]

他多数。今後、これら試料の詳細な測定データ解析を進める。

一例として、宮城県蔵王町円田 5 万年の蔵王火山噴出物の石英斑晶（無色及び茶色透明均質・200 μm 厚の両面研磨片）の分析結果を示す（図 1 4）。

単結晶内の包有物の水濃度



複数包有物の濃度：ほぼ一定 ($1\sigma=7\%$ 以内)

図 1 4. 宮城県蔵王町円田石英試料中の
ガラス包有物の水換算濃度測定結果

本システムを用いることにより、析出結晶を含む不均質包有物の水素濃度も決定が可能で、これはその他（赤外吸光分析（FTIR）など）の分析手法では不可能である。

³ サンプル収集当時の旧住所での表示

7. まとめ

照明の高輝度 LED 化とカメラ及び信号伝送方式の変更によって遠く離れた測定室の実体顕微鏡を制御室で操作し高解像度で観察するシステムを構築した。

アナログカメラ画像では輪郭などの特定が難しかった複雑なガラス包有物が本システムを使用することによりかなり見やすい環境となった。

このことにより、測定する包有物の照射位置設定時間が短縮し実験時間を有効に使うことが可能で多数の包有物の発見時間短縮に貢献できた。

謝辞

本システムの資源は、生命環境科学研究科 地球進化科学専攻 黒澤正紀 講師の科学研究費補助金より支出させていただきました。黒澤講師にはサンプルの収集から薄片試料作製まで一手に引き受けていただき地球科学的見地から様々なご助言を頂きました。

研究基盤総合センター応用加速器部門 石井聡氏には、照明の高輝度 LED 化を一手に引き受けていただき、観察テストにも協力いただきました。

また、計測・解析を中心に当分析システムを統括的に担当されている数理物質科学研究科 物理学専攻 小松原哲郎 講師、ビームライン全般・マイクロビーム形成を中心に担当されている数理物質科学研究科 物理学専攻 笹公和 講師に様々なご協力を頂きました。

この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 大和良広. 地球科学試料中の水素分析のためのマイクロビーム制御システム及び照射試料駆動制御システムの開発, 第2回筑波大学技術職員技術発表会講演予稿集 (2003) 36-43.
<http://www.tech.tsukuba.ac.jp/2002/abstract/05yamato.pdf>
- [2] 古野興平. 共鳴原子核反応法による岩石・鉱物中の水素分析法の研究 課題番号:12304032, 平成12年度～平成14年度 科学研究費補助金 基盤研究(A)(2) 研究成果報告書 (2003).
- [3] 小松原哲郎、笹公和、石井聡、大和良広、宮川一尚、佐藤健一郎、黒澤正紀. 陽子弾性散乱同時計数法による花崗岩の水素分析, 広島・長崎原爆放射線量新評価システム DS02 に関する専門研究会報告書 (2005) 120-123.
- [4] 小松原哲郎、笹公和、大島弘行、木村博美、田島義一、高橋努、石井聡、大和良広、黒澤正紀、古野興平. 第10章中性子測定と計算値に寄与する因子、E. 花崗岩中の水素含有量 「広島および長崎における原子爆弾放射線被曝線量の再評価」線量評価システム 2002、DS02, 2006 年財団法人 放射線影響研究所.
- [5] T. Komatsubara, K. Sasa, H. Ohshima, H. Kimura, Y. Tajima, T. Takahashi, S. Ishii, Y. Yamato, M. Kurosawa, K. Furuno, Hydrogen Content in Granite, "Reassessment of the Atomic Bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki-Dosimetry System 2002", Report of the Joint US-Japan Working Group, Chapter 10, Part E, pp.750-754, Radiation Effects Research Foundation (2005).
- [6] H. Hasai, K. Iwatani, K. Shizuma, M. Hoshi, K. Yokoro, S. Sawada, T. Kosako, H. Morishima, Health Phys. 53 (1987) 227.
- [7] 黒澤正紀、宮川一尚、小松原哲郎、佐藤健一郎、笹公和、石井聡、大和良広、小林洋二、安間了. 伊豆一小笠原弧衝突境界付近に発達するクロム透輝石を含む岩脈の水濃度, 月刊地球 27 (2005) 519-524.
- [8] T. Komatsubara, K. Sasa, K. Okumoto, S. Ishii, Y. Yamato, K. Satou, K. Furuno, M. Kurosawa, Development of ERCS hydrogen analysis for melt inclusions in erupted magmatic samples, N.I.M. B 251 (2006) 237-245.
- [9] K. Sasa, K. Furuno, Y. Yamato, H. Ohshima, S. Ishii T. Komatsubara, M. Kurosawa, The Tsukuba high-energy nuclear microprobe for hydrogen analysis of mineral samples, Nucl. Instr. and Meth. B210 (2003) 48-53.
- [10] K. Furuno, T. Komatsubara, K. Sasa, H. Ohshima, Y. Yamato, S. Ishii, H. Kimura, M. Kurosawa, Measurement of hydrogen concentration in thick mineral or rock samples, Nucl. Instr. and Meth. B210 (2003) 459-463.

医学安全管理室の業務とその役割

櫻井秀子、文随和美、渡邊祐子
筑波大学人間総合科学等支援室（医学系）
〒305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

医学安全管理室^[1]は平成 16 年 4 月より設置され、全学の環境安全管理室^[2]と連携をとりながら医学の環境保全のための業務を行っている。今回、医学安全管理室の業務内容を報告する。

1. はじめに

地球環境保全が叫ばれている現在、環境中へ排出される物質を規制する法律は年々厳しくなっている。筑波大学においては、教育、研究活動等により廃棄される物質の処理を、開学時には「実験環境管理室」の名称でその役目を担っていた。法人化に伴い、平成 16 年 4 月 1 日に、教育研究活動等における安全衛生も含め環境管理等に関する業務を一元的に行う組織として、「環境安全管理室」と変更されている。社会的には、環境関連法規・条例・協定の遵守、環境保全活動への取り組み、環境負荷の低減等、果たすべき役割は大きなものとなっている。医学安全管理室は、同年度に医学地区の研究室と「環境安全管理室」をつなぐ窓口の役割と、医学地区の環境保全を目的として設置された。現在の構成員は、教員 5 名（基礎医学系 2 名、臨床医学系 1 名、社会医学系 2 名）が担当となっている。事務部門の研究支援係より支援を受けている。技術職員は兼任で 3 名配置され、共通部門として安全管理の役割を担い、支援業務に当たっている。

2. 業務内容

一年間の業務内容を表 1 に示す（右段）。

2.1 実験廃棄物の共同搬出

医学地区の共同搬出は一年間に 3 回行っている。平成 17 年度第 1 回から平成 18 年度第 2 回までの共同搬出実施状況を表 2 に示す。毎回約 20 グループが約 100 個のポリタンクを搬出している。廃棄区分の傾向は大きくは変わらない。

表 2 医学地区共同搬出件数

	平成17年度			平成18年度	
	第1回	第2回	第3回	第1回	第2回
ポリタンク数	111	90	97	88	118
グループ数	22	20	21	17	22
無機系廃液 (L)	49.8	104.5	54.6	12.3	54.0
有機系廃液 (L)	772.9	464.3	513.0	663.5	571.6
写真系廃液 (L)	332.6	294.0	253.0	163.0	693.0

表 1 平成 18 年度業務カレンダー

平成 18 年 4～12 月	
4 月	医学地区安全管理 WG 委員の変更・新設申請受付（通年随時）
	PRTR 法関連試薬移動量の集計
5 月	第 1 回実験系廃液共同搬出申し込み締め切り（22 日）
	安全管理室保管分不要薬品等の分別管理作業（29 日）
6 月	実験安全管理説明会・試薬管理システム説明会（5 日）
	安全管理室保管分不要薬品等の分別管理作業（26 日）
7 月	第 1 回実験系廃液共同搬出（3 日）
8 月	ケタミン講習会（4 日）
9 月	安全管理室保管分不要薬品等の分別管理作業（25 日）
10 月	第 2 回実験系廃液共同搬出申し込み締め切り（4 日）
11 月	第 2 回実験系廃液共同搬出（6 日）
	局所排気装置（ドラフト）等定期自主検査者養成講習会（22 日）
	安全管理室ドラフト自主点検実施（27 日）
平成 19 年 1～3 月	
1 月	試薬管理に関するアンケート実施（10～18 日）
	安全管理室保管分不要薬品等の分別管理作業（29 日予定）
2 月	技術職員研修・東京大学環境安全研究センター環境安全講習会（5 日予定）
	医学安全管理 WG 委員会開催（7 日予定）
	技術職員研修・東京大学環境安全研究センター施設見学会（19 日予定）
	第 3 回実験系廃液共同搬出申し込み締め切り（日程未定）
	安全管理室保管分不要薬品等の分別管理作業（26 日予定）
3 月	第 3 回実験系廃液共同搬出（日程未定）
	安全管理室保管分不要薬品等の分別管理作業（26 日予定）

*業務予定については 1 月 26 日現在

2.2 試薬管理システムの利用支援

学内の試薬管理コンピューターシステムへ利用者登録を行うことにより、試薬管理ができるようになる。

医学安全管理室では下記の支援を行っている。

- ①利用者の登録、変更、追加の窓口になる。
- ②利用の説明会を開いている。
- ③データベースに掲載されていない試薬の登録申請を行っている。
- ④バーコードリーダーの貸し出し、バーコードラベル印刷の提供を行なっている。これらを行うことにより利用の推進を図っている。

2.3 不要試薬の再利用

循環型社会の目的は、資源の消費抑制と環境負荷の低減である。“もったいない”精神である。医学安全管理室では、退職、転出等で不要になった試薬で利用可能なものを必要な研究者に利用してもらうため、試薬の一覧をホームページに載せて医学地区内から見るができるようにした。平成17年度よりスタートして平成18年12月までで、回収した試薬は508本。リサイクルした試薬は150本。グループ数はのべ35グループであった(図1)。

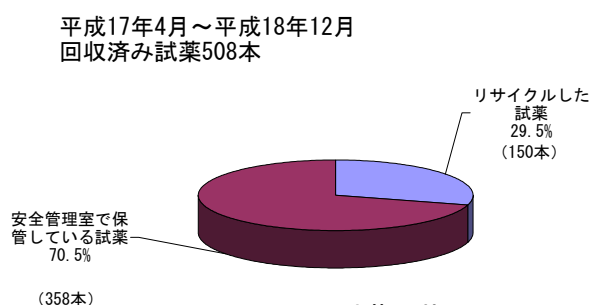


図1 再利用試薬の状況

2.4 管理者不明の試薬類処理

本来保管する場所でないところに放置された管理者不明の試薬や廃液のポリタンクは、一般社会では不法投棄であり、あってはならない残念なことである。管理者の移動、退職などによって生じた例がほとんどである。発足当初は、問い合わせが多くあり、共通の低温室、廊下等の現場に足を運んだが、最近では少なくなった。

2.5 安全管理 WG 委員の追加登録及び変更

同じ研究グループでも研究室が違っていて連絡がスムーズに伝わらないときは、ワーキンググループ(WG)委員を複数にして、情報がすべての人に伝わるようにしている。WG委員が転出等で不在となった場合は、事務部門の研究支援係と連絡を取り合い対応している。現在WG委員は87名である。

2.6 実験安全管理説明会

実験廃液、感染性廃棄物、試薬の管理^[3]について、実験者が守るべきルールについて説明を行っている。発足当初はWG委員を対象に行っていたが、現在は新任者を中心に行っている。また、必要に応じて臨時に開催している。

3. スタッフミーティング

技術職員は3人すべてが兼任でかつ業務の曜日が違っている。さらに業務先の場所も違っているため、1週間に1度のミーティングが申し送りの場となる。曜日ごとの担当者が行った業務記録をコンピューターに書き込み、全員が同じ情報を共有して、業務が円滑に行えるようにしている。

4. 今後の課題と対策

様々な部門の協力を得ながら業務を行ってきた結果、医学において、実験廃棄物、不要試薬等の問題が、少しずつ改善されて来ている。しかし、医学安全管理室は設置されてからまだ日も浅く、経験の蓄積が不十分である。そのため、今後も「環境安全管理室」と連帯を強めなければならない。

同時に、他の機関の施設の見学、講習会、研究会へ参加するなどして技術職員のスキルアップを図らなければならないと考えている。

廃棄物の適切な処理、処分のため、利用者への啓蒙活動を工夫していきたい。たとえば、利用者自らが出した廃棄物がどのように取り扱われ処理されているのか、その現場状況を見学することは、廃棄物の適切な処理、処分の重要性を知ることとなり、環境安全教育に意義あることと考える。

また、廃棄物問題の上流に位置する試薬管理システムの利用推進のため、各グループの利用状況調査を実施して、有効な支援を継続したい。

5. まとめ

技術職員3名が兼任であることは、情報の共有化、伝達等は難しくデメリットもあるが、他の業務を担当することから得る情報は、利用者の現場の声であり、医学安全管理室を運営するために役立つことが多くある。

よりよい教育・研究活動を維持するため、安全管理には、教育、広報、監視、相談窓口が必要であり、医学安全管理室はその一端を担うべく、日々の業務の遂行に努めている。

よりよい環境保全のため、足を運んで現場を見ること、現場を知ることが必要である。そのために医学安全管理室は利用者にとって身近なものでなければならないと考える。局所排気装置(ドラフト)の管理や廃棄物等の処理に関する遵守意識を高めるために、環境安全管理室と連帯をはかりながら、医学地区の状況に応じた安全管理室を目指したい。

参考文献

- [1] 筑波大学医学内共同利用施設医学安全管理室
<http://www.md.tsukuba.ac.jp/local/anzen/>
- [2] 筑波大学環境安全管理室(実験廃棄物・試薬管理関係)
<http://jtukan1.sec.tsukuba.ac.jp>
- [3] 実験系廃棄物取扱の手引き(改訂版)筑波大学(2001)

医学安全管理室内設備



<←劇毒物保管庫>



<ドラフト→>

実験安全管理説明会（平成 18 年 6 月 5 日開催）



局所排気装置（ドラフト）等定期自主検査者養成講習会（平成 18 年 11 月 22 日開催）



<←学群実習室>



<学群棟屋上→>

ドラフト屋外設備の点検

医学安全管理室ドラフト自主点検（平成 18 年 11 月 27 日実施）

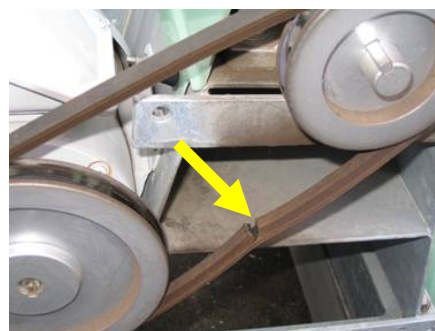


学系棟屋上で点検中の
安全管理担当教職員

<学系棟屋上>



ドラフト屋外排気筒



点検で発見されたベルトの亀裂

ウニの室内飼育系の確立

土屋泰孝¹

筑波大学生命環境科学等支援室（下田臨海実験センター）

〒415-0025 静岡県下田市 5-10-1

概要

ウニ類は、発生・生理学等の研究教育に欠かすことの出来ない海産生物であり、臨海実習等における需要も大きい。下田臨海実験センターでは、採集して消費するのみでなく自主育成による安定供給が可能となるように、ウニの幼生期から成体の成熟期に至るまでの室内完全飼育系の確立を試みた。現在のところ、アカウニ *Pseudocentrotus depressus* とバフンウニ *Hemicentrotus pulcherrimus* において成体に至るまでの飼育に成功している。

1. はじめに

ウニ類は生物学の研究教育において欠かすことができない実験生物であるが、同時に重要な漁業対象物でもある。近年、乱獲や水質汚染の影響などにより、ウニ類の資源量は減少傾向にある。特にアカウニは、全国の臨海実験所で入手が困難な状況となり、研究者への供給ができない場合さえ生じている。アカウニは、水産学的な側面からも、その増殖や行動に関して多くの研究が行われてきた^[1,2]。臨海実験施設において、実験用ウニを採集消費しながら、資源量の維持を図るためには、自主的にウニを育成して消費量を補うことが望ましい。また、さらなる余剰生産が可能であれば、放流を行ったり、施設外研究者に供給したりすることも可能となる。

そこで、当センターでは、臨海実習などの研究教育のためのウニの安定供給を目的に、ウニの完全室内飼育系の確立を試みた。まず、幼生の飼育装置と変態後の稚ウニの飼育装置からなる小規模飼育系を作製した。さらに、水槽内で小型ウニに海藻を与えて育て、成ウニまで完全に室内で飼育することに成功した。育成を行っているのはアカウニとバフンウニであるが、バフンウニについては他の報告例もあるので、本報ではアカウニを中心に述べる。

2. アカウニの採集

アカウニは10月から1月までが産卵期である。このため、ウニが成熟し産卵の最盛期となる11月後半に、下田市大浦湾内では、アカウニはカジメ林周辺の転石帯周辺に多く分布していた。水深10m地点において、スキューバ潜水によって徒手でアカウニを採集した。15個体のアカウニを種苗育成のための親ウニとして用いた。

3. 採卵と受精

アカウニを海水でよく洗い、外来精子の排除のために淡水で短時間洗った。その後、背面の棘をハサミで刈り、腹面中央の口器をピンセットで取り除きウニの内臓や不純物を海水で綺麗に洗い流した。

150 ml のプラスチック容器に濾過海水をいっぱい満たし、口器を除去したウニを、腹面が上になるようにして置いた。口器除去後の穴より 0.5 M KCl を注入して、放卵および放精を促した。雌のウニはオレンジ色が濃く粒が大きな卵を放卵するが、雄は白く濁った色の精子を放出する（図 1A）。卵は濾過海水による洗浄を3回行うとともに、過密にならぬような濃度になるまで薄めた。精子の放出が確認された雄ウニについては、殻を壊して精巣を取り出し、精巣から滲出する新鮮な精子をスポイトで採取し、これを十分に低密度になるまで薄めた。薄めた卵の容器に薄めた精子を滴下した後、十分に攪拌して受精を促した。受精の完了は顕微鏡下において、視野内の全ての卵の受精膜が形成されたことによって確認した（図 1B）。

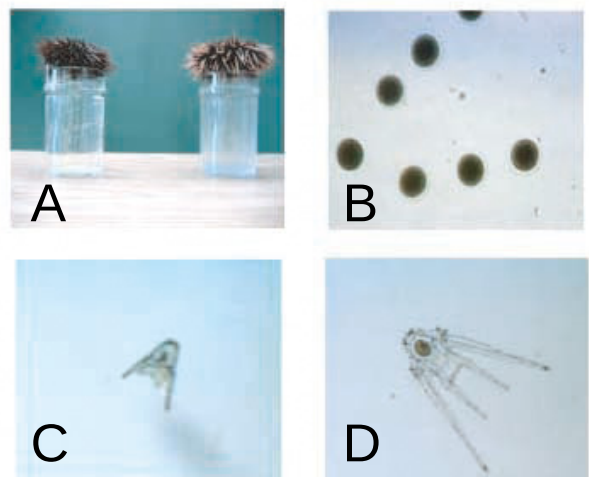


図 1. アカウニの発生：卵と精子の採取から初期幼生まで。

- A. 卵と精子の採取の様子
- B. 受精卵
- C. 2 腕後期（受精後 3 日目）
- D. 4 腕後期（受精後 7 日目）

¹ E-mail: tsuchiya@kurofune.shimoda.tsukuba.ac.jp
<http://www.shimoda.tsukuba.ac.jp>

4. 幼生の飼育

下田臨海実験センターの野外水槽から汲み上げた海水を、脱脂綿を詰めたロートで濾過して、小型生物の混入のない濾過海水を作った。幼生の飼育には、プラスチックの羽を取り付けたアクリル棒をモーターに繋ぎ、それを市販の 30 L のパンライト水槽に入れて、1 分間に 30 回転させる装置を用いた。幼生飼育時の海水温は 18℃ とした。この装置により、自然の海水の流れに近い環境で幼生を飼育した（図 2）。

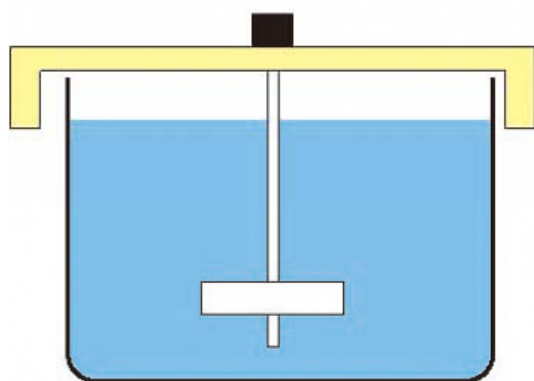


図 2. 幼生飼育用 30 L パンライト水槽
モーターに接続した海水攪拌用の
プロペラが設置されている。

受精卵は受精後 2 日目でプリズム幼生になり、2 腕期を経て（図 2 C）3 日目からはプランクトンを食べるようになった。そこで、幼生の餌には貝類・甲殻類生産用の藻飼料であるサンカルチャー（高濃度培養の *Chaetoceros calcitrans*; 日清マリンテック株式会社）を用いた。これを毎日 2 ml 与え、さらに 5 日に 1 回、水槽の 3 分の 1 を新鮮な濾過海水に置換した。幼生は受精後 6 日目に 4 腕期に達した（図 1D）。

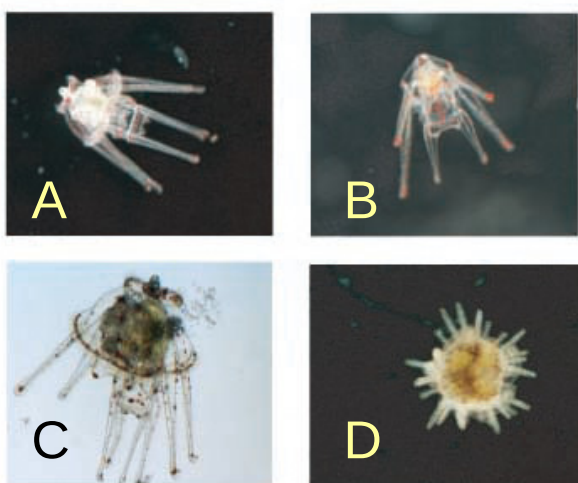


図 3. アカウニの発生：後期幼生から稚ウニまで。
A. 6 腕後期（受精後 20 日目）
B. 8 腕中期（受精後 22 日目）
C. 変態期（受精後 28 日目）
D. 稚ウニ（受精後 32 日目）

受精後 20 日目より 6 腕期に入った。6 腕後期（図 3A）より 5 日おきに、プランクトンネットのカバーをかけて、幼生を吸い込まないようにしながら、ホースで水槽の 5 分の 4 の海水を新鮮な濾過海水に置換した。22 日目から 8 腕期（図 3B）となった。

アカウニの幼生は珪藻や石灰藻の存在で定着と変態を促されることが知られている^[3-5]。そこで、受精後 28 日目からの変態直前の時期に、珪藻の付着した 40 cm×40 cm の波板を投入して変態を促した（図 4）。波板は予め屋外水槽の流海水中に約 1 ヶ月設置しておき、珪藻の付着を促しておいたものを使用した。幼生から稚ウニへの変態が進み（図 3C）、32 日目にはほとんどの幼生が稚ウニ（図 3D）となって着底した。

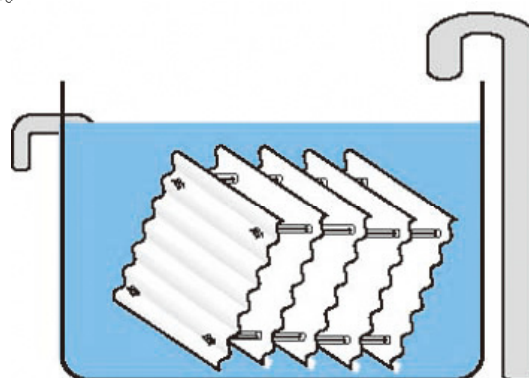


図 4. 稚ウニ飼育用 20 L パンライト水槽。
珪藻の付着した波板が設置されている。

受精から稚ウニに至る発生の経過について、受精からの経過日数と、それぞれの時期における成長段階を表 1 にまとめた。

表 1. アカウニの発生経過

月 日	受精後日数	成長段階
11 月 29 日	0	受精
12 月 1 日	2	プリズム幼生
12 月 5 日	6	4 腕期
12 月 19 日	20	6 腕期
12 月 21 日	22	8 腕期
12 月 27 日	28	変態期
12 月 30 日	31	稚ウニ

4. 稚ウニの飼育

着底した稚ウニは、20 L のパンライト水槽に穴を開けて排水口を作り海水を上から流して、流水中で飼育した。この段階での飼育水温は 14℃ であった。餌および付着基質として、前述の珪藻を繁茂させた 40 cm×40 cm の透明の波板を与えた。波板上に餌が無くなり透明になる前に、珪藻の付着した新たな波板を供給した。稚ウニは古い波板上から、筆で払い落として、新たな波板上に移動させた。その後、殻径 1 mm 以上に成長したものには、海岸より採集して来たアナアオサを刻んで与えた。

5. 成長したウニの飼育

殻径 1 cm 以上に成長したウニは、流海水の屋内水槽中にフロートで浮くように設置した 1 cm 網目のトリカルネット籠（幅 40 cm×長さ 70 cm×高さ 30 cm）に移し、3 日に 1 回、生のカジメを餌として与えて飼育している（図 5）。カジメは潜水作業時に採集して来たものを水槽に蓄えておき、適宜適当な大きさに刻んで、ウニに与えている。



図 5. トリカルネット籠内で育成中のアカウニ
トリカルネットの目合：1 cm
籠サイズ：幅 40×長さ 70×高さ 30 (cm)

6. 現況と今後の展望

受精から室内飼育を開始して 1 年以上が経ち、アカウニは殻径 35 mm に達した。現在、約 230 個体を飼育しており、これらは今年の秋には成熟する見込みである。同様にして飼育したバフンウニも現在約 500 個体飼育しており、順調に生育している。今後、ムラサキウニやコシダカウニなど他のウニの育成も実現したい。さらに育成方法の研究も行い、育成過程の簡略化や効率化を図り、実験生物としてのウニ資源の安定供給を目指したい。

本報で用いたこの室内飼育系は、ウニ類のみならず、ナマコやヒトデなど棘皮動物、巻貝類や二枚貝類などの軟体動物、さらに他の海産無脊椎動物の飼育にも応用できる可能性がある。設備や時間の許す限り、いろいろな動物において、種苗育成を試みてみたいと考えている。

参考文献

- [1] 今井利為, 新井章吾, 小川数也, アカウニの食性と摂餌量について, 水産増殖 34 (1986) 157-166.
- [2] 今井利為, 三富龍一, 小川数也, アカウニ *Pseudocentrotus depressus* (A. Agassiz) の日周行動について, 神水研研報 1 (1996) 1-6.
- [3] H. Kitamura, S. Kitahara and H. B. Koh, The induction of larval settlement and metamorphosis of two sea urchins, *Pseudocentrotus depressus* and *Anthocidaris crassispina*, by free fatty acids extracted from the coralline red alga *Corallina pilulifera*. Marine Biology 115 (1992) 387-392.
- [4] 谷雄策, 伊東義信, アカウニ幼生の付着および付着珪藻の影響について, 水産増殖 25 (1979) 15-20.
- [5] 伊東義信, ウニ幼生に対する付着珪藻の変態促進効果, 付着生物研究 5 (1984) 15-18.

電波実験の工夫と考案

鈴木秀則

筑波大学システム情報工学等支援室
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

情報学類 3 年生を対象とした主専攻実験のテーマのひとつである「通信システムの基礎」は「光伝送の基礎」、「電波の実験」、「能動 RC フィルタ」の 3 つのテーマの実験を行っていて、そのうち電波に関する実験の紹介をする^[1]。電波の実験は電波の散乱、反射を防止する専用の実験室で行うのが理想であるが、学生実験では普通の部屋で実験を行っているため理想に近い測定データを得ることは難しい。そのため実験がよい環境で行えるよう様々な工夫を試みた。

1. はじめに

電波は電界と磁界の波から出来ていて、実験では電界、磁界それぞれについて検波器を使用して測定を行っているが、実験で使用する電波は微弱なため増幅器を送信機と検波器の間に置いて測定している。送信機から発射された電波は実験室中を反射して飛び交い、検波器で測定される電波は合成された値となる。電波の強度は距離の 2 乗に反比例するので、反射された電波が検波器に届く距離を長くするように様々な角度に反射させるような障害物を置いたりして工夫している。しかし実際測定してみると、電界に関しては理論に近い値が測定できるが、磁界は理論に近い値を測定するのは難しく、メーターの針がなかなか一定値にならないなどストレスを感じる学生もいるようである。

筆者は 10 年以上電波実験に携わってきたが、ドップラーレーダー実験では最近機器の劣化と思われるノイズ等が入って、測定機器のオシロスコープの波形に歪みと揺れが目立ってきて測定しにくい状況が出てきた。その問題を解決するため、ノイズの周波数成分をカットするフィルタを製作したところ非常に良い結果が得られた。

2. 実験の概要

通信システムの基礎実験は週 2 回（各 2 限）行われているが、そのうち電波実験には 6 回分割り当てられ、以下の項目についての測定を行う。

1. 検波器の特性
2. ホーンアンテナの放射特性
3. 反射、透過
4. 回折
5. 回折による干渉
6. 反射による干渉
7. ブラグ反射
8. ドップラーレーダー

これらの測定のため、実験には以下のような装置や図 1 に示すような機材を用いて行う。

- ・送信機・・・ガンダイオードにより 10.5 GHz の電波を発振し、ホーンアンテナから垂直偏波（電界）を出す。
- ・検波器・・・電界と磁界の 2 種類ある。
- ・増幅器・・・検波器の出力が小さいので検波器と電流計の間に増幅器を接続して測定する。
- ・電流計・・・検波器からの信号を測定する。
- ・金属板・・・アルミ板製で電波の反射、回折、干渉の実験に用いる。
- ・金属格子・・・絶縁体の枠に等間隔に金属棒をとりつけてある。反射、透過の実験に用いる。
- ・プリズム・・・パラフィン製で全反射の実験に用いる。
- ・半透過板・・・塩化ビニール製の板で反射の実験に用いる。
- ・結晶モデル・・・一面玉 9 個の正立方体でブラグ反射の実験に用いる。
- ・オシロスコープ・・・ドップラーレーダーの実験に用いる。

実験は受講生が多い場合は 1 セットあたり 2～3 名で行う。受講生が少ない場合、グループでの実験を希望する学生もいるが、理解を深めてもらうためにも出来るだけ 1 人で実験を行うように指導している。

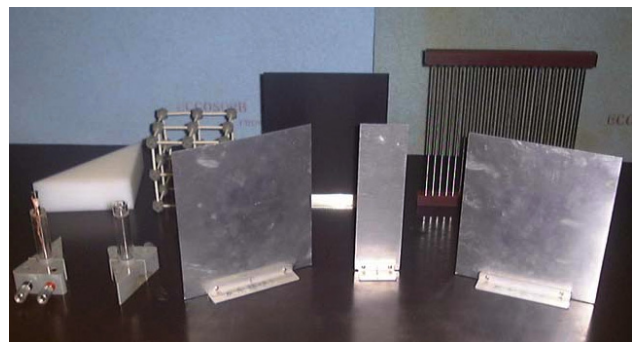


図 1. 実験に使用する機材

3. 実験補助装置の製作

3.1 実験台

検波器の特性、ホーンアンテナの放射特性を測定する実験では送信機と検波器の距離と角度を少しずつ変化させて行うが、その時に配線コードを引っ張

ったりするため角度と距離がずれて検波器の位置調整に手間取る事が多い。実験机に定規と分度器を描いてそれに沿って検波器を置く方法で測定をしていたが、コードを引っ張っても検波器がずれないように図 2 に示すような実験台を製作した。学生には実験台の使用は自由に行っているが、全員実験台を使用した方が容易に測定出来ると好評で、特に角度を変化させた場合の誤差は少なくなっていると思われる。

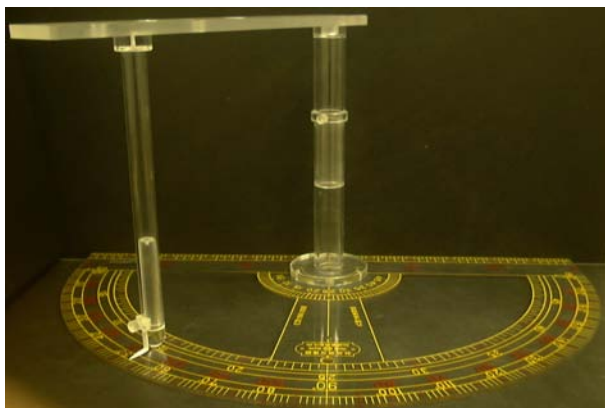


図 2. 実験台

3.2 電波吸収材の効果

送信機から検波器に向けて発射された電波は検波器以外のところにも飛んで行き、部屋の中で反射された電波がまた検波器が拾うことになり、実験の測定中に電流計の針がなかなか一定にならない。また、同じ実験をしても 1 回目のデータと違った測定値を検出することも多い。

検波器の特性の測定結果を図 3 と図 4 に示す。グラフの最大値、最小値はメーターの揺れを表している。電界よりも磁界の方が影響が大きく、電界では検波器の角度が 5 度の時に 70~80 μA 、磁界では 0 度の時に 77~84 μA の間の値となった。このデータは通常学生実験で行っている実験室でのデータだが、この部屋よりもっと狭い部屋で実験すると、誤差はさらに大きい結果となった。電波の強度は距離の 2 乗に反比例するため、角度をつけて障害物をいくつか設置して、部屋の中で反射された電波が検波器に届く距離を出来るだけ長くして、反射電波の強度を弱める工夫などをして実験をしていたが、退職された指導教員の電波研究室から譲渡された縦横約 60 cm、奥行き約 30 cm の図 5 のような誘電体の電波吸

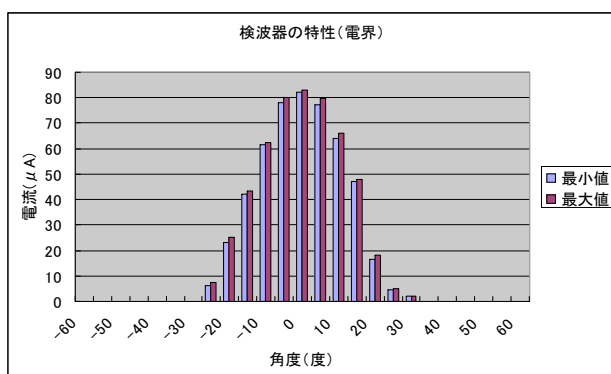


図 3. 電界の測定
角度が 5 度の時に 10 μA 程度の揺れが出た。

収材を複数個組み合わせてその効果を確認する実験を行った。影響が大きい磁界の測定結果を図 6 に示す。角度が 0 度のときに $\pm 1 \mu\text{A}$ 程度の揺れが出たが、電波吸収材を横だけでなく上にも置いたり工夫して組み合わせることにより、メータの揺れはほとんどなくなり、電波吸収材の効果は非常に大きいことが実証された。電界ではメータの揺れは全くなかった。

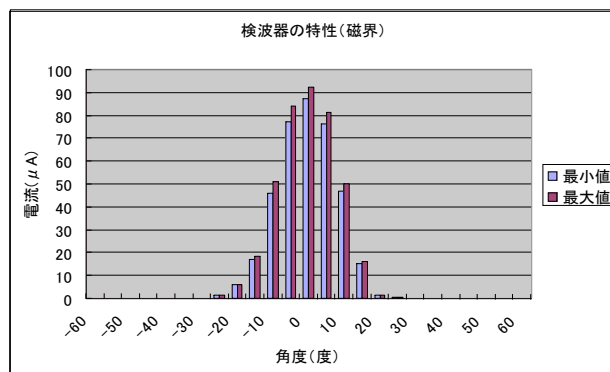


図 4. 磁界の測定
磁界では電界以上にメータの揺れが大きかった。

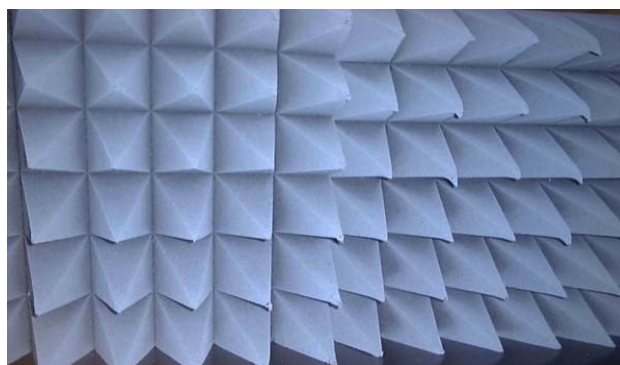


図 5. 電波吸収材

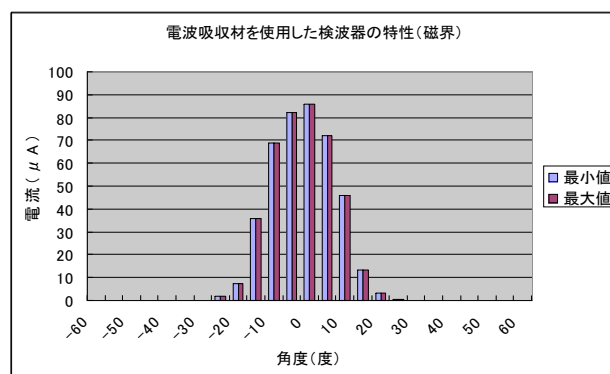


図 6. 電波吸収材の効果
電波吸収材を使用して測定すると電界、磁界ともメータの揺れは殆んどなくなった。

3.3 フィルタの製作

ドップラーレーダーの実験を図 7 に示す。実験は 10.5 GHz の連続正弦波を送信し、同時に低周波発振

器から 200 Hz の正弦波をスピーカーに加え、オシロスコープからスピーカーのコーンの振動する速さを測定する実験を行っている。数年前までは送信機とスピーカーの距離をうまく調整すればきれいな波形がオシロスコープに出力されていたが、最近ノイズが混じるようになり、出力波形の周期が読み取りにくいという学生からの意見が出されていた。波形は図 8 に示されるように 1 kHz のノイズの他に波形が揺れて静止しないため、その周期（スピーカーのコーンの速度）を読み取るのが難しかった。最初はスピーカーからの反射をよくするために別のスピーカーに変えてみたり、スピーカーに張るアルミホイルを別の金属に変えたりしてみたが、状況はあまり改善しなかった。静止しないのは電源からのノイズということが判明して、200 Hz をピークに 50 Hz と 1 kHz の周波数をカットするバンドパスフィルタを製作して実験してみたところ、図 9 に示すように 1 kHz のノイズはカットされ波形の揺れもなくなり、鮮明に安定した波形がオシロスコープに出力された。フィルタはオペアンプ、抵抗、コンデンサから構成さ



図 7. ドップラーレーダー実験

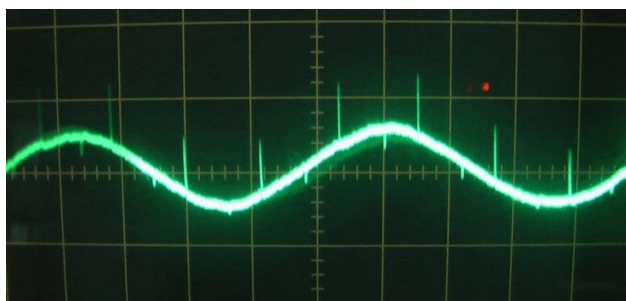


図 8. フィルタ挿入前の波形
波形は静止せず約 1 kHz のノイズも観測された。

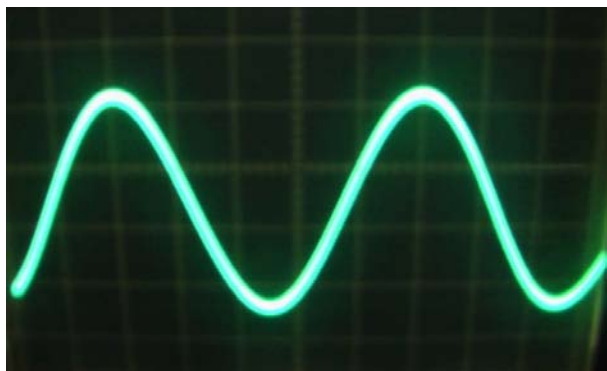


図 9. フィルタ挿入後の波形
波形は静止して 1 kHz のノイズもカットされた。

れた能動 RC フィルタと呼ばれるもので直流電源を使用するため、電源の極性を間違えてもオペアンプなどの素子が破壊されないよう工夫している。

図 10 にフィルタの周波数特性のグラフを示す。200 Hz を中心にして 50 Hz 以下と 1 kHz 以上は十分にカットされているのがわかる。

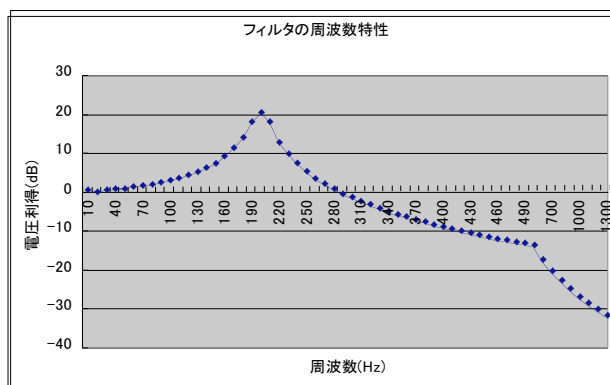


図 10. フィルタの周波数特性

4. まとめ

電波実験を受講した学生が実験終了後に提出するレポートを見ると、感想のようなものは書いてあっても考察がなかったり、結果のグラフはただ線が引いてあるだけで縦軸、横軸は何を表しているのか不明なレポートもあり、実験は真面目に行っているにもかかわらず減点された採点評価をみると残念に思うこともあり、指導にあたってはこのような点も注意していきたい。

電波実験を学生に指導するにあたり、受講した学生の意見や感想などをもとにいろいろな装置を製作したり工夫して学生が測定しやすい環境を整えてきた。これからも実験環境の整備に学生の声を聞いて装置等の改良、工夫に心がけていきたい。

情報学類実験ではソフトウェアを選択する学生が多くハードウェア系を選択する学生が少なくなっているのが現状であるが、卒業して社会人となると、大学のような実験設備が整ったところでハードウェア機器に接する機会は少ないと思われるので、もっと多くの学生にハードウェア系の実験を選択してほしいと願っている。

謝辞

本報告にあたり、ご指導いただいたシステム情報工学研究科知能機能システム専攻・根本承次郎教授、同研究科コンピュータサイエンス専攻・庄野和宏講師に感謝いたします。また実験台、フィルタの製作にあたってご協力いただきましたシステム情報工学等支援室の中島孝技術専門官、小野雅晃技術専門職員、中山勝技術専門職員に感謝いたします。

参考文献

- [1] 筑波大学情報学類実験 [通信実験] テキスト (1992)16-29.

正面旋盤による大径パイプの両端面加工の工夫

内田豊春

筑波大学研究基盤総合センター（工作部門）
〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

大径フランジ等のように直径が大きく、全長（厚み）が短い板状加工物の表面加工（端面加工）を主な目的とする正面旋盤において、直径 1016 mm、肉厚 8 mm、長さ 1000 mm のステンレス製パイプの両端面加工を、専用の保持具を工夫製作することで安全確実に切削加工を行った。（以下、大径長尺ステンレス製パイプをパイプという）

1. はじめに

本学研究基盤総合センター工作部門は、さまざまな教育研究用実験機器等の製作に応えるため各種の工作機械を設備している。特に旋盤は、汎用旋盤、NC 旋盤、卓上型精密旋盤の他に大径加工用として正面旋盤を保有している。

一般に正面旋盤は、大径フランジ等のように直径は大きい、全長（厚み）が短い板状加工物の端面加工（表面加工）を主な目的としている。本学研究基盤総合センター工作部門の正面旋盤は、藤井精機株式会社製 50-4FLHA（芯間距離：1500 mm、ベッド上の振り：1100 mm、往復台上の振り：800 mm）で、直径 1270 mm (50 inch) の 4 爪単動チャックが装着されている。数年前、この正面旋盤を主に使用し、プラズマ研究センターより依頼を受けた NBI 入射タンク延長管を製作した。NBI 入射タンク延長管の形状を図 1 に示し、形状を簡単に説明する。

NBI 入射タンク延長管は全長が 1000 mm あり、図のように直径 1016 mm、肉厚 8 mm、長さ 972 mm のパイプ両端には、直径 1170 mm の JIS 真空フランジが付いている。さらにパイプの円周上には 90 度間隔で JIS 真空フランジが付いている。材種は全てステンレス鋼 SUS304 である。

本報告は、正面旋盤本来の加工に適していない形状を加工するために検討し工夫したパイプ保持具の詳細形状と、パイプ保持具を利用し加工した結果、パイプ両端面の平行が比較的精度良く加工することができた理由等を述べる。

2. 保持方法と保持具の検討

パイプは指定された直径形状の製品が入手困難なため、形状寸法を指定し外注製作とした。各寸法は、直径と肉厚は図面の指示通り、長さ寸法は削り代を見込んで 1000 mm とした。このため、パイプは長さを 972 mm にする必要がある。また、両端にフランジが溶接されるので平行度も重要である。

正面旋盤は、芯間距離、ベッド上の振り共にステンレス管を取り付けるには問題はない仕様である。しかし、装着されている 4 爪単動チャックの外爪形状は、つかみ部長さが 40 mm とフランジ等の把持には十分であるが、長さ 1000 mm のパイプを安全確実に把持するには極めて短い長さである。

パイプ重量は約 200 kg と重く、この点も考慮しパイプの把持方法を色々検討した結果、4 爪チャックでの把持に拘らず、旋盤主軸と芯押し台に傘型回転

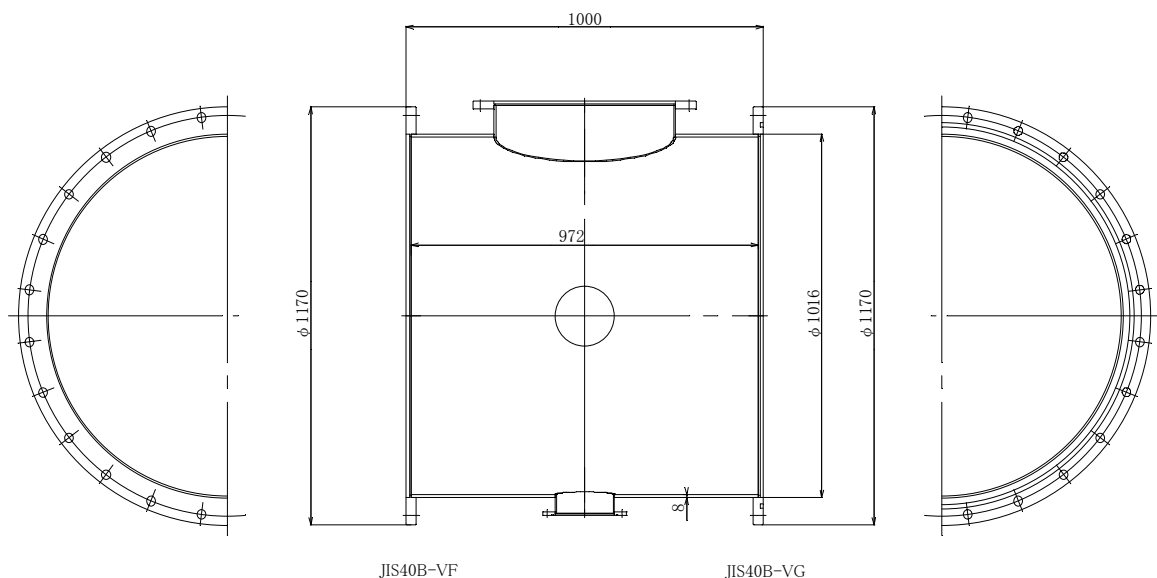


図 1. NBI 入射タンク延長管

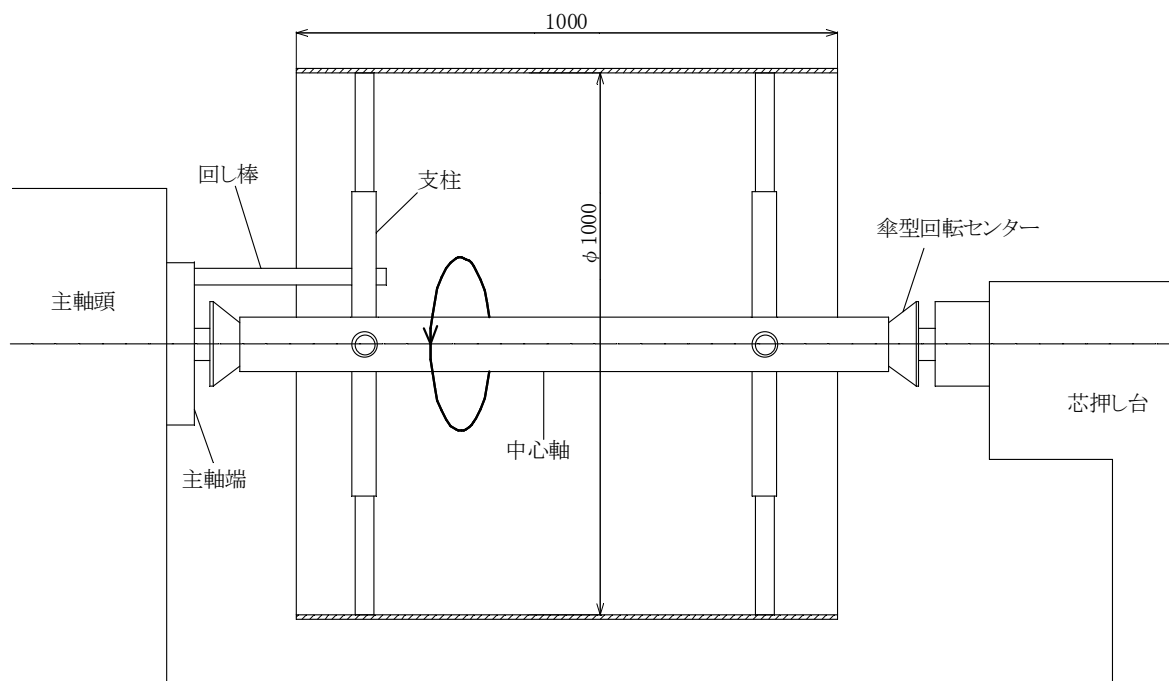


図 2. パイプ保持概念図

センターを装着した両センターによる保持方法を考えた。

図2に両センター支持によるパイプ保持の概念図を示し構造を簡単に説明する。中心軸の両端に各4本の支柱を取り付け、パイプ内面を押さえる。回し棒は旋盤主軸の回転を中心軸に伝達するもので、支柱を介しパイプを回転させる。支柱はケレも兼用している。

3. 製作したパイプ保持具の詳細

概念図を元に実際に製作したパイプ保持具の詳細形状を図3に示す。

3.1 詳細形状

基本的な構造は概念図で説明したが、更に各部の

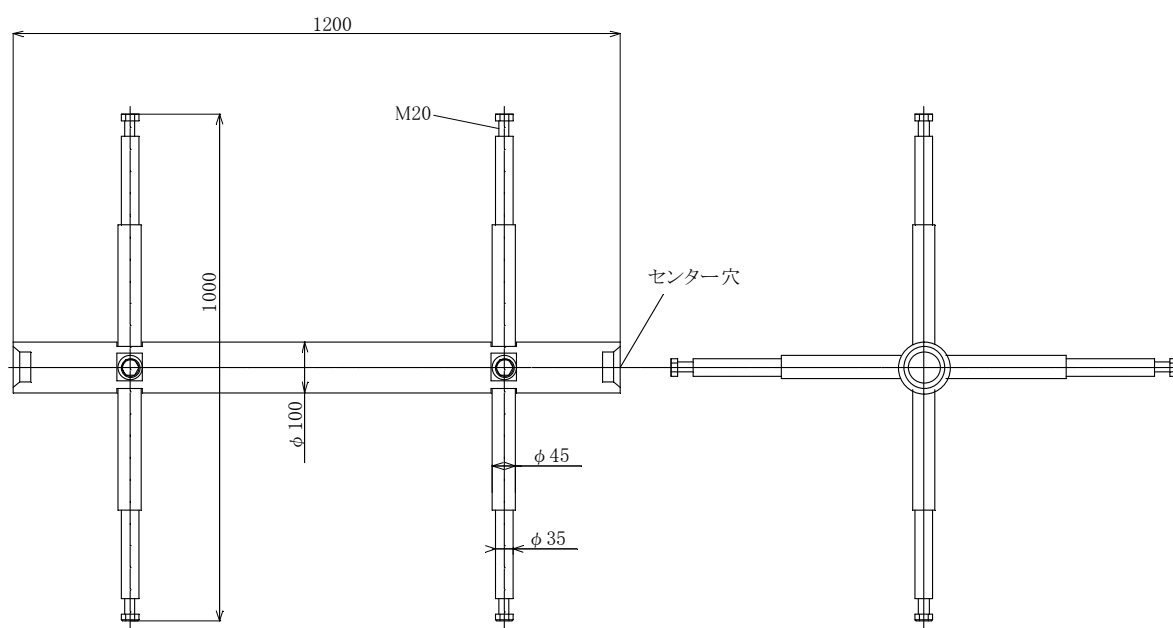


図 3. パイプ保持具の詳細形状

詳細な形状を述べる。

(1) 中心軸

両端面は傘型回転センターのテーパに合わせ 75° のセンター穴加工が施されている。8 箇所支柱取り付け部は平面加工され、支柱を固定するための M30×1.5 のメネジが切られている。

(2) 支柱

各 4 本の支柱は、根本に M30×1.5 のオネジを切り中心軸と固定。先端は M20 のメネジを切り、M20 六角ボルトを取り付けパイプ内面を支える。それと同時にパイプ全体の芯出し調整が出来る構造とした。

3.2 保持具の製作

保持具の材種は全て一般構造用鋼 SS400 を採用した。製作は特別難しくなく、中心軸の外径加工、センター穴加工および支柱の外径加工、ネジ切り加工は旋盤で行い、中心軸の平面加工とネジ切り加工は横中グリ盤で行った。加工が終わり、組み立てた保持具の総重量は約 110 kg になった。

製作したパイプ保持具を図 4 に示す。



図 4. 製作したパイプ保持具

4. パイプの端面加工

4.1 加工手順

実際に行ったパイプ端面加工の手順を簡単に説明する。

- (1) 予め、パイプの中に支柱を外した中心軸を入れ、両端にワイヤーを掛けクレーンで吊す。次に支柱を取り付け、M20 ボルトで中心軸とパイプの大まかな芯出しを行う。これらの作業は機外で行った。
- (2) 大まかな芯出しが終わったパイプと保持具は、クレーンで吊し正面旋盤に装着する。パイプと保持具は、安全確実に装着されているかを確認後、両センターで支え、旋盤上で芯だし作業を行った。

- (3) 芯出し完了後、バイトの取り付け等、切削加工の準備をした後、切削加工に入る。
- (4) 片側端面の切削加工が完了すると、保持具をクレーンで吊し反転させ、両センターで確実に支えた後、もう一方の端面を切削する。この時点でパイプの全長 972 mm を決めた。

4.2 パイプ端面の切削加工

パイプの端面切削に使用したバイトは、超硬スロアウェイバイトを使用した。バイトホルダーの形式は PTTNL2525M16、切削速度約 80 m/min、切り込み量 0.5 mm、送りは手動で行った。

パイプ端面の切削加工の様子を図 5 に示す。



図 5. パイプ端面切削加工の様子

4.3 パイプ全長の確認

パイプの全長は、端面を切削しながら適宜計測し、削り過ぎのないように慎重に切削を行い、パイプ全長 972 mm に仕上げた。

1000 mm ノギスを使い、端面上の 8 点を計測した結果、いずれも 972 ± 0.05 mm 以内に仕上がっていた。

5. 考察

パイプ保持具を使用した結果、パイプの端面加工が安全確実にできた。同時にパイプ保持具を利用し加工した結果、パイプ両端面の平行が比較的精度良く加工することが出来た。

これはパイプ保持具の中心軸を両センターで支持するため、加工されたパイプ端面と回転軸の直角が確保されているためと考えられる。

パイプ保持具の構造は、重量も重く剛性の高いものと思われていたが、実際の切削ではビビリが激しく、切り込み、送り共に手動で行い、旋盤主軸回転数も、 14 min^{-1} 、 19 min^{-1} 、 26 min^{-1} の各回転数を使い分け、ビビリ加減を観察しながら加工した。このビビリ対策は今後の検討課題である。

パイプ保持具とパイプを合わせた総重量は約 310kg もあり、段取りと段取り換えはクレーンを使いながらの作業であったが、保持具の両端にワイヤ

が掛けられるので、段取り変えが安全かつ円滑に行えた。

端面加工されたパイプにフランジ等が溶接され、完成した NBI 入射タンク延長管を図 6 に示す。

謝辞

本報告の作成にあたり、研究基盤総合センター工作部門長松内一雄教授、長田秀治講師のご支援をはじめとし、工作部門の皆様の協力に感謝いたします。



図 6. 完成した NBI 入射タンク延長管

精密加工用仮止め接着剤により樹脂薄板を固定しての 立フライス盤切削加工の試み

小林浩三

筑波大学人間総合科学等支援室（医学系）
〒305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

精密加工用仮止め接着剤は、研削加工などの際、金属の固定に用いられる。一般的な製品は、樹脂が変形する温度より軟化点が高く、樹脂の固定には不向きである。しかし、一部の製品において軟化点が比較的低い温度の製品があった。そこで、新たに精密加工用仮止め接着剤を用いた樹脂板の固定方法を考案し、試してみたところ、良好な結果が得られたので報告する。

1. はじめに

筑波大学臨床医学系整形外科の依頼により、医学工作室で、マウスの脚部に創外固定器を装着する際に使用される手術台を製作した(図1)。この装置は、マウスを用いた動物実験において評価が高く、国際会議でも報告された^[1]。

更に、時間当たりの手術数を大幅に増やし、MRI解析にも直接使用できる、改造型の新たな手術台の作製の依頼を受けた。この改良するに当たり、図2に示した部品が必要になった。しかも、MRI解析を実現するために、使用材料として樹脂を用いることが要求された。しかし、樹脂板に加工を施すには、板の固定方法を工夫する必要がある、従来の方法では困難であった。



図 1. 手術台



図 2. 手術台の部品

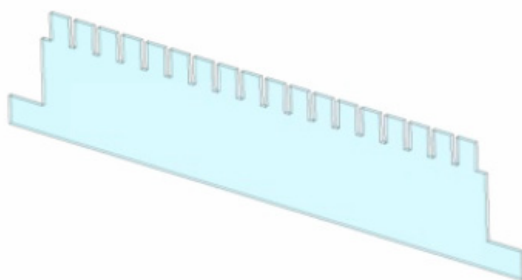


図 3. 樹脂製薄板部品
厚さ 1mm、横 150 mm、縦 35 mm

樹脂板の厚さは、材質、種類により様々である。カタログで紹介されているアクリル樹脂の厚さは 1 mm 以下から 100 mm 以上の製品までラインナップされている。ここで扱っている薄板とは、2 mm 以下を指すことにする。

立フライス盤での樹脂薄板の切削加工は、ワークの固定時に発生する変形、及び切削加工時に発生する変形を防ぐ工夫が必要である。従来、筑波大学医学工作室において、樹脂薄板の加工は、(1)捨て板による固定、(2)両面テープによる固定での切削加工を行ってきた。いずれの方法も長所・短所があり、その制約の中で、完成した製品が仕様を満たす方法を選択し組み合わせながら加工してきた。

2. 従来の加工法

筑波大学医学工作室でこれまで行ってきた薄板の加工方法についていくつか振り返ってみる。図3の形状の部品の加工は、以下の2つの方法で行ってきた。両方法ともあらかじめ外径を捨て板とともに仕上げておく。

共通した特徴は、同時に複数枚の加工ができる点である。反面、捨て板により挟んで加工するため薄板面の加工が困難である。

2.1 方法 1

薄板の面が切削工具の軸と平行する、すなわち立フライス盤においては、テーブルに対して薄板のワークが垂直な向きに固定する方法である。具体的には、テーブルに装着したマシンバイスに薄板を立てた状態で固定して切削加工を行う。図4の様にワークを捨て板で挟んで同時に加工する。加工形状によ

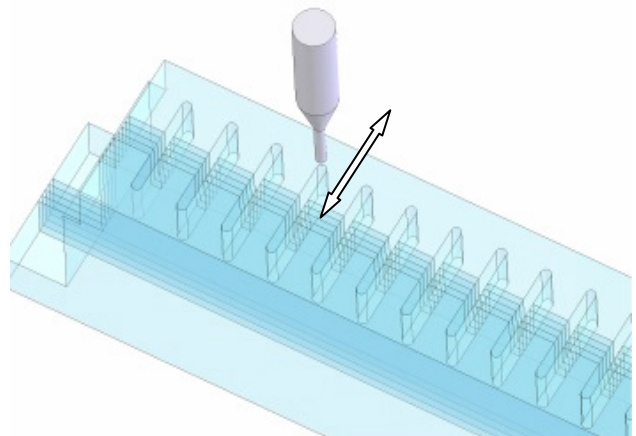


図 4. 薄板加工方法 1

り捨て板は都度準備する必要がある。同時に複数枚加工できる反面、溝の深さは、切削工具の刃長によって決定する。

2.2 方法 2

切削工具の軸が薄板の面と垂直に交わり向く、すなわち、テーブル面と平行に固定して切削加工を行う。この場合、溝の長さは、ほぼ捨て板の強度などにより決まる。また、一度に切削できる枚数は、切削工具の刃長以下となる。(図 5)

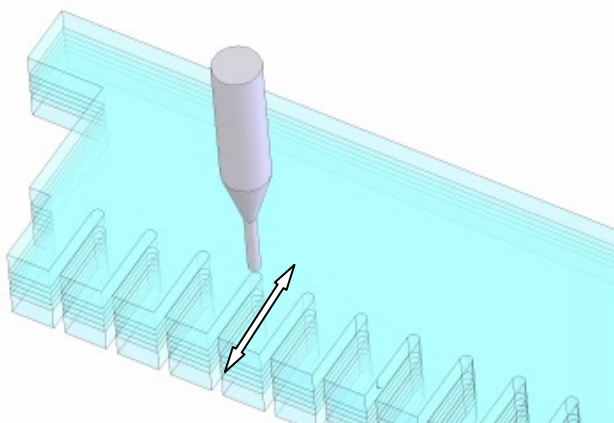


図 5. 薄板加工方法 2

2.3 方法 3

ワークを固定するための台を準備して、両面テープによりワークを貼り付けて固定する方法である。図 6 のように、薄板の片面への加工が可能な固定方法である。欠点として、固定台からワークを取り外すとき破損する可能性がある。この方法は、板の厚みや加工する形状から判断して、使用するかを決定する必要がある。

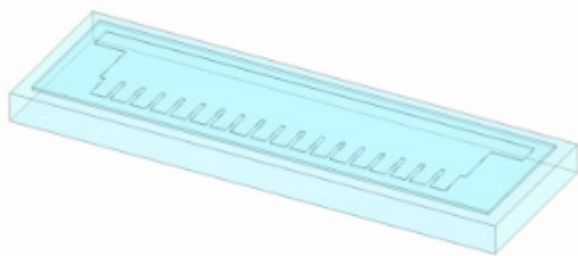


図 6. 両面テープによる加工

3. 仮止め接着剤を用いた新加工法

3.1 材料

今回、切削加工に使用した仮止め接着剤は、シフトワックス 5405S (日化精工株式会社製) である。

軟化点は、カタログ値で 46℃と比較的低い温度となっている。熔融温度のデータは、記載されていない。当工作室で接着剤を加熱し確認したところ、およそ 60~65℃で粘性のある液状の状態に熔融した。この温度は、アクリル材料での一般的な熱変形温度以下であることから、ワークを固定したり、はずしたりするのに加熱しても不都合はないと期待される。

接着力(引張剪断強度)は 4.6 N/mm² となっている。現在、最適な加工条件を詳細に検討中であるが、今回の切削加工では、従来の方法と比較し、送り速度・切り込値とも低下してはいるものの使用に耐えうる条件を既に得ている。

3.2 方法

ワークを接着剤で仮止めするための固定台を準備する。固定台の材質・形状は、ワークの材質や加工方法、機械への取り付け方法などにより選択する。加工例 1 (図 7) で固定台となる板は、ワークより十分大きい。更に、熔融した仮止め接着剤が固定台から、こぼれ落ちない様に、ワークより大きな凹み状のプールを作った (図 8)。

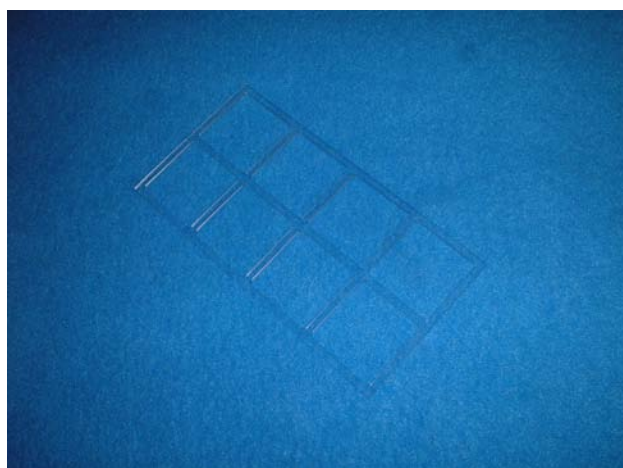


図 7. 加工例 1. アクリル樹脂: 厚さ 1 mm、横 90 mm、縦 46 mm、格子の幅 2 mm



図 8. 固定台とワーク

ワークと固定台の接着は、仮止め接着剤が溶融する温度に、ワーク・固定台・仮止め接着剤を加熱する。仮止め接着剤が溶融したら、ワークと固定台の間に気泡が入らないように、密着して大気中で常温まで冷却する。

取り外すときは、再び、仮止め接着剤が溶融するまで、加熱すれば簡単にはずすことができる。

固定台は、ワークとともに切削加工されると、溝などの跡ができる。これらの固定台は、条件により再使用が可能である。これは、固定台上にワークを乗せたとき、固定台の面とワークの面とが平行で、仮止め接着剤が固定台の溝などに、すき間なく流れ込んで、密着する場合である。(図9)

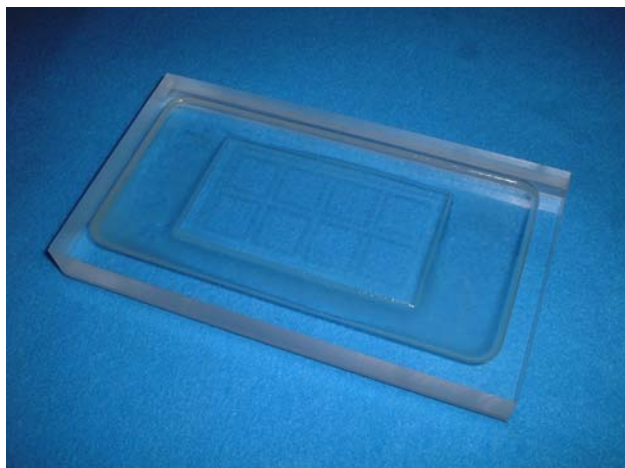


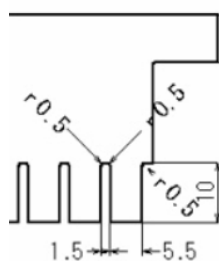
図9. 固定台を再利用している様子

3.3 加工例

以前、切削加工した部品を仮止め接着剤による固定法で加工した(図10)。写真のくし状部分(図中、丸)の拡大した設計図を右に示した。

これまで1.5 mmの幅の溝の寸法は、直径が1.5 mmの切削工具を使用して加工した時に得られる寸法とした。この寸法は、加工条件等の工夫により、要求された公差の範囲内になっている。

今回の加工では、直径1 mmの切削工具を用いて1.5 mmの溝を加工した。従って、溝の角部は、コーナ半径が0.5 mmとなっている。



拡大設計図

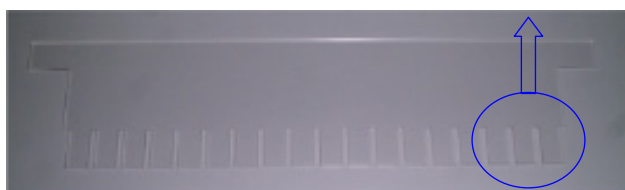


図10. 加工例2

ワークの材質は、アクリル板で厚さ1 mm、外径は、横150 mm、縦35 mmである。加工条件は、回転数750 rpm、送り50 mm/minで、切削工具は、ハイス鋼製直径1 mmのエンドミルを使用した。

加工例で示した部品は、仮止め接着材での固定の利点を生かした切削方法と考えられる。

3.4 手術台部品の作製

図11は、マウスの手術台の部品のイメージ図である。材質は、強度があり、かつ適度な弾性のあるポリアセタール樹脂を用いた。

この部品の厚さは1.5 mmで、一部段差があり、薄

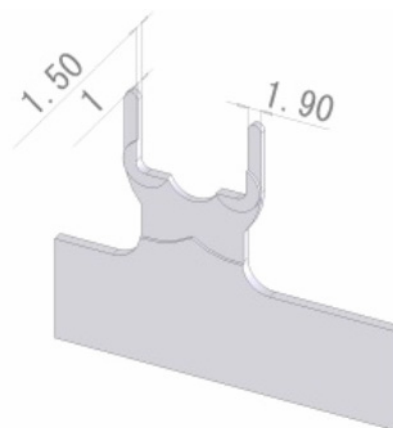


図11. 加工例3のイメージ図

いところは1 mmの厚さである。この厚みの材料は、規格上入手が困難なため、仮止め接着剤を用いた固定での加工で2 mm厚の材料から1.5 mm厚の板を削り出した。加工条件は、ハイス製エンドミル外径60 mm、回転数110 rpm、送り27 mm/minである。

外径の切削、段差の切削は、外径3 mmのエンドミル、回転数750 rpm、送り50 mm/minである。

4. まとめ

本報告のテーマとなった手術台の部品は、要求された形状に加工することができた。この樹脂薄板の接着剤による固定法により、従来困難であった、形状の加工が比較的安易になった。現在、更に検討を重ね、より薄く、より細い加工を可能とする筑波大学医学工作室で新しい加工法の開発を進めている。

文献

- [1] D. Nozawa, K. Kobayashi, T. Ishii, N. Ochiai, A murine model of distraction osteogenesis – a new devise for apparatus fixation, Abstract for 4th Meeting of the A.S.A.M.I. International, Kyoto, Japan, 2007.

微弱信号分光に於けるノイズ環境の一例について

松山英治

筑波大学数理物質科学等支援室（物性・分子工学専攻）

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

顕微分光を用いて、表面の微細構造や分子レベルでのダイナミクスを調べる走査プローブ顕微鏡 (SPM) 技術が急速な進歩を見せている。筆者は、分光の要素技術の開発と分光解析の結果に影響を及ぼす要因の研究を行っている。特に、微細構造を分光する際、検出器の信号対雑音 (S/N 比) に影響を与える装置周辺の環境問題を調べている。その中から今回は、分光装置で取り扱う特定な波長領域での雑音状況について報告する。

1. はじめに

近年の顕微分光の急速な進歩は、検出器の感度の向上に大きく依存してきた。現在使用されている検出器は、ナノ (n) からピコ (p) ワット (W) の微弱な信号を取り扱っており、更に先端の技術はサブミクロン以下の超微細な分光分析も可能にしている。しかしその一方で、この検出器の感度の向上は、目的信号以外の、周辺の種々雑多な電磁妨害波 (EMI) も合わせて検出し、分析上の障害になっている。EMI の多くは、動力電源からの電磁放射、放送電波、携帯無線電話等の通信電波であり、実験室内にも存在する。更に、分光器の制御解析用パソコンから発生する高周波も EMI である。実験室内では、観察されるスペクトルに、EMI の信号とサンプル本来の信号が混在している。高感度分析では、EMI の侵入経路を把握し、消去する事が極めて重要である。

2. 装置と測定法

2.1 装置

今回使用した装置は、スペクトラムアナライザー、低雑音前置増幅器及び、プローブから構成されている。スペクトラムアナライザーは、高周波 (RF) 信号を周波数領域で捉え表示する測定器である。低雑音前置増幅器は、小さい RF 信号を増幅する装置で、プローブは、小さい RF 電波を受け取るアンテナの役割を持つ物である。

2.1.1 スペクトラムアナライザー

マイクロ波帯の受信感度に優れたスーパーヘテロダイン方式の走査型スペクトラムアナライザー (MS62B3、MS2687B、アンリツ製、感度: -155 dBm) を使用した。

2.1.2 低雑音前置増幅器

波長帯と増幅度に応じて以下の装置を使い分けた。(1) MH 648A (アンリツ製) (2) ZFL-500LN (ミニサーキット製) (3) ZEL-0812LN (ミニサーキット製)。



図 1. スペクトラムアナライザーと低雑音前置増幅器

2.1.3 プローブ

プローブの大きさは、観測する波長に比べて充分に小さい。このことは、アンテナへの誘起電圧が小さくなり、高感度に設定された分光装置へのノイズ侵入経路を把握するのに適している。この発想の元に、ループ型プローブと短針プローブを考案し用いた

(1) ループ型プローブ

高周波ケーブルの先端に 10 mm ϕ の波長に対して小さいサイズの 1 ターンコイルの電極を取り付け、EMI 検出アンテナとして用いた。

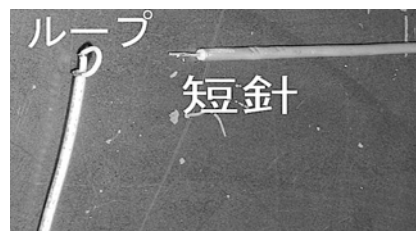


図 2. 各種プローブ

(2) 短針プローブ

高周波ケーブルの先端に長さ 10 mm の小さい電極を取り付け、EMI 探針アンテナとして用いた。又、接触探針プローブとしても使用した。

2.2 測定方法

研究室内で、どのような妨害波が発生しているか、更に機器に対する妨害波の影響を以下の条件下で調べた。

実験室内の床から 1 m ほどの高さで、壁から約 1.5 m 離れた所に、プローブを三脚に取り付け、空間に浮かせた状態で設置した。プローブから 1 m 以上離れた所で観測した。測定場所は、三方壁がコンクリート構造の一般的な実験室で、電磁遮蔽対策はなされていない。窓には EMI を吸収しない遮光カーテンが設置してある。

分光器の感度、分解能に関わる設定は RBW により設定を行い、スペクトルの分布状態が把握できる条件を適時設定した。

設定項目 (1) RBW: 分解能帯域幅、分光器の解像度とノイズフローの設定をする。(2) REF: リファレンス、レベル、表示の上限カーソルの信号レベル。

(1) ループ型プローブによる分析

上記の条件下に設置された、プローブの近傍に存在する EMI を調べた。分光器の設定の条件は RBW: 100 KHz、REF: -60 dBm である。

(2) 短針型プローブによる分析

A. 上記の条件下に設置された、プローブの近傍に存在する EMI を調べた。分光器の設定の条件は RBW: 10 KHz、REF: -60 dBm である。

B. 光学台上のスタンドに、短針先端が光学台と垂直に点接触した状態で固定した。それ以外の条件は、上に準じた。プローブを装置の光学台の要所に接触させ EMI を調べた。プローブは金属製の光学台と塗装によって、絶縁されている。分光器の設定の条件は RBW: 10 KHz、REF: -60 dBm である。

3. 結果

3.1 ループ型プローブ

ループ型プローブ近傍の EMI (放送電波) のスペクトルが明確に計測された (図 3)。1500 MHz 近傍に情報通信の電波のスペクトルが計測された。計測された電波のノイズフローと EMI スペクトルの先頭値の比 (C/N) は最大で P-P 17 dBm の値が確認できた。ノイズフローは相対レベル、-85 dBm 付近にある。このループは 100 MHz から 1700 MHz に存在している EMI を高感度で検出することができた。

3.2 短針型プローブによる分析

A. プローブの近傍に存在する EMI

349 MHz に先鋭な EMI スペクトルが観測された (図 4)。その C/N は P-P 約 20 dBm、ノイズフロー -90 dBm である。分光器の分解能を上げ、上下 50 MHz の観測範囲の計測を実施したが、近くにスペクトルは観測できなかった。

B. 光学台に点接触した時の EMI

短針先端を光学台に接触した時に、349 MHz に大きな EMI の信号が観測された (図 5)。その C/N は 35 dBm ほどであった。ノイズフローは、-90 dBm ほどであった。又、上下 50 MHz の範囲にもスペクトルを数本確認することができ、C/N は約 10 dBm ほどであった。

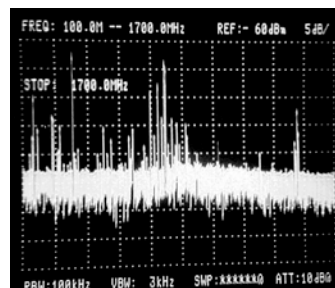


図 3. ループ型プローブ近傍の分析スペクトル

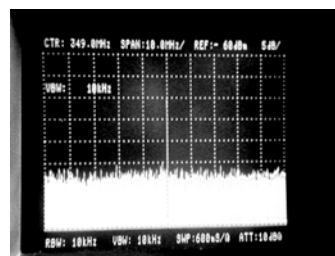


図 4. 短針型プローブ近傍の分析スペクトル

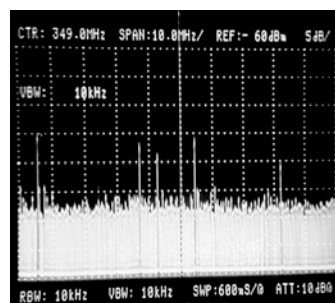


図 5. 短針型で光学台に接触した際の分析スペクトル

4. 考察

筆者は業務の一つとして、ESR-STM(電子スピンの情報を得るための走査トンネル顕微鏡)を用いて、検出感度の向上開発に取り組んでいる。EMI 実験の電波分光器の感度と観測周波数領域は、この ESR-STM の分光感度を再現した設定条件で行った。本実験に用いたプローブは、SPM の分析室で使用している電極を参考に、微小電極型を試作して使用した。

本実験で、ループ型(図 3)、短針型(図 4)共に、プローブ近傍にある EMI のスペクトルを大きく検出した。微小電極でも RF は誘起電圧を生じ、高感度・高分解能分光器で測定すると、EMI のスペクトルが明瞭に観測された。このことから、EMI が存在する実験室で、高感度の分光器を使用すると、サンプル室の電極がアンテナとして動作し、EMI を計測することが危惧される。これがノイズの侵入経路の一つとなる。

光学台に接触させた時の EMI(図 5)は、短針近傍の観測(図 4)と観測条件は類似するが、検出される信号の強度が大きい。光学台がアンテナとして動作して、接触点(接触は点接触であり、絶縁されている)付近の EMI が大きく計測された。また、短針近傍の観測では見えていなかった EMI スペクトルが多数計測された。このことは、電極片が絶縁された状況でも、光学台のような物が EMI に対してアンテナとして動作すると、近傍に存在するノイズの侵入経路となる事が推察される。

ESR-STM で観測されたパソコン(PC)からの高周波(コムスペクトル)の混入経路は大変複雑なものである(図 6)。ノイズフローは -150dBm ほどである。図 7 に、分析に使用した ESR-STM サンプルステージの写真を示す。

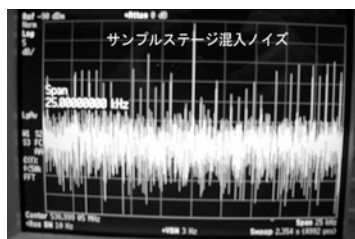


図 6. ESR-STM で観測された EMI
RBW: 10 Hz ノイズ P-P: 約 25 dBm

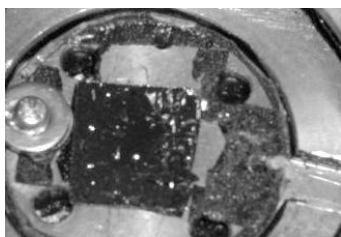


図 7. ESR-STM サンプルステージ

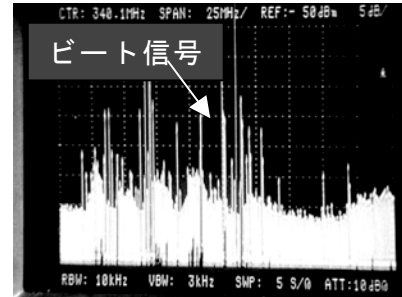


図 8. 光ビート法によるレーザ分光、EMI、
RBW: 10 KHz, REF: -50 dBm



図 9. 実装の一例
光ビート法によるレーザ分光信号検出用
フォトダイオード

レーザ分光器の信号検出器内で観測された EMI は、C/N 35 dBm で、ノイズフローが -80 dBm、光ビート信号のスペクトルが C/N 20 dBm と、大きく計測されるため、分光観測は可能であるが、EMI の除去が必須である(図 8)。ノイズの侵入経路として、フォトダイオード(PD)の電極や保持台が遮蔽されてなかったり、光学台を電気回路のアースに共用している事などがある。より厳重な高周波に対する遮蔽対策の実施が必要と思われる一例である(図 9)。

5. まとめ

大学の多くの実験室内には、様々な在来電波が EMI として常に存在しており、高感度顕微分光装置のノイズ源になっている。微小電極から侵入するノイズは、電極の近傍に厳重なシールドを施し、ノイズを低減することが大事である。観測される分光信号が大きくても、EMI スペクトルが観測されると分光の障害になり、感度向上の上限を制限する要因になる。観測者は周波数の分解能を上げ、放送や通信の電波は電波法に定められた仕様を用いて、更に EMI と分光信号の識別を行って観測を行う必要がある。EMI の混入が無ければ、より高解像度な分光が

可能になる。高い分光感度の実現に向け、より厳密なノイズ遮蔽を実施する必要がある。そのため、現在、装置の EMI 対策を工夫している。実験室全体を電磁遮蔽構造にすることが望ましいが、実現には経費等の面で困難な課題が多く、実現されていない。分光装置に対するノイズの侵入状況の測定とノイズ環境の計測は、極限感度の実現に向けた技術開発に重要な基礎的データを提供すると考える。

謝辞

分光装置のノイズ環境計測の実施に際し、筑波大学数理物質科学研究科 中村潤児教授、重川秀実教授、大井川治宏講師、武内修講師、システム情報工学研究科 根本承次郎教授の多大なご指導とご鞭撻に感謝いたします。

参考文献

- [1] 清水康敬 他編 電磁波の吸収と遮蔽
日経技術図書 (1989).
- [2] Y. Manassen et al., PRB 61 (2000) 16223.

技術報告

ワイヤ放電加工機を使った加工

石川健司

筑波大学研究基盤総合センター（工作部門）

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

ステンレス製の真空チャンバーを製作するとき、ポート（枝管）のアール加工は従来横中ぐり盤で切削加工していた。今回、複雑な形状を持つ真空チャンバーのポート（枝管）をワイヤ放電加工機で加工し、良い結果が得られたので報告する。

1. はじめに

昨年「陽電子ビーム縮小のための真空チャンバー」の試作を依頼された。このチャンバーは低速陽電子ビームラインの最終端に付けるものである。図 1 に依頼主・物理工学系上殿研究室から提供された「低速陽電子ビームラインの全体図」を示す。今回の真空チャンバーは図 1 右端の赤い点線で囲った所に位置する。

従来は切削加工で真空チャンバーのポート（枝管）接合部を加工していたが、材料の把握は中空の片持ち梁になるので、ビビリが出てしっかり把握しないと動いた。それを避けるために管の中に中子を入れてしっかり把握したが、管自体真円が出ていないので把握したときにゆがみが出て、その状態では求める形に仕上がっても、把握を外し自由な状態にするとずれが生じることもある。しかも、ステンレス薄肉管では刃が切り込むときに材料に食い込み、刃が抜けるとき材料が逃げて切削できないし、カエリが出てやすりで落とさないと使えない、という困難な作業である。

平成 14 年、工作部門にワイヤ放電加工機が導入さ

れた。ワイヤ放電加工機の加工槽に入るものなら、ワイヤ放電加工機を使って加工するようになり、今まで苦労していた接合部の加工も楽にできるようになった。

2. ワイヤ放電加工機

ワイヤ放電加工機とは、細いワイヤ（直径 0.25 mm）を電極として、工作物と垂直に張ったワイヤを放電することにより、熱を発生させその熱で金属を溶かして切断する機械である。加工は水中で行うので熱による影響は少ない。ワイヤ放電加工は、加工物と工具（ワイヤ電極）が接触しない非接触加工かつ熔融加工である。ワイヤは消耗するが常時テンションをかけた状態で巻き取っているので常に新しい電極面が出て、精度の高い加工が可能になる。

工作物を固定するテーブルは NC 制御装置で駆動され、0.001 mm 台の動作も可能である。工作材料が導電性の物であれば硬さを問わず加工でき、工作物や工具電極に作用する力が少ないので、難削材の加工、硬度金属の加工、脆弱部品の精密加工に適している。これにより真空チャンバーポート接合部加工時、材料の把握に弱い力で固定できるので、把握による変形はない。またプログラムで直線・アール加工も出来るので、一度の把握で複雑な加工が可能になる。

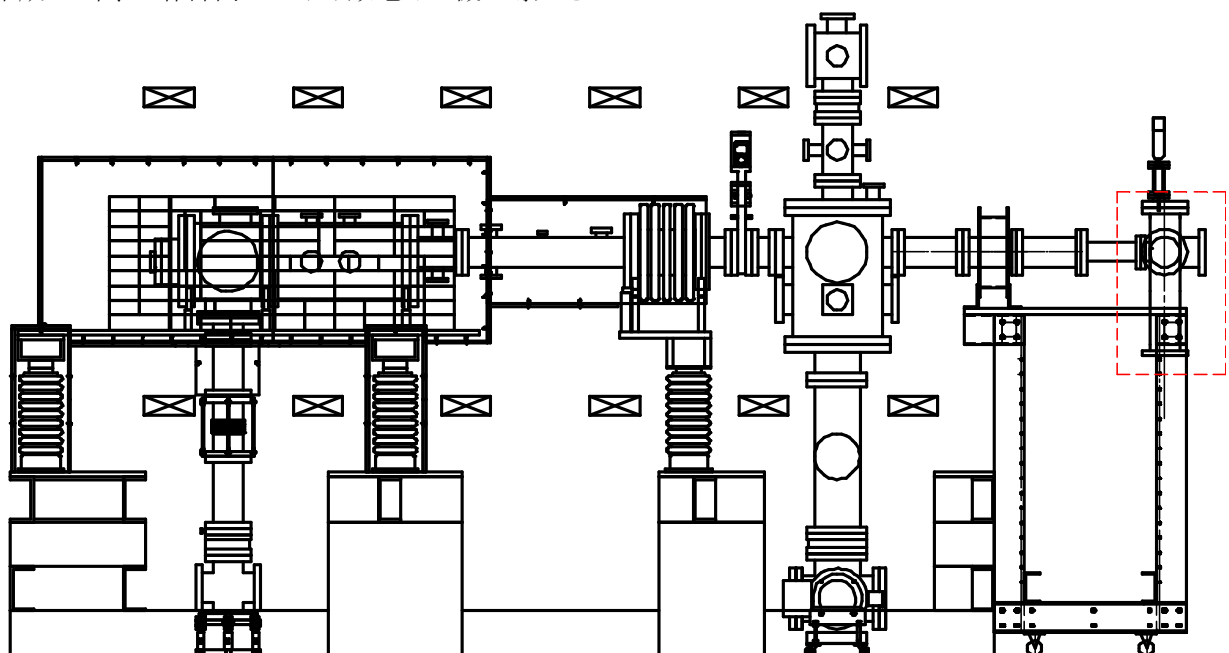


図 1. 低速陽電子ビームライン全体図

3. 真空チャンバー

3.1 試料チャンバー

今まで前段で 10 mm ぐらいまで陽電子ビームを絞れていたが、今回作るチャンバーで、陽電子ビームを 1 mm ぐらいまで絞る目的で設計されている。

真空チャンバーは 6 方向管になっており、長軸に対して直角に 90 度間隔同径のポート（枝管）が 3 本と細いポートが 1 本出ている。横から見るとクロス管に対し前後に 2 本ポートが出ている形である。各ポート（枝管）は直角で、クロス管に対して垂直に出るポートは、ずれが無い事を要求されていた。今まで同径管での製作は T 字管・クロス管（十字管）以外作ったことが無く、製作出来るか、またどういう構造にしたら作れるか想像できなかった。クロス管の交点に、同径の管を前方向に細い管を後方向に溶接可能なら作れると思い、2 次元 CAD で構造図を描いて検討した。図 2 にフランジを除いた構造図を示す。

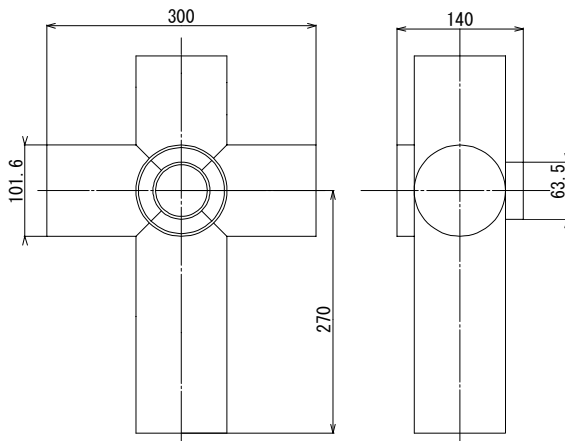


図 2. 真空チャンバー構造図

この構造図からクロス管の交点に同径の管を溶接できる事がわかったが、ワイヤ放電加工機では異径管を切断できないので、細い管に合わせた加工をし、接合部の溶接後切削加工を行い前後方向の管と合わせ加工することにする。

真空チャンバーは全てステンレス（SUS316）を使用する。管は厚さ 3 mm、直径 101.6 mm の物と、厚さ 1.65 mm、直径 63.5 mm の 2 種類を使い、フランジは ICF152 を 5 枚と ICF114 を 1 枚使う。

真空チャンバーのパイプを 6 個の部品として分けて考える。図 2 の構造図からわかるように、チャンバーの中心からフランジ端の位置は 3 本同じ 150 mm で 1 本だけが 270 mm に設計されている、形状は同じなので NC 装置が付いているワイヤ放電加工機なら一つのプログラムで、4 本同じ形状に加工できる。

3.2 製作順序

今回の真空チャンバー製作の工程を写真で説明する。

1. ステンレス管は治具で把握しワイヤ放電加工機にセットし切断する。クロス管の切断は一回の把握で加工できるが、前後方向の管の切断は治具に把握したままアール加工を行い、治具ごと 90 度回転させ、

もう一度アール加工を行う。加工後の部品（クロス管）を図 3 に示す。

2. ステンレス管を所定の長さに旋盤で加工する。
3. クロス管接合部の管を 2 本ずつ TIG 溶接で点付けし、全体が合うか確認する（図 4・図 5）。
4. クロス管を TIG 溶接する。
5. クロス管に前後方向の管を溶接するための穴の切削加工をする（図 6）。

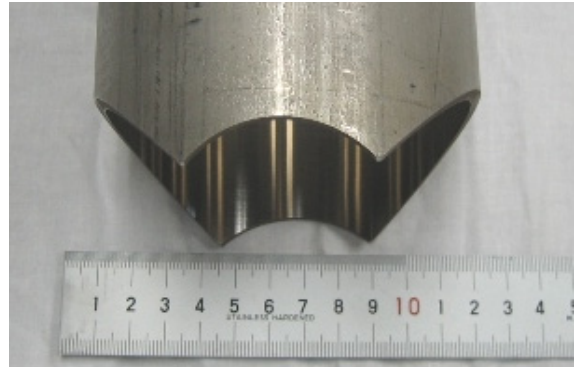


図 3. ワイヤ放電加工機で切断した管

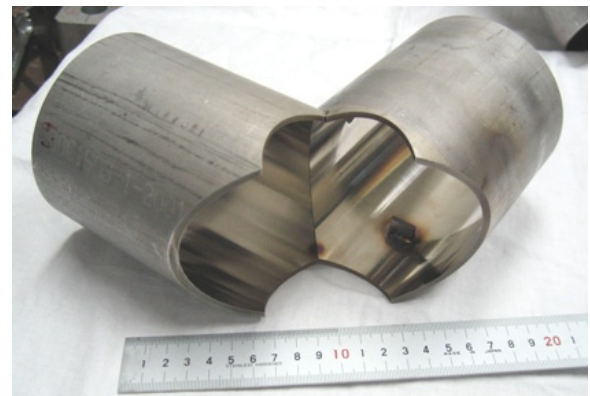


図 4. 点付けした管

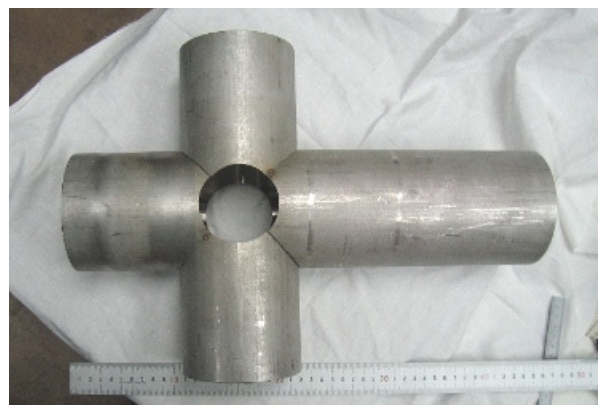


図 5. 点付けした 2 組がつながるか確認する。

6. 前後方向の管を TIG 溶接し、クロス管に ICF フランジを TIG 溶接する。前後方向の管が短く、前後方向の管にフランジを TIG 溶接すると、クロス管の部分でリークしても修正できない（溶接トーチが入らない）ため、前後方向の管を治具で封じ、各 ICF フランジも封じ 6 方向真空チャンバーの中にヘリウムガスを満たしスニファー法でリークテストを行う（図 7）。

7. 前後方向のフランジを TIG 溶接し、すべてのフランジを封じヘリウムリークディテクターでリークチェックを行い完成（図 8）。

以上の作業で、陽電子縮小のための真空チャンバーを製作することが出来た。

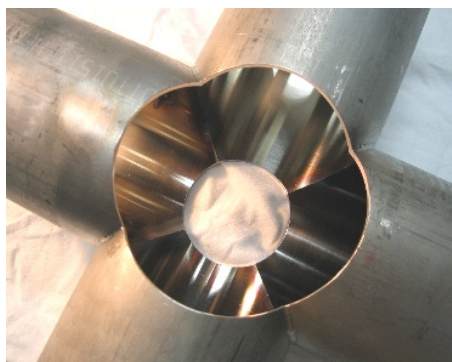


図 6. 切削加工後の接合部



図 7. スニファーリークテストの準備



図 8. 最終リークテストを行っている。

3.3 結果

今まで苦労していたチャンバーのアール取り作業は、ワイヤ放電加工機を使って楽に加工できるようになった。また精度は高くバリが出ないので、組み合わせたときに遊びが無く、溶接する時に失敗が少なくなると思われる。

真空チャンバーは、リークも無く、現在陽電子ビームラインにセットされ（図 9）ビームの直径を 2~3 mm まで絞ることに成功している。

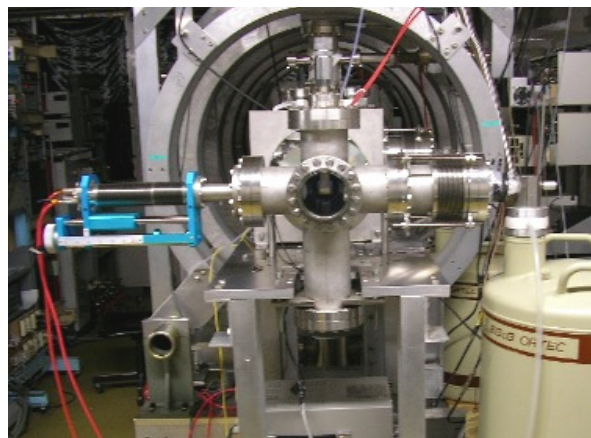


図 9. ビームラインにセットしたチャンバー

3.4 考察

TIG 溶接で仕上がった面を再切削して、あわせ加工をする時 TIG 溶接は溶け込みが浅いので、切削抵抗がかかるとビビリ、溶接面にクラックが入らないか心配したが、音だけで実際のダメージは無かった。

接合部の対向する管の径が同じなら、接合部の加工は全てワイヤ放電加工機で加工できたと思う。

部品の組み立てのときに、切断面がシャープに切断されていて、がたつきが無く楽に組み、薄肉管でも加工精度が高いのを実感した。

4. 小物部品の加工

今までワイヤ放電加工機を使って、加工した小物部品の一部を紹介する。

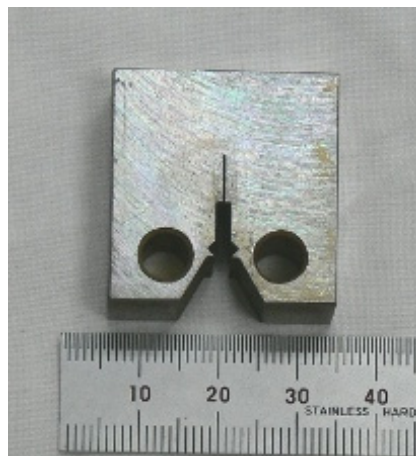


図 10. 引張試験片

この引張試験片の材質は、特殊耐熱鋼である。両面をフライス盤で仕上げ、穴加工してからワイヤ放電加工機で加工した。中心に 0.5 mm のスリットが入っているがその場所は境面といい、左右別の配合の物質を高圧高温で圧接した材料である。切削加工ではスリットバリが出てスリットが入れられないし、斜面の途中の凹凸は加工できない（図 10）。

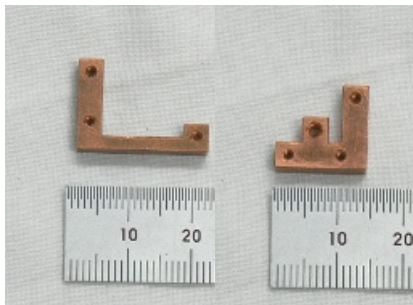


図 11. 電極（銅製板厚 3 mm）

スケールと見比べれば大きさがわかるが、板厚 3 mm で幅も 3 mm しかなく、切削加工では刃物が当たっただけで、変形しそうな部品である（図 11）。

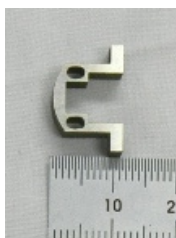


図 12. 低温バイス部品

この部品は、2 個一組でバイスになる部品。ステンレス (SUS304) 製で厚さ 2 mm。各リブの太さは 2 mm 以下である（図 12）。

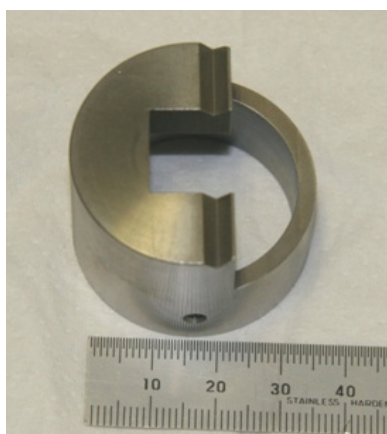


図 13. ステンレス部品

この部品はステンレス製 (SUS304) で、中央から少しずらした位置に幅 3 mm の V 溝を切りその右側を切り落とし、センターに角穴を加工した（図 13）。

ここに紹介した小物部品は、いずれも切削加工すると時間がかかり、加工するための治具をつくり加工しなければならないような物である。

5. 終わりに

ワイヤ放電加工機を使うことにより、精度の高い部品の製作が簡単に出来るようになった。ワイヤ放電加工は時間がかかるが、プログラムで動くのでワイヤ放電加工機に材料をセットして、動かしておけば自分はほかの作業が出来、時間のロスにはならない。

高精度の切断という点では、ワイヤ速度・オフセット量・移動速度等設定項目が多く材料によっても変わるのでデータがまだ少なく、0.001 mm の精度までは出せていない。

まだ使いこなすと言う域まで行かないが、刃物や材料が回転する機械ではないので、安全でプログラムどおり動かせ、まだまだいろいろな使い方が出来ると思う。

6. 謝辞

本報告書作成にあたり、図面ならびに写真を提供していただいた、本学物理工学系 上殿明良助教授ならびに上殿研究室 伊東健一氏に深く謝意を表します。

空気中の放射性同位元素濃度測定

松尾邦夫

筑波大学アイソトープ総合センター

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

非密封放射性同位元素使用室における空気中の放射性同位元素濃度の測定に関して、試料の採取法、処理、分析から測定の諸課程を検討したので報告する。

1. はじめに

平成16年度より国立大学の法人化に伴い、放射線に関わる従事者に対する労働安全面の法規制が人事院規則から労働安全衛生法に移行した。これに伴って、従来実施されていなかった作業環境測定の放射性物質に関する項目が義務づけられ、第一種作業環境測定士（放射性物質）の有資格者でなければ空気中の放射性同位元素濃度の測定、評価をすることができなくなった。この濃度評価に関して放射線障害防止法では、実測が著しく困難な場合には放射性同位元素の実使用量から、それぞれの使用室の換気量により計算によって評価する事もできる。しかし、労働安全衛生法では計算による評価ができないので、実際に使用室の空気を採取し、これを分析しなければならない。これらの事からアイソトープ総合センターの技術職員が資格を取り、環境測定用の器材等を整え放射線施設内の作業環境測定を実施することになった。

2. 試料採取について

放射線障害防止法においては、放射線量率や放射性同位元素による汚染の状況の測定方法について具体的な指定はしていないが、作業環境測定法においては作業環境測定基準で採取方法、測定方法、濾過捕集材の性能などに関して詳細に決められている。作業環境測定基準第9条の空気中の放射性物質の濃度の測定は、次の方法によらなければならない。（アルファ線を放出する放射性物質等は省略）

（採取方法）

- ・ 粒子状の放射性物質
液体捕集方法又はろ過捕集方法
- ・ ガス状の放射性物質
液体捕集方法、固体捕集方法、直接捕集方法又は冷却凝縮捕集方法

（分析方法）

- ・ ベータ線放出核種
全ベータ放射能計測方法又はベータ線スペクトル分析方法
- ・ ガンマ線放出核種

全ガンマ放射能計測方法又はガンマ線スペクトル分析方法

以上のように採取法や分析法が細かく決められているので医学アイソトープ共同利用施設では次のような方法と器材を採用することとした。

2.1 採取方法

実験室は種々の過程において化学反応によるガスの発生、揮発性物質の拡散、採取や攪拌等によるダストやミストの発生、放射性廃棄物の詰め替え、床・実験台の表面汚染物質の再浮遊などにより作業環境中の空気は放射性物質によって汚染される。したがって、以下のように試料の採取に際してはそれぞれの異なる化学的状態、物理的性状を考慮し目的に適った方法を選ばなければならない。

2.1.1 粒子状（ダスト、ミスト）の放射性物質

ろ過捕集方法

（対象核種） ^{51}Cr 、 ^{59}Fe 、 ^{75}Se 、 ^{32}P 、 ^{35}S 等
（ろ材）セルローズ繊維とガラス繊維を組み合わせたダストろ紙を使用（HE-40T）。

HE-40T：0.3 μm の粒子に対し、99.5%の捕集効率を有する。

2.1.2 揮発性またはガス状の放射性物質

固体捕集方法

（対象核種） ^{125}I 、 ^{131}I 、 ^{32}P 、 ^{35}S 等
（吸着材）活性炭含浸ろ紙（CP-20）。

CP-20： 相対湿度と捕集時間により 10%～93%の捕集効率を有する。

それぞれのろ紙は図1のようにローボリュウムサンプラーに連結され、対象実験室の空気を吸引する。

空気中の汚染された粒子状物質は HE-40T に捕集され、ガスのヨウ素等は CP-20 の活性炭に吸着される。特に放射性ヨウ素はその化学的性質から空気中に遊離し、ガス状になって存在する可能性が高い物質である。

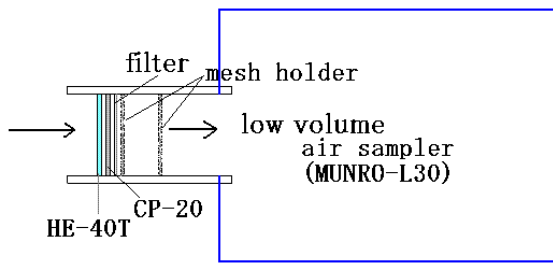


図1. サンプルホルダー内の装着ろ紙

2.1.3 ガス状の放射性物質 (水素及び炭酸ガス)

冷却凝縮捕集方法、液体捕集方法

(対象核種) ^3H 、 ^{14}C

採取はサンプラー (Aloka HCM101B) を使用し、 ^3H は HTO (トリチウム水) の化学形で冷却凝縮捕集し、 ^{14}C は $^{14}\text{CO}_2$ の化学形でモノエタノールアミンにより捕集する。この2核種の採取についての詳細を図2に示す。

ポンプ①によってろ過 (ダスト等の除去) 吸引された空気は、約 750°C の電気炉②でそれぞれ酸化される。HTO はコールドトラップ③で捕集され、 $^{14}\text{CO}_2$ は次のモノエタノールアミントラップ④によって捕集される。その後空気はモノエタノールアミン除去用活性炭層⑤を通過後、排気される。

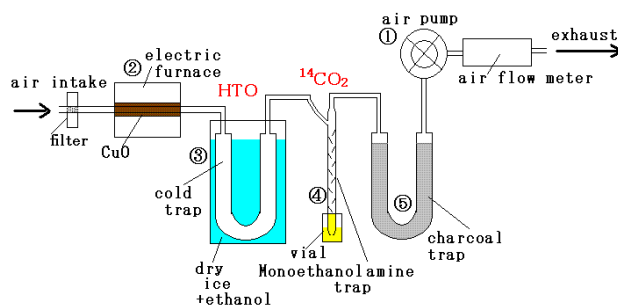


図2. トラップ装置の概要

2.2 吸引試料空気量と検出限界について

実験室内における空气中放射性同位元素濃度の上限値は法律により厳しく規制されている。作業者は放射線による外部被ばくと、放射性同位元素を呼吸などにより体内に取り込んだ効果による内部被ばくの合算値を一週間で1ミリシーベルトを超えないようにしなければならない。たとえば ^{125}I では空气中の濃度限度は 0.001 Bq/cm^3 である。核種が2核種以上あれば、それぞれの空气中濃度の濃度限度に対する比の和が1を超えてはいけないうので更に厳しくなる。

したがって、採取する空気量は法定の濃度限度よ

り更に厳しい値を考慮して採取しなければならない。

下記の式は1核種の濃度限度の精度を必要とする空気量の算定式である^[1]。

$$Q = \frac{3 \times \sqrt{2 N_b}}{1 \times 10^3 \times t_c \times \eta_M \times \eta_C \times (\text{DAC})}$$

Q: 必要吸引空気量 (m^3)

N_b : バックグラウンド計数値 (counts)

t_c : 計数時間 (秒)

η_M : 計数効率 (cps/Bq)

η_C : ろ紙の捕集効率 (%)

DAC: 濃度限度 (Bq/cm^3)

上記の式から ^{125}I (濃度限度) について必要空気量を計算すると約 2400 cm^3 となる。しかし、通常使用する核種は複数種使用され、測定器の測定効率、捕集効率などを考慮すると検出限界が濃度限度の1/10を超えないようにする必要がある^[2]。われわれが行っている測定では更に一桁精度を上げて採取空気量を100倍以上としている。

3. 分析方法

3.1 ろ紙の計測

対象とする核種は ^3H 、 ^{14}C 以外は全ガンマ放射能測定及び全ベータ放射能測定を実施し、異常値を検出した場合にスペクトル分析を行い、核種の同定と濃度を評価する事としている。この際、空气中に存在する天然のラドン及びトロンの崩壊生成物の影響を考慮しなければならないが、測定は試料採取後数時間経てからでないと実施できないので特にラドンの影響による補正はしていない。トロンについても3日後の測定値と数時間後の測定値とでは有意差がないので、測定は採取から数時間後に行っている。

全ベータ放射能の測定には2 π ガスフローカウンタを、全ガンマ放射能はオートウェルシンチレーションカウンタを用いて測定し、何れの測定においても対象核種中で最も計数効率が低い核種の効率をもって放射能値を決定する。

サンプラーから回収したセルローズろ紙はベータ線測定用の試料皿の直径に合わせて切り出し、残りの部分を全ガンマ用の試料とする。この際、ろ紙の面積による補正をする。また、活性炭含浸ろ紙は放射性ヨウ素用にそのまま試験管に入れて測定する。

この活性炭含浸ろ紙の放射性ヨウ素に対する捕集効率はヨウ素の性状、雰囲気条件、捕集時間、流量、湿度などの諸条件によって大きく変化する (図3)^[1]。したがって、捕集効率をこれらの条件により補正をしなければならない。

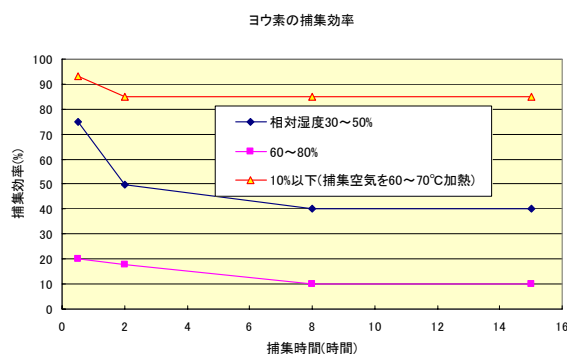


図 3. 放射性ヨウ素の捕集効率
(文献[1]の表 3 の一部よりグラフ化)

3.2 ^3H 、 ^{14}C の計測

図 2 の装置においてトリチウム用の試料はコールドトラップ用の U 字管内に霜状になって回収される。次に、この U 字管を取り出し、液体シンチレーションカクテル 8 ml で洗い出し所定のバイアルに移す。更にエタノール 2 ml で洗い出し、これもバイアルに回収する。このときの水の捕集効率は温度と湿度により異なるのでこの補正をしなければならない。図 4 は装置のマニュアルから求めた水の捕集効率曲線である^[3]。

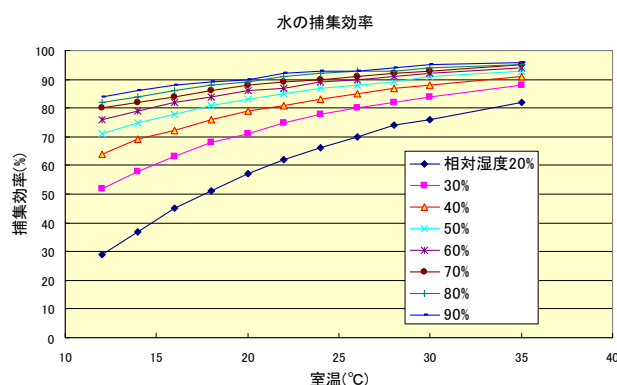


図 4. 水の捕集効率

一方の ^{14}C はモノエタノールアミントラップ用ガス吸尿管の下部に取り付けられたバイアルに回収される。次に吸尿管の上部からエタノール 3 ml で管内を洗い出し、最後にエタノール 2 ml で吸尿管下部を洗い流す。このエタノールの洗い出しの上下部の量の割合はどのような比でもかまわない。バイアル中にはあらかじめモノエタノールアミン 2.5 ml が添加されているが、この中に液体シンチレーションカクテル 8 ml を追加して測定用試料とする。マニュアルではモノエタノールアミンの CO_2 回収率を 95% としているが、99% 以上の回収率の報告がある^[4]。また、この物質は腐食性と急性毒性（吸引による肺水腫等）の危険性があるので十分注意して取り扱う必要がある。

試料測定用のそれぞれのバイアルは十分攪拌し、静置後、液体シンチレーションカウンターで測定する。

^3H 、 ^{14}C 試料のバイアル中の成分は下記のとおりである。

・ HTO

液体シンチレーションカクテル (Aquasol2) 8 ml
エタノール (99.5%) 2 ml
回収水 (HTO)

・ $^{14}\text{CO}_2$

液体シンチレーションカクテル (Aquasol2) 8 ml
エタノール (99.5%) 5 ml
Monoethanolamine (MEA) 2.5 ml
回収 CO_2 ($^{14}\text{CO}_2$)

4. 測定における添加剤の影響

液体シンチレーション計測においてシンチレーションカクテル中の成分は測定値に大きく影響を与える。その主なものはバイアル中での発光を抑制する消光 (quenching) 作用によるものが大部分である。基本的にカクテル中に添加するものは何でも消光の原因になり得る。したがって、MEA やエタノールの添加剤による計測値への影響を以下のように検証した。

- ・ 添加剤の無い試料 A : 24364 dpm $\pm$ 60 dpm
シンチレーションカクテル (Aquasol2) 8 ml
 ^{14}C -希釈水溶液 100 μl
- ・ A+MEA を 0~5 ml 添加した試料 B
- ・ A+エタノールを 0~5 ml 添加した試料 C
- ・ A+MEA 2.5 ml +エタノールを 0~5 ml 添加した試料 D

それぞれ添加剤を 0.5 ml~1.0 ml 毎追加して計測する。

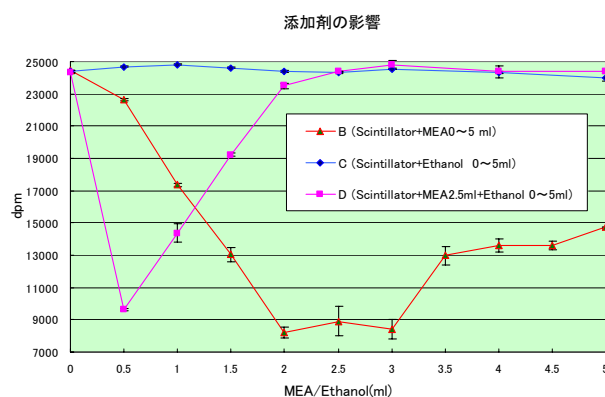


図 5. 添加剤による計測値への影響

図 5 にその結果を示した。MEA 添加の試料 B は MEA を添加した直後から計数値が低下し、2~3 ml で計数値が極小値を示す。その後 MEA が増加するに従って僅かに計数値の上昇が見られる。この時の液相は MEA 添加直後から混濁を呈する。一方、エタノールの試料 C では計数値の低下は殆ど見ら

れなく、液相も清澄である。また、MEA 2.5 ml をあらかじめ入れた試料 D はエタノール 0.5 ml 添加時は B の試料と同様の計数であったが、エタノールを増量するに伴って液相が清澄になり、計数値もエタノール 2.0 ml 以上の添加で正常に戻った。

この時の計数値に与える quenting の変化を図 6 に示した。図中の H#値はバイアル中でコンプトン電子のスペクトルが低エネルギー側にシフトする大きさを示したもので quenting の量を反映する指標である。図 6 で quenting は全ての試料で添加物の増加によって大きくなっている。しかし、液相の清澄な試料は図 5 から計数値の補正が正常になされているのが分かる。

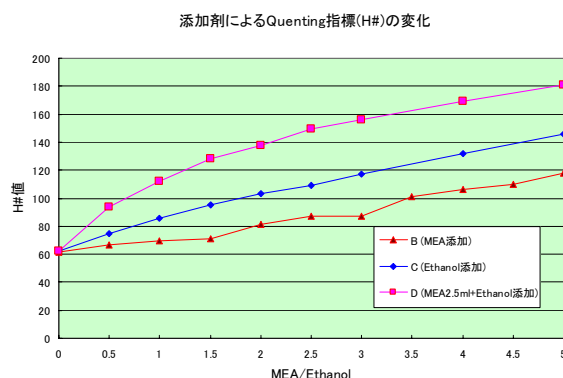


図 6. 添加剤による quenting の影響

5. 結果と考察

ろ紙の測定では特に問題とするような事はないが、活性炭含浸ろ紙の場合、試験管に入れる作業が少し煩雑になる。実測では殆どの試料がバックグラウンドレベルであったが、附属病院の核医学検査室（医学施設からは毎月核医学の空气中放射性物質濃度の検査を実施している。）で僅かに検出限界を超えた汚染試料があった。このときに測定済みのろ紙を重ねて置いたため、下のろ紙にも僅かに汚染が検出されてしまった。再度、同一場所を計測したが汚染は検出されなかったことで明らかに試料間の汚染であることが判明した。この時の汚染はスペクトル分析で核種を同定する事ができたが、注射器内に残った放射性同位元素を取り出すときに内容物が空气中に飛散したのが原因であった。

^3H 、 ^{14}C の測定では 4 項で述べたように試料中の成分比では計数値に影響が無いことが分かった。MEA の添加で計数値が大きく低下するのは添加量によって液相が微妙に変化し、乳濁と二層分離によって影響が異なる事によるためと推測される。この試料をしばらく静置すれば全ての MEA のみの添加物は二層に分離すると思われるが、これはシンチレータとエタノールの添加によって解消される。また、HTO の採取では使用室の湿度が高いときは、回収される霜状の氷が目視で容易に判別できるほどである。乾燥した冬期では図 4 でも明らかなように HTO の捕集率は悪い。

施設の許可を受ける際は放射性同位元素の 1/100 が空气中に飛散するとして使用室の放射性同位元素濃度を計算しなければならないが、通常の使用では放射性同位元素が空气中に飛散する事はあまり考えられない。筑波大学アイソトープセンターが実施した ^{14}C 標識アミノ酸の加熱実験 ($105^{\circ}\text{C}\sim 175^{\circ}\text{C}$) では始めの 2～3 時間に急激な放射能減少（半減期で 1 時間から 3 8 時間）がみられたが、常温での 6 0 日間の放置実験では検出できないレベルであった^[5]。筆者が各種材料に放射性同位元素を滴下し、常温放置における実験を試みたが（図 7）、一週間、一ヶ月単位ではそれぞれの核種で放射能の散逸（半減期の減衰補正あり）は殆ど認められなかった。

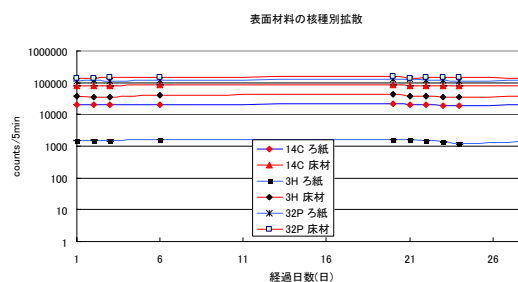


図 7. 汚染した表面からの放射能の散逸

6. まとめ

労働安全衛生法では空气中の放射性物質濃度測定は毎月 1 回実施することとなっている。我々が実施した平成 1 6 年 4 月から約 3 年間の実測データでは 1 度だけ下記のように ^{14}C が検出限界を超えた事があった。ただし、統計的にこの時の値を汚染レベルと判定する事はなかった。

- ・検出限界値 $\sim 2.53 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3$
- ・測定値 $\sim 2.98 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3 \sim 5.58 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3$
- ・濃度限度 $\sim 4.0 \times 10^{-2} \text{ Bq/cm}^3$

非密封の放射性同位元素を取り扱う実験室では前述のように飛散量を 1/100 と想定して換気量を設定しているので使用時、床の汚染時、詰め替え時であっても検出できる程度の汚染は少ないと思われる。

参考文献

- [1] 作業環境測定ガイドブック・電離放射線関係, 労働省安全衛生部環境改善室編, p. 33, p. 44-45, 日本作業環境測定協会, 2000.
- [2] 労働衛生管理とデザイン・サンプリングの実務, 厚生労働省安全衛生部環境改善室編, p. 117, 日本作業環境測定協会, 2002.
- [3] 空气中 ^3H ・ ^{14}C 捕集装置 Aloka HCM-101B 取扱説明書, p. 15-17.
- [4] 斎藤智雄 他, 空气中の ^3H ・ ^{14}C の放射能測定, RADIOISOTOPES 25 (1976) 37.
- [5] 微量放射能汚染の測定法に関する研究, 研究代表者 東京大学アイソトープ総合センター 森川尚威, p. 39-47, 昭和 61 年度科学研究費補助金 (総合研究 A) 研究成果報告書 (60303030).

筑波大学プラズマ研究センター防災訓練実施記録

平田久子
筑波大学数理物質科学等支援室（物理学専攻）
〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

まえがき

大規模の事業所では安全の為に災害を想定した訓練をする必要がある。殊に大学では学生を預っているため、その学生の安全を優先して図らねばならない。

筑波大学では平成 15 年度までは全学の防災訓練が防災の日前後に行われてきた。しかし、平成 16 年度の国立大学法人化に際し、周辺の数多の事項の構築のために防災訓練を行う時間的、組織的機会が無くなった。筆者が業務活動を行っているプラズマ研究センター（以下『センター』と記す）は殊に工場並の設備を擁し、安全の維持に多大な配慮を要するので、年度当初のセンター独自の安全講習会は継続して行っているが、全学の防災訓練に歩調を合わせていた訓練を、法人化後は行う機会を逸していることが懸念されていた。そこで平成 18 年 3 月に防災訓練の必要性から、年度末で学生数が少なくはあったがセンター独自に防災訓練を行った。本報告はその際の実施記録である。

1. 実施前

今回は訓練の日の朝のセンター定例ミーティングの際に、今までで初めて訓練シナリオを渡し、訓練の際の流れを一応全員に予告することにした。恰度 1 年以上の訓練空白期間があり、特に若い学生には経験者がいなかったのがシナリオ提示は良かったと思える。事前に事の流れを予告することは、非常時には却って対応できなくなると危惧したが実際には予想に反し、仮空経験を 1 つ持った上で臨んだことになり、大いに役立った。というのは訓練のシナリオで予備知識を入れていたにも拘らず、実地ではその通りにならなかったし、訓練後に予想以上の感想、コメントが集まったからである。

以下に防災訓練シナリオ及びセンター規則に準拠するセンター防災組織表を掲げる。

平成 17 年度プラズマ研究センター防災訓練実施要領（平成 18 年 3 月 20 日実施）

中規模地震（建物の倒壊はないが実験装置、什器等の転倒、火災を想定）の発生を感知して開始する。
（11 時頃予定）

○センター内緊急放送で地震発生、学生等退避を指示（センター長）。

○院生・学類生は最寄りの安全な出入り口より外へ避難、建物の外側を通過して玄関前のスペースに集合する（警備搬出班誘導）。その際に行き先表示板の表示は変更しない。

○教職員は全員運転室に集合し防災隊を組織（運転室の白板に自衛防災組織表を掲示し、在・不在を各自で記す。次に、予め定めていた防災隊長、副隊長、EL…Experiment Leader の略、週番…の順に当日センターに居るものから実際の隊長を決定し、組織上手薄な班へ適宜人員を再配備する。更に上記該当者が不在の節は次に KP…Key Person の略、鍵当番、週番…へ対象を拡大する。）

消火工作班（班長・H 垣）

消火器・ヘルメット・懐中電灯・トランシーバを確保

実験室での火災等の有無の確認作業を指示（防災隊長）

大実験室 1 階の北側東ガスパフ装置付近より出火の報告（ ）

緊急放送により現場での出火の旨の連絡と消火作業を指示（防災隊長）

消火器を持って現場へ急行、消火作業

消火の報告（H 垣）

警備搬出班（班長・K 沼）

ヘルメット・ハンドマイク・トランシーバを確保

学生を建物の外へ誘導、行先表示板仕様の一覧表で安否を確認

結果を防災隊長へ報告（K 沼）

総務救護班（班長・MH 田）

ヘルメット・救急用品・トランシーバを確保し、運転室で待機（5603、5601 の電話を確保）

学生の一人（M 本）が行方不明であることの連絡を受け、実験室及び地下の搜索を緊急放送で指示（防災隊長）

（ ）が消火工作班に連絡し、当の学生が実験室南側で動けなくなっているとの連絡

簡易担架を持って現場へ急行

安全経路を通過して避難場所へ脱出（工作係と連携する）

結果を防災隊長に報告（MH 田）

○防災隊長は、学生全員安全に避難、完全消火、救護処置完了の連絡を確認して訓練の終了を宣言

※上記訓練に先立ち、防災用具（ヘルメット、懐中電灯、ハンドマイク、トランシーバとバッテリー残量）の点検、消火器の配置、防災隊組織図、緊急連絡網の掲示の確認等を実施する。（防災隊副隊長）

国立大学法人筑波大学プラズマ研究センター防災安全管理委員会*

プラズマ研究センター自衛防災組織

責任者* : C 副責任者* : N 嶋

総務救護班 班長 : MH 田
総務係 : T 松、(H 田)、<K 池、Y 村>
救護係 : MH 田、S 山、E 藤、(I)

消火工作班 班長 : H 垣
消火係 : I 村、H 垣、(Y 川)
工作係 : N 嶋、W 所、(O 川)
R I 係 : K 蔵、(KI 井)

警備搬出班 班長 : K 沼
警備係 : H 條、M、S、<I 倉>
搬出係 : K 沼、N 倉、W 邊、(TI 井)

但し、() は物理学専攻からの応援部隊、< > は非常勤職員

2. 実施

前述の流れを前提に実地訓練を行った。自衛防災隊総務係の筆者は例年、防災本部にてタイムキーパーを自発的に行っているがその役割が定着したようである。以下にその際の記録を掲げる。なお、この資料は当日の発言メモから起こした記録を元に既にプラズマ研究センター年次報告ー平成 17 年度ー等に掲載しているが、直接の当事者として再掲させていただく。行頭の 4 桁の数字は時刻である。

- 1103 C: 「緊急放送」により地震発生の通知、学生は外へ避難、職員の運転室集合を指示（全館放送）
- 1104 職員点呼
- 1105 C: 実験室火災発生の有無確認の要請（全館放送）
- 1106 H 垣: 消火工作班 3 名 1 組にて実験室へ急行
消火工作班 RI 係 (KI 井、K 蔵): RI 保管場所の組立調整室へ急行
- 1107 KI 井: RI 安全確認報告→副隊長

- 1107 H 垣: 消火工作班より大実験室北側東ガスパフ装置周辺から出火の連絡（運転室へ急行して口頭）
- 1108 C: 総務救護班の 1 名 (T 松) の消火工作班への異動を指示
消火工作班 (H 垣、T 松): 出火現場へ急行
- 1109 消火工作班 4 名 (H 垣、I 村、O 川、T 松) による消火器を用いた消火活動
- 1109 警備搬出班: 2 階居室全員退避の連絡（トランシーバ）
同班: 3 階居室全員退避の連絡（トランシーバ）
- 1110 消火活動終了
C: 鎮火の連絡（全館放送）
- 1111 N 嶋: 鎮火の再確認と実験室内の点検の指示→消火工作班（トランシーバ）
- 1112 C、N 嶋: 学生の避難状況の報告を要請→警備搬出班（全館放送、トランシーバ）
- 1112 警備搬出班: 1・2・3 階の居室からの避難報告と学生 1 名の不明を通知（トランシーバ）
消火工作班 RI 係 (KI 井、K 蔵): セントラル部南側で人が倒れているのを発見（運転室へ来て口頭）
- 1113 C: 救護係へ救助を指示（口頭）
救護係 (S 山、E 藤)、K 蔵が救助活動に出動（この時点で屋外の警備搬出班は不明者を特定できていない）
消火工作班本隊: 負傷者を発見、救護要請（トランシーバ）
（この時点で救護係は未到着であった）
N 嶋: 救護係が出動した旨連絡（トランシーバ）
- 1113 救護係: 負傷者を外へ搬送中と連絡→本部（トランシーバ）
- 1114 警備搬出班: （実験室で負傷の）M 本以外の屋外退去を報告→本部（トランシーバ）
N 嶋: 消火工作班へ状況報告を要請（トランシーバ）
H 垣: 実験棟と西棟の間で担架にて負傷者を搬送中（トランシーバ）
H 垣: 屋外へ負傷者を搬送中（トランシーバ）
（この間に救急車の要請について議論あり、救急車を要請する状況としないことに決定）
N 嶋: 消火工作班へ実験室の状況確認を指示（トランシーバ）
H 垣: 地下も確認するかの問い合わせ（トランシーバ）
N 嶋: 実験棟地下の確認を依頼（トランシーバ）
- 1117 救護係: 負傷者を建物玄関まで搬送完了の通知（トランシーバ）
KI 井: 負傷学生の搬送完了を報告（防災本部の運転室へ来て口頭）
C: 「消火工作班は地下を確認中」の連絡（全館放送）
- 1118 H 垣: 「実験棟地下異常なし、西棟地下確認のため移動」の連絡（トランシーバ）

C、N 嶋：「了解」（全館放送、トランシーバ）
 1119 H 垣：「西棟異常なし」の連絡（トランシーバ）
 C：「実験棟地下異常なし」（全館放送）
 N 嶋：地下に入った人の名前の確認要請（トランシーバ）
 消火工作班（I 村、O 川、K 蔵、H 垣）が運転室へ戻る
 1120 C：員数の確認、センター屋外にいる職員名の確認要請（全館放送、トランシーバ）
 警備搬出班：屋外の人名の読み上げ（トランシーバ、聞き取り難い）
 本部：再度ゆっくり読み上げることを要請（トランシーバ）
 屋外：TI 井、T 松、E 藤、H 條、S 山、I 倉、KI 井、N 倉、W 邊、K 沼、M、S（12 名）
 （運転室には 8 名）
 1124 員数チェック完
 C：訓練終了宣言

3. 検討会

K 沼：非常時につき、女子トイレも男子が確認した。（問題なし）
 H 田：トランシーバの音声聞き取り難いので、発信の際に班名、居場所を言うてから用件を言うようにしてほしい。
 N 嶋：トランシーバの使用法として、
 ① 本部（運転室）と各班（原則として班長）が持つ。
 ② 送信する際、「こちら〇〇班、△△班または本部きこえますか？どうぞ」で始め、応答を待って内容に入る。
 ③ 話し終わったら「どうぞ」で送信終了。
 N 嶋：防災組織の変更で T 松→消火工作班への移動が後手に回った感がある。警備搬出班の初動が遅いと学生誘導に当たるのに遅れが出る恐れがある。
 H 條：「学生は外へ退避、職員は集合」というが学生は元々避難するのではないのか。
 N 嶋：学生に対して、何らかの避難誘導は必要だと思う。
 C：確認も必要。
 N 嶋：先ず避難誘導と退去、残りを確認する。
 C：学生を守ることが第一。
 H 條：担当職員の一部は学生を連れて屋外へ、一部は居室の見回り。
 MH 田：防災隊の組織を確認してから。
 N 嶋：消火工作班で、火災発生の連絡が口頭で入ったが、初期消火が重要なので、連絡に人員を割くよりも、現場での人員確保を優先して、トランシーバを使用して欲しい。火災が一箇所だけではない場合の対応も考えておく必要がある。
 H 垣：消火のときは現場にいる全員を集めて消火活動をした。

N 嶋：消火工作班の要員を運転室に残すべきか？（ほかに火がでることがあり得る。）
 C：人の手配は隊長が指示。
 全館放送を使えないときは、全体の状況把握ができないか。
 先に全員対象である旨を言ってからトランシーバで。
 N 嶋：外へ避難したら放送は聞こえない。
 S：その関連で玄関にも救急箱を備えた方がよい。（今回救護係が持っていくのを忘れた。）
 MH 田：運転室の防災リュックにある。
 S 山：持ち出しやすく必要なものだけリュックにいられておく必要がある。
 C：今後考慮する。
 TI 井：怪我人がある時、救急車の要請はどうするのか？
 N 嶋：救護現場の要請ではなく、事故発生の段階で判断し、本部が要請する。
 K 蔵：RI 係は薬品庫と RI が燃えている状況では持ち出せないで、どちらかという薬品のチェックのみでよいのか？
 A 井（環境安全管理室）：確認する。
 C：報告できればそれで当座は OK。
 H 田：職員点呼リストは防災隊発動時には良いが、員数最終チェックには使いにくい。
 N 嶋：員数チェックは（普段見慣れた）行き先表示板と同じ様式にする。
 T 松：総務係→消火係→救護係に回った。その旨を「連絡して下さい」とトランシーバ所持者に伝えた。（しかし本部には伝わらなかった。）現場へ向かう場合は伝えるべき。誰がどの様にいうのか？
 N 嶋：担当変更は到着・合流も連絡する。
 C：基本は危険箇所に入る場合は本部へ連絡する。一般的に部署を移動する場合も本部へ連絡する。
 T 松：担当変更になり現場へ入った場合には、その旨連絡する。
 S 山：救護係は作業が終了したので、室内の人にトランシーバを渡した。
 N 嶋：トランシーバは当初の班に固定すべき。全ての作業が終了するまで離さない。
 S：教職員の安否の確認はどうするか？
 N 嶋：最初にチェックした。班長は、班員全員の安否について常に把握している必要がある。屋外の避難者リストとの突き合わせが必要。最初は防災組織表のほうが使いよいが、最後の点呼では行き先表示板の並び方がやりやすい。
 MH 田：屋外へ避難者を誘導する班は、運転室で作業をチェックしてから外へチェックしに行く。
 C：点呼とリストの照合が重要。行き先表示板のマグネット表示忘れのチェックも必要。
 W 邊：本部の設置は運転室のみか。
 C：災害が大きければ屋外の避難先、小さければ運転室とする。その場で臨機応変に対応。大

規模地震では、一斉に外へ避難することもあり得る。

A 井： 先ず学生を避難させる。

災害のレベルで避難（訓練）も異なる。その場合でも生命を守ることを優先。場合によってはマニュアルを作って訓練を行うのが役に立つであろう。

記録は以上であるが、記録の整理をしていて後から気の付いた点として、いくつか挙げられる。

- ① 中規模の災害の場合、実験室の点検の際にガスボンベの元栓の閉じていることを確認する作業を含めたい。勿論、その配置図、確認順路の目安図も準備する。
- ② 実験時を想定した訓練（実験休止、発電機緊急停止作業が加わる）も必要。
- ③ 今回のシナリオ、または上記②の場合の何れかで停電を想定した訓練。照明、全館放送設備を使えないことを想定。
- ④ 緊急時に必要な作業をリストアップし、どの班が担当するかを予め決めておくのがよい。
- ⑤ もっと大規模な災害（地震）を想定して、全員が避難するだけの訓練（避難時間を計測する）をやってみるのもよいかもしれない。

などと思いつく。

また、今後準備するものとして、

- ① 防災リュックサック収納救急用品の充実。運転室に置く消火工作班用と避難者応急処置用
- ② 点呼用リスト（最初の防災隊組織時と最後の員数確認用）の作成
- ③ 実施計画の詳細（各班毎のフローチャート形式など）実施要領書の作成
- ④ 大学支給の担架は、組み立ての際に怪我をした経験があるので扱いに慣れておく必要がある。又、1人の人間を緊急時に2人で担ぐことを考えると不安定である。担送される者を固定する紐と、担ぐ人用の肩ベルトがあると多少は安心といえよう。この点について京都大学工学研究科附属安全環境衛生センター中川俊幸技術専門職員に教わったことによると、担架の組立ては足を使うほうがやりやすい、固定ベルトは市販されている、とのことである。
- ⑤ 今までに問題にあげていないが、搬出物、警備の対象、警備方法、等の指針を用意。

が考えられる。

4. 総評

昨年度は未実施だったプラズマ研究センター防災訓練は、平成 17 年度は年度末の 3 月の実施とはなったものの、訓練自体はスムーズに進行し、大きな問題も生ずることなく無事に終了することができた。終了後の検討会では、訓練の時間を大幅に上回る時

間をかけて、参加者からの有意義な意見が提案され、次回に向けての課題として活かされることとなった。特に今回は、環境安全管理室安全衛生担当専門職員荒井氏を見学に迎えて、実施後の検討会において貴重なご意見をいただいた。次回はもう少し早い時期に行うことも念頭に置いて実施したい。また検討会に学生も同席させ、意見や感想を聞くと同時に検討会そのものによる教育も兼ねたい。

5. 結語

今回は大学の連絡網の利用、確認はなく、センター独自に行ったので、センター長の「今、地震がありました。」の宣言で訓練実施の起点とした。

センターの実地訓練は模擬とは判っていながらも真剣に各人は役割をこなしている。それとて実際の災害では予想通りには行かないものである。しかし、想定訓練を経験した者と理屈しか頭に入っていない者とは自分の生命を守る能力が大幅に異なる筈である。実際にシナリオを渡されていてもその通りにはならず、実地訓練後の検討会には訓練の実時間以上の時間を割いている。この積み重ねが日頃の軽度の地震の際での対応、火災報知器の誤作動の際の対応、等に活かされているのは事実である。

特に今回は大学本部環境安全管理室荒井専門職員に声を掛け、立ち会っていただき、全学安全担当の視点で貴重な意見をいただけたことを感謝する。

あとがき

筑波大学級の規模になると防災訓練を行おうにも 1 棟の建物に対して複数の部局があり、組織ぐるみの防災訓練を行うのは難しい。附属病院等の一部の組織を除き、防災訓練が形骸化してしまった気配が感じられる。プラズマ研究センターは幸いにも 1 棟の建物の中に複数部局所属の教職員学生 70～80 名程が居る大所帯であるが、1 組織として 1 つの命令系統、責任系統が機能した活動を行っており、実態に即した訓練を行える。

また筆者はタイムキーパーとして記録し、殴り書きの発言メモを整理するという復習をすることで、当日考えつかなかったことを改めて思いつくというメリットを感じている。

今回の訓練の対応が全ての組織に適用できるわけではないが一部でも参考になれば幸いである。又、関連する参考意見を戴いて、今後に反映していきたい。

最後に本報告の体裁において、筑波大学システム情報工学等支援室鈴木秀則技術専門官、山形朝義技術専門職員の御協力を戴きましたことをここに記し、感謝します。

筑波大学技術報告 No.27
第6回筑波大学技術職員技術発表会報告集

平成19年3月発行

編集 筑波大学技術報告編集委員会
第6回筑波大学技術職員技術発表会実行委員会

発行 筑波大学研究事業部研究事業課
〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1
電話 029(853)2924

筑波大学人間総合科学等支援室(医学系)
〒305-8575 茨城県つくば市天王台1-1-1
電話 029(853)3014

第6回筑波大学技術職員技術発表会実行委員会

実行委員長
瀧田宏樹 副学長(研究担当)

実行委員
[人間総合科学等支援室]
稲月 一高(実行委員代表)

佐久間 勉
森田 倫子
須藤 伝悦
大神 明子
菅江 則子
桜井 秀子
佐藤 晶子
小林 浩三
秋山 佳代
文随 和美
安達 苗生美
林 剛人丸

[研究基盤総合センター]

内田 豊春
西田 憲正
松尾 邦夫
高橋 努
大和 良広
近藤 裕

[数理物質科学等支援室]

鶴見 明
間宮 精一

[システム情報工学等支援室]

鈴木 秀則
中島 孝

[生命環境科学等支援室]

有本 光江