

# 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<sup>[1]</sup>」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。

## 陽子弾性散乱同時計測法

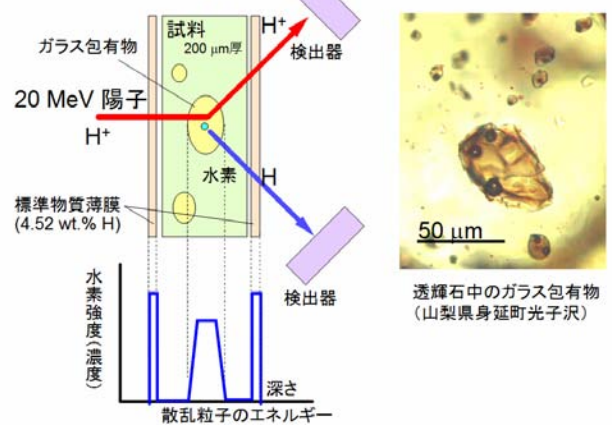


図1. 水素分析方法の概略

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。

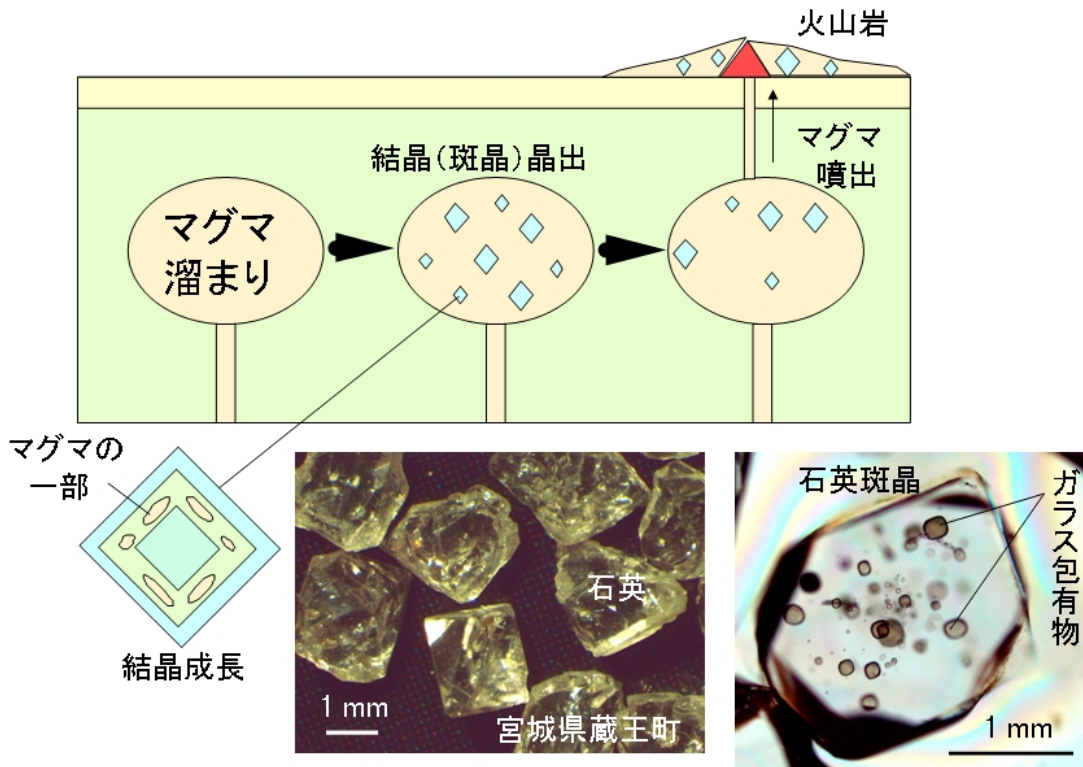


図2. ガラス包有物（メルトインクルージョン）

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。

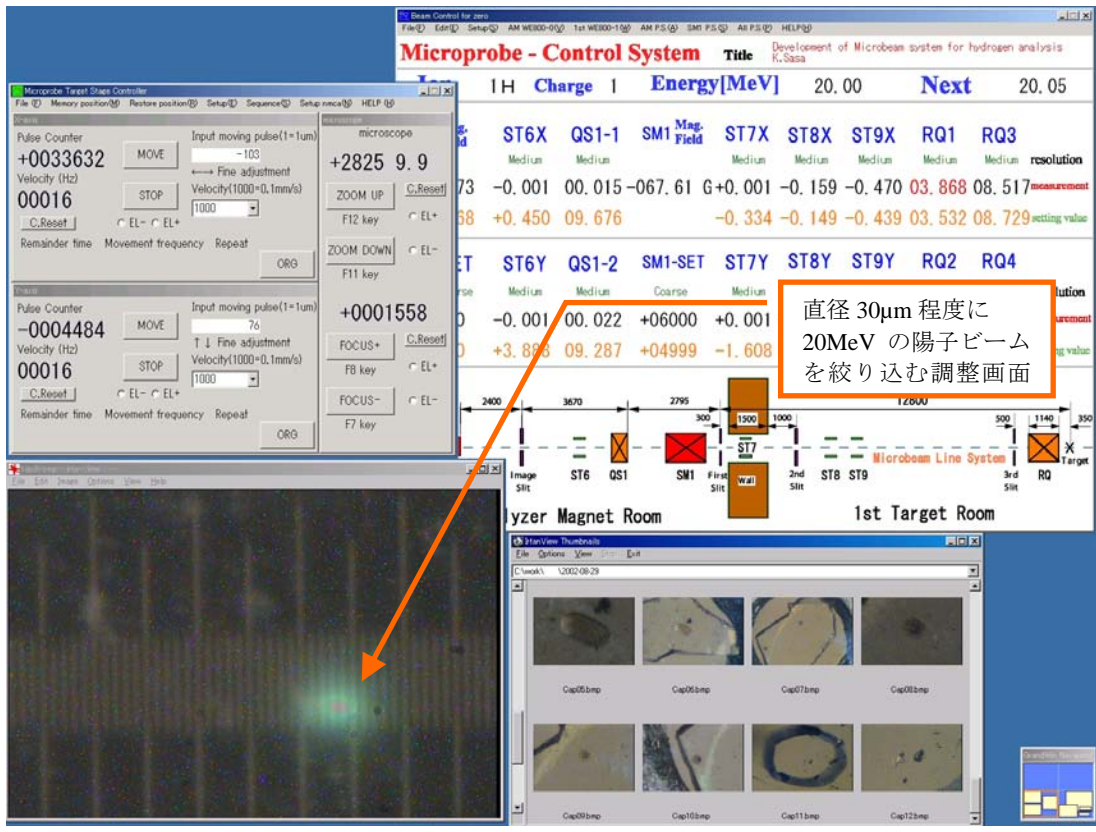


図3. マイクロビーム形成

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φ1~2 mm 程度である。これをスリットや電磁石レンズでφ10~100 μm 程度まで試料に合わせ小さくしぼる操作を行う。

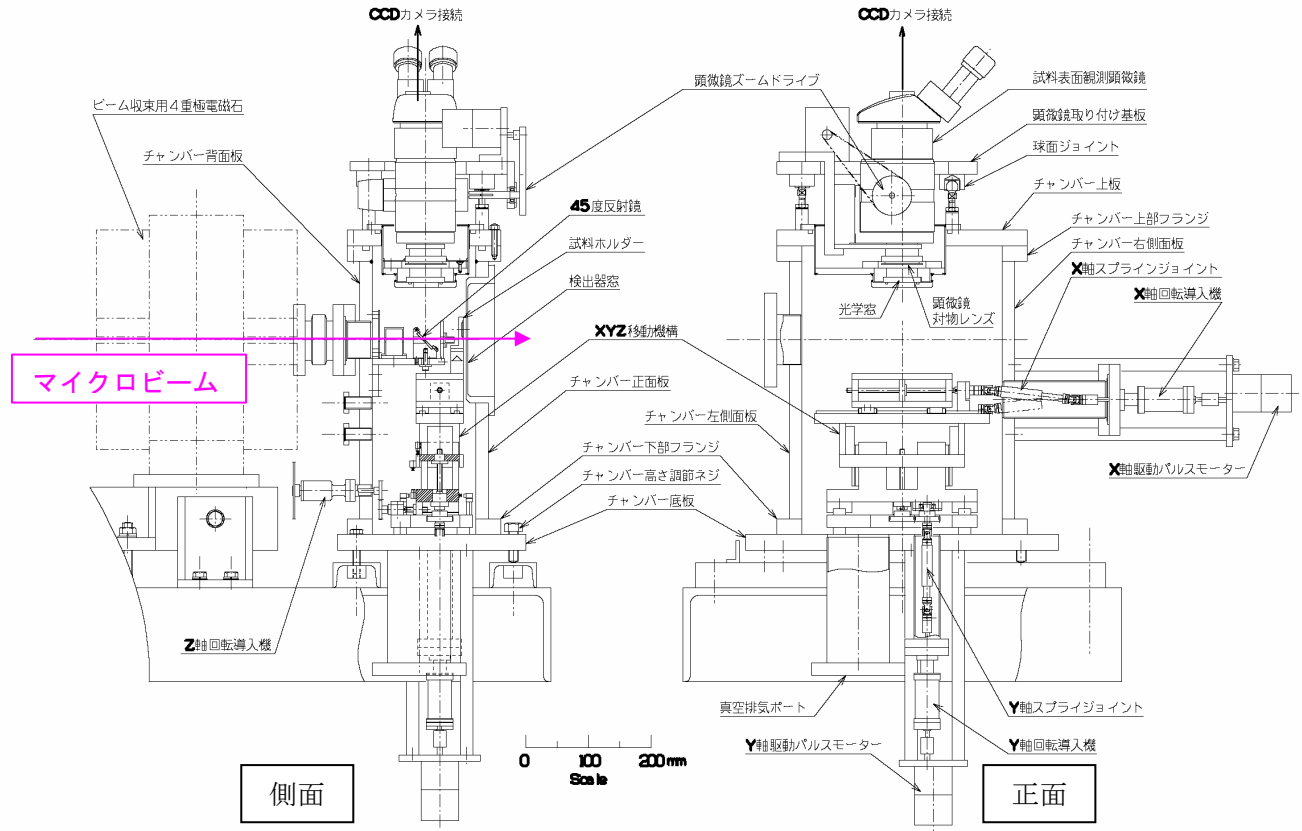


図4 試料チャンバー・顕微鏡図面

## 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 MZ12<sub>5</sub>）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。

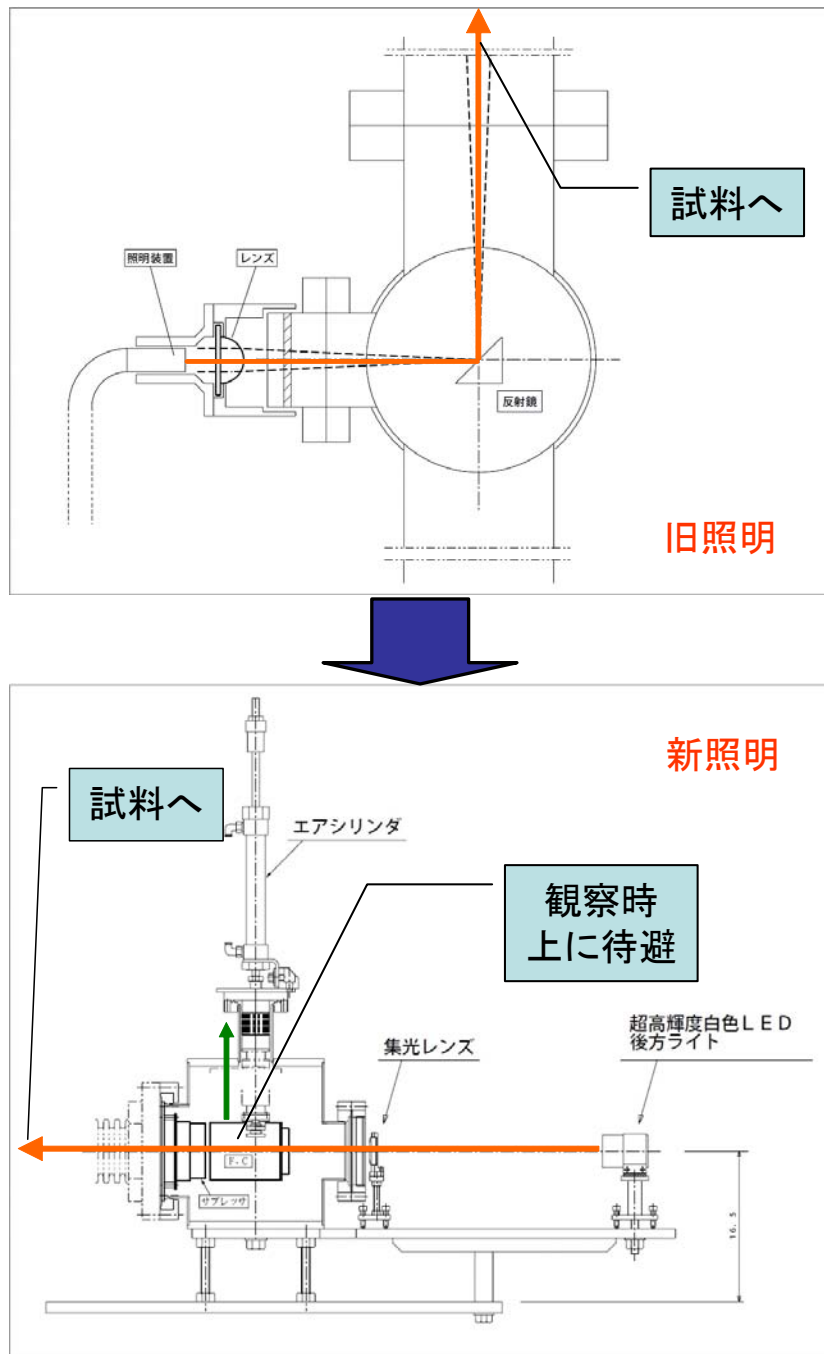


図5. 顕微鏡後方（試料透過光）照明の変更



## 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ボードを用いて観察・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なとき、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。

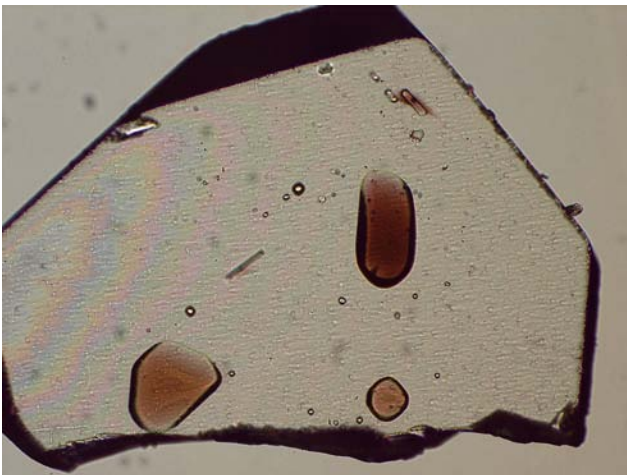


図6. 試料(宮城県荊田郡蔵王町円田土浮山D)

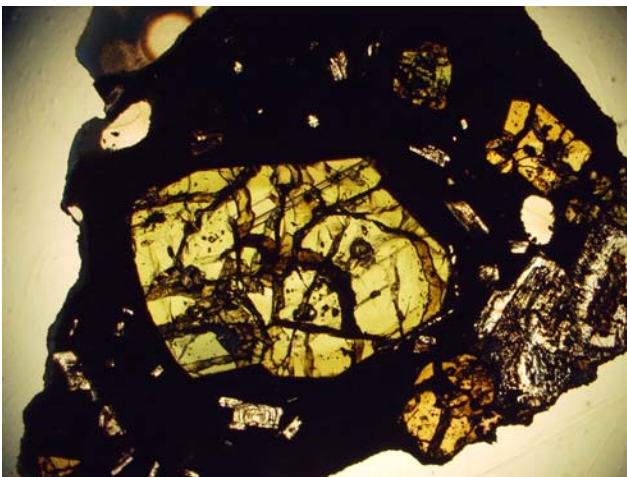


図7. 試料(山梨県中富町西島月見橋3-2-A-A)

### 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)アトレー 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―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―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)のインターフェースには、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。

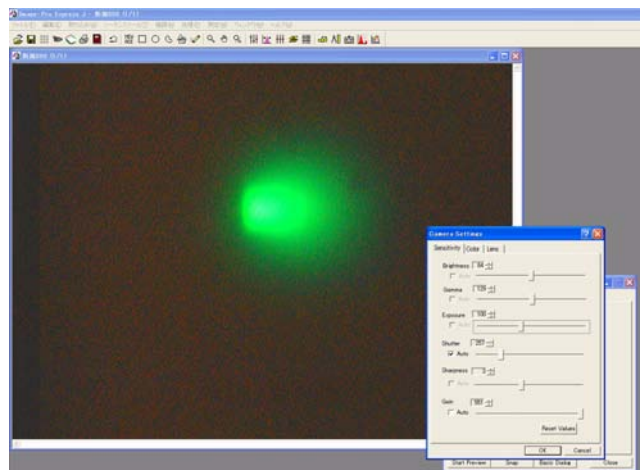


図8. ソフトウェアによるカメラの画質調整

## 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・リモートの切換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。

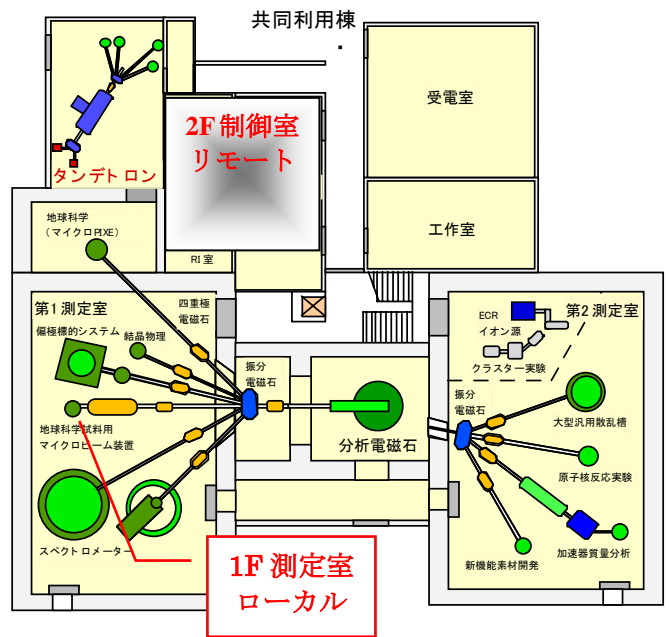


図9 ローカル・リモート位置関係

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

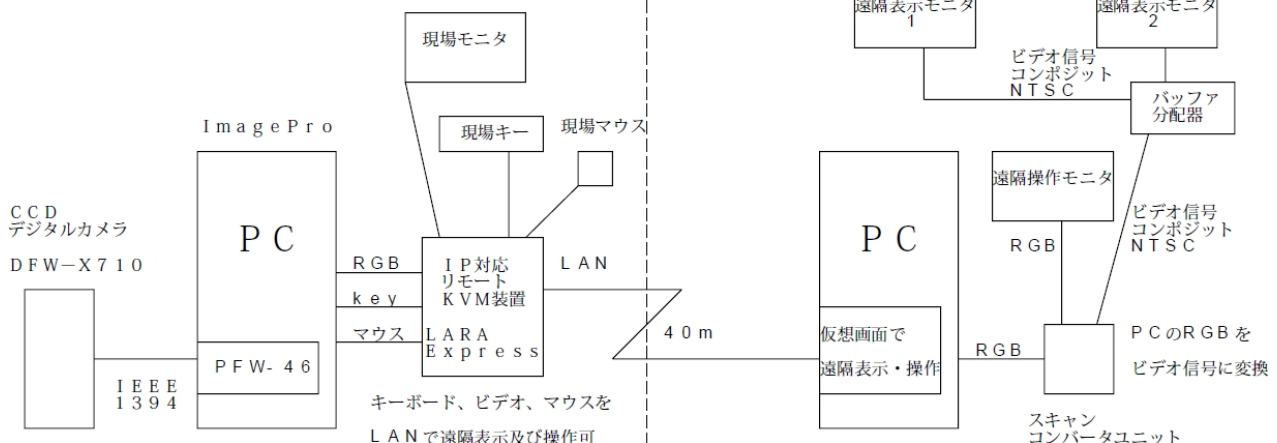


図10. KVM over IP ユニットでの接続図

### 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 UltraVNC<sup>1</sup> 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<sup>2</sup>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。

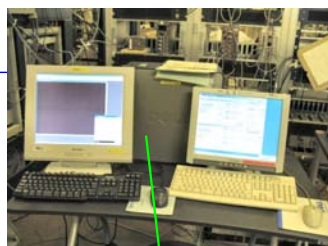
今後さらなるフレームレートの向上ができるか IgScope や PacketiX Desktop VPN などのソフトウェアでもテストする予定である。

## 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。

<sup>1</sup> [http://kp774.com/soft/uvnc\\_jp/](http://kp774.com/soft/uvnc_jp/)

<sup>2</sup> 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<sup>[2]</sup>として、学会誌等 36、国際会議発表 8、口頭発表 11、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。<sup>[3-5]</sup>



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<sup>[6]</sup>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

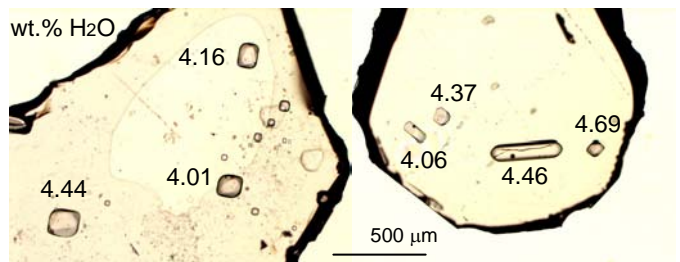
国内外の様々な試料を計測してきた。以下にこれまで測定した試料のリスト<sup>3</sup>を示す。

- 宮城県荊田郡蔵王町 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<sup>[7]</sup>

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。

<sup>3</sup> 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.