

(5) 製品開発のための非破壊可視化



中性子ラジオグラフィ (TNRF)

この装置は、中性子を用いたレントゲン写真、即ち、製品内部を非破壊で可視化する装置です。X線の場合に比較して、水素を含むオイルの動きやプラスチックが鮮明に観測できます。また、CTスキャンを用いることで製品を立体的に観ることができ、ことから、製品内部の健全性検査などに役立ちます。

マグネシウム合金製品の非破壊可視化観察

利用者 ○藤沼良夫、富長博、小石川勝男、小松崎和久、行武栄太郎
所属 茨城県工業技術センター

1.はじめに

マグネシウムは軽量、樹脂に比べて電磁遮蔽性が良好といった特徴を有しており、エネルギー消費の大きな製品開発業界で注目されている。例えば自動車産業、航空機産業等である。このような業界の動向から国においてもそれら業界で利用可能なマグネシウム材の開発、加工技術の開発等実施している。

このような状況から将来において、県内の企業においてもマグネシウムの加工関連事業が増加する可能性があることから、茨城県ではマグネシウム加工業務の受注を目指した支援を「茨城マグネシウムプロジェクト」として展開している。

今回の実験では、県内企業のマグネシウム加工技術の向上のために、中性子による、マグネシウム材加工後の材料内部の欠陥検出可能性の検証することを目的としている。

2. 実験方法

JRR-3のラジオグラフィ装置により、下記実験対象の中性子透過、可視化を行った。

- ・マグネシウムダイキャスト
- ・マグネシウムおよびアルミFSW部材
- ・マグネシウムスポット溶接部材
- ・マグネシウム曲げ部材
- ・鋼板溶接部材

なお、データ取りやCT画像化については原研機構の松林様にお世話になった。紙面をお借りて深謝致します。

4. まとめ

実験のまとめとして、JRR-3を用いた中性子ラジオグラフィでは、中性子がマグネシウムを透過しやすく、装置側で線量の微調整が難しいためかはっきりとした画像は得にくいことがわかった。

今後、県内で加工しているマグネシウム溶接部材やスポット溶接部材について詳細に実験することで画像が得られる可能性があることから、茨城大学西野先生ご指導の元、再度実験する予定である。

3. 実験結果

実験の結果については、透過画像とCT画像があるが、CT画像は計算が必要なため結果を得るまでに1ヶ月程度時間を要した。結果を図1～4に示す。

今回の実験において欠陥は検出されなかった。また、FSWの物質攪拌状況、鋼板溶接物材の接着状況等物理的なエネルギーが加えられた材料の組成変化についても明確にはとらえられなかった。

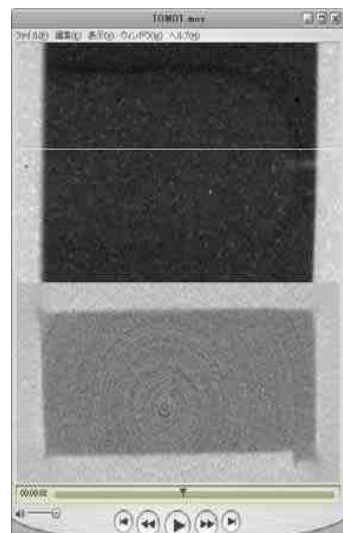
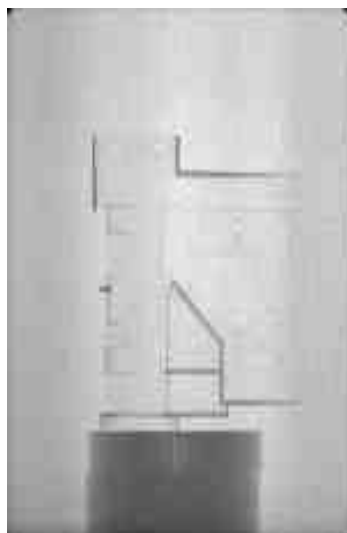


図1 実験対象例（ダイキャスト品）

図2 撮影風景

図3 撮影結果例
（ダイキャスト品）

図4 CT画像例（FSW）
上画像：上方からの透過画像
下画像：断面計算結果
白線部分断面が下図計算結果

マグネシウム合金製品の溶接継手部 内部欠陥評価

利用者 富長博、○藤沼良夫、小石川勝男、小松崎和久、行武栄太郎

所属 茨城県工業技術センター

1. はじめに

マグネシウムは軽量、樹脂に比べて電磁遮蔽性が良好といった特徴を有しており、エネルギー消費の大きな製品開発業界で注目されている。例えば自動車産業、航空機産業等である。このような業界の動向から国においてもそれら業界で利用可能なマグネシウム材の開発、加工技術の開発等実施している。

このような状況から将来において、県内の企業においてもマグネシウムの加工関連事業が増加する可能性があることから、茨城県ではマグネシウム加工業務の受注を目指した支援を「茨城マグネシウムプロジェクト」として展開している。

今回の実験では、県内企業のマグネシウム加工技術の向上のために、中性子による、マグネシウム材加工後の材料内部の欠陥検出可能性の検証することを目的としている。

2. 実験方法

JRR-3のラジオグラフィ装置により、下記実験対象の中性子透過、可視化を行った。

- マグネシウム板材の溶接部
- 溶接条件：電流値4段階、それぞれに裏波溶接、突き合わせ溶接

一般的に電流値が高いほど強固な溶接になる。また、板材の表裏面双方から溶接する裏波溶接のほうが、片側から溶接する突き合わせ溶接より強度が上がる。

なお今回使用したマグネシウム板材は1.0mm程度の圧延材である。

3. 実験結果と考察

実験の結果下記のことがわかった。

- 裏波溶接部には欠陥が見あたらなかった。
- 突き合わせ溶接では全ての電流値で欠陥が見受けられた。

突き合わせ溶接部の欠陥が現れているCT画像を図に示す。各図の上半分が溶接部分で下半分が溶接断面のCT画像を示す。下半分の上は裏波溶接、下は突き合わせ溶接である。

欠陥と思われる部分に点線で丸をつけた。また図タイトルの電流値につづく数字の大きいものほど電流値が大きいことを表す。

4. まとめ

今回の実験では多少画像は粗いものの溶接の欠陥を観察することができた。また、一般的に言われているように、突き合わせ溶接では欠陥が生じる可能性のあることを検証できた。また、上期のマグネシウム薄板加工品よりも今回の厚板加工品の方が観察は容易であった。

5. 謝辞

データ取りやCT画像化については原研機構の松林様にお世話になった。また、データの解析方法については茨城大学の西野先生にお世話になった。紙面をお借りして深謝致します。

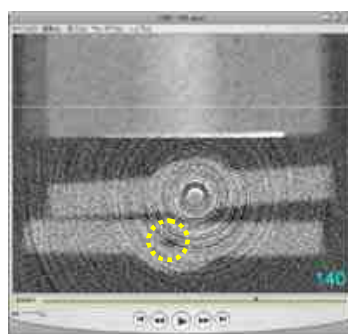


図1 電流地4

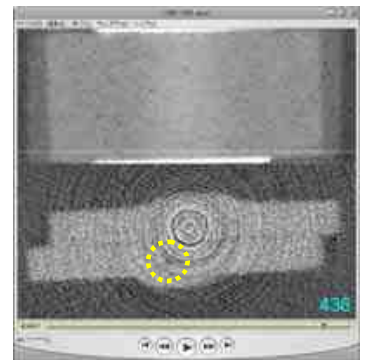


図2 電流地3

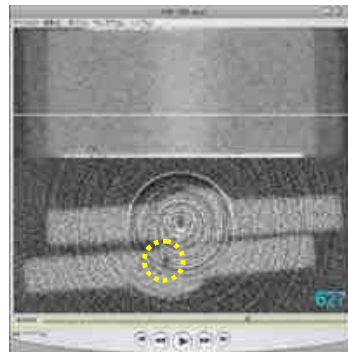


図3 電流地2

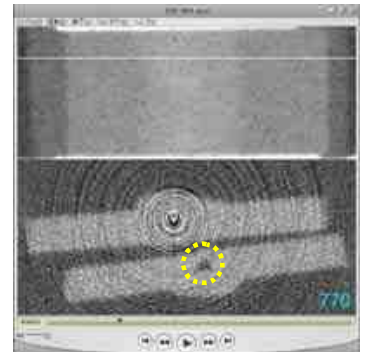


図4 電流地1



図5 実験に用いたマグネシウム溶接部材

建築材料における水分移動の可視化と定量化

利用者 ○今瀬 肇¹、鹿毛忠継²、野口貴文³、兼松 学⁴

所属 ¹茨城県企画部、²(独)建築研究所、³東京大学大学院、⁴東京理科大学

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れは、水分や劣化因子の移動を容易にし、漏水抵抗性や耐久性に大きな影響を及ぼす。しかし、通常の設計条件下において、ひび割れは不可避なものであることから、ひび割れが物質移動に及ぼす影響を明らかにするために多くの研究がなされて来た。特にひび割れ中の水分移動は、直接漏水に繋がるだけでなく、鉄筋腐食に必要な水分の供給源となることから、ひび割れの影響の中でも重要事項のひとつである。一方、コンクリート中の水分量を捉える手法としては、質量法以外に湿度計などの感知器を埋設する方法が一般的であるが、この埋設手法では、ひび割れ部に代表される局所的現象の実態を測定系に影響を与えずに捉えることは困難であった。

本課題では、コンクリートに生じたひび割れ部の水分挙動を明らかにすることを目的として、中性子ラジオグラフィによる非破壊可視化の基礎的実験を試行した。すなわち、セメントペーストによる水分の定量性の確認と可探深度の検討を行った上で、人工的に作成したコンクリートのひび割れ中の水分挙動に関して、コンクリートの乾燥状態をパラメータとして可視化の検討を行った。

2. 実験概要および結果

中性子ラジオグラフィによる測定は、JRR-3内のTNRF第二撮影室にて行った。撮像には蛍光コンバータ ($^6\text{LiF}/\text{ZnS}:\text{Ag}$) および冷却CCDカメラを用い、得られた光量と中性子強度の相関から試料の中性子透過率を求め、水分強度に換算した。

2.1 セメントペーストによる実験

中性子透過率は水素原子により強く減衰する。セメント硬化体の組成を考えれば、このことはセメント硬化体中の水分により減衰することを示すが、水和物中に取り込まれている結合水と、自由水やゲル水、層間水を区別することは出来ない。したがって、セメント硬化体中の水分挙動を可視化するには、結合水を除いた自由水の増減に対して十分な感度と線形性を有することを示さねばならない。そこで、セメント硬化体中の自由水の定量性確認と可探深度の検討を目的とし、セメントペーストを用いて飽水状態と105°C乾燥状態の三角柱試験体を作製し、斜辺方向からの測定(図-1)を行った。

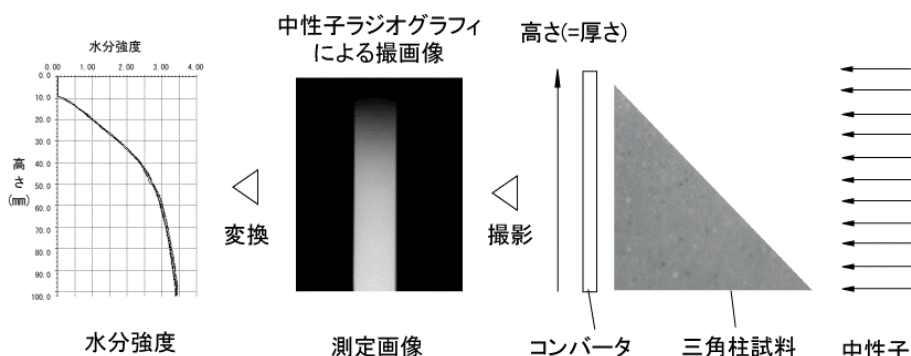


図-1 セメントペーストによる水分定量の概略

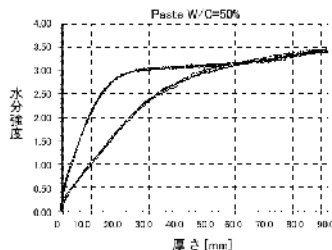


図-2 試験体厚さと水分強度の関係

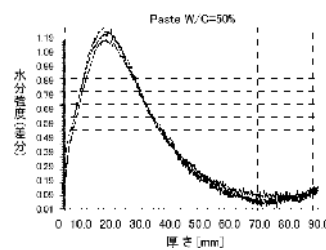


図-3 湿潤試験体と絶乾試験体の水分強度の差分

セメントは市販のポルトランドセメントを用い、W/Cを50%、試験体サイズを100×100×20mmとした。打設後24時間で脱型し28日まで水中養生した後、湿潤試験体は水中養生に、絶乾試験体は105°C乾燥により調湿し、材齢5週で測定を行った。測定位置の(試料の相対量)と三角柱試験体の斜辺方向の厚さの関係を図-2に示す。含水状態によらず一定点までは線形性を確保しているものの、10~30mmの区間に変曲点が存在していることがわかる。このことは湿潤試験体で10mm程度までの可探深度を持つことを示す。また、絶乾試験体の結果より105°C乾燥により取り除かれた結合水以外の水分が測定部の厚さに比例して測定されていることがわかる。

一方で、湿潤試験体は絶乾試験体に自由水、ゲル水、層間水が加わったものであるため、絶乾試験体と湿潤試験体の水分強度の差分をとることで、セメントペースト中の自由水分量が定量評価されるものと考えられる。

図-3に湿潤試験体と絶乾試験体の水分強度の差分を示す。およそ厚さ10mm程度まで線形性が確保されているものと判断することができる。このことは、本試験装置によりセメントペーストで10mm程度まで自由水量を捕らえることが可能であることを示し、通常のコンクリートの骨材の体積割合を7割程度と仮定すれば、約30mm強程度まで定量精度が確保されることが明らかとなった。

3. まとめ

本研究では中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分挙動の可視化を目的とした基礎的な研究を行い、以下の知見を得た。

(1) 本試験装置によりW/C=50%のセメントペーストで10mm程度まで自由水を捉えることが可能であり、コンクリートの骨材の体積割合を7割程度と仮定すれば、おおよそ30mm強程度まで定量精度が確保されることが明らかとなった。

(2) 本手法により、ひび割れ部およびマトリクス中に移動する水分挙動を高解像能で可視化可能であることが示唆された。

本実験から、中性子ラジオグラフィがコンクリート中の水の解析において非常に有用な技術となることが示されたと考えられる。下期では鉄筋コンクリートのひび割れにおける水の動きなどを動画として取得し、定量性ある水分動態を示す強力なツールとなるかを検討してみたい。

建築材料における水分移動の可視化と定量化

利用者 ○今瀬 肇¹、鹿毛忠継²、野口貴文³、兼松 学⁴

所属 ¹茨城県企画部、²(独)建築研究所、³東京大学大学院、⁴東京理科大学

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れは、水分や劣化因子の移動を容易にし、漏水抵抗性や耐久性に大きな影響を及ぼす。しかし、通常の設計条件下において、ひび割れは不可避なものであることから、ひび割れが物質移動に及ぼす影響を明らかにするために多くの研究がなされて来た。特にひび割れ中の水分移動は、直接漏水に繋がるだけでなく、鉄筋腐食に必要な水分の供給源となることから、ひび割れの影響の中でも重要事項のひとつである。一方、コンクリート中の水分量を捉える手法としては、質量法以外に湿度計などの感知器を埋設する方法が一般的であるが、この埋設手法では、ひび割れ部に代表される局所的現象の実態を測定系に影響を与えずに捉えることは困難であった。

本課題では、コンクリートに生じたひび割れ部の水分挙動を明らかにすることを目的として、中性子ラジオグラフィによる非破壊可視化の基礎的実験を試行した。すなわち、セメントペーストによる水分の定量性の確認と可探深度の検討を行った上で、人工的に作成したコンクリートのひび割れ中の水分挙動に関して、コンクリートの乾燥状態をパラメータとして可視化の検討を行った。

2. 実験材料と方法

中性子ラジオグラフィによる測定は、JRR-3内のTNRF第二撮影室にて行った。撮像には蛍光コンバータ(6LiF/ZnS:Ag)および冷却CCDカメラを用い、得られた光量と中性子強度の相関から試料の中性子透過率を求め、水分強度に換算した。

図-1に試験体概要を示す。試験体は100×100×400mmの角柱試験体より切り出した100×100×20mmの方形試験体を用いた。ひび割れは打設面に平行な貫通ひび割れとし、壁面に生じるひび割れを想定している。試験体は、高剛性試験機を用いて切断面に加圧して曲げ破壊させ、破断面を破損しないよう突き合わせ、エポキシ系接着剤で表面を目止めした後にアルミテープにより固定した。ひび割れ幅は0.05mmとし、供試体側面(図-1左面)におけるひび割れ幅をクラックスケールにて制御した。側面には水分供給用のアルミ治具を作成し、同様にアルミテープにて固定した。

中性子ラジオグラフィによりイニシャル値を測定した後、上部孔よりビニルチューブにて水分を注入し水槽を満水にし、注水前後よりおおよそ8秒間隔で2時間まで連続撮影を行った。ひび割れ部を移動する水分のみを可視化するため、各時刻の画像と注水時の水分強度の差分画像を作成し検討した。ただし、水槽中の水分の中性子散乱効果が見られたため、差分をとる注水時の画像には、水槽が満水になった直後の画像を用いた。

測定結果より、ひび割れ部を介して注水直後より水分が移動していることが鮮明に確認され、本手法により、ひび割れ部およびマトリクス中に移動する水分挙動を高解像能で可視化可能であることが明らかとなった。また、ひび割れを有するコンクリート中の水分移動量及び移動速度はコンクリートの含水率に依存して変化することが可視化を通じて明らかになった。

図-2に可視化画像のひび割れ垂直方向の水分強度変化の経時変化を示す。左図は右図中の白線に囲まれた領域について、各地点のy軸方向の平均値を変位に対してプロットしたものである。同図は想定される水分現象を良く捕らえているものと考えられ、本手法による水分挙動の相対的定量評価の可能性が示された。

これら一連の結果より、従来漏水抵抗性の許容限界とされている0.05mm程度のひび割れ中の水分挙動を高解像能で把握することが可能であることが示唆された。

現在、中性子散乱効果の補正法などを検討しつつ、さらなる定量性の精度向上を行っている。

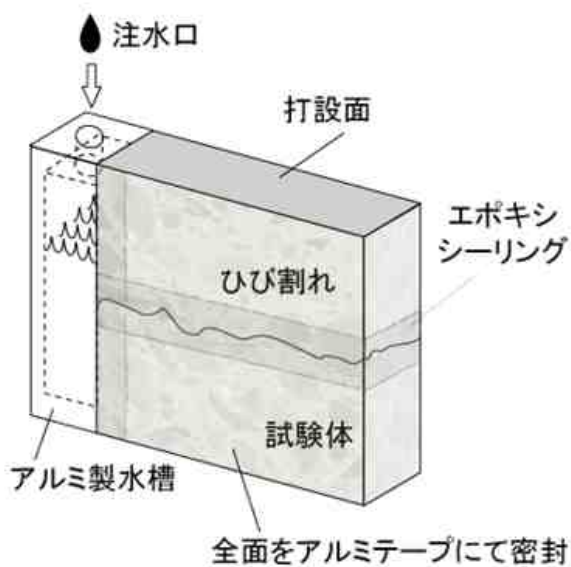


図-1 試験体概要

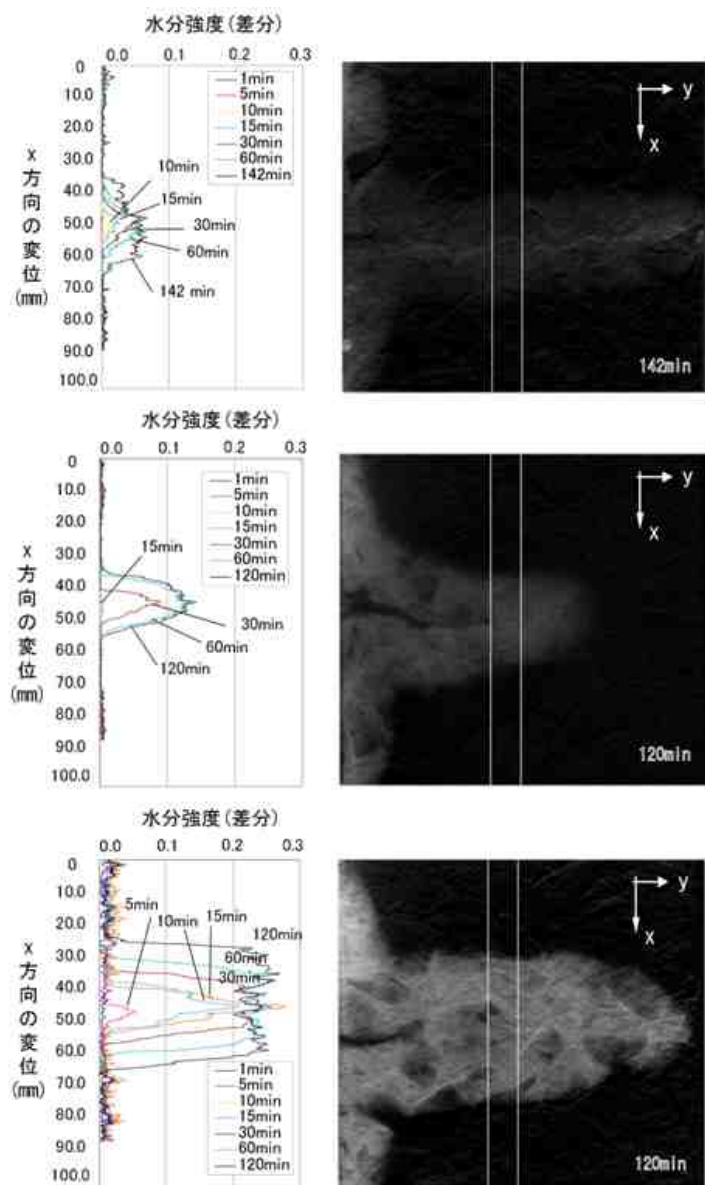


図-2 ひび割れ中の水分挙動の定量

3. まとめ

本研究では中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ中の水分挙動の可視化を目的とした基礎的な研究を行い、以下の知見を得た。

(1) 本手法により、ひび割れ部およびマトリクス中に移動する水分挙動を高解像能で可視化可能であることが明らかとなった

(2) ひび割れを有するコンクリート中のマクロな水分移動量及び移動速度はコンクリートの含水率に依存して変化することが可視化を通じて明らかになった。

上期・下期を通じた実験から、中性子ラジオグラフィがコンクリート中の水の解析において非常に有用な技術となることが示されたと考える。次年度は施設共用枠においての実験を申請中であり、定量性の高度化や様々なパラメータを振った広範なデータの取得を企画している。

中性子ラジオグラフィを用いたターボ分子ポンプ中での潤滑油の挙動解析

利用者 ○西原善明、末澤宏樹、上本龍二、坂根仁
 所属 住重試験検査(株)

1. はじめに

ターボ分子ポンプ (Turbo Molecular Pump ; TMP) は真空ポンプの一種で、内部の金属製の羽根が空気分子を弾き飛ばすことにより排気する方式のものであり、良い真空が得られる手軽で便利なポンプである。油軸受け型と磁気浮上型があり、前者は価格が手ごろな利点があるが、取り付け方向は一方に限定される。後者は完全にオイルフリーであり、取り付け方向の自由度が高いという利点がある。油軸受け型の場合、軸が回転することで軸先端部分に加工された溝にオイルが入り込み、そのオイルが循環されることで軸が浮上する。オイルの潤滑が悪いと、軸受け部分との摩擦が大きくなり、熱負荷により損傷を受けることになる。

本課題では、軸受け部分における潤滑油の挙動を、中性子ラジオグラフィを用いてリアルタイムで解析することを目的とする。

2. 実験材料と方法

被写体にはULVAC製TMP (UTM・150) を用いた。軸回転数は72000rpmである。TMP内部の構造を図1に示す。黒丸部分が撮影対象の軸受け部分である。照射室内には、ロータリーポンプを持ち込み、TMP内をある程度の領域まで真空引きを行った。TMPコントローラーは照射室の外に設置し、撮影を行いながら、TMPの運転制御を行える様にした。ポンプに付属している冷却用ファンやシールは水素を多く含むため撮影の障害となることから取り外した。潤滑油は蒸気圧の低いフッ素油 (パーフルオロポリエーテル) を使用しており、量は10cc程度である。

撮影体系を写真1に示す。ビームシャッター直後に10cmX10cmの穴をあけたボロンシートを貼り付け、照射野を限定し、撮影部分以外の箇所には中性子があたらぬ様にした。さらに、散乱中性子による放射化を防ぐため、コネクタ部分をボロンシートで遮蔽した。

3. 実験結果と考察

潤滑油の位置を確かめるために、TMPが水平状態での撮影と傾けた状態での撮影を行い比較した。結果を写真2と3に示す。写真中央よりやや下部分に潤滑油があることが確認できる。

軸受け部分を拡大して撮影を行った。撮影画像を写真4に示す。潤滑油とその他の箇所とのコントラストが悪かったため、撮影時には確認できなかったが、停止状態の画像をバックグラウンドとして差分の画像を確認すると、軸受け部分 (白丸部分) 周辺にあったオイルが上部に移動していることが確認できた。コントラストが悪かった原因は、撮影方向に対する潤滑油の層が厚いことと、潤滑油として使用しているフッ素油はフッ素が質量比で50%以上も占めているため中性子に対する透過率が通常の潤滑油より大きくなっていることが考えられる。

4. まとめ

より詳細に潤滑油の挙動を明らかにするため、潤滑油の材質と解析方法の検討を行いたい。弊社では、これまでにサイクロトロン加速器を用いた中性子ラジオグラフィを静止画フィルム撮影によって行ってきた。今後、強力な中性子場環境を実現して、動態解析に取り組み、新たな業務展開を図りたいと考えている。今回は、原子炉施設で実験を行う上での注意点、動画撮影による中性子ラジオグラフィの手法、高中性子場での実験を行う上での注意点を理解することができた。

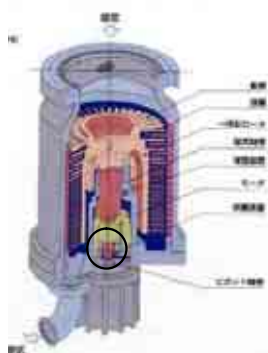


図1 TMP内部の図。黒丸位置は軸受け部分である。(ULVACカタログより抜粋)

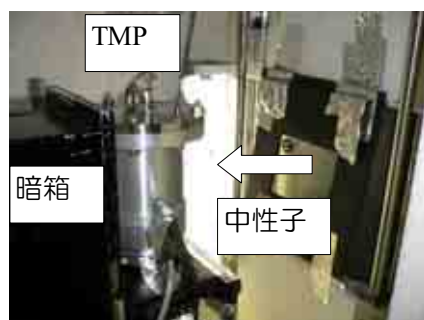


写真1 被写体と中性子シャッターと暗箱

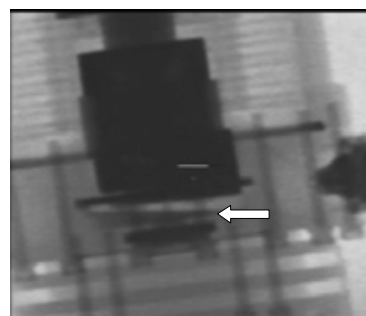
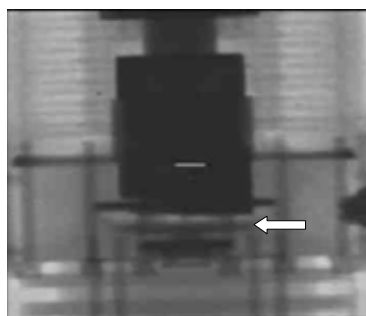


写真2, 3 TMPの撮影画像 (水平状態と傾けた状態)

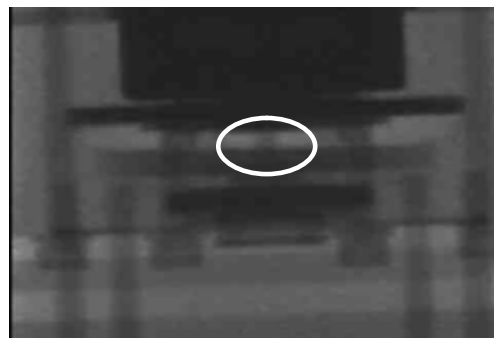


写真4 TMP軸受け近傍の拡大画像。白丸部分が軸受け部分である。

ジェットエンジン高圧タービンブレードの 非破壊検査

利用者 ○秋山公彦、柳澤道彦
所属 (有) インターフェース

1.はじめに

航空機のジェットエンジンから火を噴くというトラブルが続発している。原因はタービンブレードの冷却不良により、タービンブレードが設計値を超える温度となり、タービンブレードが遠心力で破断するためである。その破断した破片が高速で回転する他のブレードを次々と破壊し、エンジントラブルを増幅するのである。

エンジンは離着陸回数・飛行距離によって点検のため分解される。分解されたエンジンのタービンブレードは目視検査・重量検査・蛍光探傷検査・X線検査が行われ、継続して使用可能かどうかチェックされる。

タービンブレードは温度が上がらない様に内部に冷却空気を流して冷却しているが、現在行われている検査法では冷却空気が流れている内面の傷、金属の減肉を見ることはできない。

中性子はX線と違い、金属を良く透過するので金属の内部を見ることができる。中性子を使うと金属の減肉、金属内部のクラック、変形等を見ることができる様になり、タービンブレードのチェックを内部からも行えるようになる。

航空機業界は現在考えられる最良の検査方法で航空機の安全確保を行っているが、中性子による検査を追加することによって、更なる安全性向上・コストダウンに繋がるものと期待される。

そこで、JRR-3施設の中性子ラジオグラフィ装置を使い用意された内部にクラックのあるタービンブレードの透過像を取得し、(1)傷が見えるか、(2)傷の方向及び深さが分かるか、の実験を行い中性子ラジオグラフィが金属の減肉、金属内面のクラック、変形等を見ることができる最高の検査方法であることを証明する。

2. 実験方法

(1) イメージングプレート (IP) による透過像撮影

IPにタービンブレード2個をアルミテープで固定し撮影を行った。中性子照射時間は2秒。

サンプル

写真1はタービンブレードをIPに固定し中性子ラジオグラフィ装置にセットした様子である。



写真1 IPによるセッティング



写真2 CCDによるセッティング

(2) CCDカメラによる透過像撮影

回転ホルダにタービンブレードをアルミテープで固定し、角度を0、45、90度に変えての撮影を行った。各角度での中性子照射時間は10秒。写真2はタービンブレードを回転ホルダに固定し中性子ラジオグラフィ装置にセットした様子である。

3. 実験結果

(1) IPによる方法 (照射前: 写真3、後: 写真4)。

中性子照射時間が2秒にも関わらず、タービンブレード内部が非常に鮮明に写し出されているが、内部クラックの有無は確認できなかった。

(2) CCDカメラによる方法 (照射後: 写真5)。

中性子照射時間が10秒にも関わらず、タービンブレード内部が非常に鮮明に写し出されているが、内部クラックの有無は確認できなかった。

中性子照射室に入らないで角度を変えられるので、非常に便利である。

4. まとめ

(1) タービンブレードの撮影は国内では初めてで、貴重な撮影結果が得られた。

(2) 中性子照射時間が非常に短いため、放射化を極力抑えられる。

(3) タービンブレード内部を見る事が可能となったため、検査技術の向上に繋がるものと思われる。強いては航空機の安全性向上に繋がる。

(4) タービンブレードの撮影自動化する場合はCCDカメラ方式の方が有利であることが明らかとなった。

5. 今後の検討課題

(1) 今回用意したタービンブレードにはヘアークラックがあったが、透過像から確認することは出来なかった。(専門家が見れば分かるのかも知れない)

ヘアークラックを見える様にするための造影剤の研究開発が必要。

(2) 今回使用中性子ラジオグラフィ装置の最小分解は100μmとの事であるが、ビジネスに使用となると、最小分解は10μm台が必要と思われる。

そのため、撮影系の改良が必要。



写真3 照射前のブレード

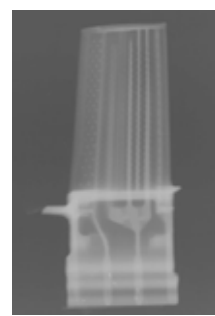


写真4 ブレードの
中性子ラジオグラフィ像 (IP)

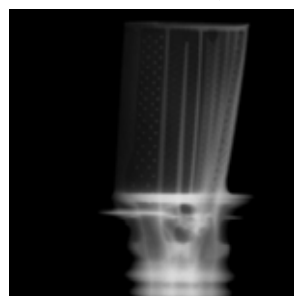


写真5 ブレードの中性子ラジオグラフィ像 (CCD)

電磁バルブのシール部位の可視化

利用者 ○梶原堅一¹、香河英史¹、櫛木賢一¹、長田泰一¹、高橋慶行²

所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. はじめに

衛星の推進系の軌道上での事故の殆どは、バルブに起因している。JAXAでは、信頼性向上研究としてバルブの動作を確実にする研究を実施している。しかしながら、バルブの動作はその構造上直接観察することは困難である。

X線を用いたCT等により内部の金属部品の観察は、可能であるが、流れをせき止める部位品は、X線では観察できないテフロンや合成ゴム等が用いられており、X線では透過してしまい像を得ることは出来なかった。このため、漏れを防止する高分子材からなるシール部の変形などに関する情報は、分解を行うなどによる方法しかなく、使用状態とは大きく拘束条件等が異なっており、漏れのメカニズムの解明が難しかった。

中性子ラジオグラフィーを利用した内部観察で、これまで確認できなかったシール部の実使用環境下の状態を観察する手法を開発し、バルブで漏れの発生するメカニズムの解明を行う。

2. 実験方法および装置

電磁バルブのシール部位について、CT画像の取得を行った。撮影は、イメージングプレートよりも解像度の落ちるCCDカメラを用いて、回転テーブル上に設置した供試体を一視野0.4°づつ180°回転させて行った。一枚の撮影時間は、およそ1秒である。

3. 実験結果

合成ゴムのシールは存在が見え、今後、解像度を向上させて分解能を改善すれば変形の様子が検知可能であることが確認できた。テフロン製シールについては、よく見えず、中性子での観察に適していないことが解った。これは、テフロンの主成分である四フッ化エチレンの化学式が、 $(-CF_2-CF_2-)_n$ で示されるとおり、水素原子が含まれていないことから、中性子透過の程度が他の有機材料よりも劣るためと推察される。

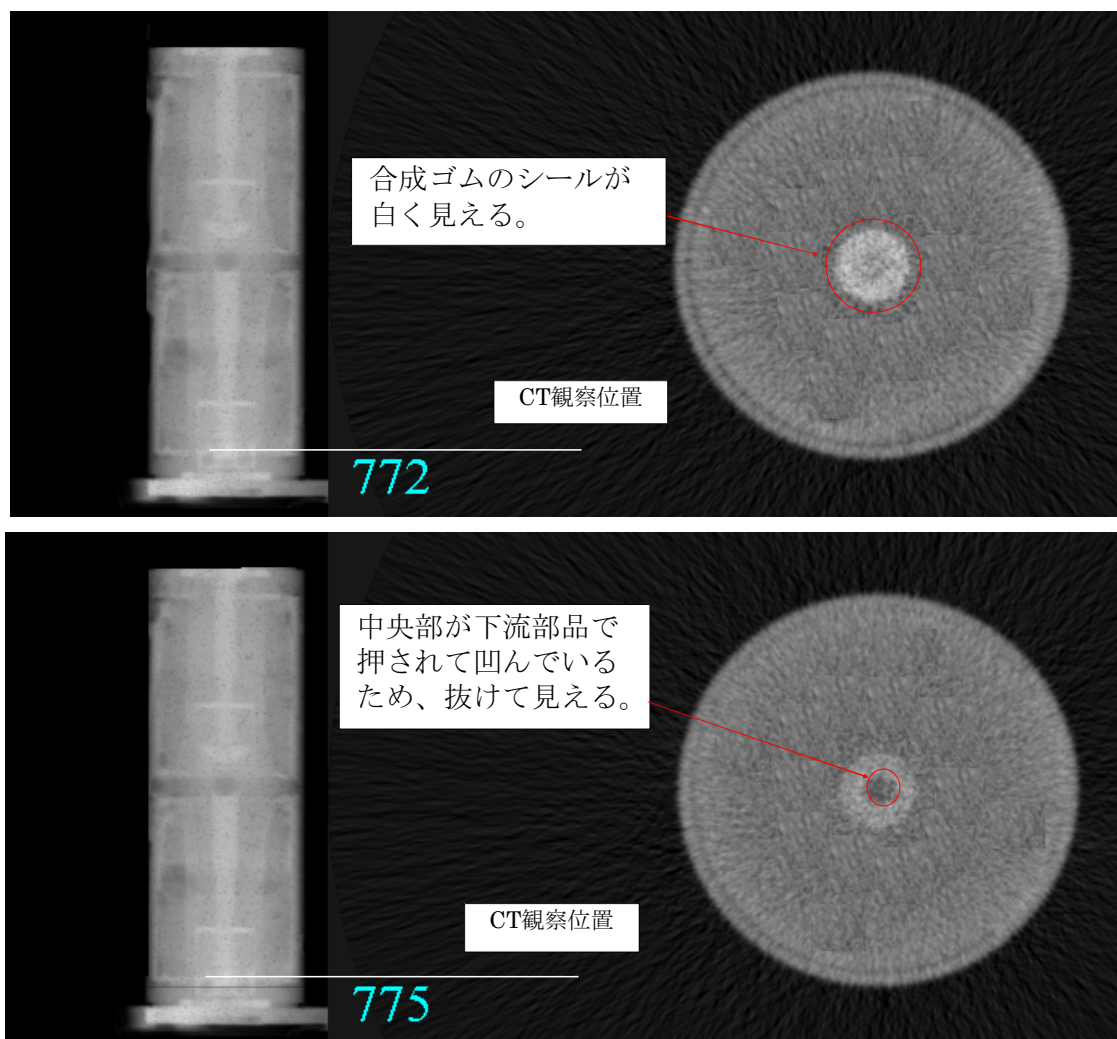


図1 合成ゴムがある弁のCT画像結果

4. まとめ

平成19年度前期の課題として行った電磁バルブのシール部位の可視化の結果は、良好で、中性子ラジオグラフィ技術の宇宙分野への適用の可能性を確認した。

これらの技術が実現できれば、宇宙分野のみならず一般産業にも適用できる技術であると思われる。

電磁バルブのシール変形部位の可視化

利用者 ○梶原堅一¹、香河英史¹、櫛木賢一¹、長田泰一¹、高橋慶行²
 所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. はじめに

衛星の推進系の軌道上での事故の殆どは、バルブに起因している。JAXAでは、信頼性向上研究としてバルブの動作を確実にする研究を実施している。しかしながら、バルブの動作はその構造上直接観察することは困難である。

X線を用いたCT等により内部の金属部品の観察は、可能であるが、流れをせき止める部品は、X線では観察できないテフロンや合成ゴム等が用いられており、X線では透過してしまい像を得ることは出来なかった。このため、漏れを防止する高分子材からなるシール部の変形などに関する情報は、分解を行うなどによる方法しかないが、使用状態とは大きく拘束条件等が異なっており、観察される結果から漏れのメカニズムの解明が難しかった。

中性子ラジオグラフィを利用した内部観察で、これまで確認できなかったシール部の実使用環境下の状態を観察する手法を開発する。これにより、バルブで漏れの発生するメカニズムの解明を行う一助とする。

2. 実験方法

放販協から指定された実験コーディネータと実験方法について事前協議を行い、遠隔操作等の手法の確立に先立って造影剤の検討を行うことになった。対象を中性子でも透過してしまい観察の難しいテフロンシールについて造影剤を用いた可視化を試みることになった。このため先ず造影剤の濃度とテフロンシールの付着具合を確かめる予備実験を行った。

水に硝酸ガドリニウム結晶を溶解させただけの造影剤では、テフロンの撥水性により造影出来ないことが予想されたため、IPA（2プロパノール）を添加することにした。

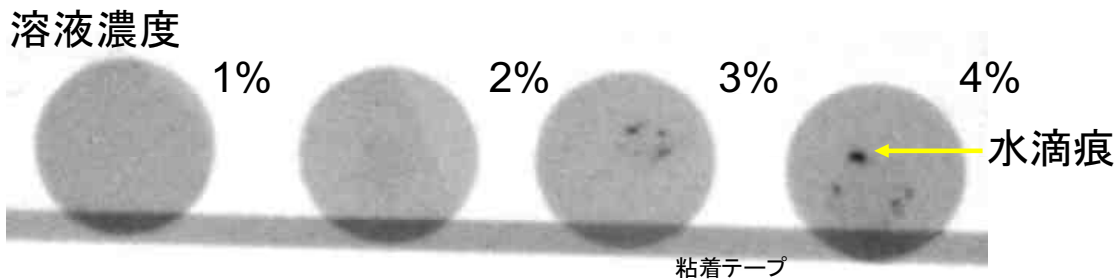
観察対象の濡れ具合を確認するため、イメージングプレートによる観察を複数回を行い造影剤の付着度合いを調整し、CT撮影を行うことにした。

3. 実験結果

3.1 事前検証

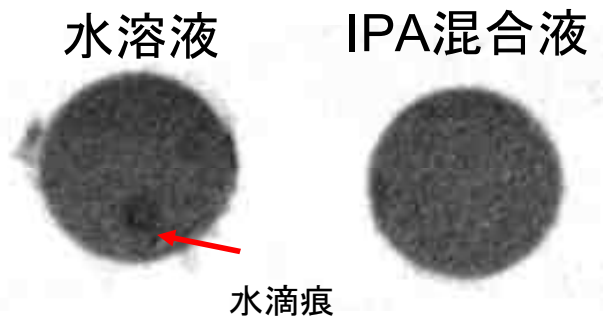
実際の観察対象弁のCT撮影に先立って、テフロンに対する造影剤の確認を行った。テフロンは、市販品のテフロン棒（φ15mm）を切断したものをアルミL字アングルに粘着テープを用いて貼り付け、それに対して、1,2,3,4wt%の硝酸ガドリニウム溶液を塗布した。

その後、乾燥し、中性子ラジオグラフィ撮影を行った。撮影結果を以下に示す。



水溶液は、テフロンではじかれてしまい水滴を形成してしまったので、水滴痕が残っているのが観察できた。これにより数%水溶液でも付着させることが出来れば造影できることが分かった。

次にテフロン表面で撥水性を抑制してガドリニウムを塗布する目的でIPA混合溶液との比較を行った。撮影結果を右に示す。



水溶液とIPA混合液では、コントラストに差が無く、殆ど影響がない事が分かる。ここでも、水溶液の水滴痕が観察されていることから、1~4%の濃度ではコントラストに差が出るほど付着させられないことが分かった。この結果から実際の実験では、10倍以上の濃度30~50wt%硝酸ガドリニウム溶液を用意することにした。

3.2 観察対象物品

設備側の制限により割り当てられた実施期間が約半日と短かったため、前期の観察と同一の宇宙用遮断弁のテフロンシール廻りの観察を行うことにした。観察部位を赤枠で示す。

3.3 実験に使用した物

- ・ 硝酸ガドリニウム水溶液
 - ① 50wt%溶液 (10:10溶液)
 - ② 33wt%溶液 (10:5溶液)
- ・ 注射器 上記水溶液を観察対象の遮断弁に注入するのに使用した。
- ・ 窒素ガス 上記水溶液を排出するのに使用した。

3.4 観察手順

CT撮影までの観察手順を以下に示す。

- ① 観察対象の遮断弁の開状態を確認する。
- ② 遮断弁の上流から対象溶液を注射器を用いて注入する。
- ③ 必要に応じて、窒素ガスを用いて、加圧し圧入する。
- ④ 遮断弁の反対側から液のしみ出てくるのを確認する。
- ⑤ IP（イメージングプレート）を用いて中性子イメージングを行う。
- ⑥ CT撮影に向いた条件が整ったと判断されるまで繰り返し。
- ⑦ CT撮影を行う。

3. 5 観察結果

中性子で写らないテフロンシールがガドリニウムにより造影されたように見えた。

① 10：5水溶液(33wt%)

水路内が完全に造影剤では満たされず、部分的に気泡が見える。造影剤が強すぎて、中性子が通っていない部分がかかなりある。

② ①の造影剤液抜き

①の状態から造影剤液を窒素ガスで加圧して抜いた。造影剤は大方抜けたものの、ポベット廻りなどにはかなり残っており、CT撮影には不向きな状態となった。

③ IPA混合溶液

硝酸ガドリニウム10：10水溶液(50wt%)2mlをIPA2mlで希釈した溶液を注入し、大方の水溶液は微パージにて排出した。

IPAを用いると濡れ性の向上が見られ細部まで溶液が廻っている様子が観察された。しかしながら、全体的にかかなり多く残留している造影剤があり、CT撮影には不向きな条件となった。

④ IPA混合溶液その2

10：5水溶液(33wt%)2mlをIPA4mlで希釈したものを注射器で注入後、液は上流からパージを行い排出した。

③に比べシールが見えてきており造影の程度は良いようだが、シール・ポベット廻りに、まだ、造影剤が残留している。

⑤ ④を十分パージ

遮断弁の開閉を実施して、遮断弁の上下双方からパージを実施した。

ポベット廻りからは、造影剤が抜けて、シールが見えているように思われる。

この状態でCT撮影することとした。

⑥ 前期トライアル時の画像

造影剤は、注入しておらず素の状態の透視画像。シール（赤丸中央部）はグレーに抜けている。⑤と比較すると⑤では、端面が強調されている。

3. 6 CT結果

① CTの撮影は⑤の状態で行った。これまでのイメージングプレート画像の垂直方向から見た形となっている。分解能が悪く、造影剤が多く残っていた部分のみに強い像が出ている。また赤枠のシール部位についてもよく解らない結果となった。

② 前期の画像

比較のため、造影剤を用いなかった前期のトライアル結果を示す。全体的に今回の造影剤を使ったCT画像よりも形状がはっきり見える。造影剤が付着した部分はコントラストが強くなるため、CTの再構成計算ではアーチファクト(斜め線)が生じ却って全体的に解像度が落ちる結果となった。また、さらに今回の撮影では造影剤を弁内部に注入するためメクラ栓をあたらたに取り付けていた。メクラ栓は、金属の塊であるので特に90度方向（下図水平方向）での中性子線の透過率が悪化したと考えられる。

4. まとめ

前期のトライアルに引き続き中性子ラジオグラフィによる弁内部の可視化を試みた。

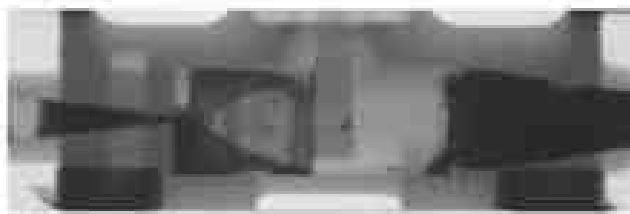
硝酸ガドリニウムを使った造影剤による効果は、単純透過画像では効果が認められるもののその付着度合いによっては、造影剤そのものの塊が像となって現れてしまう事が分かった。完全に満たしてしまうと中性子が通らず内部観察には向かない事も今回分かった。

もっと薄くした溶液や他の造影剤（例えば水やIPA）を内部流路に完全に満たし、塊を形成することを排除した上で撮影を行う等の改善方法が考えられる。

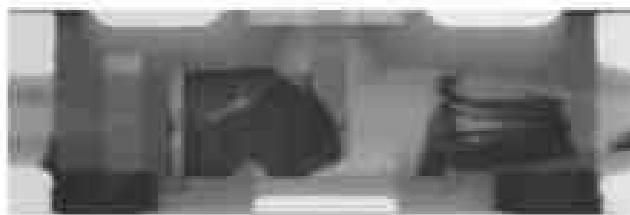
しかしながら、現状の中性子ラジオグラフィの解像度では、今回対象とした数ミリ程度の流体通路を持つシール廻りの漏れを解明する為に必要な情報が得られないことが分かった。

3. 5

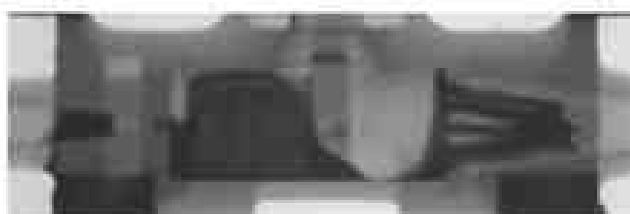
①



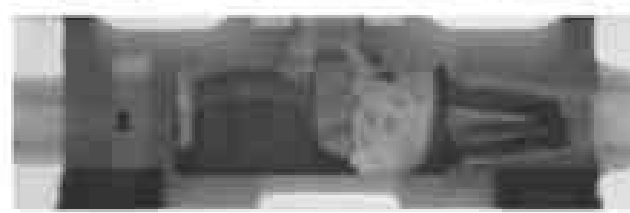
②



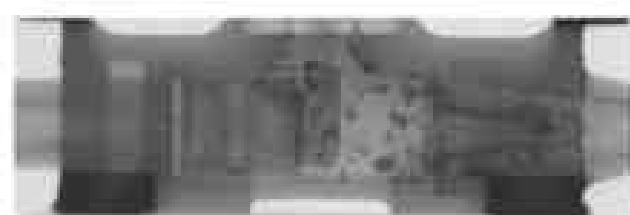
③



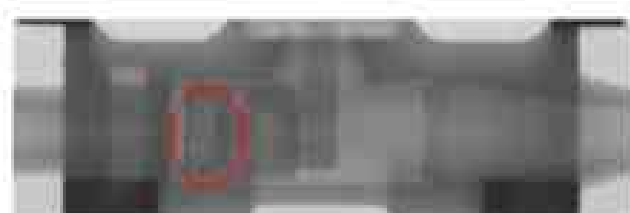
④



⑤



⑥

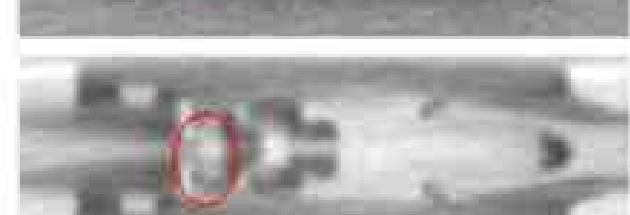


3. 6

①



②



細管内に封入された無水ヒドラジンの界面観察

利用者 ○梶原堅一¹、香河英史¹、櫛木賢一¹、長田泰一¹、高橋慶行²
 所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. はじめに

人工衛星の姿勢制御に使用されてる一液式スラスタは、燃焼室内に推薬を噴射しそれを燃焼させることで高温ガスを生成し、ノズルから噴出させることで推力を得ている。これまで、石英ガラスを用いた燃焼室の可視化を行っているが、燃焼が全体的に発生している表面的な状況は分かるもののガスの分解状況や内部の噴射状態や燃焼状態については情報が得られていない。解析等により補間を試みているが、その結果がスラスタの性能向上に結びつかず内部の燃焼構造が実現象と異なっていることも考えられる。中性子ラジオグラフィーを利用した内部観察で、実機状態のスラスタの噴射状態を観察し、推薬の噴射状況や燃焼面の挙動とその分解状況を明らかにすることで解析の精度向上に資することを最終的な目的とする。初年度は、まず、細管内に推進薬（ヒドラジン）を充填したサンプルを用いて、観察手法の適合性の確認を行う。

2. 実験方法

-4のステンレス配管（内径3.5mm）内にヒドラジンを封入した可視化供試体を準備した。また、同時に比較用として、脱イオン水、IPA、アンモニアを封入したものも同時に用意して、ヒドラジンとの視認性を比較する事にした。

3. 実験結果

イメージングプレートで得られた画像を図1に示す。

ヒドラジン、脱イオン水、IPAにおいては、管中のメニスカス形状が十分に確認出来る程度の可視化が可能であることが確認できた。なお、アンモニアは残念ながら界面を確認することが出来なかったが、これは供試体準備の段階のアンモニア液充填作業が不備であったためである。

また、ヒドラジンは、IPA、水よりもコントラストが強く、より明細な界面画像取得が可能であることが判った。これは水素原子の数が多いことから、ヒドラジンが中性子での可視化に適していることを示しているばかりでなく、今後、安全な流体である水を使ってフィージビリティ事前確認用流体と出来ることを示唆している。

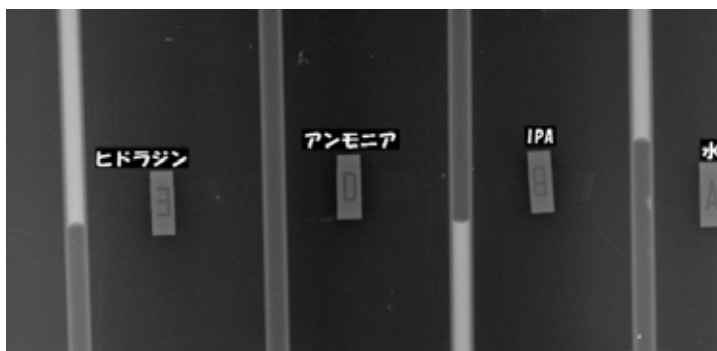


図1 配管内流体の可視化結果

またヒドラジンの封止に使用した手動弁部分の可視化状況を図2に示す。デッドエンド部分に残留したヒドラジン液がシール部に付着している様子が良く捕らえられている。（図2中に赤枠で示した部分に液が付着して白く見えている。）内径3.5mmの撮影が良好であったことから、目的としている0.2mmの細管内の可視化に向けて、より細いφ1mm程度の注射針内に水を導入し、可視化を試みた。結果を図3に示す。これらの結果、界面を可視化することが可能であることが確認できた。

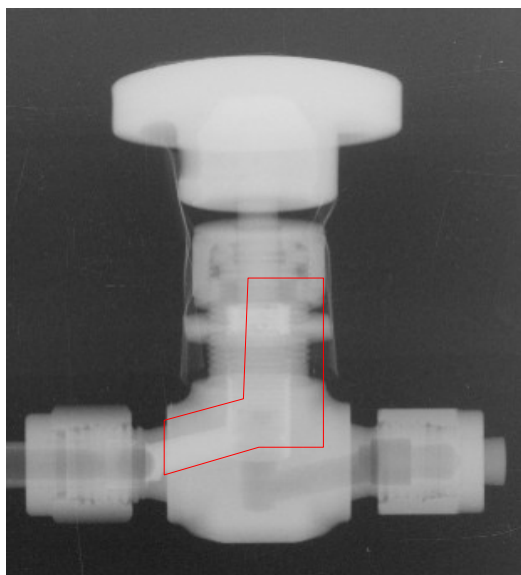


図2 ヒドラジン封止バルブ状況

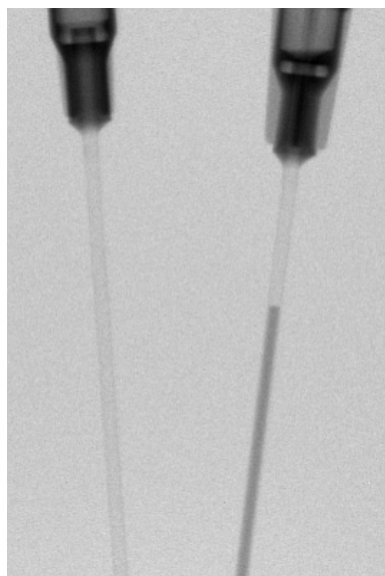


図3 細管内の可視化状況
 (左：空気、右：水)

4. まとめ

平成19年度前期の課題として行った細管内に封入された無水ヒドラジンの界面観察の結果は、良好で、中性子ラジオグラフィ技術の宇宙分野への適用の可能性が十分にあることを確認した。また、今後の課題が抽出できた。

これらの技術が実現できれば、宇宙分野のみならず一般産業にも適用できる技術であると思われる。

加熱された細管内の流動形態観察

利用者 ○梶原堅一¹、香河英史¹、櫛木賢一¹、長田泰一¹、高橋慶行²
 所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. 試験の目的

人工衛星の姿勢制御に使用されてる一液式スラスタは、燃焼室内に推薬を噴射しそれを燃焼させることで高温ガスを生成し、ノズルから噴出させることで推力を得ている。これまで、石英ガラスを用いた燃焼室の可視化を行っているが、燃焼が全体的に発生している表面的な状況は分かるもののガスの分解状況や内部の噴射状態や燃焼状態については情報が得られていない。中性子ラジオグラフィーを利用した内部観察で、実機状態のスラスタの噴射状態を観察し、推薬の噴射状況や燃焼面の挙動とその分解状況を明らかにすることで解析の精度向上に資することを最終的な目的としている。

今回のトライアルでは、「サーマルチョーク事象」として良く知られるスラスタ推薬導管内での推進薬沸騰・熱分解、分解ガスによる流路閉塞不具合の事象把握を目的に、細管内の推進薬流動様式（液流れ、ガス流れ、混相流）の観察、細管壁面温度と流れの様相との相関を取得することを目的とした。

2. 試験供試体

以前のトライアルユースにて、内径0.6mm程度の配管内に封入された流体の気液界面の静的観察が可能であることが確認できたことから、今回は実機同様、下流側から加熱した各種内径（φ0.2~0.75mm）の金属細管内に擬似推進薬である精製水を送液、回収する可視化実験システムを準備した。

実験システムは、1N/4Nスラスタ用実機フィードチューブ（L605製）を含む、各種内径サイズを持つステンレス細管4本×2組から構成した。（実際の実験では、試験期間の短さから、実機用フィードチューブでの実験のみに留まった）使用したフィードチューブの主要諸元を表1に、また主要な計測項目を図2に示した。

3. 可視化実験結果

3.1 気相・液相の確認（空間解像度の確認）

ヒータ加熱状態での流動可視化試験に先立ち、チューブ内の気相、液相の各バックグラウンドデータ取得を実施した。図3に、取得した画像データを示す。

1Nフィードチューブ可視化の結果を見ると、細管の存在は確認できるが、管内の流体識別までは、視認出来ていない。今回使用した高速度カメラ撮像系の諸元を確認していないものの、一般に高速度撮影に適した高輝度、速光減衰特性をもつとされる蛍光コンバータの空間解像度が100μm程度と言われていることを考慮すれば、致し方ない結果と言える。

一方、4Nフィードチューブ可視化の結果を見ると、明瞭には言えないものの、気相、液相が識別可能な画像が取得できている。

以上の結果から、ヒータ加熱系を使用した二相流の可視化実験は、4Nフィードチューブを対象として実施することとした。

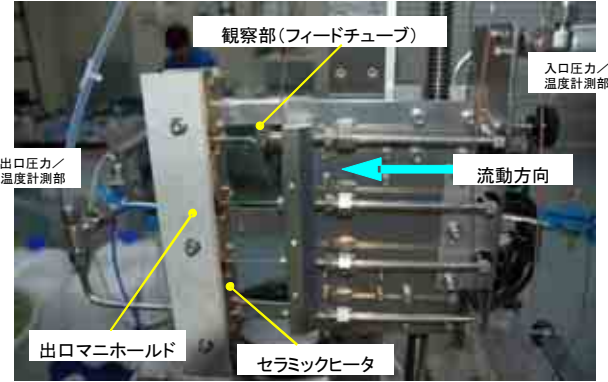


図1 衛星推進系可視化実験システム外観図（供試体部）

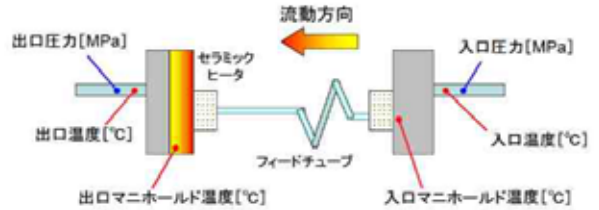


図2 実験システム供試体部の計測項目

表1 フィードチューブ主要諸元

	1N用	4N用
内径 (mm)	0.20	0.75
外径 (mm)	0.60	1.50
材質	L605 (コバルト系耐熱合金)	

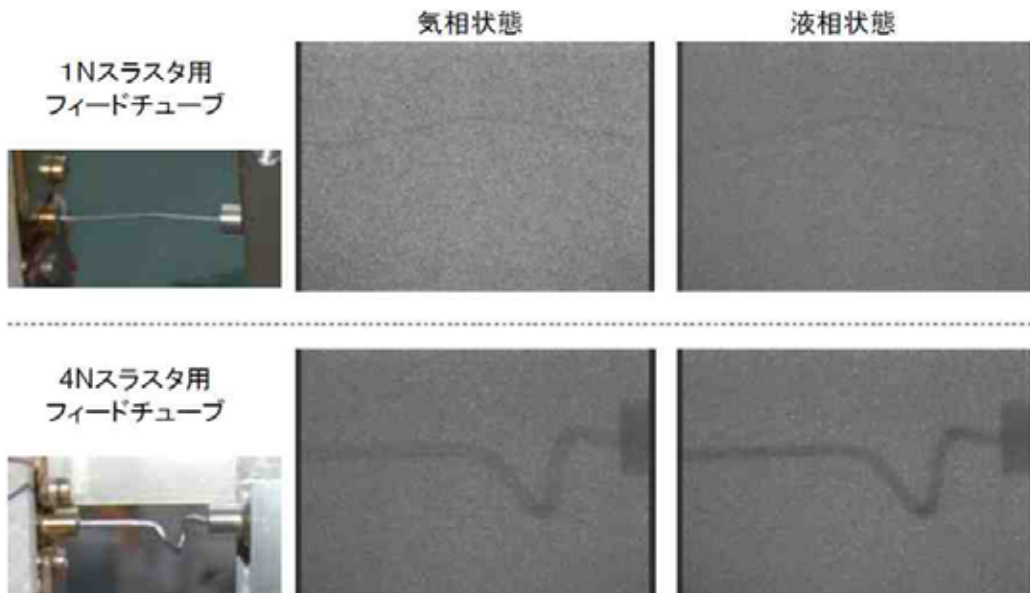


図3 フィードチューブ内の気相・液相バックグラウンド確認結果

3.2 4Nスラスト用フィードチューブによる気液二相流の可視化

4Nフィードチューブ供試体にて、実際にヒータ加熱してチューブ出口温度を300°C以上に昇温した状態を初期条件として、擬似推進薬（精製水）の流動可視化実験を実施した。

(1) 各部温度・圧カプロファイルと流動様式の可視化

図4に、初期出口側マニホール温度約350°C、入口圧力約0.1MPa時の、各部計測温度・圧カプロファイルの結果と、代表フェーズでの可視化画像を示している。

発生している事象は、およそ以下の通りと考えられる。

- ① 流体供給用の電磁バルブを開とする
- ② 流動開始に伴い、出口圧力の変動、出口温度の上昇が認められる。出口温度は早い段階で100°Cを超えることから、チューブ内あるいは出口マニホール内にて沸騰し始めている状態、一部気液二相流の状態に至る
- ③ 出口温度が120°C程度に至ると、出口圧力が上昇し始め、流体沸騰状態のレベルが上がる。入口圧力が低いケースにおいては、出口側圧力は入口圧力とほぼ同値となるまで上昇し、上下流で圧力差がない状態、すなわち流動が抑制される状態に至る。（スラストのサーマルチョークと同様の事象か）

また、同時に出口側マニホール内の沸騰継続による潜熱で、徐々に出口マニホール温度が低下することが確認できる。この時の流動様式は、ほぼガス流の状態（気相が支配的な脈動状態）が観察される。

④ ③の状態は、出口マニホール温度が低下し、ある温度領域に到達するとともに解消され、それに伴い出口圧力の低下が起こる。流体接触面の温度あるいは当該部の熱容量が、間接的に流動様式（気液混相、気相）を左右する影響因子であることを示唆していると考えられる。

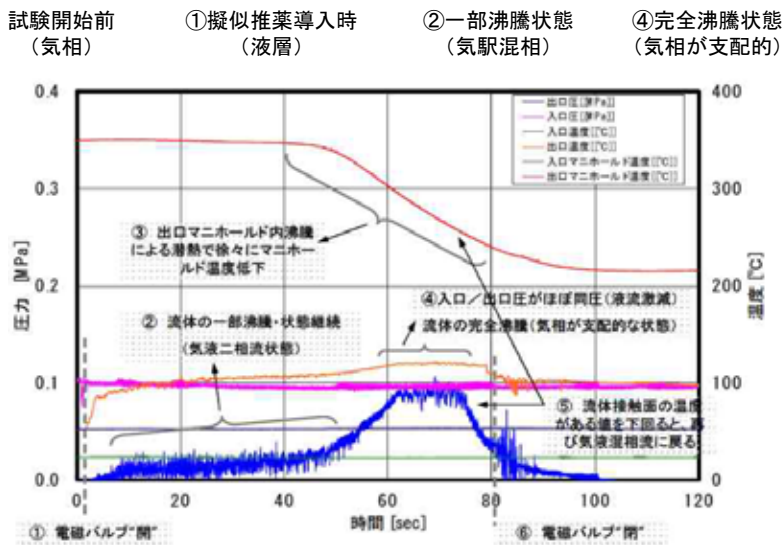
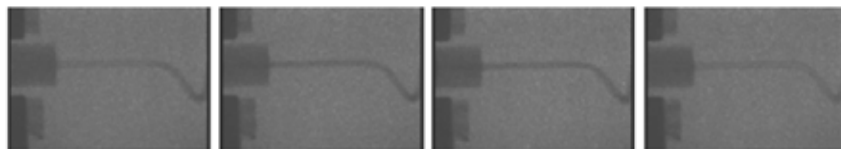


図4 4N用フィードチューブによる可視化実験結果及び各部温度・圧カプロファイル

(2) 入口圧力による各部温度・圧カプロファイル

これらのマクロな事象説明は、入口圧力をパラメータとした場合においても、ほぼ同様に説明可能であること、及び入口圧力が低いケースほど、気相が支配的な流動に至り易いことが確認できた。

3.3 高速度撮影による時間分解能の評価

一般に、気液二相流の気泡挙動といった事象の観察には、少なくとも約500コマ/秒の撮像速度が要求されるが、今回は約30コマ/秒のSIT管カメラを使用し、どこまで流体挙動の可視化が可能か把握すること、また今後のさらなる試験実施時に時間分解能に対する要求を明確化することを目的に、可視化実験を行っている。

動画で見る限りでは、管内の輝度の濃淡が微かに認められる領域でも、30コマ/秒程度のレートで抜き出した画像では、視認することが非常に難しいことが確認できた。

3.4 実験の評価と課題

今回の可視化実験によって、確認された事項、識別される課題は、以下の通りである。

- (1) 空間解像度が100μm程度では、1Nスラスト用フィードチューブ内部の流体可視化は困難である
- (2) 4Nスラスト用フィードチューブにおいては、気相・液相の可視化が出来た
- (3) 4Nフィードチューブ加熱時に、管内擬似推進薬に起こる事象について、各部温度・圧カプロファイルよりマクロに同定した。ただし、沸騰発生ポイントの特定など詳細な現象同定までには至っていない
- (4) 4Nフィードチューブ加熱時において実現した気液混相流状態、気相状態が、完全ではないものの中性子ラジオグラフィ技術により可視化することが出来た
- (5) より明瞭な画像を得るためには、さらなる空間解像度、時間分解能の向上が必要不可欠である

また今後、実機スラスト、実推進薬（ヒドラジン）での実験遂行にあたっては、以下の項目について留意する必要がある。

(今回の試験形態と実機形態との相違点)

- (1) チューブ出口の圧力条件（実機下流は真空）
- (2) 流体の違い（ヒドラジンの熱分解。発熱反応でありプロファイルが違ってくる）
- (3) 圧力条件の違い（今回は、高圧ガス保安法上、低圧で実施）

前回のトライアル結果から、精製水よりもヒドラジンの方がコントラストが付きやすいことが判っているため、その点は可視化において有利であるとは考えられるものの、今回試験形態とは大きく条件相違があるため、事前の詳細評価が必要である。

4. 今後の追加試験・評価項目

今回のトライアル実験にあたっては、JAEAでの実験ウィンドウと実験システム製作完了時期とが近接していたことから事前の実験システム予備データ取得が充分ではなかった。また実験期間が実質1日しかなかったために、体系的な試験と出来なかったことが反省点として挙げられる。

現在、実験システムは、放射化を冷ますためにJAEAにて保管中であるが、装置が戻り次第、以下の項目について追加オフライン試験、画像解析を実施することで、評価の充実を図る計画である。

(1) フィードチューブ温度分布取得試験

中性子ラジオグラフィ可視化試験時の温度計測点は、マニホール等の装置側温度を取っているため、実際のチューブ温度と流動様式との相関付けが出来ていない。サーモグラフィを使用して、フィードチューブ内の温度分布を取得する。

(2) 取得可視化画像の詳細解析

本資料中に掲載した画像は、オリジナル動画から切り出したものを、ある輝度、コントラスト調整を施し、極力見やすくしたものであるが、さらなる画像処理を実施することで、流体のボイド率等の定量的な評価に繋げる試みを実施したい。

具体的には、評価区間を区切って（フィードチューブ出口部近傍等）、各種フィルタによるノイズ除去、輪郭強調や、画像輝度をベースとしたボイド率計測等を試行することで、今後の画像処理手法の確立を目指すこととしたい。

タンク内の推進薬界面形状の観察

利用者 長田泰一¹、櫛木賢一¹、香河英史¹、○梶原堅一¹、高橋慶行²

所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. はじめに

人工衛星で使用される推進薬タンク内の液面形状を把握することは、宇宙周回軌道上での液面挙動解析及び残推進薬量推定の上で不可欠である。表面張力が支配的な宇宙空間では、タンク壁面と推進薬との接触角（濡れ性）が、液面形状を決める重要なパラメータとなる。人工衛星の推進薬には、無水ヒドラジン（N₂H₄）が使用されている。有毒なため、従来の接触角計による液滴法では特段の注意が必要となる。また、接触角は固体表面の状態や気体の物性などに大きく影響されるため、できる限り実際の推進薬充填状態に合わせた条件で計測する必要がある。

したがって、人工衛星用金属タンク内に充填された推進薬の界面形状を、直接透過撮影できれば、より精度良く接触角を見積もることが可能となる。X線ラジオグラフィではヒドラジンを可視化することはできないが、中性子ラジオグラフィを用いることでそれが可能である。金属容器内のヒドラジンを中性子ラジオグラフィにより可視化できることは、2007年上期トライアルユースにより事前確認されている。

そこで、今回は、人工衛星用タンクに充填された状態での推進薬（無水ヒドラジン）接触角を計測することを目的として、中性子ラジオグラフィによるタンク及び金属配管内の推進薬界面形状の可視化を行った。

2. 実験方法

図1に示すような1/2インチチタン配管およびチタンタンクに無水ヒドラジンを充填し、イメージングプレート（IP）により中性子ラジオグラフィを実施した。

接触角は、メニスカス形状から読み取る。メニスカス形状は、配管径が小さいとその影響を受けてしまうため、内径の十分大きい1/2インチ配管（内径10.7mm）を使用した。チタンタンクは、外径160mmの球形で、壁厚は1mm程度である。タンク内部に推進薬排出機構は設置されていない。

前述のように、壁面材料、表面粗さ及び封入気体の種類は、接触角に影響するため実際の衛星条件に合わせる必要がある。1/2インチ配管については、チタン合金（Ti-6Al-4V）材料を加工することにより、材料及び表面粗さを衛星用タンクと同じにした。チタンタンクについては、実際の衛星用タンクであるので、実際の条件と同じである。無水ヒドラジンを真空充填し（タンク：1212.6[g]、配管：4.1[g]）、充填後ヘリウムガスにより0.9MPa(gauge)に加圧した。推進薬充填後は、有毒な無水ヒドラジンが漏洩しないように入出口を封止した。



図1 1/2inチタン配管（左）および推進薬タンク（右）

配管内径はφ10.7mm、管厚1mm。タンク外径φ160mm、壁厚1mm。材料はいずれもチタン合金（Ti-6Al-4V）。無水ヒドラジン充填のため、入口にバルブがそれぞれ装着されている。

3. 実験結果

図2にチタン配管の中性子ラジオグラフィ画像を示す。濃い白色の部分がヒドラジンであり、メニスカス形状がはっきりと可視化されている。図3に示すように、接触角は三相界面の表面張力のつり合い（Youngの式）により決まる。：気相に面する固体壁の表面張力、：液相に面する固体-液体の界面張力、：液体の表面張力、：接触角である。界面形状から接触角 α を見積もることができる。

図2のメニスカスから直接角度 α を見積もると、30°程度である。これは、Societe d'Etude de Propulsion (SEP)の計測結果(1)とおおよそ一致していると言える。しかし、より正確に界面形状を見積もるためには、三島ら(2)が提案している輝度値から中性子の透過距離を求める方法を用いる必要がある、今後の課題としたい。

図4に、チタンタンクの中性子ラジオグラフィ画像を示す。配管の場合と同様に、内部のヒドラジン界面がはっきりと可視化されている。

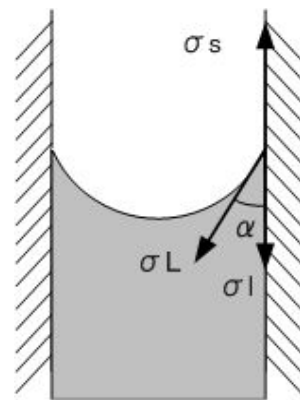
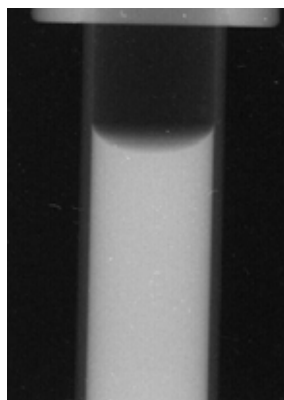


図2 チタン配管の中性子ラジオグラフィ画像（白色部がヒドラジン又は金属壁を示す。）

図3 接触角つり合いの模式図

σ_s ：気相に面する固体壁の表面張力、 σ_l ：液相に面する固体-液体の界面張力、 σ_L ：液体の表面張力、 α 接触角

4. まとめ

- ・中性子ラジオグラフィにより、実際の壁面接触条件でメニスカス形状を可視化することにより、接触角を精度良く計測できる見通しを得た。

- ・実際の人工衛星用タンク内部に充填された無水ヒドラジン界面形状を中性子ラジオグラフィにより、可視化することに成功した。

今後は、より複雑な内部構造（バーン式やチャンネル式推進薬排出機構）の推進薬タンクについても、推進薬界面形状を観察することにより、残推進薬量予想やタンク設計の最適化のためのデータ取得が期待される。



図4 推進薬チタンタンクの中性子ラジオグラフィ画像