

理研小型中性子源を用いた鋼材塗膜下の腐食膨れ中の水のイメージング

中性子イメージングから導けるマクロ物理量へ

理化学研究所 竹谷篤, 大竹淑恵, 若林泰生
神戸製鋼所 中山武典
コベルコ科研 若林琢己、河野研二

1. 塗膜鋼材の内部腐食
2. 実験と解析
3. 水の動きの観察
4. まとめと展望

塗膜膨れ部の断面OM観察例 (神戸製鋼中山様提供)

塗膜

さび層(空隙・欠陥も観察されます)

鋼板



中性子イメージングでは軽元素特に水素に対してコントラストが高い。

熱中性子では鉄と水素の透過率はかわらない

中性子で塗膜下のさびの中での水の動きがみえないだろうか？

鋼板塗膜下腐食膨れ部での水の動きの観察

1. サンプルを水につける。(重量測定で含水量が飽和したことを確認)
2. 表面をふきとる。
3. カメラボックス内で乾燥を開始
4. この状態で中性子で連続イメージング。5分から20分毎の画像をとる。同時に重量変化も測定

熱中性子ビーム

中心エネルギー 50meV

強度 $\sim 10^4$ /cm²/sec

発散角 L/D ~ 36

シンチレーター

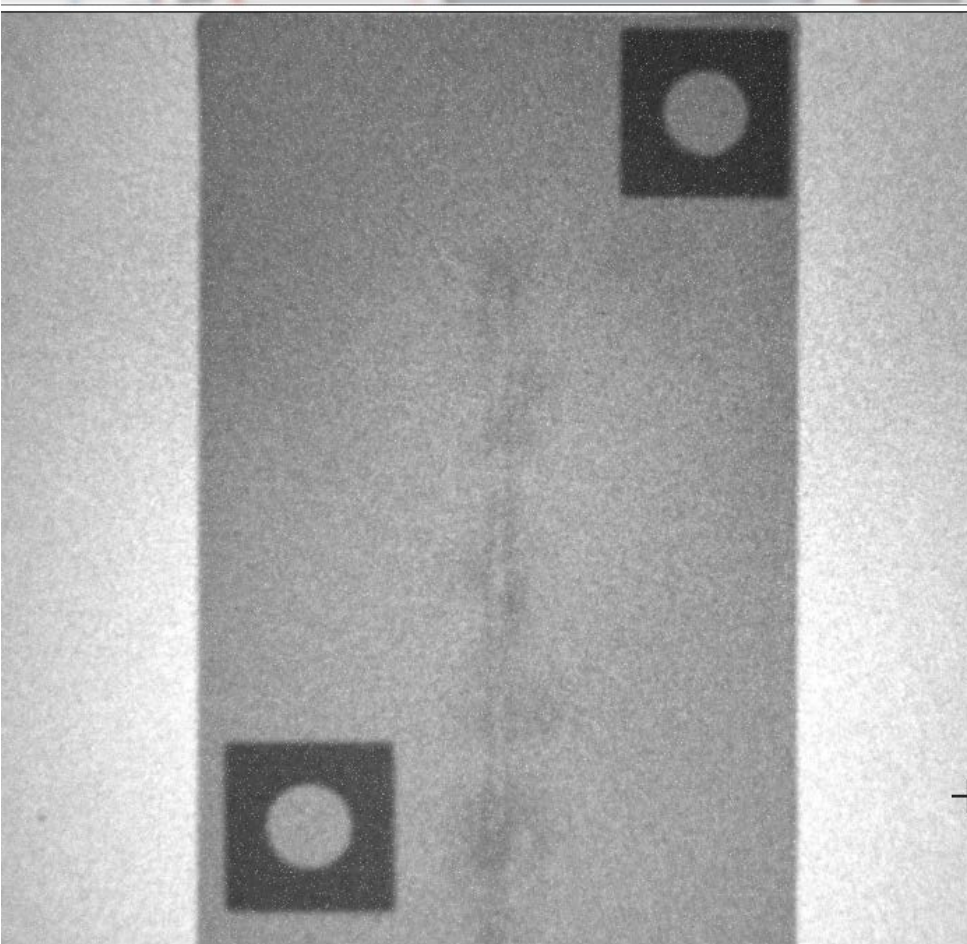
中性

中性子

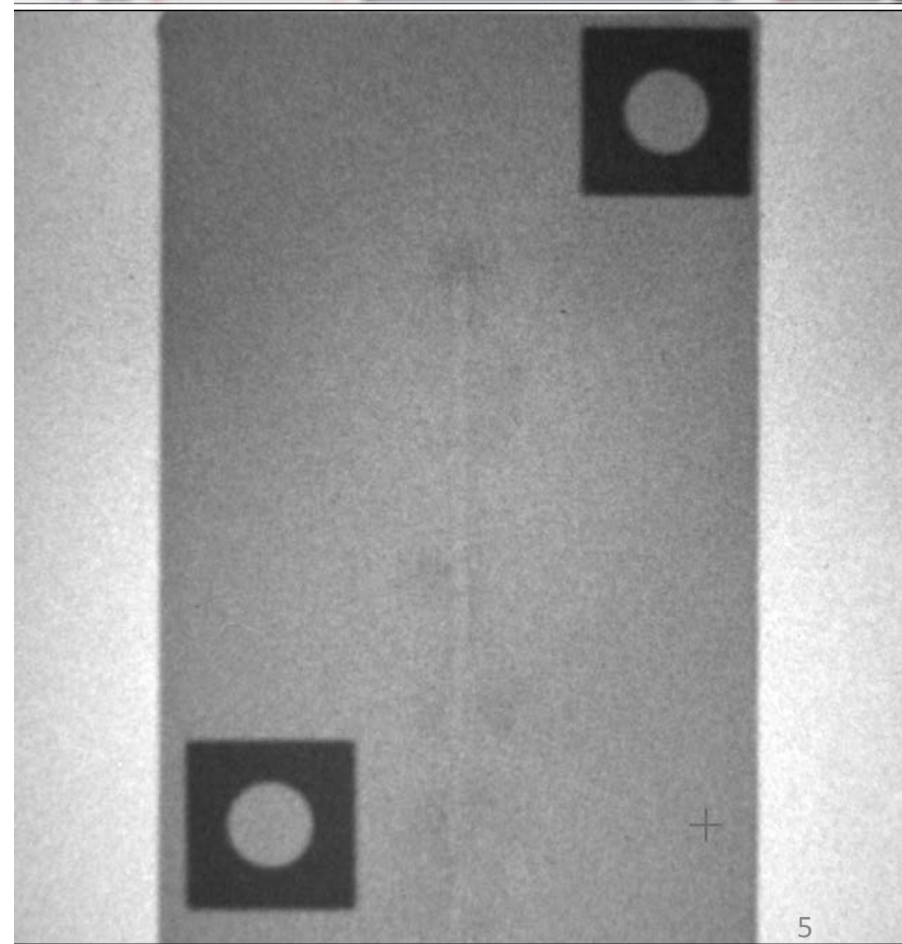
電子天秤

中性子ラジオグラフィ

水から揚げた直後



3時間後（ほぼ乾燥）



透過度から水の厚さ

水のみ透過度を得る方法

水の吸収長 α_w

鉄の吸収長 α_{Fe}

水の厚さ t_w

鉄の厚さ t_{Fe}

Direct beam V_{Fe}^D, V_{W+Fe}^D

鉄のみの透過強度 $V_{Fe} = V_{Fe}^D e^{-\frac{t_{Fe}}{\alpha_{Fe}}}$

鉄+水の透過強度

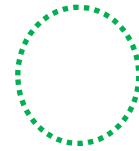
$$V_{W+Fe} = V_{W+Fe}^D e^{-\frac{t_w}{\alpha_w} - \frac{t_{Fe}}{\alpha_{Fe}}}$$

割り算すると $\frac{V_{W+Fe}}{V_{Fe}} = \frac{V_{W+Fe}^D e^{-\frac{t_w}{\alpha_w} - \frac{t_{Fe}}{\alpha_{Fe}}}}{V_{Fe}^D e^{-\frac{t_{Fe}}{\alpha_{Fe}}}}$

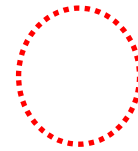
$$= \frac{V_{W+Fe}^D}{V_{Fe}^D} e^{-\frac{t_w}{\alpha_w}}$$



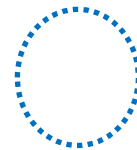
$$t_w = -\alpha_w \text{Log} \left(\frac{\frac{V_{W+Fe}}{V_{Fe}}}{\frac{V_{W+Fe}^D}{V_{Fe}^D}} \right)$$



画像でのサンプル部分の輝度比をとる



画像中、サンプルがない部分の輝度比をとることで得られる。
(中性子ビームの形は常に同じと仮定)



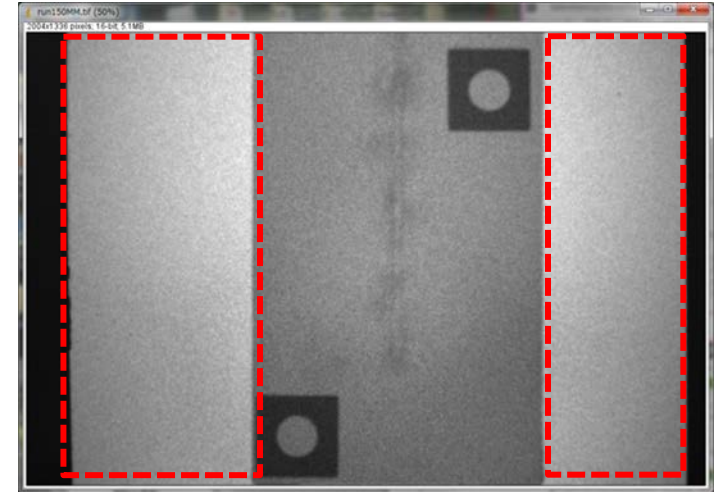
水の吸収長は実験またはシミュレーションから得る

データ解析

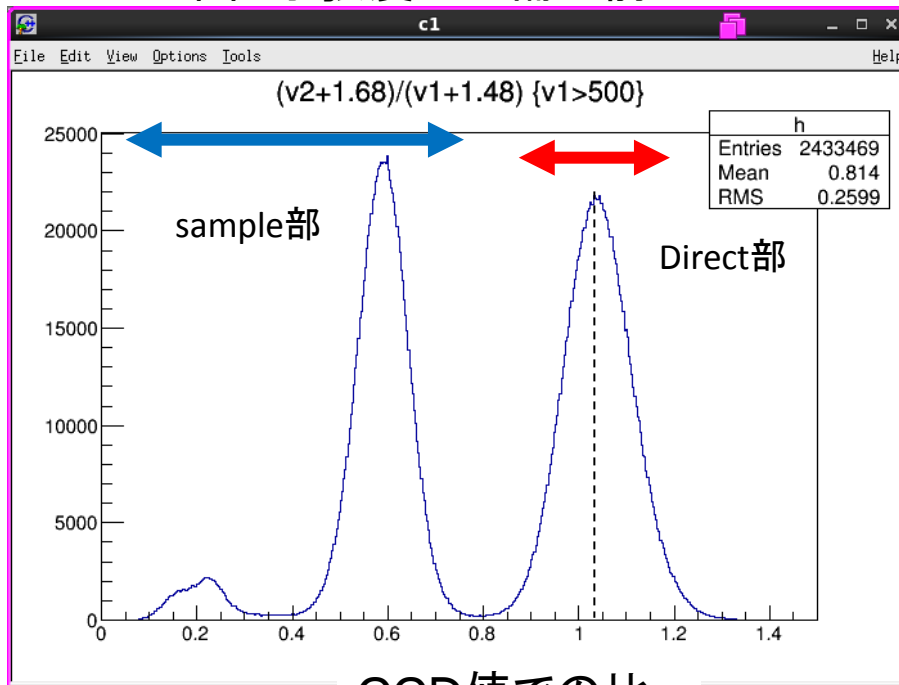
1. ノイズ除去
 - dead pixelを取り除く
2. Pixel毎にoffset値を引き算
 - Beam offでもCCDは値を持っている
3. 中性子強度のnormalization
 - 同じ数の中性子を入射と同等にする。画像間の輝度比はそのまま透過度
4. 乾燥データで割り算
 - 乾燥データを基準として透過度を求める
5. 水の吸収長 — 水の透過度
 - シミュレーション: 水の厚さを設定して、その結果から水の吸収長
 - 以前は実験値から求めていた。
 - 実験データ: シミュレーションからの減衰長から透過度 → 水の厚さ

中性子強度のnormalization

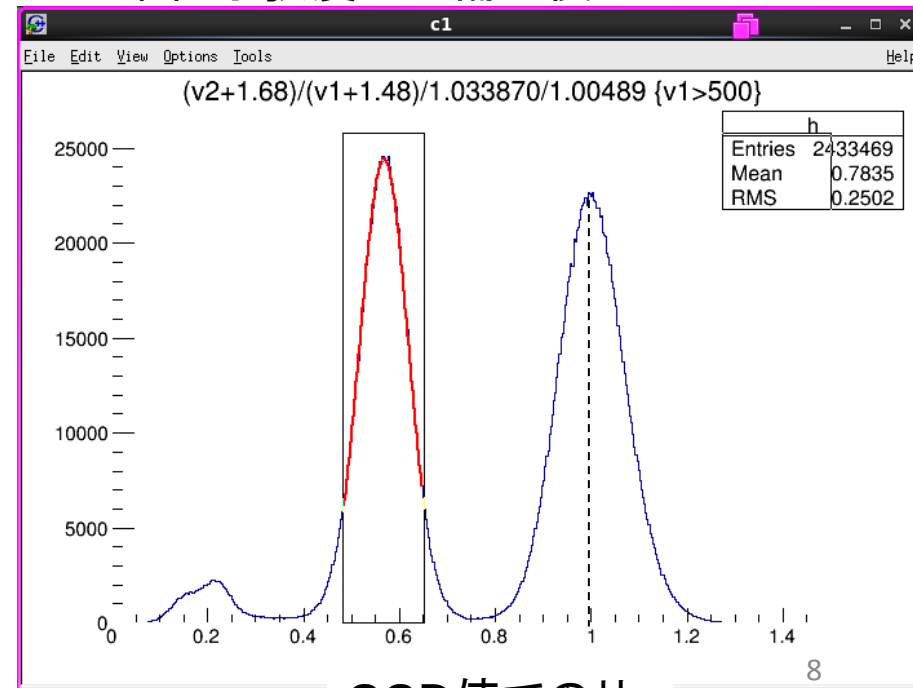
1. 湿潤イメージを乾燥イメージで割り算(輝度比)
2. Pixelごとの輝度比の頻度分布をとる。
3. 中性子ビームの強度分布が変わらないと仮定するとSampleのないDirect部の輝度比は中性子強度比となる。この値が1になるように補正をかける
4. 水のみ透過度イメージができる



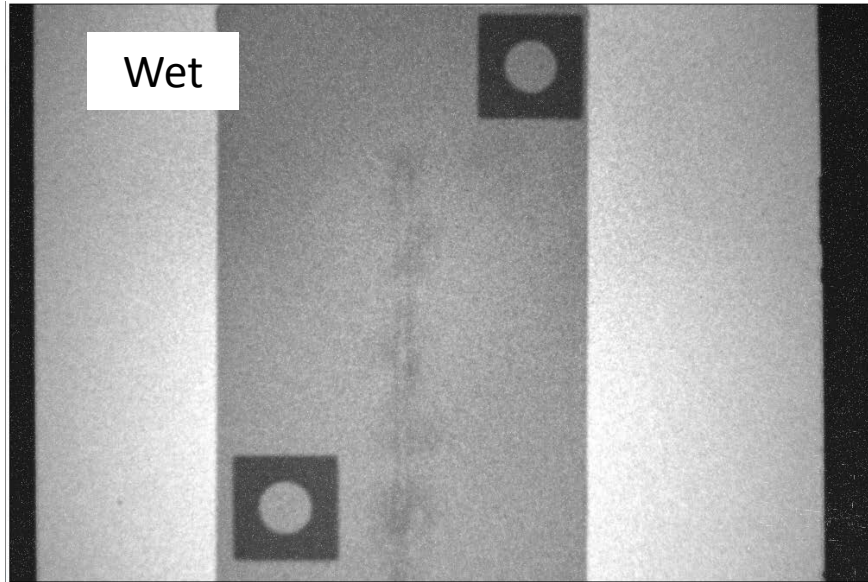
中性子強度での補正前



中性子強度での補正後

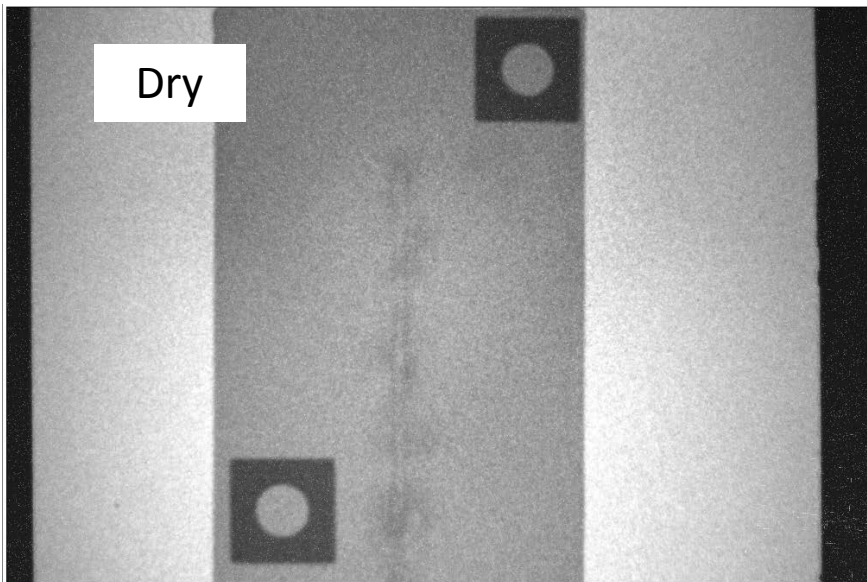
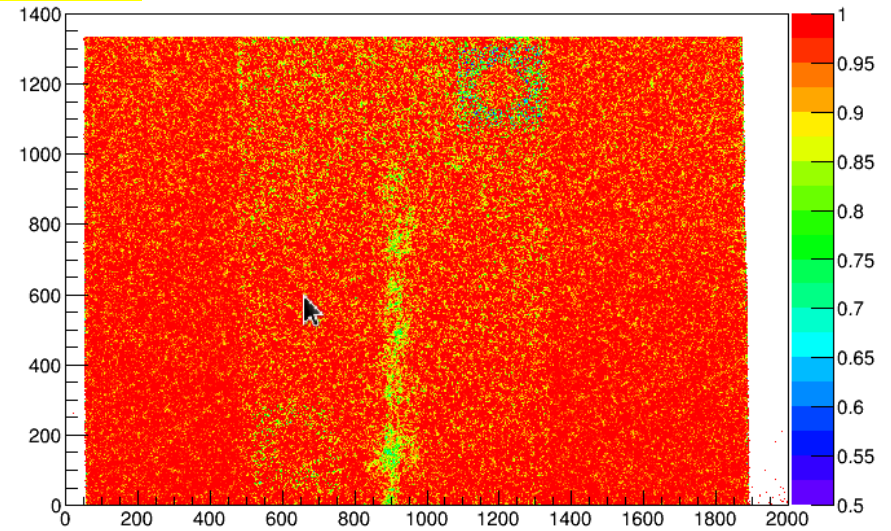


水のみ透過度イメージング



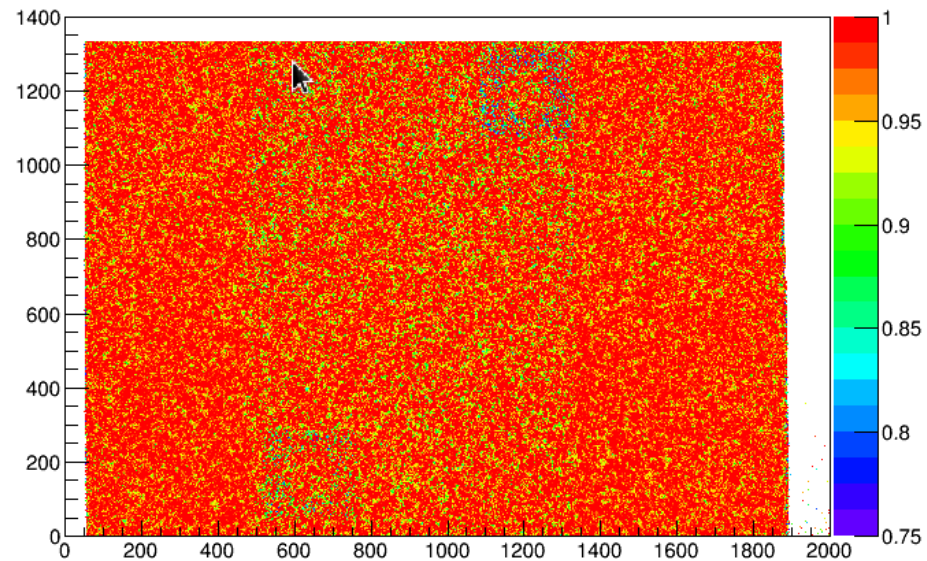
Wet

time = 2.5[min]

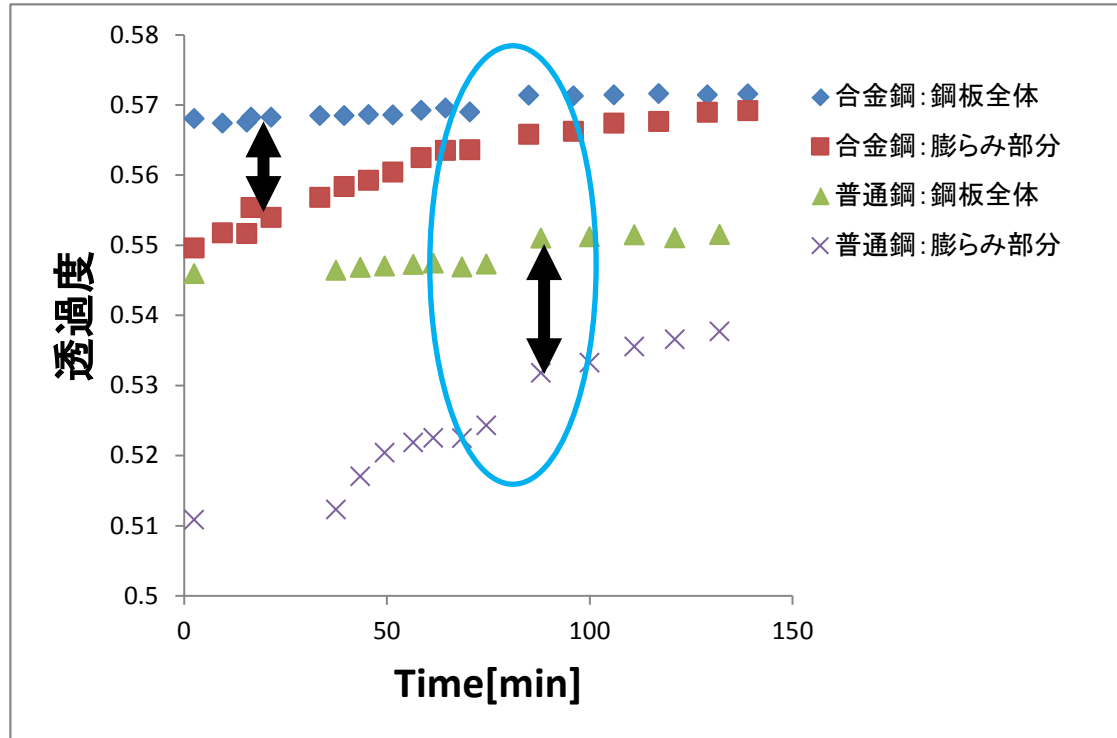


Dry

time = 139[min]



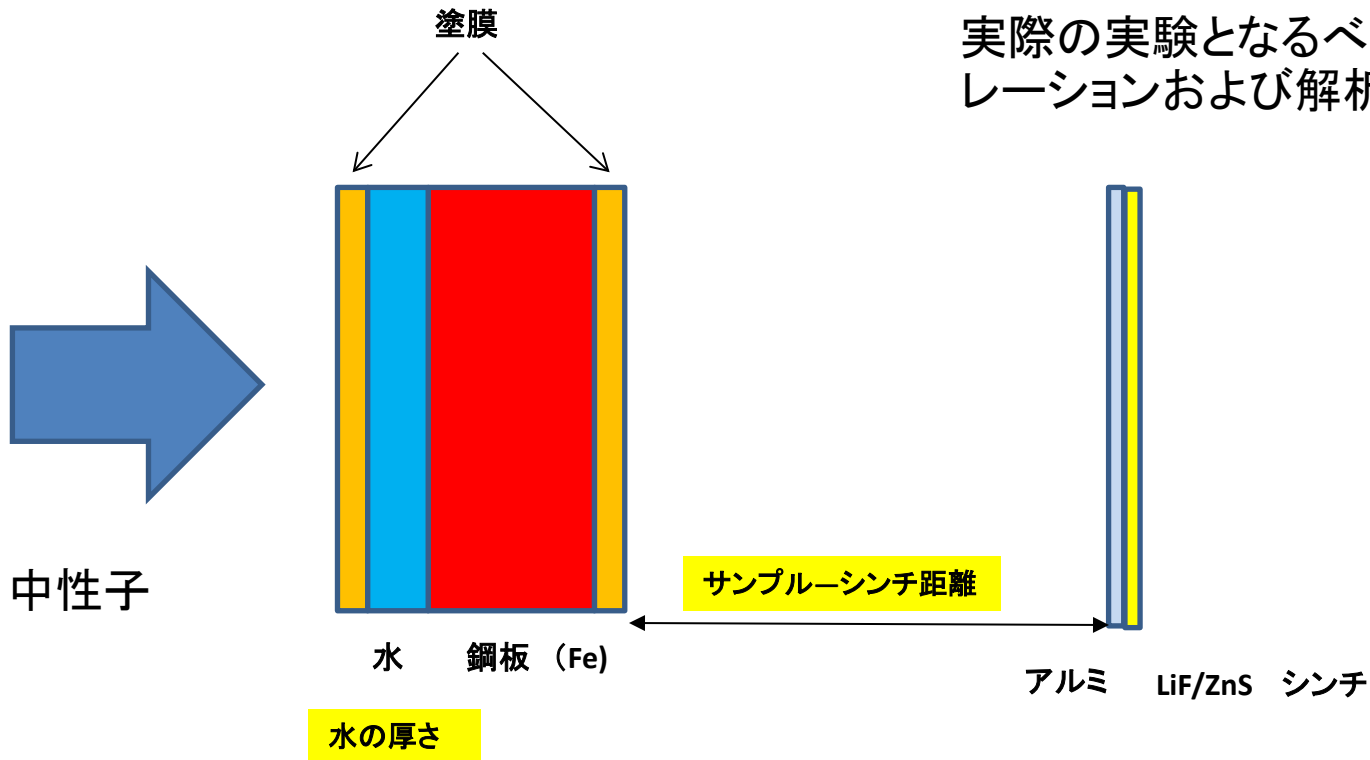
水の透過度



- (鋼板) と (鋼板+水) の透過度の差は小さい
- この差が水による差になる
- この小さな差の系統的誤差を小さくしてみることが肝心
 - CCDの積分非線形 (最大1%) が気になる
 - 今回は中性子の強度を揃えたデータで比とる

放射線輸送シミュレーション(GEANT4)

実際の実験となるべく同じ条件でシミュレーションおよび解析を行う



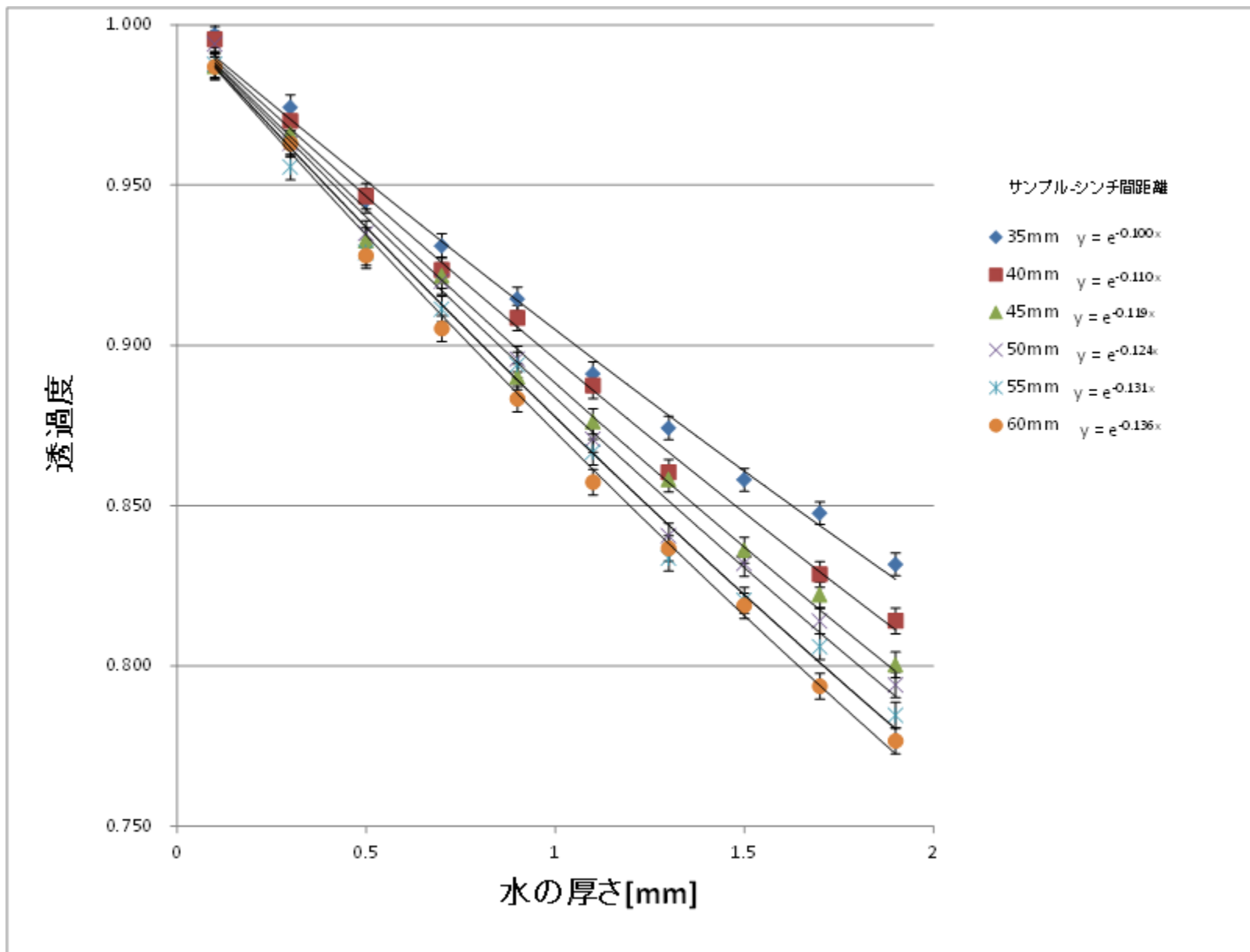
考慮したパラメーター

- サンプルとシンチレーターの距離
- 水の厚さ

比較したもの <— 実際の実験と同じ想定で比較する

- (鋼板+塗膜) あり/なし、水 なし
- (鋼板+塗膜) あり、水 あり/なし

Simulation : 水の厚さ — 透過度

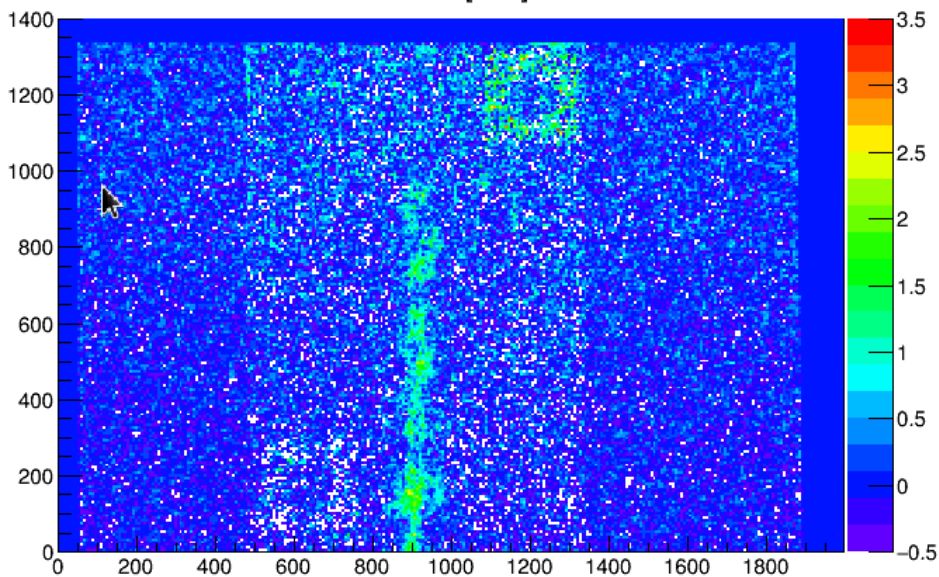


イメージング：水の厚さ

Wet

水の厚さ[mm]

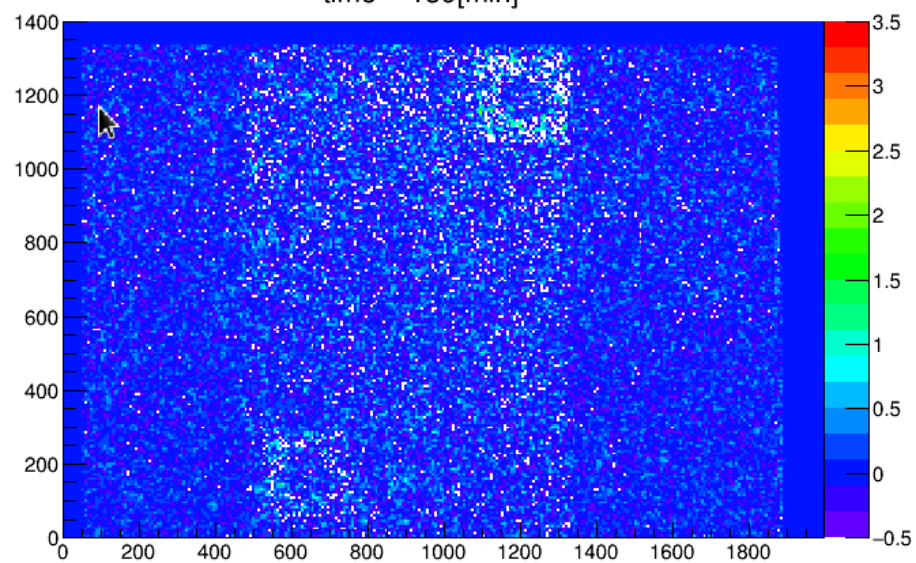
time = 2.5[min]



Dry

time = 139[min]

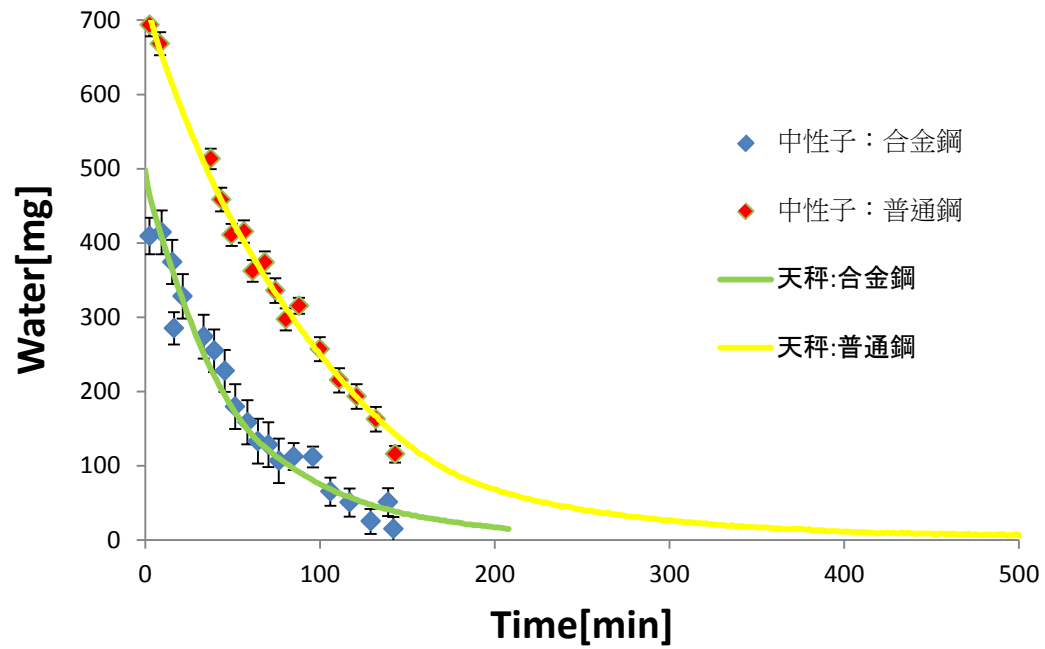
水の厚さ[mm]



ピクセル: 560um × 560um

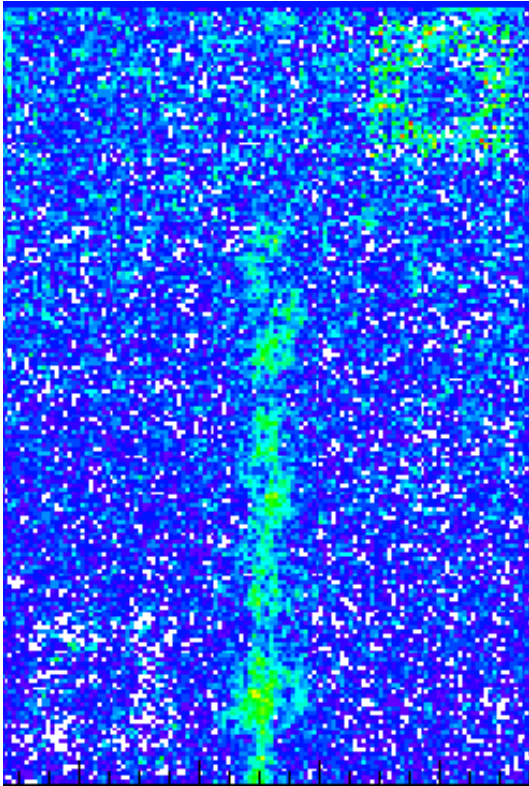
このイメージから水の厚さを面積で積分 → 水の体積 → 水の重量

水の総量

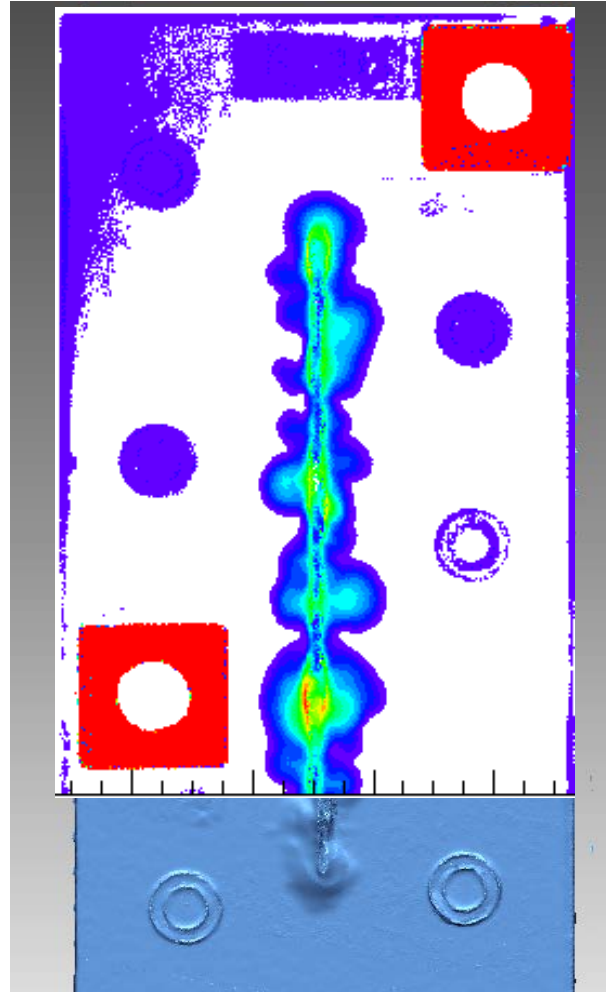


3つの異なったイメージ

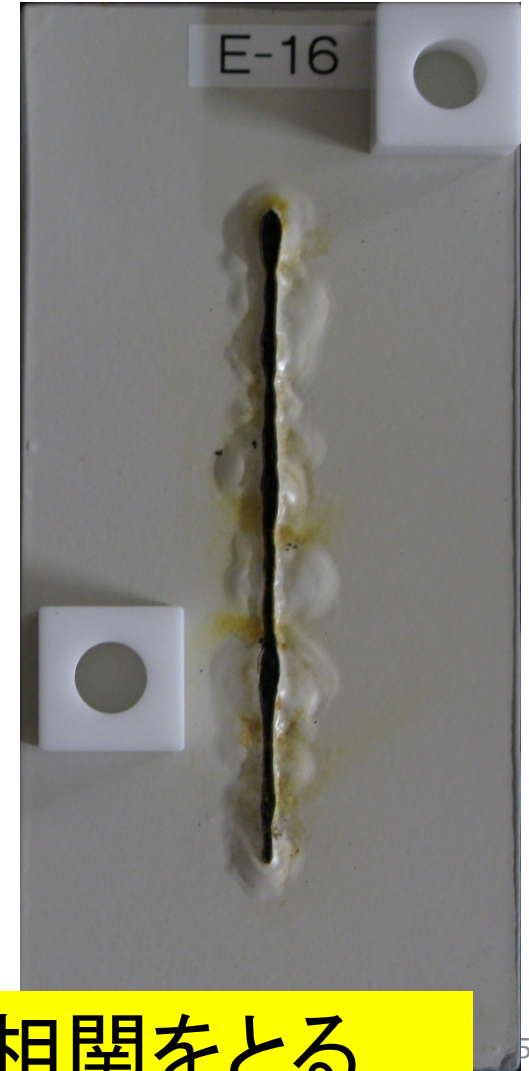
中性子による水の厚さ



形状3D測定



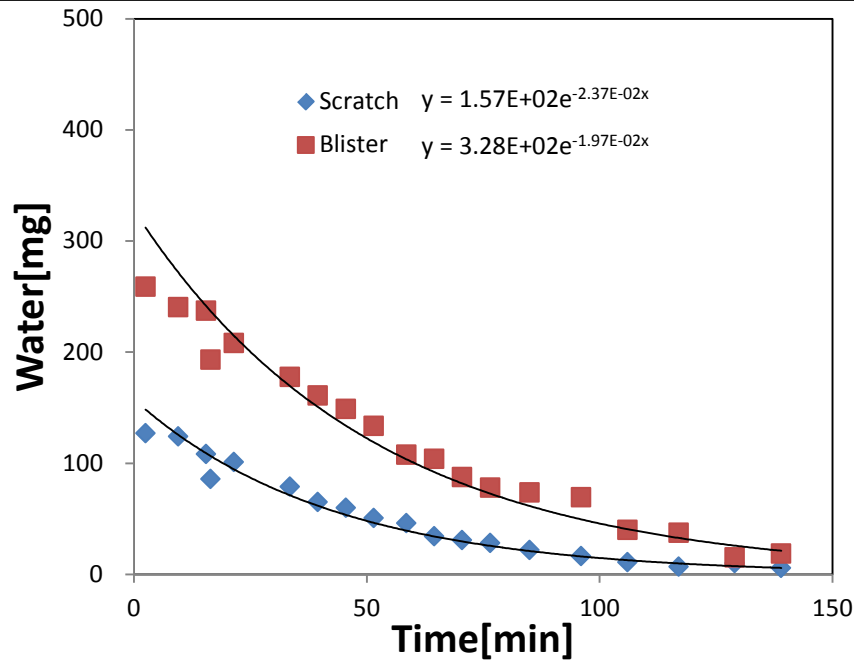
写真



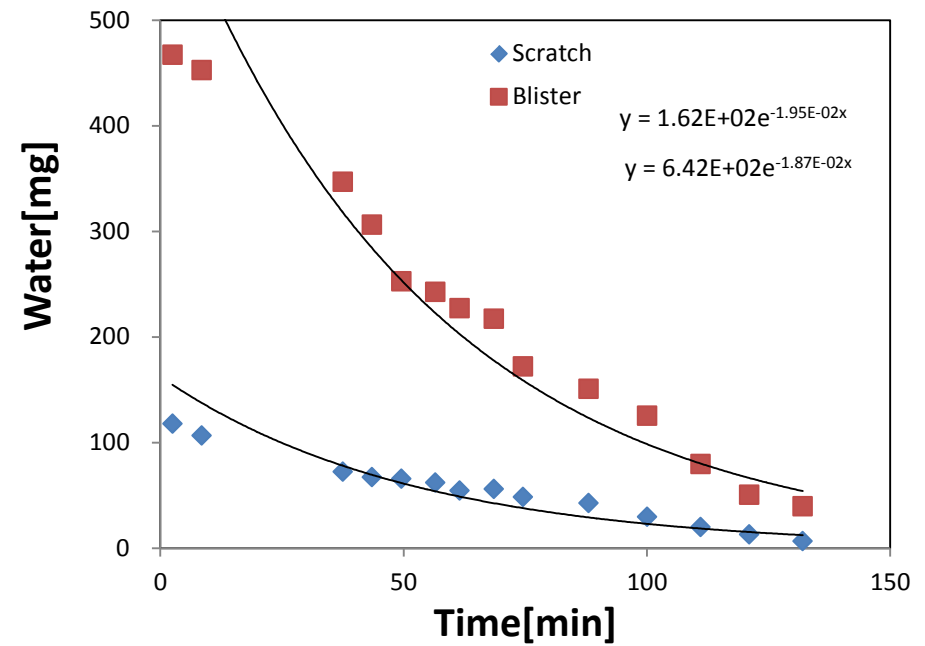
これらの位置合わせを行い、相関をとる

水の総量

合金鋼



普通鋼



- Blister部では水の量はかわらないが、Scratch部では普通鋼のほうが水の量が多い。

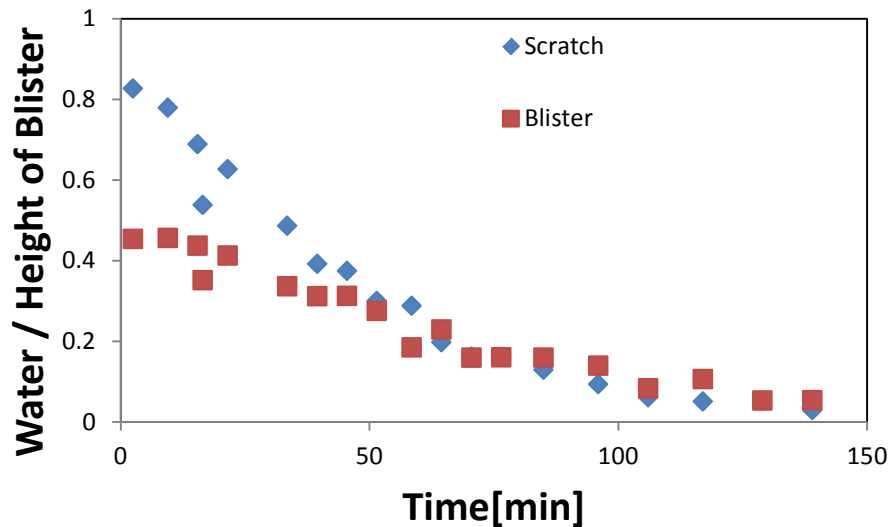
見かけの含水率

水の量を膨らみの高さでわったもの

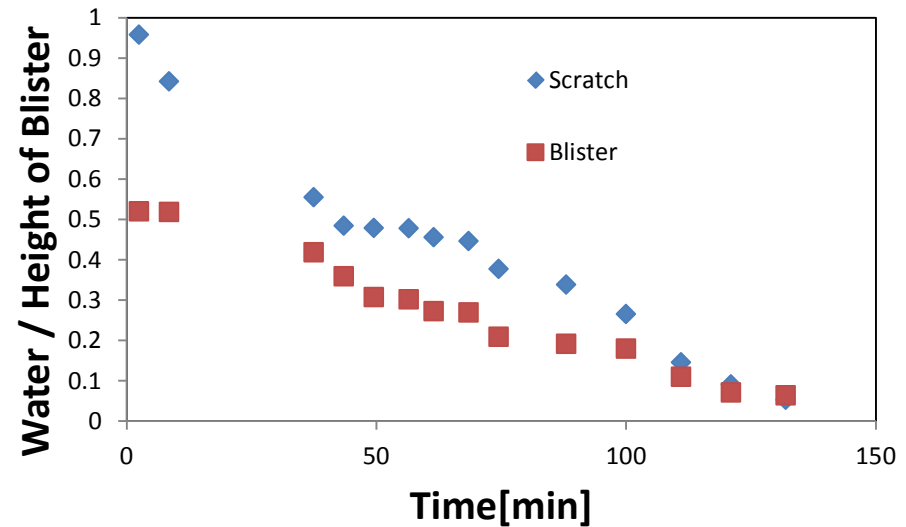
実際の含水率は この値の3/4 程度であろう

(膨らみだけでなく、鋼板の減肉まで含む)

合金鋼



普通鋼



- 合金鋼では40分でScratch部とBlisterが同じになるが、普通鋼では 100分程度かかっている

まとめと展望

- 理研小型中性子源(RANS)でラジオグラフィーを使って、鋼板塗膜下腐食膨れ部の水の動きを観察
 - イメージングだけではなくて、水の厚さまで測定
 - 小型 ($10^4 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $L/D \sim 36$)でもこれだけみえる
 - 系統的誤差を減らす工夫
 - 中性子強度を揃えて、CCDの非線形性を見えなくした
 - 将来的にはCCDの校正を行う予定
 - 種類の違うイメージ間での相関をとり、さびのメカニズムにせまる
- 将来への展望
 - 実験、解析、シミュレーションまで含めたシステム化を行い、だれでも簡便に使えるものとしたい
 - 経験、ノウハウはできるだけサイエンスとして理解して、ソフト、マニュアルに入れ込む
 - 実験技術
 - ステレオ撮影
 - CT撮影
 - トモシンセシス技法には期待(都市大 田中氏の発表)
 - 大型施設(J-PARC, JRR-3, KUR)との連携
 - 小型施設では規制が穏やか(水、火気の使用、臨機応変の設定変更等)で、マシンタイムが比較的自由に使えるので、機動的な実験が実施可能
 - RANSでの結果を元に、大型施設への実験提案
 - 回折実験はJ-PARCで実施済み
 - ラジオグラフィー実験はJ-PARC 2014Bで採択済みで、マシンタイム待ち