理工学部会 企画



パルス中性子用画像検出器の開発

はじめに

中性子の透過像を取得して被検体内の情報を 非破壊で得ることができる中性子ラジオグラ フィは、これまで原子炉からの定常的な中性子 を利用していた。そこで使用できる中性子のエ ネルギーは、主流であった熱中性子以外にも、ウ ランの核分裂で発生する MeV 領域の高速中性 子や液体ヘリウムを通って放出される冷中性子 まで様々であったが、各々の線源の中性子エネ ルギー領域は限られていた。一方でパルス状に 幅広いエネルギー範囲の中性子を発生させ、離 れた位置に被検体と中性子検出器を置き,中性 子の飛行時間が中性子のエネルギーに依存して いることを利用し、着目している中性子エネル ギーに該当する飛行時間に透過像を取得して, 被検体内部の情報を選択的に得る方法があり. パルス中性子透過分光撮像法と呼ばれている。 この手法により、加工された金属材料中の結晶 構造の分布や材料中の温度分布、また磁場分布 などの可視化が実証され、現在注目されている 方法である^{1,2)}。

そこで,時間依存の中性子透過像を連続的に



多数取得するために、従来はピクセルタイプの シンチレータを多数並べた検出器や GEM (Gas Electron Multiplier) と呼ばれる気体位置検出器 を使用し、中性子が飛来して検出と反応した位 置と時間の情報をセットで多数記録し、これら のデータを必要なエネルギー分解能で定まる時 間間隔で集計して連続画像データを取得してき た。しかしながら、完成した J-PARC の MLF (Material and Life Science Experimental Facility) 内の中性子イメージング専用ポート RADEN の ように大強度パルス中性子源を用いた実用実験 では、中性子強度の飛躍的増加に伴い、従来型 のパルス検出型ではパルス処理時間に起因した カウントロスの問題が発生する。そこで、その ような状況でも確実に情報を記録できるアナロ グ積算型の検出器として,筆者らは高速度撮像 が可能なCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)撮像素子を用いた高速度カメ ラに着目し、Detect 社のHAS-D3を改造し、 160×134 画素で 25 kfps の速度で積算機能を持 たせた画像検出器を開発し、北海道大学のパル ス中性子発生施設で実験を行ってきた³⁾。本稿 では、新たにパルス中性子透過分光法のための 開発した画像検出器について詳述する。

持木

* 中性子応用専門委員会





図1 北海道大学におけるパルス中性子透過分光法の実験体系

2 パルス中性子透過分光法

図1は、世界に先駆けてこのパルス中性子透 過分光法の研究を進めてきた北海道大学のパル ス中性子用実験施設の概要である。ライナック で加速された電子が鉛ターゲットで高エネルギ -X線を発生し、その結果パルス状のエネル ギー幅の広い中性子が発生する。パルスの発生 周期は20msである。図2はJ-PARCのMLF で中性子源から14m離れた地点での中性子エ ネルギーと中性子飛行時間の関係と応用分野を 示した図である。上図の縦軸は反応断面積,下 図は中性子強度の例であり,熱中性子近傍でピ ークとなっている。飛行時間が短い高エネルギ 一部では共鳴吸収反応を利用した元素分布測定 などの共鳴吸収イメージング、また、それ以降 の時間領域では中性子の波長が長くなり、結晶 構造を解析するためのブラッグエッジイメージ ングの応用がある。特に長波長の領域は磁気イ メージングに応用されている。

これらの3つの応用分野におけるエネルギー 領域において、中性子エネルギーが変化する一 定の範囲の中性子透過像を連続的に取得するこ とが求められている。ここで、高速度カメラの ように時間的に等間隔で連続して透過像を取得



すると、各画像には定まったエネルギー範囲 (これをエネルギー分解能と呼ぶことにする) の中性子の透過率の情報が連続して記録される ことになる。そこで、3つの応用分野で必要な 中性子エネルギー分解能に応じて、共鳴吸収イ メージングでは10 µs、ブラッグエッジイメー ジングでは30 µs、磁気イメージングでは100 µsの時間間隔で撮像が可能な高速度カメラを 選択した。なお、通常の高速度カメラは、内蔵

された画像メモリの容量で録画時 間が決まっており、今回選定した カメラの基本仕様は、メモリ64 GBを内蔵しており、100 kfps で 撮像すると8.5 s でメモリがいっ ぱいになり、録画が完了する。そ の後、パソコンなどへデータがシ リアル伝送され, 伝送中は中性子 ビームが利用できない無駄な時間 となってしまう。そこで、この欠 点を克服するために、データ積算 処理部をカメラの後段に配置し. 間断のないデータの記録を可能と した。また、共鳴吸収実験では時 間分解能が10 µs では十分ではな い場合があるため、シャッター時 間を周期 10 µs の中で最小 0.5 µs まで狭くして、かつシフトできる 機能を利用できるようにした。

3 高速度カメラを用いたパルス中 性子用画像検出器

筆者らが開発したパルス中性子用画像 検出器は、図3に示すように、中性子カ ラーイメージインテンシファイア(中性 子カラーⅡ)((株)東芝製 TCN9100B), 高解像 度静止画用カメラ((株)ニコン製 D800E 7.360 ×4,912 画素), 光イメージインテンシファイア (光Ⅱ)(浜松ホトニクス(株)製 C9547-02 MOD), 及び高速度カメラ ((株)ナックイメー ジテクノロジー社製 MEMRCAM ST-821-HK) で構成されている。中性子カラーⅡの出力面の 蛍光体の発光減衰時間は5 us と短く、また、 光Ⅱの出力面も発光減衰時間が 0.3 µs であり. 時間分解能へ影響を与えないように配慮されて いる。中性子カラーⅡの視野は被検体に応じて 直径9インチ,7インチ,及び5.5インチから 選択できる。選定した高速度カメラのフレーム レート(時間分解能)とその時の画素数及び視



図3 パルス中性子用撮像システムと画像検出器

フレーム [時間分)	レート 解能]	100 kfps [10 μs]	30 kfps [33 μs]	10 kfps [100 μs]	
画素	数	320×240	512×512	960×960	
視野 [画素サイズ]	9インチ	183×137 [572 μm]	162×162 [316 μm]	162×162 [169 μm]	
	7インチ	142×107 [445 μm]	126×126 [246 μm]	126×126 [131 μm]	
	5.5インチ	112×84 [349 μm]	99×99 [193 μm]	99×99 [103 μm]	

表1 時間分解能・視野・空間分解能の関係

野の広さに依存した1画素の実寸サイズの関係 を表1に示す。時間分解能が最も良い10 μ s場 合には、1フレームの画素数は横縦4:3の320 ×240 画素となり、9インチモードの場合には、 視野は内接の長方形で横縦が183 mm×137 mm となり、画素の一辺の長さは572 μ mとなる。 時間分解能を100 μ sとすると、1フレームの 画素数は横縦が960の正方形となり、5.5 イン チモードの場合には、画素の一辺の長さは 103 μ mとなり、最小空間解像度となる。

図4に、高速度カメラに導入された積算機能 の様子を示す。北大の施設では中性子パルスは 20 msの周期で発生するので、100 kfps で撮像 する場合、1 周期内に 2,000 フレームの画像が 記録される。図では、16回分のパルス中性子の 取得フレームデータを対応するフレームごとに 積算し、1つのフォルダーを作成している。こ のフォルダーは積算終了後にパソコンへ転送さ れ、同時に次の16回の積算が開始され、間断 なく16回積算が繰り返され、データ転送され ている。パソコン内には2TBの画像記録用メ モリが搭載されており、表2にはフレームレー トごとに、積算回数と録画可能な測定時間の関 係が示されている。積算回数を4,096回とする

送中も次の積算処理が開始されている。

と4日間ほどの長時間測定が可能であり、また 16回積算の場合には、0.32秒ごとにファルダ が作成されるので、この程度の時定数を持つダ イナミックな現象の解析にも応用可能となる。

4 測定例

図5は、装置完成後にX線でシステムの解 像度を評価した時のX線用チャートの取得 画像である。視野は5.5インチであり、左は



図4 画像積算機能

積算された2,000 フレームは1つのファイルとしてI/Oを介してPCに転送される。その転

表 2 録画時間

積算回数 デ	ジーク目	積算時間	100 kfps (10 µs, 2,000 f)		30 kfps (33.3 µs, 600 f)		10 kfps (100 µs, 200 f)	
	アーク長		ファイル容量	記録時間	ファイル容量	記録時間	ファイル容量	記録時間
[Pulse]	[bit]	[s]	[MB]	[hr]	[MB]	[hr]	[MB]	[hr]
16	16	0.32	315	0.61	302	0.62		
64	18	1.28	354	2.18	340	2.19	399	1.87
256	20	5.12	384	7.83	378	7.89	443	6.73
1,024	22	20.48	422	28.48	416	28.70	487	24.49
4,096	24	81.92	461	104.42	454	105.22	532	89.79





100kfps (320 x 240画素)

30kfps (512 x 512 画素)

0.9

0.8

Attenuation

0.6

0.5

3000

4000

5.5インチ視野で積算4096フレーム 図 5 X線での取得画像例

100 kfps で、右は 30 kfps のフレームレー トで、それぞれ4,096回の積算後の画像 である。画素数は各々320×240と512 ×512 である。図6は,北大の施設で中 性子を用いてブラッグエッジイメージン グの評価実験で得られた画像である。フ レームレートは 30 kfps で,9インチの 視野に11.6 mm厚の銅板, 10 mm厚の ボロンカーバイト,及び9mm厚の鉄板 を並べて得られた透過像の1枚である。 図7は、飛行時間3~8 msの間を33 µs の間隔で取得した積算画像から、図6の 枠で囲んだ鉄の部分のデータを積算して プロットしたもので,幾つかの中性子エ ネルギーでブラッグエッジによるくぼみ が認められる。

5 まとめ

高速度カメラを用いたパルス中性子透過分光 撮影法のための画像検出器を開発し、北大のパ ルス中性子を用いてブラッグエッジのデータを 取得することに成功した。J-PARCの中性子強 度はけた違いに高いため、今後高強度場での測 定で、特に威力を発揮することが期待される。

なお,本研究開発はJSPS 科研費 23226018 の助成を受けたものである。



Flight Time [us] 図 7 鉄のブラッグエッジデータ

5000

参考文献

6000

7000

8000

- Kiyanagi, Y., Kamiyama, T., Nagata, T., and Hiraga, F., *Key Engineering Materials*, **321–323**, 1663– 1666 (2006)
- 2) 鬼柳善明,加美山隆,非破壊検査,58(12), 533-537 (2009)
- 3) Yamashita, M., Mochiki, K., Kamiyama, T., and Kiyanagi, Y., Conference Record of Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 370–372 (2011)