

CONTENTS

第0008号



1. ご挨拶

2. 2021年度MPWラン

3. 研究紹介:

「機械工学・材料工学分野へのSOI検出器の応用について」

4. 編集後記

1. ご挨拶

2019年6月に森戸記念館でSOI量子イメージセンサ・コンソーシアムの設立総会を行ってから、 まもなく3年が経過します。当初より3年間の時限で立ち上げたこのコンソーシアムも、今月でめで たく使命を終えることになりました。

しかしながら、このように半導体の持つポテンシャルを最大限引き出せる技術は、国内においても世界的に見ても非常に貴重であるということで、ラピス・セミコンダクタ社のご協力を得ながら 今後も継続できるように努力していくつもりです。ぜひ今後ともお力添えをお願い致します。

高エネルギー加速器研究機構におけるメンバーは諸事情により減ってしまった為、今後の開発の中心は大学に担っていただく予定です。このコンソーシアムは、引き続き情報交換を行うための Special Interest Group (SIG)として維持していきたいと思います。

2. 2021年度MPWラン

2021年度のMulti Project Wafer (MPW)ラン が2021年12月初めにサブミットされ、2022年3 月末までに納入されました。今回は、東大、京 大、宮崎大グループが大面積センサーを投入 することで、マスク面積を埋める事が出来無事 MPWランを行えました。

今回のランでは、センサー以外にも東大の MEMSを初め、筑波大の極低温エレクトロニク ス、金沢工大のSuper Steep Transistor 等様々 な種類のチップがサブミットされました。 さらに電通大の範教授からは、Digital Library ICMemory Generatorが加わり、8bit CPU, 32bit RISC-V processor 等がサブミットされました。ま た今回も海外からのサブミットもありました。

さらには、前回のMPWランで製造したセン サーに対する、3D積層も始まっています。



機械工学・材料工学分野への SOI 検出器の応用について — 重要部品の疲労・材料強度保障のための X 線残留応力測定装置への適用 —

金沢大学	佐々木 敏彦
高エネルギー加速器研究機構	西村 龍太郎
株式会社不二越	乾 典規
滋賀大学	三井 真吾
高エネルギー加速器研究機構	新井 康夫
高エネルギー加速器研究機構	三好 敏喜

1. はじめに

本稿では、SOI(Silicon On Insulator)検出器の工 業的応用の一つとして、機械や構造物の強度や耐 久性に影響する「残留応力」の測定に利用する取り 組みについて紹介する。

2. X線による残留応力の測定

2. 1 残留応力

まず,残留応力とは何か?なぜ測定する必要が あるか?という点について簡単に説明する[1]。

応力は,物質中の力の状態を表す量として,機 械や,建築,土木分野における強度設計に用いら れている。応力には、外力によって発生するものの 他に、外力が無い状態でも物質中に存在しているも のもある。後者を残留応力という。発生の仕方は異 なるが、本質は同様である。なお、残留応力は物質 の一部に何らかの原因で塑性変形が生じることによ って発生し、物体内部で釣り合っているという特徴 がある。また、クラック(き裂)などの応力集中部に正 の応力(引張応力)があると、き裂が拡大しやすくな るため破壊する危険性が高まる。逆に, 負の応力 (圧縮応力)があると、壊れにくくなる。このため、機 械や構造物においては引張応力を抑制すると共に、 圧縮応力を付与することも行われる。しかし、残留 応力の評価は困難な場合が多い。一方,近年の小 型軽量化や省エネ対策の観点においても、残留応 力の管理や制御を正確かつ効率よく実現したいと いう要求があり、重要性が増しつつある。具体的な 例としては,自動車の歯車や軸受(ベアリング)等か ら, 航空機のエンジン部品(タービンブレード), さら

に、コンクリート構造物の鉄筋から、橋や原子カプラ ント等の溶接部などが挙げられ多岐に渡っている。

なお、残留応力の測定には、X 線以外にも磁気 や超音波,電気抵抗等を利用する方法から、数値 計算によるものなど種々のものが提案されており, 用途に応じて使い分けられている。これらの内,X 線法は非破壊、非接触で局部の測定が可能であり、 最も高精度と言われている。一方,測定時間やコス ト,測定深さなど弱点も有している。

2. 2 X線による残留応力の測定

X 線によって残留応力が測定できることは、1920 年代にアメリカやドイツで最初に提唱され、初期に は写真フィルムが X 線検出器として用いられた。第 二次大戦後の1950年代にディフラクトメータや計数 管が登場し、1970年頃に X 線残留応力測定用の 専用機が上市された。これ以降、この方式が普及し、 現在の世界標準技術となっている。この場合の測 定原理には「sin² φ 法」と称されるものが用いられて いる[2]。

その後, 1980 年代頃にラインセンサーの一種で ある PSPC(Position Sensitive Proportional Counter) が登場し, 測定時間の短縮に寄与した。この頃, IP(Image Plate)も利用可能になり, デバイリング(回 折環、図1参照)の二次元測定が可能になった。一 方,同じ頃 $\cos \alpha$ 法と呼ばれる新しい X 線応力測定 原理が日本で提案された(1978)[3]。 $\cos \alpha$ 法は回折 環全体の情報を利用して応力を解析する方法であ るのに対し、 $\sin^2 \phi$ 法は回折環のほんの一部分しか 利用しないという違いがある。 金沢大学では、1993 年から IP と cos a 法を柱と する X 線応力測定の基礎研究を開始し、2009 年の 科学技術振興機構 (JST) 主催による新技術説明会 [4]にて装置化へのパートナー企業を募った。その 結果、2012 年に IP と cosa 法を主体とした X 線応 力測定装置が世界に先駆けて誕生した[5]。



図1. X線応力測定の光学系と回折環(従来の sin² φ 法は回折環の中心角 α = 180°のデータのみ を利用し、cos α 法は0°から360までを利用する。)

この装置により、当時の標準装置と比べて大幅な測 定時間の短縮と装置の小型化が実現し、現在も普 及しつつある。

一方、金沢大学では IP に代わり SOI 検出器を使 用するための基礎研究を、2014 年頃から高エネル ギー加速器研究機構(KEK)の SOI 検出器グループ の協力の下で進め、X 線応力測定の高速化に取り 組んだ。当初は、SOI 検出器のひとつ"INTPIX4"と いう名前の検出器を適用し[6]、その後、INTPIX4を 改良した INTPIX4NA の実現[7]と、それを用いた X 線応力測定装置の研究開発に取り組んでいる。

以下、3章ではINTPIX4NAの性能検証(西村担 当[7])、応力測定装置の試作(乾担当[8])、三軸応 力分布のマッピング測定への利用(佐々木担当[9]) について、それぞれ、概説する。

3. 新開発した INTPIX4NA

SOI 検出器[10]には、目的に応じて幾つかのバリ

エーションがあり、その中でX線用の電荷積分型検 出器として開発されたものが INTPIX4 である[11]。 その後、金沢大学、KEK、不二越の協力の下、X線 応力測定への検証や課題の洗い出しが進められ、 改良型である INTPIX4NA が開発された。表1に、 その基本的な仕様を示す。

Chip size	$15.4 imes 10.2 \text{ mm}^2$	
Sensitive area	$14.1 \times 8.7 \text{ mm}^2$	
Pixel matrix	832 columns × 512 rows (425,984 pixels)	
Pixel size	$17 imes 17 \ \mu m^2$	
Pixel gain (designed)	12.8 µV/e	
Shutter	Global Shutter	
Thickness of sensor layer	300 μm (Typical)	
Sensor layer wafer	N type Floating Zone wafer	

表 1 INTPIX4NA 検出器の概要[7]

INTPIX4NA の性能評価が、KEK つくばキャンパ スにおける放射光実験施設フォトンファクトリーの実 験ステーション BL-14A 及び BL-14B を用いて実施 された。INTPIX4NA の性能評価における基本的な 項目である

 ①解像特性、②エネルギー分解能、③ピクセル ゲイン、④セトリング時間、に関する評価について、
X 線応力測定の標準的条件に近い X 線エネルギー(5.415 keV、8 keV、12 keV)、および、検出器運用条件(大気中、常温 (25~27 ℃)下)にて実施し、
以下の結果を得た。(詳細は文献 [7]参照)

・ナイキスト周波数(29.4 cycle/mm)における
MTF は ピクセルアレイの Column 方向・Row 方向のいずれにおいても 50% 以上を記録。

・50% MTF および 10% MTF は、ナイキス ト周波数を大幅に超える値を示したことか ら、本検出器は高い解像特性を持つことが 示された。

② エネルギー分解能;

・測定対象のピクセルについて、エネルギー

分解能は、室温で 5.415 keV で 35.3%-46.2%、8 keV で 21.7%-35.6%、12 keV で 15.7%-19.4%であった。

③ ピクセルゲイン; ・測定対象のピクセルについて、ピクセルゲ インは 9.3-10.6 µV/e であった。これは前述 の設計値に対してわずかに低いものの、想 定範囲内である。

④ セトリング時間;

・試験セットアップにおいて、出力特性を維持できる最短のセトリング時間は 1 ピクセル当たり 200 ns であった。これは INTPIX4NA 全体を読み出した場合のフレームレートで 153 fps に相当する。

・出力特性の低下が許容できる場合は、1ピ クセル当たり 80 ns(フレームレート換算 350fps)まで短縮することが可能であること が確認された。

以上より、INTPIX4NA は著者らの意図した通り に、X 線応力測定への適用に十分な特性を備えて いることが確認された。また、X 線イメージング用の 検出器として良好な性能を備えていることから、放 射光実験施設における高精度な X 線応力測定へ の適用および他の X 線イメージング用途への応用 も視野に入れた研究が継続されている。

4. INTPIX4NA によるX線応力測定システム

試作した X 線応力測定装置の構成を図 2 に示 す。本装置は、X 線管球およびセンサー基板を搭 載した測定ユニット、X 線出力電源、センサー基板 からの出力読出システム、制御用 PC から構成され、 図 3 に示すセンサー基板に実装した 2 枚の INTPIX4NA チップにより、回折環を計測する。

X線照射時間は、1測定あたり100 ミリ秒の画像を 10 枚積算することで1秒とした。次に、X線照射時 間を1秒としたときの回折X線ピークおよび連続測 定精度の確認結果について述べる。市販の応力標 準片(新東工業株式会社製)に対し、メーカーの公 称値と本システムの測定結果を比較した。

なお、メーカーでの市販の cosa 法装置による X 線応力測定の結果より、応力の公称値は無応力片 で 0MPa、高応力で-374MPa であった。

本測定では、用いた XY ステージに試料を設置 し、Zψ0 ステージに測定ユニットを搭載した。XY ス テージでは、試料の XY 平面上での測定位置を、Z ステージでは試料とセンサー間の距離を、ψ0 ステー ジでは X 線入射角をそれぞれ制御した。本構成に より、XY ステージ移動とセンサー基板の出力読出 システムを同期することで、多点自動測定や XY 平 面揺動測定が容易に行うことができる。

両標準片に対し、30回連続で応力測定を行うこ



図 2 INTPIX4NA による X 線計測システム[8]

INTPIX4NA chip



図 3.2 枚の INTPIX4NA チップを使用した応力 測定用センサー基板[8]



図 4. 無応力片からの回折環[8]





とで、連続測定精度を検証とした。まず、無応力片 の測定の1回目で得られた回折環を図4に示す。図 より、均一な回折環が得られたことが確認できる。な お、回折環を画像解析して回折環の半径方向の X 線プロフィルを求めた結果、良好な S/N 比が得られ たことを確認した。また、各 α角の回折プロフィルを 解析することで得られた cosα 線図は線形性が良く、 応力値は-6±3MPa と十分な測定精度であり、実用 上支障のない結果が得られた。

両標準片の 30 回連続測定結果から得られた応 力値は、図 5 に示すように設定した閾値である応力 公称値±30MPa 以内を満足した。30 回の応力の平 均値は無応力片で 9±10MPa、高応力片で-358±7MPaであった。

5. 三軸応力分布のマッピング測定

上記のような X 線応力測定の高速化の実現の動 きに伴い、従来は点測定や線上の離散的な分布測 定に留まっていた適用方法から、面上にマッピング 測定することが現実的な範疇となりつつある。

一方、鋼材の研削加工面やショットピーニング処 理面、転動接触面である軸受の軌道面や鉄道のレ ール(頭頂面)などでは、三軸応力成分が出現する 結果、より多くの方向からの回折環測定を必要とす るため、従来のX線応力測定技術では長時間を要 するという課題があった[12]。

こうした測定に対して、SOI 検出器と cosα 法を組 み合わせたX線応力測定では、前章までの(平面 応力)測定以上に測定の効率化が可能になる。一 例として鉄道レールの測定例を紹介する[9]。

図 6 に、測定に用いたレールを示す。レール の頭頂面全体について、5mm 間隔にX線を照射し てそれぞれ回折環を測定した。本稿では、垂直な 方向からX線を照射して測定した回折環から、深さ 方向に関するせん断応力 τ_{xz}を解析して求めた結果 について述べる。なお、x はレールの長手方向(列 車の走行方向)、z は深さ方向とした。

図7は、SOI検出器(INTPIX4)を用いて測定 したせん断残留応力 τ_{xz} を、IPの結果と並べて示 している。その結果、 τ_{xz} の高い正の値がレール の中心線上に存在することが分かった。これは 車輪との接触部分とほぼ一致している。なお、 SOI検出器と IPの結果における細部の相違の原 因には、測定位置の不一致、回折環の中心角 α の 計測範囲の差、位置分解能と画像処理条件の差 等が考えられ、現在検討中である。



図 6. 測定サンプル(鉄道のレール)[9]



図 7. 鉄道レールの三軸応力測定結果の一例(せん断応力 τ_{xz}のマッピング測定、IPとSOIの比較) [9].

一方、今回測定を行った全 279 点に対する測定 時間は、SOI 検出器が4分8秒、IPが4時間8分 であった。よって、SOI ピクセル検出器の使用は、IP に比べて 60 倍高速なデータ収集が可能となること が実証された。レールの検査の場合のように、測定 範囲が比較的長く、測定点数の多い場合には、実 用上、測定の高速化は重要になる。

6. まとめ

回折環を二次元計測して cosa 法を適用するX 線応力測定において、SOI 検出器が有効であると 共に、IP に比べて約 60 倍程度の高速化が可能な ことが分かった。本稿では、新開発の SOI 検出 器チップである INTPIX4NA の性能評価、応力測 定装置の試作状況、そして、INTPIX4 による三軸 応力のマッピング測定について紹介した。

く参考文献>

[1] 須藤一,残留応力とゆがみ,内田老鶴圃, (1988).

[2] I. C. Noyan & J. B. Cohen, Residual stress: Measurement by Diffraction and Interpretation. Springer. (2013).

[3] 平, 田中, 山崎, 材料、Vol.27, No.294, pp.

251-256, (1978).

[4] 科学技術振興機構, 金沢大学 新技術説明会, 2009 年 07 月 28 日,

https://shingi.jst.go.jp/list/list_2009/2009_kanazawa. html#20090728X-001

[5] パルステック工業,

https://www.pulstec.co.jp/product/x-ray/ [6] 佐々木, 三井, 新谷, 柳, 西村, 三好, 新井, 検査技術, (2018).

[7] R.Nishimura et al., IOP, JINST, Vol. 16, p. P08054, (2021).

[8] 乾, 佐々木, 三井, 日本非破壊検査協会、秋 季講演大会、2021 年 11 月 11 日、東京.

[9] T. Sasaki, et al., Elsevier, Nucl. Instrum. Meth.

A, Vol. 979(504), p.164426, (2020).

[10] Y.Arai et al., Elsevier, Nucl. Instrum.

Meth. A, Vol. 623, pp. 186-188, (2010).

[11] S.Mitsui et al., Elsevier, Nucl. Instrum.

Meth. A, Vol. 953, p. 163106, (2020).

[12] 佐々木, 廣瀬, 日本機械学会論文集, (A),

vol.61, No.590, pp.2288-2295, (1995).

4. 編集後記

SOIコンソも予定の3年間が終わり次のステップに入られるとの事、初代の代表として益々の ご発展を祈るばかりです。途中で辞任しなければならず今でも大変申し訳なく思っておりま すが、このように予定の3年を満了できましたのは新井先生はじめ、前代表の三好先生、陰 ながら支えていただいたスタッフの方、そして何よりも会員の皆様のご協力の賜物です。特 徴を持っている技術ですので、これからもこの技術が発展していくこと望みます。またどこか で皆様とお会いできること楽しみにし、皆様の今後のご発展を祈っております。

(初代代表 倉知郁生)

2代目代表として今年度スタートし、当初は何回か会報を出すことを考えておりましたが、 様々な事情があり2021年12月末にKEKを離れました。中途半端な形で引き継いでしまい大 変心苦しかったのですが、今ではSOI研究に携わる若い研究者は全国各地に居ります。次 のステップに進むとの事ですが、ここで得られた人脈、知見はとても貴重な財産だと思いま す。今後ともさらなる発展を願っております。

(2代目代表 三好敏喜)

2005年にSOI技術を用いた放射線イメージセンサー開発を提案してから17年が経ちます。 ここまで継続できたのは、多くの方のご支援と協力によるものと感謝しています。今もまだ KEKに在籍していますが、定年を過ぎ研究開発は若い方にバトンタッチし、研究サポート及 び産学連携に努めています。今後KEKでのアクテビティは一旦減ってしまうと思いますが、 京都大、宮崎大、筑波大、理科大、金沢大、金沢工大、茨城大、静岡大、北大、都立産業 技術高専、仙台高専、理研や東大等々、引き続き活発にSOI開発を続ける研究者が大勢い ますので、ますます発展していくものと思います。

(発起人代表 新井康夫)





2022年3月31日発行 http://rd.kek.jp/project/soi/conso/ 〒305-0801 つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構 先端加速器推進部 SOI量子イメージセンサコンソーシアム 事務局 treiko@post.kek.jp