

◇報 告◇

3Dレーザースキャナを用いたキルン点検手法の開発

Development of a Kiln Inspection Method Using a
3D Laser Scanner

関 根 麻里子*, 星 健 太*,
住 吉 裕次郎*, 森 寛 晃**

SEKINE, Mariko*; HOSHI, Kenta*;
SUMIYOSHI, Yujiro*; MORI, Hiroaki**

要 旨

工場設備の老朽化が進み、設備故障やそれに伴う修繕回数が増加している。また、今後のマンパワー不足に備えて、点検技術の省力化・効率化が急務である。そこで、ありのままの形状を取得できる3Dレーザースキャナに着目し、セメント製造の主要設備であるキルンを対象とした新たな点検手法の開発に取り組んだ。まず、キルンの形状特性を把握するため3Dレーザースキャナを用いて複数工場のキルンを計測した。楕円近似を用いた形状評価により、キルン径に応じたキルン固有の形状特性を把握でき、全体形状を示すオーバーリティ率分布や局所変形分布が取得可能となった。これまで不明だった支点間を含むキルンの全体形状や局所変形を精緻に得られ、合理的なシェル切替範囲の決定や変形箇所の詳細点検スクリーニングなどへの活用が期待できる。キルン健康度の評価に使える管理指針の設定には、故障時の計測に加えて定期的なデータ蓄積が求められる。

キーワード：工場設備、キルン、シェル、3Dレーザースキャナ、点検、形状評価、楕円近似

* 中央研究所 研究開発推進部 インフラ先進技術チーム

Infrastructure Advanced Technology Team, Research & Development Promotion Department, Central Research Laboratory

** 中央研究所 研究開発推進部 インフラ先進技術チーム リーダー

Manager, Infrastructure Advanced Technology Team, Research & Development Promotion Department, Central Research Laboratory

ABSTRACT

With the aging of factory equipment, the number of equipment failures and associated repairs has been increasing. In addition, in preparation for future manpower shortages, there is an urgent need to make inspection techniques more labor-saving and efficient. We focused on a 3D laser scanner for its capacity to capture the true shape of a kiln and worked to develop a new inspection method for kilns, the main equipment used in cement production. The dimensions of kilns were measured at several plants using a 3D laser scanner to understand the shape characteristics of the kilns, and shape evaluation was performed by using the elliptic approximation. By this method, it was possible to understand kiln-specific shape characteristics depending on the kiln diameter and obtain overall shape distribution of the kiln and local deformation distribution. The precise information obtained for the overall shape and local deformation of the kiln included the distance between the fulcrums which was previously unknown. This implies possible applications of the proposed method to the determination of a reasonable shell switching range or detailed inspection screening of deformed areas. In order to establish management guidelines that can be used to evaluate kiln health, periodic data accumulation will be necessary in addition to measurement at the time of failure.

Keywords : *Factory Equipment, Kiln, Shell, 3D laser scanners, Inspection, Shape Evaluation, elliptic approximation*

1. はじめに

セメント製造の主要設備であるロータリーキルン(以下、キルン)は巨大な円筒状の回転炉であり、複数の支点と一つの駆動装置によって全長を支持、回転する設備である。原料焼成のため内部は1450℃に達し、表面の鋼製シェルを保護するため、内側は耐火物のレンガが施工されている。レンガはわずかに台形の断面をしておりシェルの内径に沿って積まれ、基本的にはレンガ同士の一様な圧縮力によりその配列が保たれている(**Fig. 1**)が、温度や過大なシェル変形、キルン中心軸のずれにより、レンガの熔融、損耗、剥離、圧壊や、配列が崩れる斜行(**Fig. 2**)などのレンガ故障¹⁾²⁾が生じる。レンガ故障を防ぐため、キルンの定期点検項目³⁾としてシェルの変形や、厚さ、剛性、レンガ損耗状況を定期的に把握しており、特にシェルは機械的応力を極力小さくするように管理されている。

セメント工場の稼働年数は古いもので90年を超えており、老朽化による設備故障やそれに伴う修繕回数が増加している。また、今後のマンパワー不足に備えて、点検技術の省力化・効率化が求められている。従来の点検は主に手作業で行われているが、

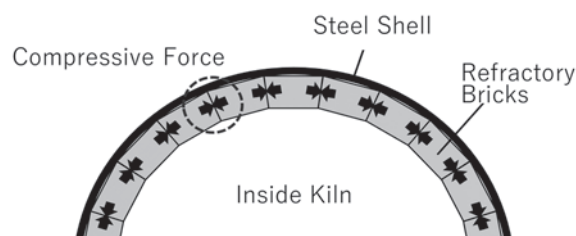


Fig.1 Schematic cross section diagram of kilns
(キルン構造の模式図)

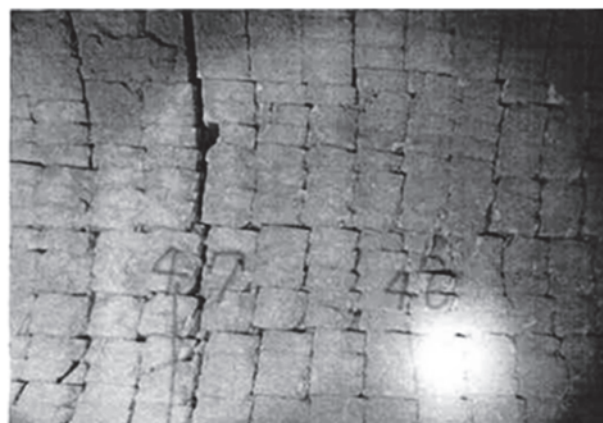


Fig.2 Bricks out of alignment
(斜行したレンガ)

例えば、先進機器を導入して耐火レンガやシェルのありのままの形状を把握し、適切なタイミングで修繕や設備更新を行うことで、レンガ故障のない安定運転を実現できる可能性がある。著者らはこれまでに、セメント製造の主要設備であるキルンを対象に、内部の全ての耐火レンガの残厚を効率的に精度よく取得する方法⁴⁾を確立した。本稿では点検技術の高度化を目指し、3D レーザースキャナを用いてシェル形状を効率的に精度よく取得する方法を検討した。

2. 3D レーザースキャナによるキルン計測

2.1 キルン概要

計測は全国の工場の3基のキルンで実施し、ここでは1号、2号、3号キルンと呼称する。1号キルンは直径5.5m、全長100mの大径キルンである。2号キルンは直径3.75m、全長76mの小径キルンであり、31～34m（キルン口元端から長手方向、以降同様）の範囲で直径が3.75から3.45mに徐々に小さくなる。3号キルンは1号キルンと同様に大径キルンに分類され、直径5.25m、全長80mであり、32～36mで直径が4.75mに徐々に小さくなる。また、3号キルンではシェル厚が規定値以下となるなどの、健康度の低いシェルを交換する切替が37～42mに実施された。

キルンの運転を停止する大規模な点検・修繕は半年に一回の頻度で行われており、このタイミングでキルン内部のレンガを更新する。古いレンガを解体し、シェル表面が露出した範囲を対象にキルン内部から計測を実施した。1号キルンと2号キルンは初回計測時に停止した位置を基準とし、基準から90°、180°回転させた状態の計3パターンの位置（以下、停止角度）で計測を実施した。なお、1号キルンでは2021年に0°、2022年に180°、2023年に90°の停止角度の計測を実施し、2号キルンは1日のうちに90°毎に停止角度を変え、3回計測した。3号キルンは切替工事の前後の2回計測し、停止角度は2回とも同じであった。

2.2 計測機概要

新たなキルン形状計測手法として、地形測量に用いられ、近年ではインフラ調査などで活用⁵⁾⁶⁾されている3D レーザースキャナ（以下、3DLS）に着目した。

3DLSは測定対象物にレーザーを照射し、その距離と照射角度から対象物の座標値を算出する。また、**Fig. 3**に示すようにレーザー発出部が垂直方向に



Fig.3 3D Laser Scanner
(3D レーザースキャナ)

360°回転し、本体全体が水平方向に180°回転することで全周囲における3次元空間の点群座標を取得できる。本検討ではFARO製のFocusS-Plus150を用いた。計測時の点間距離は10m先にレーザーを垂直に照射した場合6.3mmの設定とした。この設定では全周囲を計測するのに約4分要する。

2.3 計測方法

3DLSはレーザーを放射状に照射するため、計測対象が計測機器から離れるほど得られる点群の間隔が大きくなる事や、照射角度が小さいとキルン内部の凹凸により死角が増える等の問題が生じる。これらを防ぐため、キルン内部の計測は3DLSを長手方向に20mずつ移動させて複数回計測を行い、各計測で得られたデータを繋ぎ合わせた。各計測では**Fig. 4**に示す直径約14cmの樹脂製基準球（以下、リファレンスボール）を複数個ランダムに配置して計測データに含めることで、任意の3個のリファレンスボールで構成される三角形を計測データの合成目印とした。リファレンスボールは計10個使用し、上手と下手の計測範囲に5個ずつ配置する。リファレンスボールの移動と設置の作業時間は5分程要、計測時間を合わせると10分弱必要となり、全長100mのキルンは約1時間程度で計測できた。円滑に作業するには3名以上いると良い。

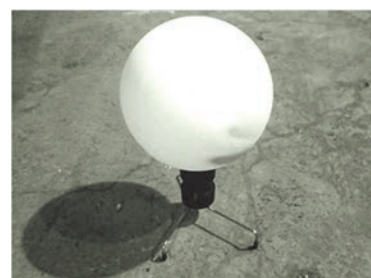


Fig.4 Reference ball
(リファレンスボール)

なお、計測間隔について本計測では 20m を採用したが、シェル表面が露出したキルン内部において 30m 間隔で計測しても問題ない事を別途確認している。より計測間隔を大きくする際は、リファレンスボールに照射されるレーザー点数が少なくなるため、点群密度の設定を大きくする必要があるが、計測時間が極端に長くなる。定期修繕中の限られた時間で作業する場合、キルン内部の計測間隔は 30m までが適当である。

2.4 点群処理

得られた点群データは格子状に整列していないランダム点群であり、計測時の機器を中心とした座標系で構成される。複数の点群データの合成や新たな座標の設定には、3D 計測データ処理ソフトウェア Galaxy-Eye modeler を使用した。リファレンスボールの位置関係から自動的に全点群データを合成して、これに最小二乗法で円筒を近似した。Fig.5 に示すように、近似円筒の中心軸をキルンの中心軸と仮定し、これを Z 軸とする円筒座標系(中心軸から点群までの半径方向距離を R, 中心角 θ はキルンの頭上方向を 0° とする)を点群の座標系に設定した。全点群について、中心角 1° 、Z 軸 5 cm の範囲毎に R の平均値 r を算出した。なお、中心角 1° は、1 号キルンにおける周方向約 5 cm に相当する。この平均化によって、計測器からの距離により点密度が異なるランダム点群は格子状に均一となり、シェル表面の点群データについて中心角を行、軸方向長さを列とする行列で表すことが可能となる。以降、平均化した点群を用いてキルン形状を表す。

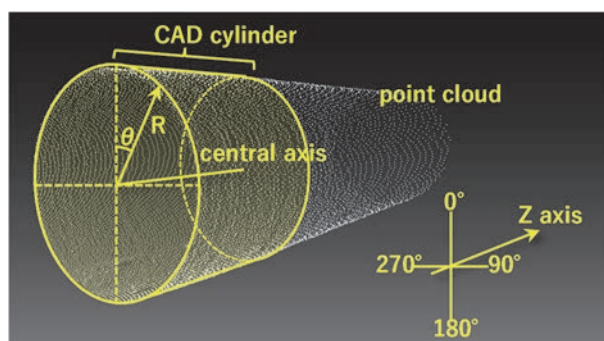


Fig.5 Coordinate axis setting
(座標設定)

3. 計測結果

点群処理を実施した 1 号キルンの停止角度 180° における計測結果の一例を Fig.6 に示す。Fig.6 では r の値を用いたカラーマッピングで形状を表しており、垂直方向は青、水平方向は赤で表され、水平方向は垂直方向より r が 5 cm 程度大きい。キルンは真円のように見えるが、実際には形状特性として、軸に直交する断面は楕円状に変形していることが確認された。Fig.7 にキルン 13.5~15m の断面を示す。この図は r のレンジをキルン表面付近に合わせることで変形を顕著に表した図であり、断面垂直方向が潰れる楕円変形の他に、向かって右下と左上方向に局部的に内側へ隆起するような変形を確認できる。キルン口元から 15m 付近で、レンガ故障が発生し、これに伴いシェルの受熱温度が高くなり変形が生じたと考えられる。従来、このような変形が生じた際

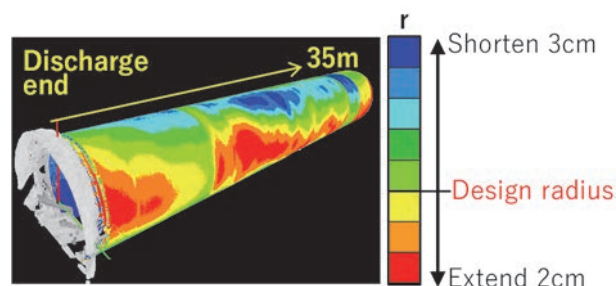


Fig.6 Deformation of kiln No.1
(1 号キルン形状)

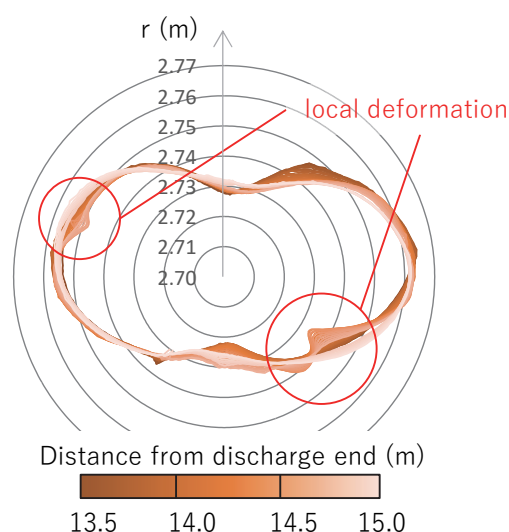


Fig.7 Locally deformed steel shell surface
in kiln No.1
(1 号キルン局所変形)

は変形を囲うように健全な箇所に2点基準をとり、基準点から同一高さに水系を張って、水系からシェル表面までの距離を測る事で変形程度を把握している。Fig. 8 にキルン 13~15m の円周右下 1/4 範囲における 3DLS 計測から求めた 3D 散布図と同箇所を水系で計測した結果を示す。図上 a~d の4ラインについて、従来の水系の計測結果と、3DLS による計測結果を比較すると、両者の局所変形の大きさがおおむね一致している事が確認できた。水系はライン上の計測に限られるのに対し、3DLS は面的に形状を取得でき、シェル局所変形の程度を詳細に確認できる。これまで確認の難しかった支点間を含む全体形状・局所変形データを短時間で精緻に得られる点が 3DLS を用いるメリットと言える。

4. シェル形状評価

キルン形状において Fig. 6, 7 で示された通り、全体の変形と局所変形が混在していることや、レンガ故障を引き起こす変形程度が不明であることから、3DLS を用いた本手法を点検に活用するためには複数キルンのデータ蓄積が必要である。現状、キルン形状について、全国のキルンの形状個体差が不明であること、従来の管理方法では支点付近の変形程度や回転芯を計測するにとどまり、支点間の詳細な形

状は把握できていないことから、まずは各キルンの基本的な形状特性を確認することとした。複数のキルン形状を把握するにあたり、統一した形状評価手法が必要である。ここではキルン中心軸に直交する断面形状を評価する。

Fig. 6 で確認された通り、自重により軸に直交する断面形状は楕円に近い形状である²⁾。そこで、各断面に最小二乗法でフィッティングさせた近似楕円を、自重の影響を受けた健全なキルンの断面形状と仮定し、式1に示される近似楕円のオーバーラップ率から形状を評価する。

$$\text{式1} \quad \text{オーバーラップ率} : \omega r = (a-b)/d \times 100(\%)$$

a : 近似楕円の長軸半径

b : 近似楕円の短軸半径

d : 胴体半径(設計値)

さらに、近似楕円からの誤差情報を可視化する方法のイメージを Fig. 9 に示す。断面を構成する計測データの各点について、中心軸からの距離 r が近似楕円の半径より小さい場合(シェル表面が内側)を赤、一致する場合を黄色、大きい場合(シェル表面が外側)を緑とし、キルン 3D コンタにカラーマッピングした。キルン内部からの視点で、赤は凸、緑は凹の変形が表せる。

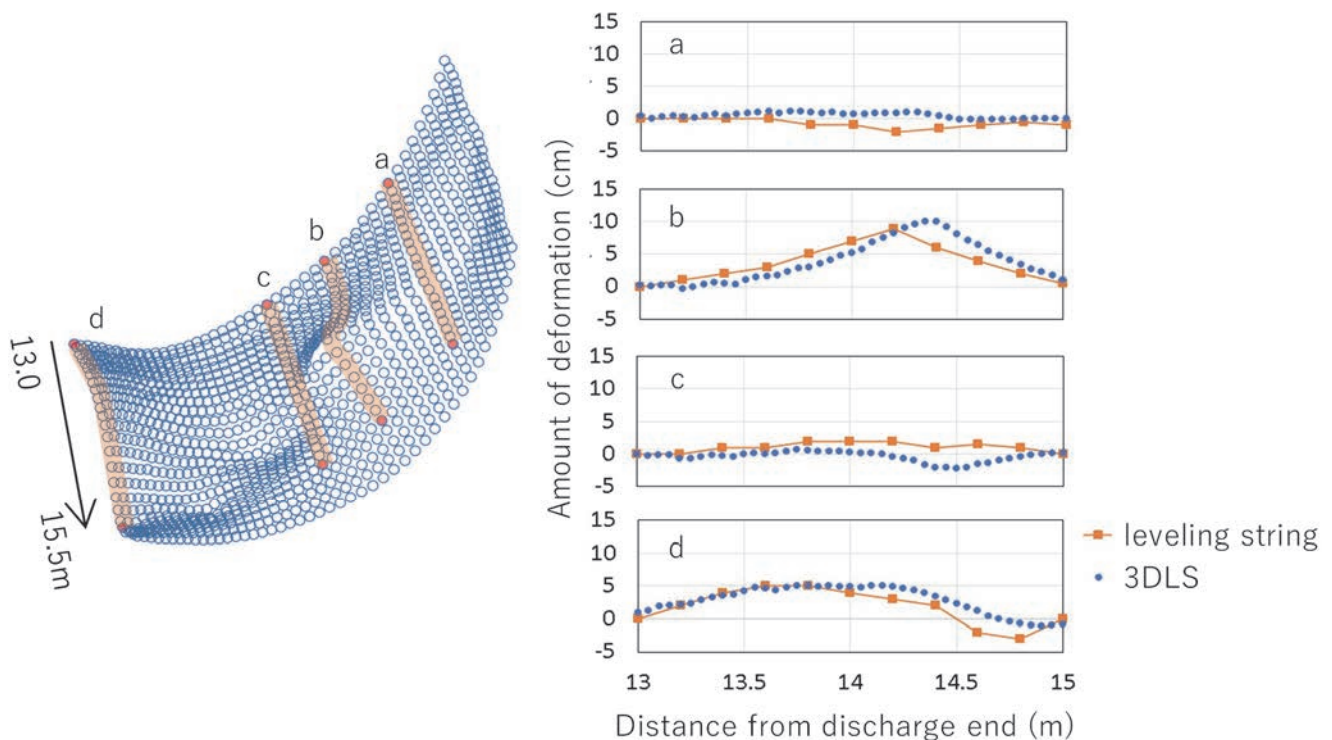


Fig.8 Comparison of deformations measured by 3DLS and leveling string at the erosion site
(溶損箇所における 3DLS と水系計測で取得した変形量の比較)

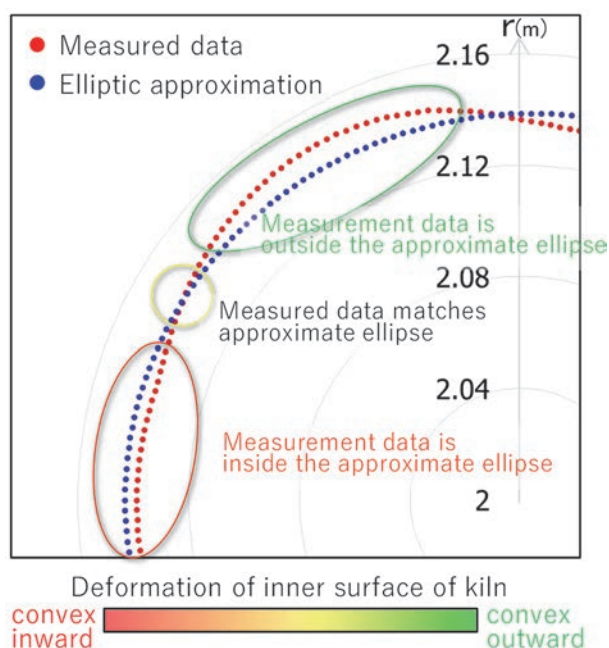


Fig.9 Evaluation method of local deformation
(局所変形判定方法)

5. 形状特性

5.1 オーバリティ率

1～3号キルンの各断面に近似した楕円のオーバリティ率をそれぞれ Fig. 10～12 に示す。図中の二重線の縦軸はキルン長手方向における支点位置を表す。Fig. 10 の1号キルンにおいて、オーバリティ率は支点付近で小さく、楕円変形が小さい事がわかる。支点部はシェル厚が大きい変形が抑制されていると考えられる。また、支点間では停止角度0°、180°のオーバリティ率は大きく、おおむね一致している。一方、停止角度90°のオーバリティ率は小さい。特に支点間中央付近はオーバリティ率の変動幅が大きく、特に負荷がかかると考えられる。Fig. 11 の2号キルンにおいて、停止角度0°と180°のオーバリティ率は同じ傾向であり、停止角度90°は異なるオーバリティ率であった。これにより1号キルンと同様に停止角度により変形しやすさが異なり、変動幅を有することが示された。1号キルンの最大オーバリティ率は1.4程度であるが2号キルンのオーバリティ率は1以下であり、小径かつ支点間距離が小さいため剛性が大きく変形しにくいことが示唆される。Fig. 12 の3号キルンにおいて、切替前後でオーバリティ率の分布はおおむね一致しており、同一停止角度であればオーバリティ率に大きな違いは

ないことが確認された。オーバリティ率は1以下と、大径の1号キルンより小さい値であったが、変形し易さを比較するには別の停止角度の計測が望まれる。切替を実施した37～42mでは切替前と比較して切替後のオーバリティ率が低下し、変形が改善されたように見えるが、計測事例が少なく、オーバリティ率0.2程度の低減が変形の改善を表すのか、誤差なのかは不明である。

キルン各断面の近似楕円のオーバリティ率からキルン各断面の変形程度と、停止角度の変化に伴い生じる変形量を把握することができた。特に大径の1号キルンでは支点間中央付近で停止角度の変化に伴うオーバリティ率の変動幅が大きい傾向があることが確認された。今後、さらにデータ蓄積をして、オーバリティ率の基準値を設定することで、シェル切替範囲を合理的に決めることができる可能性がある。

5.2 局所変形

局所変形の分布は断面形状と近似楕円の誤差情報から求めた。Fig. 13 は上から停止角度0°(21年計測)、180°(22年計測)、90°(23年計測)の1号キルンの計測データから得られる局所変形の分布を表し、キルン3Dコンタの向きは21年計測時の停止角度0°に統一した。15m付近に着目すると、停止角度180°、90°では、停止角度0°には見られない局所的な赤い特徴がキルン下方に確認できる。これはFig. 7 に示すレンガ故障後のシェル塑性変形を捉えたものである。Fig. 14 の2号キルンは停止角度0°、90°、180°の計測データから得られる局所変形の分布を表し、1号キルンと同様に図の向きを停止角度0°に統一した。停止角度3パターンの局所変形位置を比較すると、キルン5、15m付近にはキルン側面の緑と下方の赤い特徴が見られ、局所変形が確認できる。Fig. 15 の3号キルンは切替前後の同じ停止角度で計測された。局所変形分布はほぼ同じであるが、切替部分をFig. 16 に拡大して示す。切替前では39mの周方向に変形が確認された。支点位置と一致しており、局所的な負荷が生じていたと考えられる。切替後は局所変形が解消しており、シェルの切替により健康度が回復した。キルン軸方向に赤線で示される変形は、切替前1カ所と切替後3箇所を確認され、線状であることと、35m側と45m側で90°ずれていることからシェル接合で生じる溶接線と考える。

各キルンにおいて停止角度に関わらず、同一箇所に表示される赤や緑の特徴は永久変形とみなすことができる。複数の停止角度による計測で、永久変形と一

時的な変形を検知できる可能性がある。従来の水系計測は故障発生時のみ該当箇所を実施され、故障部以外の局所変形の有無は不明である。当手法はキル

ン全面に対して局所変形の有無とその位置を検知でき、詳細点検の要否判断のスクリーニングに使える可能性がある。

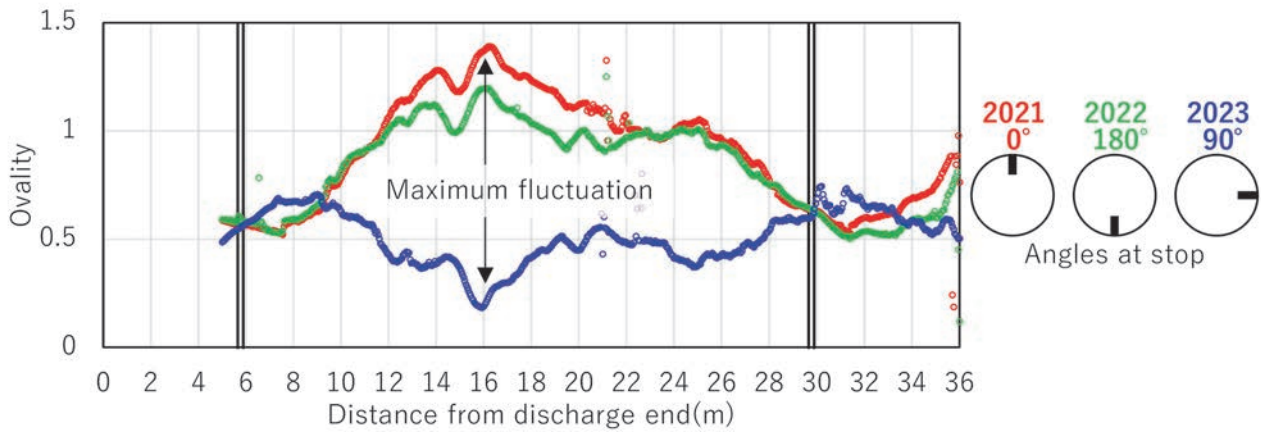


Fig.10 Ovality by position of kiln No. 1
(1号キルンオーバリティ率分布)

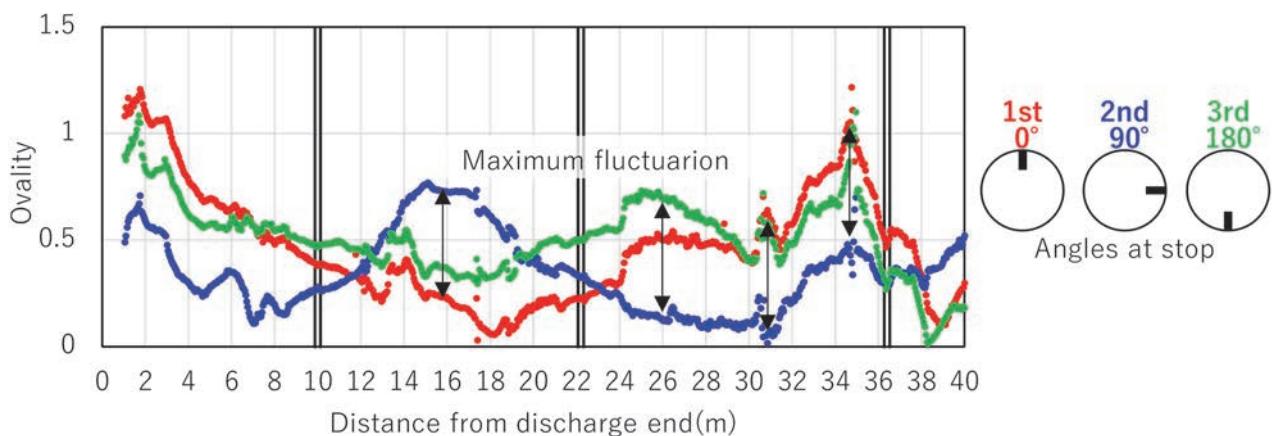


Fig.11 Ovality by position of kiln No. 2
(2号キルンオーバリティ率分布)

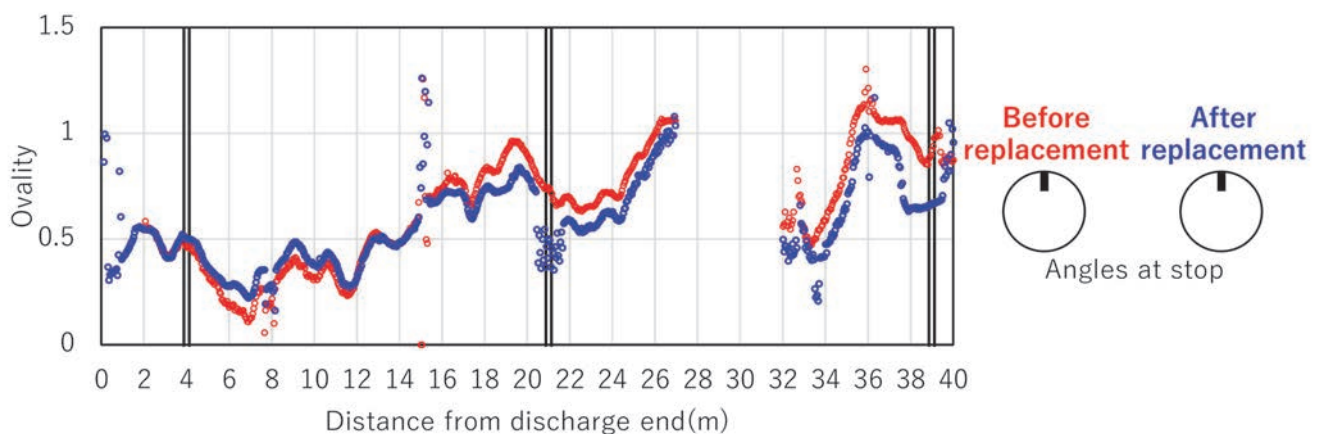


Fig.12 Ovality by position of kiln No. 3
(3号キルンオーバリティ率分布)

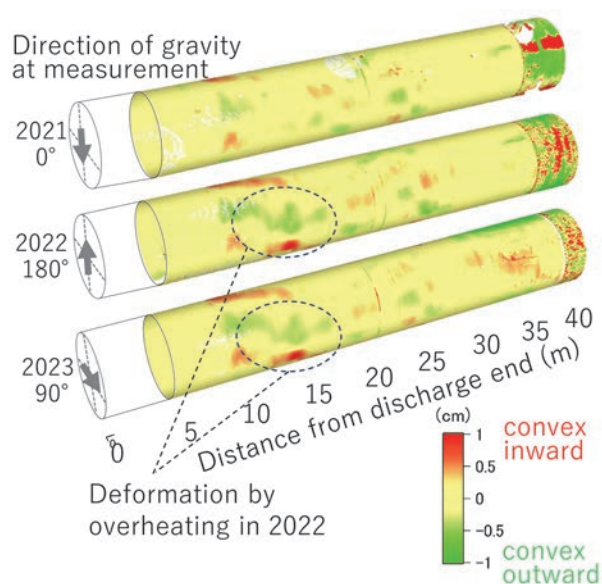


Fig.13 3D contour diagram of Local deformation in kiln No.1
(1号キルンの局所変形)

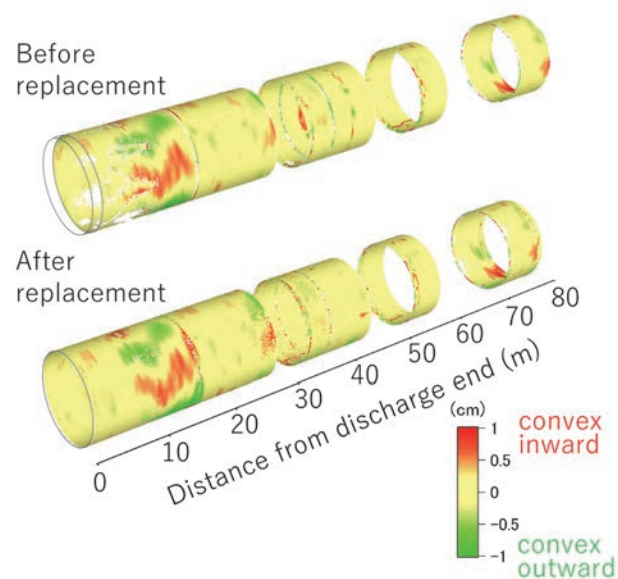


Fig.15 3D contour diagram of Local deformation in kiln No.3
(3号キルンの局所変形分布)

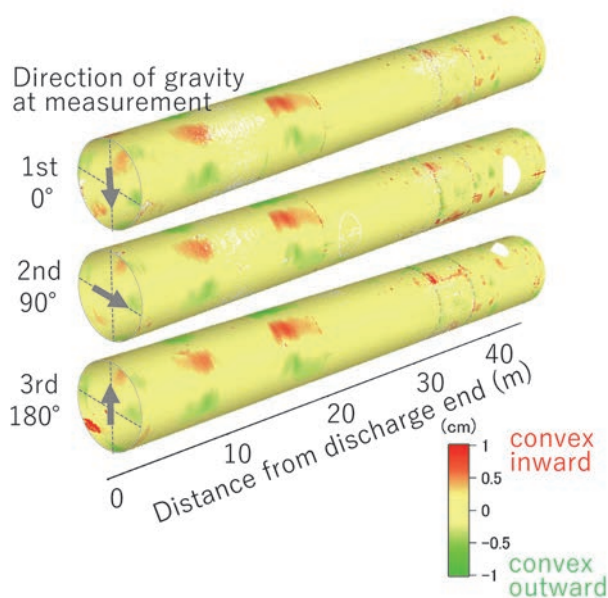


Fig.14 3D contour diagram of Local deformation in kiln No.2
(2号キルンの局所変形分布)

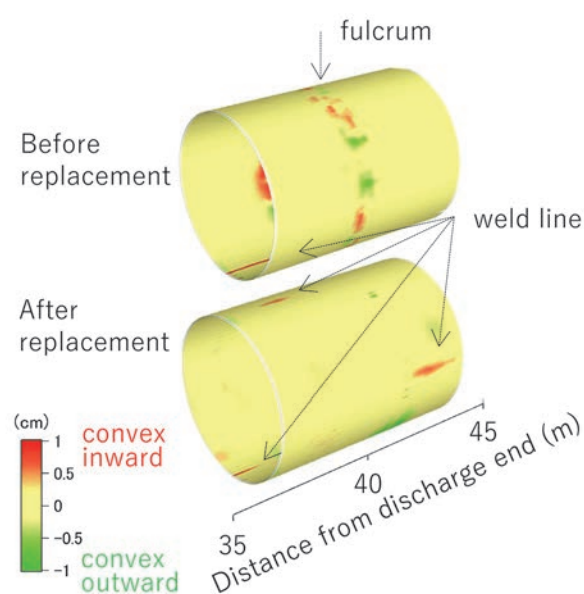


Fig.16 3D contour diagram of Local deformation from 37 to 42m in kiln No.3
(3号キルン 37-42m の局所変形分布)

6. お わ り に

本稿ではキルン点検技術の高度化を目指し、3DLSを活用したキルン形状の評価方法について検討した事例を報告した。楕円近似を用いた形状評価により、キルン径に応じたキルン固有の形状特性を把握でき、全体形状を示すオーバリティ率分布や局所変形分布が取得可能となった。これまで不明だった支点間を含むキルンの全体形状や局所変形を精緻に得られ、合理的なシェル切替範囲の決定や変形箇所の詳細点検スクリーニングなどへの活用が期待できる。キルン設備の修繕や更新を適切なタイミングで行いながらキルン安全運転ができるよう、故障時の計測に加えて定期的にデータを蓄積し、キルン健康度の評価に使える管理指針の設定に繋げたい。

参 考 文 献

- 1) 戸田 雅, 大野 誠, 尾関文仁 ほか. セメントロータリーキルンのオーバリティが内張り耐火物の損耗に与える影響. 耐火物. 2017, 69(10), p. 502-506.
- 2) 戸田 雅. ロータリーキルンの耐火物のトラブルとその要因について. 紙パ技協誌. 2019, 73(8), p. 770-773.
- 3) 望月 禎仁. ロータリーキルンの設備診断. 紙パ技協誌. 2017, 71 (11), p. 1297-1300.
- 4) 関根麻里子, 星 健太, 森 寛晃. 3D レーザースキャナを用いたロータリーキルン点検技術. セメント技術大会講演要旨. 2023, 77, e2102.
- 5) 中村隆寛, 妹尾悠貴, 石田航星ほか. 3次元レーザースキャナを用いた建築物の計測手法に関する研究 その1:利用目的ごとの計測手順の整理. 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM). 2020, e1452.
- 6) 山下淳子, 木村沙智, 川村日成. 3次元点群データを活用したインフラ構造物の維持管理. 精密工学会誌. 2019, 85(3), p. 228-231.