

3Dレーザースキャナによる工場点検技術の開発

太平洋セメント株式会社 中央研究所研究開発推進部インフラ先進技術チーム 関根 麻里子
太平洋セメント株式会社 中央研究所研究開発推進部インフラ先進技術チーム 星 健太
太平洋セメント株式会社 中央研究所研究開発推進部インフラ先進技術チーム 住吉 裕次郎
太平洋セメント株式会社 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 森 寛晃

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、複数の支点で全長を支持し、駆動装置にて回転する設備である。原料焼成のため内部は1,450℃に達し、鋼製キルンシェルを保護するため、内側に耐火物のレンガが施工されている。過大な温度やシェル変形、キルン中心軸のずれにより、レンガの溶融、損耗、剥離、圧壊や、配列が崩れる斜行(写真-1)などのレンガ故障¹⁾²⁾が生じる。レンガ故障を防ぐために、キルンの定期点検項目としてシェルの変形や厚さ、剛性、レンガ損耗状況を半年毎の定期修繕(以下、定修)時に把握している。

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、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



写真-1 レンガ斜行

安定運転を実現できる可能性がある。本稿ではキルンを対象に、3Dレーザースキャナを用いてレンガの残厚およびシェル形状を効率的に精度よく取得する方法を紹介する。

2. 3Dレーザースキャナによるキルン計測

2-1 キルン計測における留意点

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³⁾⁴⁾されている3Dレーザースキャナ(以下、3DLS)に着目した(図-1)。3DLSは測定対象物にレーザー光線を照射し、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、レーザー照射部が垂直方向に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。3DLSはレーザーを放射状に照射するため、計測対象が3DLSから離れるほど得られる点群の間隔が大きくなることや、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計測機器を長手方向に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る。計測間には写真-2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3個以上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複数の計測データの合成目印とする。レンガ残厚を求める際に



図-1 3Dレーザースキャナ

はレンガ表面が露出した状態で、シェル形状を求める際にはシェル内面が露出した状態でそれぞれ計測する。

2-2 点群処理

3DLSで得られる点群データは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。3D計測データ処理ソフトウェア Galaxy-Eye modeler を使用し、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する。キルンの中心軸を仮定し、これをZ軸とする円筒座標系(中心軸から各点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



写真-2 リファレンスボール

点群の座標系とする(図-2)。なお、原点はZ軸とバーナー側のキルン端面の交点である。

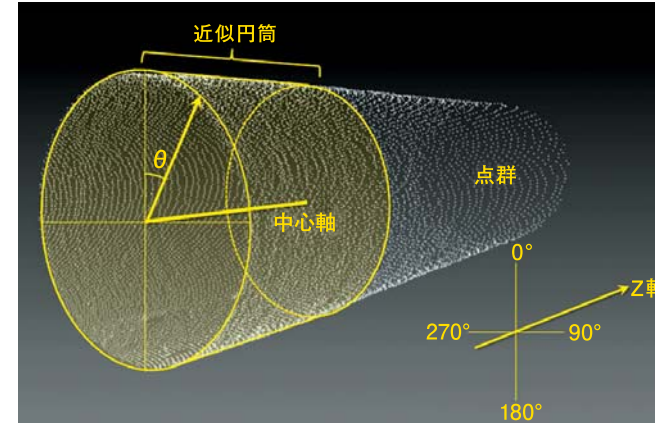


図-2 点群への座標設定

3. レンガ残厚計測への適用例

キルン定修毎に、次の定修までの運転で残厚が規定値以下に損耗するレンガを巻替える。レンガ巻替えの目安となる残厚計測は、従来、以下の手順で手作業により行っている。キルン長手方向のライン上について、一定間隔にドリルで穴を開け、測定棒を差し込み、水糸で測定棒を繋いだ後、水糸と残レンガ表面までの距離を測り残厚を算出する(図-3)。

そのためキルン頭上方向など手の届かない範囲は目視での確認にとどまる。

図-4はキルン全長のレンガ残厚を3DLSで計測して円筒状キルンを展開図として示したものである。シェルの半径(設計値のキルン半径)2.75mから、2-2節で得られた中心軸から各点までの距離rを減じ、レンガ残厚を算出した。レンガ残厚は0~300mmを8階調に色分けして表す。特に残厚が小さいのは5~25mの範囲である。この付近は焼成帯と呼ばれ、高い熱負荷のためにレンガの損耗が激しく巻替え周期も短い。また、図-5にZ軸方向の0.05m幅毎に円周方向の最小値を抜き出し、従来の計測手法による2ライン分のデータとの比較を示す。キルン0~60mにおいて、解析で得られ



図-3 従来のレンガ残厚測定

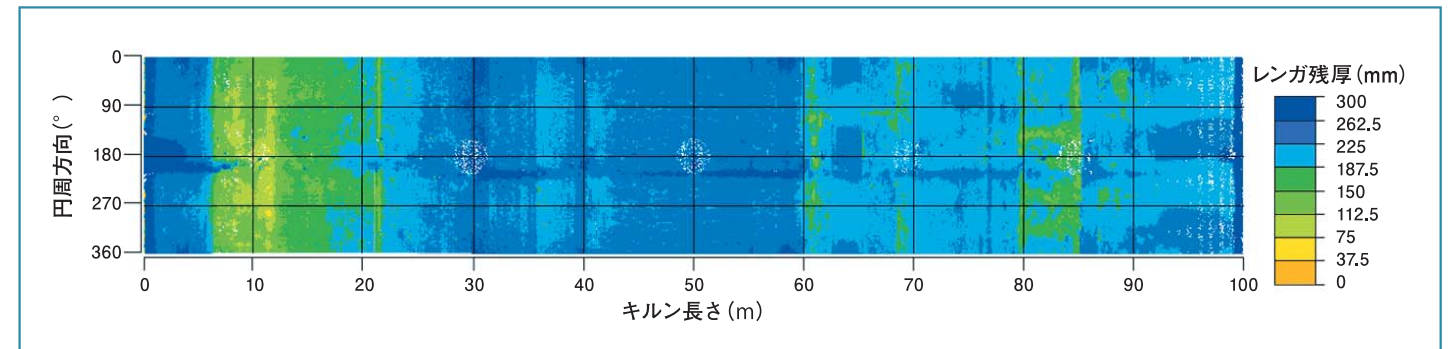


図-4 レンガ残厚

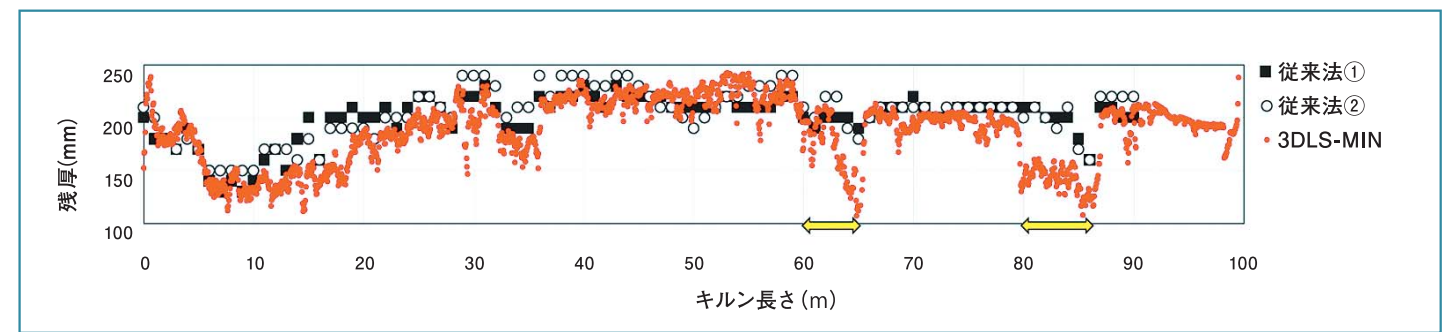


図-5 従来の方法と3DLSによるレンガ残厚比較

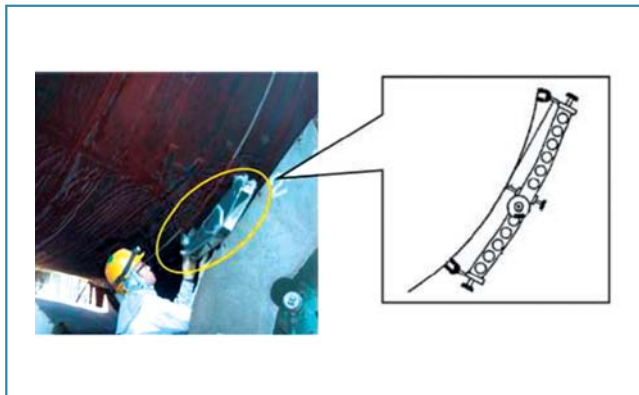


図-6 シェルテストによるオーバリティ計測

た残厚は従来の手法で計測した残厚と概ね同じか小さい値であり、円周方向の最小値を使用すれば安全側の評価が可能である。残厚値に大きな乖離が見られる60~65m、80~87m付近では、本来巻替えすべき残厚が極端に小さい箇所が従来手法では見落とされた可能性がある。

4. シェル形状計測への適用例

シェル厚が規定値以下になると剛性は低下し、シェル変形は大きくなる。定修時のシェル厚計測は超音波測定器を用いてキルン長手方向に一定間隔で実施される。そのほか、キルン運転中にはキルン長手方向に直交する断面の楕円程度を計測する。この楕円程度はオーバリティと呼ばれ、図-6に示すシェルテストによって計測する。シェルテストはシェル外側の表面に本体の脚を設置して、キルン回転中の本体とシェル表面の距離を計測し、回転に伴うシェル表面の曲率変化を変位として計測する仕組みである。オーバリティ計測はシェルテストの設置が容易な支点付近で行うのが基本である。

図-7はキルンの停止角度180°におけるシェル形状計測結果の一例である。図-7では中心軸から各点までの距離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5cm程度rが大きい。キルンは真円のように見えるが、軸に直交する断面は楕円状に変形している。図-8はキルン

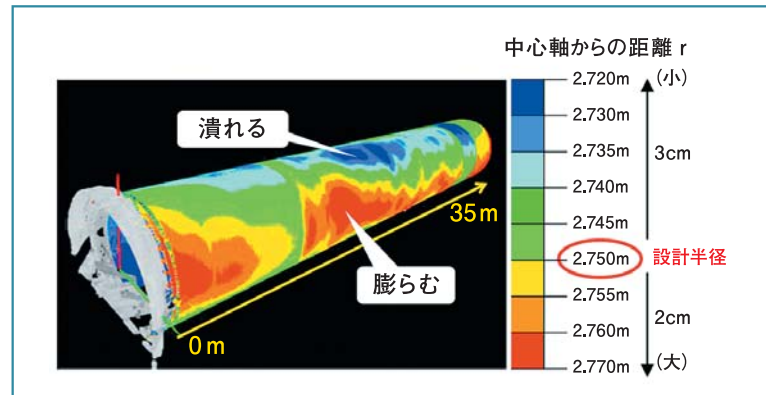


図-7 シェル形状計測結果

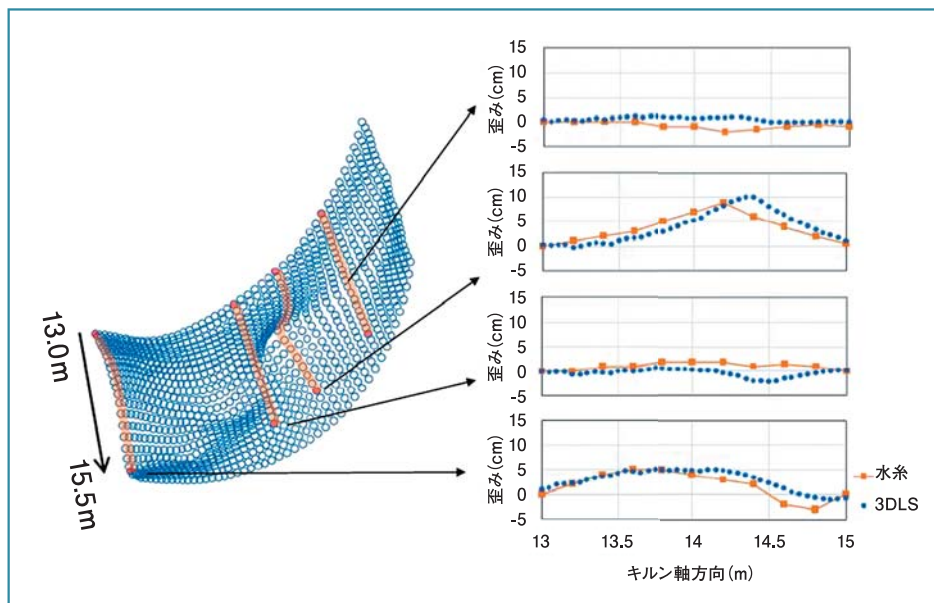


図-8 従来の計測手法と3DLSによる局所変形計測比較

13.5~15m付近でレンガ故障によりシェルが高温に晒されて生じた変形状況を表すもので、右のグラフに4ラインでの3DLSと従来手法の計測値比較を示す。従来の計測では、変形箇所を囲うように健全なシェル表面に2点基準をとり、基準点から同一高さの水糸を張り、水糸からシェル表面までの距離を測定する。図-8より、局所変形の大きさは両手法で概ね一致していることが分かる。水糸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、シェル局所変形を詳細に把握できる。これまで確認することが難しかった支点間を含む全体形状・局所変形に関する情報を短時間で精緻に得られる点が3DLSを用いるメリットである。

キルンは自重により軸に直交する断面は楕円に近い形状²⁾であり、その中に局所変形が混在する。各断面に最小

二乗法により近似した楕円を自重による変形と仮定し、断面形状と近似楕円の誤差情報を使って各キルンの局所変形を確認した。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図-9に示す。各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

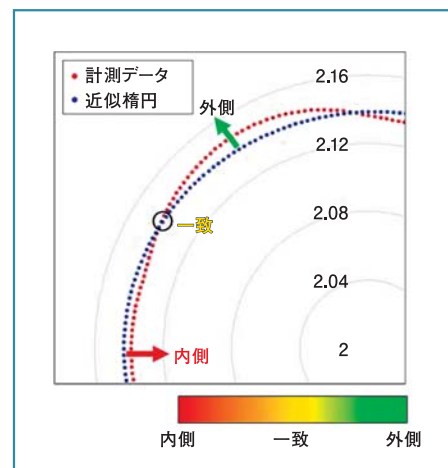


図-9 局所変形の判定

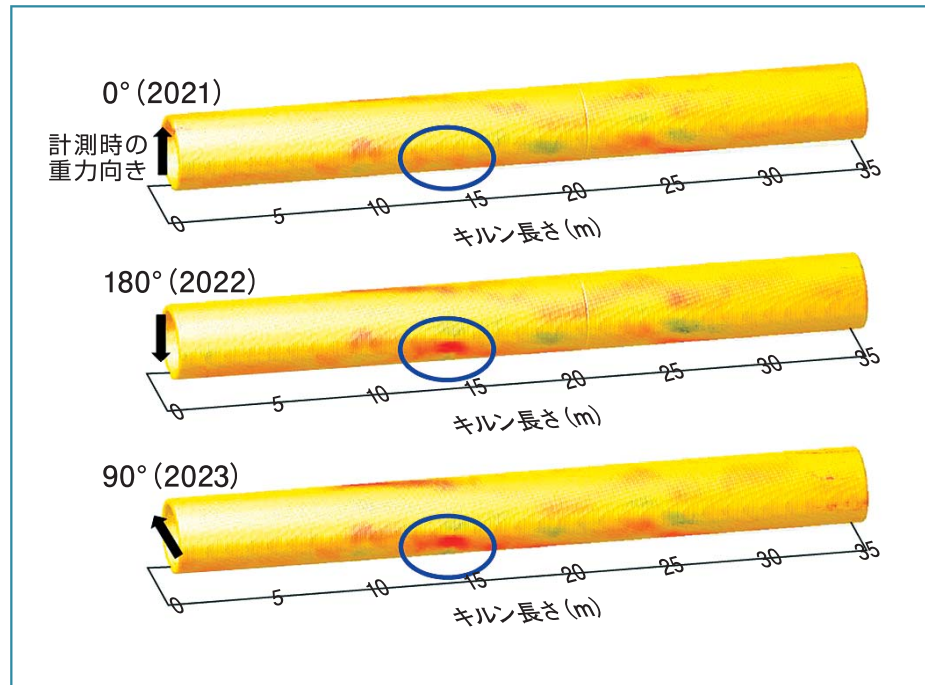


図-10 局所変形分布(キルン向き統一)

近似楕円の半径より小さい場合(計測データが内側)を赤、一致する場合を黄色、大きい場合(計測データが外側)を緑とし、キルン3Dコンタにカラーマッピングした。図-10は停止角度0°(21年計測)、180°(22年計測)、90°(23年計測)の計測データから得られた局所変形の分布を表す。キルン3Dコンタの向きを停止角度0°に統一して示す。22年と23年の結果には15m付近に局所的な赤い特徴(丸で囲む箇所)がキルン下方に見られる。これは図-8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。従来の水糸計測は故障発生時に該当箇所で行われるのみで、故障発生箇所以外の局所変形の有無は不明である。本手法であればキルン全面に対して局所変形の分布を把握できるので、不健全箇所のスクリーニングとしての活用が期待できる。

5. キルン点検手法への活用に ついて

従来の点検手法と比較して、3DLSによるキルン点検はより面的かつ詳細にデータを取得できる。これによりレンガ残厚計測においては、例えば、定修毎に巻替えを行わない焼成帯より奥(キルンへの原料入り口側)の範囲で、レンガ損耗や

脱落箇所の見落としがなくなり、レンガ故障の発生を未然に防ぐことに繋がると思われる。また、局所的なシェル形状の3次元的把握は、例えば、レンガ故障の要因となるシェル表面凹凸の研削範囲や研削深さを決める上で役立つほか、シェル更新時には切替範囲を決める参考データとなる。さらにシェル表面の凹凸やシェル厚などの詳細計測の要否判断にも使用できる。

6. おわりに

本稿ではキルン点検技術の高度化を目指し、レンガ残厚計測およびシェル形状計測について検討した事例を紹介した。3DLSを用いることでキルンの形状データを短時間で精緻に取得でき、これにより包括的なキルン健康度の把握が期待できる。レンガ故障時の計測だけでなく定期的なデータを蓄積することで、将来的にはキルン健康度の評価に使える管理指針の設定にも繋げたい。今後も膨大な情報を持つキルン形状データの効果的な活用方法について引き続き検討していきたい。

【参考文献】

- 1) 戸田雅他: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,69[10],pp.502-506(2017)
- 2) 戸田雅他: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,第73巻第8号,pp.68-71(2019)
- 3) 中村隆寛他:3次元レーザー扫描仪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(関東),pp.903-904(2020)
- 4) 山下淳子他: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,Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.85, No.3, pp.228-231(2019)

せきね・まりこ



【著者略歴】

2018年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所研究開発推進部インフラ先進技術チーム

ほし・けんた



【著者略歴】

2020年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所研究開発推進部インフラ先進技術チーム

すみよし・ゆうじろう



【著者略歴】

2022年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所研究開発推進部インフラ先進技術チーム

もり・ひろあき



【著者略歴】

1997年 日本セメント株式会社(現 太平洋セメント株式会社)入社
現在 同社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