

1. はじめに

本稿では、3次元計測装置(3D Toolbox™)を使い、配管外皮の腐食深さ、減肉容量、変形形状を3次元的に計測、評価する手法を事例に基づいて解説する。配管の残存運用圧力評価には、米国ASME B31Gに準拠しそれを修正したRSTRENG©(著作権は米国Technical Toolboxes社、PRCI: Pipeline Corrosion Supervisory Committeeで認可された唯一の評価ソフトウェア)を用いた。これはFFS(Fitness For Service)の考え方を取り入れている。計測及び評価対象となるのは、保護材などを取り外し、スケールも除去した後の配管表皮であり、配管内部や、保護材を取りつけたままの配管は対象としていない。

2. FFS (Fitness For Service) の考え方 (参考文献(1))

米国の配管敷設・運用業界では、腐食した配管が、取り外しが必要なのか、修繕が必要か、或いは減肉があっても引き続き共用可能であるかを、“B31G”基準を使って評価している。しかし、“B31G”基準は過剰品質であることが知られており、新しい評価基準が望まれていた。B31Gの適用により、配管運用業者が必要以上に配管を切除せずに済んでいたことは言をまたないが、配管を切除せずに共用を続けても、安全性を低下させなかったかもしれない事例が多数存在する。

1960年代の終わりから1970年代の初めにかけて、Texas Eastern Transmission社とA.G.A.の配管研究委員会の支援による研究を通して、腐食配管の共用評価基準が開発された。この基準はB31.4とB31.8配管設計規則として制定され、一般にB31Gと呼ばれている。配管の圧力運搬残存能力は、腐食に至る金属損失の量と配分、ならびに材料の降伏強度をもとにして計算される。もし、計算された圧力運搬残存能力が、十分な安全係数を掛けた配管の最大許容運用圧力を上回っていれば、その腐食を含む配管区画は引き続き共用されうる。この基準を適用することで、米国の配管運用業者は、安全基準を十分に保っている配管の腐食部分を必要以上に除去せずにすみ、数億円以上のコスト削減を達成している。

制定当初から、B31G基準は配管を過酷事故から防ぐための重要な安全因子を明らかにすることを意図していた。しかしこの基準の中には保守的(=過剰品質的)な考え方があまりにも多く、それらが十分な堅牢性と安全性を維持するために必要とされるレベル以上の配管区画交換や修繕作業を生んでいることを、今までの経験が示している。従って、結果としてより少ない配管区画の交換や修繕でも十分な堅牢性をもった配管を維持可能であることを評価できる修正基準が、業界として望まれていた。

本稿で言及している配管腐食評価のための修正基準は、金属損失の詳細な計測と、それに対する最小降伏圧力を予測する計算とともに利用され、かつての過剰な配管交換をもたらした過剰品質主義を低減させる傾向にある。これらの複雑な解析はPCベースのソフトウェアRSTRENG©で計算される。

3D Toolbox™は、かかる詳細な計測とその評価を実行できる、計測装置と評価ソフトウェアを備えたシステムである。

3. 3次元計測の動作原理

3次元計測装置(3D Toolbox™)の動作は、三角測量法の一つである、構造化光計測法(空間位相シフト

法)に分類される原理を採用している。計測装置は、特殊パターン光を投影するプロジェクター1基と、物体の形状に応じて歪められたパターンを撮影する高速カメラ1台、そして、それらの同期をとる仕組みから構成される。複数枚の撮影フレームを解析し、実際の3次元データを生成するのは、ホストパソコン上で走るソフトウェアである。動作原理を簡単に図1に示す。

3次元計測原理の解説は本稿の目的ではないため、詳細については、参考文献(3)、(4)、(5)を参照されたい。

4. 3D Toolbox™ の構成

図2に3D Toolbox™の構成一覧を図示する。このセットは、3Dデジタルピットゲージ、AC/DCアダプター、車シガーアダプター、システムケーブル、パソコン用電源装置、制御用パソコン、一脚(monopod)で構成され、現場への持ち運びが便利になるように、剛性の高いペリカンボックスに収納されている。また、現場で交流電源が用意できない場合に備え、これらの機器は蓄電池(DC12V~DC24V)での駆動も可能である。計測装置の駆動用ソフトウェア、および、腐食評価用ソフトウェアは、制御用パソコンに搭載され、動作確認、品質検査を経た後工場から出荷される。本装置の組み立ては現在米国ケンタッキー州の工場で行われている(2013年6月現在)。

5. 計測用 Graphical User Interface (GUI)

図3は、制御用パソコンに搭載された計測装置制御用ソフトウェアのGUIを使い、塩ビ配管の表面の一部を計測したところを示した図である。GUI上部に各動作指示用アイコン、左側に計測データのサムネール、右側の一番大きな画面が計測対象物ならびに計測された3Dデータの表示用画面である。この画面の中でマウスボタンの操作によって3D画像の拡大・縮小、回転が可能で、またプルダウンメニューから表示色の設定変更も行える。

動作指示用アイコンとして、左から、各種パラメータ設定、パターン投射開始、3D計測、3D画像貼り合わせ、腐食解析ソフトウェアの起動、保存データの読み出し、書式変更しての保存、データ削除が用意されている。

3D Toolbox™で計測できる範囲は、標準で横25cm、縦20cm、奥行き30cmであるが、この範囲を超える配管表面を計測する場合、少し重なる部分を考慮しながら、上下左右方向の計測を行い、重ね合わせアイコンを使って広い範囲の3D計測データを合成することで対応する。

6. 腐食解析ソフトウェア(PAS)

図4は、図3で示された3D計測データを、腐食解析ソフトウェア(PAS: Pipeline corrosion Analysis Software)に読み込んだところである。図5は、3次元計測された円筒表面の曲率を計算して、円筒の円周面を再現し(パソコン上では左側画面の緑色の線で表示)、その再現された表面からの差分(腐食の深さに相当)をカラーバーで右上の画面に表示したものである。左側画面の表示では、計測された円筒表面部分が、計算で再現された円筒表面に滑らかに組み込まれている様子が読み取れる。

カラーバーの下には、表示単位系の選択(インチないしミリメートル)、配管の肉厚(腐食の無い部分の肉厚)、円周面再現表示(緑色の線)の有無、z軸のオフセットを選択するボックスが並び、計算された円筒の半径が表示されている。

図 6 は、上部アイコン列の左から 4 番目のアイコンを選択し、各種パラメータ設定を行う画面を示したものである。ここで設定できるパラメータは、解析対象となる減肉の閾値(Depth Threshold: Minimum、5%、10%、20%)、格子表示の間隔 (Grid size: 無し、1mm~10mm)、解析対象となる減肉の面積 (Minimum Feature Area : 平方ミリ単位で指定)、軸方向のグルーピング閾値(Longitudinal Interaction Rule)、円周方向のグルーピング閾値(Circumferential Interaction Rule)である。これらのパラメータ設定の変更を適用(Apply)すると、それに応じて、右下画面に表示されている減肉グループの表示数が変わってくる。つまり、減肉深さの閾値やその面積が設定値よりも大きい減肉グループのみ、右下画面に表示される。Feature の番号と色分けは、右上画面で表示されている減肉グループの長方形に対応しており、Feature の番号をマウスで選択するとそれに対応した長方形が、F 番号を伴って右上に表示されるので、どの長方形がどういう数値として認識されているのか、その対応が明確となる。

図 7 は、上部アイコン列の左から 5 番目のアイコンを選択し、計測された円筒表面で最も腐食の深い(あるいは、凹みの大きい)部分の、軸方向と円周方向に沿った深さのプロファイル(断面)をグラフ化したものである。パソコンの画面では、それぞれ、青(軸方向)、緑(円周方向)で区別されるため、対応が明確である。グラフ横軸のゼロ点は、腐食の無い部分を表し、縦軸の値が正の場合、盛り上がり、負の場合、腐食を表している。

図 8 は、外部からの応力を受け、凹みを生じた金属配管の 3 次元データを読み込んだところである。図 9 は円筒表面を再現し、円筒からの差分をカラーバーで表示したもの。図 10 はパラメータ設定画面、図 11 は最大凹み部分の断面プロファイルをグラフ化したものである。図 12 は、図 11 において、“Export all features” を実行し、csv テキストデータに出力したものを、エクセルを使ってグラフ化したものである。

7. 腐食評価ソフトウェア

図 13 は別途有償で提供される RSTRENG© ソフトウェアを使った評価事例である。RSTRENG© は、“Effective Area”法、“0.85dL Area”法、そして“ASME B31G”法の 3 種類の手法を用いて、最大運用安全圧力 (Max. Safe Pressure [psig]) を算出する。その元となるデータは、図 11 から得られるプロファイル(図 12 に図示)であり、図 13 の左側のスプレッドシートに代入される。

図 13 の上部に表示されたプロファイルは、いわゆる“River Bottom”法を用いて算出されたプロファイルであり、3 次元的なプロファイルとは趣を異にする。図 15 に River Bottom 法を解説した。

赤枠の縦方向(円筒の軸方向)に見た時、最も腐食深さの深いグリッドセルを選び、その深さをその縦枠の深さとみなす。その操作を右方向(円筒の円周方向)に進めながら繰り返し、各領域の腐食体積を式の通りに計算する。

8. 3次元腐食計測システムの利便性と留意点

従来、デプスゲージを使って手作業で深さを計測していた工程の代わりに、本稿のシステムを使うことで、面単位で腐食深さを一度に把握することが可能となり、現場での作業効率が大幅に向上する。

3次元計測に当たり準備する作業は、計測対象となる配管表面の汚れ、土砂、黒鉛化腐食などを除去し、投射光の障害とならないように、直射日光を遮る覆いを設置することだけであり、レーザーを使った他の 3次元計測方法と比べると、準備作業が著しく簡略化されている。

また、3次元計測とその解析・評価ソフトウェアは堅牢型パソコンに搭載されているため、現場で残存圧力評価まで進めることができ、その場で補修や交換の判断が可能となる。

このように現場での作業効率を向上させることを主眼として設計されたシステムであるが、利用するに当たりいくつかの留意点がある。

第一に、この3次元計測システム 3D Toolbox™ は、特殊なパターン光を投射しその反射光をカメラで撮影することで3次元座標を計算するという原理上、パターン光の反射が見えない対象物や外光環境下では計測が不可能となる。具体的には、鏡面状態のため反射光がパターンとして認識できない物体、完全黒体でパターン光の反射が無い物体、直射日光など強い光が当たり、計測装置のプロジェクターから投射されたパターン光が認識できない状態、配管の周囲に水があり、光の屈折率が変わってしまう場合、スケールなどで腐食部分が覆われてしまっている場合などでは、計測が不可能となる。また、計測対象物と計測装置の間の作動距離として一定の距離が必要なため、配管と配管の距離が狭い環境では、計測できない部分が発生してしまう。

9. 最後に

本稿では、3次元計測、腐食解析、FFS向け評価ソフトウェア RSTRENG© を取り上げ、事例集を使って解説をした。米国ではすでに、現場での不必要な補修・交換作業の割合を減らす FFS (Fitness For Service) という考え方を導入し RSTRENG© を使うことで実績を上げつつあるが、FFS の採用に踏み切らずとも、現場での作業を大幅に効率化できるという観点から、本システムは有効である。

昨今、インフラの老朽化が進行し、トンネル天井の崩落や、橋脚の腐食、水道管の水漏れ、つまりなどが全国的に問題となっている。本システムは現在のところ配管外皮の計測のみを対象としているが、同じ動作原理でより広い範囲を離れた距離から計測することに応用することも可能であり、これらの分野への適用を進めることで国土保守・インフラ保守の一助となればと希望している。

<参考文献>

- (1) Technical Toolboxes 社 RSTRENG© Manual (RSTRENG© 製品に添付)
- (2) Technical Toolboxes 社ホームページ <http://www.ttoolboxes.com/products/3DToolbox/>
- (3) “Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3D shape measurement”、 Kai Liu、 Yongchang Wang、 Daniel L. Lau、 Qi Hao、 Laurence G. Hassebrook、 OSCI codes: (150.0155) Machine Vision Optics、 (Dr. Liu、 Dr. Lau とともに SEIKOWAVE INC.)
- (4) 「プロジェクタ・カメラシステムのレスポンス関数を用いた位相シフト法によるアクティブ・ステレオの精度向上」、戸塚聡、古川亮、川崎洋、埼玉大学工学部、広島市立大学情報工学部 『画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2009)』 2009年7月号、他
- (5) 「最新光三次元計測」吉澤徹編著、朝倉書店