

(タイトル)

シェブロン社からの声かけで始まった光3次元計測装置の誕生秘話

(英文タイトル)

Birth story of optical three-dimensional measuring device derived by a voice from Chevron

(サブタイトル)

現場の要請で進化し続ける光3次元計測装置

株式会社セイコーウェーブ

新村稔

1. はじめに

米国で原油や製油を運ぶパイプラインが敷設されるようになったのは、今から90年以上も昔のこと^①。自動車ブームに伴う生産数量の爆発的飛躍や第二次世界大戦にからむ軍需物資などの大需要を賄うためパイプラインが増設され、いまや毛細血管のように全米を網羅し、50万マイル以上にも成長した。しかし、人間と同じく、歳を経れば老朽化する。50年以上経過し、腐食にまみれているかもしれないパイプラインは全米で半数にも達し、配管からの油・ガス漏洩に起因する火災や爆発事故が幾たびも起きた。2012年カリフォルニア州リッチモンド市にあるシェブロン社の製油所が火災を起こし、市全体に甚大な被害をもたらした^②のは、ほんの一例にすぎない。事故を防ぐには古くなったパイプラインや配管をすべて交換するのが安全上最も確かなことだが、コスト的にも納期的にとてでもないが対応しきれない。

1990年代から全米で、**修理が間に合わない!**という悲鳴がより多く上がるようになった。

アメリカ石油学会 (API: American Petroleum Institute) やアメリカ機械学会 (ASME: American Society of Mechanical Engineers) は危機感を募らせ、どうすれば修理の効率を上げ、事故を防ぐことができるかを業界上げて真剣に討議を重ねた。その成果として FFS (Fitness For Service: 供用適性) 評価という考え方を確立し、API 規格

(API-579, ASME FFS-1 等) が制定され、現場での実施が強力に押し進められた。具体的には、設計肉厚を割り込んでいる箇所があっても、管壁の残存強度が一定の水準で保たれていればその部位の修理は後回しにして、残存強度が足りない部位を集中的に補修しようという方針を、データに基づいて実行することが可能となったのだ。

FFS 評価規格に基づいて安全性を評価するためには、配管の表面に格子を書き込み、そのひとつひとつで減肉数値を計測しなければならない。格子寸法は最大でも配管肉厚の2倍とされているため、たとえば設計肉厚5ミリの配管では、10ミリ以下の格子寸法で計測しなければならない。もし、減肉領域が200ミリ x 100ミリであったとすると、200 x 100のグリッド、つまり200箇所での計測が必要となる。従来手法、たとえば、デプスゲージでは1箇所の計測に10秒程度、200箇所では、2,000秒もかかってしまうことになる。

減肉1箇所の計測でこんなに手間がかかっては**FFS 評価は現場では使えない!**という声が大きかった。

2010年に創業し、光3次元計測装置の市場開拓に乗り出したばかりの当社に、漏洩に起因する大事故を起こして頭を痛めていた米国シェブロン社から声がかかった。「**FFS 評価のための計測で現場が困っている。面単位で一気に計測できる装置を作**

ってくれないか」。この時、配管減肉計測用光3次元計測装置の目標仕様が誕生した。

2. 3DTOOLBOX™ LCG の誕生

米国シェブロン社からの要請を受けて開発した最初の光3次元計測装置 3DTOOLBOX™ LCG の仕様は表1、外観は図1の通りである。

項目	仕様
計測方式	構造化光・位相シフト法 (能動的三角測量法) 採用
光源	LED (赤色光)
対物距離	350mm ~ 550mm
計測範囲	300mm x 150mm
平面分解能	0.4mm x 0.4mm
深さ分解能	0.5mm (1σ)
計測所要時間	0.3 秒
耐環境性	防塵、防水、耐落下

表1. 3DTOOLBOX™ LCG 第一世代機仕様

これにより、保全現場で、面単位で一気に腐食減肉深さを計測できるようになった。だが、深さ分解能が0.5mmでは誤差が大きすぎた。誤差をもっと小さくしないと、せっかくのFFS評価規格が役に立たない。必要以上に修理のための安全裕度を高めなければならないからだ。当社の開発陣は燃えた。

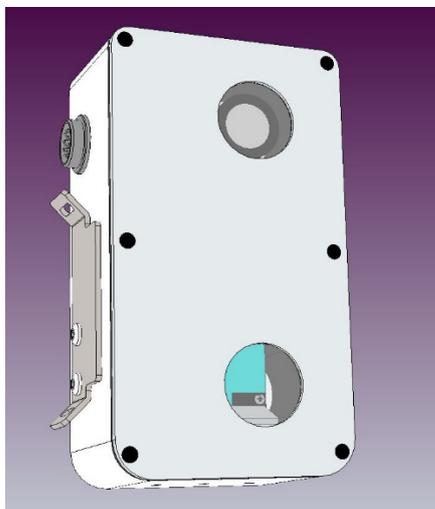


図1. 3DTOOLBOX™ LCG 外観

「絶対に市場要求に合う製品をつくる！」

投影するパターンを何種類も開発し、キャリブレーション方式を幾通りも編み出し、1年以上かけてついに深さ分解能(繰り返し誤差1σ)0.1mmを実現した。2013年の年明けだった。

ここでようやく日本市場の厳しい要求にも応えられる仕様の製品(3DTOOLBOX™ LCG 第二世代機)(外観は図1と同じ)が完成し、日本市場への投入が始まった。しかし、供用適性評価の認知度の低い日本市場では、面単位で精密に計測可能な装置の必要性はほぼ皆無だった。

市場投入からわずか半年で、米国では数十台以上の製品がパイプライン保全分野に受け入れられた。カリフォルニア州の電力・ガス供給会社であるPG&E社の配管保全部門にも採用され、現場での適用が始まった^③。その一方、日本では遅延として導入が進まなかった。そこに救世主が現れた。

3. FFS 評価規格と 3DTOOLBOX™ の普及

それまで10年間、日本石油連盟の技術顧問をしていた田原博士だった。田原博士と最初にお会いしたのは、2013年6月大分で開催された日本溶接協会の機械化学溶接委員会の場合だった。日本石油連盟との契約が2013年6月で満了し、次の契約先を探している最中とのことだった。幸いなことに、創業して間もない当社に、技術顧問として力を貸していただけることになった。田原博士のそれまでの実績と人脈で、3DTOOLBOX™ LCG の売り上げが始まったのだ。田原博士を中心として、米国の供用適性評価規格を勉強するグループ「石油・石化協 FFS 評価技術委員会」の活動が1999年から2012年まで13年間継続され、石油・石化協各社の若手エンジニアの間に FFS 評価技術の必要性が浸透していった。3DTOOLBOX™ LCG の最初のユーザーは彼らの所属する企業や機関だった。この装置の使い方が簡便だったこともあり、彼らには比較的容易に浸透していった。写真1は表面に腐食減肉を伴った配管の表面形状を3次元計測している時の写真である。

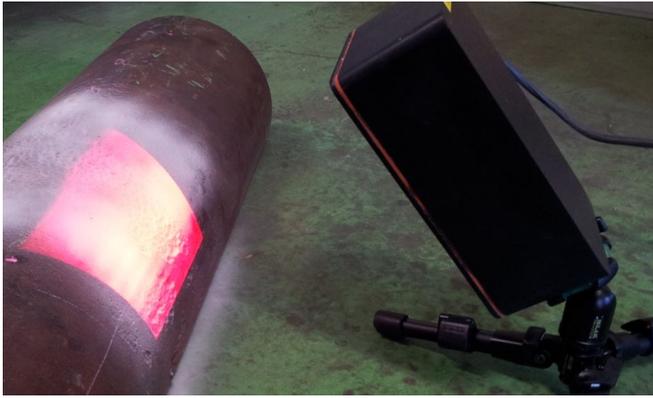


写真 1. 配管腐食計測

4. 狭隘部向け機種 LCG-02 の追加

日本では米国のようなパイプラインは普及していないため、石油精製や石油化学製品の生産プラント設備保全分野で最初に使われた。だが、これらの現場は配管が多数走り、込み入っている。配管と配管の間の隙間があまりない。3次元計測するためには対物距離を最低でも35cm離さないといけないが、その距離を確保することが難しい。

そこで、対物距離が160mm~240mmの仕様を持った製品 3DTOOLBOX™ LCG-02 がラインアップされた。この製品は従来製品より対象物との距離を接近させて測定できるように設計されたため、計測範囲が狭くなった。三角測量における三角形が小さくなったからである。従来製品は300mm x 150mm だったが、LCG-02 の仕様は130mm x 80mm である。一方、計測範囲が狭くなったおかげで、計測の分解能が向上した。同じ画素数のカメラを採用しているため、計測範囲が狭い方が、画素間隔が狭くなるためである。従来0.4mm x 0.4mm だった平面分解能が、0.2mm x 0.2mm になったのだ。そのため、抜管後半割された1インチ配管の内部の減肉状態も効率よくデータ化することが可能となることがわかり、石油化学生産プラントでの採用が進んだ。

5. 次々と湧き起こる課題

しかし、ここでまた新たな課題が持ち上がった。3DTOOLBOX™ LCG/LCG-02 は、計測（データ取得）所要時間が0.3秒である。つまり、0.3

秒の間計測装置を静止させておかないとデータが取れない。そのため、現場でも三脚、ないし一脚を使い、計測装置が揺れないように配慮しなければならなかった。

「現場では三脚を立てるスペースがない！」
更なる課題が開発陣を襲った。

6. 手持ち型計測機 3DSL-Rhino の開発

開発陣は約1年半の試行錯誤の後、手持ちでも画像がぶれにくい性能を仕込んだ機種 3DSL-Rhino（ライノ）の完成にこぎつけた。最大の難関は、手ぶれの影響を小さくするために、カメラの撮影速度（フレームレート）を上げる必要があったが、速度向上に伴い増大する発熱量をどう解決できるか、にあった。発熱量は消費電流の2乗に比例して増大するため、従来機種のように、金属筐体に放熱するだけでは不十分であった。また、市場からは軽量化も求められていたため、プラスチックケースに入れたい、という思惑もあった。開発陣は、図2のような放熱機構を開発した。具体的には、発熱部からヒートパイプで熱を外部の放熱フィンに効率的に伝え、放熱フィンを強制空冷で冷やす方式を採った。更に、内部と放熱フィン部を完全に分離し、IP67 準拠の防水性と防塵性も達成した。

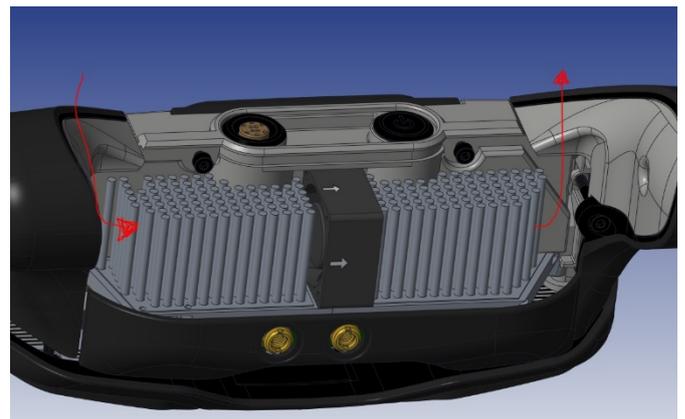


図2 放熱フィン

その結果、従来の LCG と比較し、計測範囲をほぼ同等に保ちつつ、データ取得時間を0.3秒から0.08秒に短縮できた。また、計測のトリガーを切る機能（トリガーボタン）を、計測装置の握り手（右側）に設置し、操作性を向上させた。

図3は3DSL-Rhinoの外観図である。向かって右側の窓から、LEDで生成された構造化光パターンが投射され、向かって左側の窓には、そのパターンを撮影する高速カメラが配置されている。



図3. 3DSL-Rhino 外観図

写真2と写真3は3DSL-Rhinoを手持ちしながら対象物の表面を計測している場面を示したものである。



写真2. 手持ち計測

写真2は、直径約40cmのパイプライン表面に発生した腐食（局部減肉）を手持ちで測定している場面。写真3は、地震による落石によって凹んでしまった原油用パイプラインの底部を測定している場面である。



写真3. 配管底部の計測

3DSL-RhinoもLCGと同様に供用適性評価ソフトウェアと連動しており、計測した3次元座標から、軸方向、周方向のCTP(Critical Thickness Profile)を求め、API-579 / ASME FFS-1 ないし、ASME B31.G規格に基づいた評価を行うことができる。

このように、現場からの喫緊の要請に基づき、「現場で使える」ICT技術を活用した最新の計測装置を市場投入することができた。

6. 絶えない市場要求

現場からは続々と要望が上がってくる。腐食は配管や圧力容器だけに発生するわけではない。鉄橋など他の鋼構造物でも発生する。

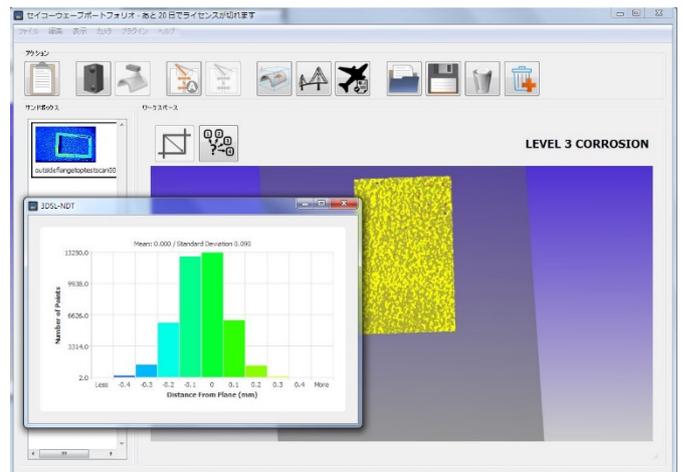


図4. 耐候性鋼橋腐食の画像による診断

3年前(2016年)、国土強靱化を図る国土交通省の近畿地方整備局によって、耐候性鋼橋腐食の画像による診断プロジェクトが企画され⁴、約2年

半の活動を経て図4に示すアプリソフトウェアが開発された*5。この評価用ソフトウェアは、3DSL-Rhino の計測専用ソフトウェア SEIKOWAVE Portfolio に組み込まれ、腐食面の3次元計測とその数値解析（計測面全体の凸凹の標準偏差）に基づく腐食評点評価が滞りなく現場にて遂行することを可能にした。

7. 防爆対応

この計測装置を石油・石化産業へ紹介した当初から、現場からのもっとも強い要望は、装置の防爆対応であった。防爆機器でないと、引火性ガスが発生する可能性のある設備の運転を停止させないと利用できないからである。

防爆を実現するためには、(1) 耐圧防爆筐体設計しその中に計測装置を内蔵するか、(2) 安全な空気を外部から供給し、外部の引火性ガスが筐体内部に侵入しないように内圧防爆機構とするか、(3) 消費電力を下げて、本質安全防爆機構とするか、いずれかの方式を採らなければならない。しかし、消費電力の大きさから(3)の本質安全防爆は最初から不可能であり、また、(1)(2)の機構も、ポータブル性(可搬性)が犠牲になるため、採用はできなかった。

この難題を解決するための機構を、(株)セイコーウェーブで鋭意開発中である。計測装置本体は変更せず、電源供給の仕組みのみを変更し、ゾーン2において利用可能となる仕組みである。この考え方は、ユーザーのための工場防爆設備ガイド*6を策定した労働安全衛生総合研究所の担当職員や消防庁消防研究センターの責任者とも確認済みであり、早急に実現し、年内にもご紹介できる見込みである。

8. さいごに

腐食減肉を伴った配管や圧力容器の余寿命評価は、「スーパー認定事業所」*7を申請する際にも重要な要素となる。また、橋梁などの社会インフラの経年劣化を具体的・数値的に把握することも社会的な意義が大きい。当社はこれらの事業に貢献できるシステムをこれからも鋭意開発し、設備管理、社会

基盤保守のお役に立てることを願っている。

<考資料>

*1: API ウェブサイト、"Pipeline 101";

<https://pipeline101.org/The-History-of-Pipelines/1900-1950>

*2: Chevron Richmond Refinery Fire、YouTube

<https://www.youtube.com/watch?v=mweAiu7OtGc>

*3: PG&E ウェブサイト、

https://www.pge.com/en_US/safety/gas-safety/safety-initiatives/pipeline-inspection.page

*4: 国土交通省近畿地方整備局、「海岸近接部において耐候性鋼材(無塗装仕様)を使用する橋梁の環境計測技術に関する研究」, H28,

https://www.kkr.mlit.go.jp/road/shintoshikenkyukai/2018shiryo/20180627_04.pdf

*5: (株)セイコーウェーブ、耐候性鋼橋の腐食の評価用ソフトウェア

<https://seikowave.jp/Doc/toukou-niimura.pdf>

*6: 労働安全衛生総合研究所、「ユーザーのための工場防爆設備ガイド」

https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/doc/tr/TR_No44.pdf

*7: 経済産業省ホームページ

https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/sp-nintei/

<筆者紹介>

現在、(株)セイコーウェーブ副社長、米国 SEIKOWAVE INC. 副社長兼取締役。1960 年生まれ。1982 年 3 月東北大学工学部電気電子通信系卒業。同年 4 月信州精器(後、セイコーエプソン)就職。日米にて米国向けパソコンの設計や携帯電話向け画像処理半導体の企画・設計・マーケティング担当を歴任。2007 年退職。2010 年(株)セイコーウェーブを創業し、現在に至る。