

令和元年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「ホモグラフィ変換1ピッチ格子位相解析法を用いたインフラ劣化診断用全面ひずみ計測装置の研究開発」

研究開発成果等報告書

令和2年5月

担当局 近畿経済産業局

補助事業者 和歌山県中小企業団体中央会

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2	研究体制	5
1-3	当該研究開発の連絡窓口	5
1-4	成果概要	6

第2章 本論

(1)	本プロジェクトの基盤技術（HOPPA法）の概要	7
(2)	研究開発の概要	
【1-1-1】	HOPPA法による変位分布・ひずみ分布計測技術の確立	10
【1-1-2】	HOPPA法によるひび割れ開口量計測技術の確立	12
【1-2】	HOPPA法によるホモグラフィ変換技術の確立	13
【1-3】	HOPPA法による3次元変位分布計測技術の確立	14
【2-1】	対象物に応じた最適格子シートの開発	16
【2-2】	格子シートの耐久試験	16
【2-3】	格子シートの固着試験	17
【3-1】	ドローンを用いた実証実験	17

最終章 全体総括

複数年の研究開発成果	19
研究開発後の課題	19
新たな事業展開・その他の波及効果	20

第1章 研究開発の概要

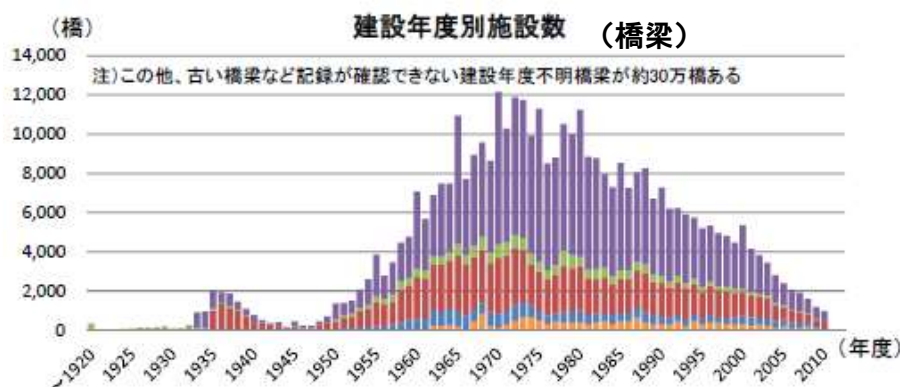
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1. 研究開発の概要

(1) 研究開発の背景

日本社会のインフラの多くは高度成長期以降に整備されており、今後20年で建設後50年以上を経過するインフラの割合が加速度的に上昇と考えられているため、近々インフラの更新費用がまかなえなくなると言われている。インフラ構造物の劣化問題は笹子トンネルの天井床板の崩壊後、多くの人員と予算が投じられ、インフラ構造物の劣化診断技術開発が急務となっている。インフラ構造物の中でも特に、橋梁およびトンネルの検査に強いニーズがある。弊社では、大手道路メンテナンス会社A、大手鉄道会社Bおよび大手電力会社Cから定量的な劣化診断を行うためのひずみ計測ニーズを受けており、その他の大手企業も潜在ニーズは強いと思われる。

現在ではひび・き裂の発見は作業員の目視および打音検査により行われているのが現状である。日本政府は人員不足・予算の不足を補うため、人手で行われているインフラ維持管理について、今後はドローンやロボットを活用する計画を発表しており、インフラの維持管理業界ではドローンやロボットから得られるデータから点検・モニタリング・診断をする技術が求められている。



高所の打音検査は足場が必要



(2) 研究目標

(十二) 測定計測に係る技術に関する事項

1 測定計測に係る技術において達成すべき高度化目標

(4) 川下分野特有の事項

3) その他の川下分野に関する事項

a. インフラ産業分野に関する事項

ア. 非破壊検査技術の向上及び従事する者の技術水準の確保・向上

○従来技術（画像相関法）と新技術（HOPPA法）との比較

従来の画像ひずみ計測法 画像相関法		本開発の画像ひずみ計測法 HOPPA 法（ホモグラフィ変換1ピッチ格子位相解析法）
ー計測方法ー 1. 計測対象物にランダムパターンを描画 2. 変形前の測定物を撮影 3. 変形後の測定物を撮影 4. 変形前後の画像データからひずみ計測 ーデメリットー × 固定撮影した画像データが必要 × リアルタイム解析は困難 × 広範囲を平均的に計測 × ランダムパターンの写真だけでは縮尺がわからない × ランダムパターンの汚れが測定誤差となる	➡	ー計測方法ー 1. 計測対象物に格子パターンを固着 2. 変形前の測定物を撮影 3. 変形後の測定物を撮影 4. 画像データを射影変換で補正 5. 変形前後の画像データからひずみ計測 ーメリットー ○ 移動撮影データが使用可能 ○ リアルタイム解析が可能 ○ 広範囲を高精度に計測 ○ 格子パターンの写真だけで縮尺がわかり正確な変位を計測可能 ○ 汚れも格子パターンが分かれば問題なし

○研究開発の主たる目標

【1】HOPPA法解析技術の確立

変位分布計測の精度が格子ピッチの1／500以上
 ※4mmピッチの格子から繰り返し精度の標準偏差 0.875μm を達成する精度

【2】広範囲計測用格子シートの開発

6年以上に相当する促進耐候性試験後で解析可能変化
 6年以上に相当する促進耐候性試験後で固着状態維持
 ※インフラの点検サイクルである5年を上回る耐性

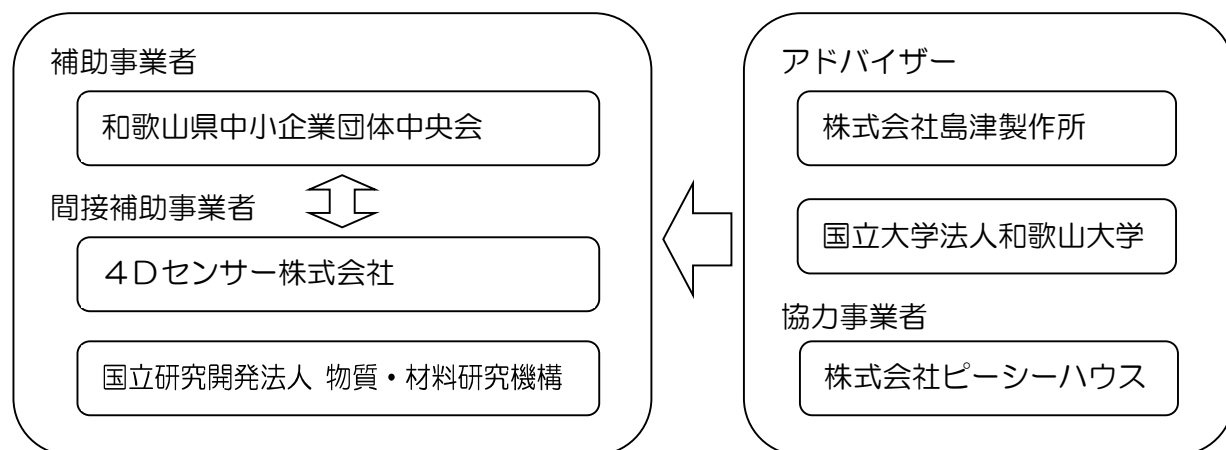
【3】ドローンを用いた実証実験

実際の現場を想定した環境下でひずみ計測成功

○研究開発の成果

- 【1】HOPPA法解析により4mmピッチの格子から50μmのひずみ計測を達成
- 【2】6年以上に相当する促進耐候性試験後で解析・固着可能なシート開発を達成
- 【3】高さ10メートル、対象までの距離0.5m、風速1.5mの環境下でひずみ計測を達成

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）



○研究者氏名

氏 名	総括	担当テーマ
森 本 吉 春		【1】・【2】
桵 谷 明 大	P L	【1】・【3】
植 木 将 貴		【1】・【3】
岸 本 哲	S L	【1】・【2】

1-3 当該研究開発の連絡窓口

プロジェクト全体に関する内容

和歌山県中小企業団体中央会

担 当：連携支援支部 連携支援課 平中 克治

TEL：073-431-0852

FAX：073-431-4108

E-mail：hiranaka@chuokai-wakayama.or.jp

プロジェクトの技術に関する内容

4Dセンサー株式会社

担 当：代表取締役社長 桵谷 明大

TEL：073-454-1004

FAX：073-494-6004

E-mail：info@4d-sensor.com

1-4 成果概要

【1-1-1】HOPPA法による変位分布・ひずみ分布計測技術の確立

目標値：変位分布計測の精度が格子ピッチの $1/500$ 以上

達成状況：変位分布・ひずみ分布計測についてHOPPA法が正しく組み込まれ、変位分布計測の精度が4mmピッチの格子で $1/500$ 以上であることを確認した。

【1-1-2】HOPPA法によるひび割れ開口量計測技術の確立

目標値：ひび割れ開口量計測の分解能 $50\mu\text{m}$ 以上

達成状況：開口量を求めるアルゴリズムが正しく組み込まれ、ひび割れ開口量計測評価実験において分解能 $50\mu\text{m}$ 以上の分解能を確認した。

【1-2】HOPPA法によるホモグラフィ変換技術の確立

目標値：A3領域以上の計測

達成状況：画像をホモグラフィ変換するソフトウェアを開発し、実際に斜めから撮影した格子を正面から撮影したように変換するテストを行った結果、OPPA法とホモグラフィ変換技術を組み合わせA3領域のひずみ計測に成功した。

【1-3】HOPPA法による3次元変位分布計測技術の確立

目標値：解析性能が距離比 $1/100$

達成状況：光学系の設計を行い、3次元変位分布計測装置を開発、3次元変位分布計測実験を行った結果、Z方向精度が距離比 $1/100$ であることを確認した。

【2-1】対象物に応じた最適格子シートの開発

目標値：コンクリート用、鉄用それぞれ2種類以上開発すること。

達成状況： 0.5mm ピッチと 1.0mm ピッチの格子フィルム、 2.0mm ピッチの格子テープを開発し、耐久試験・固着試験を実施した。

【2-2】格子シートの耐久試験

目標値：20ヶ月の暴露試験後で解析可能変化/6年以上に相当する促進耐候性試験後で解析可能変化

達成状況：25ヶ月の暴露試験・6年以上に相当する促進耐候性試験後で解析可能な格子シートを確認出来た。

【2-3】格子シートの固着試験

目標値：20ヶ月の暴露試験後で固着状態維持/6年以上に相当する促進耐候性試験後で固着状態維持

達成状況：25ヶ月の暴露試験・6年以上に相当する促進耐候性試験後で固着状態維持可能な格子シートを確認出来た。

【3-1】ドローンを用いた実証実験

目標値：10m以上、対象までの距離2m以内、風速3m以下の環境下で実験成功

達成状況：高さ10m、対象までの距離0.5m、風速1.5mの環境下でドローンを用いた撮影実験を実施し、撮影した画像の位相解析に成功した。

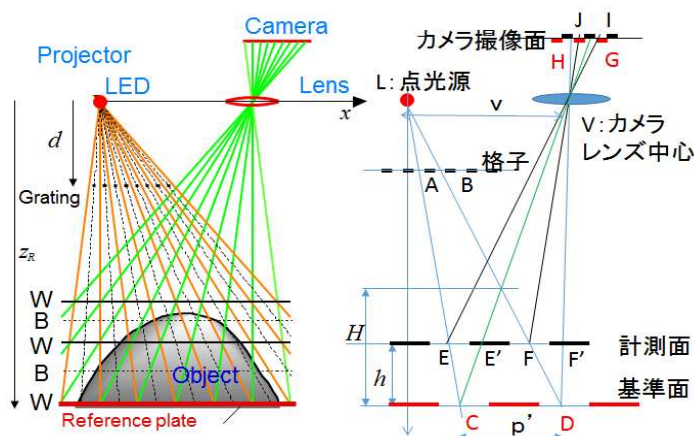
第2章 本論

（1）本プロジェクトの基盤技術（HOPPA法）の概要

一般的なサンプリングモアレ法による解析技術は、1枚の画像から間引きと補間により複数枚の位相シフトしたモアレ縞画像を生成し、位相シフト法により位相解析を行うため、メモリを多く使用するなど効率が悪くリアルタイム計測には向かない。今回のひずみ計測では、当社が開発した高速高精度な位相解析法であるOPPA法をベースに格子解析による変位分布・ひずみ分布計測技術を確立する。また、同時に主ひずみ方向および主ひずみを解析表示する技術を開発する。

－OPPA法の原理－

OPPA法は、高速・高精度に形状を計測するための技術である。下図に示すように、格子投影法の一つであるモアレトポグラフィの光学系（カメラレンズ面、カメラ撮像面は格子面に平行、すなわちカメラ光軸は格子面に垂直）において、物体上に投影された格子の画像は、物体の高さに関係なく、カメラ内の撮像面では一定の長さとなり、高さにより格子の位相だけが異なる。撮影した格子1ピッチの輝度データより位相を解析することにより、すべての画素の位相を解析する方法である。



OPPA法の特徴

- ①格子投影法により非接触で高速
- ②格子の位相解析により高精度
- ③動く物体の計測が高速で可能
- ④高速度カメラの使用で更に高速化

基準面からの高さ h と基準面からの位相差 θ_M の関係は、式（1）に示される関係があり、格子に平行な面の x, y 座標には関係しない。ここで、 p は基準面での格子の影の格子のピッチ、 z_R は光源から基準面までの距離、 v は光源とカメラレンズ中心の距離である。

$$(1) \quad h = \frac{p' \Theta_M z_R}{p' \Theta_M + 2\pi v}$$

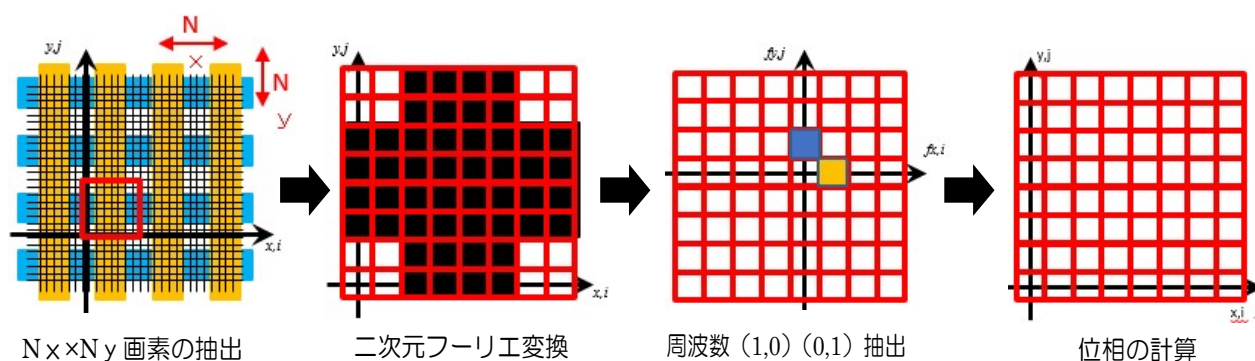
この式において、位相差 Θ_M が 2π となるときの高さ H が計測可能範囲ダイナミックレンジを示し、式 (2) で表される。

$$(2) \quad H = \frac{p' z_R}{p' + v}$$

ーHOPPA法によるひずみ解析の原理ー

HOPPA法は、格子の位相分布を求めるため、OPPA法の原理を利用して変形前の格子の位相と変形後の格子の位相の差から変形量を求めることが可能となる。正面から撮影した格子画像を用いて、高速高精度な位相解析法であるOPPA法をベースにしたひずみ分布解析に特化した変位分布・ひずみ解析プログラムであるHOPPA法を開発する。形状計測では1次元格子の位相解析を行ったが、ひずみ計測では2次元格子の解析を行なうため、2次元格子解析のアルゴリズムを確立する。

- ① 画像から1ピッチの面積を切り出す
- ② 2次元フーリエ変換し、取り出したスペクトルの位相を求め、画像の中心の座標の位相とする
- ③ 周波数 (1, 0) について求めたものはx方向の位相となる
- ④ 周波数 (0, 1) について求めたものはy方向の位相となる
- ⑤ 位相分布を変位分布に変換、これにより全面でのx方向変位分布とy方向変位分布が得られる



本解析方法は、前記光学系によって1ピッチの画素数が固定される点に特徴があり、上図では、1ピッチの画素数が8画素に固定されている。

ーHOPPA法によるホモグラフィ変換技術ー

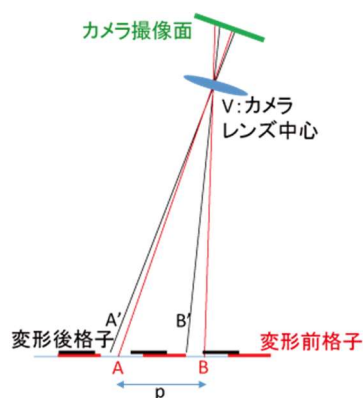
OPPA法では、格子を垂直方向から撮影した画像を用いて解析するが、ドローンやロボットから撮影された画像データからの解析を可能にするため、斜めから撮影された台形状の格子データを射影変換により長方形に補正する技術を確立する。

斜めから撮影された台形状の格子データをホモグラフィ変換により座標変換することで、

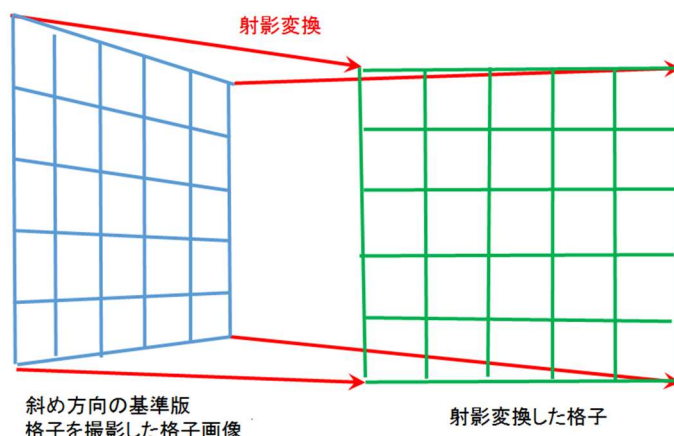
垂直方向から撮影した画像と同じになる格子データを作り出し、変位分布・ひずみ分布計測のデータに使用し解析する。

カメラが移動した場合は、対象格子が撮影された同一画像内に基準となる格子が写るようにすることで解析が可能で、射影変換は光学系によって1ピッチの画素数が固定されていることを利用して行う。

—HOPPA法による射影変換の原理—



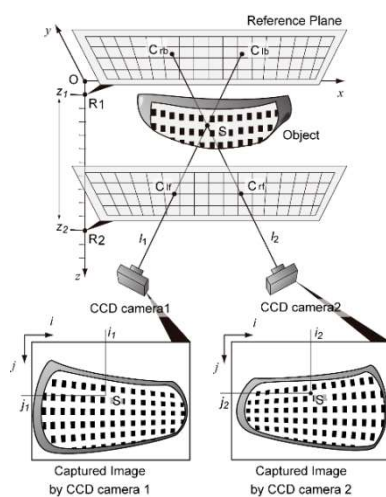
斜めから格子を撮影した図



斜めから格子データを射影変換

—HOPPA法による3次元変位分布計測技術—

複数カメラから格子を撮影して3次元変位分布の解析を行う技術確立する。3次元物体の表面の強度評価では、数百枚のひずみゲージからひずみ分布を計測している。しかし、ひずみゲージは1方向の変位計測であるため最大ひずみを計測できていない恐れがある。2台のカメラを用いて3次元物体の表面の格子を撮影し、そのデータを基に全面の変位分布やひずみ分布を一度に解析する技術確立する。



3次元計測のイメージ図

- ① カメラで2枚の基準平板上の2次元格子を撮影して、各画素の x, y 座標を位相解析により精度よく求めて各画素がどの方向を見ているか（視線の方向）を求めておく。
- ② 変形前の物体上の2次元格子を撮影して、各画素の位相を求めておく。左右のカメラの同じ位相をもつ点が同一場所となる。その場所を見ている画素の視線の交点より3次元 x, y, z 座標を求める。
- ③ 変形後の物体上の2次元格子を撮影して、各点の3次元 x, y, z 座標を求め、各点の変形前後の3次元座標から移動量（3次元変位）を求める。

基準平板の表面には、二次元の格子描いておき、 x y 方向の位相解析によって、精度よく各画素が撮影する点の x y 座標を求める。基準面を用いてキャリブレーションを行う際に、計測視野を含む基準平板を準備する必要がある。すなわち、広い領域をキャリブレーションするには、その領域分の大きさの基準平板が必要となる。広い領域の基準平板を製造・保管するには、コストがかかるため、外挿によるキャリブレーション手法を開発する。すなわち、比較的狭い領域の基準平板を2台のカメラの前に配置し、外挿により、 z 方向に基準平板が動いたと仮定して、キャリブレーションを行う。この手法を用いることで、24インチの液晶モニタを用いても、100インチ液晶モニタ相当のキャリブレーションが可能になる。

（２）研究開発の概要

【１－１－１】HOPPA法による変位分布・ひずみ分布計測技術の確立

研究内容

HOPPA法による変位分布・ひずみ分布計測技術を確立させること。

目標値：変位分布計測の精度が格子ピッチの $1/500$ 以上であること。

研究成果

図1のような構成でレーザー変位計とOPPA法の精度比較検証を行った。

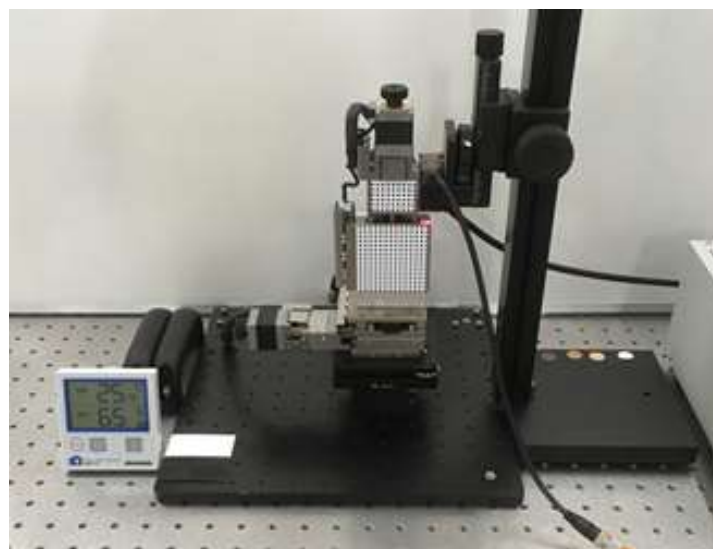


図 1 精度比較実験較正

以下の表は原点位置を10,000回計測した際のレーザー変位計の結果と、格子上の中央1画素を10,000回計測した際のOPPA法の結果である。レーザー変位計と同等以上の繰り返し精度があり、格子ピッチ4.064mmに対して、標準偏差が $0.875\mu\text{m}$ なので、変位分布計測の精度が格子ピッチの $1/500$ 以上という目標値を達成した。

レーザー変位計

最大値(μm)	最小値(μm)	平均値(μm)	標準偏差(μm)
3.500	-4.500	0.000	1.078

OPPA 法

最大値(μm)	最小値(μm)	平均値(μm)	標準偏差(μm)
3.136	-3.984	0.000	0.875

表面に1.016mmピッチのゴム格子を貼りつけ、裏面にはひずみゲージを貼りつけた JIS5号試験片を用いて引張試験を行った結果（図2・図3）、良好な変位・ひずみ分布の解析結果（図4・図5）が得られた。さらに、ひずみゲージとOPPA法での2点間ひずみを比較すると、同等な値が求められていることが証明された。また、ひずみゲージでは計測できない大きなひずみも、OPPA法では解析できることが確認できた（図6）。



図2 JIS5 号試験片

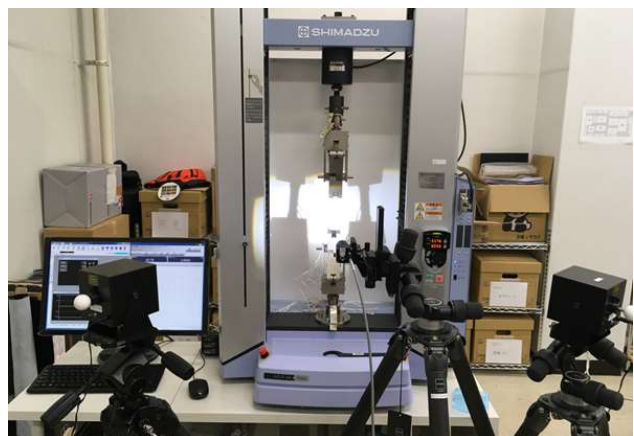


図3 引張試験風景

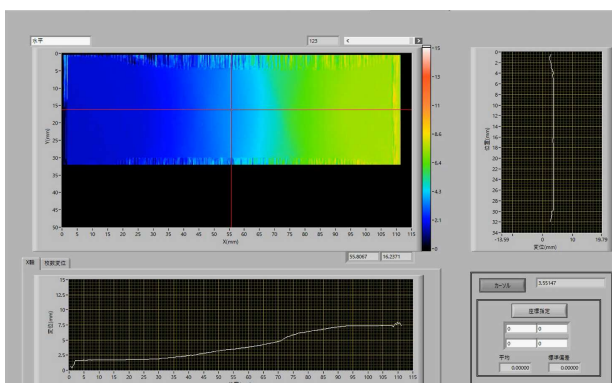


図4 変位分布画像

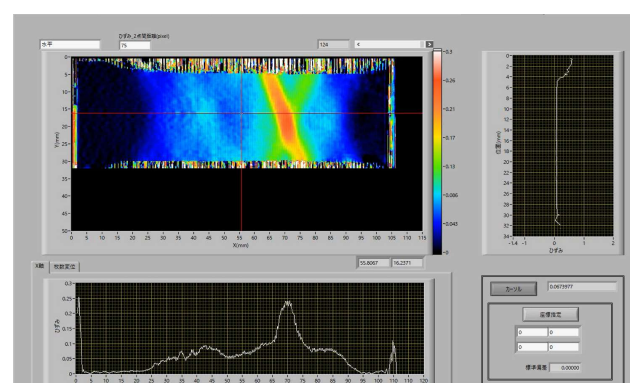


図5 ひずみ分布画像

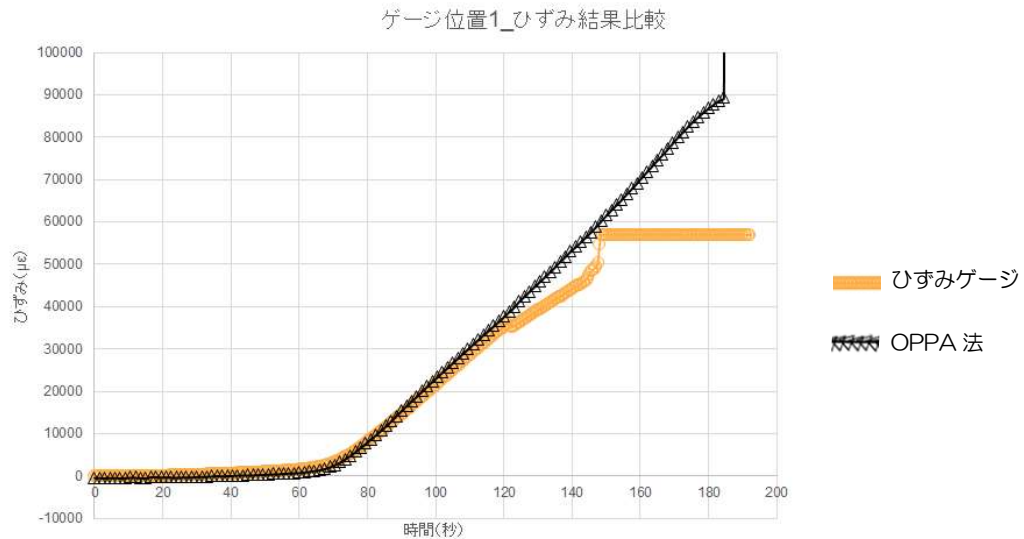


図6 ひずみゲージとOPPA法の比較

【1-1-2】HOPPA法によるひび割れ開口量計測技術の確立

研究内容

HOPPA法によるひび割れ開口量計測技術を確立させること。

目標値：ひび割れ開口量計測の分解能 $50\mu\text{m}$ 以上であること。

研究成果

図7のような構成でHOPPA法によるひび割れ開口量計測の精度検証を行った。

ひび割れ開口量計測専用の金属格子を移動ステージに貼りつけ、移動ステージを原点から1mmまで $50\mu\text{m}$ 刻みで動かし、各段10枚ずつ撮影しデータをまとめた。なお、解析結果はひび割れ開口量計測専用の金属格子内部2領域の変位差から求めることができる。

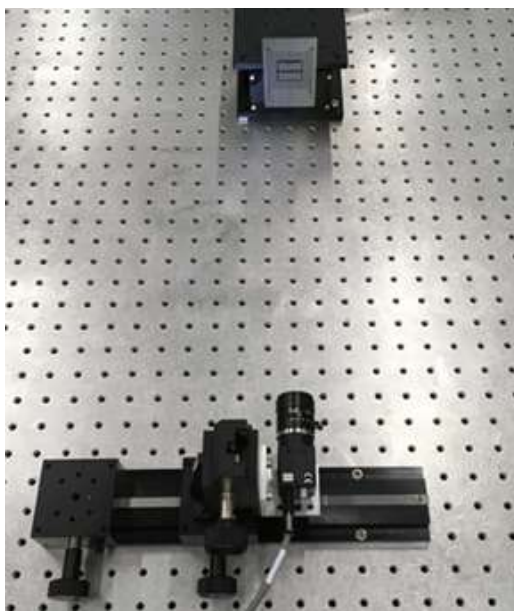


図7 ひび割れ開口量計測精度評価風景

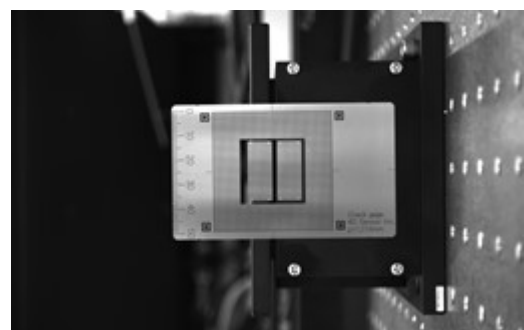


図8 変換前画像

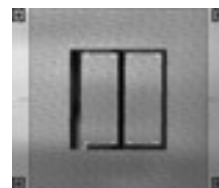


図9 変換後画像

精度評価の結果、誤差の最大値は $5.19\mu\text{m}$ となった。市販のクラックゲージの単位は $50\mu\text{m}$ であることから、HOPPA 法によるひび割れ開口量計測は高精度であり、ひび割れ開口量計測の分解能が $50\mu\text{m}$ 以上という目標値を達成した。

ステージ	0.000	0.050	0.099	0.149	0.199	0.248	0.298	0.347	0.397	0.447	
平均値	0.000	0.051	0.102	0.148	0.203	0.245	0.300	0.345	0.397	0.452	
誤差(μm)	0.000	1.288	2.668	-0.582	4.652	-2.832	2.522	-2.141	0.031	5.196	
ステージ	0.496	0.546	0.596	0.645	0.695	0.745	0.794	0.844	0.894	0.943	0.993
平均値	0.499	0.546	0.596	0.646	0.692	0.749	0.794	0.841	0.891	0.943	0.990
誤差(μm)	2.789	0.316	0.507	0.212	-3.383	4.450	-0.451	-2.896	-2.281	0.152	-2.557

【1－2】HOPPA法によるホモグラフィ変換技術の確立

研究内容

HOPPA法によるホモグラフィ変換技術を確立させること。

目標値：A3 領域以上の計測であること。

研究成果

ホモグラフィ変換の前提となる4点のパラメータの決定手法の開発を行った。マーカー認識と精度の良い中心位置のサブピクセル推定アルゴリズムを整理した。この内容からホモグラフィ変換を用いた変位計測の実験を進めた。まずは制約条件を見定めるために、角度を変えながらの実験に着手した。具体的には、格子の片方を高精度の移動ステージ上に専用格子を貼り、もう片方を移動ステージの本体側に貼り付けた。移動ステージを移動させながら、精度確認を行った。実験の結果、カメラの角度135度以下であれば、 $12\mu\text{m}$ 以上であり、手持ちして撮影した手振れ画像を使った場合でも $24\mu\text{m}$ 以上であった。市販のクラックゲージは、 $50\mu\text{m}$ 単位であることから、 $25\mu\text{m}$ の精度は十分な結果と考えられる。

カメラの固定と撮影条件	最大誤差[mm]
カメラを三脚で固定し格子を正面から撮影	0.001
カメラを三脚で固定し格子を斜め45度から撮影	0.003
カメラを三脚で固定し格子を斜め135度から撮影	0.012
カメラを20度傾け三脚で固定し格子を正面から撮影	0.010
カメラを手で持ち格子を正面から撮影	0.024

画像をホモグラフィ変換するソフトウェアを開発し、実際に台形状の格子を長方形の格子に変換するテストを行った結果、目標値のA3領域の計測を達成した（図11・図12）。

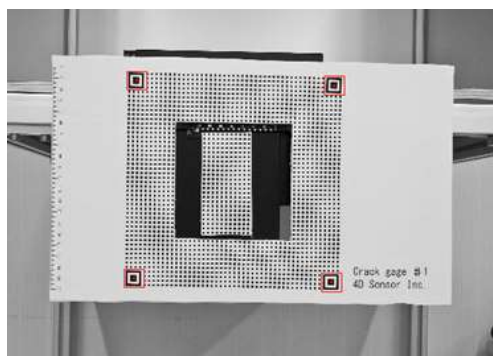


図10 変換前画像(A3領域)

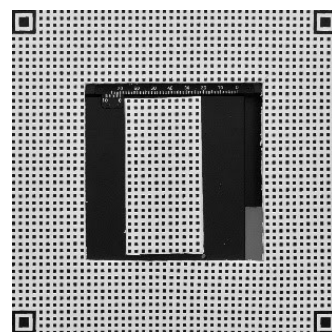


図11 変換後画像(A3領域)

【1－3】HOPPA法による3次元変位分布計測技術の確立

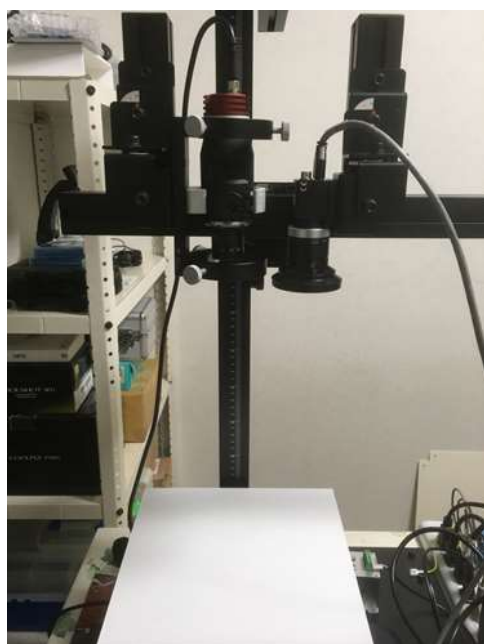
研究内容

HOPPA法による3次元変位分布計測技術を確立させること。

目標値：解析性能が距離比 1/100 であること。

研究成果

図12の光学系で奥行き方向の精度評価を行った。具体的には、理想的な完全拡散シートを貼りつけた平面度の高い板を移動ステージの上にのせ、移動ステージを原点から4.5mmまで0.9mm刻みで動かした。中心1画素を100回計測し、結果をまとめた。



ZR:レンズ中心と基準面までの距離
v:カメラ-光源間距離
d:カメラ-格子間距離
p:基準面の格子間隔

(単位：mm)

ZR	350
v	75
d	350
p	2.77

図12 OPPIA法の光学系

高さ比率テーブル(0.5mm×10段):移動ステージ移動量上限5mm

	計測位置	最小値	最大値	平均値	平均値誤差	標準偏差
Z	0.9	0.884	0.936	0.904	0.004	0.009
Z	1.8	1.777	1.828	1.806	0.006	0.009
Z	2.7	2.688	2.720	2.701	0.001	0.008
Z	3.6	3.590	3.631	3.610	0.010	0.009
Z	4.5	4.502	4.553	4.526	0.026	0.010

単位:mm

レンズ中心と基準面までの距離が350mmに対して、誤差の平均値が $26\mu\text{m}$ なので解析性能が距離比1/100という目標値を達成した。光学系を改良し、近距離型形状計測装置を完成させた。

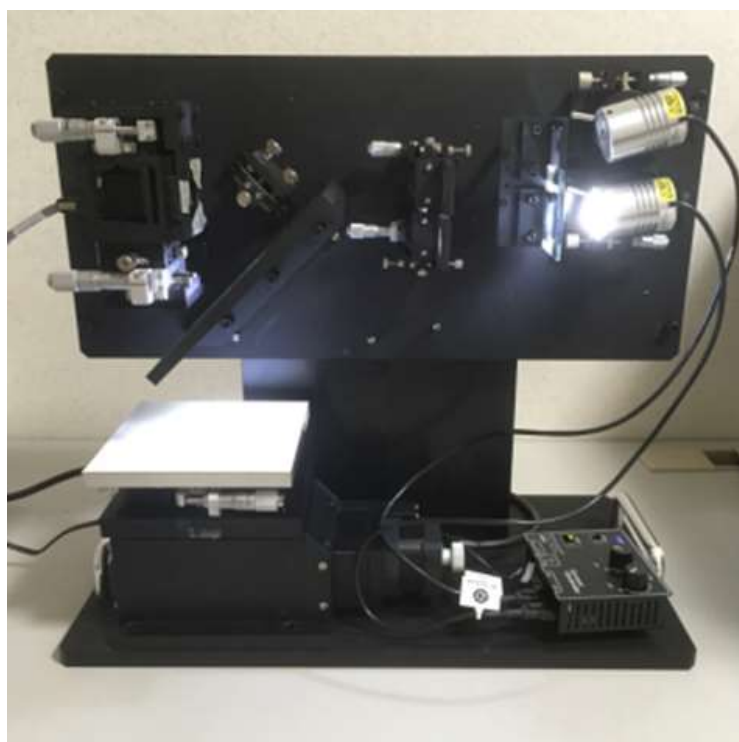


図13 近距離型形状計測装置

【2-1】対象物に応じた最適格子シートの開発

研究内容

対象物に応じた最適格子シートを開発すること。

目標値：コンクリート用、鉄用それぞれ2種類以上開発すること。

研究成果

0.5mm ピッチと 1.0mm ピッチの格子フィルムを開発した。2mm ピッチの格子テープを開発した。ひび割れ開口量計測専用格子を開発した。耐熱性格子シートを開発した。

【2-2】格子シートの耐久試験

研究内容

格子シートの耐久試験を行い劣化状況を確認すること。

目標値：20ヶ月の暴露試験後で解析可能変化／6年以上に相当する促進耐候性試験後で解析可能変化

研究成果

最長25か月の暴露試験をつくば市の物質・材料研究機構に設置した図14の暴露台を用いて行った。また、6年に相当する耐候性試験機による促進試験も行った結果、図15に示すような、かなり劣化した格子シートにおいても図16に示すように位相解析図を得ることができ、解析可能な程度の変化であることが分かった。



(2017年より暴露開始)



(2018年より暴露開始)

図14 暴露試験台



図15 劣化した格子試料

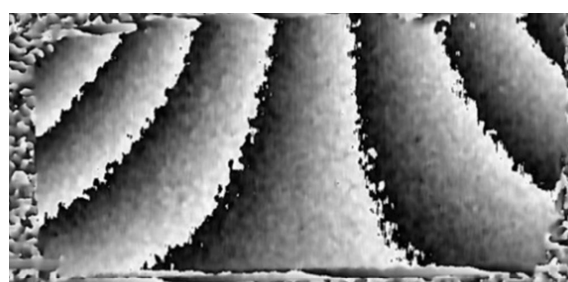


図16 図15より求めた位相解析図

【2-3】格子シートの固着試験

研究内容

耐久試験後の格子シートの固着試験を行うこと。

目標値：20ヶ月の暴露試験後で固着状態維持／6年以上に相当する促進耐候性試験後で固着状態維持

研究成果

25ヶ月の暴露試験・6年以上に相当する促進耐候性試験後の格子シートに対し図17のクロスカット試験を行った結果、ゴム系形の試料は劣化後の試料であっても、劣化はグリッドの表面であり図18からグリッドはモルタルに固着していることが確認できた。



図17 クロスカット試験

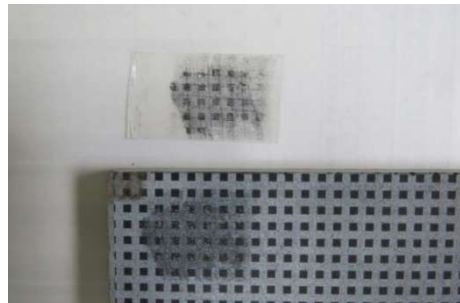


図18 クロスカット試験結果

【3-1】ドローンを用いた実証実験

研究内容

ドローンを用いた実証実験。

目標値：高さ 10M以上、対象までの距離 2m以内、風速～3Mの環境下で実験成功。

研究成果

図19のような室内環境でHOPPA法を用いた計測がドローンを用いて可能かどうか実証した。具体的には、XY手動ステージにA3領域のひび割れ開口量計測用格子を貼りつけ、手動ステージを原点から5mmまで1mm刻みで動かした。各段2枚ずつドローンで撮影しHOPPA法で変位量を解析した。



図19 ドローン室内実験風景

解析した結果移動ステージと同等な値を求めることができた。HOPPA 法を用いた計測はドローンを用いても可能であることを確認した。

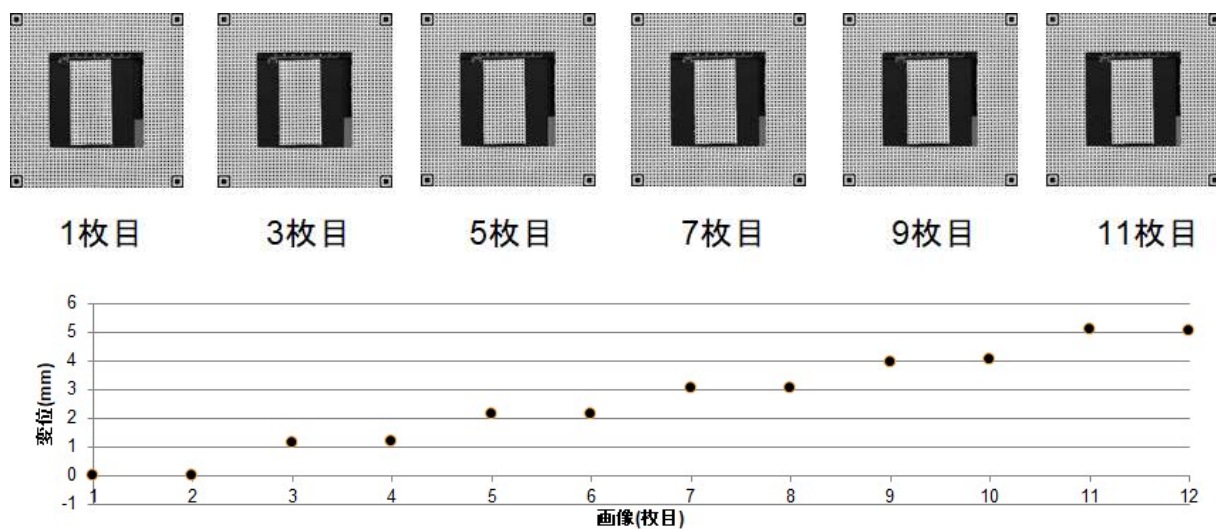
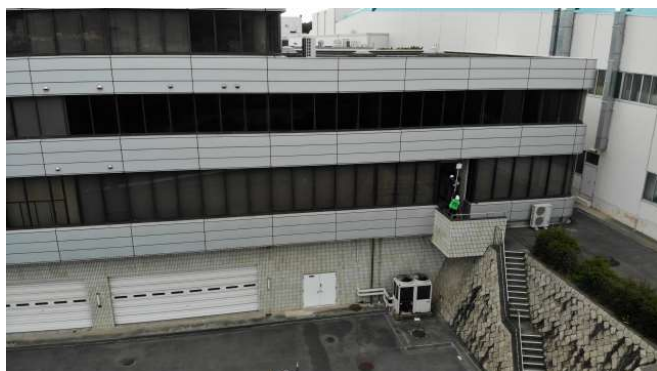
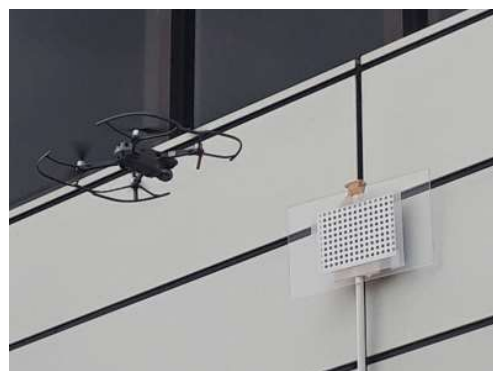


図20 HOPPA法で解析した結果

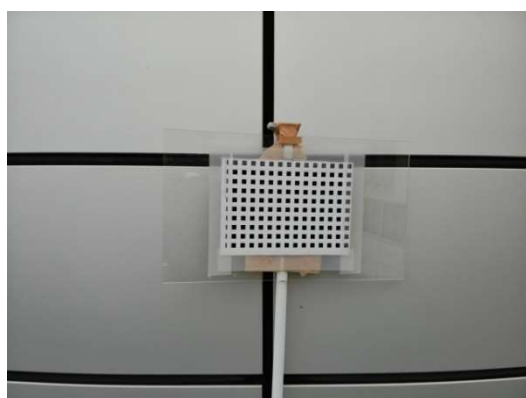
屋外にて実証実験を行い、高さ10m、対象までの距離0.5～1 m、風速0.5～1.5m/sの屋外環境下で実験し目標を達成し、撮影したデータの位相解析にも成功した。(図21)



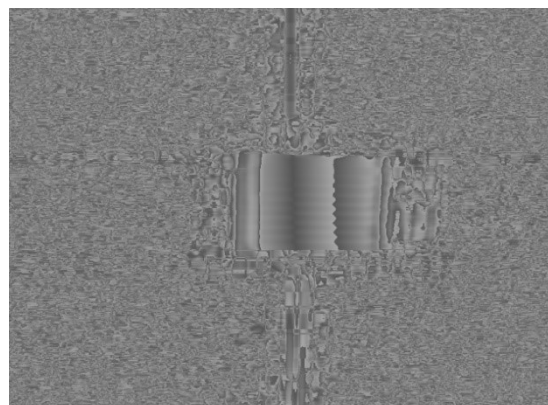
飛行中ドローンからの画像



格子画像取得風景



ドローンで撮影した格子画



位相解析画像

図21 ドローンによる屋外実証実験

最終章 全体総括

複数年の研究開発成果

本研究開発では、平成 29 年度から平成 31 年度までの 3 年間、高速高精度な位相解析技術をひずみ計測用に高度化させた HOPPA 法（ホモグラフィ変換 1 ピッチ格子位相解析法）の確立を目的とし、定量的にインフラ劣化診断できる全面ひずみ計測装置を研究開発した。

1 年目は、HOPPA 法をソフトウェアに組み込み、HOPPA 法の基本性能を確認した。また、広範囲計測用格子シートの開発も行った。

2 年目は、引張試験機を用いて、HOPPA 法と従来であるひずみゲージとの結果を比較し性能評価をした。また、HOPPA 法による 3 次元変位分布計測技術の確立と、ドローンを用いた室内実証実験を実施し、ひび割れ開口量計測での計測結果について精度評価をした。

3 年目は、HOPPA 法の利便性向上のため、ソフトウェア UI を設計し、外注とソフトウェアの作成をした。作成したソフトウェアを用いて引張試験時の計測を行い、シミュレーションソフトと比較して、変位・ひずみを求めるアルゴリズムが正しく組み込まれていることを確認した。また、ドローンを用いた屋外撮影実験を実施し、データの解析を行った。

最終的なひずみ計測技術の目標は達成できているが、インフラの維持管理にドローンにより撮影したデータから点検・モニタリング・診断をする技術として実用化するためには、ひずみ計測技術並びに計測面で課題が残ってしまった。

研究開発後の課題

HOPPA法を用いたひずみ分布計測について、主にJIS5号試験片を用いてひずみ分布計測の評価を行ったが、これは板状試験片として多く利用されているためである。この他に丸棒試験片と呼ばれるものがあるので、それを計測し計測例を増やす必要がある。また、応力ひずみ線図としてデータをまとめるように改善する必要がある。

格子シートについては、6年以上に相当する促進対抗試験を行い、表面は劣化するが、固着性や位相解析には影響が少ないことが分かった。しかし、塩害の耐久性や直射日光による耐熱性については評価していないため、海沿いや高温になる地域で計測する場合は、地域の特性に合わせた実用実験をする必要がある。

ドローンを用いた実証実験について大型のタイプと小型のタイプの両方で実験を行ったが、ドローンのサイズにかかわらず高度な操縦技術が必要となることが分かった。

GPSが受信できる環境でもホバリング精度は±50cm程度あり、橋梁などはドローンのコンパスを狂わせ操縦は困難になることが想定される点や、バッテリーで飛行するため飛行時間は限られる点など、ドローンに関して現状の課題は多いが、ドローンの発展を待ちながらドローン業者と連携して計測の高度化を図っていく必要がある。

新たな事業展開・その他の波及効果

本研究開発の事業化は、ドローンによる橋梁に貼られた格子シートの撮影データからひずみ計測を基に橋梁の劣化診断を行うことであるが、ひずみ計測のプログラムは完成したものの環境による格子シートの劣化やドローンの撮影に課題が残ったため、即座に事業化は困難で継続した研究開発が必要となった。

そこで波及効果として、完成したひずみ計測のプログラムを活用し、ドローンの高度化を待たずに固定されたカメラと望遠レンズを用いて、ある程度離れた距離における格子シートを望遠レンズで撮影・解析するひずみ分布・変位分布計測装置を実用化していきます。

また、工場内における生産設備の動きの監視に関するニーズが強くあることが分かったので、今回開発した試作機を元に、室内での大型の機械（生産設備）を対象にした変位計測装置を実用化していきます。