画像情報に基づく歯元ひずみの定量評価*

増山 知也^{*1}, 吉 泉 聡^{*2}, 井上 克己^{*1}Quantitative Evaluation of Strain Near the Tooth Fillet
by an Image ProcessingTomoya MASUYAMA^{*3}, Satoshi YOSHIKUMI and Katsumi INOUE^{*3} Department of Mechanical Systems and Design, Tohoku University,
6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

The accurate measurement of strain and stress in a tooth is important for the reliable evaluation of strength or life of gears. In this research, the strain measurement method which is based on an image processing is applied to the analysis of strain near the tooth fillet. The displacement of the point in the tooth flank is tracked, and then, the strain is calculated. The interrogation window size of cross-correlation method affects the accuracy and the resolution. In case of the measurement at the complicated profile such as fillet, the interrogation window keeps big size and the overlap amount should be large. The surface condition also affects the accuracy. The white painted surface with small black particle is suitable for measurement.

Key Words: Gear, Digital Image Processing, Measurement, Strain, Displacement

1. 緒 言

強度・寿命の両面において信頼性の高い設計を行うためには精度の良い強度評価が求められ、そのためにはトルクが負荷された歯車の歯元応力・ひずみの分布を正確に知ることが不可欠である。応力・ひずみの実験的評価には、ひずみゲージ法^{(1)~(3)}、銅メッキ法⁽⁴⁾など様々な方法が実用化されてきた。画像情報からひずみを算定する方法としては、光弾性法⁽⁵⁾やレーザースペックル法^{(6)~(7)}などが知られている。表1にまとめるように、それぞれ長所、短所があり測定の目的に応じて使い分けられたり、併用されたりしている。

カメラを用いて測定対象物の変形前および変形後の形状を撮影し、これらの画像を比較してひずみを測定する試みは、1983年の矢川ら⁽⁸⁾の研究が先駆的である。しかし、試験片上に直接グリッド状のマーキングを施す必要があり、数%から10%オーダーの大きなひずみが解析の対象であるなど、精密な測定には不向きであり、実用性が高いとは言えない状況であった。その後、コンピュータ性能の驚異的な向上と、それに伴う画像処理技術の飛躍的な進歩が見られたのは周知の通りであるが、当該分野への応用は、光弾性法や干渉

法による縞模様の解析^{(9)~(10)}などに限定されていたようである。

一方流体力学の分野では、1900年代初頭から流れを可視化する試みがなされ、現在では流れの中に混入したトレーサ粒子をビデオカメラで撮影し、その移動ベクトルを算出するPIV法 (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速測定法) が広く用いられている^{(11)~(13)}。

このような状況において、最近、PIV法を固体の計測に応用する装置が開発された。これは、負荷下の評価対象物を電子画像として撮影し、その画像の変化から変位分布やひずみ分布を得るものである。測定対象物に対して特別な加工を施す必要がなく、非接触で測定が可能であり、高温環境下やオンマシンでの測定に適用する事が可能であるなど、表1で比較するように従来の測定手法よりも優れた点が数多く考えられる。

本報告では、画像情報に基づくひずみ計測法を、歯先荷重により生じる歯元ひずみに適用し、歯形形状に適した測定法を見だし、計測の精度を高める方法について検討する。

2. ひずみ計測方法

本研究で使用したひずみ計測システムはLA VISION社のStrain Masterである。白黒12bitの分解能を持つ1360×1024pixelのCCDカメラにより測定対象を撮影し、ビデオボードを介してデジタル化された画像情報をメモリーに記録する。記録された全画像のうち

* 原稿受付 2005年5月6日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科(☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)。^{*2} 学生員、桑沢デザイン研究所(☎150-0041 東京都渋谷区神南1-4-17)。

E-mail: masu@elm.mech.tohoku.ac.jp

Table 1 Features of strain measurement method

method item	strain gauge	copper plating	photo elasticity	laser speckle	image processing
accuracy	◎	○	○	○	◎
quantitatively	◎	△	×	×	◎
point/2D/3D	point	3D	3D	2D	2D
material	○	△	model	△	○
non-contact	×	○	○	○	○
size of object	△	△	model	○	◎
pre-treatment	△	×	model	○	○
cost	◎	×	△	×	△

◎ : excellent
 ○ : good
 △ : enough or restricted
 × : no good or unsuitable

1280×1024pixel の範囲が解析に用いられ、図 1 に示すフローでひずみ分布が求められる。まず、画面は検査領域と呼ばれる小さな正方形に分割され、検査領域ごとに変形前後の明度分布を比較する。変形に伴い明度分布が移動するが、相互相関法により最も相関値が高くなる移動先を探索することで変位ベクトルを算定する。そして、隣接する検査領域における変位ベクトルを微分することによりひずみ場が得られる。

本装置は一画面を計測するシャッター速度が $10\mu\text{s}$ から 10ms の範囲より選択でき、画面計測間隔は 0.1s 以上の範囲で設定できる。

測定対象はモジュール 5、歯数 18、歯幅 8mm の SCM415 浸炭歯車であり、側面からの浸炭を防止するため、ブランクに銅メッキを施してある。その後ホブ切り、浸炭処理を行い実験に供した。電気油圧式サーボ試験機により歯先荷重を負荷し、試験歯を正横から撮影する。その様子を図 2 に示す。8.6×6.9mm の CCD 素子に対して $f = 105\text{mm}$ のマクロレンズを用いた。これは 35mm 判で $f = 440\text{mm}$ レンズの画角に相当する。測定対象の静止画像を図 3 に示す。

歯元最大応力が 800MPa となる繰り返し荷重を与え、負荷による歯の変形を動画として記録する。記録された動画から除荷時と最大負荷時の 2 フレームを抽出して、両者を比較することでひずみを算出する。

3. 画像ひずみ計測

3.1 有限要素解析によるひずみ分布 実際の画像計測に先立ち、ひずみ分布の比較対照にするため FEM 解析を行った。歯車の歯の一枚を図 4 に示すようにモデル化する、平面ひずみ 6 節点 3 角形要素を用い、2783 節点 1344 要素である。歯元最大応力が

Fig. 1 Working principle of PIV and strain distribution calculation

Fig. 2 Electro-hydro-servo test rig and CCD camera

Fig. 3 Measurement area of test tooth

Fig. 4 FEM model for strain analysis

Fig. 5 Strain distribution obtained by FEM analysis

800MPa となる歯先荷重を集中荷重として負荷した時のひずみ ϵ_{xx} の分布を図 5 に示す。図の赤色側が引張(正), 青色側が圧縮(負)である。以降に示す計測結果も同様の色分布を用いる。

3.2 検査領域サイズとオーバーラップ値の影響
相互相関法の特徴として, 検査領域が大きいほど変位ベクトル計算の精度が向上するが, 全画面における

Fig. 6 Schematic of the interrogation windows and their overlap

変位ベクトル算出点が減少する。そこで, 検査領域を上下左右にオーバーラップさせることで, 算出点を減少させずに, つまり, 空間分解能を低下させずに計算精度を保つことができる。その概念図を図 6 に示す。

一検査領域を 32×32 pixel, 128×128 pixel としたときのひずみ ϵ_{xx} の計測結果を図 7 (a)(b) で比較する。オーバーラップ値は 50% である。なお, 背景と歯受けにはマスキング処理を施している。前述のように, 本装置では一つの検査領域に対して一つのひずみが得られ, コンター図が出力される。従って, 測定対象の形状は検査領域を単位とする正方形の集合で表現される。ここで図 7 (a) では, 歯に対して十分細かい検査領域であるので, 形状を良く表している。しかし, 赤色で表示される検査領域と青色の部分とが入り組み, 力学的に生じ得ないひずみ場を示す部分が散見される。一方図 7 (b) では, 赤色から青色までなだらかなグラデーションを描いており, ひずみが連続的に変化する様子がよくわかる。これは, 検査領域が大きく変位ベクトル算出の精度が高いためと考えられる。しかし, 歯形曲線を表しているとは言えない。

また, 32×32 pixel オーバーラップ 50% と等しい変位ベクトル算出点が得られる 64×64 pixel オーバーラップ 75% の条件で測定したひずみ分布を図 7 (c) に示す。この条件では歯形をよく再現し, ひずみ分布も図 5 に近く, 良い分布を示している。

左右歯面の Hofer 30° 接線の位置を結ぶ線上のひずみ分布を評価することにし, その結果を図 8 に示す。歯形中心線上の点を $y = 0$ とし, $|y| = 4.701$ mm となる点が歯面である。図には FEM 解析の結果を合わせて破線で示す。図中赤線で示した 32×32 pixel オーバーラップ 50% では, ひずみ値が増減を繰り返す様子が見られる。一方黄線で示す 128×128 pixel オーバーラップ 50% の場合は, ひずみ分布はなだらかなものであるものの, 測定点が少なく, $y > 4$ mm となる引っ張り側の端部において測定値が得られなかった。青線で示す

Fig. 7 Measured strain of test tooth (Influence of interrogation window size and amount of overlap)

64×64pixel オーバーラップ 75%では、ひずみの変化がFEM 解析結果に近く、連続的であり、また、十分な数の測定点が得られている。よい測定結果を得るには、検査領域を大きく、かつ、オーバーラップ値を大きく設定することが適している。

しかし、64×64pixel オーバーラップ 75%の場合でも、歯と背景との境界付近の値が大きな誤差を持つことがわかる。これは、同一検査領域内において、移動する歯と、静止した背景が混在するため、歯の変位ベクトルを正しく検出できなかったためと考えられる。

3.3 測定対象の表面状態の影響 撮影した画像の明暗の移動によりひずみを算出するため、表面状

Fig. 8 Comparison of strain distribution between measurement and FEM analysis

態が計測精度に影響を及ぼすことが予想される。3.2 節までの測定は、試験歯車に何も処理を施していなかった。すなわち、旋盤加工痕が残る艶消しの銅メッキ面である。本節では他に、

- (1) 2000 番エメリー紙仕上げ
- (2) 2000 番エメリー紙仕上げ後、艶あり灰色塗装
- (3) 艶なし白色塗装上に黒鉛粒子散布
- (4) 艶なし白色塗装上に 250 番 SiC 粒子散布 (密度低)
- (5) 艶なし白色塗装上に 250 番 SiC 粒子散布 (密度中)
- (6) 艶なし白色塗装上に 250 番 SiC 粒子散布 (密度高)

の表面処理を施した。(1)や(2)は通常の機械部品の表面を模している。(3)～(6)はPIV法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾で用いられるトレーサ粒子を模したものである。歯車を白色に塗装したのは、粒子との明度差を大きくし、相互相関法が良く作用することを期待したためである。(3)の黒鉛粒子は鉛筆の芯を削ることで得た。図9に示すように、まず、歯車に艶なし白色塗装を施し、その後、黒鉛粒子を散布する。さらに、粒子を定着させるために、その上から透明な塗料を塗装した。(4)～(6)のSiC(カーボランダム)粒子は250番を用いた。粒子を均等に散布し、かつ密度を調節するために、あらかじめ透明塗料とSiC粒子を混合しておき、それを白色塗装後の歯側面に塗布することにした。手順を図10に示す。

以上の粒子性状を粒子径の平均値と標準偏差、および密度に着目して表2にまとめる。デジタル画像処理であるので、被写体の大きさは画素数で表現することが相応しい。また、一検査領域内での明度差の分布が相関アルゴリズムに影響を及ぼす。従って、ここでは粒子径を画素数で、粒子密度を一検査領域に含まれる粒子数で評価する。黒鉛粒子は径にばらつきが大きく、測定顕微鏡で面積の算出が困難なほど微小な粒子が多数含まれるが、表2に示した数値では、これらは無視

Fig. 9 Method of sprinkling carbon powder on surface of test tooth

Fig. 10 Method of sprinkling carborandom powder on surface of test tooth

している。SiC 粒子において、同一ロットにもかかわらず粒子径測定値が異なるのは、粒子同士が重なることがあるためである。以上の処理を施した歯の写真を図 11、図 12 に示す。

前節における検討で、最も良い測定条件である検査領域 64×64 pixel、オーバーラップ 75% の条件で計測を行った。(1)、(2) の表面処理を行った歯におけるひずみ ϵ_{xx} の結果を図 13、図 14 に示す。これらより、乱反射の多い (1) や明度差のない (2) では満足な測定ができないことがわかる。(3)～(6) の処理を行った歯の計測結果を図 15、図 16 にそれぞれ示す。図 16 よ

Table 2 Details of particle

	Particle diameter				Particle density
	mean		standard deviation		
	pixel	μm	pixel	μm	pieces/64 ² px
Carbon powder	7.4	104	6.8	97	7.2
SiC low density	4.6	63	3.5	47	24.8
SiC medium density	5.3	72	4.3	59	50.7
SiC high density	6.4	87	5.2	70	90.2

(1) Emery paper sanding

(2) Gray painting

Fig. 11 Surface condition of test teeth (Uniformity surface)

り、粒子を散布したものでは、図 8 で示した未処理の状態と比べ、予期したとおりに良い結果が得られた。また、特に歯と背景との境界付近において精度向上が顕著であることが知られる。同一検査領域内に移動する歯と静止した背景が混在しても、歯を白色に塗装する事で背景との差が大きくなり、かつ粒子によって相関アルゴリズムがよく作用するので、歯の部分の情報のみで十分な精度の変位ベクトルが算出されたためと考えられる。

4. 測定精度の定量評価

画像情報に基づく歯元ひずみの計測結果を、FEM 解析結果を正として評価する。図 16 に示したひずみ分布において、歯の曲げ強度評価に重要と思われる引張側の、歯面から深さ 1mm までの範囲に存在する測定点について、それぞれ解析結果との比をとり平均した値を図 17 に示す。この評価範囲においては、黒鉛粒子を散布した表面での測定結果が最も精度が高く、FEM 解との誤差は 9% であった。次いで精度の高い SiC 散布 (密度中) では誤差 21% である。SiC 散布 (密度低) および SiC 散布 (密度高) では精度が低い。これは、測定面の色が前者では白一色、後者では黒一色に近くなり、画像の明度差が小さく相関アルゴリズムが良く機能しなかったためと考えられる。

また、広範囲における測定精度を評価するために、

Fig. 12 Surface condition of test teeth (Dotted surface)

式(1)で表される $\bar{\epsilon}$ を評価量とすることにした。これは、各検査領域ごとに計測されたひずみ値を $\epsilon_{im\ i}$ とし、同位置でのFEMによる計算結果を $\epsilon_{fem\ i}$ として、両者の差の絶対値を平均したものである。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n |\epsilon_{fem\ i} - \epsilon_{im\ i}|}{n} \quad (1)$$

図16に示したひずみ分布の計測結果に式(1)を適用し、粒子密度が精度に及ぼす影響を調べた。結果を図18に示す。64×64pixelの検査領域サイズに対して、一検査領域あたり50個程度の粒子を配置することで良好な精度が得られる一方で、密度が低くても高くても精度は低下する。これは前述の通り、白一色あるいは黒一色の面に近づくためである。また、図17において最も精度の高かった黒鉛粒子散布面に比べ、SiC散布(密度中)の処理を施した面の方が若干誤差が小さくなった。これは、本測定では $-2\text{mm} < y < 2\text{mm}$ 程度の歯形中心近傍において、SiC散布面の測定誤差が

Fig. 13 Measured strain of test tooth (Influence of the surface condition)

Fig. 14 Comparison of strain distribution between measurement and FEM analysis (Uniformity surface)

小さかったことによる。

粒子径が測定精度に及ぼす影響を図19に示す。測定した粒子径の標準偏差をエラーバーで表現している。また、未処理の表面である旋盤加工痕が残る艶消しの銅メッキ面については、旋盤加工痕の間隔を粒子径とみなし同時にプロットした。図より、粒子径も測定精度に影響することが認められ、5pixel ($\approx 70\mu\text{m}$)程度の粒子を用いることで、最も高い精度が得られることが知られた。

Fig. 15 Measured strain of test tooth (Influence of the surface condition)

3.3節で言及したとおり、粒子密度や粒子径はデジタル画像における画素数で評価されるべきである。そこで、本研究で最適と認められた粒子径 (5pixel) 及び粒子密度 (50 個/64×64pixel) が³, 異なる撮影倍率にお

Fig. 16 Comparison of strain distribution between measurement and FEM analysis (Dotted surface)

Fig. 17 Measurement error of strain near the fillet

Fig. 18 Influence of particle density on the measurement accuracy

いて幾らの寸法, 密度に相当するか換算を試みる。結果を図 20 に示す。横軸には撮影画面の長辺寸法 [mm], 縦軸には粒子径 [mm] および粒子密度 [pieces/mm²] をとる。また横軸の副尺として, 図 3 に等しい大きさで

Fig. 19 Influence of particle diameter on the measurement accuracy

Fig. 20 Suitable particle diameter and density in various exposure size

撮影される歯のモジュールを表す。測定対象が異なる場合には、本図を参考にして粒子密度および粒子径を選択することができる。

5. 結 言

本研究では画像ひずみ計測装置を用いて、歯元ひずみを計測した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 歯車形状を正確に表現するには、検査領域が小さいほうが適当であるが、相関法の特徴により変位ベクトル計算精度、延いてはひずみ計測精度が低下する。
- (2) 変位ベクトルの計算精度を保つには、一検査領域がより大きいほうが適当であるが、空間分解能低下のため、歯形形状に対応できない。
- (3) オーバーラップ値を大きく取ることで、空間分解能の低下を防ぐことができる。
- (4) (1)(2)(3)より、本測定条件においては、検査領域 64×64 pixel、オーバーラップ値 75% が適当である。

- (5) 一様な塗装面や平滑な金属面は測定に不向きである。
- (6) 白地に黒色粒子を散布した表面は、変位の追跡が容易で、ひずみ計測の精度が高い。
- (7) 粒子径と、粒子密度は、測定精度に影響を与え、本測定条件では、粒子径約 5 pixel、粒子密度 50 個 / 64×64 pixel が、最も良い結果であった。

謝 辞

本研究で用いた画像計測装置の導入および画像計測にあたり、(社)日本機械学会 研究開発事業部 RC-205 歯車装置の実用技術革新のための調査研究分科会および丸文株式会社のご協力を得た。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 応力測定技術研究会編、倉西 正嗣他、応力測定法、(1955)、朝倉書店。
- (2) 川田 雄一・平 修二・多田 美朝 共編、安積 健次郎他、応力測定マニュアル、(1972)、オーム社。
- (3) 河井 正安、ひずみゲージとともに 35 年、機論、51-472, A(1983), 2675-2676。
- (4) 大久保 肇、銅メッキ応力測定法、(1965)、朝倉書店。
- (5) 辻 二郎・河田 幸三、光弾性実験法、(1964)、理研計器株式会社。
- (6) 山口 一郎、電子式スペックル干渉法による変位・ひずみ測定、応用物理、61-6, (1992), 584-587。
- (7) 豊岡 了、スペックル干渉法による粗面の変形測定、非破壊検査、44-7, (1995), 515-521。
- (8) 矢川 元基・松浦 真一・安藤 良夫、点認識画像を用いた非接触ひずみ解析法、機論、49-447, A(1983), 1435-1443。
- (9) 南家 由紀久・梅崎 栄作、画像処理による RGB 光弾性において得られた等色線縞の増倍と抽出、機論、65-635, A(1999), 1607-1614。
- (10) Cesar A. Sciammarella, Overview of Optical Techniques That Measure Displacements, *Experimental Mechanics*, 43-4, (2003), 1-19。
- (11) Markus Raffel 他、PIV の基礎と応用、(2000)、シュプリンガー・フェアラーク東京。
- (12) 可視化情報学会編、小林 敏雄他、PIV と画像解析技術、(2004)、朝倉書店。
- (13) 山本 恭史・植村 知正・米原 紀吉、時空間微分法を用いた PIV サブピクセル解析における空間勾配の差分近似について、機論、70-695, B(2004) 1703-1710。