

## 1012 衛星搭載望遠鏡主鏡を目指した高精度 CFRP 鏡の開発

○神谷友裕, 宇都宮真, 清水隆三 (宇宙航空研究開発機構)

Development of High-precision CFRP Mirrors for Space Telescopes  
Tomohiro Kamiya, Shin Utsunomiya and Ryuzo Shimizu (JAXA)

Key Words: CFRP Mirror, Space Telescopes, Surface Accuracy, Replica Method

### Abstract

Ultra-lightweight and high-precision CFRP(carbon fiber reinforced plastics) mirrors for space telescopes were studied and the surface accuracy of prototype mirror( $\phi 150\text{mm}$ , R454mm, Concave) was improved to  $0.8 \mu\text{m}$  RMS and the surface roughness was  $5 \text{ nm}$  RMS by using a replica technique in our previous studies. In this report, surfaces of CFRP flat mirrors were measured and changes in surface accuracy were investigated at each phase of the fabrication process. The surface accuracy at the phase of skin fabrication was improved to  $1 \mu\text{m}$  RMS by the process improvement and it became worse after the phase of skins-core adhesive process. Finally, the surface accuracy was improved to  $0.2 \mu\text{m}$  RMS by using a replica technique.

### 1. 目的および背景

人工衛星に要求される観測分解能の向上のためには、搭載される望遠鏡の開口径を大きくすることが有効な手段の一つであると考えられている。しかし、大開口径を実現するためには、ロケットの打ち上げ可能質量の制約から、望遠鏡全体の構造と質量に大きく影響する部分である主反射鏡を軽量化する必要がある。炭素繊維複合材料(CFRP)は比剛性に優れており、サンドイッチ構造とすることにより大幅に軽量化することができることから、軽量・大型の反射鏡に適した構造材料であると考えられている。過去の研究では、CFRP 表皮、CFRP ハニカムコアから成るサンドイッチ構造の CFRP 鏡面(図 1)は  $10\text{kg}/\text{m}^2$  以下の面積密度が達成されている<sup>1)</sup>。ゼロ膨張ガラス製の鏡面(太陽観測衛星「ひので」の可視光望遠鏡の主鏡: 約  $60\text{kg}/\text{m}^2$ , など)や SiC 製の鏡面(赤外線天文衛星「あかり」の冷却望遠鏡の主鏡: 約  $30\text{kg}/\text{m}^2$ , など)と比較して、大幅な軽量化が達成されている。

しかしながら、CFRP 鏡には、可視光望遠鏡や赤外線望遠鏡で要求される nm レベルの面精度と表面粗さの達成が困難であること<sup>2)</sup>、マトリックス樹脂の脱湿収縮やクリープなどに起因する長期間の変形が生じること<sup>3)</sup>、などの複合材料特有の技術課題が存在している。過去の研究において、レプリカ法を用いることにより試作した CFRP 鏡面( $\phi 150\text{mm}$ , R454mm, 凹面)は面精度  $0.8 \mu\text{m}$  RMS, 表面粗さ  $5 \text{ nm}$  RMS を達成している<sup>2)</sup>が、要求される nm レベルの

面精度には到達しておらず、CFRP 鏡は実用化には至っていない。

今回、CFRP 鏡面の nm レベルの高精度化を達成するために、CFRP 鏡の製造工程の各段階で面精度、表面粗さを評価し、製造工程の改善による高精度化の可能性を調査したので報告する。

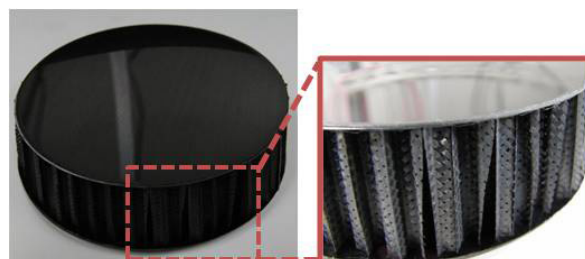


図 1 サンドイッチ構造の CFRP 鏡面<sup>4)</sup>

### 2. 供試体と試験方法

製造工程を検証するための供試体として、CFRP 表皮、CFRP ハニカムコアから成るサンドイッチ構造の CFRP 鏡面を製作した。供試体の形状は  $135\text{mm} \times 135\text{mm} \times \text{H}44\sim 45\text{mm}$  のサンドイッチ平板である。表皮材料には、高剛性ピッチ系炭素繊維(YSH60A)とシアネート樹脂(NM31)から成る UD プリプレグを用いた。ハニカムコアには、高剛性ピッチ系炭素繊維(K13A1L)のクロスとシアネート樹脂(EX1515)から成るクロスプリプレグをフレックスコア形状に成形した CFRP フレックスコアを用いた。

供試体の製造工程は、主に、①表皮成形、②サンドイッチ成形、③レプリカ処理の 3 段階に分けることができる。

表皮は疑似等方に積層し、オートクレーブで成形した。過去の研究において、表皮成形後に表皮全体に反りが発生していることが観察され、この反りが面精度悪化の支配的な要因であった<sup>2)</sup>。この反りを発生させている成形ひずみは、表皮成形のキュアサイクルの加熱・冷却時において、成型型面と裏面との熱容量の差に起因する表皮厚み方向のわずかな温度差によって生じているものと推測されている。よって、今回の試作では、面精度悪化の支配的要因である表皮全体の反りを解消するために、表皮裏面側にも成型型と同一の型を置き、成型型面と裏面との熱容量の差がないように成形を行った。表皮成形方法の模式図を図2に示す。

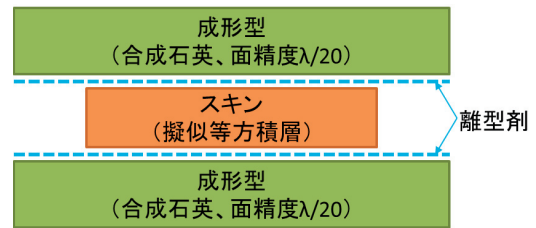
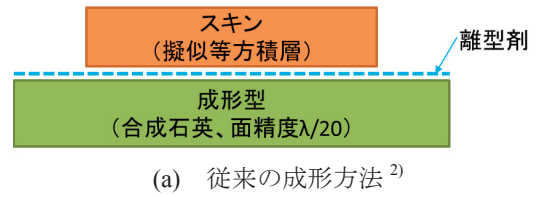
表皮とコアはフィルム状エポキシ接着剤を用いて接着してサンドイッチ板とした。過去の研究において、サンドイッチ成形により表面に不均一な凹凸形状が発生して表皮単体よりも面精度が悪化し、さらに測定場所ごとのばらつきが大きく悪化することが観察された<sup>2)</sup>。よって、今回の試作では、サンドイッチ成形時に表皮に変形が生じないように、表皮成形と同様に表裏両側を同一の成型型で挟み込んで、高精度な成型型面に押し当てることによりサンドイッチ成形を行った。サンドイッチ成形方法の模式図を図3に示す。

さらに、CFRP表面に観察されるCFRP繊維のプリントスルーに起因する凹凸<sup>5)</sup>を低減するために、レプリカ法によりエポキシ樹脂を用いて高精度ゼロ膨張ガラス型の表面をCFRP鏡面に転写し、プリントスルーの凹凸を覆う処理<sup>6)</sup>を施した。レプリカ処理方法の模式図を図4に示す。

供試体の面精度と表面粗さは、Zygo社製非接触表面形状測定機NewView7300を用いて工程ごとに測定し、製造工程の各段階における面精度、表面粗さの変化を追跡評価した。供試体全体のうねり形状から微細な表面粗さからまでを評価するため、測定は表1に示す複数の条件で行った。各工程における供試体の外観を図5に示す。

表1 測定条件

測定領域の大きさ	測定間隔
100mm×100mm	80μm
40mm×40mm	20μm
12.5mm×12.5mm	8μm
4mm×4mm	2μm
1.25mm×1.25mm	1μm
0.4mm×0.4mm	0.2μm



(b) 今回の試作における成形方法  
図2 表皮成形方法の模式図

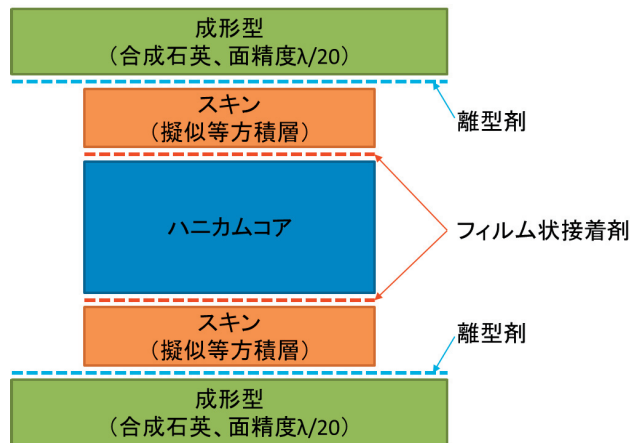


図3 サンドイッチ成形方法の模式図

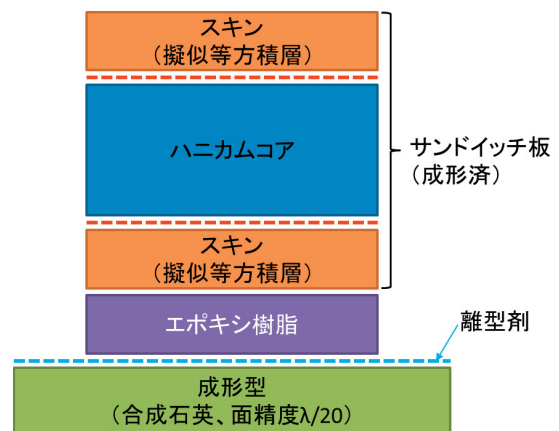
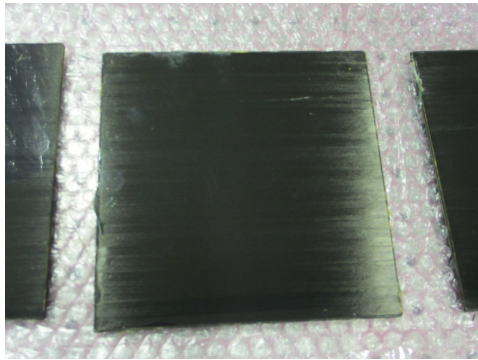
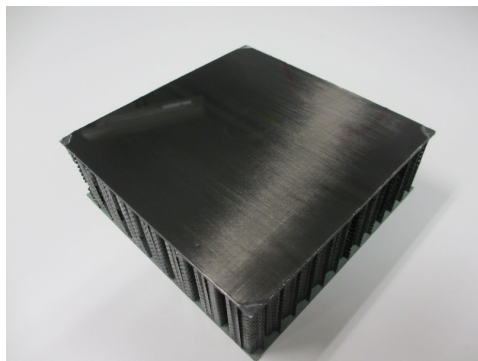


図4 レプリカ処理方法の模式図



(a) 表皮成形後



(b) サンドイッチ成形後



(c) レプリカ処理後

図5 各工程における供試体の外観

### 3. 試験結果

#### 3.1. 表皮成形

表皮成形後の面精度，表面粗さの測定結果を図6に示す．100mm×100mmの領域における面精度は，今回試作した4枚の表皮の平均値で0.94 μm RMSであり，4枚の標準偏差は0.18 μm RMSであった．従来の成形方法では，測定領域が10mm×10mm以上において，全体の反りの影響で急速に面精度が悪化する傾向が観察されていた<sup>2)</sup>が，今回の試作結果では，測定領域の拡大に伴う面精度の悪化は軽減された．よって，表皮の両側を同一の成型型で挟み込んで成形する方法は，全体の反りを小さく抑えることに効果的であると考えられる．

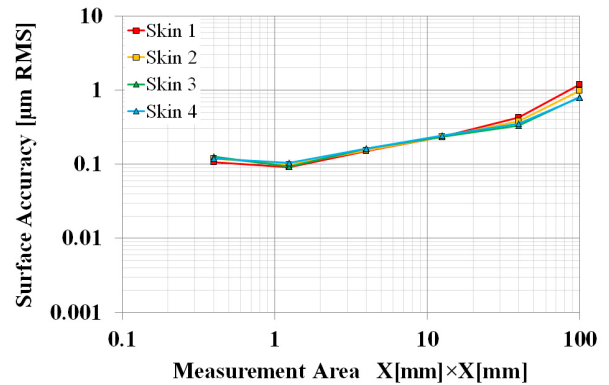


図6 表皮成形後の面精度，表面粗さ

#### 3.2. サンドイッチ成形

サンドイッチ成形後の面精度，表面粗さの測定結果を図7に示す．100mm×100mmの領域における面精度は，今回試作した4面（サンドイッチ2個×表裏2面）の平均値で2.01 μm RMSであり，4面の標準偏差は0.09 μm RMSであった．従来と比較して，サンドイッチ成形による面精度悪化は軽減されたが，今回の成形方法においても表皮単体には見られなかった不均一な凹凸形状が観察されており，成型型面に表裏両側を押し当てるだけでは，不十分であることがわかった．凹凸形状は数10mm程度の領域の大きさで発生しており，全体の反りともハニカムコア模様のディンプルとも異なるものである．

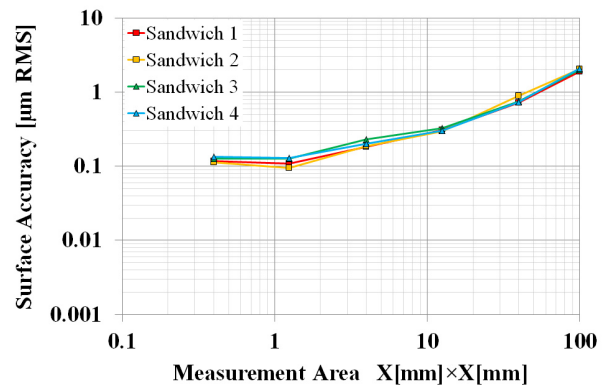


図7 サンドイッチ成形後の面精度，表面粗さ

#### 3.3. レプリカ処理

サンドイッチ成形において表面の不均一な凹凸が比較的少なかった表面1および表面4に対して，レプリカ処理を施した．レプリカ処理後の面精度，表面粗さの測定結果を図8に示す．レプリカ処理結果は，表面1において，100mm×100mmの領域における面精度は0.22 μm RMSであり，0.4mm×0.4mmの領域における表面粗さは6.16 nm RMSであった．

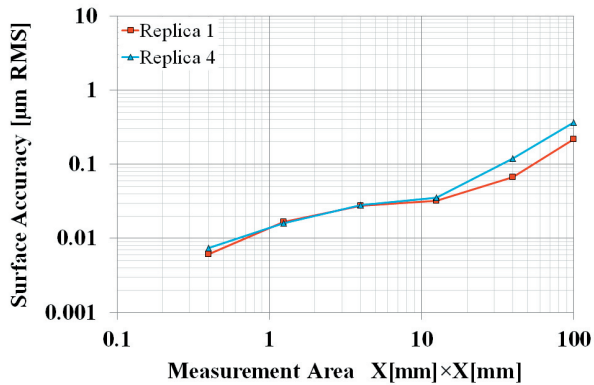


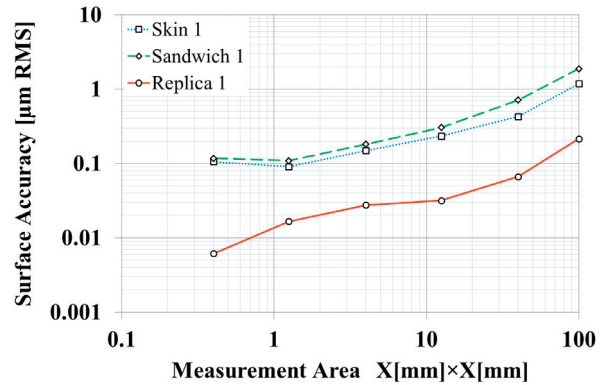
図8 レプリカ処理後の面精度，表面粗さ

### 3.4. 各工程における表面状態の比較

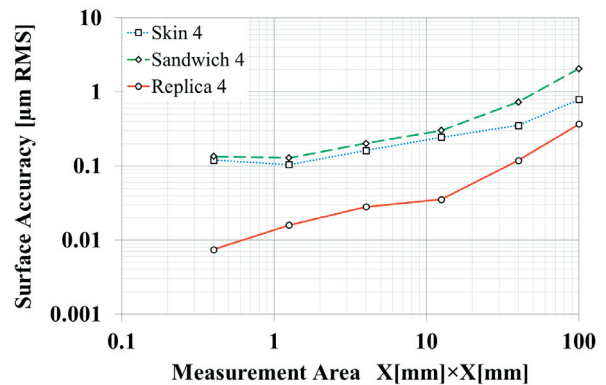
レプリカ処理を施した表面1および表面4について、表皮成形，サンドイッチ成形，レプリカ処理の各工程における面精度，表面粗さの変化を，図9に示す。また，表面1について，各工程の各測定領域における表面の状態を図10に示す。表面1も表面4もサンドイッチ成形後に，10mm×10mm以上の測定領域において，面精度が悪化する傾向が確認できる。レプリカ処理により，どの測定領域の大きさにおいても，サンドイッチ成形後の精度曲線から約1桁程度の改善効果が確認できる。レプリカ処理後の精度曲線は，サンドイッチ成形後の精度曲線と同一の傾向を示している。これは，最終的な面精度に，サンドイッチの成形精度が大きく影響していることを示唆している。

## 4. 結言

CFRP鏡面の高精度化のために，製造工程に着目して工程ごとに面精度と表面粗さを評価し，製造工程の改善による高精度化の可能性を調査した。表皮成形工程において成形後の全体の反りを抑えるためには，表皮の表裏を同一の成形型で挟み込むように成形することが効果的である。これにより表皮単体の成形精度は1 μm RMS以下を達成した。サンドイッチ成形工程において，不均一な凹凸形状が発生して面精度を悪化させており，さらなる工程の改善が必要である。レプリカ処理後の面精度は，0.22 μm RMSを達成した。レプリカ処理後の精度曲線は，サンドイッチ成形後の精度曲線から約1桁程度改善されており，また，測定領域の大きさに対する傾向はサンドイッチ成形後と同一の傾向を示している。これらの結果より，レプリカ処理後の面精度にサンドイッチの成形精度が大きく影響しており，サンドイッチ成形工程が重要な改善点であることがわかった。



(a) 表面1



(b) 表面4

図9 各工程における面精度，表面粗さの変化

## 参考文献

- 1) Shin Utsunomiya, Ryuzo Shimizu : Monitoring of Dimensional Stability of CFRP Mirrors for Space Telescopes by Using Embedded FBG Sensors, ICCM-17, 2009.
- 2) 神谷友裕, 宇都宮真, 清水隆三 : レプリカ法による CFRP 鏡の表面粗さの改善, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 3A10, 2011.
- 3) 宇都宮真, 清水隆三 : FBG センサーを用いた低熱ひずみ CFRP の湿潤膨張モニタリング, 第 33 回複合材料シンポジウム, 2008.
- 4) 宇都宮真, 神谷友裕, 清水隆三 : 人工衛星搭載用 CFRP ミラーの開発, 第 35 回複合材料シンポジウム, 2010.
- 5) Shin Utsunomiya, Tomohiro Kamiya and Ryuzo Shimizu : CFRP composite mirrors for space telescopes and their micro-dimensional stability, Proc. of SPIE Astro. Inst. 2010, Vol. 7739-116, 2010.
- 6) 宇都宮真, 神谷友裕, 清水隆三 : 衛星搭載望遠鏡用 CFRP ミラーの表面粗さの改善, 第 2 回日本複合材料合同会議, 2B-09, 2011.

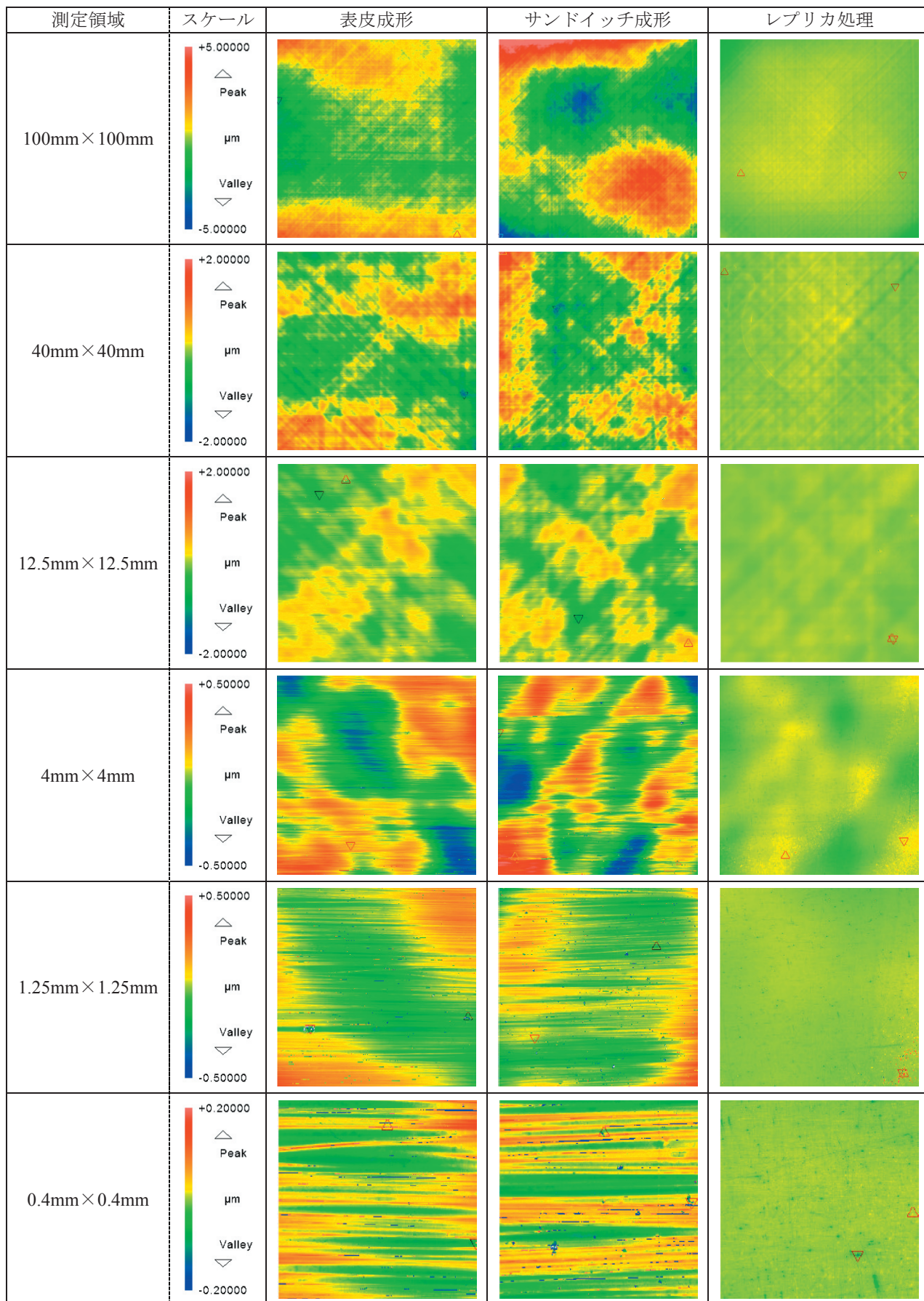


図 10 各工程における表面状態の比較