

## 医療用光学部品向け超精密金型成形技術の研究

研究報告者 伊藤 高廣

### プロフィール



最終学歴 1985年3月  
東京大学大学院工学系研究科  
産業機械工学専攻 修士課程修了  
1992年6月  
米国イリノイ大学コンピュータサイエンス学科  
大学院修士課程修了  
専門分野 MEMS, マイクロメカニズム  
学 位 博士(工学)  
所属団体 国立大学法人九州工業大学 大学院  
情報工学研究院 知的システム工学研究系  
役 職 名 教授

### 今後の抱負

令和5(2023)年度に助成いただき、研究開発を進め、超精密金型成形技術を活用した医療用光学部品の作製手法について多くの知見を得ることができました。具体的には、自走式カプセル内視鏡ボディについて本技術を用いて作製するための条件や成形に最適な条件、光学部品としての評価手法を得ました。今後は、実用化、製品化に向け、自走式カプセル内視鏡の研究開発を引き継いだ研究者と組織を支援する取り組みを進めていきます。ご支援ありがとうございました..

## 1. はじめに

近年の金型成形技術へのニーズは、医療用では人体に害の少ない難成形樹脂や、成形条件が難しいドーム形状等が増えている。コロナ禍以降特に在宅の検査治療を指向した光学部品への需要が増大している。例えば、カプセル内視鏡は、在宅でも消化管内の検査ができる有力な医療機器であるが、その先端球面レンズ部の形状が理想の真球形状に対して、わずかな誤差が原因で画像が不鮮明になる。同様の光学性能は、医療用光学分析機器にも求められる。そこで、金型・成形技術により、医療機器の光学性能を向上させることが本研究の目的である。

カプセル内視鏡の場合、表1に示すように、金型では形状精度と表面の滑らかさが、医療向けの光学画像品質を満たすために必要であり、成形では、離型性、薄肉部の成形、精度各項目にて、高い目標を満たす必要が生じている。金型加工に、同時三軸制御による手法を応用し、工具の回転中心が低速であることによる加工ムラのない、設計通りのレンズ形状を実現することを狙いとした。

表1 医療用光学部品向け超精密金型成形技術が狙う数値目標

目 標	項 目	開発内容	数値目標
医療用光学部品向け超精密金型成形技術開発	金型加工技術開発	真球面形状に加工する技術の開発	形状精度： PV1ミクロン以下
		球面レンズ形状の鏡面切削加工技術の開発	表面粗さ： Rz0.5ミクロン以下
	精密射出成形技術開発	離形性向上技術の開発	球面形状精度 PV5 $\mu$ 以下
		難成形薄物樹脂の最適成形条件の確立	最薄部0.2mm
	光学性能評価技術開発	画像解像度200dpi以上	

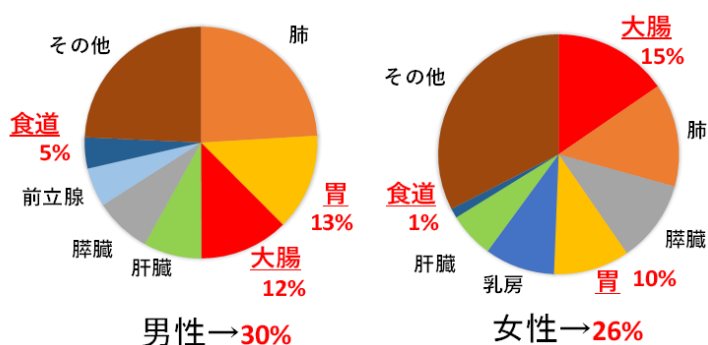
本研究では、同時三軸制御加工技術を応用して、医療用光学部品のための加工条件を求め、金型加工を実現する。具体的には、医療用光学機器への要求性能を満たすため、形状精度1ミクロン以下の真球面形状の加工を実現した。

## 2. 期待される研究・開発の成果

医療機器の光学性能を向上させれば、特に自走式カプセル内視鏡では、患者と医師双方の負担を減らすことにより健診率を向上させ、がんによる死亡を0に近づけることが期待できる。消化器系のがん死亡率は、図1に示すように、男性で約30%、女性で約26%と高いにも関わらず、内視鏡検査は、患者の苦痛の問題から、大腸がん検査率は30%未満と低い。

この現状を改善すべく、患者、医師双方の負担を軽減できる自走式カプセル内視鏡（図 2, 3, 4）を研究開発し、動物実験にまで到達した。しかし、動物実験等を繰り返す中、カプセルボディを介した画像が少しぼやける問題（図 7）があり、その解決が急務となった。光学解析技術により現状のカプセルについて評価確認し、検証を行ったところ、射出成形加工したカプセル金型の先端球面レンズ部の形状が理想の真球形状（図 5）に対して、わずかな誤差が原因で画像が不鮮明になることを検証した（図 6）。繊細な光路が要求される製品では、この微細な形状の誤差が画像に影響したと考えられ、この解決策としては、精密な真球面レンズ形状を持つカプセル内視鏡レンズ金型を研究開発することにより、医療機関で受け入れられる映像を得る目途が立った。金型の球面加工の精度平滑性を上げたところ、画像に効果が表れた（図 8, 9）。またこの技術は、医療用の分析セルはじめ、医療用、バイオ用の樹脂製品にも応用ができる。分析セルでは、 $\mu\text{m}$ オーダーの微細な形状誤差が樹脂製品を通しての光学特性が観察や映像の品質に影響を及ぼすためであり、コロナ時代後のワクチン開発予防治療に対応した、今後需要の拡大する重要技術である。本課題解決により金型技術の向上を図り、医療に貢献してがんによる死亡を減らし公共の福祉に貢献するとともに、我が国工業技術社会及び産業経済の健全な発展に寄与することができる。

部位別がん死亡率[2017年]



最新がん統計[国立がん研究センター がん登録・統計]  
[https://ganjoho.jp/reg\\_stat/statistics/stat/summary.html](https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html)

図 1 日本人のがん死亡率

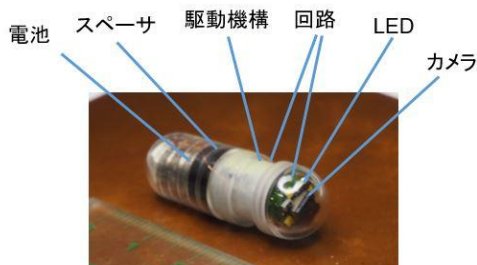


図 2 カメラ搭載カプセル



開発する球面レンズ部

図 3 カプセルボディ

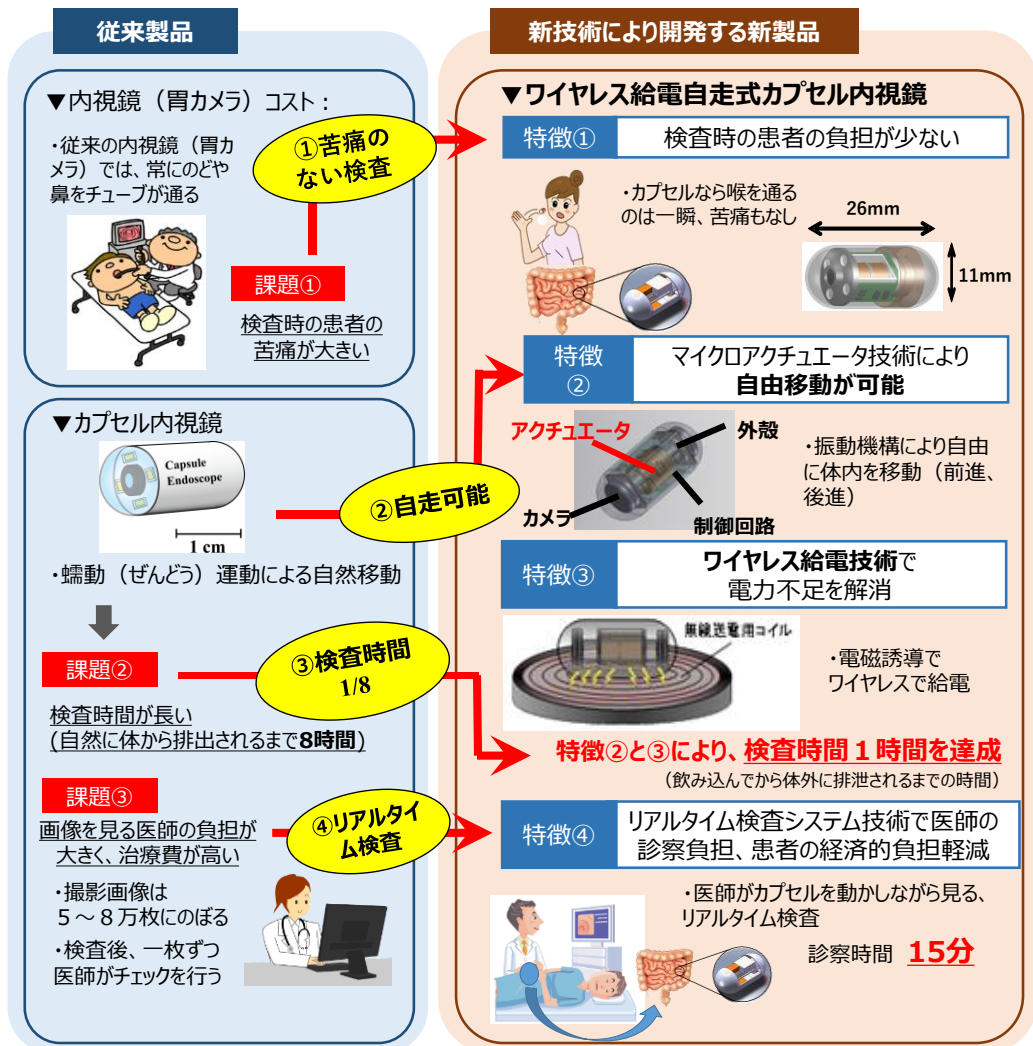


図4 自走式カプセル内視鏡と従来技術との比較

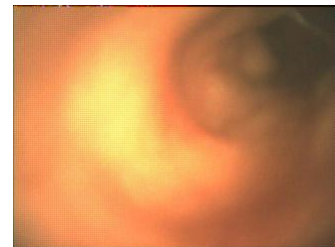
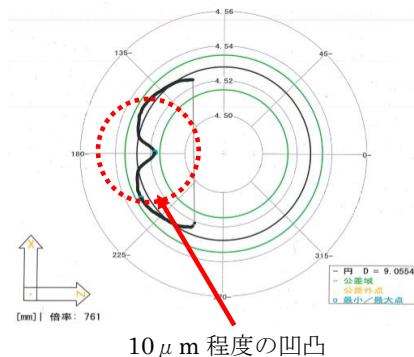
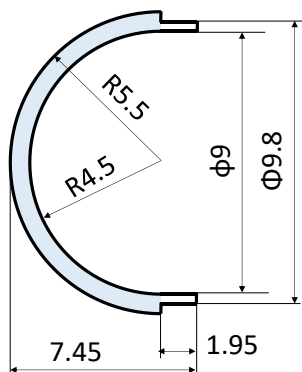


図5 カプセル先端ドーム形状（断面図、単位 mm）

図6 形状測定結果グラフ

図7 イヌの腸内をカプセルカメラにより撮影した画像



図8 球面レンズ部を通したテストパターン画像



図9 改良球面レンズ部を通した画像

### 3. 研究・開発の実施計画

- ・ 自走式カプセル内視鏡用の樹脂ボディ用金型加工、成形技術を実用化する
- ・ 医療診断品質の画像が撮影できるレンズ部分を 2024 年 12 月までに実現する

自走式カプセル内視鏡試作品を開発してきたが、医療機関から、電送画像が不鮮明で、現状品では医療現場で使用することは難しいとの評価を受けた。光学解析にて原因を調査した結果、現在のカプセル金型のレンズ球面形状の加工精度が不十分であることが分かった。そこで、本提案では、医療機関が満足する高精細な画像が伝送できる、カプセル内視鏡用金型加工技術と射出成形の技術開発を行った。

#### 研究内容及び新規性・独自性

医療機関が納得する高精細な画像を伝送するには、カプセル内視鏡金型の球面レンズ形状を真球面に切削加工し、かつ、表面粗さを鏡面に加工する必要がある。

本提案では以下の5つの要素について金型加工・成形技術の高度化開発を行う。内容について、以下に示す。

#### 【開発1】真球面形状に加工する技術の開発

##### 目標値：形状精度 1 ミクロン(1/1000mm)以下

試作開発段階では、一般的な加工法である CNC 工作機械を使用して超合金製切削加工工具で同時二軸制御による金型の球面レンズ形状の加工を行った。設計上の仮想真球面レンズ形状に対して、形状精度が約 10 ミクロン程度の形状のずれがあることが分かった。この加工方法では、加工する球面レンズ形状に沿って、超合金製切削加工工具切れ刃の先端Rの加工点が移動しながら加工していく加工法である為に、切削加工工具先端Rの形状精度が加工結果に影響しやすく、真球面形状に加工することが難しい加工法であるという問題があった。

高精度な球面レンズ形状を加工するには、切削加工工具の先端R形状精度の影響を受けない加工技術を開発する必要がある。

そこで、本提案では、カプセルの球面レンズ形状に対して、切削加工工具の先端Rの一

点だけで加工する**同時三軸制御**加工技術と加工条件を開発する。

これにより、工具先端Rの形状精度に影響を受けない。また、**ナノメーター精度(1/100万分mm)**を持つ超高精度加工機械を使用して加工することにより、

機械精度の転写加工が可能となり、**形状精度1ミクロン以下**の真球面形状の加工を実現する。同時2軸制御加工と同時3軸制御加工の比較及び加工イメージを図10, 11, 12に示す。真球面形状に加工する技術の開発は、九州工業大学と株式会社ワークスにて実施した。



図10 同時2軸制御加工イメージ図



図11 同時3軸制御加工イメージ図

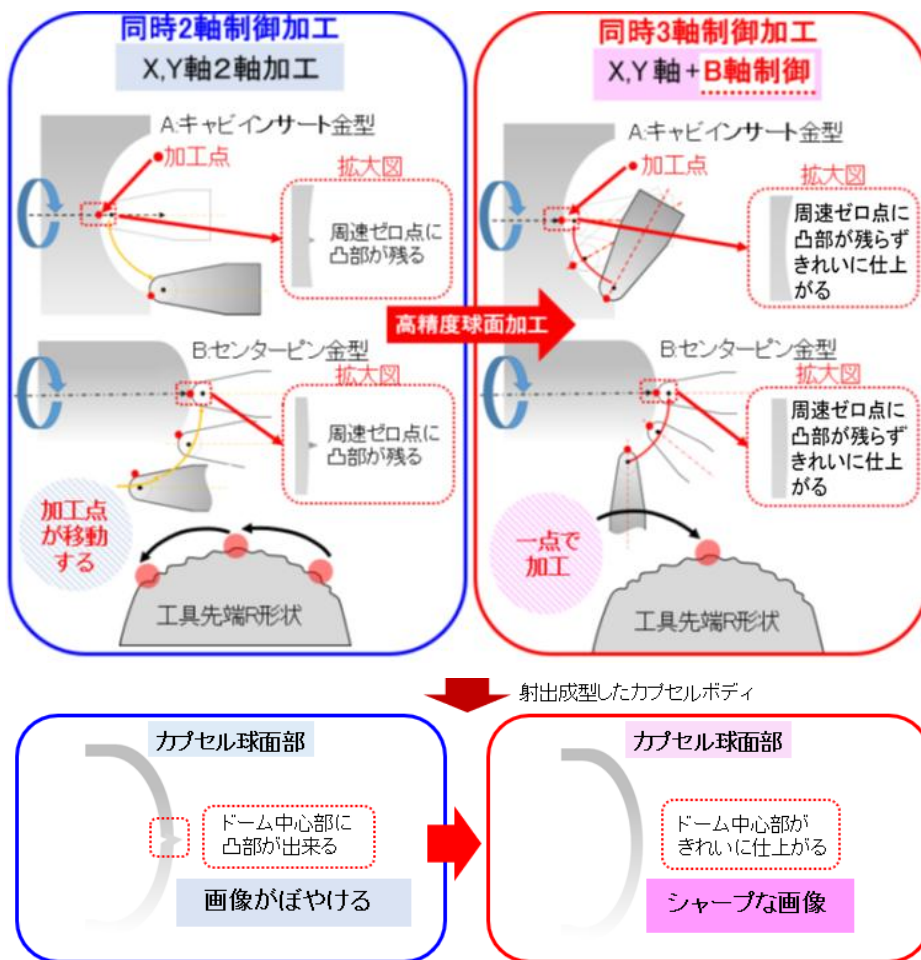


図12 本事業で研究開発する微細加工方法とその効果

## 【開発2】金型球面レンズ形状の鏡面切削加工技術の開発

### 目標値：金型表面粗さ Rz0.5 ミクロン以下

試作品を製作した金型は、SK 材を使用し加工し、表面粗さ Rz2 ミクロンの表面粗さであった。光学解析技術により検証したところ、医療機関が求める鮮明な画像を映し出すにはカプセル金型の球面レンズ部の表面粗さを Rz0.5 ミクロン以下に加工する必要があることが分かった。

そこで、金型球面レンズ形状を鏡面切削加工する技術開発を行う。

試作品開発では超硬合金製切削工具を使用し、SK 材に対して、球面レンズ形状を加工したが、本提案では、より美しい表面粗さの切削加工が得やすく、切削性能に優れた単結晶ダイヤモンド工具を使用し、STAVAX（注1）材料に対しての金型加工条件の開発を行った。

注1：STAVAX 材料について

ウッデホルム社（スウェーデン）が開発したプラスチック金型用鉄鋼材料。クロム合金ステンレス工具鋼。耐食性能、耐摩耗性能に優れ、表面を美しく鏡面状態に加工できる材料として、高精度光学プラスチックレンズ金型の加工等に使用されている。

・実用化の際、想定される技術分野並びに用途、製品

自走式カプセル内視鏡およびシステム、手術支援ロボット用カメラシステム、内視鏡手術支援カメラシステム。

・概要のポンチ絵

本研究開発が対象とする金型で成形するカプセルを図2に示す。球形ドーム内に超小型カメラを収め、消化管内にて撮影をしながら自走する。しかし、得られた画像がぼやけていることが課題として明らかになり、形状を精密測定したところ、図5の真球状に設計形状に対し、実際のドームは図6に見られる表面の凹凸が生じていて、画像に影響を及ぼしていることが原因であることが判明した。カプセル内のカメラから取得したテストパターン画像を図8に示す。金型加工精度を上げ、図15に示すセンターピン、図16に示すキャビン挿入部、いずれも加工寸法誤差を2 μmに抑え、これらを用いて成形したカプセルドームも、10 μmあった中央凸部を数 μmに抑えることができた。上記成形したカプセルを通して撮影したテストパターンを図9に示す。以前に比較し高精細な画像が得られ、カプセルカプセルドームの形状精度が画像に影響を与えることが判明した。これは金型加工時に生じる、工具中心の回転速度が0であることに起因する問題であり、本研究によって同時3軸制御を適用し凹凸の無い球面形状加工を実現し、解決し、さらに高精細な画像取得を目指す。金型球面レンズ形状の鏡面切削加工技術の開発は、株式会社ワークスにて実施した。

## 【開発3】金型における離型性向上技術の開発

金型の、レンズ部分以外に、マイクロショットブラスト加工を施し、離型性を向上させた。カプセル凹凸入れ子金型形状に対し、コーティングレスで高精度なカプセルレンズを製作するための金型技術を開発する。九州工業大学と株式会社ワークスにて実施した。

- ・半球面の凹凸形状は、入れ子金型を超精密に加工することで、金型成形時の密着性が非常に高まり、離形性能が低下する傾向がある課題があり、変形しやすい問題が生じた。
- ・レンズ金型では、通常、Ni-P コーティングで離形性能を高めているが、カプセルは、医療用なので、この技術は使えない。ニッケルが人体に安全とは言い難いからである。
- ・今回の金型開発では NiP コーティングをしない超精密金型で高精度なカプセルを開発した。

#### 【開発4】難成形薄物樹脂の最適成形条件の確立

カプセルの樹脂壁は 0.5mm と薄く、最薄箇所は 0.2mm である (図 17) 。設計通りに成形するための諸条件を求め、成形材料は、医療グレードで透明なポリカーボネートを使用している。流動性は高くない。このため、金型の端の最薄部に樹脂が入らない問題がある (図 18) 。成形条件、金型形状、部品形状を工夫して、設計通りの形状に成形する条件を求めた。具体的には、流動解析ツール Moldex3D を用いて樹脂の挙動を可視化し、細部まで樹脂が回り込める圧力、温度、金型形状を計算機上の試行錯誤により求めた。計算機解析は九州工業大学にて実施し、成形トライ、実験は株式会社ワークスにて実施した。

#### 【開発5】カプセルボディ光学性能の評価

カプセルボディのドーム形状を、株式会社ワークスにての成形後、3次元測定器を用いて測定し、中心凸部が 1  $\mu$  m以下に収まっていることを確認した。さらに、超小型カメラモジュールをカプセル中央に設置し、画像を取得してテストパタンの解像度をピクセル単位で比較し、画質向上の測定を実施した。数値目標は、病変が識別可能となる 200dpi を目安とする。光学性能カメラ画像評価は九州工業大学にて実施した (図 13) 。



図 13 カプセル用超小型カメラを用いたテストパターン撮影

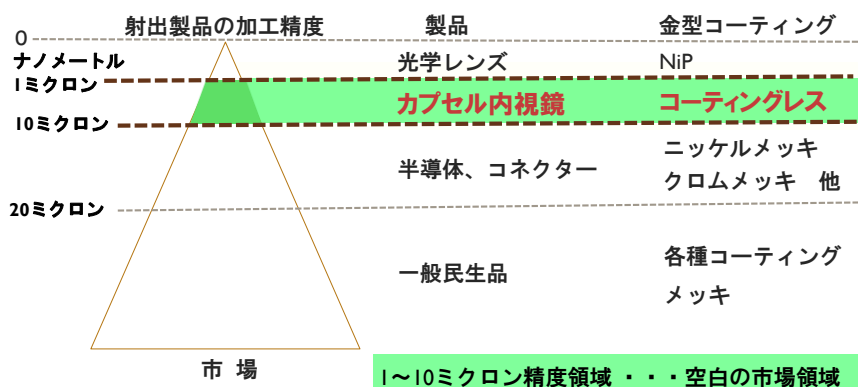


図 14 プラスチック成型金型の市場と幾何公差

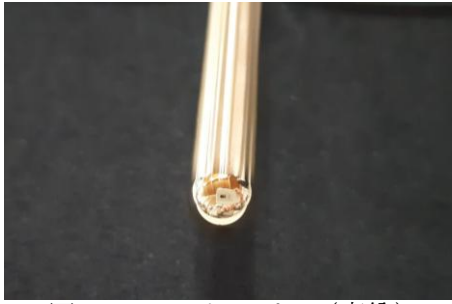


図 15 センターピン (真鍮)

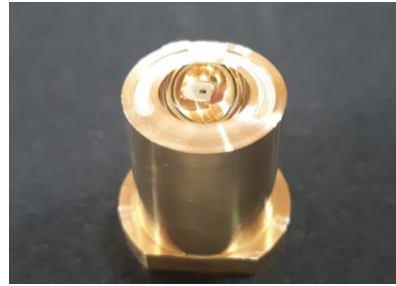


図 16 キャビンサート

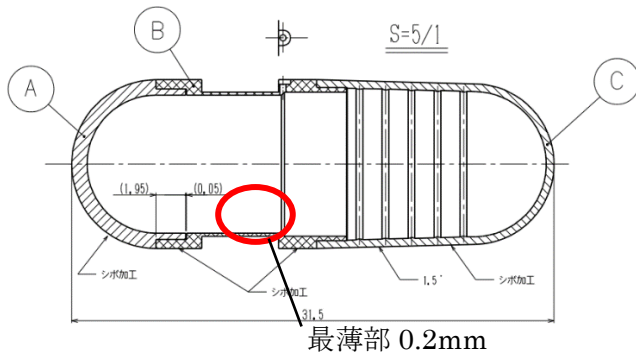


図 17 カプセル断面図と最薄部

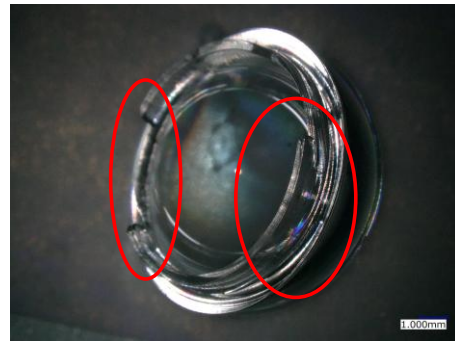


図 18 成形したレンズ部分  
端部へ材料が回らない

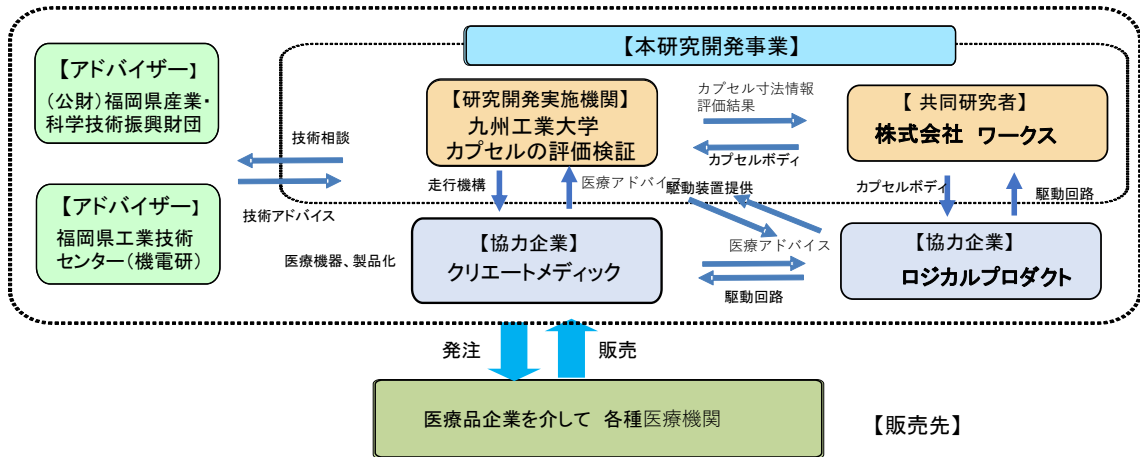


図 19 事業体制



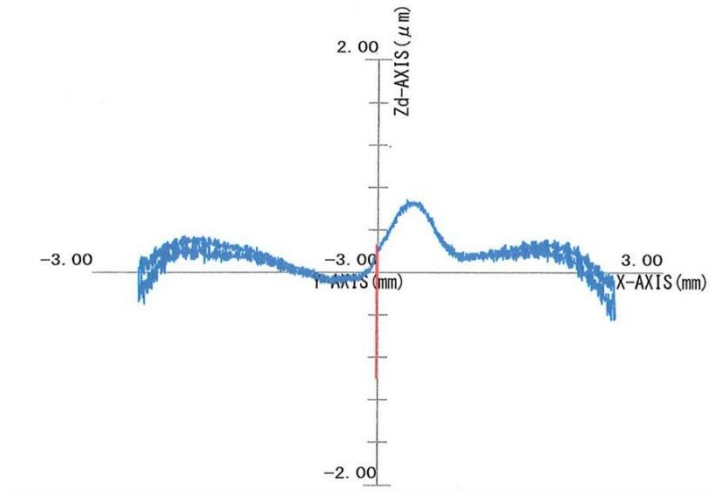


図 20 カプセルボディ 中心凸部形状測定結果 (凸部  $0.5[\mu\text{m}]$ )

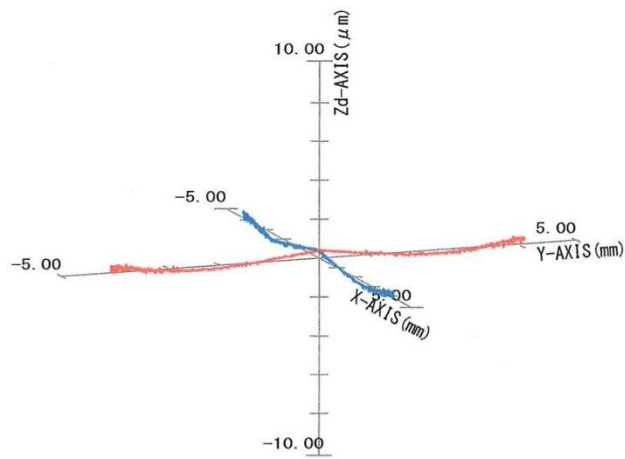


図 21 金型形状精度 (P-V 値:  $0.85[\mu\text{m}]$ )

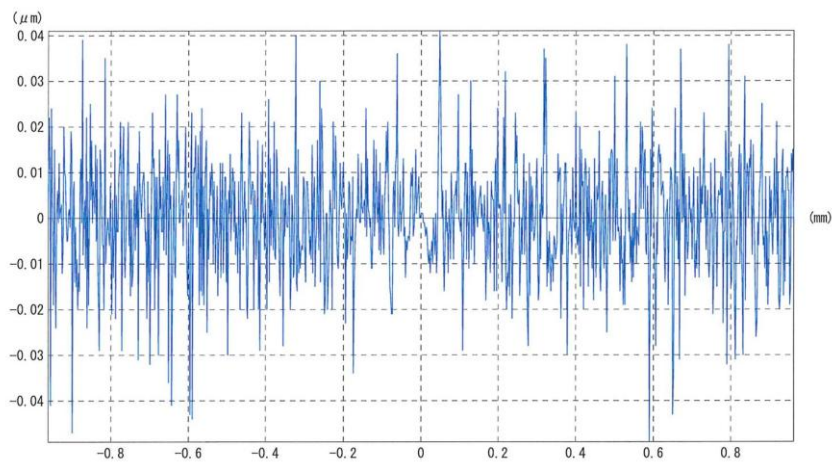


図 22 金型表面粗さ (Rz) 測定グラフ (Rz:  $0.06[\mu\text{m}]$ )

## 5.2 光学性能評価

自走式カプセル内視鏡用のカプセルボディを、設計、金型製作、射出成形して、超小型カメラによる解像度評価を定量的に行った。

今回、同時3軸制御加工技術と成形技術により、カプセルドーム中心の凸凹を当初の  $10\mu\text{m}$  から、今回の目標値  $1\mu\text{m}$  以下をもさらに凌駕する  $0.5\mu\text{m}$  以下に収めることに成功した。従来、カプセルドームを通して撮影した画像は、目視では明らかに鮮鋭度が向上しているものの、この差を数値化することが課題であった。

そこで、光学機器メーカーに勤めている技術者達に相談して、説明を受け、業界標準の手法にて数値化した。

その結果、当初のカプセルボディを用いた画像解像度が、約 950 本であったのに対し、改良したカプセルボディでは約 980 本と、約 30 本の向上が数値としても得られた。なお、ボディを介さず撮影した画像の解像度は約 1000 本であり、ボディを介することによる解像度劣化も抑えられていることがわかった。

### 5.2.1 測定方法

本実験ではカプセルボディを介して撮影した画像の解像度評価を行うために、解像度チャートを使用し、PC 内臓の Web カメラにカプセルを取り付けて撮影・評価を行なった。実験環境は、図 23 に示す。



タブレット型の PC 内臓 Web カメラにカプセルボディを張り付けて、テストチャートを撮影した

図 23 解像度測定実験系

使用したノート PC(富士通 LifeBook)内臓 Web カメラは 90 万画素タイプであり、自走式カプセル内視鏡に使用しているカメラモジュールの 30 万画素を上回るのので、評価用には十分と考えた。他に、医療用内視鏡、工業用内視鏡、スマートフォン内臓カメラなど、カプセ

ルボディを通して撮影可能な超小型カメラによる撮影を試したが、PC内臓 Web カメラによる画像が最も鮮明であったため PC カメラを用いた。

測定には撮影用のノート PC、PC を支える器具（万力）、解像度チャート、チャートを張り付け垂直に立てるためのホワイトボードを使用した。ホワイトボードに張り付けた解像度チャートを図 24 に示す。図は ISO 12233 準拠の解像度チャートです。撮影した画像をもとに解像度計算するソフトウェアは OM デジタルソリューションズ株式会社提供の HYRes IV 解像度測定用ソフトウェア(OM デジタルソリューションズ株式会社)を使用した。

撮影方法は次の通りである。ノート PC は図 23 のように器具で押さえて立て、カプセルは図 23 のノート PC のキーボード面にある内側 Web カメラに両面テープで張り付けた。ノート PC カメラ面から解像度チャートまでの距離は 32 cm とした。撮影は、

- ・カプセルなし(以下ノーマルと示す)
- ・従来のカプセル(以下旧カプセルと示す)
- ・今回新しく作成したカプセル(以下新カプセルと示す)

の 3 種類で 20 枚ずつの撮影を行なった。

解像度測定では図 25 に示す部分を測定した。また、目視による評価も行なった。

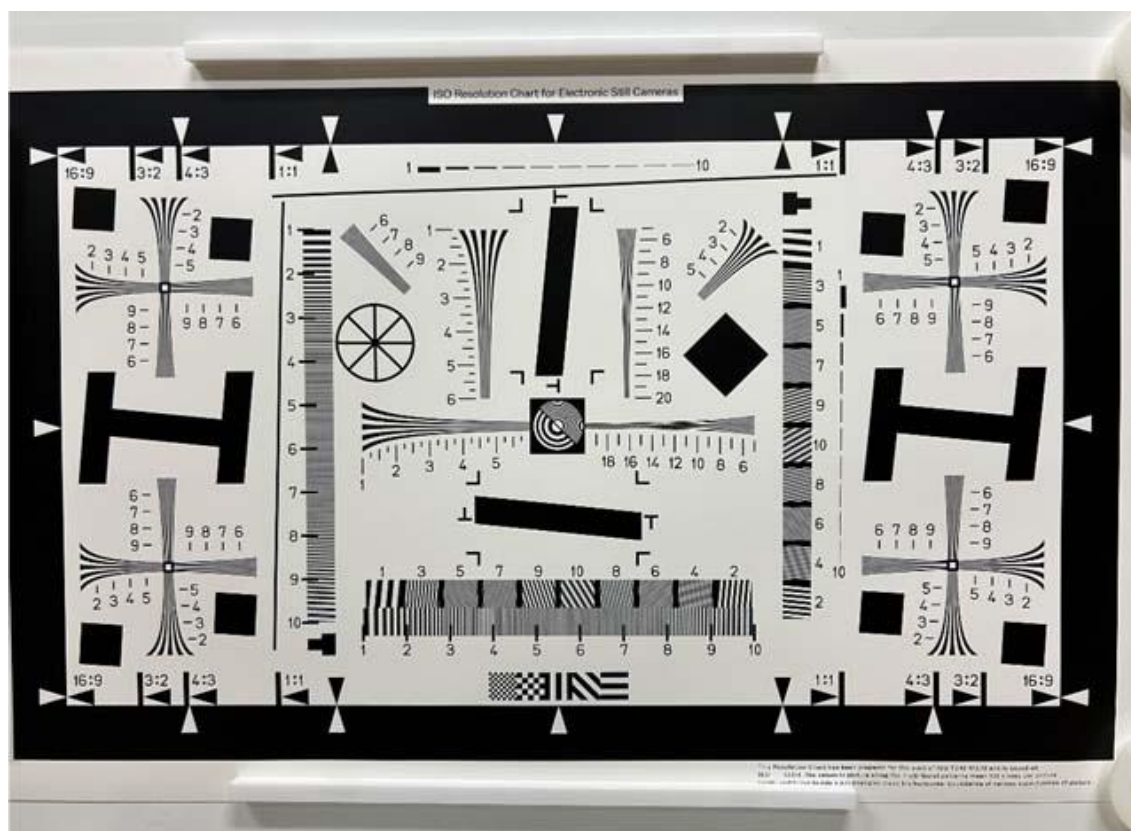


図 24 解像度チャート

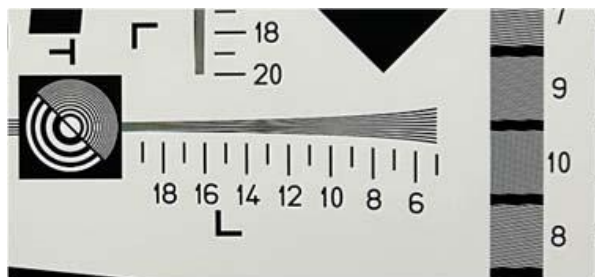


図 25 チャート内で解像度計算に使用した箇所

## 5.2.2 解像度の数値化結果

### (A) 限界解像度の測定結果

限界解像度の測定結果を示す。測定結果にはばらつきがあるため、分布をヒストグラムに示し、中央値で比較した。

ノーマル（カプセルなし）の結果としては解像度の値は、1000 本前後となった。旧カプセルと新カプセルの結果を表 3, EXCEL を使用しヒストグラム化し中央値を算出したものをそれぞれ図 26 に示す。図 26 よりそれぞれの中央値は旧カプセル 950 本, 新カプセル 980 本が得られた。

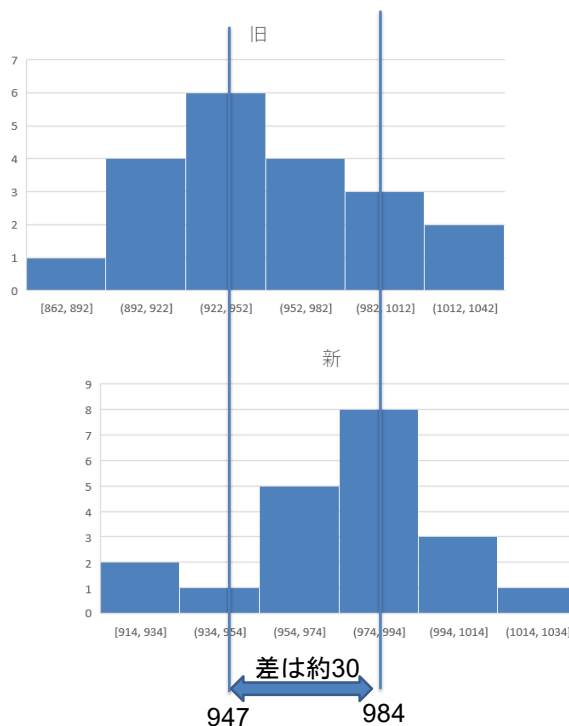


図 26 解像度測定結果の分布ヒストグラム(EXCEL 使用)と各中央値

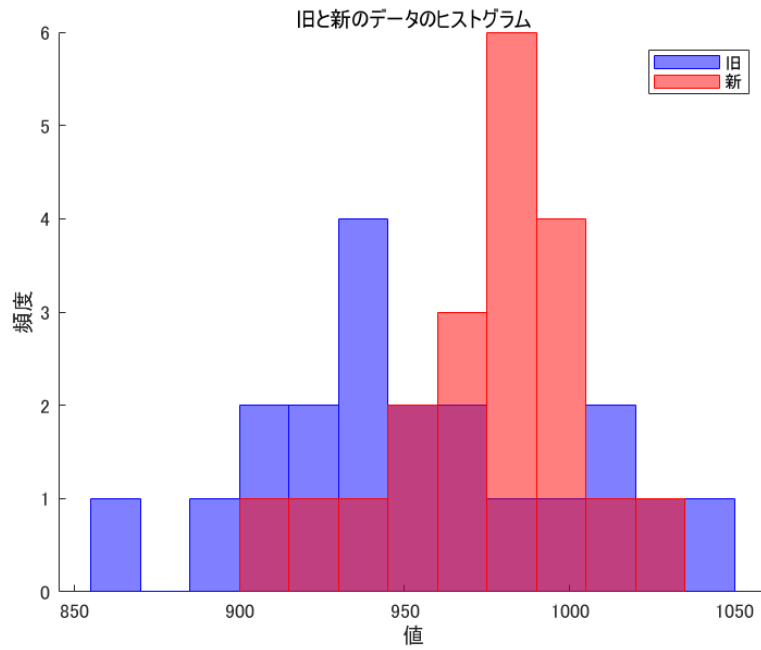


図 27 測定結果のヒストグラム (MatLab 使用, 重なり部はエンジ色)  
 (横軸のデータ区切りの範囲 (幅) が異なるため, 図 26 とは縦軸頻度の値も異なる)

表 3 測定結果データ (単位: 本)

番号	旧	新
1	963	914
2	943	936
3	956	1032
4	911	1012
5	862	923
6	946	970
7	1006	983
8	895	982
9	1036	985
10	937	996
11	927	986
12	999	958
13	1020	979
14	970	972
15	1011	1001
16	939	986
17	977	994
18	918	958
19	939	994
20	911	968

(B) 目視評価

旧カプセルと新カプセルによる撮影画像を図 28, 29 にそれぞれ示す. 図 28 と図 29 を比べると新カプセルの図 29 の方が黒と白の境界線がはっきり見える. 特にチャート周辺部で白黒境界部の差が顕著である. また図 28, 29 の中央部分を拡大したものを図 30, 図 31 に示す. 図 30 と図 31 を比べると, 中央の同心円細部の比較で, 図 30 は白黒がはっきりしなくなる部分が中央から近い位置から始まるとわかる.

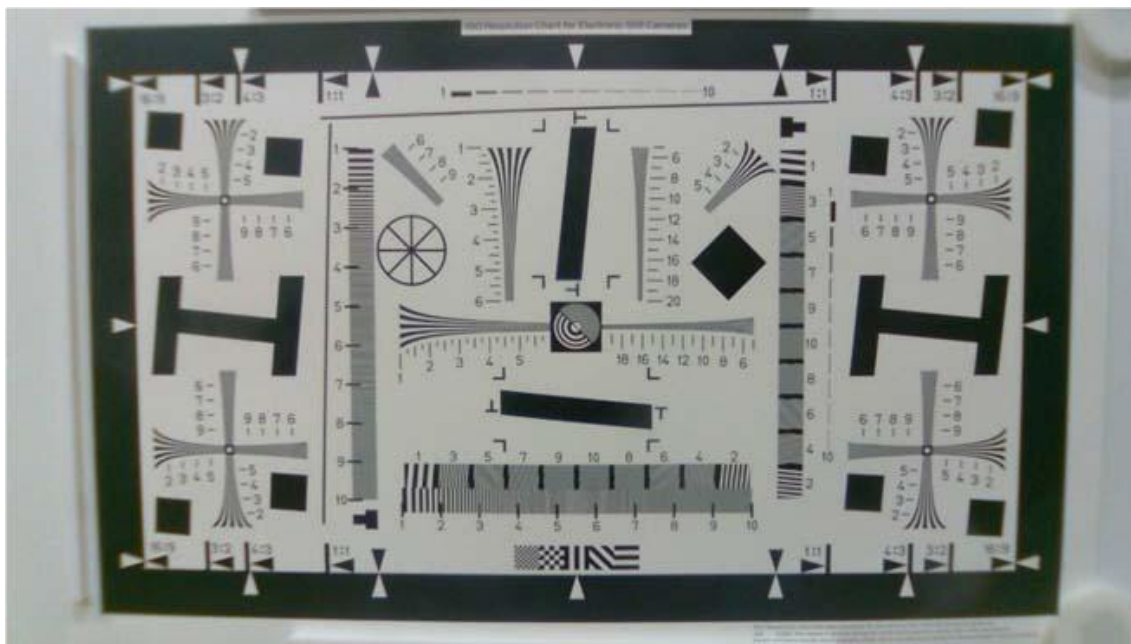


図 28 旧カプセルから撮影した解像度チャート

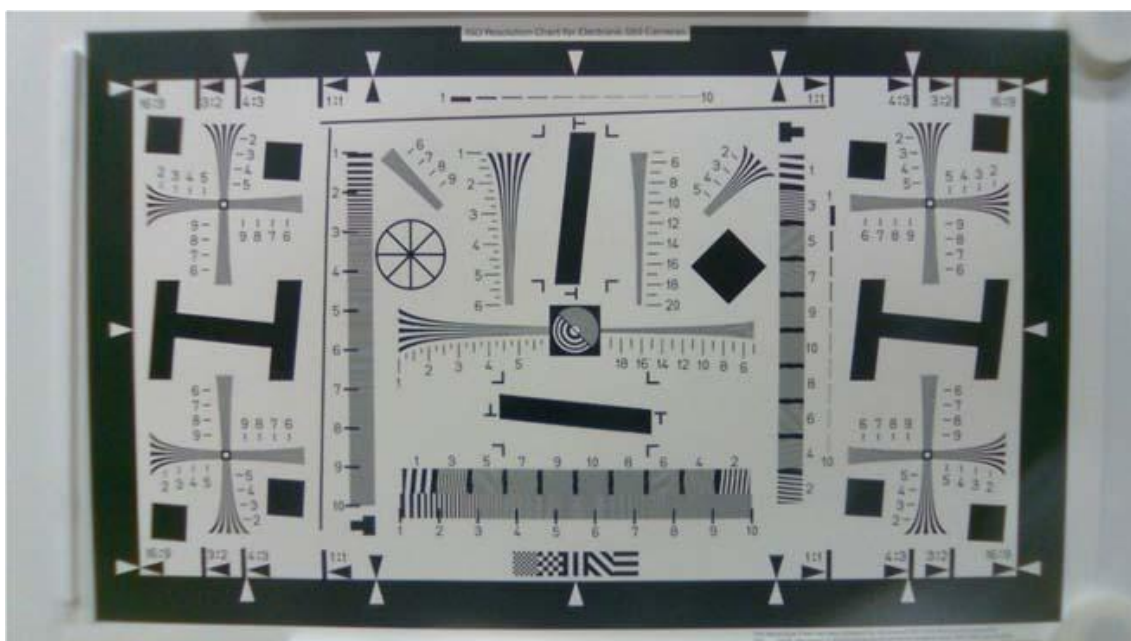


図 29 新カプセルから撮影した解像度チャート

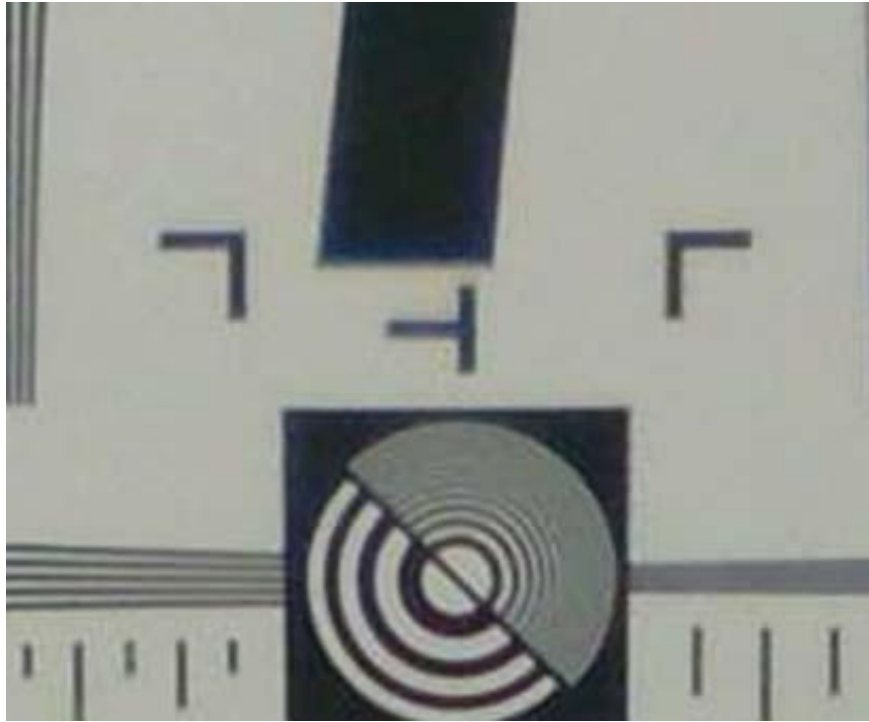


図 30 図 28 の中央部拡大 (旧カプセル)

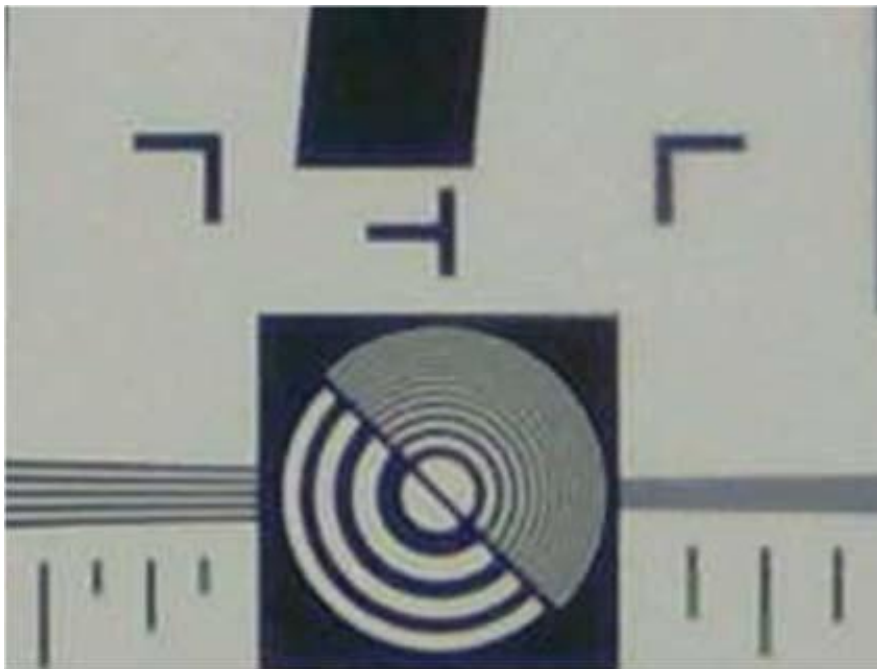


図 31 図 29 の中央部拡大 (新カプセル)

(C)考察

実験結果の図 30 と図 31 を見比べると、旧カプセルでは中央部分とみられる箇所がぼやけている。腸内画像がぼやけたのと同様、旧カプセルの中央部突起 ( $10\mu\text{m}$  高さ) の影響と考えられる。新カプセルではわずかな突起も無く製作されているた

め、はっきりと写っていると考え。また、図 28 と図 29 を見比べると新カプセルのほうが白と黒の境界部分がはっきりと写っている。これは実験結果のグラフである図 26, 27 より、旧カプセルと新カプセルの限界解像度の中央値が 30 本の差が反映している。

今回は実験のしやすさから、PC の内臓 Web カメラで撮影を行なった。PC カメラは 90 万画素であり、カプセル内臓カメラモジュールの 30 万画素に比べれば解像度は上回っているため、カプセル内臓カメラモジュールで撮影した際の結果をカバーできていると考え。

### 5.2.3. 光学性能評価まとめ

解像度チャートを用いて、旧カプセル(従来のカプセル)と新カプセル(新たに作成したカプセル)による撮影画像を比較して数値化、評価した。限界解像度は旧カプセルより新カプセルの方が 30 本上回る結果を得た。また、目視による評価においても旧カプセルでは中央部分がぼやけていたことから、新カプセルの方が鮮明に映ることが確認できた。

### 5.2.4. 参考文献

・OM デジタルソリューションズ株式会社 無償提供解像度測定用ソフトウェア HYRes IV/OM デジタルソリューションズ株式会社/[CIPA 一般社団法人カメラ映像機器工業会: 解像度測定用ソフトウェア HYRes IV](#)

上記ソフトウェアを用いて、チャート撮影画像の解像度計算を行うと、結果が右図のように表示されます。本文では、この結果の数値を用いて、表 3, 図 26, 27 を作成した。



## 6. まとめ

自走式カプセル内視鏡ボディの光学性能を向上するために、金型加工の精度目標を定めて達成し、成形品の表面平滑性、精度を得た。具体的には、金型加工に、同時三軸制御による手法を応用し、工具の回転中心が低速であることによる加工ムラのない、設計通りのレンズ形状を実現した。この結果、中心凸部の凸凹誤差が従来の 1/20 で目

標の半分以下、表面粗さ値も目標の 1/10 と、目標を遥かにクリアする達成値となった。さらに、カプセル内視鏡画像として定量的に評価する手法を検討した。具体的には業界標準テストチャートを用いた評価法により、当初のカプセルボディを用いた画像解像度が、約 950 本であったのに対し、改良したカプセルボディでは約 980 本と、約 30 本の向上が数値としても得られた。この結果、工作精度が画像解像度の向上に反映できたことを、目視による画像の面のみならず、定量的にも確認した。

7. 過去の研究成果など（過去 5 年間で研究論文や研究発表、題名、年次、その概要等）
1. “Impulse-driven capsule for medical inspection,” Hiroyuki ICHIKI, Kenta ASAI, Shotaro WATANABE, Takahiro ITO, Sunao MURAKAMI; ICPE2018, C-2-1, CD-ROM (2018).国際会議論文, 査読有, (概要) 消化管内を傷つけることなく走行できるカプセルを研究開発した。振動により走行する。走行速度を最大にするための条件を、計算機解析により求め、実験により確認した。
  2. “Impulse-driven Capsule for Medical Inspection,” Yuichiro KAWASHIMA, Kenta ASAI, Shotaro WATANABE, Takahiro ITO, Sunao MURAKAMI, Kaoru KARASAWA, Chihiro KATSUTA, Akane TANAKA, Hiromu KUTSUMI; ICPE2020 Nov.23(Mon.)-27(Fri.),2020. 国際会議発表論文, 査読有, (概要) 本論文は、患者と医師双方の負担を減らすべく、体内を傷つけずに走行できるカプセル内視鏡を、制作・評価したものであり、世界で初めて、生きたイヌの腸内で走行させ映像で確認実証した。カプセルによる腸内画像撮影および画像無線伝送にも成功した。
  3. “Impulse-driven Capsule for Medical Inspection -Improvement of Drive Mechanism-,” Koki KOIZUMI, Koki IWASHITA, Takahiro ITO, Sunao MURAKAMI, Toshihiro KIMURA, Kaoru KARASAWA, Chihiro KATSUTA, Akane TANAKA, Hiromu KUTSUMI, ICPE2022 Nov.28(Mon.)-Dec.2(Fri.),2022. 国際会議発表論文, 査読有, (概要) 本論文は、自走式カプセル内視鏡のボディ形状を工夫することにより、従来に比べ約 50%走行速度を向上した。力学モデルによる解析と実機を用いた走行実験により効果を確認した。
  4. “自走式カプセル内視鏡の研究 - 無線給電と動物実験 - Research on Impulse-Driven Capsule Endoscopy -Wireless Power Transfer and Animal Experiments-,” 岩下 広樹, 伊藤 高麿, 村上 直,木村 俊広,唐澤 薫, 勝田 ちひろ, 田中 あかね,久津見 弘, 2021 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.385-386, 2021. (概要) 自走式カプセル内視鏡用に、ワイヤレス給電技術を研究開発し、動物実験によりその有効性を確認した。実験では、生きたイヌの腸の中でカプセルが走行できることを確認し、最適な給電コイル配置を求めた。