

# シールド機長寿命化ビットの開発

阿曾 利光

正会員 清水建設株式会社土木技術本部技術開発部（〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3 シーバンス S 館）

シールド機は、前面のカッターにビットを装備し、カッターを回転させながらビットで地山を切削して土砂をシールド機内に取り込んでいる。常に地山に接触しているカッタービットは、一定距離を掘進すると摩耗や欠損が発生する。このため長距離のシールド工事やビットの摩耗が激しい礫地盤ではカッタービットの交換作業が必要であった。

耐摩耗性の高いカッタービットは製造上の課題から製作が困難であったが、耐摩耗部材の配置見直しなどにより、従来の3倍の長距離掘進が可能な「長寿命化ビット」を開発した。

**キーワード：** 長距離シールド、高速施工、長寿命化ビット、耐摩耗性

## 1. はじめに

近年、シールドトンネル延長は環境条件や経済性から長距離化が図られている。この長距離化に対し、シールド工事は工期短縮のため高速施工が求められている。

従来、長距離シールド工事では、カッタービット交換作業のために多くの日数を必要としていた。このため、様々な機械的ビット交換技術が提案されてきたが、シールド機に大きな装備を付加させるため、シールド機コストの大幅な増加が課題であった。

これらの課題に対し、特殊な装置を用いず、切削ビットの素材である超硬合金製チップの組み合わせや製作行程等を見直しすることによって、ビット自らの寿命を延ばし、長距離掘進に対し交換を必要としない「長寿命化ビット」を開発したので概要を報告する。

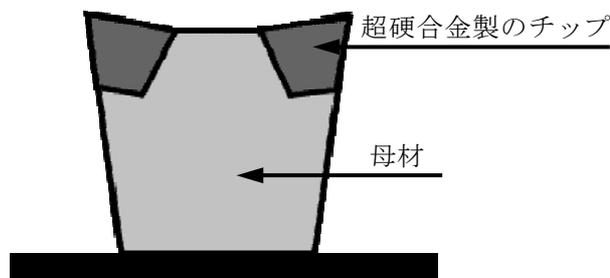


図-1 カッタービットの構造

表-1 JIS 鉱山工具用超硬チップ規格値

記号	硬度 (HRA)	抗折力 (N/mm <sup>2</sup> )
E1	90 以上	1200 以上
E2	89 以上	1400 以上
E3	88 以上	1600 以上
E4	87 以上	1700 以上
E5	86 以上	2000 以上

## 2. 長寿命化カッタービットの概要

カッタービットは、一般鋼材の母材部分と先端部分に配置する超硬合金製のチップから成り立っている。超硬合金は物性値により E1 から E5 の記号で表され、数値が小さい程、硬度は高くなるが抗折力は低下する。従来のシールド機に用い

るチップは、耐摩耗性と耐衝撃性を考慮して、主に E5 材（まれに長距離軟弱地盤で E3 材）を採用していた。図-1 にカッタービットの構造、表-1 に鉱山工具用超硬チップ規格値を示す。

今回開発したビット技術は、超硬合金製チップを組み合わせ、緩衝材となる比較的軟らかい超硬合金を素材性状に応じて配置することにより、

従来のシールド機では使用できなかった硬い超硬合金製チップ材（E2材）の採用やチップの大型化を可能とした。当技術で製作したビットは、従来ビットに比べ3倍以上の耐摩耗性を有することを、実証実験を行い確認した。

表-2 チップ材料物性値

材 料	材種	ヤング率 kgf/mm <sup>2</sup>	線膨張係数 /°C
母 材	SKC24	22,000	13.79×10 <sup>-6</sup>
超硬合金 チップ	E 3	59,500	5.0×10 <sup>-6</sup>
	E 5	55,500	6.0×10 <sup>-6</sup>

### 3. 長寿命化への技術的課題

カッタービットは、先端に超硬合金製チップを取り付けて地山切削時の摩耗を減らす。ビットの長寿命化を実現するには、耐摩耗部材であるチップをより硬くすることと、大型化が考えられる。

しかし、硬いチップは耐摩耗性が良いが、抗折欠損性が低い。また、ビット製造過程においても、より硬いチップや大型化したチップの母材への接合は、チップ接合に必要な加熱により接合歪が大きくなり困難であった。

ビットの母材となる鋼材と超硬合金チップの接合は、加熱して行う「ろう付け溶接」によるが、それぞれの材料の線膨張係数が大きく異なり、接合後の熱残留応力により、有害クラックの発生や場合によってはチップ破損の恐れがあり、長寿命化に必要なより硬い超硬合金の使用や、超硬合金チップの大型化には限界があった。表-2 にチップ材料物性値を示す。

### 4. 長寿命化ビットの構造

シールド機は、切削土砂を取り込むメインビットに対し、そのメインビットの軌跡上にそのビットより高く先行ビットを配置することが多い。

先行ビットは、メインビットに対して地山を先掘するため、メインビットの負担は低減される。先行ビットが磨耗限界を迎えるまでは、メインビットは先行ビットにより保護される。ビットの開発にあたり、開発対象として上記の機能から、切削性能への影響が大きい先行ビットとした。図-2 にカッタービット配置例を示す。

先行ビットは、メインビットに比べより耐衝

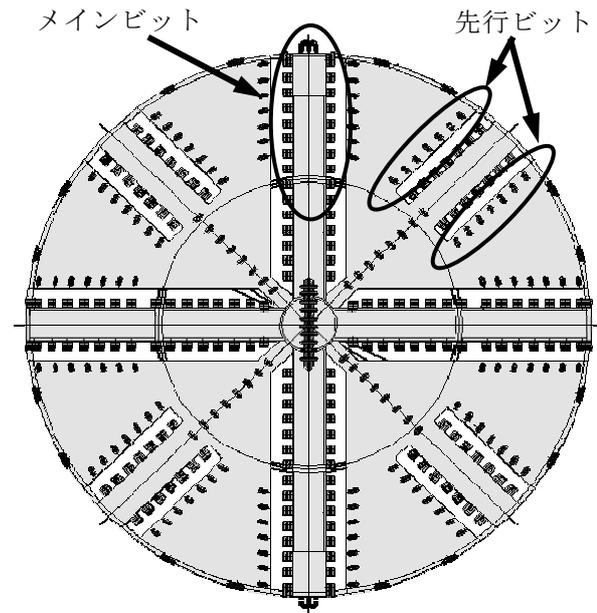


図-2 カッタービット配置例

撃性が求められる。開発するビット構造は、耐衝撃性と製造時の課題を解決するため、以下の項目で対応した。

- ① 硬度の高いチップを採用し、衝撃を受ける部分に硬度が比較的低いチップを組み合わせで使用する
- ② 構造母材となる鋼材と超硬合金チップ材の間に、緩衝材となる軟性超硬合金を適正配置する

チップの組み合わせにより、従来と同等の耐衝撃性を確保しながら従来以上の耐摩耗性を実現し、軟性超硬合金の配置により、ビット製造後の熱残留応力の抑制を図った。

開発した先行ビットの構造は、耐摩耗性の高いE2チップを軸に、耐衝撃性の高いE5チップを大型化し、E2チップを包み込んでいる。特に物性

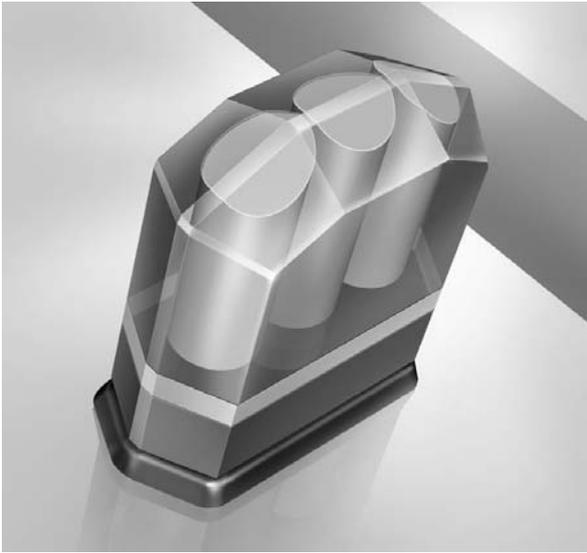


図-3 イメージ図

値の大きく異なる超硬合金と母材との間には、緩衝材となる軟性超硬合金を挟み、「ろう付け溶接」時に発生する残留歪を抑制して大型のビットを製作した。なお緩衝材となる軟性超硬合金は、E6相当の超硬合金で母材と超硬合金の中間の物性値を持っている。図-3 に開発したビットのイメージ図を示す。

### 5. 長寿命化ビットの摩耗係数

ビットの摩耗係数は、超硬合金製チップ材の硬度で決まる。E5 チップに対する耐摩耗比を示すと、E3 チップが2.0倍、E2 チップが3.3倍である。砂質地盤での摩耗係数は、従来使われているE5 チップが  $15 \times 10^{-3}$  (mm/Km(周動距離)) 程である。ビットの種類では、先行ビットの摩耗度はメインビットの1.5倍、また先行ビットの内、強化型先行ビットは通常の先行ビットに対し、逃げ角が無いなどの形状から10%程度摩耗度が高くなる。写真-1にメインビット、写真-2に先行ビット、写真-3に強化型先行ビットを示す。また、表-3に各ビットの砂質土の摩耗係数を整理する。

今回開発した長寿命化ビットの耐摩耗性は、E2 チップの性状に支配されるため、E2 チップの摩耗係数を使うのが妥当と考える。

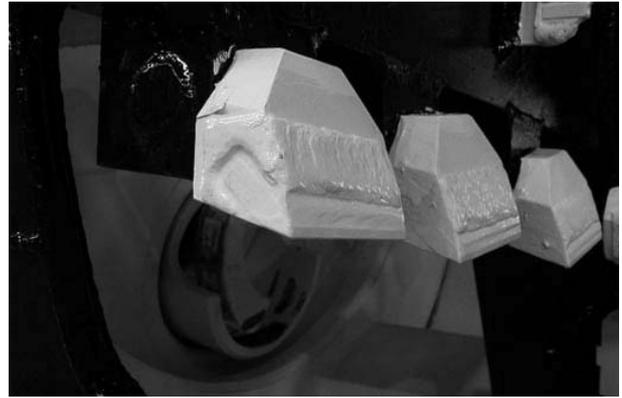


写真-1 メインビット



写真-2 先行ビット

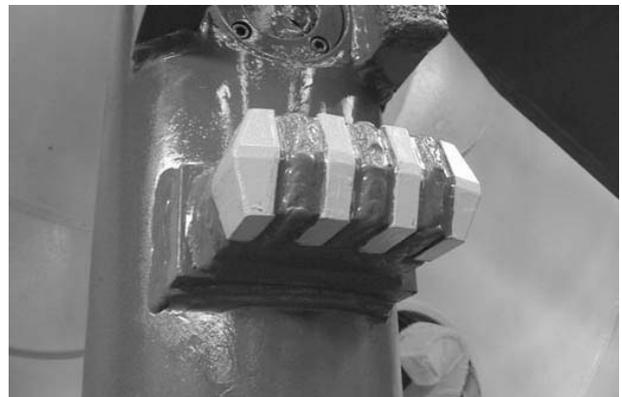


写真-3 強化型先行ビット

表-3 各ビットの砂質土の摩耗係数 単位:mm/km

	E5	E3	E2
メインビット (A)	$15 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$	—
先行ビット (B=1.5A)	$23 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	—
強化型先行ビット (C=1.1B)	$25 \times 10^{-3}$	$13 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$

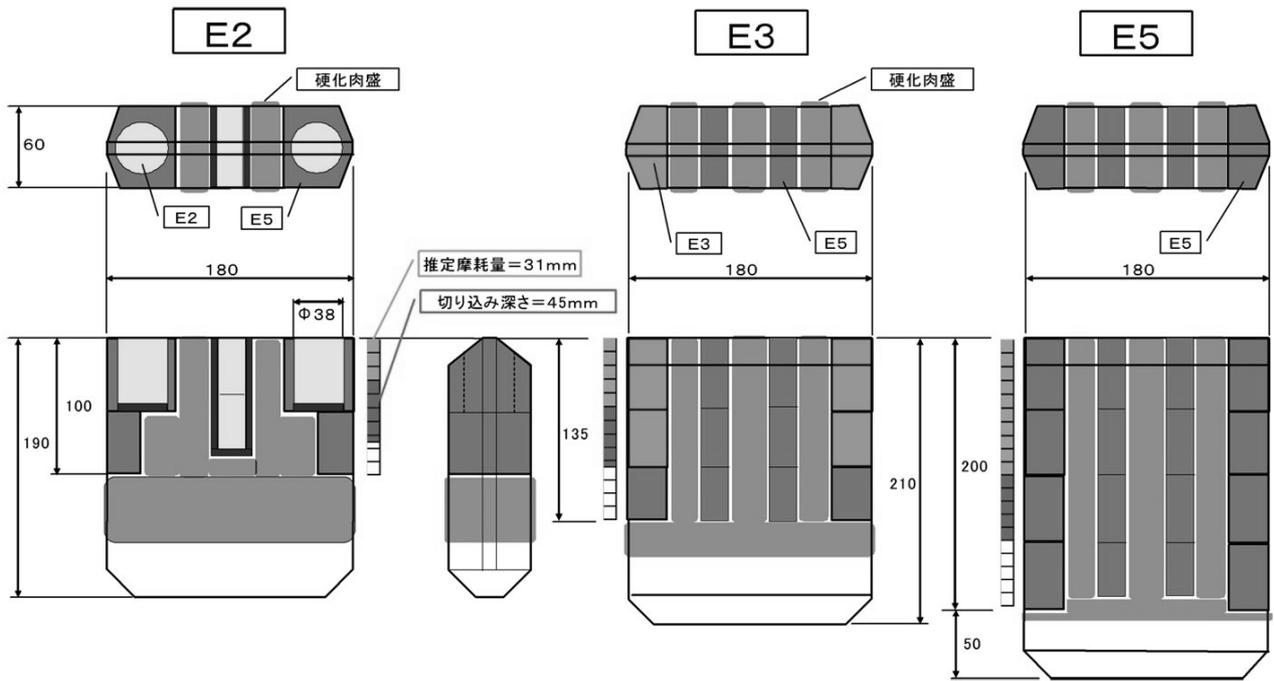


図-4 チップ種類別ビット図

## 6. 長寿命化ビットの経済性

大断面道路トンネルにおける従来ビットとの経済性比較の検討を行った。検討条件は、掘削外径がφ16m、掘削距離は7.5km、掘削地盤は砂質土と設定し、各硬度のビットの摩耗係数からチップ高さを計算した。

- L : 掘進距離 (m) : 7,500
- R : ビット取付け半径 (m) : 8
- V : 平均掘進速度 (mm/min) : 30
- N : カッター回転数 (rpm) : 0.3

とすると周動距離λ (km) は

$$\lambda = 2\pi R L N / V = 3,768 \text{ (km)}$$

E2チップの摩耗係数 $\eta_2 = 8 \times 10^{-3}$  (mm/km)

とすると表23材の摩耗量は砂質土の摩耗係数

$$\lambda \times \eta_2 = 3,768 \times 8 \times 10^{-3} = 30 \text{ (mm)}$$

となる。

同様にE3チップの摩耗量は

$$\lambda \times \eta_3 = 3,768 \times 13 \times 10^{-3} = 49 \text{ (mm)}$$

E5チップの摩耗量は

$$\lambda \times \eta_5 = 3,768 \times 25 \times 10^{-3} = 94 \text{ (mm)}$$

となる。

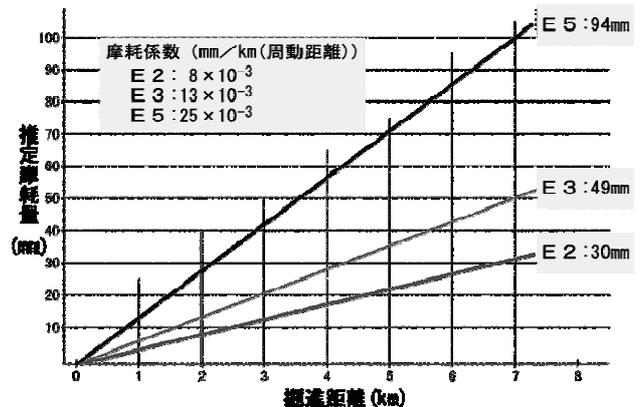


図-5 チップ別摩耗量算定図

ビット高さは、摩耗量+ビットの切り込み深さ+余裕代で求められる。

ビットの切り込み深さは、取り付けたビットの同一軌跡上にビットを2個ずつ配置すると

$$V / N / 2 = 30 \div 0.3 \div 2 = 45 \text{ (mm)}$$

余裕代を摩耗量の約80%と設定した場合のE2チップのビット高さは

$$30 + 45 + 25 = 100 \text{ (mm)}$$

同様にE3チップでは135mm、E5チップでは200mmとなる。図-4にチップ種類別ビット図を、図-5にチップ別摩耗量算定図を示す。

各チップの超合金重量を算出し比較すると、それぞれ1 : 1.3 : 1.9 となる。超合金材料は硬度によるコスト差はあまり無く、従来から使用されたチップ材料で、この高さのビットが仮に製作できるとしても、十分に工事費のコストダウンが図れることがわかる。また、シールド機の機械的交換装置に対しても安価なことは明らかである。

## 7. 開発ビットの試作・実証

E2 チップの摩耗係数は、砂質土における強化型先行ビットの場合  $8 \times 10^{-3}$  (mm/Km(周動距離))、従来のE5 チップの摩耗係数は  $25 \times 10^{-3}$  であり、開発したビットは、従来と同等の耐衝撃性を確保しながら従来ビットの3~4倍の耐摩耗性を有する。これらの性能確認のため、長寿命化ビットを試作り、東京メトロ13号線新宿工区シールド機にビットを装備し、実掘削を行った。写真-4 に試作した長寿命化ビットを示す。

当工区は、新宿三丁目駅と東新宿駅を結ぶ東京地下鉄開発の2本の単線シールドトンネル工事である。

シールド機は、新宿三丁目駅から発進し東新宿駅に到達する。東新宿駅でUターン後、新宿三丁目駅まで戻り、2本のトンネルを築造する。シールド機外径は6.8m、掘削距離は980m(Uターン施工)、掘削地盤は洪積層の粘性土・シルト、玉石混じりの砂質土と多様である。図-6 に路線地質図、写真-5 に掘削土に出現した玉石を示す。

ビットは、シールド機カッター面板の外周側に強化型先行ビットを7列、各列同一軌跡上周囲に8個ずつ配置している。開発した長寿命化ビットは外側から2列目の同一軌跡上周囲に8個を配置した。写真-6 に開発した長寿命化ビットの装備状況を示す。

シールド機発進から980m掘削後の到達時に、長寿命化ビットと従来型ビットの外観目視と摩耗量を計測した。長寿命化ビットの平均摩耗量は4.5mm、従来型の強化形先行ビットは、前後の従来型ビットの摩耗量測定から長寿命化ビットの位置に従来型ビットがあったと想定すると

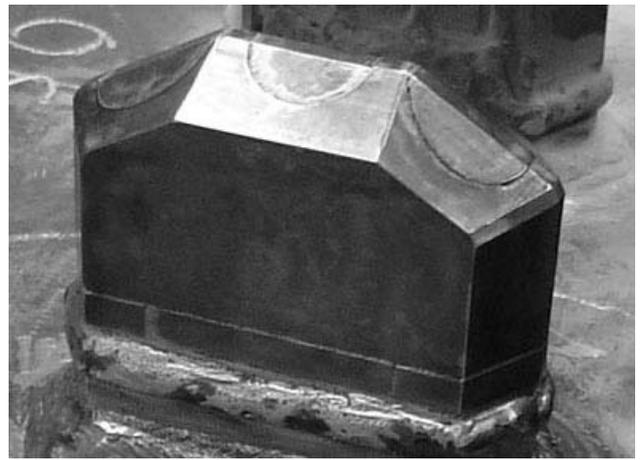


写真-4 試作した長寿命化ビット

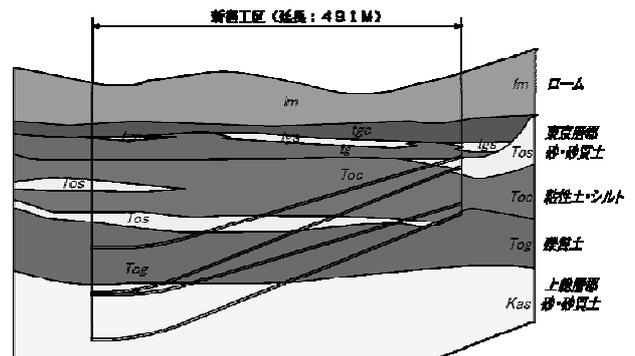


図-6 路線地質図



写真-5 掘削土に出現した玉石

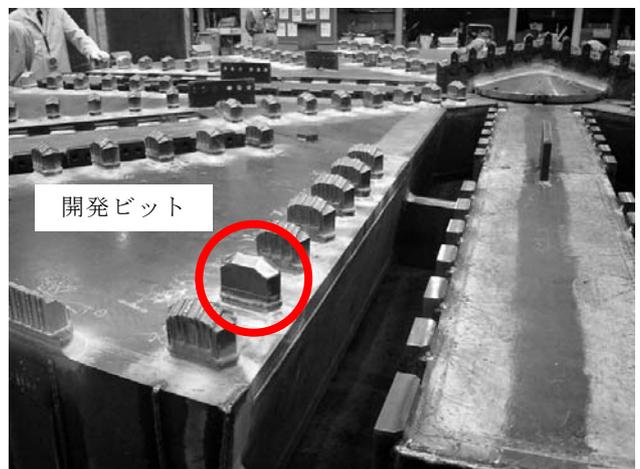


写真-6 長寿命化ビットの装備状況

16.8mmとなり、長寿命化ビットの摩耗量は従来ビットの摩耗量に比べ 1/3～1/4 となった。また、外観において従来型ビットは、破損が所々見られたが、長寿命化ビットには特に欠損は無く、長寿命化ビットの耐摩耗性や耐衝撃性を確認できた。図-7に強化型先行ビットの摩耗量測定結果、写真-7に到達時の長寿命化ビットと従来型ビットの外観を示す。

## 8. おわりに

切削ビットの素材である超合金製チップの組み合わせや緩衝材の適切な配置などにより、特殊な交換装置を必要としない、交換不要な長寿命化ビットを開発することができた。さらに実証実験により、従来ビットの3倍以上の長距離掘進が可能であることを確認した。試算によると礫質土を5km掘削した場合、工期を15%、ビットに関するコストを50%低減する。

この長寿命化ビットは、大断面長距離シールド工事の高速施工を目標として開発したが、小断面のシールド工事においても、ライフライン築造工事を中心に、長距離化が進められており、特に特殊な機械的交換装置の装備が難しい小断面シールド機では、この長寿命化ビットはコストダウンが図れて有効である。

東京メトロ13号線新宿工区の実掘削では、想定した砂質土の摩耗係数に良く一致した。

今後は、この長寿命化ビットが長距離シールド工事で一般的に採用されるよう、積極的に提案活動を行い、洪積粘土層での有効性や礫・玉石地盤での耐衝撃性などをより多く検証していく予定である。

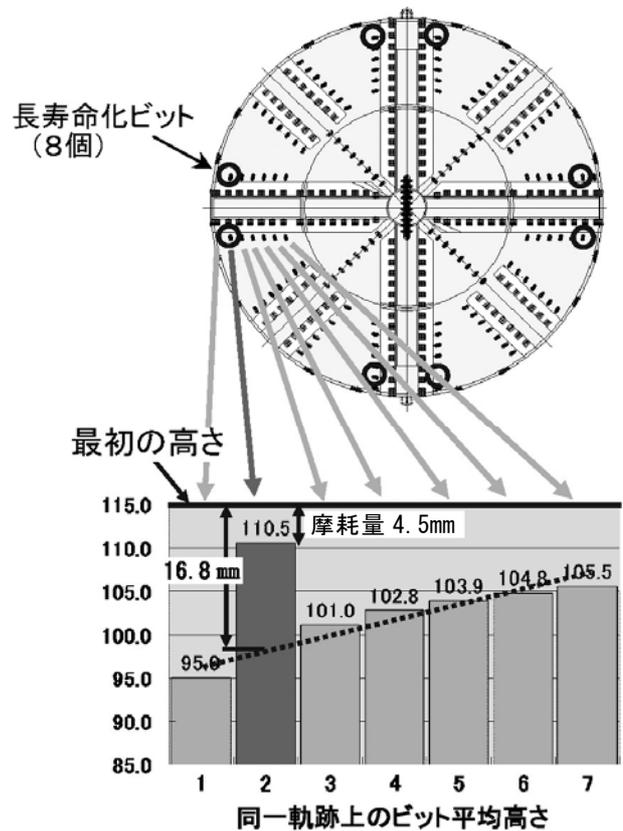


図-7 強化型先行ビットの摩耗量測定結果



長寿命化ビット



従来型ビット

写真-7 到達時のビットの外観