

(技術資料)

# 高 cleanliness 仕様一体型クランク軸の最大介在物寸法評価技術

池上智紀\*

## Technology of Evaluating Maximum Inclusion Size in Solid-type Crankshaft with High Cleanliness Specifications

Tomonori Ikegami

### 要旨

クランク軸の疲労強度に対する高強度化の要望がある。これを受けて当社では、高 cleanliness 仕様のクランク軸を製造している。従来の光学顕微鏡による cleanliness 評価方法では、クランク軸の疲労強度に大きな影響を与える最大介在物の寸法情報を十分に得ることができていない。そこで当社は、極値統計解析を用いて最大介在物の寸法を評価する技術を開発した。開発した技術では、クランク軸余材の超音波探傷によって得られた介在物の寸法分布データを用いることにより、クランク軸に内在する最大介在物の寸法を評価することができることが分かった。また、その妥当性も確認できた。

### Abstract

There is a demand for crankshafts with higher fatigue strength. In response to this demand, Kobe Steel is manufacturing crankshafts with high cleanliness specifications. The conventional method of cleanliness evaluation using an optical microscope does not allow obtaining sufficient dimensional information on the maximum size of inclusions that have a significant effect on the fatigue strength of crankshafts. Hence, the company has developed a technique for evaluating the size of the largest inclusions using extreme value statistical analysis. The newly developed technology has been found to enable the evaluation of the dimensions of the largest inclusions in a crankshaft by using the dimensional distribution data on inclusions obtained by the ultrasonic flaw detection of its surplus material. The validity of this evaluation method has been confirmed by using the actual distribution of inclusion sizes.

### キーワード

介在物, cleanliness, 極値統計解析, 高 cleanliness 鋼, クランク軸

まえがき = 近年、環境規制や省エネ、CO<sub>2</sub>削減などに向けた取り組みがさまざまな分野において進められている。船舶の分野においても燃費改善が求められており、船用エンジンの小型化や高出力化が検討されている。これに伴い、船用エンジンの主要部品であるクランク軸に対してはより一層の高疲労強度化が要求され始めている。

クランク軸はピストンの往復運動を回転運動に変換するための重要な部品である。エンジン稼働中において、クランク軸には曲げ応力とねじり応力の複合応力が生じる。フィレット部においてその最大応力値が発生する。このため、クランク軸の疲労強度を向上させるためには、フィレット部の疲労強度を高めることが必要となる。

フィレット部の疲労強度を向上させる方法としては、高 cleanliness 鋼製造プロセスの適用のほか、冷間ロール加工<sup>1), 2)</sup> やショットピーニング加工、窒化、高周波焼入れなどの表面処理技術の適用が挙げられる。これらの表面処理技術は、表面硬さを高めることによってき裂発生を抑制する、あるいは表面に圧縮残留応力を付与することによってき裂進展を抑制し、疲労強度向上を狙ったものである。

鋼材中の非金属介在物が疲労き裂発生の起点になるこ

とが知られており、クランク軸中に存在する最大介在物寸法がクランク軸の疲労強度に大きな影響を与える。鋼中の非金属介在物の大きさやその分布の評価には従来、光学顕微鏡法<sup>3)</sup> や酸溶解法、スライム法、超音波探傷法、あるいは疲労試験を利用した方法<sup>4)</sup> が適用されている。

一般的に用いられている光学顕微鏡法は、鋼材から切り出した試験片を光学顕微鏡で観察し、非金属介在物を硫化物系、アルミナ系、シリケート系、酸化物系などに分類し、それらの個数や大きさによって cleanliness を評価する方法である。光学顕微鏡法では、微小な介在物の観察が可能であるが、顕微鏡視野内かつ試料表面での評価であることから、介在物の三次元評価を含む大領域評価が困難である。

また、一般的な超音波探傷法は大領域の評価が可能であるが、検出可能な介在物サイズに下限がある。超音波探傷の周波数を高周波にすると微細な介在物を検出できるが、検出可能な領域が小さくなり、要求される領域全体を検査することは困難となる。

そこで当社は、非金属介在物の最大値を評価し得る極値統計解析を用いる方法を検討した。本方法では、クランク軸の一部分を対象とした超音波探傷検査を行う。超音波探傷検査の中で、疲労き裂発生の起点となる微細な非金属介在物の検出が可能な高周波超音波探傷を採用し

\* 素形材事業部門 鋳鍛鋼ユニット 鋳鍛鋼工場 鍛圧部

た。この高周波超音波探傷検査により得られた介在物寸法分布データに基づいて極値統計解析を行うことにより、クランク軸の高応力部位の最大介在物寸法を十分に評価することができる。

## 1. 試験方法

### 1.1 高周波超音波探傷検査

本検討で使用した超音波探傷検査装置は3~150 MHzの広い周波数帯を有する高周波探傷器、および広領域の検査面を走査探傷可能な機構を有している。探傷条件を表1に示す。超音波探傷子は水浸型、焦点型で周波数50 MHzのものを使用した。水中焦点距離は0.5 inであり、鋼中焦点距離が表面下1.3 mmとなるように鋼材表面と探傷子表面との距離を設定した。

### 1.2 試験片仕様

高周波超音波探傷検査における反射波のエコー高さや欠陥径との関係性を調査するため、人工欠陥を有する標準試験片を用意した。鍛造クランク軸用鋼である低合金Cr-Mo鋼を真空溶解にて作製し、80×65×10 mmの寸法に切り出した。その後、熱処理として焼ならし(870℃, 2 h) および焼戻し(640℃, 5 h)を施し、表面にラップ研磨を実施した。さまざまな寸法を有する欠陥からの超音波反射エコー挙動を調査すべく、標準試験片表面(ラップ研磨面)から深さ0.8~1.8 mmの位置にφ50~500 μmの平底穴を加工した。また、実際の介在物の寸法分布を調査するため、熱処理前の実クランク軸の余材から250×250×30 mmの寸法の試験片を切り出した。その後、焼ならし(870℃, 2 h) および焼戻し(640℃, 5 h)の熱処理を施し、表面にラップ研磨を実施した。試験片の化学成分を表2に示す。

### 1.3 極値統計解析

極値統計解析は、試験片サイズの領域の検査によって得られた複数の最大値データを用いて、実機サイズの領域での最大値を予測する手法である。石油タンク底の最大腐食深さ<sup>6)</sup>や、ある期間における最大波高の推定<sup>7)</sup>などに用いられている。本検討では、実鋼材から切り出した一部分を高周波超音波探傷にて検査し、得られた最大介在物寸法データを用いて、検査領域より大領域の最大介在物寸法の推定に極値統計解析を適用した。介在物

表1 超音波探傷条件  
Table 1 Condition of ultrasonic test

Scan type	C-scan ultrasonic test machine
Probe (frequency / caliber / focus point in water)	50 MHz / 0.125 in / F0.5 in
Scan mode	X-Y mode
Scan pitch	0.04×0.04 mm
Focus point	1.3 mm (in steel)
Scan speed	100 mm/s

表2 低合金Cr-Mo鋼試験片の化学成分  
Table 2 Chemical composition of specimen of low alloy Cr-Mo steel

							(mass%)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	
0.39	0.25	1.11	0.006	<0.0005	2.00	0.30	

寸法分布が指数分布型に従うと仮定した場合、累積分布関数 $F(x)$ は式(1)で示される。

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - e^{-\frac{x}{\mu}} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $x$ 、 $\mu$ はそれぞれ介在物寸法、尺度パラメータである。ここで、極値統計解析には $n$ 箇所の任意の体積中の介在物寸法検査データを使用する。1箇所あたりの検査領域の体積を要素体積とし、最大介在物寸法を推定したい領域の体積を評価体積とする。 $n$ 箇所の要素体積中の最大値 $x(1)$ 、 $x(2)$ 、 $\dots$ 、 $x(n)$ が $F(x)$ に従うとき、 $n$ 箇所の最大値の累積分布関数は式(2)のように表現される。ただし、 $x(1) \leq x(2) \leq \dots \leq x(n)$ とする。

$$F_n(x) = \left(1 - e^{-\frac{x}{\mu}}\right)^n \dots\dots\dots (2)$$

分布の最大値を評価する場合、 $e^{-\frac{x}{\mu}}$ は0に近く $n$ を十分に大きな値とすれば、式(2)は式(3)に近似される。

$$F_{(n)}(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - \mu \log n}{\mu}\right)\right) \dots\dots\dots (3)$$

式(3)で示した累積分布関数の両辺の二重対数 $y$ は式(4)のように表記される。

$$y = -\log(-\log(F_{(n)}(x))) = \frac{x - \lambda}{\mu} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\mu \log n = \lambda$ とし $\lambda$ は位置パラメータとする。 $x$ 軸に最大介在物寸法 $x(i)$ 、 $y$ 軸に $-\log(-\log(i/n+1))$  ( $i=1 \sim n$ )をプロットすると、最大介在物寸法プロットは直線上に分布する。ここで、要素体積を $V_e$ 、評価体積を $V_d$ とした場合、要素体積中、評価体積中の最大介在物寸法分布が同一の累積分布関数に従うとき、評価体積中の最大値 $x_d$ が発生する累積確率 $F(x_d)$ は式(5)のように表現される。

$$F(x_d) = V_d / (V_d + V_e) \dots\dots\dots (5)$$

評価体積中に発生し得る推定最大値は、式(5)を式(4)に代入した式(6)を $x$ について解くことによって得られる<sup>5)</sup>。

$$-\log(-\log(V_d / (V_d + V_e))) = (x_d - \lambda) / \mu \dots\dots\dots (6)$$

## 2. 実鋼材試験片による極値統計解析手法の評価

### 2.1 標準試験片による超音波探傷検査特性の把握

欠陥寸法の指標である平底穴換算径(以下、FBH換算径という)を超音波探傷検査での反射波のエコー高さから把握するため、標準試験片を用いて超音波探傷検査を実施した。検査結果を図1に示す。縦軸はFBH換算径、横軸はエコー高さを示す。標準試験片での結果を基にエコー高さ $x(\%)$ とFBH換算径 $y(\mu\text{m})$ の関係式(7)を算出した。

$$y = 3.46x \dots\dots\dots (7)$$

超音波探傷検査における深さ範囲は1.3~1.8 mmとした。図1からエコー高さ $x$ とFBH換算径との決定係数( $R^2$ )が96%程度であり、エコー高さからFBH換算径が十分予測し得ることが分かる。以下、実介在物の寸法は得ら

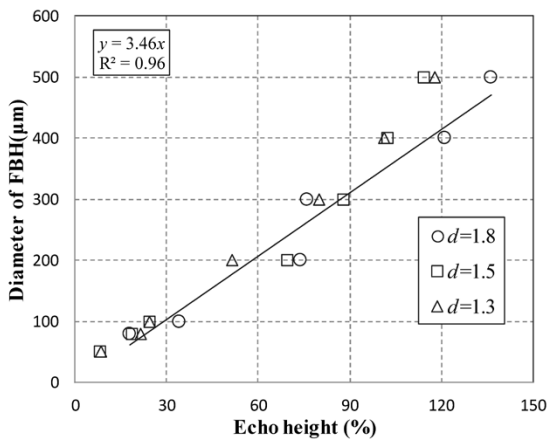


図1 エコー高さとFBH換算径との関係

Fig.1 Relationship between echo height and diameter of FBH

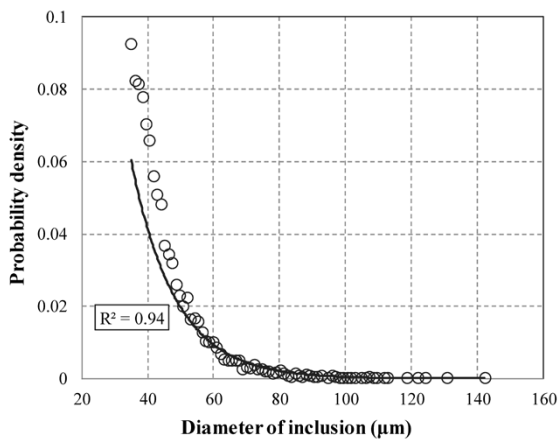


図2 超音波探傷による実鋼材中の介在物寸法検査結果

Fig.2 Inspection results of inclusion dimensions in actual steel by ultrasonic testing

れたエコー高さと関係式(7)を用い、FBH換算径として評価した。

## 2.2 実鋼材の介在物寸法分布

最大介在物寸法の評価に対して極値統計解析が適用可能かを検討するため、実鋼材試験片を用いて超音波探傷検査を実施した。図2に検査結果を示す。得られた介在物寸法分布に対して指数関数で近似し、近似曲線を実線で表記した。

超音波探傷にて検査した領域の体積 $3.04 \times 10^4 \text{ mm}^3$ 中、介在物寸法最大値はFBH換算径で $141 \mu\text{m}$ であった。実際は $30 \mu\text{m}$ 以下の寸法の介在物は多く存在すると考えられるが、超音波探傷検査にて検出できていない。極値統計解析を実施する上では、分布の極大値付近のデータを用いるため、 $30 \mu\text{m}$ 以下の介在物寸法データを取得できていなくても最大値推定結果に大きく影響を与えるものでないと考えられる。

また、介在物寸法データを指数分布で近似したところ決定係数は0.94となり、指数分布でよく表現されることが分かった。

## 2.3 極値統計解析による実鋼材の最大介在物寸法評価

実鋼材試験片の一部を対象に超音波探傷によって介在物を検査し、得られた寸法分布データを用いて極値統計解析を行う。その解析結果を用いて実鋼材試験片の領域全体に存在する最大介在物寸法 $141 \mu\text{m}$ が推定可能か

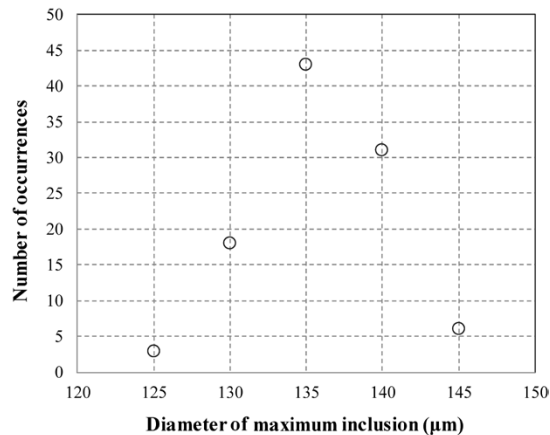


図3 最大介在物寸法の発生頻度

Fig.3 Frequency of occurrence of maximum inclusion size

否かを評価した。

超音波探傷によって検査した領域 $3.04 \times 10^4 \text{ mm}^3$ から、 $150 \text{ mm}^3$ の要素体積を有する領域を無作為に20箇所に設定し、各要素体積中の最大介在物寸法を抽出した。これらの最大介在物寸法を昇順にx軸に、 $-\log(-\log(i/n+1))$ をy軸にプロットすると、最大介在物寸法は直線上に分布し、式(4)から $\lambda$ 、 $\mu$ を決定することができる。ここで、要素体積 $V_e$ 、評価体積 $V_d$ をそれぞれ $150 \text{ mm}^3$ 、 $3.04 \times 10^4 \text{ mm}^3$ とし、式(6)から最大介在物寸法の推定を実施した。また最大介在物寸法の推定値は、要素体積をどの部位から抽出するかによって異なる値を示す。本検討では要素体積を抽出する位置を無作為に変化させ、100回の極値統計解析を実施した。図3に極値統計解析により推定した最大介在物寸法の発生頻度を示す。推定された介在物寸法最大値の平均値は $134 \mu\text{m}$ 、標準偏差は $4.36 \mu\text{m}$ となった。また、正規分布を仮定すると、推定された介在物の最大値は95%信頼区間で $130 \sim 138 \mu\text{m}$ の範囲になることが計算される。実鋼材試験片中の超音波探傷で検査された最大介在物寸法 $141 \mu\text{m}$ に対して、極値統計解析による最大介在物寸法は大きな差異なく推定された。この結果から、一部分の介在物寸法データを用いて極値統計解析によって全体の最大介在物寸法が推定されることが分かった。

## 3. 一体型クランク軸の介在物寸法評価

### 3.1 フィレット部の介在物寸法評価方法

エンジンの稼働時、クランク軸にはフィレット部に最大の応力が発生する。このため、クランク軸の疲労強度を評価するうえにおいて、フィレット部の最大介在物寸法を把握することが重要となる。

一体型クランク軸では、ジャーナルとピンの接合部を中心として一定の曲率半径を有するフィレットが円周方向に加工されている。フィレット部表面は曲面(凹面)であるため同部位への直接的な高周波超音波探傷検査は困難である。また、フィレット部から介在物調査用試験片の切り出しは破壊検査となる。

そこで本検討では、クランク軸製造工程においてクランク軸本体から切り離される軸延長部から試験片を切り出す方法を提案する。図4に試験片採取方法を示す。軸



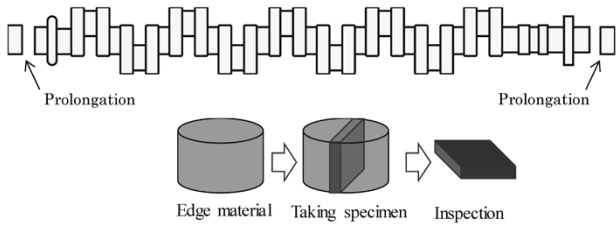


図4 軸延長部からの試験片採取  
Fig.4 Collection of specimens from shaft prolongations

延長部から切り出した試験片には製品と同等の熱処理を施した後、ラップ研磨を実施する。つづいて、表1に記載した条件にて超音波探傷検査を実施し、介在物寸法分布データを取得する。超音波探傷検査を実施した領域を複数個所に分割し、各領域内の介在物寸法最大値を用いて極値統計解析を行い、クランク軸中の最大介在物寸法を推定する。

### 3.2 フィレット近傍と軸延長部での介在物寸法分布

フィレット近傍の最大介在物寸法を推定するのに必要となる介在物寸法分布を得るために、図4に示す軸延長部から試験片を切り出し、超音波探傷検査を実施した。

また、フィレット近傍の最大介在物寸法を得るために、図5に示すようにフィレット近傍から試験片を切り出し、超音波探傷検査を実施した。検査条件は表1と同じである。軸延長部およびフィレット近傍の超音波探傷検査を実施した体積はそれぞれ $2.65 \times 10^4 \text{ mm}^3$ 、 $6.73 \times 10^4 \text{ mm}^3$ であった。

つぎに、軸延長部およびフィレット近傍の介在物寸法分布を比較するために、軸延長部の検査領域から $1.00 \times 10^4 \text{ mm}^3$ の試験片を、またフィレット近傍の検査領域から $1.00 \times 10^4 \text{ mm}^3$ の試験片を切り出し、それぞれから20分割した要素体積 $500 \text{ mm}^3$ 中の最大介在物寸法を抽出した。最大介在物寸法の累積分布を図6に示す。四角(□)のプロットは軸延長部、丸(○)のプロットはフィレット近傍の最大介在物寸法分布である。図中の実線は、フィレット近傍の介在物寸法分布に対して式(3)に示す二重指数分布型の近似曲線を示している。また破線はその近似曲線の95%信頼区間の上限と下限を示している。これらの信頼区間内に軸延長部の介在物寸法分布データ全てが上下限の間に位置していることから、軸延長部とフィレット近傍の介在物寸法分布には有意な差がないことが分かる。すなわち、上記の差異検証結果から、軸延長部の介在物寸法分布データを用いて極値統計解析を実施することにより、フィレット近傍の介在物寸法を十分評価し得ることが分かった。

### 3.3 フィレット近傍の推定最大介在物寸法

軸延長部の超音波探傷検査を実施した体積 $2.65 \times 10^4 \text{ mm}^3$ から、 $341 \text{ mm}^3$ の要素体積を有する領域を20箇所を設定し、各領域中の介在物寸法の最大値を抽出し、フィレット近傍の超音波探傷検査を実施した体積 $6.73 \times 10^4 \text{ mm}^3$ の介在物寸法の最大値を極値統計解析によって推定した。その結果を図7に示す。フィレット近傍から超音波探傷検査によって検出された介在物の最大値 $87.5 \mu\text{m}$ に対して、極値統計解析では $105 \mu\text{m}$ の評価結

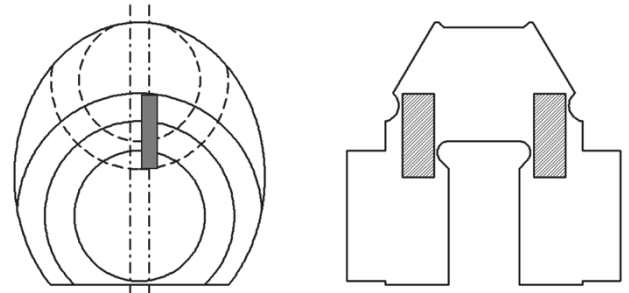


図5 フィレット近傍からの試験片採取  
Fig.5 Collection of specimens from vicinity of fillet

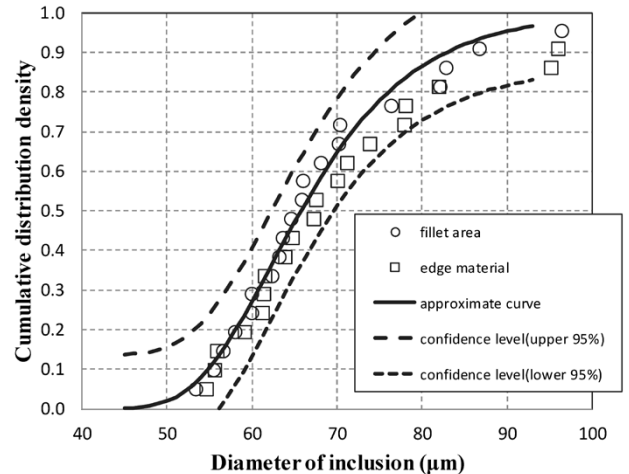


図6 軸延長部およびフィレット近傍の超音波探傷による介在物寸法検査結果  
Fig.6 Inspection results of inclusion dimensions in shaft prolongations and vicinities of fillets by ultrasonic testing

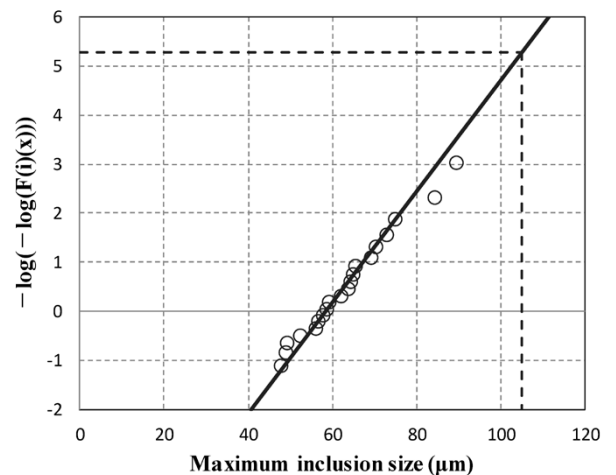


図7 フィレット近傍の最大介在物寸法推定結果  
Fig.7 Evaluation results of maximum inclusion sizes in vicinities of fillets

果を得た。実測の最大値に比べ20%大きく評価する結果となったが、クランク軸の疲労強度に大きく影響を及ぼすフィレット部の疲労強度を評価するうえでは安全側の評価結果といえる。

むすび=クランク軸の軸延長部から切り出した試験片を高周波超音波探傷にて検査し、得られた介在物寸法分布データから極値統計解析によってクランク軸フィレット近傍の最大介在物寸法を評価する方法を検討した。得ら

れた結果は以下のとおりである。

- 1) 軸延長部とフィレット近傍での介在物寸法分布には有意な差がないことが確認された。
- 2) 極値統計法での介在物寸法評価では、疲労強度を評価するうえで重要となる実構造部材中の最大介在物寸法が評価できることが示唆された。

大型鍛造クランク軸のフィレット部は大体積である。このような部位中の最大介在物寸法の評価が可能な極値統計法は、高纯净度鋼の信頼性を定量的に評価できる手法として重要な技術であるといえる。

#### 参 考 文 献

- 1) 長坂英明ほか. R&D神戸製鋼技報. 1988, Vol.48, No.1, p.68-71.
- 2) 松田真理子ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.2, p.24-28.
- 3) JIS G 0555:2020.
- 4) 古谷佳之ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, No.10, p.643-650.
- 5) E. J. Gumbel et al. Statistics of Extreme. Dover Publications. 2012, p.400.
- 6) 荒木了一ほか. 圧力技術. 1986, Vol.24, No.3, p.20-28.
- 7) 合田良美ほか. 海岸工学論文集. 2002, Vol.49, p.171-175.



池上智紀

素形材事業部門  
鋳鍛鋼ユニット 鋳鍛鋼工場 鍛圧部