

川崎製鉄技報  
KAWASAKI STEEL GIHO  
Vol.16 (1984) No.1

---

ドリルパイプの製造と諸特性

Manufacturing and Properties of Drill Pipes

平野 豊(Yutaka Hirano) 高原 茂樹(Shigeki Takahara) 小林 邦彦(Kunihiko Kobayashi) 金城 昌平(Sho-hei Kanari) 河手 崇男(Takao Kawade) 田上 俊久(Toshihisa Taue)

---

要旨：

API 5A E, 5AX X95, 5AX G105, 5AX S135 ドリルパイプの製造と特性について述べた。ドリルパイプの製造にあたっては、材料の焼入性、靱性、疲労特性およびアップセット部の形状を滑らかにするアップセット条件について特に注意を払った。このようにして製造されたドリルパイプは、高靱性、パイプ全長に亘って均一な強度、高いコラプス強度・疲労強度を示した。知多製造所では 1982 年 8 月にドリルパイプの生産を開始した。

---

Synopsis：

Manufacturing and properties of drill pipes of API 5A E, 5AX X95, 5AX G105, and 5AX S135 are reported. In manufacturing the drill pipes, considerations were paid especially on hardenability, toughness and fatigue properties of the materials and upsetting condition for achieving the smooth profile in the upset portion. Drill pipes thus produced showed good toughness, uniform strength through the entire pipe length, sufficient collapse strength and fatigue strength. Chita Works started commercial production of drill pipes in August 1982.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

平野 豊<sup>\*2</sup> 高原 茂樹<sup>\*3</sup> 小林 邦彦<sup>\*4</sup> 金成 昌平<sup>\*5</sup> 河手 崇男<sup>\*6</sup> 田上 俊久<sup>\*7</sup>

## Manufacturing and Properties of Drill Pipes

Yutaka Hirano, Shigeki Takahara, Kunihiro Kobayashi, Shō-hei Kanari, Takao Kawade, Toshihisa Taue

### 要旨

API 5A E, 5AX X95, 5AX G105, 5AX S135ドリルパイプの製造と特性について述べた。ドリルパイプの製造にあたっては、材料の焼入性、靱性、疲労特性およびアップセット部の形状を滑らかにするアップセット条件について特に注意を払った。このようにして製造されたドリルパイプは、高靱性、パイプ全長に亘って均一な強度、高いコラプス強度・疲労強度を示した。知多製造所では1982年8月にドリルパイプの生産を開始した。

### Synopsis:

Manufacturing and properties of drill pipes of API 5A E, 5AX X95, 5AX G105, and 5AX S135 are reported. In manufacturing the drill pipes, considerations were paid especially on hardenability, toughness and fatigue properties of the materials and upsetting condition for achieving the smooth profile in the upset portion. Drill pipes thus produced showed good toughness, uniform strength through the entire pipe length, sufficient collapse strength and fatigue strength.

Chita Works started commercial production of drill pipes in August 1982.

## 1 緒 言

石油・天然ガスの試掘・生産用の井戸には大別して、ケーシング、チュービング、ドリルパイプの3種類の油井管が使用される。当社では、小径シームレス、中径シームレス圧延設備および各種の熱処理設備を含む精整ラインの建設・増強を通じて主としてケーシング、チュービングの製造能力の拡大を進めてきたが、さらに、油井掘削に使用されるドリルパイプの製造技術に関する研究開発を進め、1982年8月から生産を開始した。

油井管生産量の中に占めるドリルパイプの割合は、API出荷統計によれば、約5%程度と量的には少ないものの、高い強度、厳しいアップセット加工、耐疲労特性などが要求されるのが特徴である。ドリルパイプの強度等に関するAPI規格5A, 5AXの規定値をTable 1に、また、ドリルパイプのグレードおよび外径毎の世界における製造実績<sup>2)</sup>をTable 2に示す。グレードでは5A Eおよび5AX G105が、また、寸法的には外径4 $\frac{1}{2}$ 、5 $\frac{1}{2}$ のパイプが多量に使用される傾向にある。通常のロータ

リードリリング法ではFig. 1に示されるように、ドリルパイプはツールジョイントに摩擦圧接された後、ツールジョイントのネジ継手により結合され、さらに、重量を付加するためにドリルカラーを接続し、先端のビットに回転を与えて掘削するように使用される。このように、ドリルパイプはケーシング、チュービングと異なり、溶接をされたり、回転を与えられるので、その製造にあたっては、使用状態を考慮した品質設計、製造管理が必要である。本報ではウェルドオンツールジョイント用のドリルパイプ原管の製造と、その諸特性について報告する。

## 2 ドリルパイプの製造

### 2.1 品質設計

ドリルパイプの品質設計にあたっては、強度・使用法等を考慮して以下の項目に特に重点を置いた。

(1) 強度・靱性

Table 1 API Specifications for drill pipes

| API<br>Standard | Grade | YS                        |             | TS          | El.                                            | Chemical<br>composition  | Process      |
|-----------------|-------|---------------------------|-------------|-------------|------------------------------------------------|--------------------------|--------------|
|                 |       | kgf/mm <sup>2</sup> (ksi) |             |             | %                                              |                          |              |
|                 |       | Min                       | Max         | Min         | Min                                            |                          |              |
| 5A              | E     | 52.7 (75)                 | 73.8 (105)  | 70.3 (100)  | $e = 625\,000 \frac{A^{0.2}}{U^{0.5}}$<br>(*1) | P ≤ 0.040%<br>S ≤ 0.060% | Heat treated |
| 5AX             | X95   | 66.8 (95)                 | 87.9 (125)  | 73.8 (105)  |                                                |                          | QT or NT     |
|                 | G105  | 73.8 (105)                | 94.9 (135)  | 80.8 (115)  |                                                |                          |              |
|                 | S135  | 94.9 (135)                | 116.0 (165) | 101.9 (145) |                                                |                          |              |

\*1 e : Elongation for 2 inches G.L. (%)

A : Cross section area of tensile specimens (in<sup>2</sup>)

U : Specified minimum tensile strength (psi)

\*1 昭和58年8月3日原稿受付

\*2 知多製造所企画部企画開発室主任 (部長補)

\*3 知多製造所管理部技術管理室

\*4 技術研究所第2研究部知多研究室主任研究員 (課長)

\*5 技術研究所第2研究部知多研究室

\*6 知多製造所第2造管部シームレス管技術室

\*7 知多製造所第2造管部小径シームレス管課課長

Table 2 Amount of drill pipes produced in the world

(Met. tons)

| Outer dia.<br>(in) | Grades |         |        |        |        |        | Total   |
|--------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|
|                    | D      | E       | X95    | G105   | S135   | Others |         |
| 2 $\frac{3}{8}$    | 326    | 262     | 89     | 371    | 30     | 313    | 1 391   |
| 2 $\frac{7}{8}$    | 635    | 2 889   | 238    | 1 893  | 605    | 868    | 7 128   |
| 3 $\frac{1}{2}$    | 1 208  | 15 247  | 5 203  | 5 807  | 3 054  | 2 506  | 33 025  |
| 4                  | —      | 12 582  | 622    | 983    | 648    | 2 592  | 17 427  |
| 4 $\frac{1}{2}$    | 2 438  | 151 010 | 12 000 | 16 798 | 4 928  | 16 140 | 203 314 |
| 5                  | 1 863  | 16 094  | 3 344  | 40 635 | 10 519 | 7 477  | 79 932  |
| 5 $\frac{1}{2}$    | 352    | 1 366   | 147    | 2 495  | 376    | —      | 4 736   |
| 6 $\frac{3}{8}$    | —      | —       | —      | —      | —      | —      | —       |
| Total              | 6 822  | 199 450 | 21 643 | 68 982 | 20 160 | 29 896 | 346 953 |

(API Annual report, 1981)

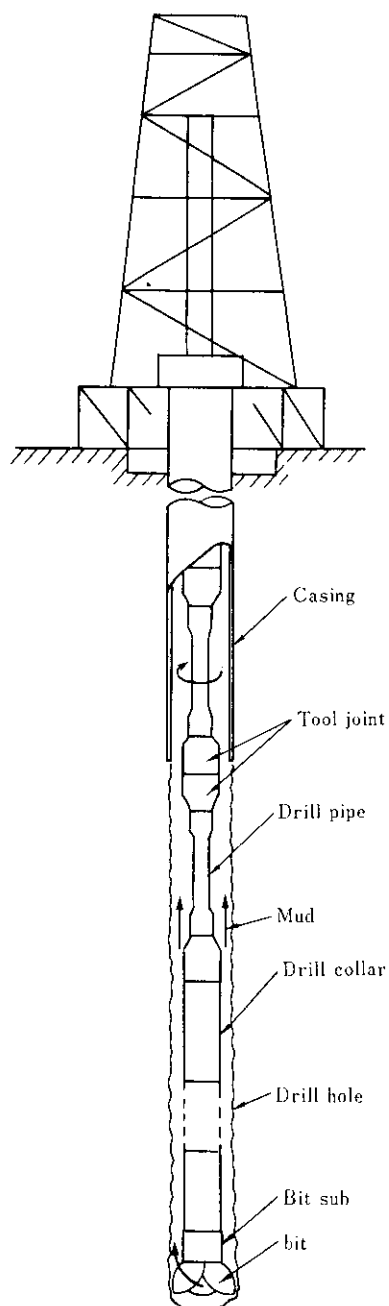


Fig. 1 Schematic illustration for rotary drilling

通常使用されるドリルパイプの規格降伏応力は52.7 kgf/mm<sup>2</sup> (グレード E) から94.9 kgf/mm<sup>2</sup> (グレード S135) と高い。また使用中に衝撃荷重が加わることから靱性的にも優れていることが望ましい。したがって、高い強度と靱性を安定して得られる成分・熱処理の選定が必要である。

## (2) 圧接部の焼入性

ドリルパイプは厚肉のアップセット部にツールジョイントが摩擦圧接法により溶接された後、局部的に焼入れ焼戻し処理が施されるのでアップセット部での強度を確保する上からも、焼入性の優れた成分系にする必要がある。

## (3) 耐疲労性

掘削中に回転を与えられるドリルパイプは、掘削穴の曲がりのために繰り返し曲げ応力を受け、疲労破壊を起こすことから、耐疲労性に優れていることが要求される。そのために、疲労強度劣化の原因となる非金属介在物の低減を図る製鋼上の注意、有害な析出物を生じさせないような成分系の選定、が必要であることはもちろん、次項に述べるようなアップセット部形状に対する考慮も必要である。

## (4) アップセット部形状

アップセット部はパイプボディー部との形状不連続部となって応力集中を生じるために疲労破壊の原因となる。応力集中を低減するためには、アップセットとボディー境界部の幾何学的形状を滑らかにすることが効果的であり、これを実現するためのアップセット加工条件の選定が必要である。

前述の点を考慮して、グレード E, G, X, S ドリルパイプの品質設計にあたっては以下の点を基本とした。

- 熱処理は全グレードとも焼入れ焼戻し (Q-T) 処理を行い、高い強度と靱性を実現する。
- 成分は高 C-Mo 系を基本とし、強度に応じて Cr, V を添加する。
- 不純物元素としての S を 0.010% 以下、P を 0.020% 以下に管理し、清浄な鋼を素材とする。
- アップセット加工条件の適正化により、アップセット-ボディー境界部の幾何学的形状を滑らかにする。

## 2.2 製造工程

ドリルパイプの製造工程の概略を Fig. 2 に示し、主要工程について以下に簡単に記す。

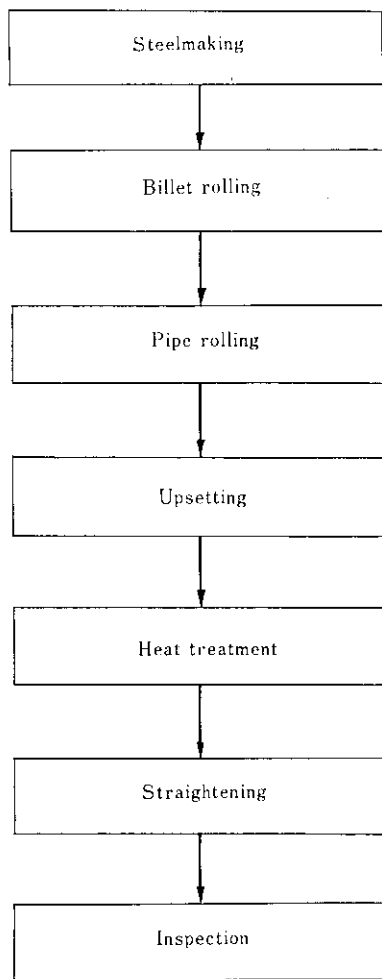


Fig. 2 Manufacturing process of drill pipes

### 2.2.1 造 管

ドリルパイプ素管は小径シームレス工場のマンドレルミルおよびホットストレッチレデューサーで所定の外径、肉厚に造管された後、所定長さに切断される。

### 2.2.2 アップセット加工

アップセット加工には4½"あるいは7"用アップセッターが使用される。ドリルパイプのアップセットには、内面アップセット (IUE)、外面アップセット (EUE)、内外面アップセット (IEUE) の3種類があるが、寸法によっては増肉率が100%を超す厳しい加工を受けるものもあり、規格の寸法精度を満足することはもちろんのこと、耐疲労特性の面から、しわ疵発生防止、内外面R部の形状を滑らかにすることが特に重要である。適切なアップセット加工条件を確立するために、広範囲の基礎的実験を行った<sup>2)</sup>。一例として外面アップセット加工における最大しわ疵深さ<sub>入</sub>、(最大しわ疵深さ/アップセット厚)、と増肉率の関係を Fig. 3 に示す。 $t/D$  (管厚/外径比) が小さい程しわ疵は発生しやすく、しわ疵深さをある一定値以下に抑えるためには  $t/D$  に応じた限界増肉率が存在する。2ショット加工を行う場合の限界増肉率は(1)、(2)式で表される。

$$\alpha_{1cr} = f(t/D) \quad \text{.....(1)}$$

$$\alpha_{2cr} = (1 + \alpha_{1cr}) \left\{ 1 + f \left( \frac{(1 + \alpha_{1cr})t}{D} \right) \right\} - 1 \quad \text{.....(2)}$$

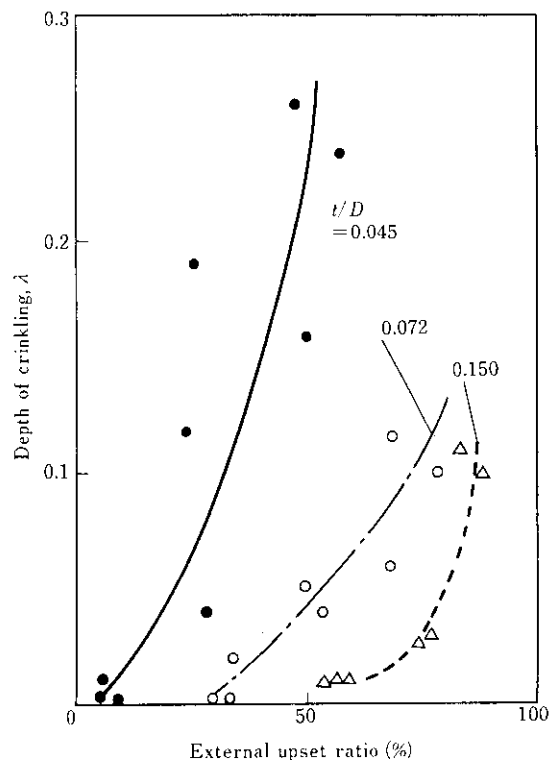


Fig. 3 Effect of external upset ratio on depth of crinkling<sup>2)</sup>

$\alpha_{1cr}$ ,  $\alpha_{2cr}$ : 1, 2ショット目の限界増肉率

また、1ショット目と2ショット目の増肉率の配分も重要であり、(3)式によることが望ましい。

$$\alpha_1 = \alpha_2 \times \frac{\alpha_{1cr}}{\alpha_{2cr}} \quad \text{.....(3)}$$

( $\alpha_{1cr} < \alpha_2 < \alpha_{2cr}$ ) .

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ : 1, 2ショット目の増肉率

内面アップセットについても同様に取り扱うことができる。

内面アップセット、外面アップセットに対する限界増肉率と  $t/D$  の関係を Fig. 4 に示す。

さらにアップセットR部の形状には1ショットあたりの増

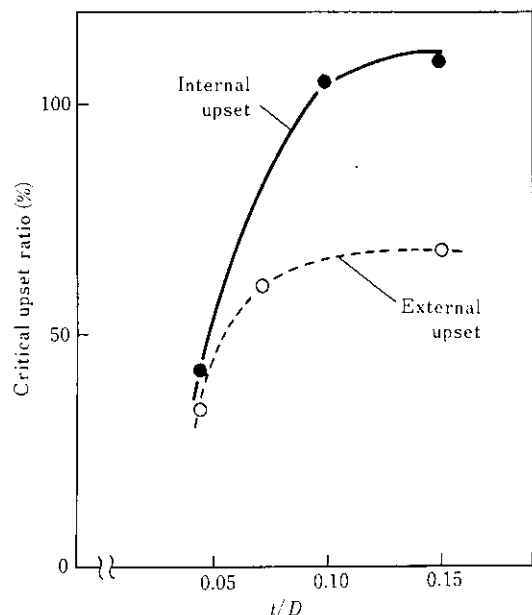


Fig. 4 Effect of  $t/D$  on critical upset ratio<sup>2)</sup>

肉率、加熱条件等も影響を与える。これらの知見を基礎に適正な加工条件を設定して操業することにより、良好な形状のアップセットを実現している。

### 2.2.3 熱処理

焼入れ焼戻し処理にはチュービング用熱処理設備<sup>3)</sup>を使用している。焼入設備は内面高圧水噴射、外面攪拌方式の浸漬型内外面焼入れ設備であり、パイプ内外面および長手方向に均一な焼入れを実現している。また焼入炉、焼戻炉とともに管端予熱装置が設けられており、アップセット部とボディー部の昇温時間差を縮小することにより、機械的性質の均一化を図っている。

## 3 ドリルパイプの諸特性

前章に記した基本的思想での試作・確性を経てドリルパイプの成分系、製造条件を決定し、製造技術を確認した。ここではグレードE、X95、G105、S135の各ドリルパイプについて得られた諸特性について述べる。

### 3.1 冶金学的性質

#### 3.1.1 焼入性

グレードS135についてのCCT曲線をFig. 5に示す。広い冷却速度範囲でマルテンサイト組織が得られる。

摩擦圧接後のアップセット部での焼入性を評価するために一端焼入法による焼入性試験を行った。試験にはASTM A255に規定された小型試験片(6.35 mmφ)を用い、925°Cに30 min保持後、一端焼入れし、さらに565°C、1 hの焼戻しをした後に硬

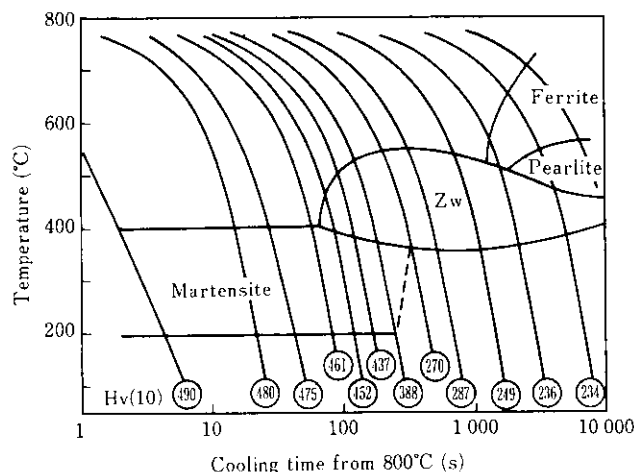


Fig. 5 CCT diagram of steel for S135 drill pipe

度分布を測定した。その結果をFig. 6に示す。焼入端から20 mm離れてもH<sub>RC</sub>30以上の硬度が得られ、圧接後のアップセット厚肉部においても十分な強度が得られると推定できる。

#### 3.1.2 微視組織

グレードE、X、G、Sドリルパイプボディー部、アップセット部の熱処理後の微視組織をPhoto 1に示す。いずれも焼戻しマルテンサイトから成る組織であり、アップセット部においてもフェライトの生成は見られない。

#### 3.1.3 清浄度

各グレードのパイプでの清浄度測定結果をTable 3に示す。いずれのグレードでも0.03以下で清浄な鋼である。

### 3.2 機械的性質

#### 3.2.1 引張特性

引張試験結果(API試験片)をTable 4に示す。強度は規格

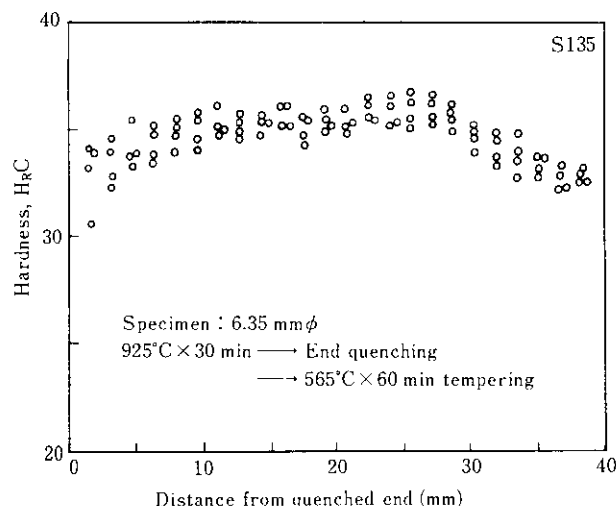


Fig. 6 Hardness distribution in Jominy specimen after end-quenching and tempering (S135 drill pipe)

Table 3 Cleanliness of drill pipes

| Grade | Cleanliness |    |       |       |
|-------|-------------|----|-------|-------|
|       | dA          | dB | dC    | Total |
| E     | 0.016       | 0  | 0.008 | 0.024 |
| X95   | 0.021       | 0  | 0.004 | 0.025 |
| G105  | 0.017       | 0  | 0.000 | 0.017 |
| S135  | 0.008       | 0  | 0.008 | 0.016 |

Table 4 Tensile properties of drill pipes

| Grade | Size       |           | Upset | Position            |       |     |                     |       |     |                     |       |     |
|-------|------------|-----------|-------|---------------------|-------|-----|---------------------|-------|-----|---------------------|-------|-----|
|       |            |           |       | Top                 |       |     | Middle              |       |     | Bottom              |       |     |
|       | OD×Weight  | Thickness |       | YS                  | TS    | El. | YS                  | TS    | El. | YS                  | TS    | El. |
|       | in ×lbs/ft | mm        |       | kgf/mm <sup>2</sup> |       | %   | kgf/mm <sup>2</sup> |       | %   | kgf/mm <sup>2</sup> |       | %   |
| E     | 5×19.5     | 9.19      | IEUE  | 71.1                | 79.9  | 28  | 68.8                | 78.3  | 28  | 68.6                | 78.3  | 29  |
| X95   | 4½×16.6    | 8.56      | IEUE  | 74.3                | 85.6  | 26  | 73.5                | 84.2  | 26  | 74.0                | 84.5  | 27  |
| G105  | 4½×16.6    | 8.56      | IEUE  | 88.0                | 96.1  | 22  | 87.7                | 96.8  | 22  | 87.7                | 95.4  | 22  |
| S135  | 4½×16.6    | 8.56      | IEUE  | 99.1                | 107.9 | 21  | 99.5                | 108.2 | 21  | 99.0                | 108.5 | 21  |

IEUE: Internal external upset end

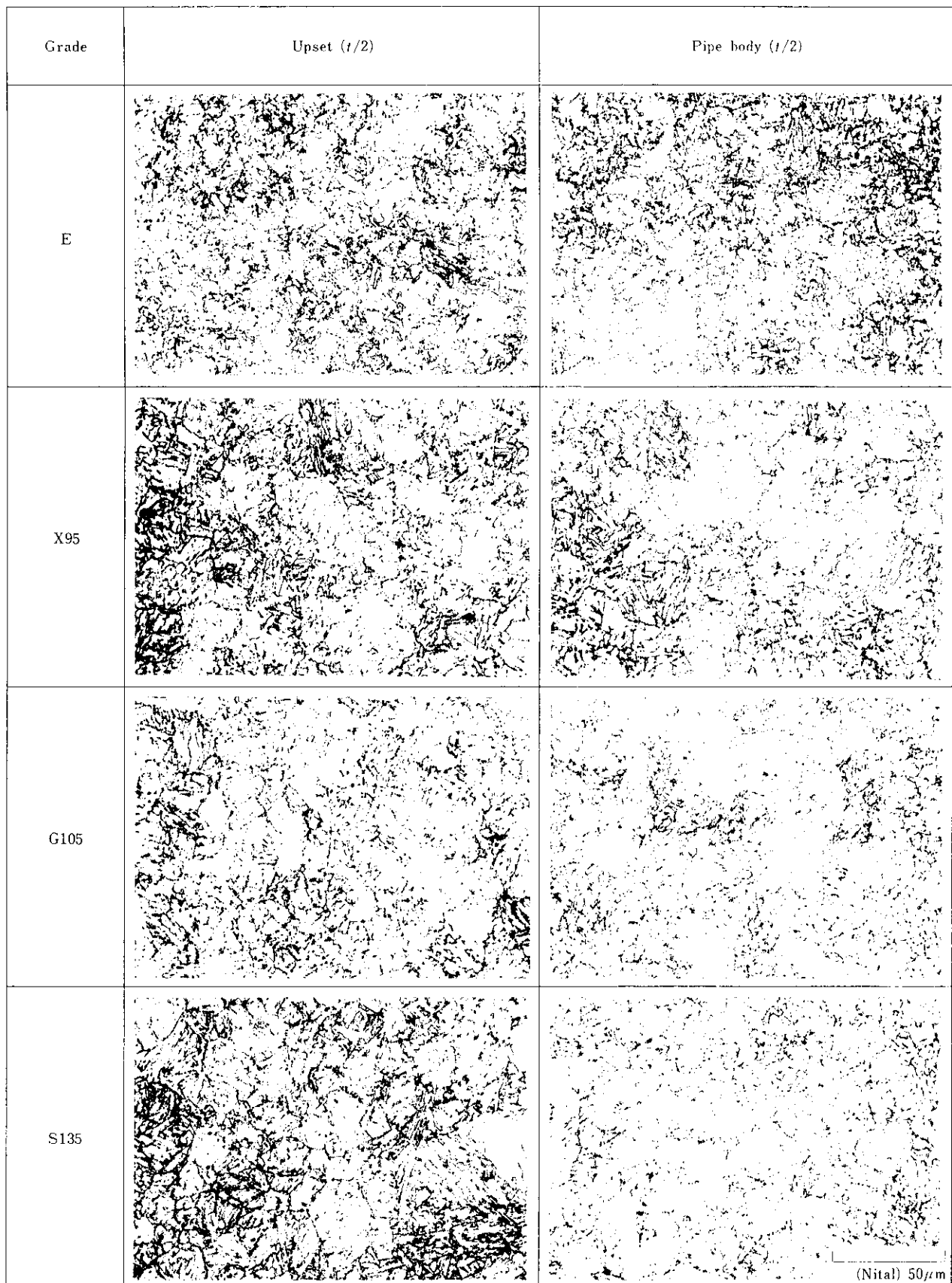


Photo 1 Microstructures of pipe body and upset portion in drill pipes

値を十分満足することはもちろん、パイプ長手方向での差はほとんど認められない。

### 3.2.2 硬 度

アップセット部も含んでパイプ長手および肉厚方向の硬度分布測定結果の例を Fig. 7 に示す。アップセット部とボディー部の硬度差は小さく、強度的に均質なパイプである。

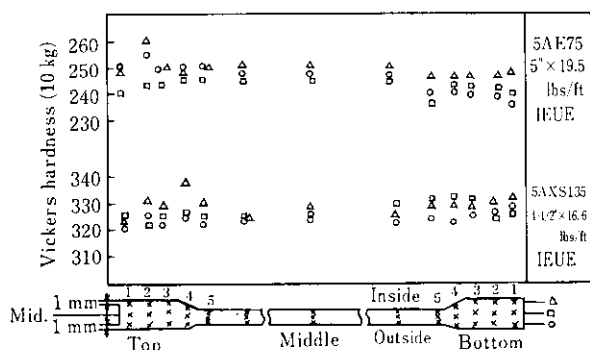


Fig. 7 Hardness distribution in E75 and S135 drill pipes

### 3.2.3 衝撃特性

パイプボディ中央部でのシャルピー試験結果を Table 5 に、遷移曲線の一例を Fig. 8 に示す。L 方向での  $vTrs$  はいずれのグレードでも  $-40^{\circ}\text{C}$  以下であり、優れた衝撃特性を有している。

### 3.2.4 圧潰特性

パイプのトップ、ミドル、ボトム部サンプルを用いて圧潰試験を行い、コラプス強度を求めた。結果を Table 6 に示す。いずれのグレードでも API BUL 5C2 に規定されたコラプス強度に対して 10~40% 高い強度を有している。パイプのコラプス強度は降伏応力および  $t/D$  により支配されるが、引張残留応力が大

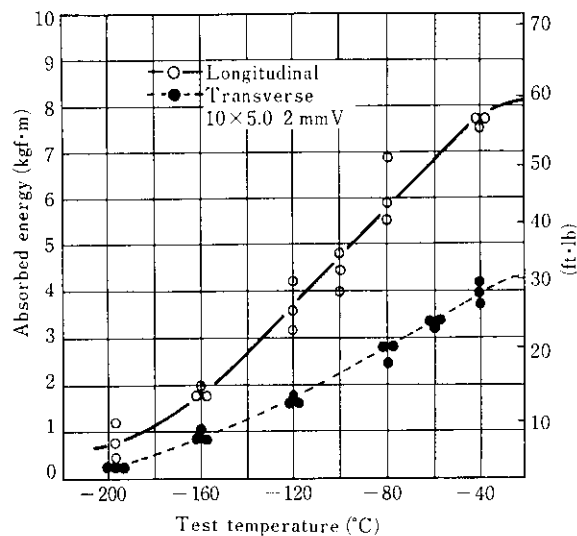
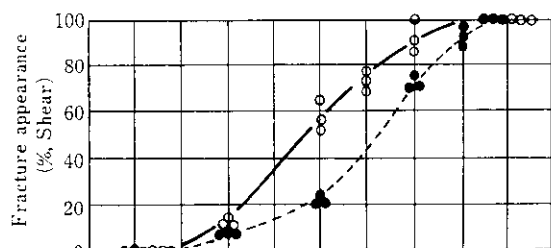


Fig. 8 Transition curves in Charpy impact test of G 105 drill pipe

Table 5 V-notched impact test results

| Grade | Direction | Specimen size | $vTrs$             | $vE_{-40}$ |
|-------|-----------|---------------|--------------------|------------|
|       |           | mm            | $^{\circ}\text{C}$ | kgf·m      |
| E     | L         | 10×7.5        | -128               | 16.0       |
|       | C         | 10×5.0        | -85                | 5.5        |
| X95   | L         | 10×5.0        | -145               | 9.8        |
|       | C         | 10×5.0        | -100               | 4.3        |
| G105  | L         | 10×5.0        | -130               | 7.9        |
|       | C         | 10×5.0        | -95                | 4.0        |
| S135  | L         | 10×5.0        | -57                | 3.1        |
|       | C         | 10×5.0        | -35                | 1.5        |

きい場合には低下することが知られている<sup>9)</sup>。残留応力を測定した結果、グレード E で  $5\text{ kgf/mm}^2$  以下、S135 で  $10\text{ kgf/mm}^2$  以下の低い値であり、コラプス強度の低下をもたらす程の値ではない。

### 3.2.5 疲労特性

グレード E, G, S ドリルパイプボディ部より研削加工した  $8\text{ mm}\phi$  丸棒で行った回転曲げ疲労試験の結果を Fig. 9 に示す。実管での疲労強度は黒皮の影響、アップセット部の応力集中などのために Fig. 9 の強度よりかなり低い値になる<sup>5,6)</sup>が、母材自体はこの強度レベルの材料として十分な疲労特性を有している。

Table 6 Collapse strength of drill pipes

| Grade | Size<br>(in. × lbs/ft) | API<br>specification | Collapse strength<br>kgf/cm <sup>2</sup><br>(psi) |                   |                   | Actual<br>/<br>API |
|-------|------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|       |                        |                      | Top                                               | Middle            | Bottom            |                    |
| E     | 5×19.5                 | 703<br>(10 000)      | 951<br>(13 530)                                   | 979<br>(13 920)   | 911<br>(12 960)   | 1.30<br>1.39       |
| X95   | 4½×16.6                | 896<br>(12 750)      | 1 116<br>(15 870)                                 | 1 171<br>(16 650) | 1 196<br>(17 010) | 1.24<br>1.33       |
| G105  | 4½×16.6                | 972<br>(13 820)      | 1 181<br>(16 800)                                 | 1 225<br>(17 430) | 1 244<br>(17 700) | 1.22<br>1.28       |
| S135  | 4½×16.6                | 1 181<br>(16 800)    | 1 327<br>(18 870)                                 | 1 324<br>(18 840) | 1 394<br>(19 830) | 1.12<br>1.18       |

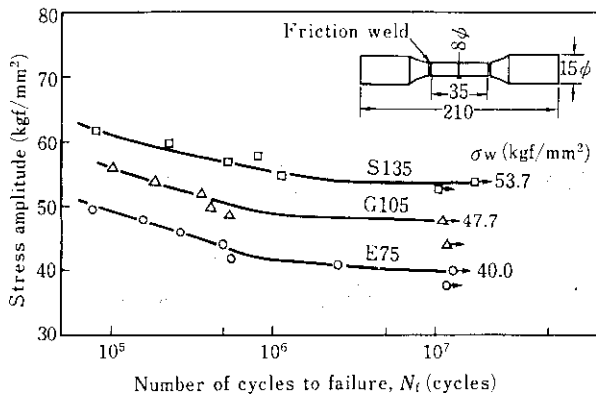


Fig. 9 S-N curves in rotating bending fatigue of grade E, G and S drill pipe bodies

### 3.3 アップセット部形状

グレード G105 アップセット部のメタルフローエッチの例を Photo 2 に示す。写真にはアップセット条件が適正な場合(G2)と人為的に不適正に変えた場合(G1) について示すが、適正条件ではメタルフローの乱れもなく、加工度の大きい内面アップセット部からボディー部に至る R 部の形状も滑らかであるが、不適正条件では R 部の形状変化が急激であり、大きな応力集中源となる。

アップセット部形状と疲労特性の関連を調べるために小型試験片で実験を行った。実験の模式図と結果を Fig. 10 に示す。アップセット条件を変化させた Photo 2 に示す形状のアップセット部からパイプ長手方向に20 mm 幅の弧状試験片を加工し、片持ち曲げ疲労試験を Fig. 10 に示す要領で実施した。疲労破壊は応力集中の大きいアップセットの R 部で生じ、適正条件で加工したアップセット部は、不適正条件で加工したアップセット部に比較して2 倍の疲労寿命を示す。このように、ドリルパイプアップセット部の疲労特性を向上させるためには R 部の形状を滑らかにすることが効果的であり、そのような形状を実現するためのアップセット加工条件を工程的に採用している。

### 4 製造寸法実績

ドリルパイプの商業生産に先立ち、各種グレードのサンプルパイプを海外の主要ツールジョイントメーカーに出荷した。実

| Specimen | Stress range (kgf/mm <sup>2</sup> ) | Number of cycles to failure | Upsetting condition |
|----------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| G 1      | 65                                  | $1.21 \times 10^5$          | Bad                 |
| G 2      | 65                                  | $2.30 \times 10^5$          | Good                |

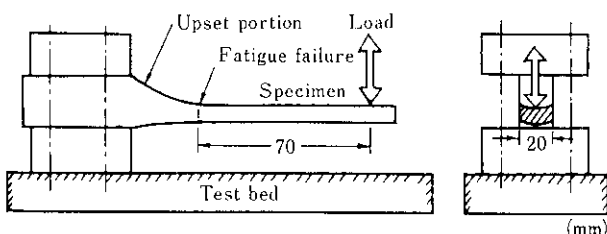


Fig. 10 Schematic illustration for fatigue test of upset portion of G105 and test result

管試験を含む各種テストでの評価を経て認可された後、1982年8 月から本格的にドリルパイプ原管の生産を開始した。

製造されたパイプの寸法に関するヒストグラムの例を Fig. 11 に示す。

### 5 結 言

API 規格のグレード E, X, G, S ドリルパイプ原管の製造技術を確認し営業生産を開始した。

ドリルパイプ素管の製造にあたっては強度・靱性の確保のため C-Mn-Mo 系を基本とした成分設計を行い、耐疲労特性に優れた材料とするため、S を0.010%以下、P を0.020%以下に管理した。

またアップセット部の形状を滑らかにするアップセット加工条件を選定した。

このようにして製造したドリルパイプは強度上規格値を十分満足することはもちろん、パイプ長手方向での差もほとんどな

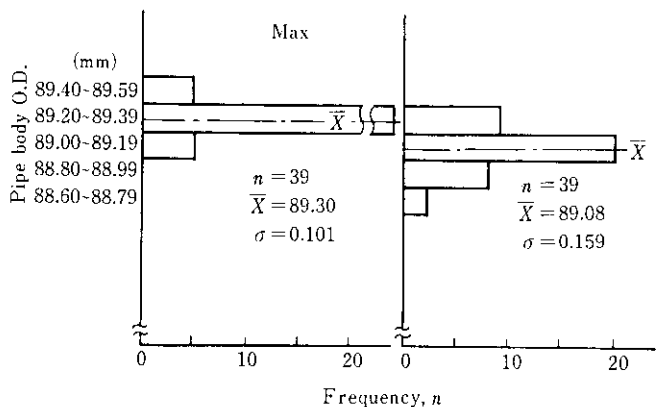
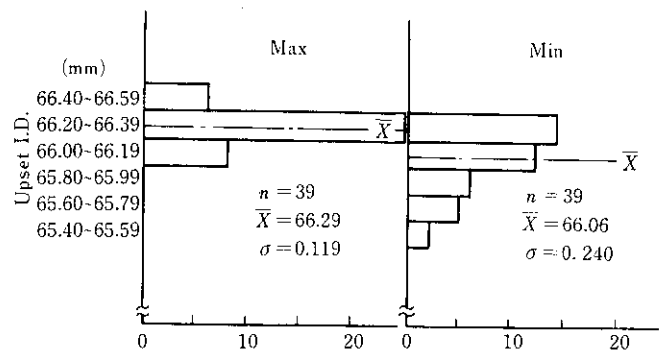
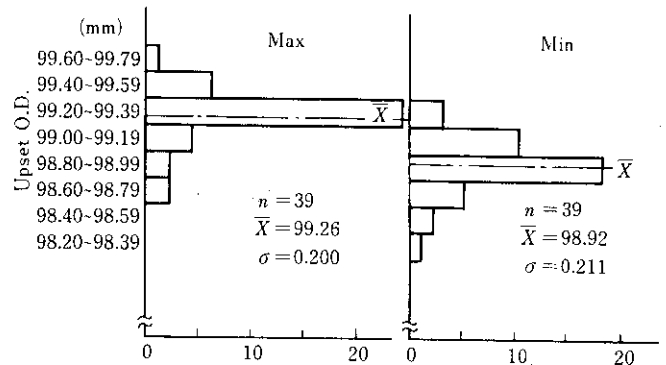


Fig. 11 An example of diameter histograms in grade E drill pipes ( $3\frac{1}{2}'' \times 13.3 \text{ lb ft} \times \text{R-2, EUE}$ )



| No. | Upset     |       | Metal flow and profile                                                             |
|-----|-----------|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Condition | Shape |                                                                                    |
| G 1 | Bad       | Bad   |  |
| G 2 | Good      | Good  |  |

Photo 2 Effect of upsetting condition on the profile and metal flow of the upset portion (G105)

い均一なものを得ている。硬度もアップセット部とボディ部での差はほとんどない均質なパイプで、さらに衝撃特性も L 方向で  $vTrs$  がいずれのグレードでも  $-40^{\circ}\text{C}$  以下という優れたも

のである。また圧潰強度も規格を十分に満足する。

今後さらに使用条件の苛酷化が予想されるが、品質の向上に努力し、予想されるニーズへ対応していく所存である。

#### 参 考 文 献

- 1) API Annual Report, (1981)
- 2) 河手, 金成: 鉄と鋼, 69(1983)4, S375
- 3) T. Doi et al: Kawasaki Steel Technical Report, (1981)4, 23
- 4) K. Takitani et al: Kawasaki Steel Technical Report, (1981)4, 31
- 5) H. M. Rollins: Oil and Gas J. (1966) April, 98
- 6) J. E. Hansford and A. Lubinsky: J. Pet. Tech. (1964) January, 77