

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.29 (1997) No.2

油井管用特殊ねじ高生産性製造技術の開発

Development of Highly Efficient Manufacturing Technology of Premium Joint for Oil Country Tubular Goods

島本 健 (Ken Shimamoto) 高野 順 (Jun Takano) 高橋 一成 (Kazunari Takahashi)

要旨：

近年の油井用 13%Cr シームレス鋼管の使用量増加に伴い、耐ゴーリング性、耐リーク性に優れた特殊ねじ『FOX Ⅱ』の需要が増加している。そのため、FOX の生産能力増強を目的として、川崎製鉄知多製造所に高生産性および高品質を有する新ねじ切りラインを建設し、1994 年 10 月に営業生産を開始した。この建設において、機械剛性および切粉排出性を大幅に改善した工具回転型ねじ切機および全自動の光学式非接触型ねじ寸法測定システムを開発し、世界初の実用化に成功した。

Synopsis：

Demand for the premium joint, "FOX(R)", which is superior in antigalling and antileak performance, has increased with the increase of 13%Cr steel seamless pipe for oil country tubular goods. Therefore, in order to expand manufacturing capacity of FOX, a new threading line of high productivity with superior product quality was built and commenced commercial production in October 1994. Along with this construction, developments of tool-rotating type threading machines with remarkable improvements in machine rigidity and chip disposability and fully automated optical-gauging systems were achieved, and resulted in use for actual manufacturing for the first time in the world.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Highly Efficient Manufacturing Technology of Premium Joint for Oil Country Tubular Goods



島本 健

Ken Shimamoto

知多製造所 シームレス管部シームレス管技術室



高野 順

Jun Takano

知多製造所 シームレス管部シームレス管技術室



高橋 一成

Kazunari Takahashi

知多製造所 シームレス管部 主任部員(課長補)

要旨

近年の油井用 13%Cr シームレス鋼管の使用量増加に伴い、耐ゴーリング性、耐リーク性に優れた特殊ねじ『FOX®』の需要が増加している。そのため、FOX の生産能力増強を目的として、川崎製鉄知多製造所に高生産性および高品質を有する新ねじ切りラインを建設し、1994 年 10 月に営業生産を開始した。この建設において、機械剛性および切粉排出性を大幅に改善した工具回転型ねじ切機および全自動の光学式非接触型ねじ寸法測定システムを開発し、世界初の実用化に成功した。

Synopsis:

Demand for the premium joint, "FOX®", which is superior in antigalling and antileak performance, has increased with the increase of 13%Cr steel seamless pipe for oil country tubular goods. Therefore, in order to expand manufacturing capacity of FOX, a new threading line of high productivity with superior product quality was built and commenced commercial production in October 1994. Along with this construction, developments of tool-rotating type threading machines with remarkable improvements in machine rigidity and chip disposability and fully automated optical-gauging systems were achieved, and resulted in use for actual manufacturing for the first time in the world.

1 緒 言

近年、油田、ガス田の開発環境の過酷化により、耐食性に優れた 13%Cr 鋼などの高合金鋼油井管の使用量が増加している¹⁾。それに伴い、高合金鋼用の継手として継手強度、耐ゴーリング性に優れた特殊ねじの需要も増加している。川崎製鉄は、Hunting Oilfield Service 社と共同開発した FOX® の生産量の増加を図るため、知多製造所小径シームレス管工場に新ねじ切りラインを建設した。その中で、機械剛性および切粉排出性に優れた工具回転型ねじ切機と全自動の光学式非接触型ねじ寸法測定システム(オプティカルゲージ)をそれぞれ、Mannesmann Demag 社(独)および Brown & Sharpe 社(英)との間で共同開発した。これは、高合金鋼特殊ねじの切削ラインへの導入としては、世界初の試みであった。当ラインは、1994 年 10 月に営業生産を開始し、現在も順調な稼働を続けている。本報では、新設備の開発および新ねじラインの操業、品質状況について述べる。

2 特殊ねじ継手の特徴

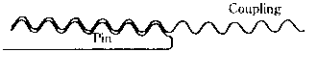
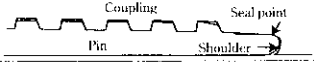
代表的な API ねじ継手である丸ねじおよび角ねじと、特殊ねじの特徴を Table 1 に比較して示す²⁻⁴⁾。特殊ねじは、一般的に角ねじにより継手強度を確保し、また、先端部のメタルシール部により、気密性を持たせることを特徴としている。その製造においては、API ねじに比べ精度の高いねじ切削技術および高度な品質管理技術が要求される。

3 新 9-5/8" ねじ切りラインの構成

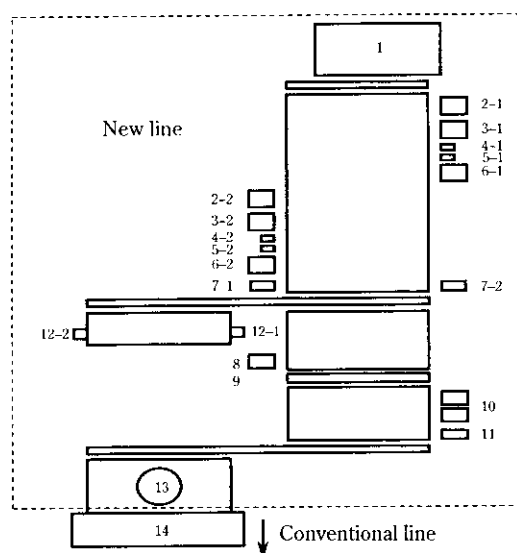
Fig. 1 に新 9-5/8" ねじ切りラインのレイアウトを、また、Table 2 に製造可能範囲を示す。チャージテーブルから搬送されたパイプの両端は、前加工機、およびねじ切機で切削された後、オプティカルゲージにて全数が全自動でねじ寸法が測定される。この後、13%Cr 鋼については、ねじ表面にステンレスビーズのピーニング処理がなされる。その後、反カップリング取付け側のねじ部にコンパウンドが塗布され、プロテクタが取り付けられる。他端側にはカップリングが自動で取り付けられ、締付けがなされる。そして、ドリフト試験と水圧試験がなされ、検尺、秤量、印字の後、塗油が施される。なお、ねじ不良品は、バンドソーにて切断された後、再ねじ切

* 平成 9 年 5 月 21 日原稿受付

Table 1 Comparison of the characteristic of API joints and "FOX" premium joint

Joint	Configuration	Performance			Range of dimensional tolerance
		Join strength	Sealing	Antigalling	
API Round		Poor	Good	Good	Wide (± 0.198 mm)*
API Buttress		Good	Poor	Poor	Wide ($+0.158/-0$ mm)*
Premium Joint (FOX)		Good	Excellent	Excellent	Narrow (± 0.050 mm)*

*Standoff in diameter



- 1; Charge table
- 2; Preturning machine
- 3; Threading machine
- 4; Chip remover
- 5; Air blow instrument
- 6; Optical thread-gauging system
- 7; Bead peening machine
- 8; Compound applying machine
- 9; Protector applying roller
- 10; Coupling power-tightening machine
- 11; Drift tester
- 12; Band saw
- 13; Turning table
- 14; Hydrostatic tester

Fig. 1 Layout of the new threading line

Table 2 Production size and thread types

Pipe diameter	2-3/8"-9-5/8" (60.3-244.5 mm)
Pipe length	8 500-13 800 mm
Thread type	API Round, API Buttress, Premium joint (FOX)

りのために返却される。

4 高生産性製造のためのアプローチ

特殊ねじの高生産性製造技術の開発におけるポイントは、ねじ切りの生産性向上、およびねじ寸法検査の効率化であった。そこで、新 9-5/8" ねじ切りラインの建設に当たっては、それぞれ以下に記すアプローチにより高生産性を達成した。

4.1 ねじ切りの生産性向上

鋼管のねじ切機は、パイプ回転型と工具回転型の二つに大別される。Table 3 にその比較を示す。特殊ねじの切削は、API ねじに比べより高い寸法精度が要求される。また、切削量が多いので、より良好な切粉処理性も要求される。このため、特殊ねじは、従来から機械剛性および切粉排出性に優れた旋盤方式のパイプ回転型ねじ切機により切削されるのが一般的であった。しかし、パイプ回転型は、複数の工具による同時切削ができないため、繰り返し切削が必要となり、切削時間が長い。また、パイプの搬入、搬出にかかる時間も長いので、生産性が低いという問題点がある。そこで今回、工具回転型の従来の欠点であった寸法精度および切粉排出性を改善し、特殊ねじ用の高生産性ねじ切機を開発した。

4.2 ねじ寸法要素検査の効率化

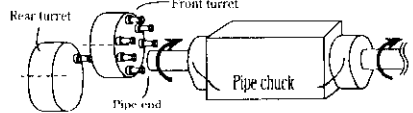
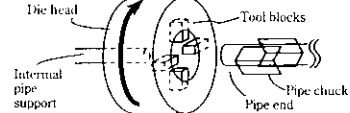
Fig. 2 に特殊ねじ FOX の代表的な寸法要素を示す。特殊ねじは、API ねじに比べてシール径、ニブ径など、より多くの寸法要素の検査が必要であり、その測定は、専用のゲージを用い人手によりなされるため、検査に長時間を要する。そこで、この検査の効率化を図るため、光学系を利用した全自動のねじ寸法測定システム（オプティカルゲージ）を開発した。

5 特殊ねじ切削用高生産性工具回転型ねじ切機の開発

5.1 高精度切削技術

工具回転型のねじ切機は、ダイヘッドを回転させながら、ダイヘッドに装着されたツールブロックを半径方向（X 軸方向）に拡張させて切削を行う機構となっている。このため、ツールブロックが受ける遠心力により X 軸系の機械要素が変形し、切削寸法に影響を及ぼす。そこで、これを軽減するため、ダイヘッド内部にツールブロックの遠心力を補償する機構を導入した。また、X 軸系の変形を最小限とするため、有限要素法による応力解析を行い、ツールブ

Table 3 General characteristics of pipe-rotating type and tool-rotating type threading machine

	Schematic illustration	Threading time	Pipe handling time	Machine stiffness	Chip disposability
Pipe-rotating type threading machine		120 s/end*	24 s/end*	Good	Good
Tool-rotating type threading machine		47 s/end*	4 s/end*	Poor ↓ Inaccurate thread dimensions	Poor ↓ Low operational ratio

*In case of 2-7/8" 13Cr-FOX

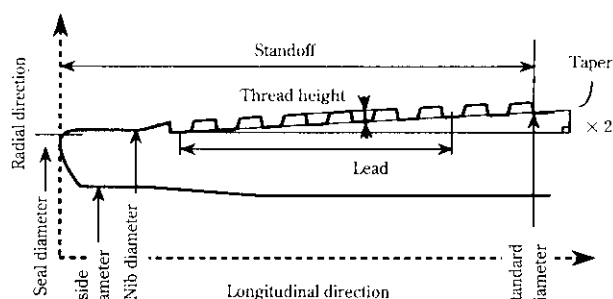


Fig. 2 Thread dimension of "FOX"

ロックの形状および X 軸系全体の強度バランスを最適化した。これらにより、Fig. 3 に示すように切削速度変化による寸法変動が著しく低減された。

なお、ねじ切機での切削負荷の軽減および管軸方向での均一化を図るため、Fig. 4 に示すように前加工機にてあらかじめテーパ加工を行っている。

5.2 切粉処理技術^{7,8)}

工具回転型のねじ切機は、切粉の排出性が悪いため、以下の問題を有する。(1) ダイヘッド内のインターナルパイプサポートやツールブロックに切粉が絡み付きやすく、絡み付いた切粉を取り除くに時間がかかる。(2) 切削工具の刃先が切粉で叩かれ、チップング

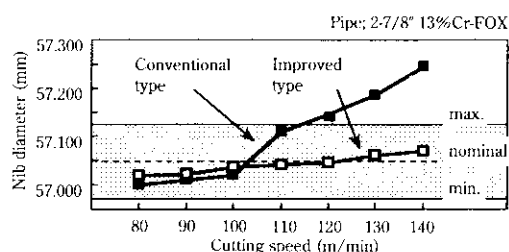


Fig. 3 Relation between cutting speed and Nib diameter

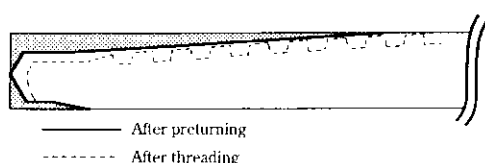


Fig. 4 Pipe end configuration after preturning

しやすく、寿命が悪化する。

このため、Fig. 5 に示す次の 2 点の改造をおこなった。(1) 切粉がダイヘッド内に残存し難い構造とするため、ツールブロックをダイヘッドの前面に出す。(2) チップブレイカなどの工具デザインの改良やツールブロックに切粉排出用のブロックを付けることにより、切粉がツールブロックの前方でパイプに巻き付くようにし、切粉と工具の衝突防止を図る。これらの対策により、人手による切粉除去および工具の刃先のチップングが著しく低減され、操作性を改善することができた。

5.3 総型バイトの開発

特殊ねじのシール部は、従来、ポイントカットツールを用いたならい切削を行っていた。しかしながら、高品質な表面性状を要求されるシール部は、送りを小さくして加工する必要があり、長い切削時間を要していた。そこで、Fig. 6 に示すようなシール加工用の総型バイトによる切削方法を開発し、シール切削時間の短縮を図った。

5.4 生産性

工具回転型ねじ切機に対する以上の改善により、特殊ねじ FOX

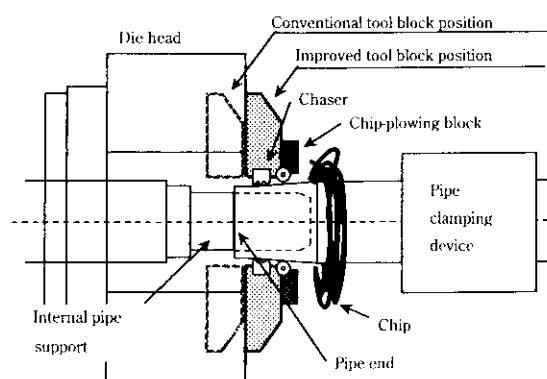


Fig. 5 Cross sectional view of threading part with pipe-rotating type threading machine

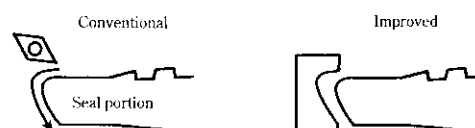


Fig. 6 Cutting method of seal portion

Pipe: 2-7/8" × 5.51 mm × R2 13%Cr FOX						
Type	Time(s)	30	60	90	120	150
Pipe-rotating type threading machine		Pipe transfer				Pipe transfer
		Threading				Total: 144 s
Tool-rotating type threading machine		Total: 51 s				

Fig. 7 Comparison of threading time between pipe-rotating type threading machine and tool-rotating type threading machine

の高生産性切削が可能となった。**Fig. 7** に従来のパイプ回転型ねじ切機と、今回開発した特殊ねじ用工具回転型ねじ切機の切削時間の比較を示す。パイプ搬入、搬出時間の短縮、複数工具での同時切削、および総型バイト使用によるシール部の切削時間短縮により、従来の3倍の生産性を実現した。

6 オプティカルゲージの開発

オプティカルゲージは、光学装置によりねじプロフィールを採取し、演算処理によりねじ寸法を算出する全自動寸法検査システムである。オプティカルゲージの測定原理は以下のとおりである。

Fig. 8 にオプティカルゲージの光学系の模式図を示す。測定対象となるねじの垂直方向と水平方向にそれぞれ2対配置された光源用ハロゲンランプと受光用 CCD (charge coupled device) により構成されている。この光学系を管長手方向に移動させながら、十分に短い周期でねじ外径と長手方向位置データをサンプリングすることにより、ねじのプロフィールを得ることができる。そして、このデータを独自に開発したソフトウェアで演算処理することにより、各ねじ寸法要素へと変換する。その後、合否判定を自動で行う。

開発にあたっての重要なポイントは、次の3点であった。

- (1) ねじプロフィールの高精度な認識
- (2) 既存の接触型ゲージの測定原理の踏襲
- (3) トレーサビリティおよびキャリブレーション体系の確立

6.1 装置構成

Fig. 9 にオプティカルゲージの構造の概略を示す。また、オプティカルゲージは、以下の装置から構成されている。

- (1) 光学系 (光源、CCD)
- (2) 光学系の位置を測定するリニアスケール
- (3) CCDにより得られた電圧信号およびリニアスケールより得られた光学系の位置を (X, Y) データとして保存するデータ処理ボード
- (4) 各機構の移動距離や速度指令制御およびねじ寸法要素の算出を行う CPU
- (5) 移動機構およびモータ等の電機系
- (6) その他の付帯装置

6.2 ねじプロフィールの高精度認識技術

寸法公差が μm のオーダーである FOX ねじの寸法測定を、高速かつ高精度で行うため、以下の対策を実施した。

6.2.1 光学系の分解能向上

Fig. 10 に示すように、CCD の出力電圧はねじにより遮光される部分では低く、遮光されない部分では高くなる^{9,10)} ので、出力電圧

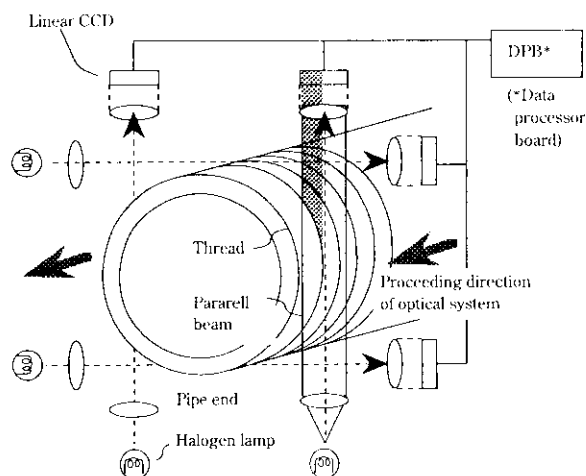


Fig. 8 Schematic illustration of optical system

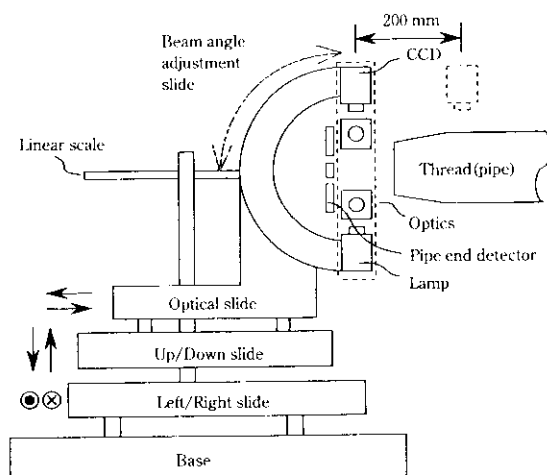


Fig. 9 Outline of optical gauge structure

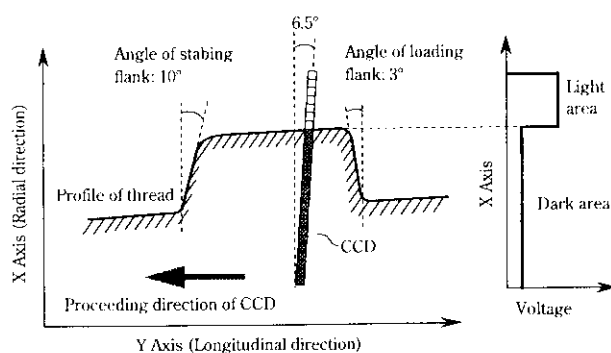


Fig. 10 Relation between profile of thread and voltage obtained by CCD

の変化する位置を検知することにより、ねじの外表面位置が求まる。光学的分解能は $4\mu\text{m}$ であるが、CCD の1ピクセル当たりの受光電圧を1/16に分割し、分解能を $0.25\mu\text{m}$ まで向上させている。

6.2.2 ねじプロフィール認識精度向上

CCD 受光範囲の長さを最も有効に活用するには、CCD を管長手方向に対し垂直に配置することが望ましい。しかし、ねじのロードフランク (3° 面) が CCD のピクセルの並びに対しほぼ平行となる

ため、ねじプロフィールデータ採取中に光学系が瞬時に通過し、リードフランクを高精度に認識するために必要なデータ点数が得られない。この問題は、CCD を光学系進行方向に対しやや傾斜させることにより解決できるが、傾斜角度をスタビングフランク (10° 面) より大きくすると、CCD の受光と遮光の境界が 2 点となる箇所が生じる。この場合、複雑な演算処理が必要となり測定所要時間が長くなる。そこで、CCD の受光と遮光の境界を常に 1 点とし、かつリードフランクおよびスタビングフランクにおいて各々数点以上のデータが得られるようにこの角度を 6.5° とした。さらに、得られたデータから最小 2 乗法によりねじプロフィールを決定し、より一層の精度向上を図っている。

6.2.3 パイプの曲がり補正機能の開発

ねじは螺旋状に加工されているため、ねじプロフィールの検出精度向上には、光軸をねじ溝と平行にする必要がある。このため、モータにより光軸角度を変更する機構を設け、サイズ替えごとに実施するキャリブレーション時に設定している。しかし、測定されるパイプに曲がりがあると、光軸がねじ溝と平行でなくなり、ねじプロフィール認識精度が低下する。そこで、ねじプロフィールデータ採取前にパイプの傾き量を算出し、光軸角度を補正する機能を追加している。

6.3 バーチャルプローブ技術の開発

オプティカルゲージのソフトウェア開発においては、世界中に普及しているメカニカルゲージのような接触型ゲージと同じ値が得られるよう、その測定原理を可能な限り踏襲することが重要な課題であった。その中の最も重要な概念のひとつが、接触型ゲージがプローブをねじ表面に接触させて測定を行うのをシミュレートする、バーチャルプローブ方式である。

これは、光学系により得られたねじプロフィールに仮想のプローブをフィッティングさせ、ねじ要素寸法を求める方式である。Fig. 11 に 5 TPI (5 ねじ/インチ) のリード測定について示す。リードとは、ねじピッチのことで所定のねじ山 (谷) 数の間隔で定義される。まず、ソフトウェアの定数テーブルに入力した既存の接触式ゲージのプローブ先端径と基準となる測定位置から、ねじプロフィールと仮想プローブとの接点を算出する。円周方向で 180° 対抗する位置では、接点は $1/2$ ピッチずれるので、基準測定位置に対して、 $1/2$ ピッチ前後する範囲でねじプロフィールと仮想プローブとの接点を探す。そして、それらの接点間の距離からリードを求める。他のねじ寸法要素についても同様にして接点を求め、得られた接点座標値を演算処理して各寸法要素の測定値を算出している。

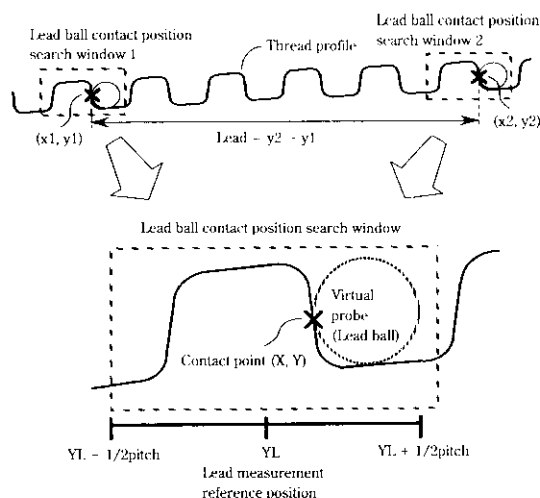


Fig. 11 Virtual probe for lead measurement

6.4 トレーサビリティおよびキャリブレーション体系の確立

オプティカルゲージの精度は、Fig. 12 に示すように、外径測定器としての精度、そしてバーチャルプローブを含めた演算ロジックにより保証される。オプティカルゲージで測定される主要ねじ寸法は、ねじ形状を有したマスターゲージによりキャリブレーションされる。また、このマスター寸法は、国家標準にトレースすることが可能である。

キャリブレーションは、受光素子の特性の経年変化を補正するために実施するものと、操業中のねじ外径変更時に行うものの 2 種類を備えている。前者では 5 次多項式により、CCD 受光範囲全般に渡るリニアリティ補正を行い、レンズの収差や CCD の個体差を補正する。後者では、測定するねじの外径毎の光学系の間隔変更、CCD のゼロ点、ゲイン、ねじ要素のオフセット、および光軸角度の設定を行う。キャリブレーション開始から可否確認までは約 15 min である。また、キャリブレーション時からの外径測定値および CCD のゲインの経時変化を、マスターゲージを用いて 2 h ごとにチェックしている。この所要時間は約 2 min である。

6.5 精度

外径測定値の再現性は、 $\sigma = 2 \mu\text{m}$ 以下と優れている。Fig. 13 に FOX ねじの二倍径測定値の経時変化を示す。キャリブレーション

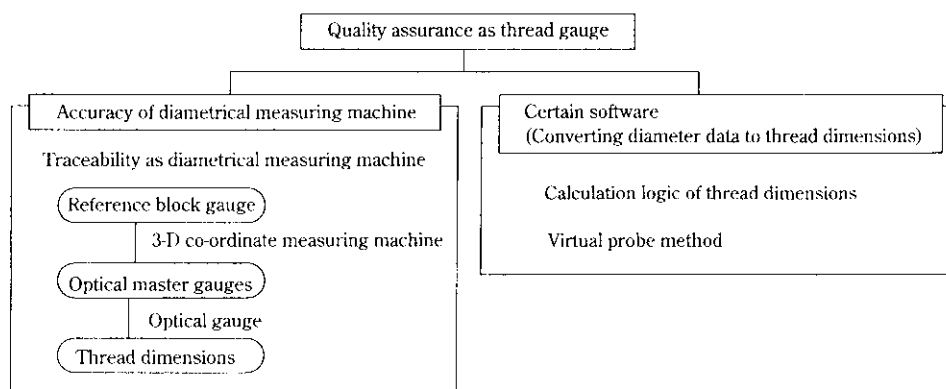


Fig. 12 Quality assurance of optical thread gauging system

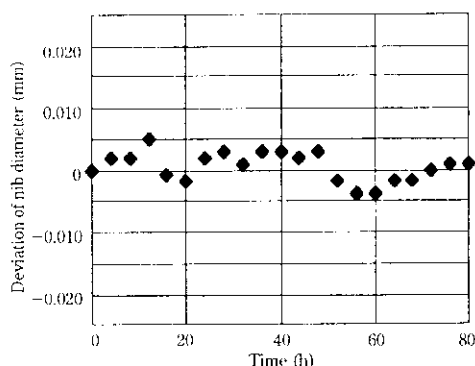


Fig. 13 Nib diameter variation

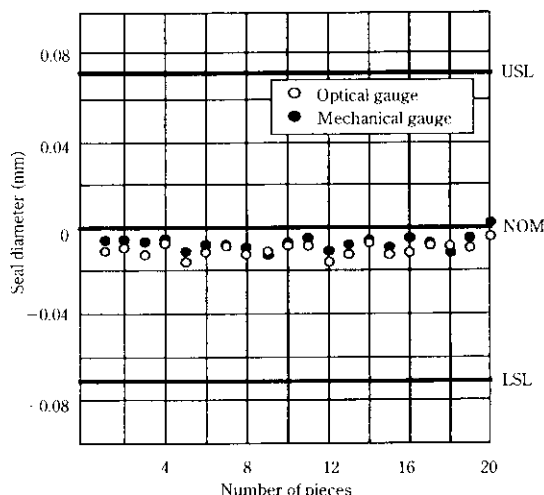


Fig. 14 Comparison of seal diameter between optical gauge and mechanical gauge (2-7/8" FOX)

直後から長時間に渡り、検定値 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内と安定している。

また、Fig. 14 は、オプティカルゲージおよびメカニカルゲージによるシール径測定値比較である。両者の差は、 $10 \mu\text{m}$ 以内であり、優れた相関を示している。

6.6 サイクルタイム

従来の接触型ゲージとの測定所要時間の比較の例を Fig. 15 に示す。オプティカルゲージは、従来の約 1/4 の時間で検査可能である。

6.7 オプティカルゲージ導入の効果

以上のように、今回開発したオプティカルゲージは、精度の安定性および既存のゲージとの測定値の整合性の点から、既存のねじ要素ゲージの代替として十分実用に耐えるものであり、かつ、ラインの生産性を阻害することなく、全数検査が可能である。

この他、本ゲージには、ねじプロフィールを CRT に表示する機能を装備しており、目視では検出困難である微小なねじ形状異常の検出が可能である。

また、パイプ毎の測定結果をプロセスコンピュータに伝送することにより、コンピュータによる品質管理が可能となった。さらに、測定値のトレンドをラインコントローラ CRT に表示することにより、ねじ切機の切削オフセット量調整のガイダンスとしての利便性

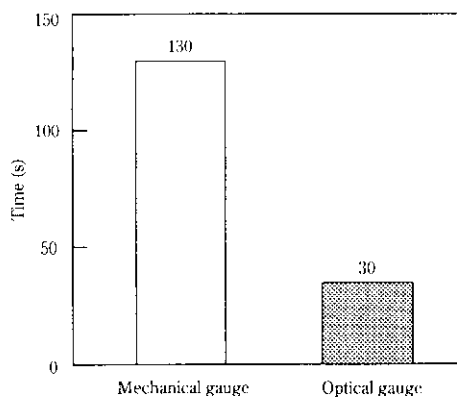


Fig. 15 Comparison of time for dimensional inspection between mechanical gauge and optical gauge (2-7/8" FOX)

を向上させることができた。

7 操業状況

7.1 生産性

Table 4 にパイプ回転型ねじ切機を有する 7" ねじラインと新 9-5/8" ねじラインの生産性の比較を示す。新ラインの生産性は、7" ねじラインの約 3 倍である。

7.2 品質

Fig. 16 に 7" ねじラインおよび新 9-5/8" ねじラインで切削したねじ寸法の推移を、スタンドオフおよびシール径を代表例として示す。ねじ寸法の測定値は、7" ねじラインは接触型ゲージを、新 9-5/8" ねじラインはオプティカルゲージを用いて得られたものである。新 9-5/8" ねじラインでは、7" ねじラインに比べより安定した品質が得られていることがわかる。

Table 4 Comparison of productivity between 7" threading line and 9-5/8" threading line

Pipe size	Thread type	Steel grade	Productivity (Piece/h)	
			7" threading line	9-5/8" threading line
2-7/8"	FOX	13%Cr	19.2	53.9
5-1/2"			13.6	38.7
7"			11.6	27.9

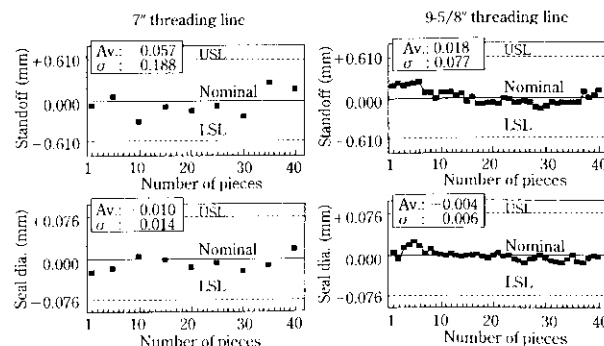


Fig. 16 Dimensional accuracy of 2-7/8" 13%Cr FOX thread

8 結 言

油井用鋼管の特殊ねじ FOX の量産のため、高生産性製造技術を開発し、新 9-5/8" ねじラインの建設に当たりこれを適用した。ね

じ切りの生産性向上のため、機械剛性および切粉排出性を改善した工具回転型ねじ切機を導入した。また、ねじ寸法検査の効率化を図るため、全自動のオプティカルゲージを開発した。これらにより、特殊ねじの高品質、高生産性の製造体制が確立できた。

参 考 文 献

- 1) 河手崇男, 片桐忠夫, 増田敬一, 高田 庸, 柴栖孝雄, 大坪 宏: 川崎製鉄技報, **17**(1985)3, 291
- 2) 倉橋連生, 曾根雄二, 中井陽一: 川崎製鉄技報, **17**(1985)3, 299
- 3) 川崎製鉄(株): 特開昭 60-260792
- 4) K. Ueno, G. C. Dearden, J. K. Duxbury, and T. Maguchi: The 18th Annual OTC, Houston (USA), May (1986), 221
- 5) Y. Hirano, T. Maguchi, K. Yamamoto, K. Ueno, and J. Duxbury: *Kawasaki Steel Technical Report*, **19**(1988), 23
- 6) 山本健一, 小林邦彦, 間口龍郎, 上野雄夫: 川崎製鉄技報, **21**(1989)3, 202
- 7) 佐野清人: 「切削加工データ集」, (1983), 166, [新技研開発センター]
- 8) 白井英治: 「切削・研削加工学上」, (1985), 151, [共立出版]
- 9) 計測自動車制御学会: 「計測制御技術事典」, (1995), 18, [丸善]
- 10) (株)東芝: 「CCDリニアイメージセンサ データブック」, (1991), 12
- 11) 光工業計測研究専門委員会: 「光応用計測の基礎」, (1989), 70, [計測自動制御学会]