

油井管用の高性能特殊ねじ継手“VAM®21”

VAM®21, an Innovative High-performance Premium Threaded Connection for OCTG

杉野正明*	山口 優	鵜飼 信
Masaaki SUGINO	Suguru YAMAGUCHI	Shin UGAI
濱本貴洋	中村圭一	
Takahiro HAMAMOTO	Keiichi NAKAMURA	

抄 録

近年、油田、天然ガス田の深井戸化や深海化に伴い、高圧、高温、高複合荷重に耐える強度と密封性能が油井管を接続する特殊ねじ継手に求められている。“VAM®21”は、油井管ねじ継手の試験規格 ISO13679 で最も厳しいレベル IV に、管本体降伏強度相当の荷重条件で完全準拠する高い強度、密封性能を有し、かつ油井現場における取扱性、締結容易性を従来製品より飛躍的に向上した高性能特殊ねじ継手である。開発は FEA と実体試作試験により行い、プロダクトラインアプローチの考え方で製品化全サイズの強度、密封性能を確認した。現場取扱性、締結作業性についても世界各地の実験井戸でリグテストを多数行い、優れた性能を有することを実証した。

Abstract

The Oil & Gas industry's increased activity in HPHT and deepwater well developments requires high strength and excellent seal integrity to withstand high pressure, high temperature and high combined loads like as external pressure and compression on threaded connections for Oil Country Tubular Goods (OCTG). “VAM®21” is developed as an innovative high-performance premium threaded connection which has high strength and high seal integrity to comply with the severest protocol of ISO13679 CAL IV, within the full pipe body envelope, and excellent handling and running ability on the actual rig site than conventional products. The development was carried out by using Finite Element Analysis (FEA) and physical prototype testing, and the strength and seal integrity of all production sizes was validated based on the product line approach. Regarding the handling and running ability, the excellent performance was proved with a lot of rig tests at many testing rig sites around the world.

1. 緒 言

近年、採掘容易な原油、天然ガスの減少に伴い、油田、ガス田の大深度化や深海化が進んでいる。これらの井戸はいわゆる高圧高温（HPHT）環境となり、地下の原油や天然ガスを採掘する油井管を接続するねじ継手には非常に高い強度と密封性能、特に耐圧縮性能と外圧密封性能が求められる。一方、油井現場でねじ継手の締結作業を行う際、後で述べるスタビング性が良くなければ作業効率が低下するだけでなく、ねじやシール面などが疵付いたり焼付きが発生して油井管ごと取り換えなければならなくなり、作井作業に重大な支障をきたす。そのため、現場取扱性や締結作業性もねじ継手の重要な性能である。

油井管ねじ継手は API（米国石油協会）が定める標準継手りのほか、メーカー各社がより高性能な特殊ねじ継手をこれまで独自に開発、販売してきた^{2,3)}。市場の要求性能は年々高まり、2002 年には油井管ねじ継手の国際標準試験規格 ISO13679⁴⁾が発行されたが、その中の最も厳しいレベル IV プロトコルに、油井管本体の降伏強度相当の荷重条件で準拠する高性能特殊ねじ継手は極めて少なかった。

新日鐵住金(株)は、この市場の高い要求性能に応えるべく、特に耐圧縮性能と外圧密封性能を従来製品より飛躍的に向上し、ISO13679 試験規格のレベル IV プロトコルに油井管本体の降伏強度相当の荷重条件でも完全準拠する高強度、高密封性を有し、かつ現場取扱性や締結作業性を従来製品よりも飛躍的に向上させた高性能新特殊ねじ

* 鉄鋼研究所 鋼管研究部 主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒 660-0891

継手“VAM[®]21”（バム 21）を開発した。VAM[®]21はプロダクトライン製品として開発され、現在5”から14”までの55サイズが製品化されている。またISO11960（API5CT）で規定される炭素鋼や高強度耐サワー用鋼だけでなく、ISO13680に準拠した新日鐵住金独自ブランドの高合金鋼にまで適用することが可能である。

本稿では、高性能特殊ねじ継手 VAM[®]21 をどのように開発し、その性能確認をどのような考えで実施したかについて述べる。開発の第一段階では、代表1サイズで試作試験と有限要素解析（FEA）を行い、後で述べるノーズやテーパガイドなどの基本設計技術を確認した。次いで第二段階において、基本設計技術を製品化対象サイズに展開し、各サイズ毎に設計の適正化を行うとともに、プロダクトラインアプローチに基づいて全サイズのパフォーマンス確認を実施した。最終段階では世界の様々な実験井戸で多くの現場締結作業性試験（以後リグテストと呼ぶ）を行い、優れた取扱性と締結・解体容易性を有することを確認した。

2. 高性能特殊ねじ継手“VAM[®]21”の特徴

2.1 密封機構の特徴

油井管の特殊ねじ継手は、図1に示すようにテーパねじのほか、密封性を高めるためにメタルシールと呼ぶねじ無し密封面と、発生応力やシールの密封接触を適正にコントロールするための締結ストッパであるトルクショルダを備えるものが多い。メタルシールは雌部材（以後ボックスと呼ぶ）より雄部材（以後ピンと呼ぶ）の径の方が僅かに大きくなっており（このピンとボックスのシール径差を干渉量と呼ぶ）、嵌め合わせたときにそれぞれが元の径に戻ろうとする弾性回復力で全周密着し密封性能を発揮する。

一般的な特殊ねじ継手では図2(a)に示すようにピン先端の外周面にシール面が設置され、さらに最先端面はトルクショルダとなっていて、締結完了時にこのトルクショルダが突き当たることによる反力の径方向成分がシールの密着力を増幅する。しかしこの従来構造では、高い引張荷重が作用している時、あるいは圧縮荷重が繰り返し負荷されてトルクショルダに大きな塑性変形が生じるような時は密封性能に悪影響がでることがある。特に高压流体が外部からねじのすき間を伝ってメタルシールまで浸透したときに、トルクショルダの増幅効果が無いとシールを通過して油井管内部に侵入してしまう、いわゆる外圧リークが発生するリスクが高い。

開発した VAM[®]21 は図2(b)に示すように、ノーズと呼ぶピンの延長部と、その先端部に設けたスタビライザ構造を特徴とする。ノーズの機能の特徴は図2(b)に示すように、トルクショルダが突き当たることによって生じる反力ではなく、ノーズ自体の変形剛性を利用してシール接触力を増幅する点にある。つまり干渉量によって縮径したピンのシール面が元の径に戻ろうとする弾性回復力が、隣接するノ

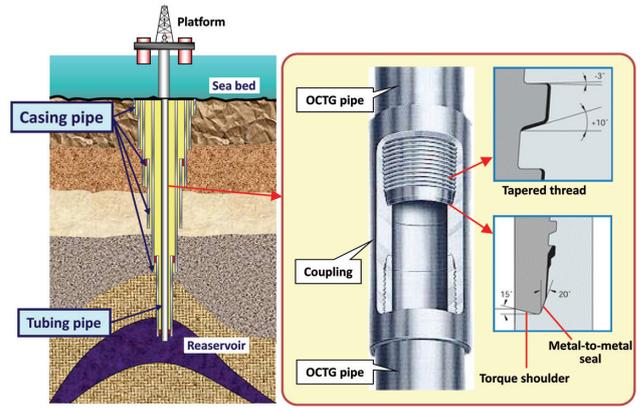


図1 油井管および代表的な特殊ねじ継手の構造
Schematic of typical well string design and premium connection

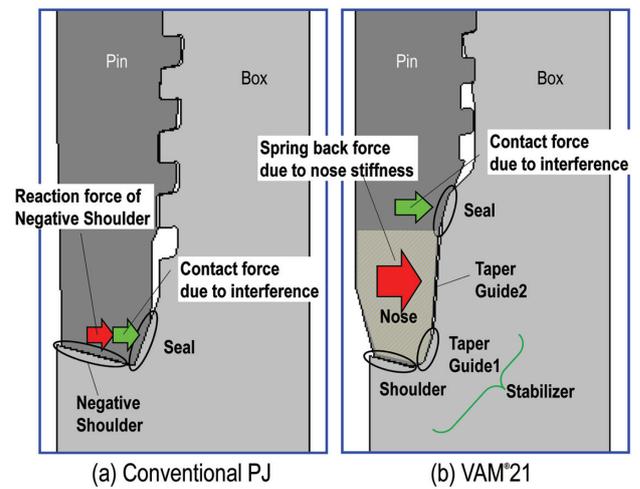


図2 シール構造と密封機構の特徴
Feature of sealing structure and mechanism

ズの剛性によって増幅されるのである。この増幅効果はトルクショルダの接触の有無に関わらず安定して発揮されるので、高い荷重が繰り返し負荷される間も高い密封性を維持することができる。

新しい密封機構のもうひとつの特徴はスタビライザ構造であり、図2(b)に示す、ピン先端面の負角のトルクショルダと、それに隣接するテーパガイド1の組み合わせを指す。この構造により、高い圧縮荷重が負荷された時のノーズの径方向への変形を抑制し、ノーズの圧縮変形を安定させることで隣接するメタルシールの圧縮負荷時の密封性能を安定させることができる。なおテーパガイド1の形状は従来製品のシールと酷似しているが、その表面には潤滑剤の封入圧抜き溝を刻設しているのでシールとしての機能はない。

この VAM[®]21 の新しいシール構造は、図3(a)に示すように雄ねじの頂部とテーパガイド1を結ぶ線よりもシール面が内側にあるため、締結作業中にシール面に当たり疵などが付きにくい。また図3(b)に示すようにシールとトルク

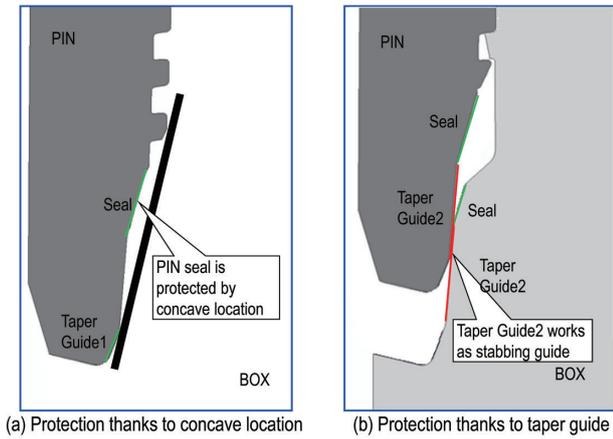


図3 当たり疵が付きにくいシール面
Schematic of seal surface protection

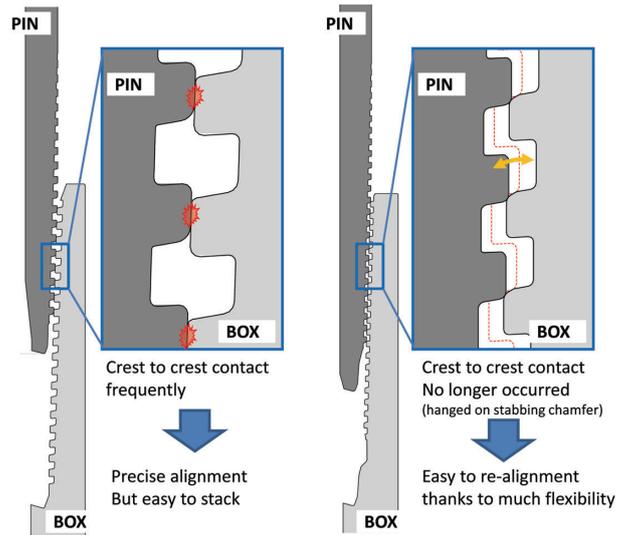


図5 スタビング性能の向上
Improving mechanism for stabbing performance

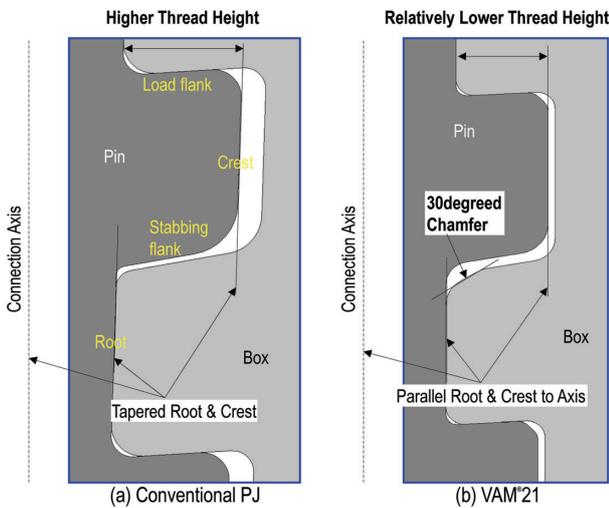


図4 ねじ形状の特徴
Feature of thread shape

ショルダの間にある2つのテーパガイド面も、締結中にシール面が異常接触して疵が付くのを防ぐ挿入ガイドとして機能する。

2.2 ねじの特徴

従来の特殊ねじ継手と、新しく開発したVAM®21のねじ形状を図4で比較した。API規格のバットレスねじを含め、多くの従来特殊ねじ継手では、ねじの底面と頂面がねじテーパに対し平行なねじ山形状を用いている。これに対しVAM®21では締結容易性、特にスタビング性能を向上させるために、図4(b)に示すように台形ねじのねじ底面と頂面を継手軸と平行にした。ここでスタビング性とは、締結開始時にピンをボックスに挿入する際に、ねじの目違いやねじ山の頂面同士の引っ掛かり（スタック）などを生じずに一番内奥までスムーズに挿入され、直ちに締結回転を開始できる性能のことをいう。

図4(b)に示すVAM®21の新ねじ形状は継手軸と平行な底面と頂面を有するため、図5のようにピンとボックスの

軸芯がたとえずれていたとしても、従来ねじのようにねじの目違いやねじ山の頂面同士が引っ掛かることなくセルフアライメント（自動調芯）し、ピンがボックスの内奥まで直ちに挿入される。さらには、雌ねじ山の挿入面に面取りを施すことで、スタビング時に挿入面の角が衝撃的に接触したときに生じる、焼付きの原因となるダメージを低減している。

3. 開発に用いた実体試験と有限要素解析の要領

3.1 実体試験要領

この新しい特殊ねじ継手の開発では、製品化する全サイズにおいてISO13679試験規格のレベルIVプロトコルに完全準拠することを最終目標とした。このレベルIVプロトコル試験は図6に示すようにひとつのサイズ・グレードにつき製品寸法公差を調整した8体のサンプルを用意し、繰返し複合荷重を負荷して行う試験であり、準備等も含めると非常に多くの手間と時間を要する試験である。

本開発は後述するように、設計コンセプトに一貫性を持たせたプロダクトラインアプローチの考え方に基づいており、このレベルIVプロトコルの完全版試験はもっとも一般的な外径・肉厚サイズで行い、その他のサイズは完全版試験と同等の厳しさを有する凝縮版のレベルIVプロトコル試験、または後述する有限要素解析を適用することで、完全準拠ニーズに対応した。

このほかに、継手の耐焼き付き性能の評価のため、様々なサイズ、鋼種、表面処理の組み合わせでメイクブレイク試験と呼ばれる締結と解体を繰り返す試験を実施した。この試験では通常、長さ1m程度の短管サンプルを用いるが、実際の油井管は約10mと長尺であるため、ねじの接触状態が実際と異なることが考えられる。そこで長尺の油井管重量相当の錘を取り付けたメイクブレイク試験や、実際に

長尺の油井管を使用するリグテストも実施した。

リグテストでは単にねじ継手のスタビリング性能や耐焼き付き性能を確認するだけでなく、実際の油井現場とはほぼ同じ環境で、実物の油井管を使用するという特徴を活かし、実井戸で生じる様々な状況、トラブルに対して新しく開発した継手がどのような利点を有しているかも検証した。

さらに油井管材料の引張強度を超えるほどの荷重が負荷された場合の最終破壊モードを確認するため、引張破断試験などの各種破壊試験も実施した。

3.2 有限要素解析 (FEA) の要領

VAM®21 の開発では、基本設計技術やサイズ展開の検討、

最終設計の全サイズ密封性能評価など、開発のあらゆる段階で弾塑性有限要素解析 (FEA) を活用した。解析には汎用の有限要素解析ソフトウェアである ABAQUS/Standard を用いた。解析はほとんどの場合密封性能、すなわち (回転対称体である) シール面の接触状況を評価することが目的であるので、図7のようなねじの螺旋を考慮しない2次元軸対称モデルを用いた。ねじ継手を締結する解析は次の要領で実施した。まず予めねじとシール面の有限要素メッシュを干渉量に相当する分だけ幾何学的にオーバーラップさせて作成し、解析過程でこのオーバーラップを解消することによって、ねじとシールそれぞれが嵌め合わされた状態をシミュレートした。次に ABAQUS の解析機能のひと

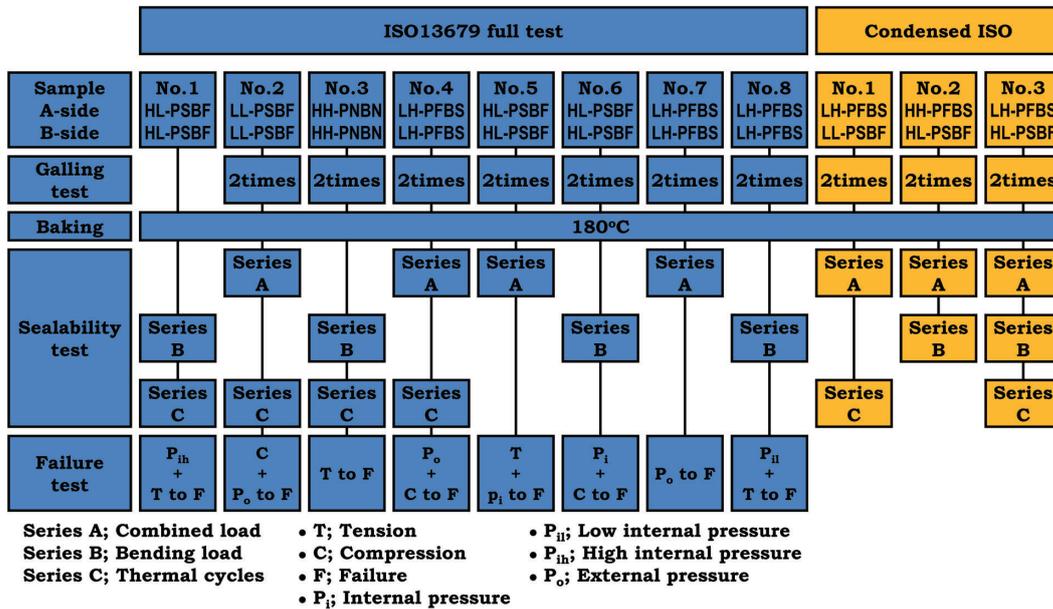


図6 ISO13679 CAL IV 規格の実体試験プロセス
Physical test flow of ISO13679 CAL IV used in this development

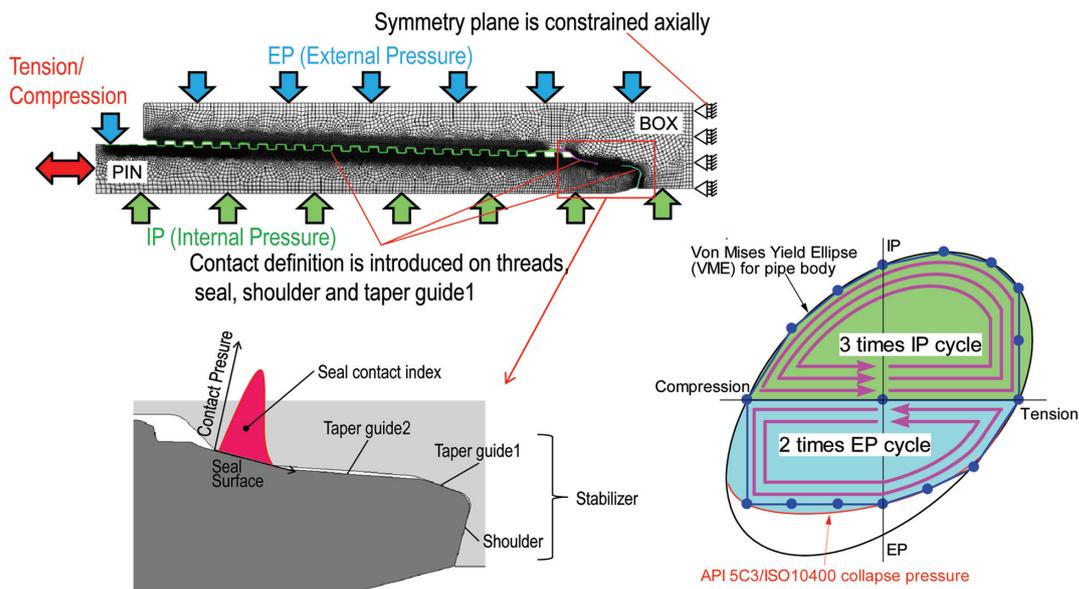


図7 FEA モデル、密封性評価パラメータおよび荷重条件
Schematic of FEA model, sealability parameter and loading condition

つである予張力導入機能を用い、ねじとトルクショルダ間の特定部分を解析過程で軸方向に延伸することによって、トルクショルダが突き当たり所定の目標トルクで締結された状態をシミュレートした。

FEAによる殆どすべての密封性能評価では、図7に示すISO13679試験規格のレベルIVプロトコルのうち、シリーズA試験を模擬した荷重シーケンスを適用した。継手軸方向の引張や圧縮、それに内圧、外圧を種々組合せた複合荷重を、図7の等応力楕円に示す要領で継手モデルに負荷した。シール面は圧力浸透を考慮し、解析過程においてシール接触面が開口した場合は、新しく曝露したシール面にも順次圧力荷重を負荷した。

解析において密封性能は単位周長さ当たりのシール接触力を無次元化したシール接触インデックスで評価した。シール接触インデックスは言い換えると、図7に示すシールの縦断面表面に沿って接触圧を積分した量であり、シール接触圧分布の下の面積に相当する。この指標はシール面の周長（ねじ継手の外径サイズ）の影響が排除されるので、異なるサイズ間の密封性能の比較が容易である。このシール接触インデックスは、漏れに対するマージンの大きさを表すと考えられ、これのみでは密封性能の絶対的な判断（漏れの有無の判定）はできないが、異なるコンセプト間の密封性能マージンの相対比較や、最も密封性能のマージンが少ないサイズの見極めには大変有用である。本開発では、最終設計の全サイズに対しFEAを実施したが、この評価で密封性能のマージンが少ないことが判明したサイズは全て実体試験を行い、漏れが発生しないことを確認している。

4. 新開発のシール構造の設計検討

VAM®21の新シール構造は、その着想を得てから設計適正化、サイズ展開、最終設計に至るまで非常に多くの検討を行ったが、本章ではこれらの検討のいくつかを紹介する。

まず設計の適正化を行うにあたり、シール構造の各設計因子が外圧密封性能に及ぼす影響をFEAで評価した。代表サイズにおいて3.2節で述べた解析を行い、図8に示す4つのシール構造設計因子それぞれが外圧密封性能（ISO13679試験規格のシリーズA試験を模擬した外圧負荷過程におけるシール接触インデックスの最小値）に及ぼす影響を評価した。解析結果も図8に示したが、これよりノーズ厚とノーズ長さの影響が大きく、ノーズがより厚く、より長いほどシール接触インデックスの最小値が高い、すなわち外圧密封性能が良いことがわかる。

外圧密封性能への影響が大きい前記2つの設計因子のうち、ノーズ厚については、肉厚を取り合うねじ部のねじテーパやねじ高さなどを適正化することで、それぞれの肉厚サイズで最大化を図った。ノーズ長さについては、いたずらに長くしても継手長さが長くなり、取扱性や製造面でかえって不具合が生じるため、弾性円筒シェル理論を用い各外径・肉厚サイズごとに寸法の適正化を行った。具体的には、図9に示すようにピンを多段階肉厚の弾性円筒シェルと仮定し、先端のノーズ部を除いた外表面にAPI BUL 5C3⁶⁾で規定される単純外圧を負荷した際のノーズ長さとしール径の縮径量の関係を求めた。結果は図10に示すように、ノーズ長さの増加につれてシールの縮径量は減少するが、ある程度の長さに達すると縮径量はそれ以上小さくならず、ノーズの

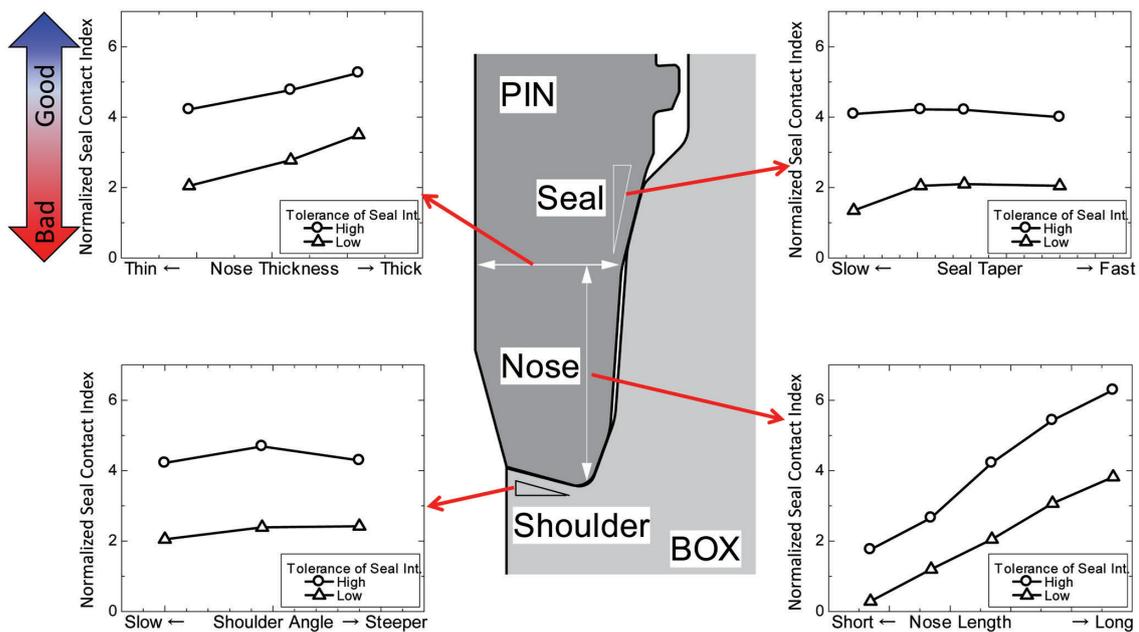


図8 無次元化シール接触エネルギーとシール設計因子の関係
Relationship between normalized seal contact index and seal design factor

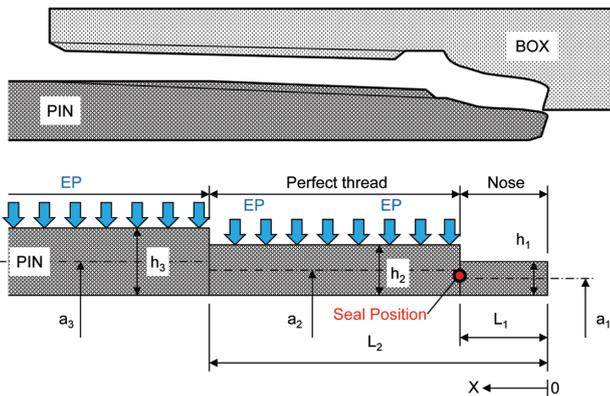


図9 単純外圧を受けるピンの弾性円筒シェルモデル
Elastic cylindrical shell model for Pin under EP

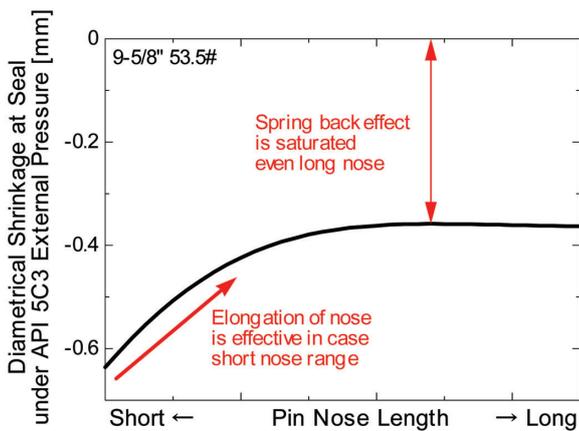


図10 弾性円筒シェルモデルで得られたピンリップの縮径量
Estimation result of Pin lip shrinkage by the elastic cylindrical shell model

剛性向上効果に限界があることがわかる。後で述べる製品化全サイズへの設計展開では、全サイズについてこの弾性シェル理論による検討を行い、それぞれのサイズでノーズ長さの適正化を行った。

5. 製品化サイズの性能評価

5.1 プロダクトラインアプローチに基づく性能保証

新特殊ねじ継手 VAM®21 はサイズラインナップの豊富な、いわゆるプロダクトライン製品とする方針で開発を行った。前述の基本設計コンセプトを5”から14”までの多くの製品化対象サイズに展開するにあたっては、プロダクトラインアプローチの考えに基づいて全サイズの性能確認を行った。プロダクトラインアプローチとは、油井管本体の外径と肉厚からなるマトリクス上で製品化対象サイズを包含する区画（ポリゴン）において、そのポリゴンのコーナーサイズ、量販サイズ、FEAで判明したクリティカルサイズといった、重要なサイズは全て完全版ないし凝縮版のレベルIVプロトコルの実体試験によって性能確認を行い、その他のサイズはFEAによる内挿で補完する手法である。

図11はメイクブレイク試験を行い、十分な耐焼付き性

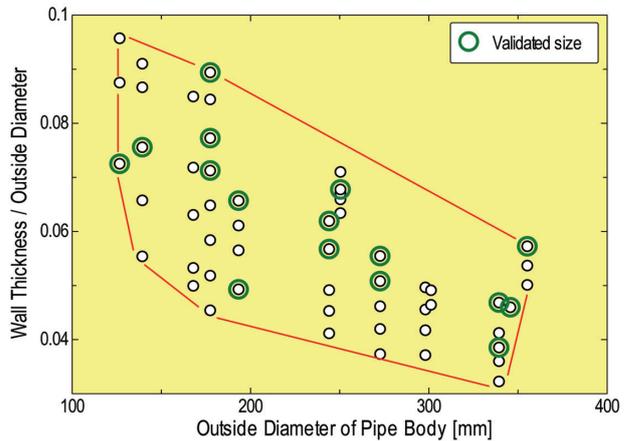


図11 耐焼付き性能を評価した繰返し締結／解体試験結果
M&B test results for verification of galling resistance

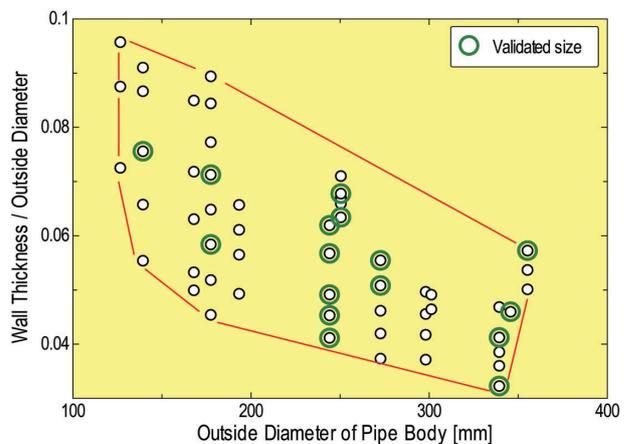


図12 引張強度を確認した引張破断試験結果
Tension to failure test results for verification of failure mode

能を有することを確認したサイズのマトリクスである。これらの耐焼付き性能の評価は炭素鋼をベースとし、焼付きに関して最もクリティカルであると考えられる各外径の最厚肉サイズを中心に行った。そして主要なサイズについては13Cr鋼やスーパー13Cr鋼、オーステナイト系ステンレス鋼といった新日鐵住金独自の高合金鋼による評価も実施した。図12には引張破断試験を行い、最終破断モードを確認したサイズを示す。試験を行った全てのサイズで最終破断モードはジャンプアウトではなく、管本体またはピンの不完全ねじ部での破断であることが確認できている。

図13はISO13679試験規格のレベルIVプロトコルの完全版または凝縮版の密封性能試験を行い、密封性能を確認したサイズを示す。ポリゴンコーナーサイズ、一般的な製品サイズ、それにFEAで判明したクリティカルサイズの全てでISO13679試験規格のレベルIVプロトコルによる密封性能試験は漏れは一切発生せず合格している。なお図14に示すようにプロダクトラインの全サイズで密封性能評価のFEAも実施しており、実体試験を行っていないサイズはいずれも、実体試験を行ったサイズより高いシール接触

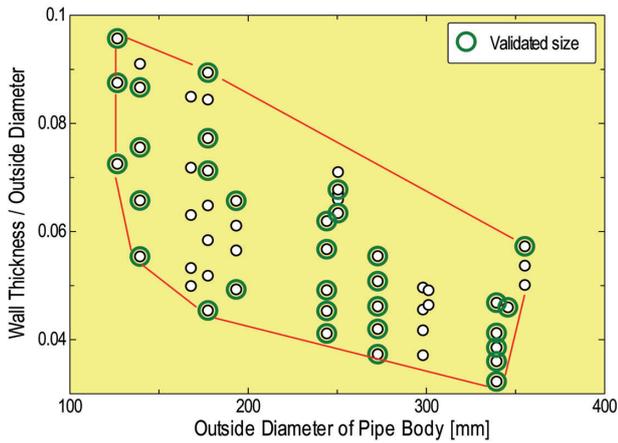


図 13 密封性能を評価した ISO13679 凝縮版試験結果
Sealability test results

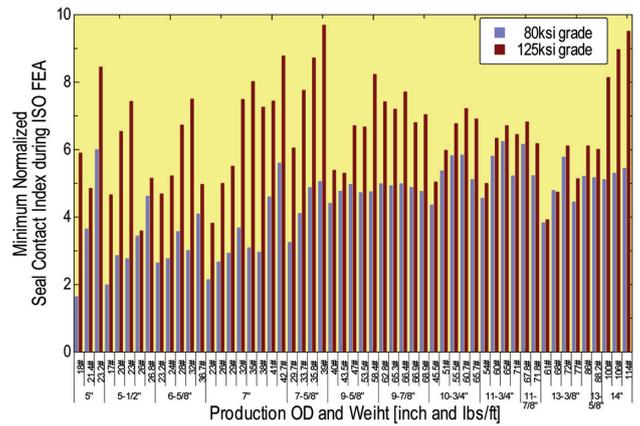


図 14 密封性能を評価した有限要素解析結果
Sealability verification results by FEA

Test Rig Site	Size	Grade	Connection	M&B success	Remarks
Pau	9-5/8"	P110	VAM® 21	5 times	
Houston	13-3/8" 72#	Q125	VAM® 21	5 times	
			Conventional Connection	more than 2 times	
Nagaoka			VAM® 21	5 times	
Houma	10-3/4" 65.7#	L80-	VAM® 21	5 times	
		13Cr	Conventional Connection	5 times	
Aberdeen	10-3/4" 65.7#	L80-	VAM® 21	5 times	
		13Cr	Conventional Connection	4 times	Cross thread



© Copyright 2013 Weatherford



図 15 リグテスト結果
Rig test results

インデックスとなっていることを確認した。以上の検討より、新しく開発した特殊ねじ継手 VAM®21 は製品化全サイズで ISO13679 試験規格のレベル IV プロトコルに合格できることが確認された。

5.2 リグテストによる取扱性の確認

油井現場における取扱性、締結作業性を確認するために、多くのリグテストを実施した。図 15 に示すように、異なる 3 サイズのレンジ 3 の長さ (約 12m) のサンプルを用い、世界中のさまざまな実験井戸でメイクブレイク試験を行った。リグテストでは、サンプルはサイドドア式エレベータ (吊り具) で吊りあげ、油井管端部のピンを、プラットフォーム上に固定したボックスに挿入し、ピンがボックスにスタビングして油井管の全重量が継手部に負荷された状

態で締結作業を実施した。世界各地のさまざまな実験井戸でこのリグテストを実施したが、全てのサンプルにおいて焼付きやねじの目違い、スタックといった問題は起こらず、ISO 13679 試験規格で規定された 2 回を超える、5 回以上の締結-解体に成功した。これらのリグテストにより、新しく開発した VAM®21 の優れた締結作業性を実証することができた。

5.3 顧客適用事例

VAM®21 は世界最高水準のねじ継手として、図 16 に示すように北海油田、東南アジア、中東、西オーストラリア、ブラジルなど、全世界で出荷実績を着実に積み上げている。本製品はこれらの地域を含む世界各地の 4000m を超える深井戸、深海井戸の開発を容易にし、特に、原油よりさら

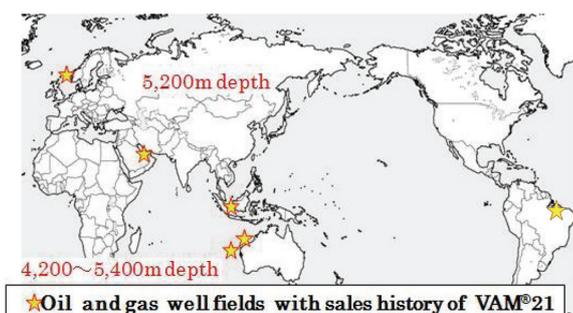


図 16 本製品の顧客使用実績

Oil and gas well fields with sales history of VAM®21

を行ってその優れた現場取扱性と締結作業性を確認した。本製品は既に世界各地に出荷され、特に従来技術では開発が困難であった深井戸、深海井戸に数多く適用されている。今後も市場の多様化、高度化するニーズに応え、サイズラインナップの拡充などを行っていく。

謝 辞

本製品は、バローレックオイルアンドガスフランス社と共同で開発を行った。ここに謝意を述べる。

参考文献

- 1) 例えば API Specification 5B: Specification for Threading, Gauging and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads. 15th Edition. American Petroleum Institute, 2008.04
- 2) Matsuki, N. et al.: Evaluation of Premium Connection Design Conditions. Drilling and Production Symposium 1985. ASME, 1985, p. 73-81
- 3) 小笠原昌雄 ほか：油井管プレミアムジョイントの開発. 製鉄研究. (328), 22-28 (1988)
- 4) ISO13679:2002: Petroleum and Natural Gas Industries – Procedures for Testing Casing and Tubing Connections. 2002
- 5) Sugino, M. et al.: Development of an Innovative High-performance Premium Threaded Connection for OCTG. 2010 Offshore Technology Conference. OTC 20734, 2010
- 6) API Bulletin 5C3: Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill pipe, and Line pipe Properties. 4th Edition. American Petroleum Institute, 1985.01

に深い位置に埋蔵されている在来型天然ガスの増産に寄与していくことが期待される。

6. 結 論

大深度、深海の高温高圧井戸の開発を支える高性能油井管特殊ねじ継手 VAM®21 を開発した。本稿では ISO13679 試験規格のレベル IV プロトコルに管本体降伏強度相当の荷重条件で準拠し、かつ優れた現場取扱性と締結作業性を実現した製品技術と開発の概要を紹介した。ピン先端に配置したノーズとスタビライザ構造により外圧密封性能と耐圧縮性能を飛躍的に向上し、その設計を 5" から 14" までの全 55 サイズに展開した。そしてプロダクトラインアプローチの考え方に基づき、全ての製品化サイズの密封性能、耐焼付き性能、最終破断モードを実体試験と有限要素解析により評価、確認した。また、新しいねじ山形状を採用することで優れたスタビング性能を実現し、実際にリグテスト



杉野正明 Masaaki SUGINO
鉄鋼研究所 鋼管研究部
主幹研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



濱本貴洋 Takahiro HAMAMOTO
和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部長



山口 優 Suguru YAMAGUCHI
和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部
OCTG継手技術室
主査



中村圭一 Keiichi NAKAMURA
VAMUSA, LLC
General Manager - Research & Development



鵜飼 信 Shin UGAI
和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部
OCTG継手技術室