

解説

大口径管推進工法の技術進化

ふなばし とおる
船橋 透
 機動建設工業(株)
 関東支店長
 (本誌編集委員)



1 はじめに

日本最初の推進工事は、1948（昭和23）年に兵庫県尼崎市において国道2号線と国鉄の交差するところで、ガスのさや管を手動のシップジャッキを用いて推進が行われました。それからの推進工法は、70年余りの間に急激に進化してきたことは皆さんご存知のことと思います。

そこで本稿では、推進工法の原点から、現在の技術進化に貢献してきたわき役もあわせて紹介しながら、大口径管推進工法の優れた技術が進化している過程などを理解していただければ幸いです。

2 大口径管推進工法の歩み

刃口式推進工法は、推進管先端に装着した刃口で、切羽（地山）を人力で掘削し、元押ジャッキにて推し進めます（写真-1）。切羽で人力掘削をするには、切羽の安定が確保されているのが前提です。私も入社して間もないころは、刃口式の推進業者の方々に、炭鉱出身が多かったのを記憶しています。従って、刃口式推進工法の原点は鉱山と隧道トンネルから引き継がれたものといつてよいでしょう。

当時は、地下水がなく掘削しやすい地盤、施工がやりやすい場所が多く、下水道を普及させるため、寝る暇もなく忙しかったと諸先輩方に話を聞きました。今では刃



写真-1 刃口式推進（切羽掘削）

口式工事は減っていますが、消滅してはいません。むしろ、既設管路との接合部として採用される場合もあります。深刻なのは、刃口式推進業者のなかで、後継者不足から先山（切羽を掘削する作業員）の人が貴重な存在となっているため、やがて消えゆく工法にならないようにしなければなりません。

しかし時代は、刃口式推進工事の切羽崩壊や地下水の流出、人力掘削の限界等の対応に迫られるようになってきました。そこで、密閉型の機械式掘進機が徐々に開発され、安全な作業環境が確保されるようになり、ますます機械式推進工法が採用されると同時に大規模な下水道整備の普及に大きく貢献しました。

それから、推進工法の経済性で工程短縮等の利点から、ライフラインの発展にも貢献するようになり、電力管路の地中線化、道路下輻輳するパイプラインや水道管路網の拡充等様々な施工を行っています。

3 大口径管推進工法の現状

3.1 泥水式・土圧式・泥濃式

推進工法において重要なのは、土質、環境、土被り等を考慮し、施工前に最適な工法を選定することです。大口径管推進は、開放、密閉に分類され、密閉型では、泥水式、土圧式、泥濃式と3つの分類となっています（写真-2～4）。その分類は、各々定義がありますが、近年では、その垣根を超えて利点を組み合わ

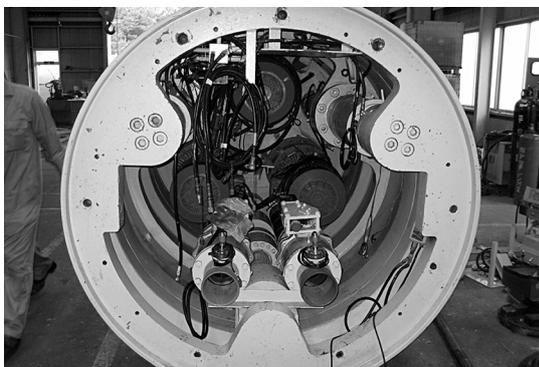


写真-2 泥水式掘進機 流体輸送（送排泥管）



写真-3 土圧式掘進機 スクリュコンベヤ（軸スクリュ+正面ゲート）

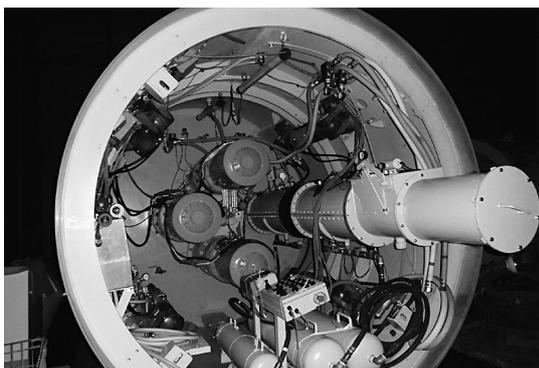


写真-4 泥濃式掘進機 排土管（ダブルピンチバルブ）

せた方式で施工していることもあります。しかし、推進工法では、各々の利点欠点を正しく理解し、その現場に最適な工法であることを十分に理解し施工することです。

①泥水式推進工法では、地下水圧が0.3MPa以上の高水圧対応では、掘進機、推進管、発進到達坑口に高水圧対応策を行っています。立坑においては鏡切をしない掘進機による直接切削可能な材質（FFUやNOMST等）といったシールド工事で使われている土留め材も使用されています。この時の注意点は、掘進機の切削スピードを微速制御で行うことです。その他では、泥水式特有の土砂排土は流体輸送のため、崩壊性の高い砂質土では、差圧密度計を用いた乾砂量管理または、送排泥の差による土量換算方式などを用いて、リアルタイムの管理をすることもあります。また、作泥材も逸泥防止等、比重・粘性管理は最も重要な管理項目となっています（写真-5、6）。

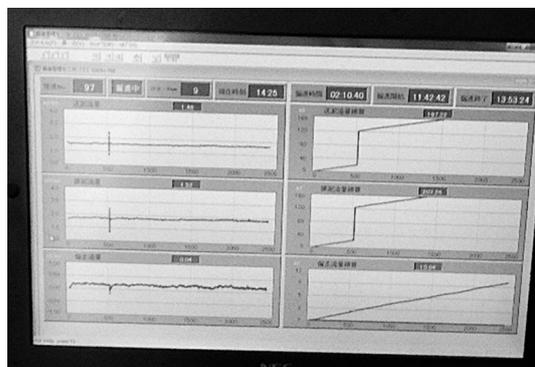


写真-5 掘削土量管理システム



写真-6 γ 密度計

②土圧式推進工法では、切羽チャンバ内を泥土で満たしていますが、加泥材が泥土の性状を左右し、止水性を保持して塑性流動化し、なおかつ排土をスムーズに行えるかが肝要です（写真-7、8）。排土方式では、圧送排土または土砂バケットによるバケット排土になりますが、圧送排土では連続的な掘進が可能です。削土の性状を左右する加泥材の適合が日進量に影響してしまうことに注意してください。

③泥濃式推進工法では、最も歴史が浅いのですが、実状では、3工法の中では近年一番多く施工されています。比較的土圧式に類似していますが、高濃度泥水注入とカッタの攪拌によって泥土となり、通過径が大きいピンチ弁による間欠排土された泥土を真空吸引排土します。近年では、この構造を補うために排土直結型にすることも行っています。

3.2 長距離・急曲線施工

ひと昔前になりますが、超長距離推進での日本一を競い合うといった風潮がありました。その結果、呼び径1000で1スパンL=1447.6mを達成させています。推進工事では、中押工法での尺取虫方式での対応が可能であるため、基本的な元押設備に中押しで超長距離が可能です。できる限り推進力低減する滑材や注入方式などが開発されてきているため、従来の中押方式に、新しく開発された推進力低減システムに加えてこのような超長距離施工が行われました。しかし、たとえ呼び径1000とはいえ、測量管理や、坑内点検、不測の事態でのトラブルが発生すれば、人の出入りをスムーズに行うことに戸惑いと閉塞感等の不安はぬぐえません。現在では、安心安全を主としたリスク管理体制が求められていることを鑑みれば、1kmを超えない推進距離で設計施工することが望ましいのではないかと考えます。

また、急曲線においては、推進管の標準管の長さは2.43mで、半管の1.2mのJC管が通過できる曲線半径で計画されますが、合成鋼管のように特殊な短尺管を用いることで、より曲率半径の小さい曲線を可能としています。それに加え、掘進機の対応も2段中折れ機能を有した構造でなければなりません。急曲線施工をする場合の最も重要なことは、推進力伝達材の強度計算を行

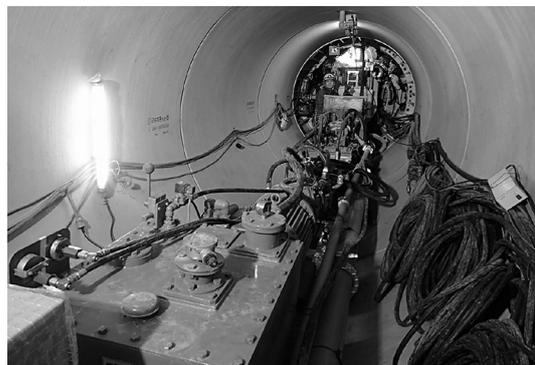


写真-7 機内土砂圧送装置



写真-8 泥濃式の排土状況

い、推進管の追随性を確実にし、目地開きによる止水性の低下や軸方向推進力の応力を安全側に抑え、管破壊が生じないようにすることが最も重要です。そのためにも、推進力伝達材のシミュレーションを行い、適正な伝達材を使用し、計画された推進力を超えないよう推進力低減策を講じなければなりません（図-1）。

4 進化に伴い支えた周辺技術

4.1 材料の開発（加泥材、作泥材、滑材、裏込材）

推進工にとって最も重要なのは、使用する材料です。泥水式では、一般に、切羽管理で使用する作泥材や増粘材では、ベントナイトを一般的に用いますが、一液性のものや水溶性ポリマーを成分とした材料も使われます。泥水二次処理で余剰泥水を脱水するときに使用する凝集材ではPAC剤が主流でしたが、運搬や扱いが容易になったポリマー系凝集剤も扱います。泥土圧式では、土質成分の粘土シルト含有に大きく左右されますが、各材料メーカーで独自に開発しているもの、一般的なベン

目地番号 108 計算番号 116 適用延長 246.577m CP2000岩盤2-1
 選択HP GJC71-2.43 選択CP 90° 20mm2.0倍180° 10mm2.0倍
 最大応力 23.3N/m² 最大目地開 24.3mm
 最終区間 2 最終目地開 15.7mm

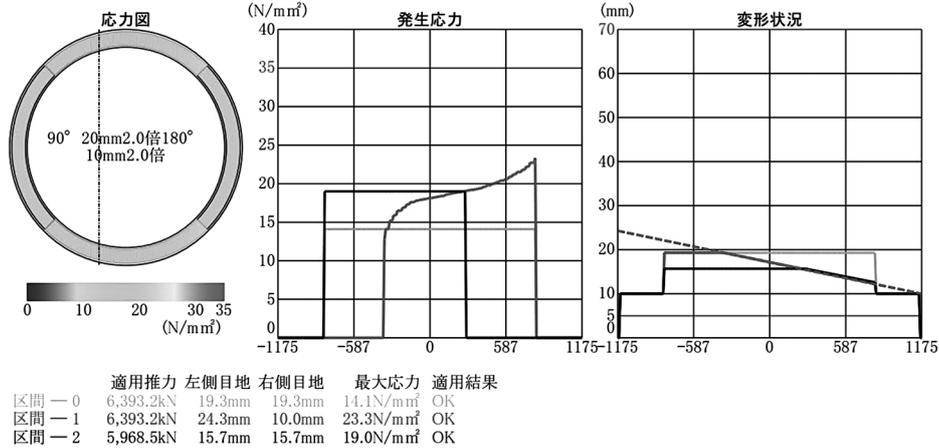


図-1 推進力伝達材計算例

トナイト溶液等を加味し、ベストマッチの加泥材の配合、注入量を探り当てなければなりません。

泥濃式では、高濃度泥水の仕様は当初同じものが使用されていましたが、近年土質や地下水を考慮し、材料、配合を変えて行くようになってきています（写真-9、10）。

滑材では、摩擦低減効果を有した固結タイプや一液性ポリマーは今や一般的になっています。近年では、地下水に含まれる鉱物や塩化物等によっては摩擦低減効

果が損なわれたり、希釈による効果減少を防止する滑材も開発されているので、現場条件に応じた対応が必要です。また、無害な材料も環境保全に対し大切な条件になります。

裏込材は、今では一液性のプレミックス型の材料を使うのが主流になりました。そのため、運搬や練り混ぜに対し、施工性の向上に寄与しています。

4.2 推進力低減

設計推進力は推進延長の増大につれ増高します。推進力は、面板（先端）抵抗、と周面抵抗に距離が比例するため、如何に周面抵抗を抑えるかが重要になります。まずは前に記述した滑材です。滑材は、掘進機と推進管とのクリアランスに対し、確実に充填注入し、推進管列の移動とともに滑材の劣化が生じるためその防止補充を行うことが各工法協会にて開発されてきました（図-2）。推進工事では、長距離・急曲線推進に伴う滑材充填方式のシステム（図-3）は不可欠で、テールボイドが保持されなければ、推進力の上昇、地盤の緩みによる沈下等が生じるため、確実な低減システムを採用します。

また、推進管の表面のコンクリートの摩擦を低減する施策として時々使用するのが、推進管に直接塗布する摩擦低減剤です。これは、地中での撥水効果もあり、推進力低減効果を発揮するので大きな断面や長距離推進に採用されています（写真-11）。

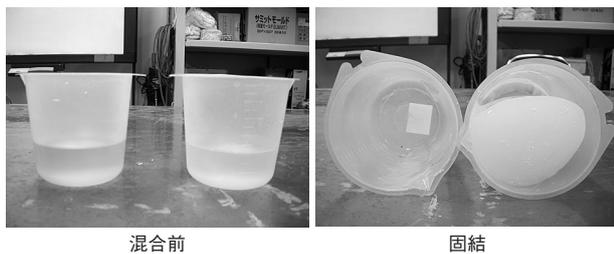


写真-9 固結滑材（クリーンFD-II）（提供：株式会社花マテリアル）

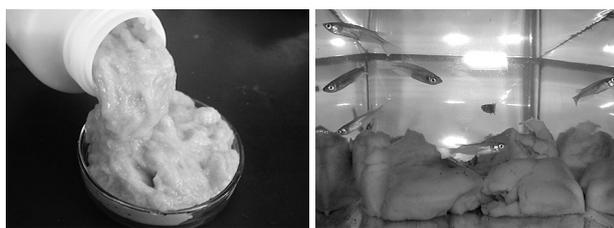


写真-10 可塑性滑材（アルティークレイ）

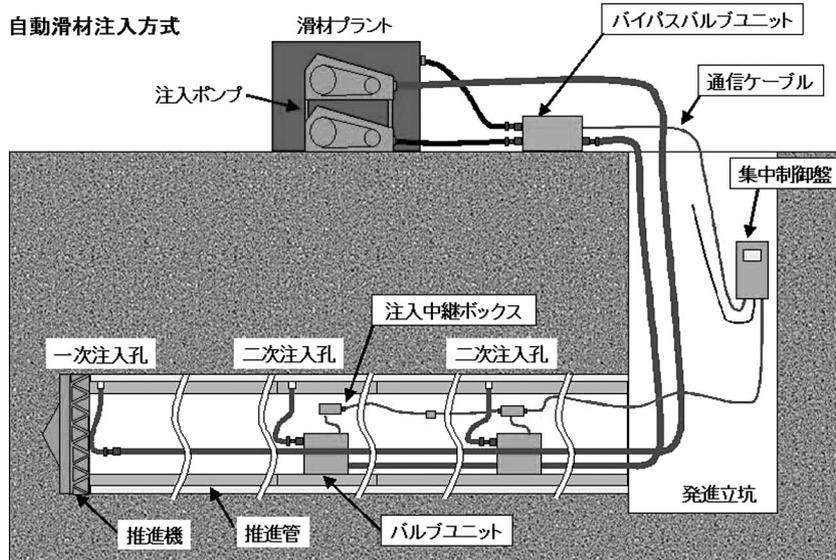


図-2 推進力低減システム（アルティミット工法）

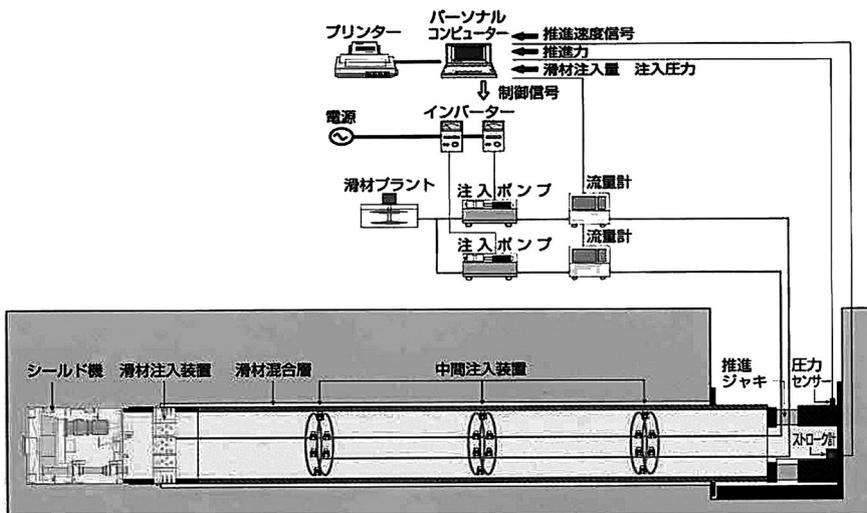


図-3 管周混合推進工法の滑材注入システム¹⁾



写真-11 摩擦低減剤を塗布した管

4.3 測定の自動化

推進工事に携わる我々にとって重要なのは精度管理です。長距離、急曲線施工においては、掘進機の位置、方向を把握していなければ方向修正をすることができません。ジャイロコンパスは急曲線の時に掘進機先端部に搭載し、リアルタイムに方位角を検知し、所定の曲線線形どおりに曲がっているかを判断します。今では光ファイバージャイロが発達し、初期設置時や整定時間が以前より短縮されていることと、運搬等の扱いで傾き角度の制約と振動を与えないといった慎重な扱いがなくなったことです（図-4、写真-12、13）。水レベル計も垂直方向の管理としてリアルタイムな検知ができるため中口径で使用することもあります（写真-14）。これらと併用し、自動測量システムによって正確な測量を行い精度誤差を求め、次の推進の方向制御管理をすることでより正確な位置確認が行えます。

4.4 その他の設備

環境に配慮した対応対策ではプレキャスト支圧壁（バックロック）があります。支圧壁を所定の推進力に対抗するためにコンクリート壁を打設し元押ジャッキの反力として用いてきましたが、そのジャッキに対抗する反力材としてコンクリートの代用にしています（写真-15）。今までは推進完了時にコンクリートをハツリ撤去していましたが、プレキャスト製を用いることで産業廃棄物の削減とハツリ作業を縮小できています。また、推進管径にあわせて大きさと数を組み合わせることで現場に即した対応が可能となります。

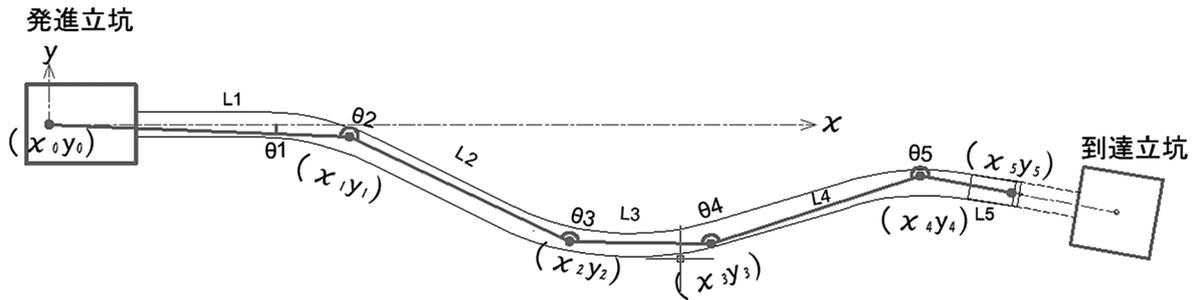


図-4 管内トラバース測量例（掘進機先端座標値のスレと比較する）

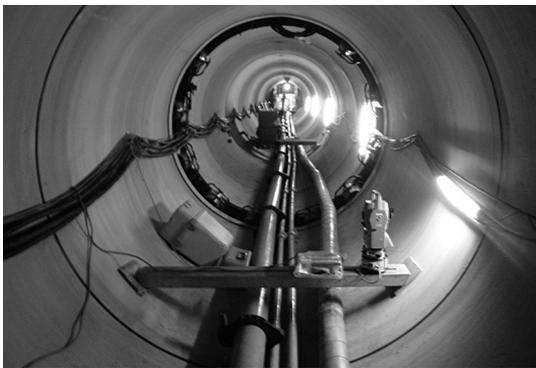


写真-12 管内自動測量



写真-15 プレキャスト支圧壁（バックロック）

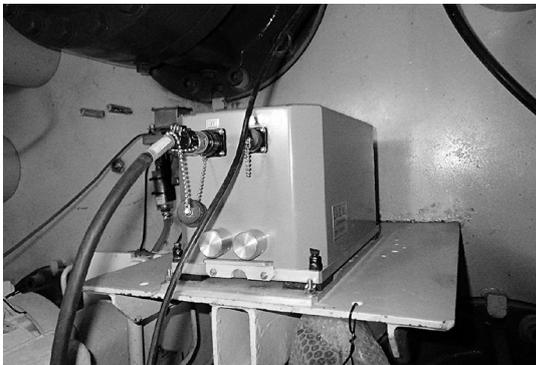


写真-13 光ファイバージャイロ

その他として、泥水式では防音ハウスや防音壁を採用し、現場に即した大きさ等で設計し、使用します。一次処理機（振動篩）の架台は、エアダンパ構造とし、振動と騒音を抑える工夫も行われています（写真-16）。

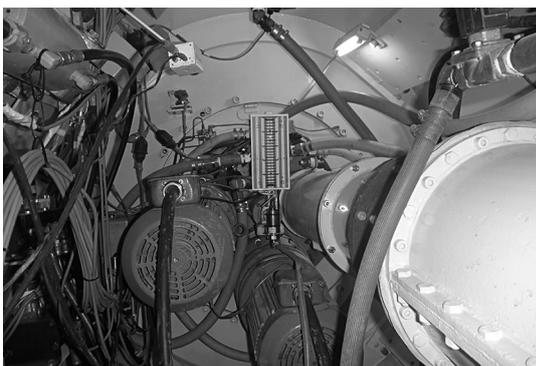


写真-14 水レベル計



写真-16 泥水振動篩のエアダンパ

5 特殊推進工法の進化

ここからは、大中口径管推進工法での様々な必要に迫られ、それに対応した工法を紹介します。

まず、推進シールド切替型推進工法ですが、名目どおり最初は推進区間として掘進を行った後にシールド工法でセグメントを掘進組立を行うことで、お互いの利点を組み合わせたものとなっています。

次は、既設構造物からの発進や到達する推進工法です。今までにも何回かこの特集号を紹介（Vol.33 No.8、9ほか）していますので参照願います。支障物切削技術では、今まで対応が困難な金属支障物を切削等する工法が開発されてきています。

近年、土質調査によっては可燃性ガスが含まれていることが確認されています。推進工事をするにあたり密閉式掘進機では防爆対策を講じる必要があります。また、換気においては送気排気の検討と自動ガス検知器によるリアルタイムな計測を行い事故防止に努めなくてはなりません。そこで万が一可燃性ガスが流入し基準を超えた場合は自動遮断器が作動し電源供給を遮断することで爆発引火を防止する対策をしています。防爆と非防爆の境はエアカーテン構造とし、当然、防爆領域での機械器具は防爆仕様になります（写真-17、18）。

6 おわりに

大中口径管推進工法がこのように72年の歴史とともに発展してきたのは、この推進工事に携わる先人の努力であり、多くの失敗とトラブルを克服してきたからです。都市部においては高速道路、地下鉄、地下構造物、電気、ガス、水道、下水道等ライフラインが張り巡らされているなかで、新たな推進工事や改築や内面補強等

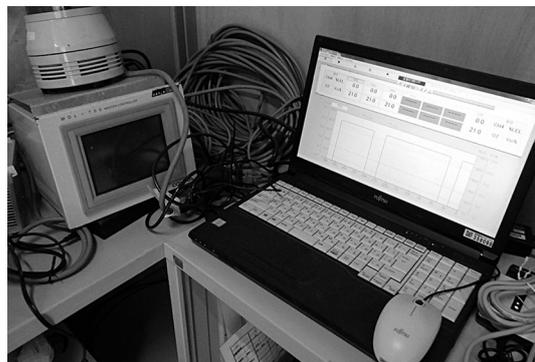


写真-17 ガス検知



写真-18 管内換気

老朽化対策が急務となっており深刻な課題を克服しなければなりません。このように、ますます推進工法が発展し進化するためには、中央制御による管内無人化による管理をよりICT化し、AI機能を取り入れた制御管理システムとして進化していくよう研究されていくことを希望します。

【参考文献】

- 1) 「滑材注入のシステム化を図り、確実な滑材効果をもって安全な長距離推進を可能とした「管周混合推進工法」」
石塚千司、月刊推進技術 Vol. 29 No. 3 (2015年3月号)