

量産型真空浸炭設備

吉本 誠 司*

1. 緒言

今日、産業の構造変化やグローバル化によって従来の生産技術をそのまま継続していくのではなく、大幅なコスト削減や省エネルギー化、製品の高性能化への要求が強くなっている。鋼材の表面硬化技術ではガス浸炭焼入法が広く普及しており、生産性や品質管理の向上、作業環境の改善を推進しているが、雰囲気ガスと鋼材との基本的な処理プロセスに大きな変化がなく、革新的な飛躍はできていない。そのため表面硬化法のブレイクスルーとして真空浸炭法が期待されており、特に自動車のトランスミッション用歯車などの精度が要求される処理品に対しても生産がおこなわれるようになってきた。

本稿では真空浸炭とガス浸炭を比較し、弊社が開発した真空浸炭設備について紹介する。

2. 真空浸炭とガス浸炭

浸炭焼入処理は炭素を含有した鋼材を急冷すると硬化することを利用して、処理品表面のみに炭素を浸透させて急冷し、内部は靱性を保ったまま表層のみを硬化する処理である。この炭素を浸透させるプロセスが真空浸炭とガス浸炭では異なる。

ガス浸炭は雰囲気ガスと鋼材表面の炭素量が平衡状態になるように進む可逆反応によって炭素を浸透させる。この反応が平衡状態に達した場合の鋼材の炭素濃度はカーボンポテンシャル (CP) と呼ばれ、理論的に計算できる値である。雰囲気ガスは CO と H₂ の分圧の高いガスが効率よく、このガスを設備に常時流気させ、エンリッチガスと呼ばれる炭化水素ガスを同じく導入し、その量にて CP が一定になるよう制御している。このため処理後の表面炭素濃度は CP と同等になる。ただし、雰囲気中の微量酸素と酸素との親和性の高い合金元素が優先的に結合するため表面で合金元素欠乏がおこり硬さ低下が発生する^{1), 2)}。

真空浸炭は減圧下において炭化水素ガスを直接導入し、鋼材表面に吸着したガスが触媒作用により分解し炭素を浸透させる。この吸着反応はガス浸炭の平衡反応より早い。ガス浸炭、真空浸炭の処理時間における鋼材の炭素濃度分布と 0.3% 炭素濃度深さの比較を図 1 に示す。真空浸炭は鋼材表面の炭素濃度が 1 分以内に飽和値に達するため、同じ有効硬化層深さを狙った処理の場合、処理時間が短縮する。ただし、内部への炭素の拡散は Fick の第 2 法則で知られるよう温度と炭素濃度差と時間で決まるため、長時間処理した場合の時間

* 中外炉工業株式会社 熱処理事業本部 真空機能材事業部 真空浸炭課 課長補佐 S.Yoshimoto
連絡先 E-Mail アドレス : Seiji_Yoshimoto@n.chugai.co.jp

短縮効果は小さくなる。

真空浸炭の特徴として均一に浸炭できる点があげられる。ガス浸炭は雰囲気ガスの対流が滞るような場所ではCPが上がらず浸炭能を低下させるため、品質ばらつきの要因となる。真空浸炭は減圧下でおこなわれるため浸炭ガスが十分に広がり、鋼材表面への接触で直ちに浸炭が開始するため、場所による差が小さい。図2に真空浸炭処理した袋穴テストピース断面の浸炭層観察結果に示す。このような細かい袋穴の中でも浸炭することが可能である。

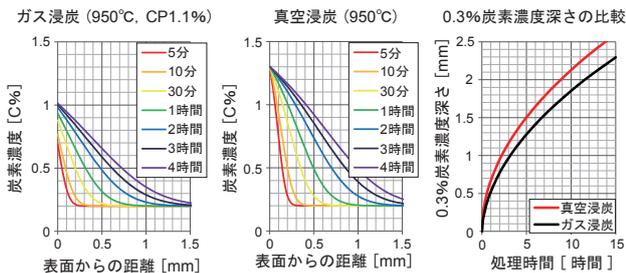


図1 各浸炭処理時間に対する炭素濃度の比較

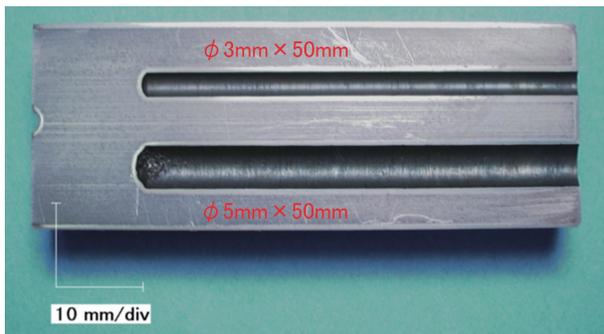


図2 袋穴テストピースの浸炭層観察結果

再現性も非常によく、ガス浸炭では雰囲気ガスの成分やガス流れなどの因子も品質に影響するが、真空浸炭は圧力と浸炭ガスの因子だけであり、例えば同じ処理条件で日本の設備と海外の設備で処理した場合、同等の品質を生産することが易しい。

品質面での真空浸炭の利点は、酸素が存在しないために表面異常層が発生しないことである。そのため、破壊の起点がなく疲労強度は強くなり寿命が長くなる。

欠点は処理後の表面炭素濃度が部位によって異なることである。この理由は浸炭中、鋼材表面の炭素濃度はどの部位でも飽和値で均等になっているが、拡散は浸炭ガスの供給を停止するだけであ

り、炭素の侵入は鋼材内部のみになるためである。そのため例えば、歯車の歯先のように拡散する部位が少ない場合、鋼材表面は高い炭素濃度となり、歯底のように拡散する部位が多い場合、低い炭素濃度となる。ガス浸炭ではこの現象は発生しにくい。

第2の欠点は浸炭中、鋼材表面が飽和値に達するが、炭素との親和性の高い合金元素も炭化され、飽和値以上に炭素濃度が高くなってしまふことである。このためセメンタイトが析出してしまひ、処理後まで残ってしまうと破壊の起点となり寿命が低下する。各鋼種での真空浸炭処理後の金属組織観察結果を図3に示す。これらは真空浸炭したのち拡散せず焼入処理したものであり、S15C材は炭化されやすい合金元素がないためセメンタイトの析出は確認できない。クロムの含有するSCM420材、SCr420材はネット状にセメンタイトが析出しており、消失させるためには十分な拡散時間が必要になる。

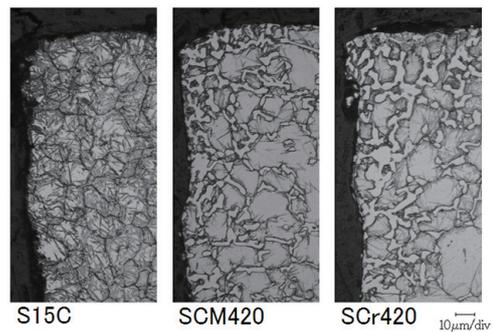


図3 各鋼種の金属組織観察結果

この2つの欠点から、歯車の真空浸炭処理は歯先でセメンタイトが析出しやすく、消滅させるために拡散時間を長くする必要があるが、歯底では炭素濃度低下による硬度不足になる傾向がある。この欠点は浸炭と拡散を繰り返すようなヒートパターンで改善できる。浸炭時間を短くしてセメンタイトの析出量を減らし、表面炭素濃度がある程度低下するまで拡散をおこない、浸炭拡散を繰り返して有効硬化層深さまで浸炭する方法である。

設備面でもガス浸炭と真空浸炭では大きく異なる。炉材で使用する金属はガス浸炭の場合、雰囲気ガスの平衡反応を促進させる効果が有り、使用の制約はない。しかし、真空浸炭の場合、金属で浸炭ガスが分解し浸炭ムラの要因になりやすくなり、また金属表面では煤が発生する。このため、

真空浸炭では炉材に金属を使用しないほうがよい。この金属の有無には下記の利点・欠点がある。

- ・ 熱源：金属チューブバーナが使用できず、SiCヒータ、カーボンヒータなど電熱やセラミックチューブバーナを使用することになり、コストアップとなる。
- ・ 温度：処理温度は炉材によって制約され、常用の場合、一般的な耐熱鋼であれば950℃処理、高級耐熱鋼の場合でも1050℃処理が限界である。炉材に金属を使用しない場合、鋼が溶融し始める1148℃以上でも使用可能になる。
- ・ 搬送：搬送機構を加熱部内にもつ場合、金属を使用したほうが強度、精度とも得られやすく安定する。

炉材に金属を使用しない真空浸炭設備は、鋼の熱処理の限界温度まで使用できるため、高温処理³⁾、高濃度浸炭処理⁴⁾が可能であるが、搬送機構を加熱炉内にもつことが難しく、トンネル型連続設備の場合、不安定要因が大きい。

近年、真空浸炭に最も期待されている面として下記の内容がある。

- ・ 爆発火災の危険がなく、管理が容易
- ・ 設備の立ち上げ、立ち下げが容易

この利点は下記の大手メーカーのニーズに応じるためにはなくてはならない内容である。

- ・ 海外展開時の労力の低減
- ・ 土日の休業や夜勤の廃止

ガス浸炭設備で生産する場合、専門性を有する操業であり、海外展開する場合、設備の生産準備だけでなく、現地作業員の教育にも多くの時間をさいていた。真空浸炭は再現性がよいため生産準備自体が容易にでき、かつ教育なども含めた労力も低減することができる。また、ガス浸炭はシーズニングも含めた設備を立ち上げる時間が10時間以上必要で、土日の休業など機械加工工場での運転状態にあわせると生産効率が悪い。これらのニーズを満足させるためには、真空浸炭が有効である。

3. 量産型真空浸炭設備

1) 開発コンセプト

大量生産ができる真空浸炭油焼入設備をター

ゲットとして設備開発をおこなった。大量生産設備の代表例はトンネル型連続設備であるが、2項の理由で採用せず、複数のバッチ型加熱室をもつが装入と油槽はひとつずつで構成されている設備を検討した。その炉形2種類を図4に示す。どちらの炉形も装入部はひとつで各浸炭室へは搬送室の中の搬送機構が運び、浸炭拡散後は油槽に搬送され油焼入したのち抽出する。一定のサイクルで装入、抽出をおこなうため、連続設備のような大量生産が可能になる。

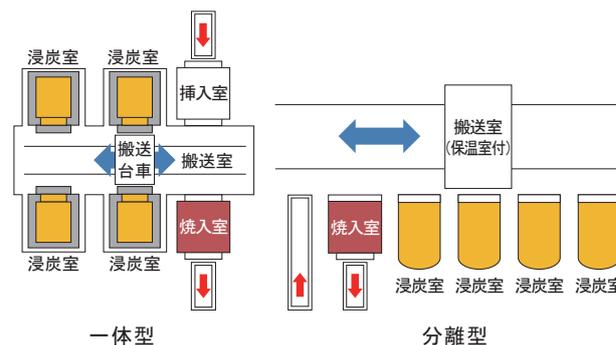


図4 真空浸炭設備 炉形比較

一体型は各浸炭室と搬送室がつながっておりこの間には真空シール機構がなく防熱扉になっている。そのため処理圧力は浸炭室、搬送室とも一定で雰囲気完全な分離はできない。しかし、搬送機構は単純な構造が採用でき、短時間で搬送することができる。

分離形は各浸炭室が独立しているため、扉には真空シール機構が必要となり、搬送時間は長くなる。そのため搬送室には処理材の温度低下防止の保温機構を設けている。

処理時間について、浸炭室6室で120分浸炭拡散処理(950℃、有効硬化層深さ0.7mm狙い)の場合の一体形と分離形の比較を表1に示す。分離形のほうが昇温時に雰囲気攪拌ができ、降温保持を浸炭室でおこなわないため時間短縮になる。その

表1 処理時間の比較

浸炭室6室、
浸炭拡散時間120分(950℃、有効硬化層深さ0.7mm狙い)

	一体形	分離形
昇温時間	150分(真空加熱)	90分(雰囲気加熱)
降温保持時間	60分(真空中で降温)	なし(別室にて降温)
浸炭室処理時間	330分 =150分+120分+60分	210分 =90分+120分
サイクル時間	55分+1分(搬送時間)	35分+1分(搬送時間)

ためサイクル時間は56分から36分と短縮し、生産量は約1.5倍に向上する。

一体形はインシャルコストが安く、設置スペースも少ないが、浸炭室のメンテナンス時は全て停止する必要があり、浸炭室の数も焼入搬送時間に限界があるため拡張性が低い。

弊社ではより大量生産が可能な設備を目指しており、分離形の真空浸炭設備の開発に着手した。

2) 量産型真空浸炭設備「ハイファルコン®」

分離形の真空浸炭設備をベースとして

- ・ 浸炭室の両面配置による省スペース化
- ・ 搬送方法の工夫によるサイクル時間のロスの低減
- ・ 高性能な油焼入設備

を織り込んだ内容で客先の生産計画に合致した設備を構築できるよう開発した。

両面配置の効果について浸炭室4室の場合の片面配置と両面配置の比較を図5に示す。両側配置することで約25%の省スペース化を図ることができる。

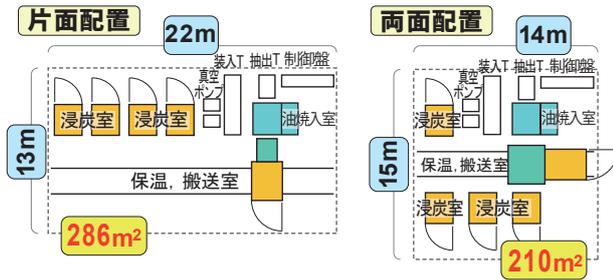


図5 片面配置と両面配置の比較

図6に量産型真空浸炭設備のレイアウト例を示す。この設備は浸炭室を10室配置しており、表1の浸炭拡散120分処理の場合、サイクル時間は22分想定となる。この場合、降温保持が22分のサイクル時間内で均熱に達することができないため降温保持室と油焼入室は2室ずつ設置している。

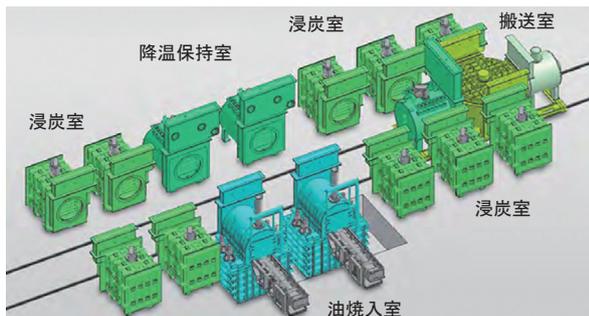


図6 真空浸炭設備レイアウト例

搬送室の外観と断面構造を図7に示す。搬送室は温度制御機能をもつ保温室と徐冷機能をもつ待機室があり、搬送はフォークによる送り機構のほかに回転機構を追加し、四方に搬送できるよう工夫した。

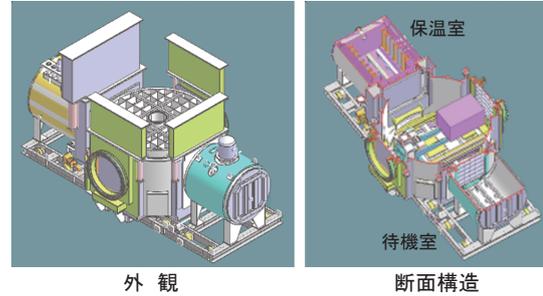


図7 搬送室

設備全体の運転について、まずは未処理材が待機室に搬送され、酸素除去のための真空排気をおこなう。この間に搬送室は浸炭室まで移動する。ここでの搬送は浸炭室での処理を終えたトレイを先に保温室に搬送し、その後、待機室の未処理材を浸炭室に搬送する。この後、搬送室は油焼入室と降温保持室に移動する。ここでの搬送は、先に降温保持を終えたトレイを油焼入室に搬送し焼入した後に、保温室にある浸炭拡散後のトレイを降温保持室に搬送する。この後、装入テーブルに移動し、未処理材を待機室に装入する動作をおこない、これを繰り返す。

このように搬送室に待機室と保温室をもつことで、搬送時に発生する時間のロスをなくし、サイクル時間を短縮することができる。

浸炭室の断面を図8に示す。発生する煤は加熱部の滞在時間が長くなると堆積量が増える傾向が有り、炉形を角型にして熱間部の容積を小さくすることで、煤の堆積量を減少させる効果を狙った。また搬送機構を設けず、処理材は炉内レールの上に積載する構造とし、インナーチャンバー方式を

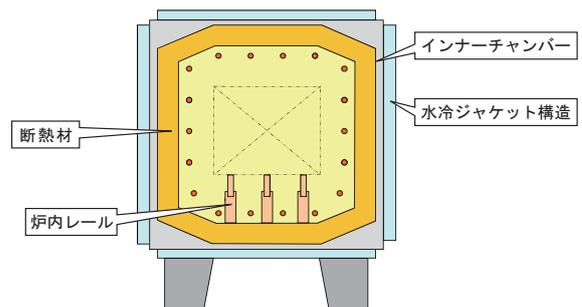


図8 浸炭室

採用してメンテナンス性の向上を図った。メンテナンスは後面からおこない、インナーチャンバごと交換することができる。ヒータおよびガス導入部は均一な温度分布とガス流れが得られるような配置とした。

真空浸炭処理時の浸炭ガス導入量を決定するのに処理品の表面積と浸炭シミュレーションから必要な炭素浸入量を求めて、その炭素量に見合う2倍、2.5倍、3倍の浸炭ガスを導入して試験をおこなった。結果は荷姿によって異なり、2倍の導入量とした試験で問題がない場合もあったが、密に積載した荷姿では2.5倍の導入量の試験で浸炭ムラが発生した。このように荷姿によって浸炭ガスの適正量が変化するため注意が必要である。

降温保持室は減圧化で搬入し、焼入圧で搬出するため、ホットウォール型の真空炉と同じ構造とし、側面にエレクトロチューブ(ヒータ内蔵)とクーリングチューブ(冷却用)を配置した。搬送機構は浸炭室と同じく設けていない。

油焼入室の外観と構造を図9に示す。この油焼入室は幅750mm×奥行1200mm×高さ650mmのトレイ寸法を処理する仕様で、油量は12000ℓ、攪拌機を両袖に各2基の計4基もつ構造とした。攪拌機下には整流機構を設け、トレイ下のダクトを細分しダンパーによって流量を可変できる構造になっている。この構造は弊社が過去に納入した油焼入設備の整流機構を踏襲したものである。

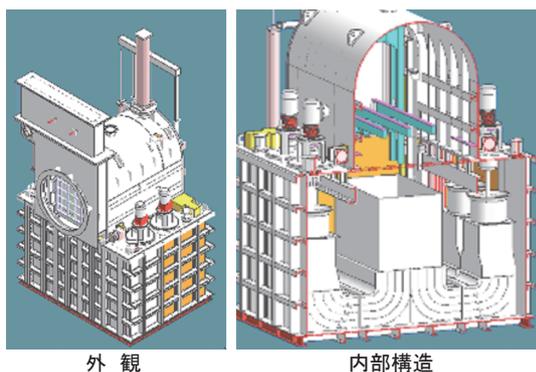


図9 油焼入室

ダンパーの開度を調整する際、出光興産株式会社殿製の焼入油冷却能測定器を使用し調整した。調整後の油流速分布の結果を図10に示し、測定条件を以下に示す。

- ・油種：出光興産株式会社製ハイテンプA
- ・油温：120℃

- ・攪拌機周波数：30 Hz (中攪拌)
- ・荷姿：ベーストレイのみ
- ・測定位置：トレイ下より+100 mm

このダクト構造は外周側の流速が速くなりトレイ中央の流速が速くなる傾向になるため、外周側のダンパーを調節して流速の均一化を図った。しかし、実際の生産では処理品が存在し中央部で圧損が大きくなるため、焼入油は側面に流れる傾向になる。このためトレイ中央の焼入油流速が速い状態であるが、この状態の流速分布に決定した。

設備の立ち上げについて、浸炭室を室温で大気開放した状態から浸炭処理が可能になるのに2時間以内である。降温保持室も長時間の大気開放後でなければ2時間以内で可能であるが、油焼入室については焼入油の昇温に時間を要する。

設備の立ち下げについて、各部屋を真空パック状態にしておけば、降温保持室の天井ファンの運転と循環冷却水の流水以外、直ちに停止することができる。

例えば土日を休業する場合、立ち下げは各部屋を真空パック状態にし、降温保持室の天井ファンの運転以外、停止させておき、立ち上げは油焼入室の焼入油昇温と攪拌機の運転をカレンダータイマーにて自動起動させておけば、月曜には運転2時間後に生産が可能となる。

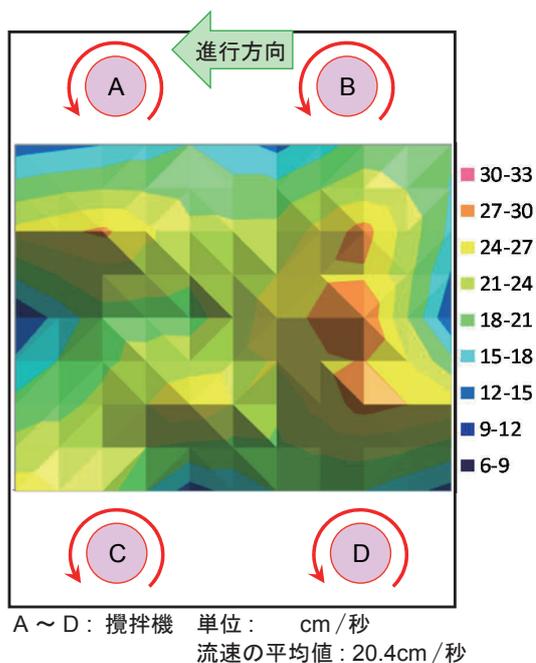


図10 油槽流速分布

3) 量産型真空浸炭テスト設備

2) 項の設備を実証するため、弊社・堺事業所内にテスト設備を製作した。その概要とレイアウトを図 11 に示す。

このテスト設備は前洗浄から真空浸炭処理、後洗浄、焼戻処理の一貫テストができ、実生産を模擬することができる。主仕様を下記に示す。

- ・積載寸法：幅 750 mm×奥行 1200 mm×高さ 650 mm
- ・最大積載重量：900 kg グロス
- ・浸炭室 最高処理温度：1100℃
- ・浸炭ガス：アセチレン
- ・油焼入室 最高温度：180℃ (油種による)
- ・前洗浄 / 後洗浄設備：真空洗浄乾燥装置「ソルメイト®」
- ・焼戻設備：最高温度 200℃、窒素流気可

この設備での真空浸炭品質の一例を下記に示す。処理品はリング形状のかさ歯車で、144 個を 3 段積みにて刀掛けにて積載し、このうち 22ヶ所の歯について評価した。評価は歯面と歯底の炭素濃度分布、歯底での有効硬化層深さ、歯底間の内部硬さとし、その結果を図 12 に示す。炭素濃度分布は真空浸炭特有の均一性があり、トレイ内でのバラツキよりも歯面と歯底の差が大きい結果である。硬さ特性について、刀掛けでは治具と接触する上部の焼入性が悪く、また段積みしているため、バラツキが大きい、その影響が確認できる結果であった。

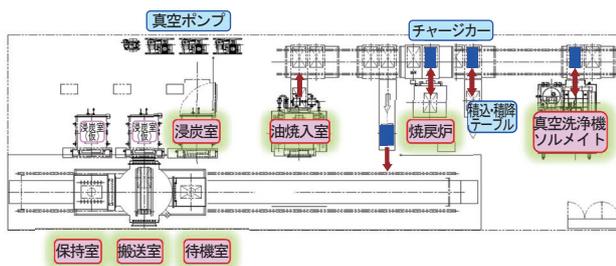


図 11 量産型真空浸炭テスト設備

4. 結言

開発した量産型真空浸炭設備は弊社のスーパー型ガス浸炭バッチ設備「ハイ・シフター®」と同じトレイ寸法で、連続的に生産できる設備であり、このトレイ寸法で連続式の浸炭設備は世界最大級である。また、同じスペースで連続ガス浸炭設備は 2 基分の設置ができるのに対して、処理能力は 3.5 基分と生産能力も非常に高い。生産量や用途に応じてユニットを適正配置させ最適な設備構成と拡張性を提案することができ、生産効率の向上に大きく寄与できる設備である。

5. 謝辞

量産型真空浸炭テスト設備での試験に対する部品、治具の供給をして頂きました富士重工業株式会社殿と、焼入冷却能測定器の借用と焼入油の性状調査にご協力頂きました出光興産株式会社殿に御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 市原睦夫：熱処理，7，5，p289 (1967)
- 2) 市原睦夫：熱処理，9，3，p148 (1969)
- 3) 横瀬敬二：工業加熱，42，，2，p13 (2005)
- 4) 内藤武志：熱処理，26，，2，p157 (1986)

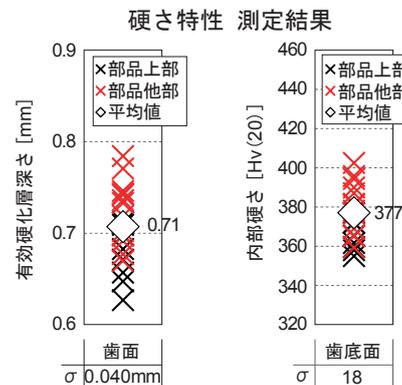
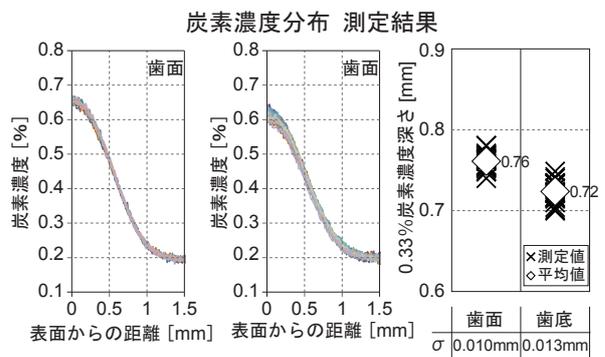


図 12 浸炭品質測定結果