

原子炉構造材の非破壊的健全性評価手法の検討（その1）

A Study of Non Destructive Integrity Assessment Method for Structural Materials of Nuclear Reactor -Part 1-

戸塚 信夫 (Nobuo Totsuka)*¹ 松崎 明博 (Akihiro Matsuzaki)*²

要約 地震被災後の原子炉構造材の健全性評価や原子炉構造材の実強度を非破壊的に評価する手法として、硬度測定法が最も有力な方法と考えられているが、具体的手法については必ずしも十分な検討が行われていない。そこで本研究では硬度測定による評価手法について市販のSS400鋼およびSUS304鋼に対してポータブル硬度計を用いて具体的に検討し、実機に適用できる手法を開発したので、その結果について報告する。

キーワード 原子炉構造材, 非破壊検査, 硬度測定, 塑性変形, ポータブル硬度計, 金属組織

Abstract Hardness measurement is one of the most effective methods for non destructive integrity assessment evaluating structural materials of nuclear power plants before and after suffering an earthquake. However, the actual evaluation method using a portable hardness tester has not been established yet. In this study, the actual method using a portable hardness tester for commercial steels of SS 400 and SUS 304 has been investigated, and a practical procedure applicable to actual plants has been developed and reported.

Keywords Structural Materials of Nuclear Reactor, Non Destructive Integrity Assessment, Plastic Deformation, Portable Hardness Tester, Metallurgical Structure

1. 緒言

2007年7月16日に発生した中越沖地震により東京電力柏崎刈羽原子力発電所は想定を上回る大きな地震動を受け、原子力発電所の耐震性について懸念される事態となった。⁽¹⁾実際には主要機器において大きな損傷は見られなかったが⁽¹⁾、そのことをより定量的に実証するには構造材料の塑性変形量を非破壊で定量評価することが必要であるが、現状では評価技術が確立できていない。また現在稼働中の原子力発電所の耐震性の実力を評価するためには現時点における構造材料の実強度を知る必要があるが、充分な対応ができていない部分もある。もちろん充分な裕度をもって設計されており、耐震性は担保されていると考えられるが、実際の構造部材の実強度についてはより実証的な検証が望まれる。そこで本研究では鉄鋼材料の微小塑性変形量を非破壊で定量評価できる手法の可能性を調査し、この微小塑性変形

量の定量評価により実際に材料が地震により受けた負荷・ダメージを定量評価する手法を開発する。また同時に構造材料の実強度を非破壊的に測定できる硬度測定法についても検討する。

2. 実強度を硬度で評価する手法に関する検討

金属材料の強度と硬度の間には相関があり^{(2)~(4)}、炭素鋼の強度と硬度の関係は日本工業規格 (JIS) の硬度換算表 (SAEJ417) として表されている。しかしながらこの換算表は硬度と引張り強度の関係であり、降伏強度、耐力との関係を示すものではなく、かつ、オーステナイト系ステンレス鋼にはそのまま適用できないものである。そこで原子力発電所の構造材料の代表例としてオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 と炭素鋼 SS400 等について硬度と引張り強度、降伏強度、耐力の関係について文献調査およ

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 JFE テクノリサーチ(株) 千葉分析・材料事業部

び市販鋼材を用いた調査を行った。硬度については実機プラントにおける適用を考慮して、簡易かつ非破壊的に調査できるようポータブル硬度計を選択し、それを用いた適正な硬度測定手法についても調査した。

2.1 従来知見の整理

公表されている材料の強度データ集⁽⁵⁾について、ビッカース硬度 (HV)、引張り強度 (TS)、降伏強度 (YS)、0.2%耐力 (PS) の記載されたものを抽出して整理した結果を図1に示す。この抽出したデータには炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼以外に合金鋼、工具鋼、鋳鉄等の種々の鉄鋼材料が含まれているが、硬度と引張り強度、降伏強度および0.2%耐力には良好な相関関係が認められる。それぞれの相関を式の形で表せば以下の通りである。

引張り強度 (N/mm²) = 0.324 × HVN - 0.08; 相関係数 $r = 0.890$

降伏強度および0.2%耐力 (N/mm²) = 0.307 × HVN - 12.9; 相関係数 $r = 0.926$

ここでHVNはビッカース硬度またはマイクロビッカース硬度を示す。

以上の検討結果から硬度と引張り強度、降伏強度および0.2%耐力には良好な相関関係が認められることは明らかであるため、適切に硬度が測定できれば実機構造材料の実強度を評価することは可能であると考えられる。

2.2 ポータブル硬度計による硬度測定法の検討

次に具体的に実機構造材料の硬度測定法について検討する。実機構造材料の硬度を測定できるポータ

ブル硬度計にはいくつかの種類があるが、本研究ではビッカース硬度計との互換性と操作性に優れた超音波振動式硬度計を用いて検討を行った。本硬度計 (JFE アドバンテック社製, SH22) の外観を図2に示すが、内蔵されたマイクロビッカース硬度計と同等の圧子を先端に装着した振動子を、一定の荷重で被測定物に押し当てて形成された圧痕の大きさを、圧子の振動数の変化として読み取るものである。通常のビッカース硬度計が圧痕の大きさを直接観察して計測するのに対して本装置では圧子の押し込み深さの違いを、圧子を振動子としてその共振周波数の変化として計測する間接測定法である。この間接測定法は直接観察による方式に比較して装置がコンパクトであり、操作性に優れた利点があるものの、測定誤差がやや大きくなる欠点がある。本検討においては、標準的なビッカース硬度計と同等以上の測定精度を得ることのできる手法について検討した。

まずポータブル硬度計の測定者によるバラツキについて検討した。図3に異なる4人によるポータブル硬度計を使った測定値のヒストグラムを示す。比較のために、ビッカース硬度計による測定値のヒス

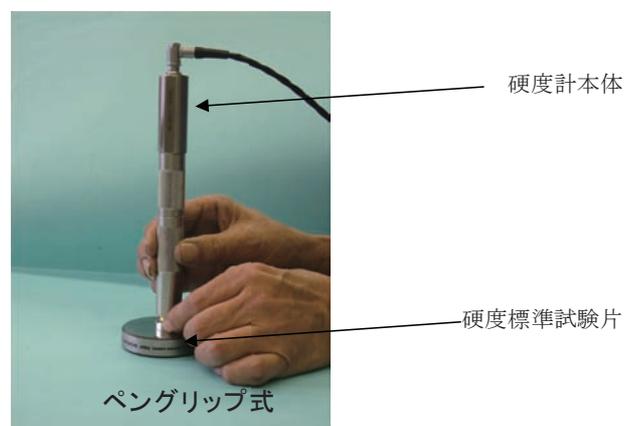


図2 ポータブル硬度計外観写真

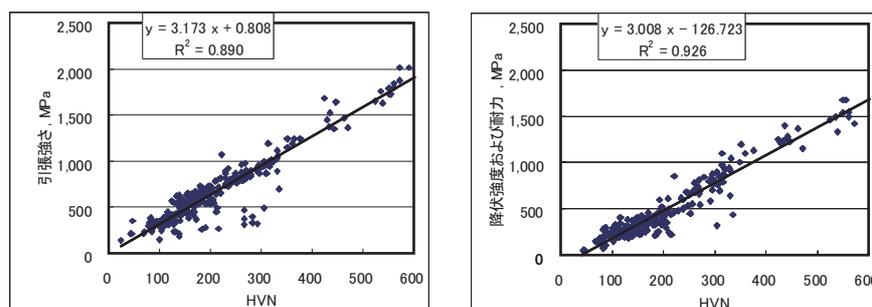


図1 材料強度と硬度の関係

トグラムを最上段の図に示した。測定サンプルはビッカース硬度計の標準硬度試験片 (HV200) であり、それぞれ連続して 40 点ずつ測定した。

図 3 に示すように、測定者 A および D の測定値は比較的良好な分布状態であるのに対し、C の測定値はバラツキが大きく、明らかに個人差がある。大きなバラツキの原因は、押し付け方が安定しないためと考えられる。これは熟練すればある程度は改善されるが、ある程度の測定不良値が混入する恐れがある。そこで、データ処理により不適切なデータを削除する必要がある。以下の検討を行った。

図 4 に、測定者 A の測定結果から上下限の一定のデータを削除して解析した場合の、平均値及び標準偏差の計算結果を示す。母数としては、全測定数 $n = 40$ および、この中から任意に抽出した $n = 30$, $n = 20$, または $n = 10$ 点を抽出したケースについて

検討した。図中の左側のプロット点は、ビッカース硬度計による測定値 (母数 $n = 5$) の値である。いずれの測定者の場合も、上下の削除データ点数を増やした場合、平均値には大きな変化は見られないものの、標準偏差は小さくなり、全測定データの上下それぞれ 15% を除外することにより、ほぼビッカース硬度に近い標準偏差が得られる。以上のことから、上下 15% のデータを除外すれば、平均値を大きく変えることなく、異常なデータを排除し、バラツキの低減に有効と考えられる。なお、母数の n 値については、装置メーカーの推奨値を参考にして、 $n = 20$ とした。また、測定者 B および C のバラツキは大きく、熟練度不足または作業に不向きと考えられる。そこで、このような作業者を排除または熟練度の向上を促すために、標準サンプルによる初期の測定値の標準偏差がある基準値 (例えば標準偏差 12) を超

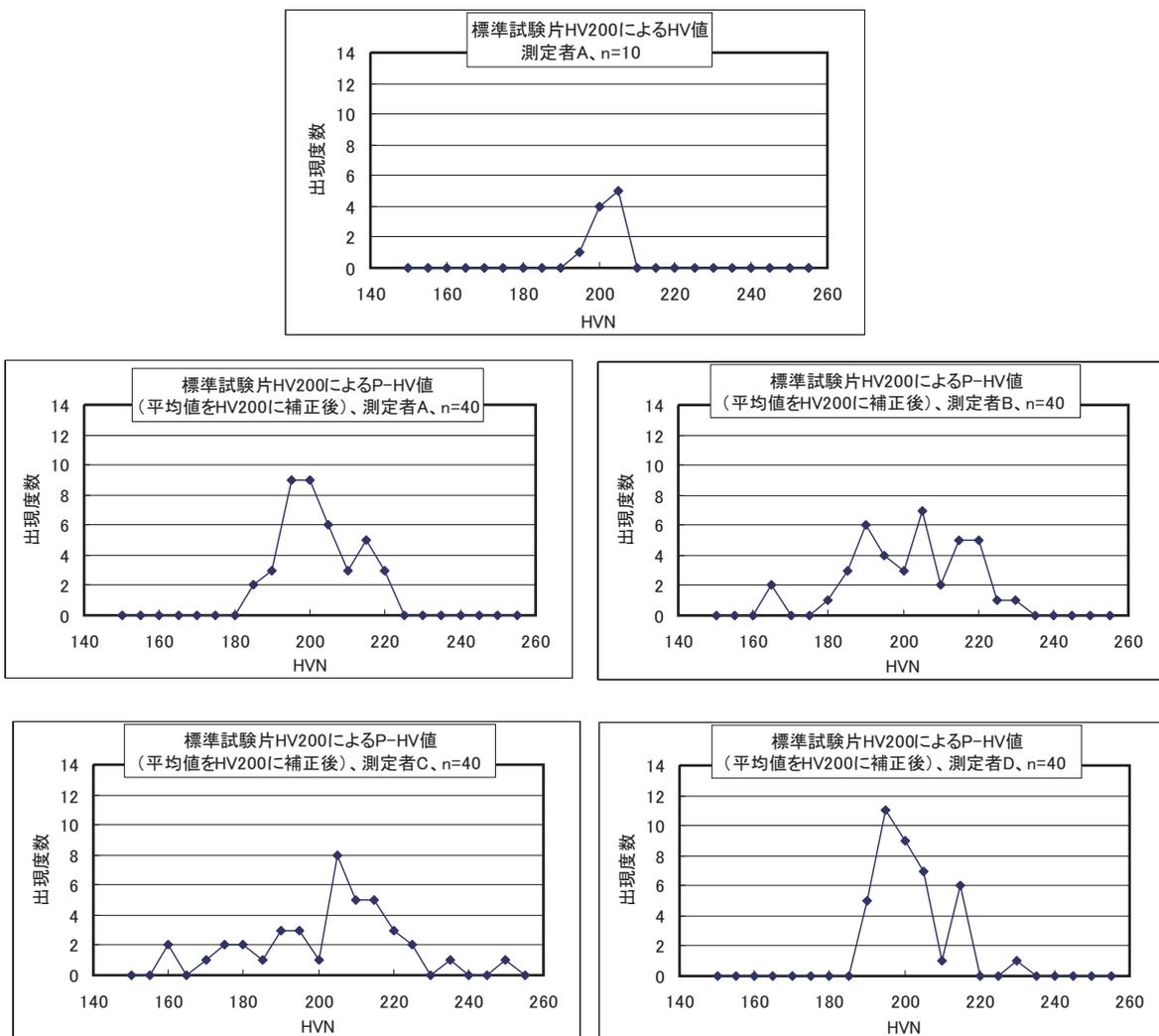


図 3 測定者によるポータブル硬度計の測定値のバラツキ

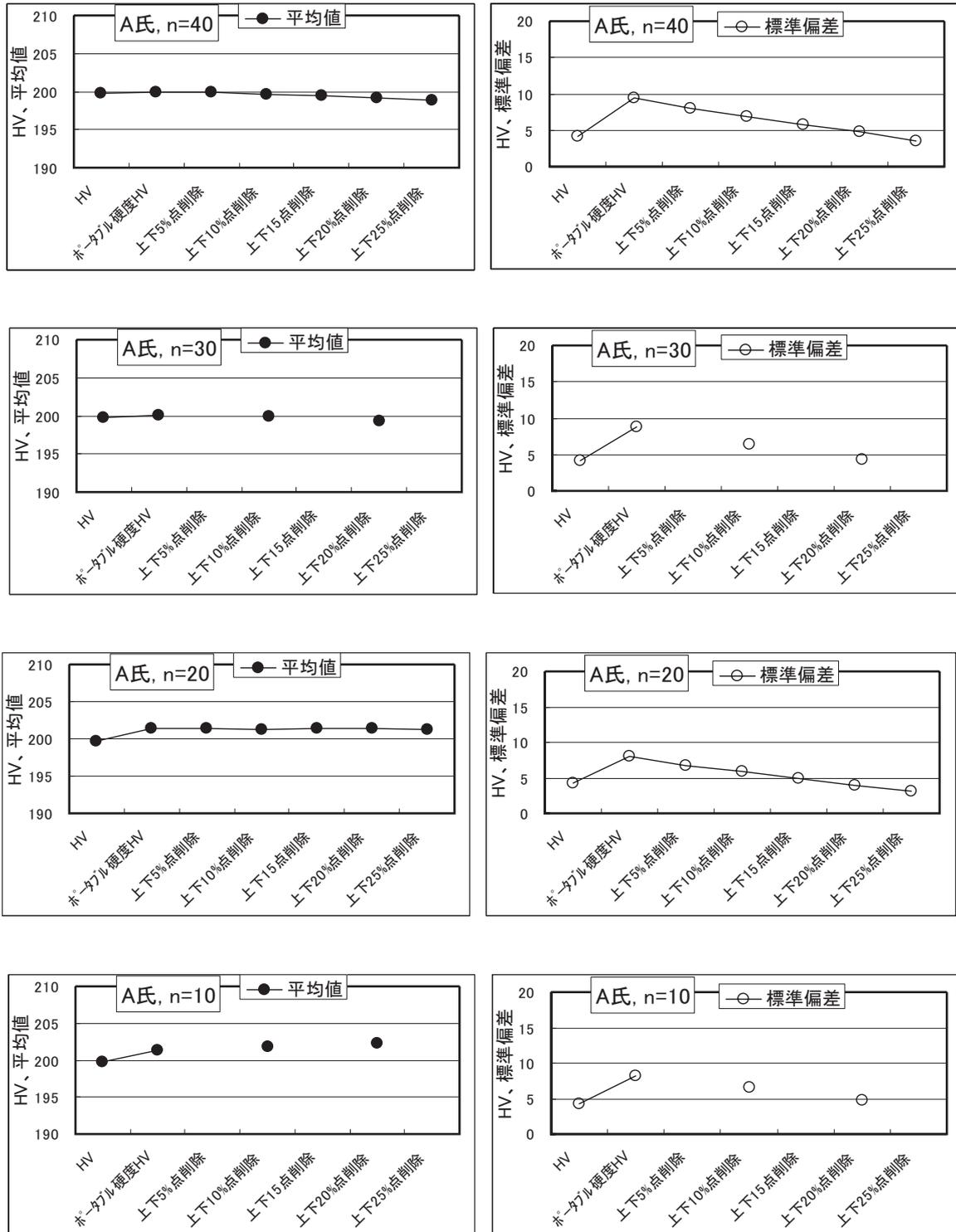


図4 硬度測定値のデータ処理方法による平均値，標準偏差の差異（測定者A：40回，30回，20回，10回）

える場合には，測定者とししない等の対応が必要である。

以上の検討に基づき，実機測定標準としては，以下を設定した。

- ・n = 20点を測定し，上下それぞれ15%のデ

ータを除外して，中央の14点を測定値とした。

- ・測定者は標準試験片での測定値の標準偏差が12を超えない測定技能を有する者とする。

次に，被測定物の表面の研磨状況の影響について

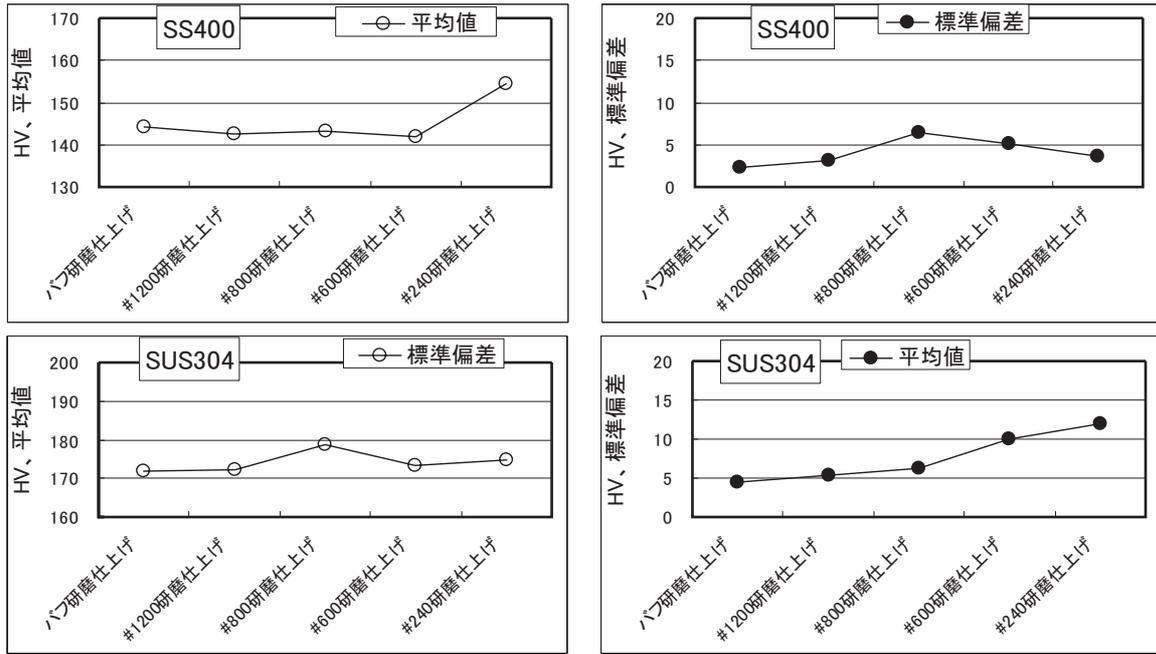


図5 硬度測定値の平均値及び標準偏差に及ぼす表面仕上げの影響

調査した結果を述べる。

図5に測定、解析結果の数値データと表面仕上げの関係を示す。試料は市販の炭素鋼（SS400）およびオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）である。バフ研磨に対して、研磨状態が耐水研磨紙800番まで粗くなると、平均値や標準偏差に変化が現れてくる。したがって、表面は1200番程度以上の研磨仕上げが望ましいと判断される。

2.3 市販材による硬度と強度の相関性確認

次に市販の炭素鋼（SS400、板厚9.0mm）およびオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304、板厚10.0mm）に対し、ポータブル硬度計による硬度測定法を用いて、強度と硬度の相関を実験的に確認した。JIS Z 2201 13B号試験片を用いてJIS Z 2241「金属材料の引張試験方法」に準拠した引張り試験を行い、引張り強度と0.2%耐力を求め、JIS Z 2244「ビッカース硬さ試験—試験方法」に準拠して求めたビッカース硬度と比較した結果を図6に示す。このように本測定法による結果は文献情報を整理して得られた相関性と一致し、硬度測定により材料の引張り強度と0.2%耐力を推定できることが確認できた。

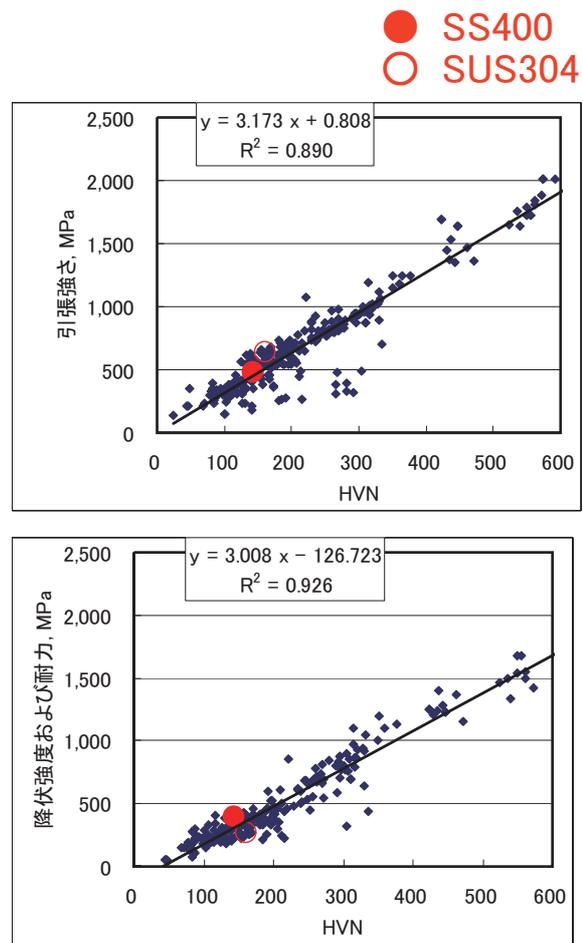


図6 市販のSS400とSUS304の実強度と硬度の関係

2.4 ポータブル硬度計による硬度測定法のまとめ

以上のことから、硬度による実強度の評価は十分に可能であると判断される。しかし、硬度をポータブル硬度計で測定する場合には、人為的バラツキが大きくなるため、その使用基準を厳格に規定し、測定者の教育等も含めた適切な精度管理を行うことが必要と考えられる。

3. 材料の塑性歪み量を硬度で評価する手法に関する検討

材料の塑性歪み量と硬度の間に相関があることはよく知られており、東京電力柏崎刈羽原子力発電所の中越沖地震被災後の材料健全性評価手法として硬度測定が最も有効な手法と考えられている⁽⁶⁾。しかしながら硬度測定法が歪み量10%以下の微小歪み領域で十分な定量性が確保できるかどうかについて十分なデータは得られていない。そこで原子力発電所の構造材料の代表例としてオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 と炭素鋼の SS400 を用いて歪み量10%以下の微小歪み領域で材料の歪み量と硬度の関係を詳細に調査した。

また実機材の調査を視野に入れたポータブル硬度計による測定手法についても調査する。さらに、このような微小な硬度変化が生じる要因である金属組織の変化挙動を明らかにしておくことは重要である。そこで、これまでの技術知見を整理するとともに、今回の研究材料である SS400 鋼および SUS304 鋼について、実験的にその組織調査を実施し、塑性変形量と組織および硬度変化の関係について調査した。

3.1 従来知見の整理

公表されている技術論文を調査し、微小変形領域での変形組織形成挙動に関する技術知見を明らかにする。

金属に加工変形を加えた場合、ミクロ組織的には、まず転位の上昇運動によるすべり変形が生じる。しかし、さらに変形度を増加させると、たとえ単結晶金属であっても、この転位の運動が阻止され、転位の蓄積が起こるようになる。これが、不均一変形組織形成の起源である。実用金属材料はほとんどが多結晶体および／または複合組織からなる多結晶体で

あり、それぞれの界面が転位蓄積の有力サイトである。また、結晶粒内にもそれに劣らぬ転位蓄積サイトが形成され、それらが不均一変形帯 (Deformation Bands) と称され種々の形態を呈することが知られている。このような一般的な知見に関して、本調査・研究の対象である炭素鋼 SS400 とオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 に関する冶金学的な技術知見を以下にまとめる。

まず、SS400 鋼の代表的な不均一変形組織について概説する。SS400 鋼は、JIS に熱間圧延鋼材として規定されており、原子力をはじめ一般構造用部材として使用されている。SS400 鋼は通常熱間圧延ままの状態を実使用に供され、その金属組織はフェライト相を主体とし、わずかのパーライト相が混在した組織である。そこで、以下に、フェライト相に着目した組織変化挙動に関する主たる従来知見について述べる。

Chen ら⁽⁷⁾は、IF 鋼 (侵入型固溶元素フリー鋼) において、微小歪み領域での、組織変化について検討した結果、歪み量2.2%で、転位同士の相互作用が生じ始め、さらに歪み量4.2%では明らかに転位同士のタングル化が生じ、さらに加工度が増加し歪み量9.8%になると、マイクロバンドと称する不均一変形組織が形成され始める。それ以上ではマイクロバンドがさらに発達する等、塑性変形量にともなって組織が変化することを明らかにしている。

次に、SUS304 鋼の代表的な不均一変形組織の形態について概説する。

SUS304 鋼は、JIS に規定されており、原子力をはじめ高温および一般用部材として使用されている。SUS304 鋼は通常、圧延加工の後に固溶化熱処理を施されて実使用に供され、その金属組織はオーステナイト相を主体としている。そこで、以下に、オーステナイト相に着目した組織変化挙動に関する知見について述べる。

オーステナイト相においても塑性変形量の変化によって変形双晶⁽⁸⁾、転位組織と変形帯⁽⁹⁾、加工誘起マルテンサイト⁽¹⁰⁾、等の組織変化が起こることが明らかにされている。

以上のように、金属材料が加工変形を受けた場合の組織変化については詳細な研究がなされており、その組織の形成挙動、メカニズムもほぼ明らかとなっている。本調査・研究の対象材料である、SS400 および SUS304 は、それぞれフェライト相およびオーステナイト相を主体とする組織であり、これまで

の技術知見に準ずる変形組織を形成するものと考えられる。

3.2 市販材による微小歪みと硬度との関係に関する実験的検討

市販材を用いて、地震を想定した微小変形による構造部材の硬さおよび組織変化について検討した。検討概要を表1に示す。第2.3節と同様の引張り試験片を用い、表1に示す所定の予歪み量の引張り変形を付与した後に除荷することにより、引張り歪みを付与した試験片を作製した。なお、表に示した歪み量は、除荷時の弾性歪も含んでいるため、実質的

な塑性歪み量はこれらの値から約0.3%を引いた歪み量となる。

試験後の試験片の平行部から種々の試験片を切り出し、以降の試験に供した。

引張り歪み付与材の歪み量と硬度の関係について、通常のビッカース硬度計（HV）およびポータブル硬度計（P-HV）で測定し、評価した。ポータブル硬度計による測定は、第2.2節で規定した標準手法、標準硬度試験片 HV200 によりキャリブレーションおよび補正を行い、バフ研磨仕上げした被測定物を各40点測定して、上下の各6点を削除した計28点のデータで解析した。SS400 および SUS304 の測定結果をそれぞれ図7と8に示す。

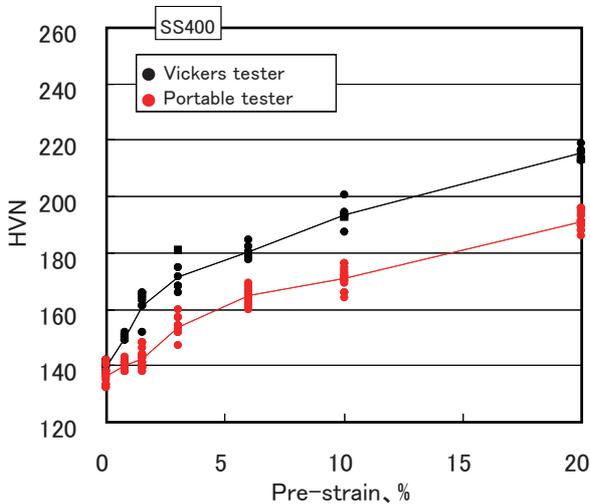


図7 SS400の歪み量と硬度の関係

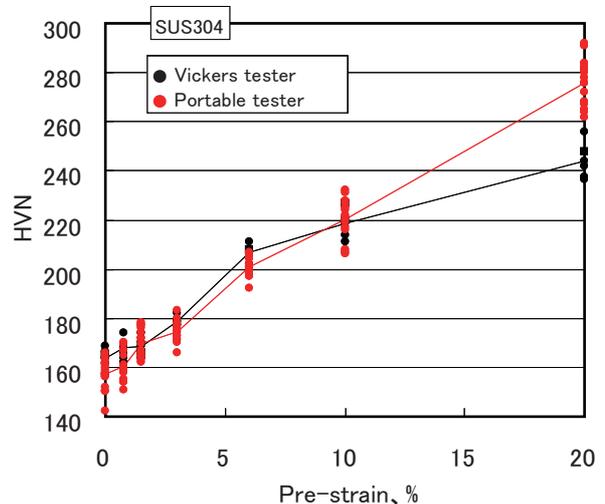


図8 SUS304の歪み量と硬度の関係

表1 微小変形による硬度および組織変化に関する調査内容

鋼種	試験片符号	予歪み % (弾性変形含む)	ビッカース硬度 HV	ポータブル硬度 P-HV	光学顕微鏡組織	走査電子顕微鏡組織	透過電子顕微鏡組織	EBSD	X線回折	フェライト量評価フェライトスコープ
SS400	S L-31	0.0	○	○	○	○	○	○	○	-
	S L-7	0.8	○	○	○	○	○	○	○	-
	S L-9	1.5	○	○	○	-	-	-	-	-
	S L-10	3.0	○	○	○	○	○	○	○	-
	S L-12	6.0	○	○	○	-	-	-	-	-
	S L-13	10.0	○	○	○	○	○	○	○	-
	S L-15	20.0	○	○	○	-	-	-	-	-
SUS304	A L-31	0.0	○	○	○	○	○	○	○	○
	A L-7	0.8	○	○	○	○	○	○	○	○
	A L-9	1.5	○	○	○	-	-	-	-	○
	A L-10	3.0	○	○	○	○	○	○	○	○
	A L-12	6.0	○	○	○	-	-	-	-	○
	A L-13	10.0	○	○	○	○	○	○	○	○
	A L-15	20.0	○	○	○	-	-	-	-	○

これらの図に示すように、ビッカース硬度およびポータブル硬度計ともに、歪み量の増加に伴い硬さは上昇していることが分かる。1%程度の微小歪み領域においても、わずかではあるが硬さの平均値は歪み量の増加に伴い上昇している。すなわち、硬度法が、微小歪み付加による材質変化の評価指標として有効であることが分かる。

3.3 微小変形時の組織変化挙動に関する調査結果

(1) 光学顕微鏡による組織解析

歪み付与後の試験片平行部のL断面（引張方向に平行な断面）を切り出し、研磨、エッチング後に、光学顕微鏡にて組織を観察した。

図9にSS400の各歪付与後の光学顕微鏡による組

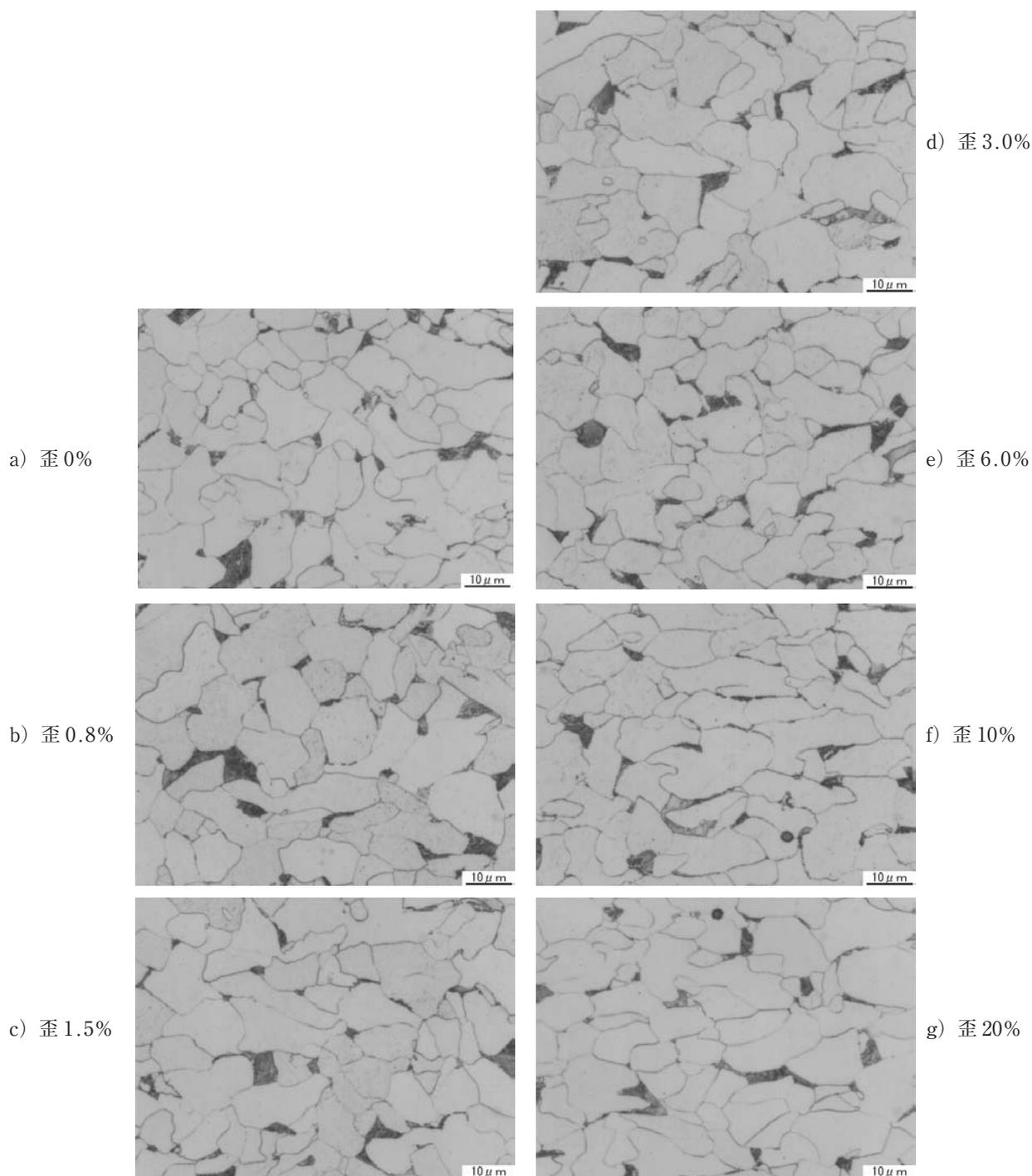


図9 SS400の歪み付与後の組織観察結果（光学顕微鏡）

組織観察結果を示す。エッチング液は5%ナイトールである。ほぼフェライト相主体の組織で一部にパーライト相が少量存在している。引張り歪みの影響は不明瞭である。すなわち、20%歪み材でも結晶粒の変形は明瞭ではなく、またフェライト粒内の下部組織の変化も観察されない。

図10にSUS304の各歪み付与後の光学顕微鏡によ

る組織観察結果を示す。エッチング液は王水である。オーステナイト単相組織であるが、一部に δ -フェライト相が点列状に少量存在している。SUS304では、光学顕微鏡組織に、歪みの影響が現れている。すなわち、歪み量が3.0%まではほとんど変化は認められないが、10%になると双晶組織が認められ、20%歪みではさらに増加するとともに、交差した双晶組

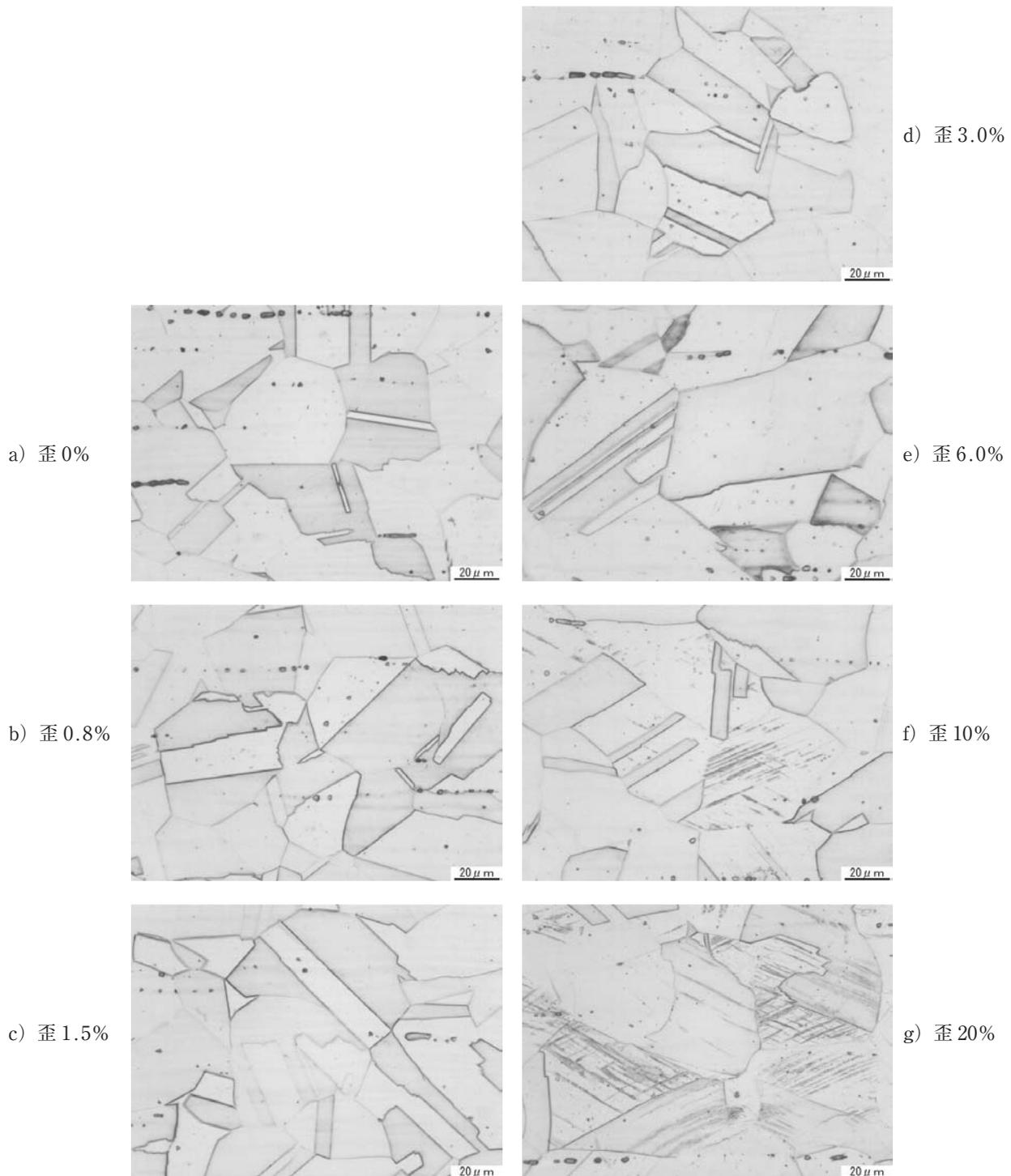


図10 SUS304の歪み付与後の組織観察結果（光学顕微鏡）

織も認められるようになる。また、20%歪み材には加工誘起マルテンサイトと推察される組織も散見される。

(2) 走査電子顕微鏡による組織解析

図 11 に歪み付与後の代表的な走査電子顕微鏡による組織観察結果を示す。SS400 では、歪み付与の影

響は、走査電子顕微鏡による観察では認められない。一方、SUS304 では、光学顕微鏡観察では明瞭ではなかったが、歪み量 3.0% でわずかに変形双晶と思われる組織が認められる。歪み量 10% 以上では、それらが顕著となっている。

(3) EBSP による組織解析

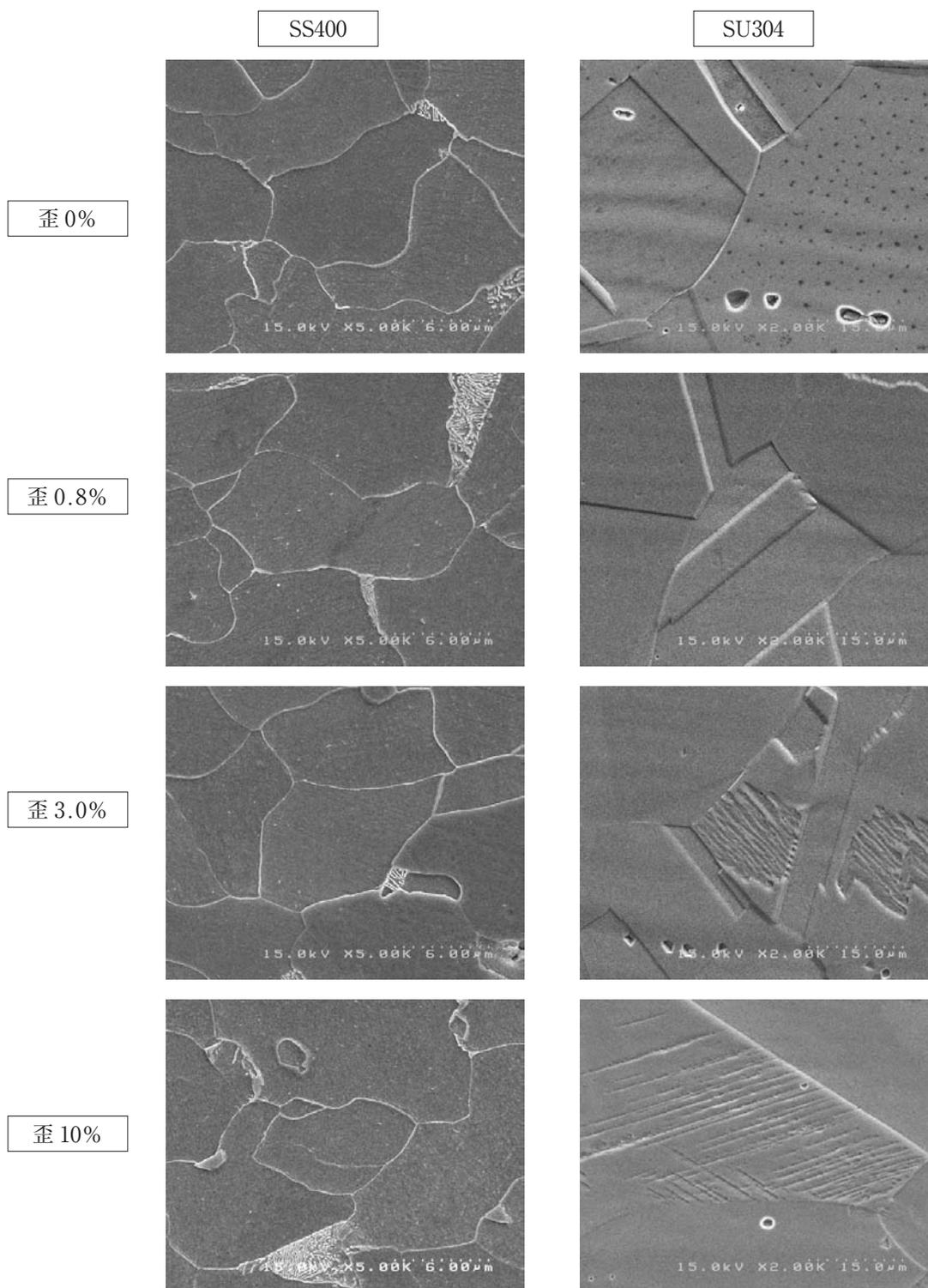


図 11 歪み付与後の組織観察結果（走査電子顕微鏡）

EBSP (Electron Back Scattering Pattern) 法により、引張歪みによる結晶方位への影響に関して、(1) ミスオリエンテーション分布解析、(2) 結晶方位マッピング解析、(3) 正極点図解析、(4) 逆極点図解析、(5) 粒度分布、(6) 特定粒内の微小方位差分布解析を行ったが、(1) においては3%以上の塑性歪

み領域で方位差が大きい粒が増加する傾向は見られるものの明瞭ではなく、その他の解析においては10%以下の微小塑性歪み域ではほとんど変化は見られなかった。

(4) 薄膜透過電子顕微鏡による組織解析

図12にSS400鋼の各歪み付与後の代表的な透過

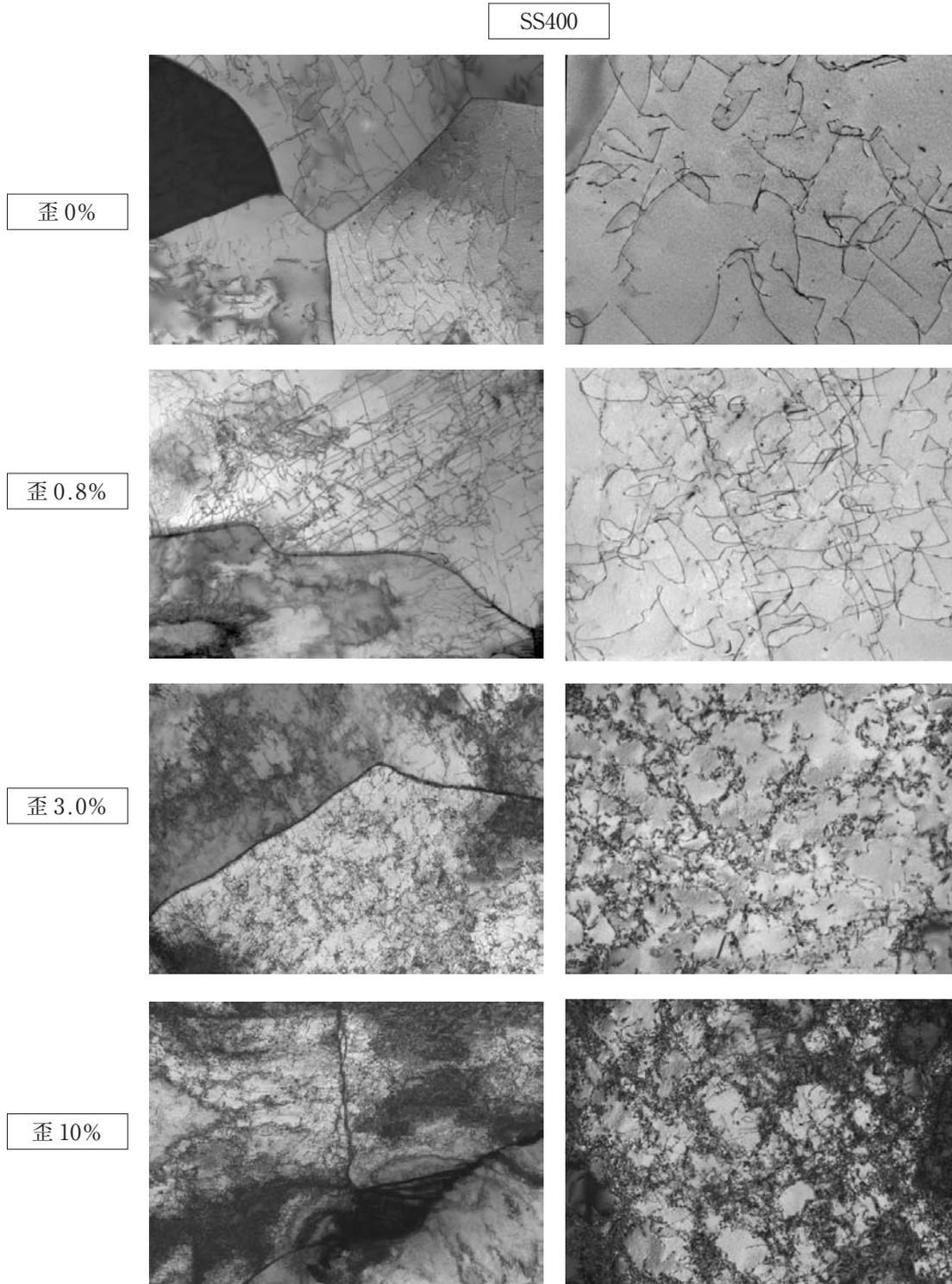


図12 SS400の歪み付与後の組織観察結果 (透過電子顕微鏡)

電子顕微鏡による組織観察結果を示す。歪み量の増加により転位密度が増加し、歪み量 3.0%では転位のタンゲル、集積が顕著になり、さらに歪み量 10%では転位セル組織が出現している。

図 13 に SUS304 鋼の各歪み付与後の代表的な透過電子顕微鏡による組織観察結果を示す。SS400 鋼と

は異なり、SUS304 鋼の転位組織は比較的直線的で平行に配列しているものが多いことが特徴である。また、微小歪み領域での転位密度、形態の変化は少ないが、歪み量が 10%になると、変形双晶の発達と、それに対応した転位の配列の傾向が認められる。

(5) X 線回折による組織解析

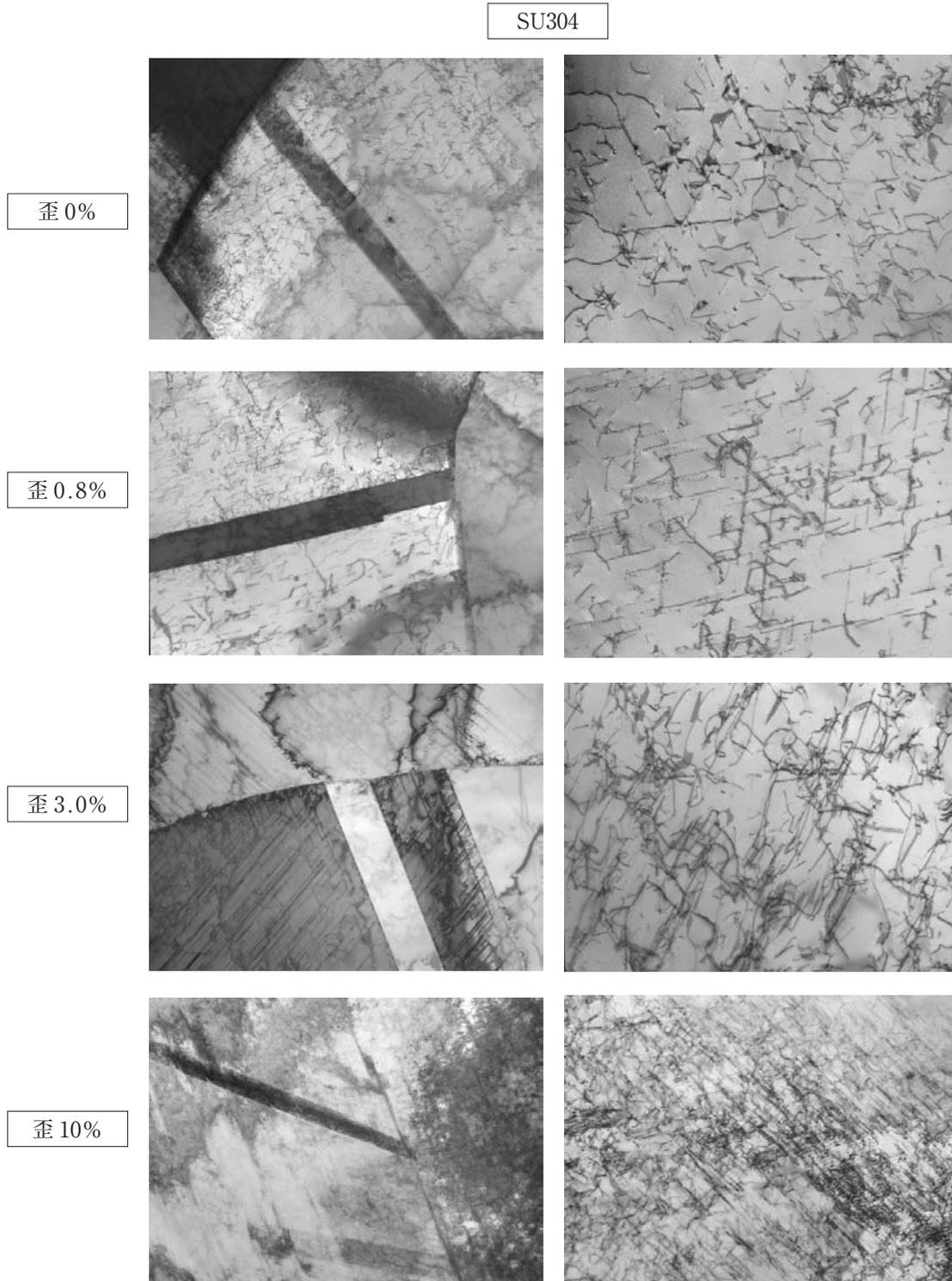


図 13 SUS304 の歪み付与後の組織観察結果 (透過電子顕微鏡)

材料内部の不均一歪みを X 線回折法により評価した。測定結果を図 14 に示す。

いずれの材料も、少なくとも歪み量が 2% 程度以上では歪みの増大に伴って、不均一歪み量が增大していることが分かる。2% 程度以上の微小歪み領域の歪み量の評価として、有効と思われる。

(6) フェライトスコープによる組織解析

SUS304 鋼は加工によりマルテンサイト変態を引き起こすことが知られている。そこで、歪み量とマルテンサイト生成量の関係を調べた。マルテンサイト量は、フェライトスコープにより測定した。

測定結果を図 15 に示す。歪み量が 10% 以上でフェライト量が増加し始める。すなわち、加工誘起マルテンサイト変態が生じていると判断される。光学顕微鏡および電子顕微鏡組織にも、マルテンサイト相と思われる組織が認められており、本結果から裏付けられる。しかし、歪み量 5% 程度以下ではほとんどマルテンサイト相は生成しないと考えられ、微

少領域の歪みの評価としては有効ではない。

(7) 微小変形時の組織変化挙動に関する調査結果のまとめ

以上の結果から、微小塑性歪み量の評価手法として、硬さ測定が有効であることが明らかとなった。また、現地測定のためには、ポータブル硬度計での測定が必要であるが、装置の特徴に十分に配慮して測定を行えば、塑性歪みの定量的評価手法として有望である。

また、硬さの変化は材料の組織変化によるものである。原子力発電所の構造材料の代表例である SUS304 と SS400 鋼の組織変化は、従来、学術的に明らかにされてきた基本的知見に沿うものであることが、本調査により検証された。したがって、地震等での塑性歪みにより硬さが変化する現象は、材料科学的に十分に裏付けがあるものであり、硬度による塑性歪み量推定手法の信頼性を担保するものと言える。

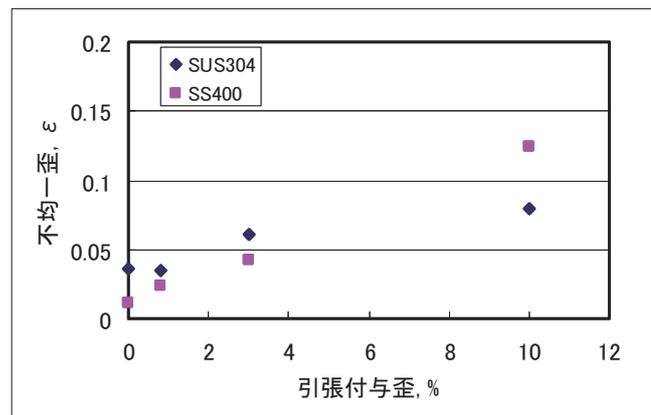


図 14 X 線回折法による不均一歪みの測定値と引張り付与歪みの関係

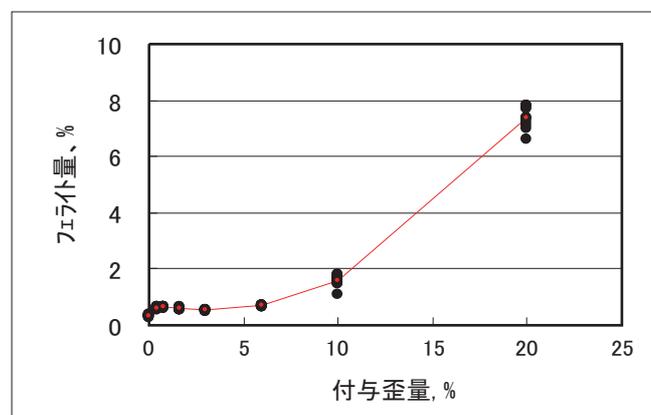


図 15 フェライトスコープによるフェライト量測定値と SUS304 の付与歪みの関係

4. まとめ

原子力発電所の構造材料の耐震性評価を目的として、代表鋼である SUS304 と SS400 に着目し、その実強度を評価する手法と地震動による塑性歪み量を推測する手法として、硬度測定法に着目し、その適用の可能性について調査し、以下の結論を得た。

- 1) 硬度と強度の相関は良好で、ポータブル硬度計による測定を適切に行えば、硬度による実強度の評価は十分に可能であると判断される。
- 2) 微量塑性歪み量の評価手法として、硬さ測定が有効であることが明らかとなった。また、現地測定のためには、ポータブル硬度計での測定が必要であるが、装置の特徴に十分に配慮して測定を行えば、塑性歪み量の定量評価手法として有望である。
- 3) 硬度の変化は材料の組織変化によるものであり、原子力発電所の構造材料の代表鋼 SUS304 と SS400 のそれは、従来、学術的に明らかにされてきた基本的知見に沿うものであり、硬度による塑性歪み量推定手法の信頼性を担保するものと言える。

文献

- (1) 原子力安全保安院：柏崎刈羽原子力発電所の設備健全性について、平成 21 年 3 月
- (2) 長谷川ら：日本材料学会学術講演会前刷, Vol. 38 (1989), p. 40
- (3) 長谷川ら：日本材料学会学術講演会前刷, Vol. 38 (1989), p. 190
- (4) 浅見ら：日本機械学会全国大会講演論文集, Vol. 67 (1989), p. 86
- (5) 日本材料学会：金属材料疲労強度データ集, Vol. 1 および 2 (1982).
- (6) 原子力安全保安院：中越沖地震における原子力施設に関する調査・対策委員会，運営管理・設備健全性評価サブワーキンググループ，第 9 回会議資料「柏崎刈羽原子力発電所 7 号機における追加点検等の実施状況について」平成 20 年 5 月 16 日。
- (7) N. K. Chen et al.: Trans. AIME, Vol. 3 (1951), p. 653
- (8) F. Hamdy et al.: Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 39A (2008), p. 294 .
- (9) 高村仁一：日本金属学会報, Vol. 25 (1986) p.

379

- (10) A. Das et al.: Mat. Sci. Eng. A, Vol. 486 (2008), p. 283a.