

平成 28 年度 修士論文

各種炭素鋼板の炭素添加レーザ溶融焼入れに関する検討

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

松月 直紀

目次

第1章	緒言	・・・1
1-1	研究背景	・・・1
1-2	研究目的	・・・2
第2章	実験装置及び実験方法	・・・3
2-1	供試鋼	・・・3
2-2	炭素塗布方法	・・・3
2-3	実験方法	・・・3
2-4	実験条件	・・・4
2-5	試験片断面観察	・・・4
2-6	SEM 観察及び EPMA 分析	・・・5
2-7	炭素含有量の推定法	・・・5
第3章	溶融部形状	・・・8
3-1	照射速度による影響	・・・8
3-2	炭素添加による影響	・・・8
第4章	炭素添加による硬化	
4-1	溶融部表面の硬さ	・・・10
4-1-1	SWRM10 の溶融部表面の硬さ	・・・10
4-1-2	S45C の溶融部表面の硬さ	・・・11
4-2	溶融部内の深さ方向の硬さ	・・・12
4-2-1	SWRM10 の溶融部内の深さ方向の硬さ	・・・12
4-2-2	S45C の溶融部内の深さ方向の硬さ	・・・13

第5章	炭素混入率	・・・14
第6章	焦点はずしの影響	・・・16
6-1	溶融部の変化	・・・16
6-2	硬さへの影響	・・・17
第7章	炭素混入形態	・・・18
7-1	鋼種の影響	・・・18
7-2	湯流れの影響	・・・18
第8章	結言	・・・20
参考文献		・・・22
謝辞		・・・23

第 1 章 緒言

1-1 研究背景

焼入れとは鋼の硬化法の一つであり、熱した鋼を水中または油中で急冷させることで硬い組織であるマルテンサイトを得る技術である。しかし、焼入れで得られる鋼の硬さは炭素含有量に依存しており、炭素含有量の低炭素鋼では焼入れの効果が得づらいという欠点がある。しかし、低炭素鋼に焼入れ効果が得られるようになれば、低炭素鋼のコスト面や加工性に優れている点から他の金属と置き換えることができ、コスト削減や部品の軽量化ができると考える。レーザ焼入れは一般的な焼入れと比較して処理時間が短く、加熱が狭い範囲のみに行われるためひずみを小さくすることができる。母材自身の自己冷却作用を用いて冷却されるために冷却水や冷却油を必要としないことや、レーザは制御性や操作性においても優れているといった利点を持っている。このレーザ焼入れ技術は従来の強度を保ったまま材料を薄くすることができるため軽量化、燃費の向上につながると考えられる。現在自動車用ボンネットの軽量化には FRP（繊維強化プラスチック）などが用いられているが熱に対して脆弱な点や加工が困難なことに対して差別化が期待できる。

現在、鋼板表面に炭素粉末を塗布し、レーザ加熱により生じた熔融金属内に炭素を混入することで炭素含有量を増加させ、焼入れ効果を与える炭素添加レーザ熔融焼入れの研究 [1,2]が行われており、冷間圧延鋼板 SPCC においては炭素含有量を増加させ、高い焼入れ効果が得られることが判明している。

1-2 研究目的

前述の炭素添加レーザ溶融焼入れによって冷間圧延鋼板 SPCC において高い焼入れ効果が得られた。しかし、鉄中に固溶できる炭素量の最大は 6.67mass%であるため、鉄中の炭素含有量との濃度勾配が大きい低炭素鋼と濃度勾配の小さい高炭素鋼では炭素添加レーザ溶融焼入れにおいて同一条件においても溶融金属内の炭素含有量の上昇量が異なると考えられる。そこで本研究では炭素含有量の異なる 2 種類の鋼板に関して炭素添加レーザ溶融焼入れによる焼入れ効果が得られるかを調べることを目的とした。

第 2 章 実験装置及び実験方法

2-1 供試鋼

供試鋼として SWRM10(0.08mass%C)S45C(0.44mass%C)の炭素含有量の異なる炭素鋼を用いた. 各鋼の化学組成を Table.2-1 に示す. 幅 22mm, 板厚 3mm の鋼板から長さ 100mm に切断してレーザ溶融焼入れ実験に供した.

2-2 炭素塗布方法

炭素粉末と水を質量比で 7:1 の懸濁液を作成し, レーザ照射面にスプレーにより塗布した後にドライヤーで乾燥させることで炭素のみを鋼板表面に塗布する. 供試鋼の炭素塗布前後の質量の変化により塗布量を確認した. レーザ照射面に炭素塗布密度が $23\text{mg}/\text{mm}^2$ となるように幅 22mm, 長さ 100mm の鋼板表面に 50mg 塗布する. 供試鋼の炭素塗布した写真を Fig2-1 に示す.

2-3 実験方法

本実験では, 定格出力 1kW, 波長 $10.6\mu\text{m}$, 連続発振型の炭酸ガスレーザ加工機(アマダ社製 Quattro AF1000E)を使用した. Fig.2-2 に実験装置の概略図を示す. 実験装置は炭酸ガスレーザ発振器, 光学器, 供試鋼固定用治具によって構成される. 集光用レンズはレーザ光と同軸のノズル内に収められ, ノズルより供試鋼表面に向けて窒素ガスを噴出させた. 供試鋼は銅製の治具の上に設置し, 2 枚の押さえ板とボルト・ナットにより固定する. レーザ装置の動作プログラムを用いてレーザを制御し, 供試鋼表面にレーザ照射の開始位置と照

射速度を制御する。また、窒素ガスの勢いによりスパッタが発生する可能性があるため、側面から扇風機を用いてレンズを保護した。レーザー照射の開始位置から 50mm 照射する。SWRM10 と S45C それぞれでレーザー照射条件と炭素塗布の有無を変えて実験を行った。

2-4 実験条件

レーザーの種類	: CO ₂ レーザ
レーザー出力	: 500W
照射速度	: 10～100mm/s
照射距離	: 50mm
焦点はずし	: ±0, ±5, ±10mm
炭素塗布密度	: 0 μg/mm ² , 23 μg/mm ²
供試鋼	: SWRM10, S45C
スラリー	: 炭素と水

2-5 試験片断面観察

各照射条件が焼入れ部の組織、形状、硬さに対しての効果を調べるため、顕微鏡観察及び硬さ試験を行った。以下に断面観察の手順を示す。

1. 供試鋼をリファインカッタを用いて照射開始から 1 秒以内の溶融部を照射方向に対して垂直に切断する。試験片を REFINE TEC 社製 RAPID PRESS に垂直になるように入れ、その上からベークライト粉末を入れて 20 分かけて硬化させる。
2. 供試鋼の断面を 400 番から 2000 番までのエメリー紙を用いて研磨する。

3. バフ仕上げによって鏡面仕上げを行う.
4. 3%ナイトール溶液に数秒浸し, 焼入れ部の輪郭を出す.
5. 光学顕微鏡を用いて形状を観察する.
6. マイクロビッカース硬さ試験機を用いて硬さの測定を行う.

2-6 SEM 観察及び EPMA 分析

SEM(Scanning Electron Microscope, JEOL 製 JXA-8530F)を用いて SEM 像の観察を行った. また溶融部内の原子の存在量及び組織を検討するために EPMA(Electron Probe Microanalysis, JEOL 製 JXA-8530F)を用いて面分析, 点分析を行った. 以下に手順を示す.

1. 測定する供試鋼の溶融部をリファインカットにより切断し, バックライト粉末樹脂に埋め込む.
2. 供試鋼の断面を 400 番から 2000 番までのエメリー紙を用いて研磨する
3. バフ仕上げによって鏡面仕上げを行う.
4. 3%ナイトール溶液に数秒浸し, 溶融部の輪郭を出す.
5. 供試鋼表面に電流が流れるように Pt 蒸着装置を用いて Pt を蒸着する.
6. 任意の倍率で SEM 像を撮影する.
7. 元素分析に C と Fe を指定し, 任意の点と面を EPMA を用いて分析する.

2-7 炭素含有量の推定法

ADVANTEC 社製卓上真空ガス置換炉に供試鋼を置き, ポンプを用いて炉の内部の気圧を 9.3Pa まで低下させ, 焼戻し温度 873K, 保持時間 99 時間で真空焼もどしを行う. 真空熱処理を行った S45C をナイトールにより腐食した SEM 像を Fig.2-3 に示す. 十分な時間

で熱処理を行っているため、鋼中は全てフェライトとセメンタイトとなっていると考えられる。Fig.2-3 で示した箇所を面分析したものを Fig.2-4 に示す。Fig.2-3 で白く析出した部分は炭素の濃度が高く、鉄の濃度が低くなっていることが分かる。フェライトの炭素含有量は $0\sim 0.02\text{mass}\%C$ であり、セメンタイトの炭素含有量は $6.67\text{mass}\%C$ であることから図中の白色粒子はセメンタイトだと考えられ、それ以外の部分はフェライトだと考えられる。そこで炭素含有量の判明している 4 種類の鋼 SWRM10($0.08\text{mass}\%C$), S20C($0.20\text{mass}\%C$), S45C($0.44\text{mass}\%C$), SK 材($0.88\text{mass}\%C$)に真空熱処理を行い、SEM 像からフェライトとセメンタイトの存在量を測定し、それらの存在量から炭素含有量の推定を試みた。その結果と炭素含有量の推定により得られた補正式を Fig.2-5 に示す。本実験では SEM 像からフェライトとセメンタイトの存在量を測定し、補正式により補正したものを炭素含有量とする。以下に炭素含有量の測定法の手順の概略を示す。

1. レーザ照射を行った供試鋼をアルミホイルで全体を包むことで脱炭を防ぎつつ真空焼戻しを行う。真空焼戻しの条件は $873K$ ，99 時間で行う。
2. 測定する供試鋼の溶融部をリファインカットにより切断し、バークライト粉末樹脂に埋め込む。
3. 供試鋼の断面を 400 番から 2000 番までのエメリー紙を用いて研磨する。
4. バフ仕上げによって鏡面仕上げを行う。
5. 3%ナイトール溶液に 60~70 秒程度浸し、溶融部のセメンタイトを現出させる。
6. 供試鋼表面に電流が流れるように Pt 蒸着装置を用いて Pt を蒸着する。
7. 溶融部内を 4000 倍の倍率で SEM 像を撮影する。
8. 撮影した SEM 像から現出したものをセメンタイト、それ以外をフェライトとしてセメンタイトを白、フェライトを黒として 2 値化する。セメンタイトの炭素含有量を $6.67\text{mass}\%$ ，フェライトを $0.002\text{mass}\%$ として、その面積の量比から炭素含有量を測定

する．以下に計算式を示す．

$$x = 6.67a + 0.002b$$

ここで， x ：炭素含有量の測定値， a ：白の面積の量比， b ：黒の面積の量比とする．

9. Fig.2-5 より求められた補正式を用いて炭素含有量を求める．以下に補正式を示す．

$$y = 0.94x + 0.05$$

ここで， y ：炭素含有量の補正值， x ：炭素含有量の測定値とする．

第3章 溶融部形状

3-1 照射速度による影響

Fig.3-1～3-4 に SWRM10 と S45C の各照射条件で形成された溶融部断面の写真を示す。また、Fig.3-5 各照射速度と溶融部形状の関係を示す。SWRM10 と S45C とともに照射速度 10mm/s～60mm/s においてはキーホールが生成され、深い溶け込みが観察された。照射速度 70mm/s～100mm/s においては半楕円型の溶融部形状が観察された。本研究ではそれぞれキーホールが生成された溶融部形状を Winecup 型、半楕円型の溶融部形状を Semiellipse 型と称す。キーホールの生成には母材を気化するだけの入熱が必要であるため、レーザによる入熱が多い照射速度が遅い範囲においては Winecup 型が観察され、レーザによる入熱が少ない照射速度が速い範囲においてはため Semiellipse 型が観察されたと考えられる。

Fig.3-6～3-8 に SWRM10 と S45C の各照射速度と溶融部の幅と深さと面積の関係を示す。SWRM10 と S45C とともに照射速度が速くなるに連れて幅、深さ、面積が減少している。これは照射速度が速くなるに連れて入熱が減少するためである。また、Winecup 型から Semiellipse 型に遷移する際に幅、深さ、面積が大きく減少している。これはキーホールの生成によりレーザ吸収率が増加するためだと考えられる。

3-2 炭素添加による影響

Fig.3-6～3-8 より同じ照射速度において炭素添加溶融部は幅、深さ、面積が炭素添加無しの溶融部に比べて増加している。また Fig.3-9 に炭素添加による溶融部の面積の上昇率と照射速度の関係を示す。炭素添加により SWRM10, S45C とともに溶融部の形状によらず 20% 程度溶融部の面積が増加した。レーザ吸収率はレーザ照射面に依存しており、照射面が黒に

近いほど吸収率が増加する。炭素粉末を添加することによって照射面は黒色に近づき、レーザーの反射を抑制しレーザー吸収剤の役割を呈することになる。したがって炭素添加した溶融部はレーザー吸収率が増加することによって幅、深さ、面積が炭素添加無しの溶融部に比べて増加したと考えられる。なお、SWRM10 に関しては後述するように炭素添加による融点低下がおきるが、レーザー吸収率に対する影響はちいさいものと思われる。

第4章 炭素添加による硬化

4-1 溶融部表面の硬さ

4-1-1 SWRM10 の溶融部表面の硬さ

Fig.4-1 に Winecup 型, Fig.4-2 に Semiellipse 型の溶融部表面の硬さ試験結果を示す. 炭素添加無しにおいて, 溶融部内の硬さが約 400Hv 程度の硬さを示したのに対し, 炭素添加した溶融部表面は Winecup 型, Semiellipse 型ともに 700~1300Hv 程度の硬さを示し, 炭素添加により硬さの向上が確認された.

走査型電子顕微鏡(SEM)にて観察すると溶融部表面には Fig.4-3 に示すような黒い粒子の存在が確認された. この粒子の点分析の結果を Fig4-4 に示す. 点分析の結果, 黒い粒子の鉄と炭素の組成比はおよそ 3:1 となった. セメントタイトの組成式は Fe_3C であるので鉄と炭素の割合は 3:1 となることから黒い粒子はセメントタイトであると考えられる.

焼戻し後の Winecup 型, Semiellipse 型の溶融部表面の硬さ試験をそれぞれ Fig.4-5, Fig.4-6 に示す. 焼戻し前の硬さに比べて, 溶融部内の硬さが低下している. マルテンサイトは焼戻しを行うことでフェライトとパーライトに変態するため焼戻し後に硬さが低下する. したがって溶融部内にはマルテンサイトが多く存在していると考えられる. また, 各照射速度の溶融部内の炭素含有量の推定量を Fig4-7 に示す. Fig.4-8,4-9 に Winecup 型, Fig.4-10,4-11 に Semiellipse 型の溶融部表面の炭素添加有無のそれぞれの SEM 像を示す. セメントタイトの硬さは 1300Hv 程度であり, 炭素含有量 0.4mass%のマルテンサイトは 700Hv 程度 [3]である. これは溶融部内の硬さのばらつきの範囲と一致する. したがって溶融部表面はセメントタイトとマルテンサイトで構成されていると考えられる. これは溶融部内に侵入した炭素粉末が十分に拡散される前に凝固してしまうため, 溶融部内の炭素含有量が不均一

になるためだと考えられる。

4-1-2 S45C の溶融部表面の硬さ

Fig.4-12 に Winecup 型, Fig.4-13 に Semiellipse 型の溶融部表面の硬さ試験結果を示す。炭素添加無しにおいて溶融部内の硬さは 900Hv 程度を示したのに対し、炭素添加した溶融部は Winecup 型, Semiellipse 型ともに 900~1300Hv 程度を示し、SWRM10 で得られたような硬さの顕著な差異はみられなかった。鉄中に炭素を混合させる際におきる拡散は濃度勾配に比例するため、炭素含有量の異なる炭素鋼では同一条件においても炭素の混入速度が異なると考えられる。したがって SWRM10 に比べて炭素含有量の高い S45C では炭素が溶融部内に入りにくいと考えられる。また、Table2-1 より SWRM10 と S45C の硫黄の含有量を比べると、S45C が硫黄を多く含んでいることが分かる。硫化物は界面活性物質であるため、溶鉄表面を占有することから溶鉄と炭素粉末の接触を阻害して反応を妨げ、炭素の混入速度を低下させている可能性がある。[4]

溶融部表面を光学顕微鏡より観察すると SWRM10 と同様に Fig.4-13 に示すような黒い粒子が観察された。この組織を点分析した結果(Fig.4-4)から観察された黒い粒子は鉄と炭素の組成比が 3:1 となっていることからこの組織はセメンタイトだと考えられる。

焼戻し後の Winecup 型, Semiellipse 型の溶融部の溶融部表面の硬さを Fig.4-14, Fig.4-15 に示し、Fig.4-16,4-17 に Winecup 型, Fig.4-18,4-19 に Semiellipse 型の溶融部表面の炭素添加有無のそれぞれの SEM 像を示す。焼戻し後の硬さが低下していることから溶融部内にマルテンサイトが多く存在していると考えられる。セメンタイトの硬さは 1300Hv 程度であり、炭素含有量 0.4~0.5mass%のマルテンサイトの硬さは 700~800Hv 程度[3]である。これは溶融部内の硬さのばらつきと一致することから溶融部内はセメンタイ

トとマルテンサイトで構成されていると考えられる。

4-2 溶融部内の深さ方向の硬さ

4-2-1 SWRM10 の溶融部内の深さ方向の硬さ

Fig.4-20に SWRM10 の Winecup 型における溶融部内の深さ方向の硬さ試験結果を示す。溶融部上部では 700~1300Hv 程度の硬さとなり，溶融部下部では 500~600Hv 程度の硬さとなった。炭素添加した溶融部上部を SEM で観察すると Fig.4-21 のような黒い粒が観察された。この粒子に関する点分析の結果を Fig.4-22 に示す。点分析の結果から鉄と炭素の組成比が 3:1 となっていることからこの組織はセメンタイトだと考えられる。また，溶融部の焼戻し後の硬さ試験結果を Fig4-23 に示す。溶融部内の硬さは上部，下部に関わらず低下していることから溶融部上部，下部ともに多くのマルテンサイトが存在していると考えられる。溶融部上部の硬さのばらつきは溶融部内に侵入した炭素粉末が十分に拡散される前に凝固してしまうため，溶融部内の炭素含有量が不均一となり，セメンタイトとマルテンサイトが存在しているためだと考えられる。

溶融部の炭素含有量を表面から深さ方向に推定したものを Fig.4-24 に示し，溶融部上部の SEM 像を Fig.4-25，溶融部下部の SEM 像を Fig.4-26 に示す。溶融部上部に比べて溶融部下部は炭素含有量が低いことが分かる。このことから溶融部上部と下部の硬さの違いは炭素含有量の差が原因だと考えられる。これは溶融部表面と炭素粉末が反応し，高炭素化した鋼が湯流れによって溶融部全体に攪拌される前に凝固されるために溶融部上部と下部で炭素含有量に差が出ると考えられる。特に Winecup 型の溶融部下部では湯流れが悪いため炭素含有量が上部に比べて低いと考えられる。

4-2-2 S45C の溶融部内の深さ方向の硬さ

Fig.4-18 に S45C の溶融部の深さ方向の硬さ試験結果を示す。SWRM10 でみられたような炭素添加による硬さへの顕著な差異はみられなかった。炭素添加した溶融部上部を光学顕微鏡により観察すると Fig.4-19 のような黒い組織が観察された。この組織の点分析結果 (Fig.4-15) をみると鉄と炭素の組成比が 3:1 となっていることからこの組織はセメントタイトと考えられる。溶融部の炭素含有量を表面から深さ方向に推定したものを Fig.4-28 に示し、溶融部上部の SEM 像を Fig.4-29, 溶融部下部の SEM 像を Fig.4-30 に示す。SWRM10 でみられたような溶融部上部と下部での硬さの差異はみられず、溶融部内の炭素含有量の推定量の結果と相応するものであった。

これらの結果から炭素粉末が湯流れに巻き込まれて溶融部内に混入することによる局所的な炭素含有量の増加は S45C でも見られたが、炭素粉末と溶融表面の反応が 4-1-2 で挙げた理由で抑制されたと考えられる。

第 5 章 炭素混入率

溶融部上の炭素が全て溶融部内に混入した場合を炭素混入率 100%として実際の溶融部内の炭素混入率を求めた.

以下に計算式を示す.

$$x_{max} = \frac{M_c}{M_{Fe} + M_c} \times 100 + C$$

$$R = \frac{x}{x_{max}} \times 100$$

ここで, x_{max} : 溶融部上の炭素が全て混入した場合の炭素含有量[mass%], M_{Fe} : 溶融部の質量[mg], M_c : 溶融部上に塗布された炭素の質量[mg], C : 供試材の化学組成表における炭素含有量[mass%], x : SEM 像により算出された炭素含有量[mass%], R : 炭素混入率[-]とする. また, M_{Fe} と M_c は以下の式により求めた.

$$M_{Fe} = \rho_{Fe} \times A$$

$$M_c = \rho_c \times W$$

ここで, ρ_{Fe} : 鉄の密度 7.83[mg/mm²], A : 溶融部の面積[mm²], ρ_c : 炭素塗布密度 0.23[mg/mm²], W : 溶融部の幅[mm]とする.

Fig.5-1 に各供試材の炭素混入率を示す. SWRM10 に関しては照射速度が速くなるに連れて炭素混入率は低い値となった. これは炭素添加後の溶融部内の炭素含有量は照射速度によって 0.35~0.40mass%程度の差を示すのに対し, 溶融部上の炭素が全て混入した場合の炭素含有量 x_{max} は照射速度が速くなるに連れて大きく増加しているためだと考えられる.

Fig.5-2 に x_{max} と照射速度の関係を示す. また Winecup 型に関して高い炭素混入率を示したのは Fig.5-2 に示すとおり Winecup 型は Semiellipse 型に比べて x_{max} の値が低い値となっているため Winecup 型は炭素混入率が Semiellipse 型に比べて高くなったと考えられる.

S45C に関しては照射速度によらず炭素混入率はほぼ 0%となった. これは Fig.4-7 に示

すとおりの S45C に関しては溶融部内に炭素があまり混入しないため、炭素混入率がほぼ 0% の値になったと考えられる。

第 6 章 焦点はずしの影響

6-1 溶融部の変化

硬化幅を広げるため、焦点はずしを ± 5 , $\pm 10\text{mm}$ の条件で行い溶融部の幅の上昇を試みた。Fig.6-1~6-2 に SWRM10 と S45C の各照射条件で形成された溶融部断面の写真を示す。また、焦点はずしを行うことで、溶融部が形成されない条件が存在した。SWRM10 と S45C の焦点はずしと照射速度による溶融部の形成の有無をそれぞれ Fig.6-3, 6-4 に示す。これは焦点はずしを行った低入熱側の条件ではレーザーのエネルギー密度が低く、供試材の融点まで加熱することができなかったためだと考えられる。Fig.6-5 に焦点はずしと溶融部幅の関係を示す。硬化幅の増加を狙って、焦点はずしを行ったが本実験範囲で得られた同照射速度での溶融幅はジャストフォーカス($\pm 0\text{mm}$)がほぼ全ての条件で最も大きい結果となった。これはジャストフォーカスの条件にのみで得られた Winecup 型はキーホール生成によりレーザーの吸収率が増加するため、同照射速度において焦点はずしを行なった条件より入熱量が大きくなり、結果として溶融部幅が大きくなったと考えられる。ただし、Semiellipse 型となった高照射速度条件においてはその差は小さくなった。Fig.6-6 に焦点はずしと溶融部深さの関係を示す。焦点から離れるにつれて、溶融部深さは減少する傾向がみられた。これは焦点から離れるにつれて、レーザーのエネルギー密度が小さくなったため、深い溶け込みを得られなくなったと考えられる。Fig.6-7 に焦点はずしと溶融部の面積の関係を示す。焦点から離れるにつれて溶融部の面積は減少する傾向がみられた。これは同じ溶融部形状においては焦点はずしを行うほど溶融部幅が大きくなっているため、溶融部と伝熱しやすい未溶融の部分との境界部分が大きくなり、溶融部の面積が減少したと考えられる。

6-2 硬さへの影響

Fig.6-8, Fig.6-9 に 10mm/s の SWRM10 と S45C での各焦点はずし量における表面硬さと照射速度の関係を示す. 焦点はずしを行うことで SWRM10 はジャストフォーカスでの硬さと同じく 700~1300Hv 程度を推移しているが比較的, 1300Hv 程度の硬い部分が多い傾向がある. S45C も同様にジャストフォーカスでの硬さと同じく 900~1300Hv 程度を推移しているが比較的, 1300Hv 程度の硬い部分が多い傾向がある. これは焦点はずしを行うことで x_{max} (溶融部上の炭素が全て混入した場合の炭素含有量[mass%])が大きく上昇するため溶融部内に炭素粉末がジャストフォーカスに比べ多く混入し, セメントタイトが多く存在するためだと考えられる. Fig.6-10, Fig.6-11 に SWRM10 と S45C での各焦点はずし量における x_{max} と照射速度の関係を示す.

第 7 章 炭素混入形態

7-1 鋼種の影響

炭素添加レーザ溶融焼入れによって SWRM10 では溶融部内に炭素を混入し、溶融部内の炭素含有量が向上したが、S45C においては溶融部内の炭素含有量の向上はほぼ得られなかった。そこで SK 材(0.88mass%C)を用いて炭素添加レーザ溶融焼入れを行い、真空焼もどしを行なった。Fig.7-1 に炭素添加レーザ溶融焼入れ後の溶融部の炭素含有量を示し、Fig7-2 に SK 材の SEM 像、Fig.7-3 に炭素添加無しの溶融部の SEM 像、Fig.7-4 に炭素添加有りの溶融部の SEM 像を示す。レーザ溶融焼入れ後の溶融部の炭素含有量は炭素添加の有無に関わらず減少している。これは大気中や供試材内の酸化鉄から酸素が供給され、溶融部内の炭素と反応し、脱炭が起きたと考える。この脱炭反応は炭素含有量が高い程、また大気と直接触れる溶融部表面でよく反応すると考えられる。

炭素添加レーザ溶融焼入れでは溶融部表面では炭素粉末と溶融部が反応する吸炭反応と同時に前述の脱炭反応が起こっていると考えられる。そのため、溶融部の炭素含有量の変化は吸炭反応と脱炭反応の合計によって得られ、炭素含有量の低い SWRM10(0.08mass%C)では吸炭反応が促進され、脱炭反応が抑制されるため炭素含有量が向上し、炭素含有量の高い SK 材(0.88mass%C)では吸炭反応が抑制され、脱炭反応が促進されるため炭素含有量が減少したと考えられる。S45C においては吸炭反応と脱炭反応による炭素含有量の変化が釣り合うため、結果として溶融部内の炭素含有量がほぼ変化しなかったと考える。

7-2 湯流れの影響

炭素添加レーザ溶融焼入れによって得られた SWRM10 の Winecup 型の溶融部は溶融部上部と下部で硬さの違う結果(Fig.4-20)となり、炭素含有量は上部で 0.35mass%程度とであ

り，溶融部下部では 0.2mass%程度(Fig.4-24)であった．Winecup 型の溶融部の湯流れを Fig.7-5 に示す[4]．溶融部表面で炭素粉末と反応し，高炭素化した鋼は Fig.7-5 に示す湯流れによって溶融部全体に攪拌されると考えられる．Fig.7-6 に Winecup 型の湯流れによる炭素混入の概要を示す．湯流れの悪い溶融部下部では溶融部表面で高炭素化した鋼が十分に行き渡る前に凝固するため溶融部上部に比べて低い炭素含有量となったと思われる．

第 8 章 結言

本実験では炭素含有量の異なる 2 種類の鋼板(SWRM10,S45C)で炭素添加レーザ溶融焼入れを行い、以下のような結論が得られた.

1. SWRM10, S45C とともに炭素添加の有無に関わらず, 照射速度 10~60mm/s の高入熱条件では Winecup 型となり, 照射速度 70~100mm/s の低入熱条件では Semiellipse 型なった.
2. SWRM10(母材硬さ 200Hv)において炭素添加無しの場合, 溶融部は 400Hv 程度であったのに対し, 炭素添加効果により Winecup 型, Semiellipse 型ともに溶融部表面は 700~1300Hv 程度の硬さが得られた. Winecup 型においては溶融部内の硬さは均一ではなく溶融部下部においては 500~600Hv 程度の硬さとなった.
3. S45C(母材硬さ 330Hv)においては炭素添加無しの場合, 溶融部は 900Hv 程度であったのに対し, 炭素添加した溶融部は Winecup 型, Semiellipse 型に関わらず, 900~1300Hv 程度であり SWRM10 に比べ, 炭素添加による溶融部の硬さの向上は僅かであった.
4. SWRM10, S45C とともに溶融部の焼戻し後の硬さが低下していることから得られた組織はマルテンサイトが多くを占めていると考えられる.
5. SWRM10(C : 0.08mass%)においては炭素添加レーザ溶融焼入れにより照射速度によらず, 溶融部内の炭素含有量を 0.35mass%程度まで炭素含有量を上昇させられるこ

とがわかった. Winecup 型においては溶融部内の炭素含有量は均一とはならず, 溶融部下部において炭素含有量は 0.2mass%程度となった.

6. S45C(C : 0.44mass%)においては本実験範囲の炭素添加レーザ溶融焼入れによって溶融部内への炭素の混入はほぼ得られなかった.

参考文献

- [1] 大前堯他：レーザ焼入に関する基礎研究

溶接学会全国大会講演概要 31,(1982), pp.154-155

- [2] 石塚将央：低炭素鋼板への炭素添加レーザ溶融焼入れにおける影響因子

三重大学大学院修士論文, (2015)

- [3] 鈴木信夫：金属データブック,1993, 丸善株式会社

- [4] 川人洋介 中田光紀 上村溶輪 水谷正海 西本浩二 川上博士 片山聖二

: ステンレス鋼の高出力レーザ溶接における 3 次元 X 線透過その場観察による
湯流れと入射角および焦点はずし距離によるスパッタ抑制との関係

溶接学会論文集 第 34 巻 第 4 号 p.239-248(2016)

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切にご指導いただきました三重大学工学部鈴木実平教授，川上博士准教授，尾崎仁志助教に感謝致します．特に実験条件の選定，修論の執筆など多岐にわたりご教授いただいた川上博士准教授，レーザ発振器の調整等を懇切丁寧にご指導いただいた尾崎仁志助教に深く感謝いたします．

さらに本研究を遂行するにあたりご協力頂いた同学工学部材料機能設計講座の諸氏に心より感謝致します．

最後に幾多のご協力を頂きながら，個々に御氏名を掲載できなかった方々に対し，その非礼をお詫びするとともに，謹んで御礼申し上げます．

Table2-1 Chemical components (mass%).

SWRM10

(Base material hardness 240Hv)

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.21	0.21	0.02	0.01

S45C

(Base material hardness 330Hv)

C	Si	Mn	P	S
0.44	0.19	0.73	0.01	0.18

(a)No-coating



(b)Carbon coating



Fig.2-1 Change of surface by carbon coating.

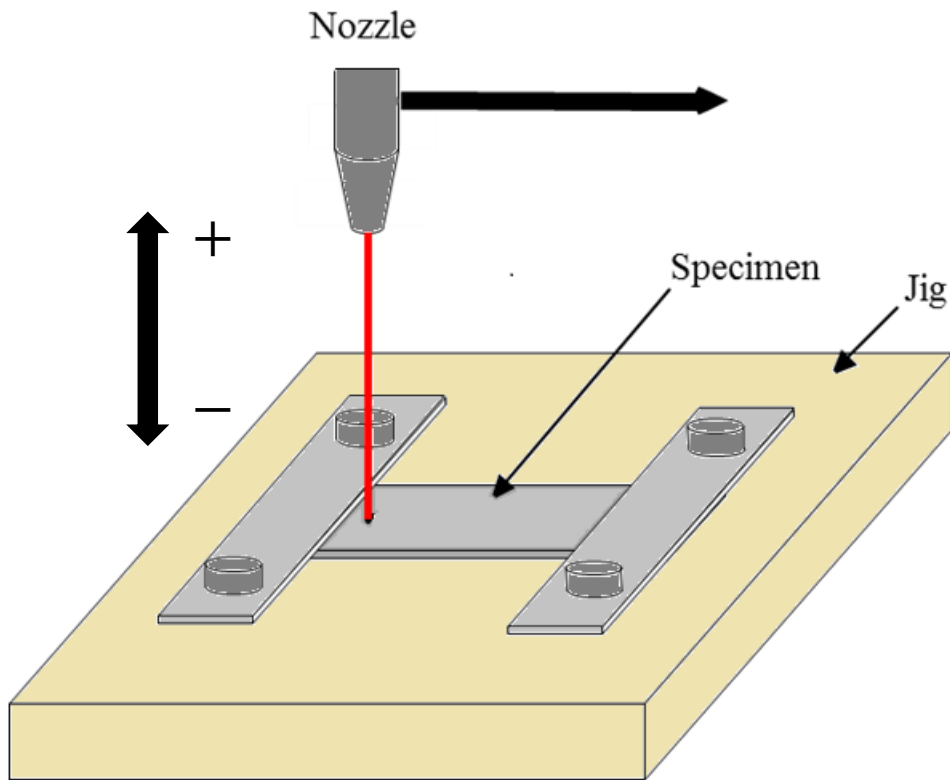


Fig.2-2 Experimental apparatus.

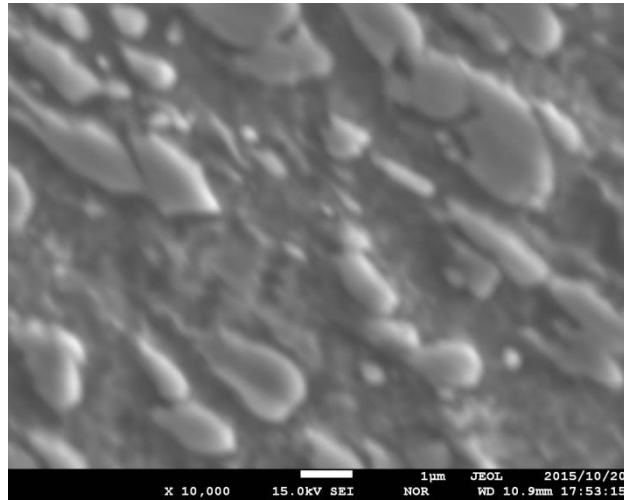


Fig.2-3 SEM observation result of cross section of S45C after tempering.

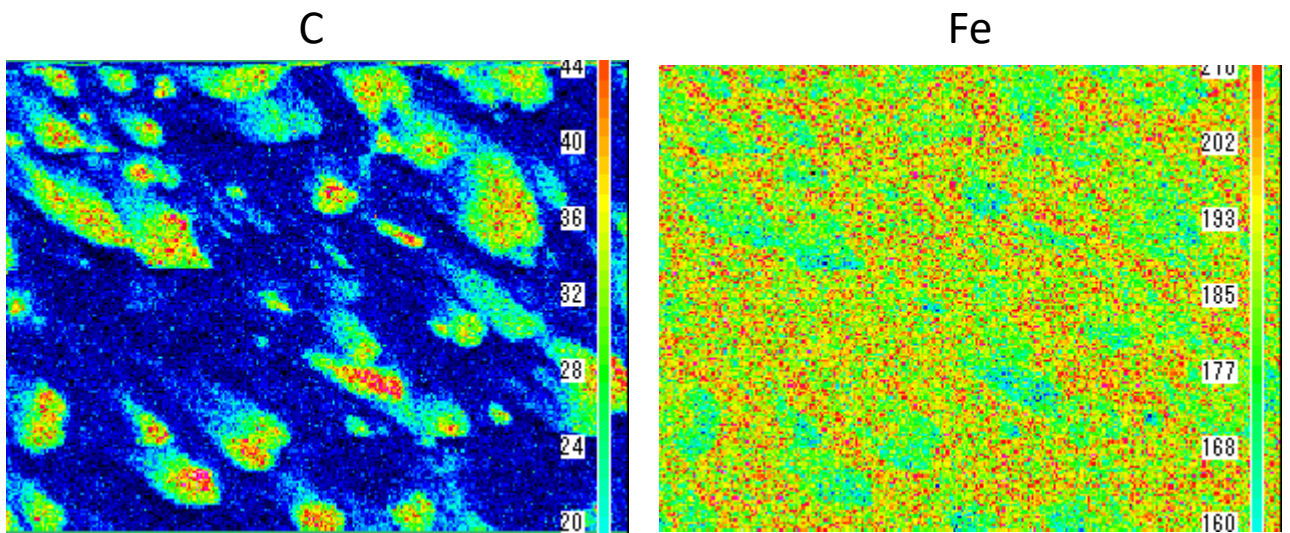


Fig.2-4 Surface analysis result of S45C after tempering.

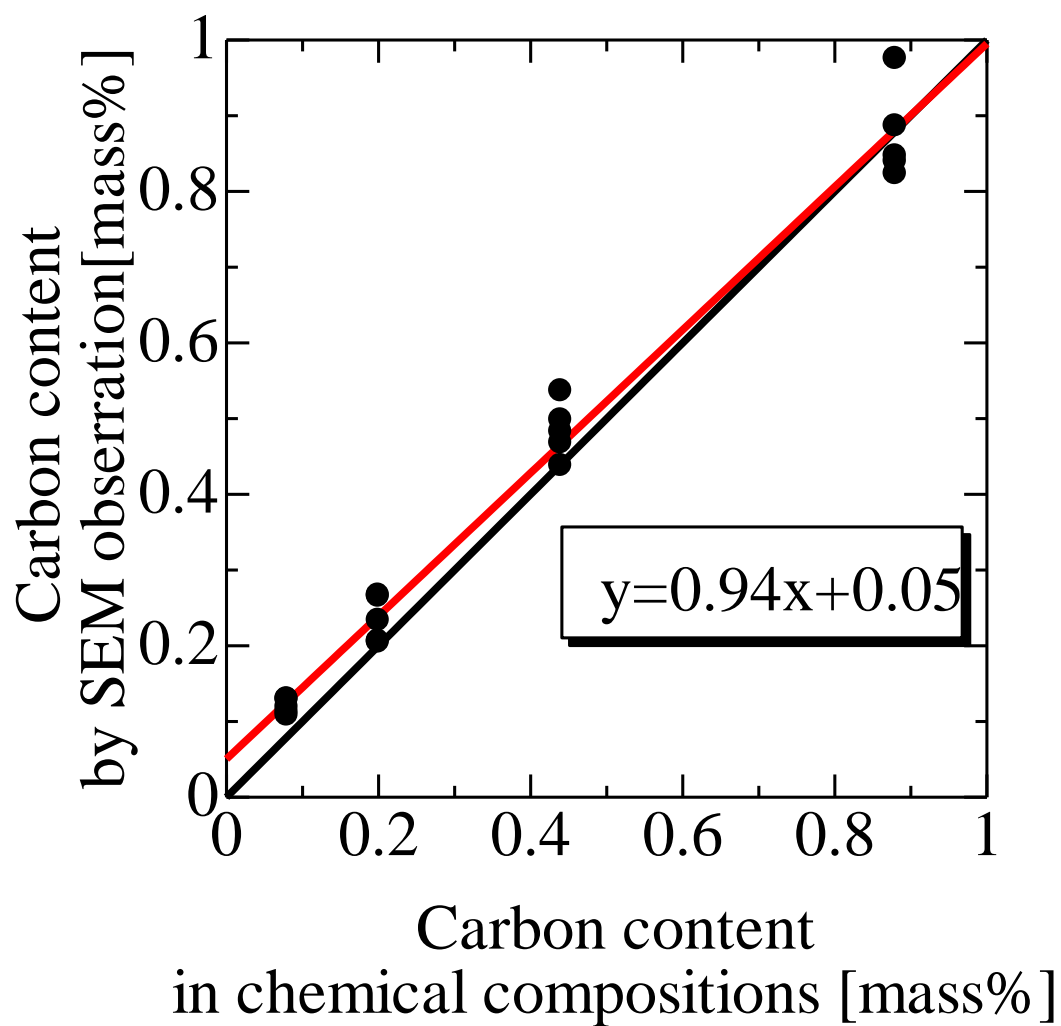


Fig.2-5 Correction formula of carbon content.

(a)10mm/s



(b)40mm/s



(c)100mm/s

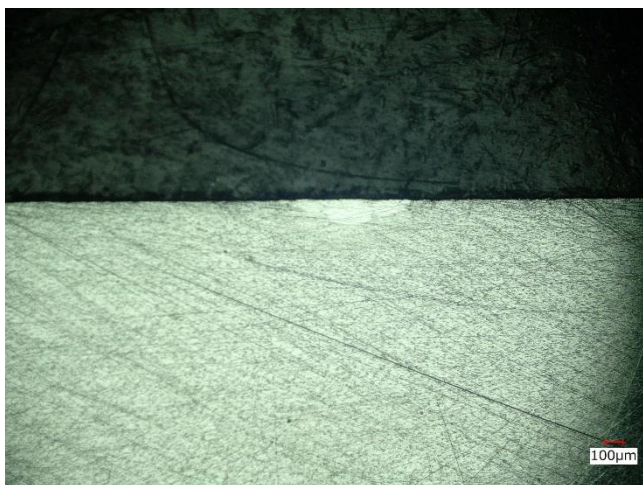


Fig.3-1 Cross section areas of molten metal of SWRM10 without carbon coating.

(a)10mm/s



(b)40mm/s



(c)100mm/s

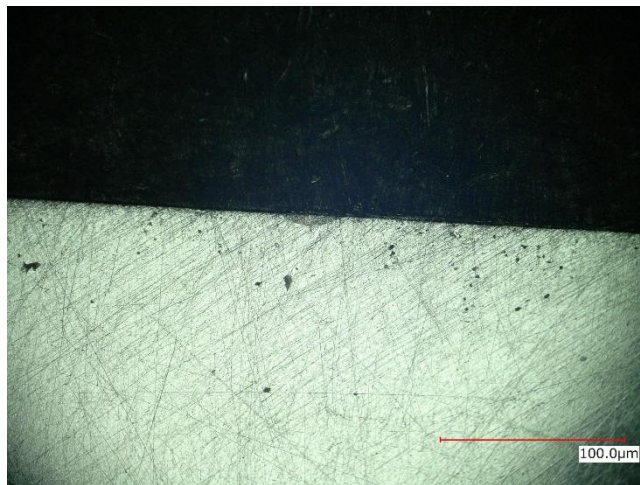


Fig.3-2 Cross section areas of molten metal of SWRM10 with carbon coating.

(a)10mm/s



(b)40mm/s



(c)100mm/s



Fig.3-3 Cross section areas of molten metal of S45C without carbon coating.

(a)10mm/s



(b)40mm/s



(c)100mm/s



Fig.3-4 Cross section areas of molten metal of S45C with carbon coating.

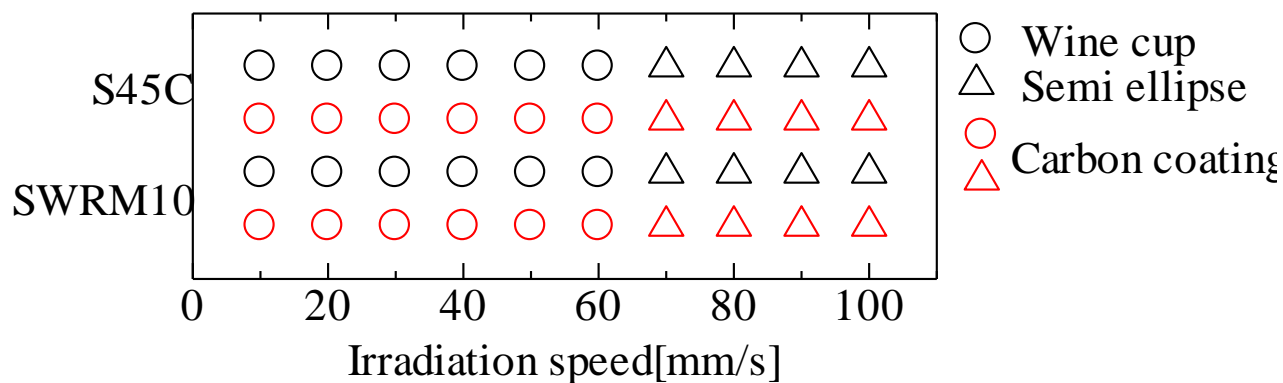


Fig.3-5 Shape of molten metal at each condition.

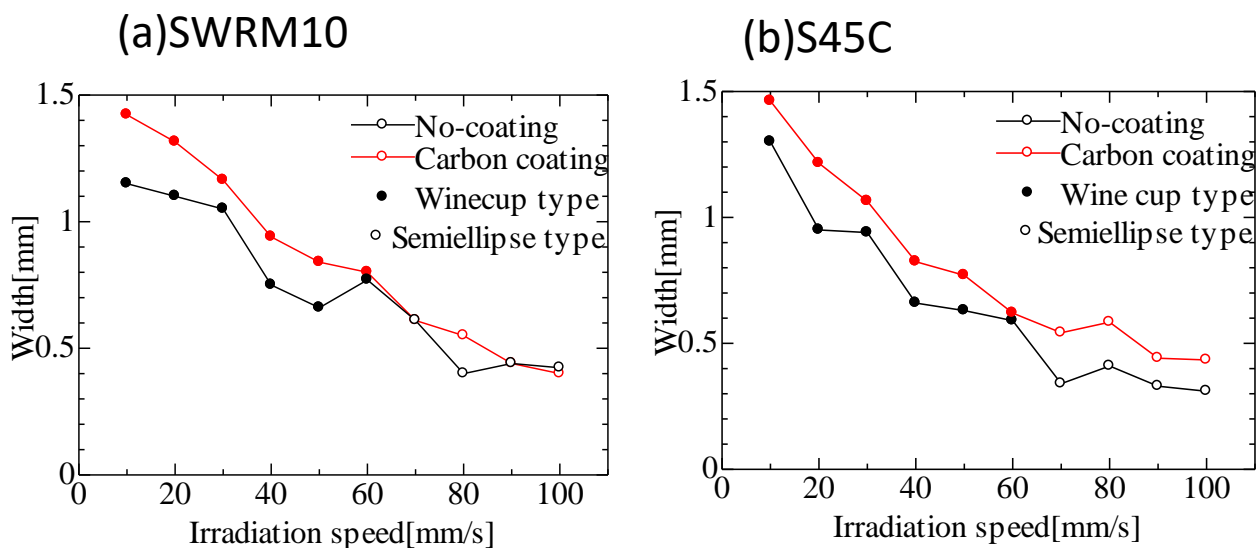
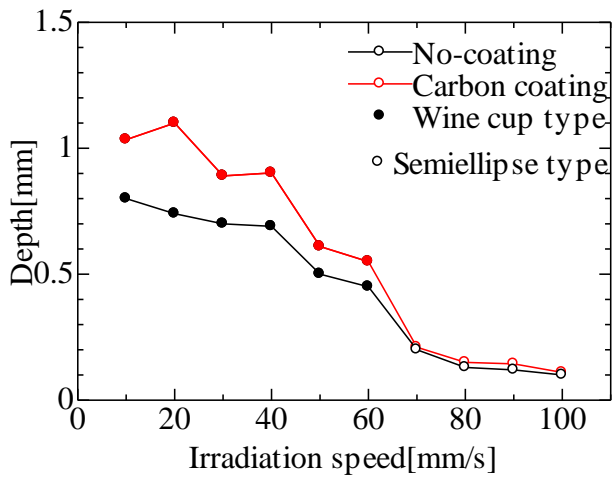


Fig.3-6 Change of width of molten metal at each condition.

(a)SWRM10



(b)S45C

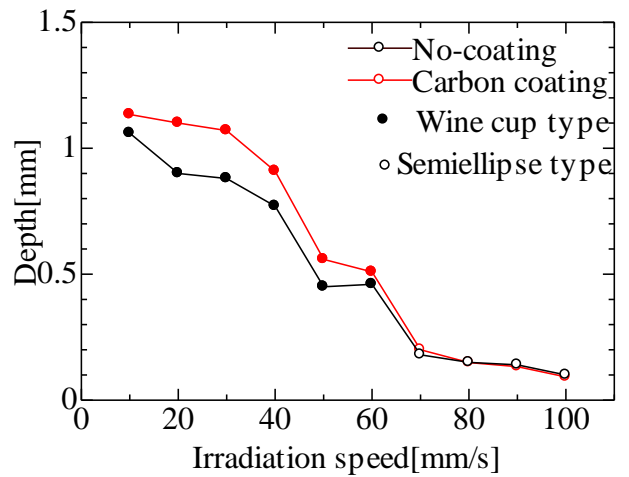
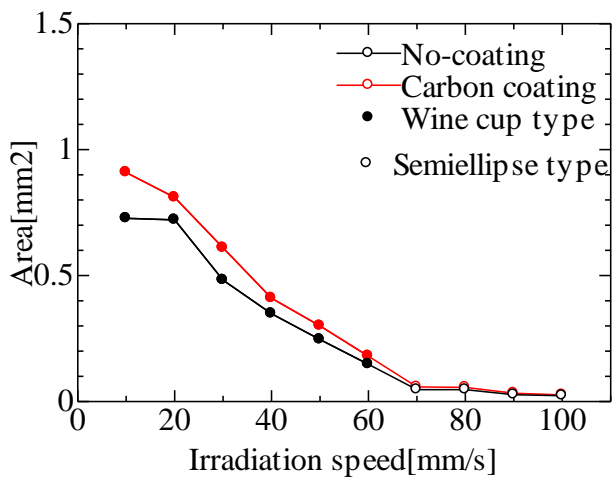


Fig.3-7 Change of depth of molten metal at each condition.

(a)SWRM10



(b)S45C

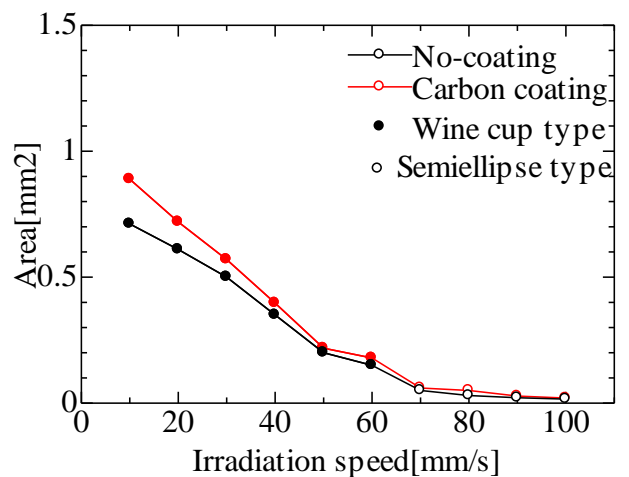


Fig.3-8 Change of area of molten metal at each condition.

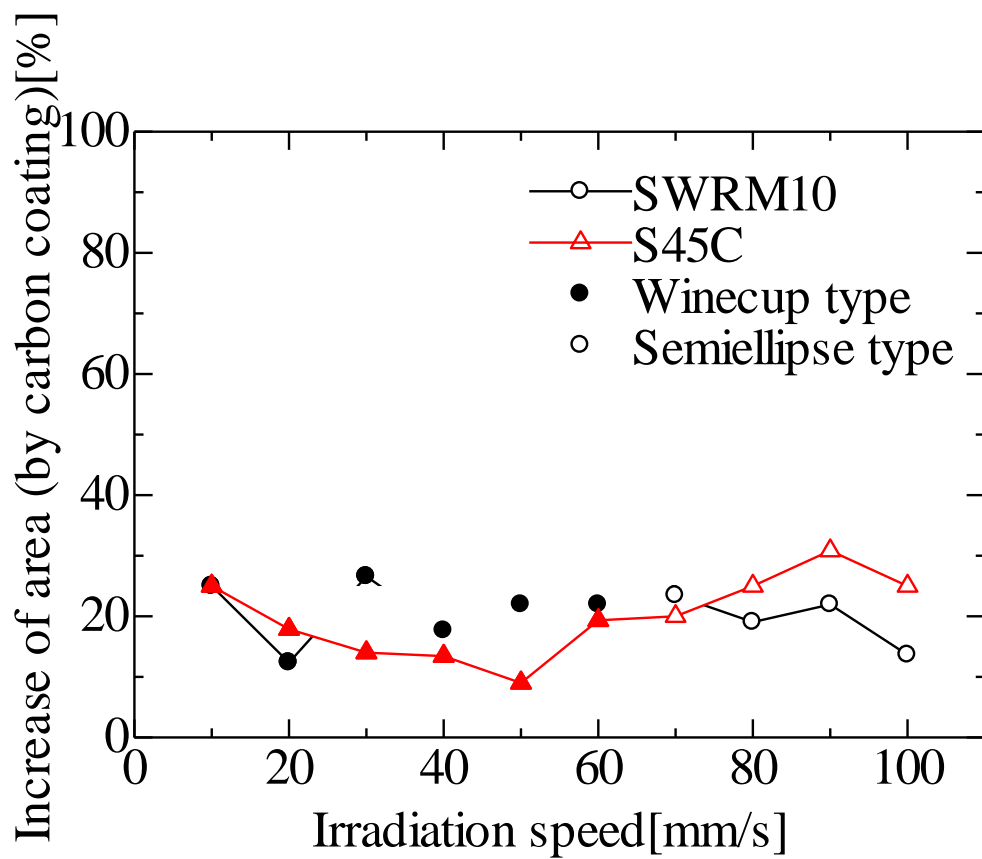


Fig.3-9 Increase of area by carbon coating.

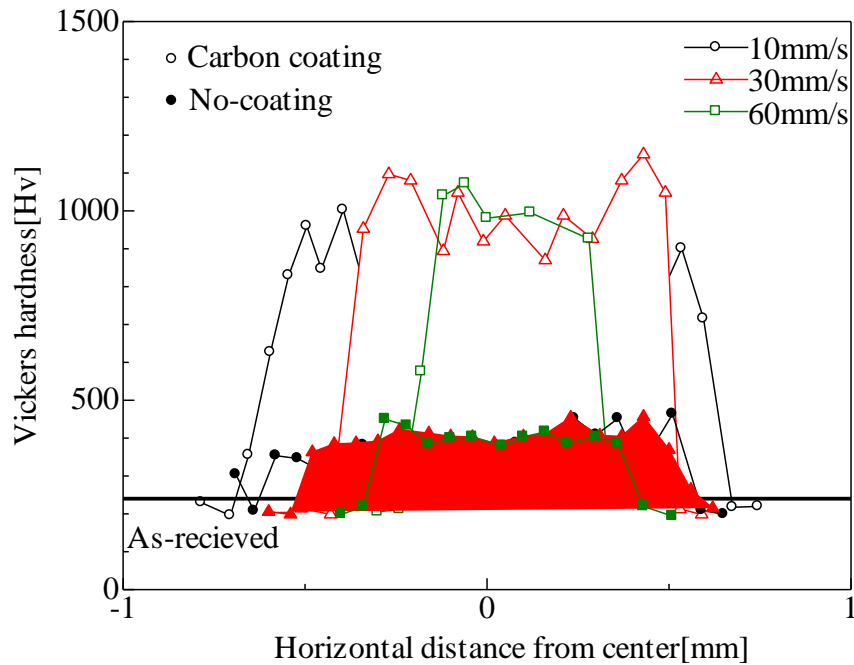


Fig.4-1 Hardness distribution along width direction of Winecup type molten metal of SWRM10.

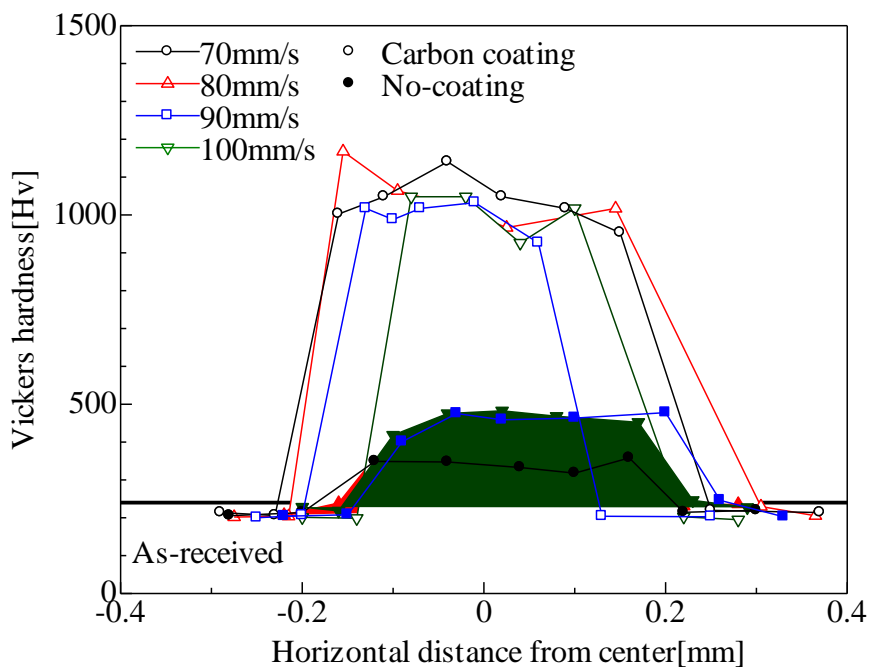


Fig.4-2 Hardness distribution along width direction of Semiellipse type molten metal of SWRM10.

10mm/s

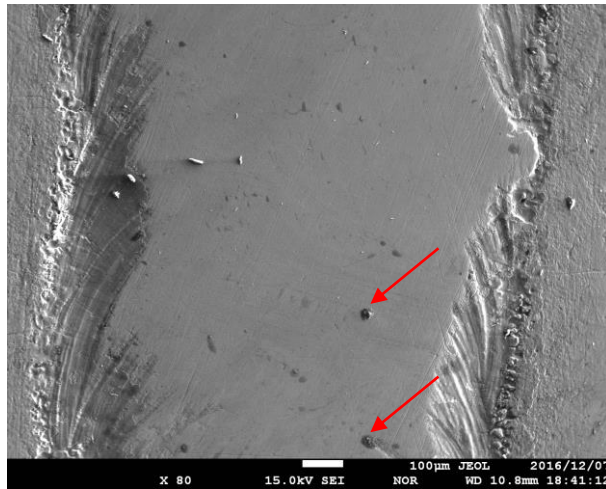


Fig.4-3 Black particles observed on molten surface of SWRM10 by carbon coating.

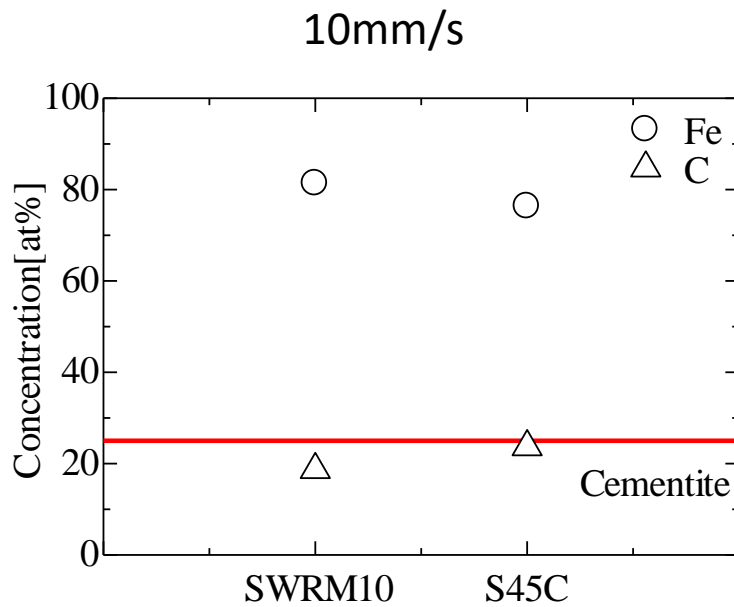


Fig.4-4 EPMA point analysis results of black spots observed on surface of molten metal.

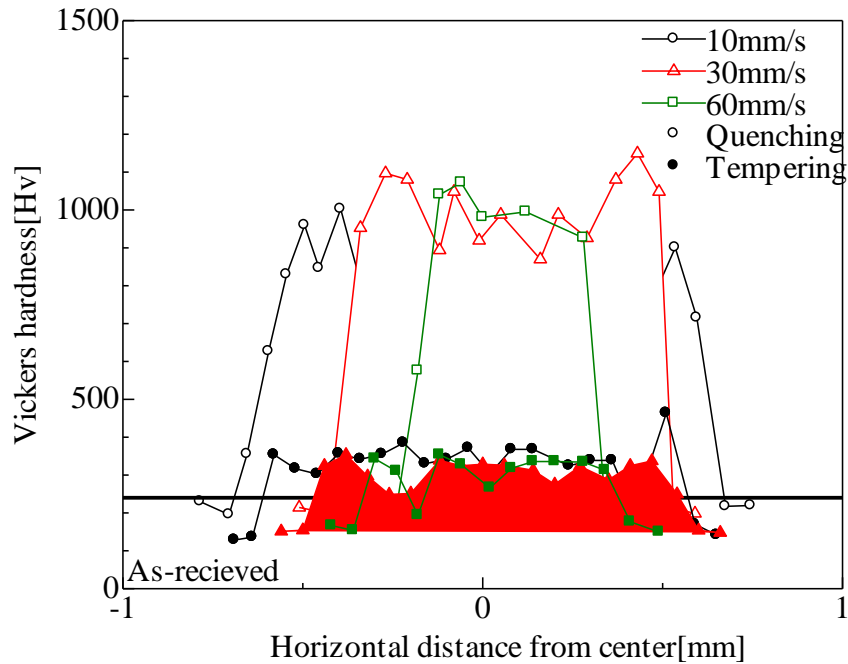


Fig.4-5 Hardness after tempering distribution along width direction of Winecup type molten metal of SWRM10.

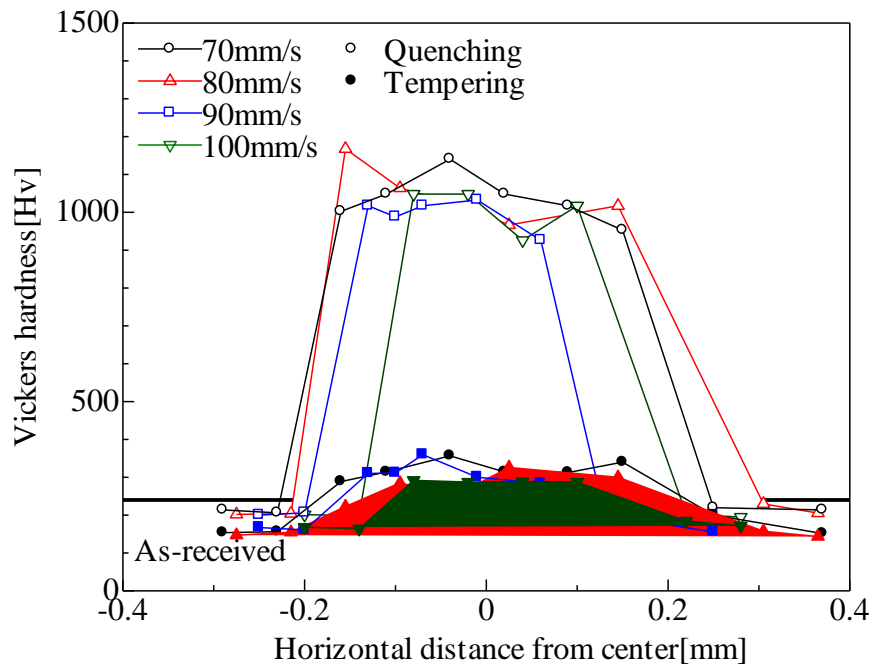


Fig.4-6 Hardness after tempering distribution along width direction of Semiellipse type molten metal of SWRM10.

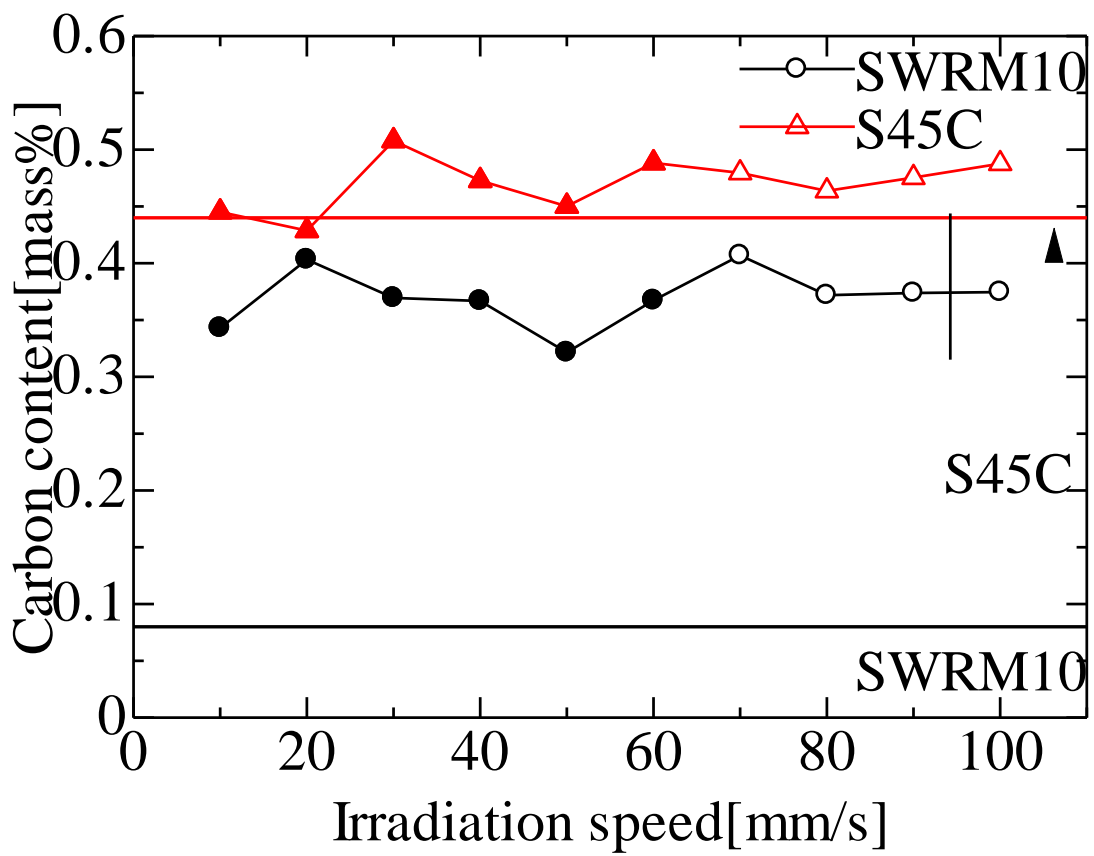


Fig.4-7 Carbon concentration of molten metal with carbon coating.

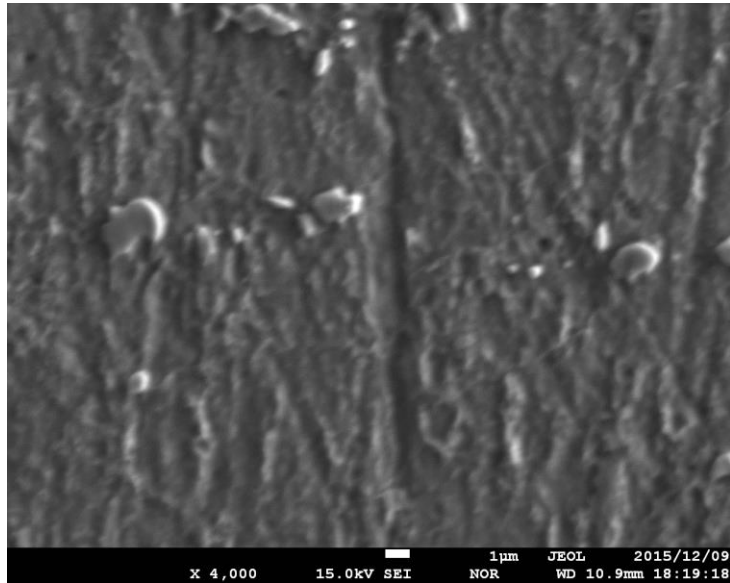


Fig.4-8 SEM image of molten metal surface of SWRM10 of Winecup type.

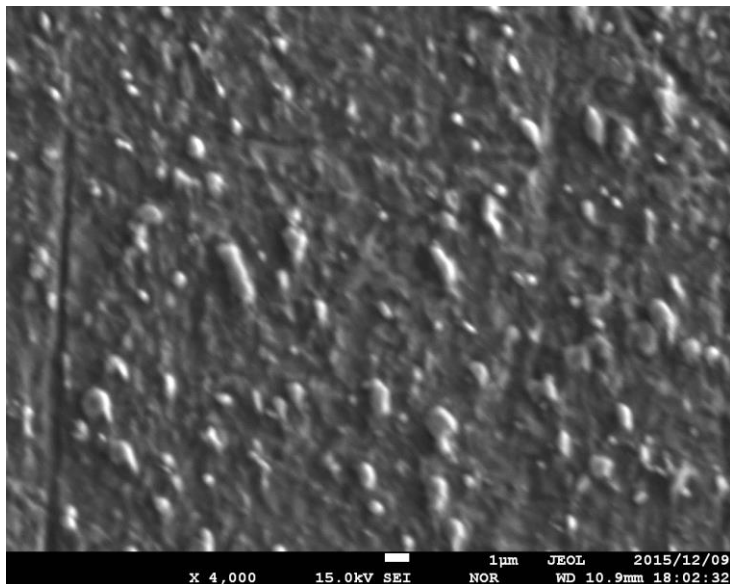


Fig.4-9 SEM image of molten metal surface of SWRM10 of Winecup type with carbon coating.

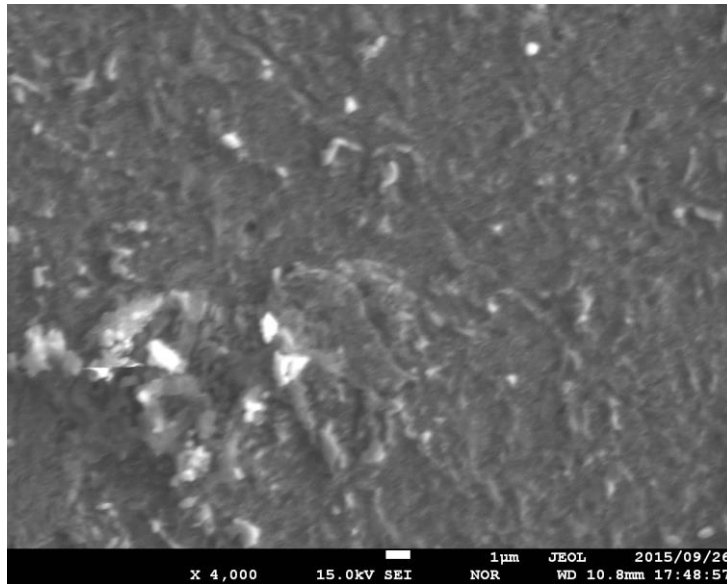


Fig.4-10 SEM image of molten metal surface of SWRM10 of Semiellipse type.

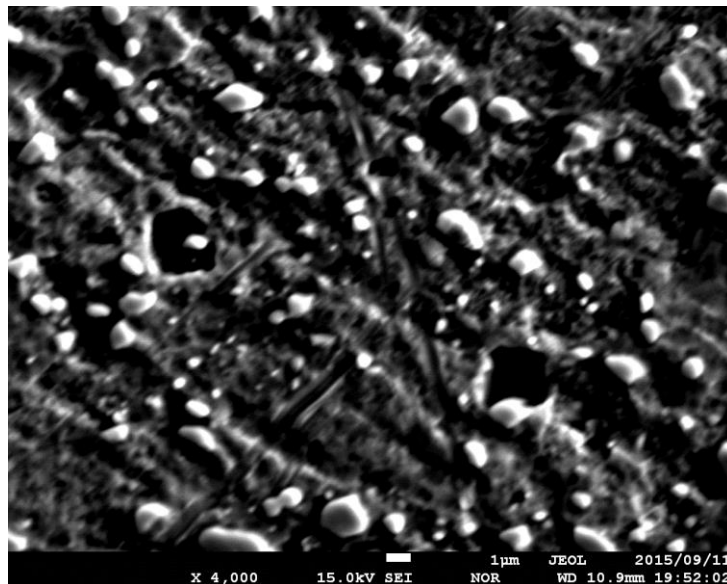


Fig.4-11 SEM image of molten metal surface of SWRM10 of Semiellipse type with carbon coating.

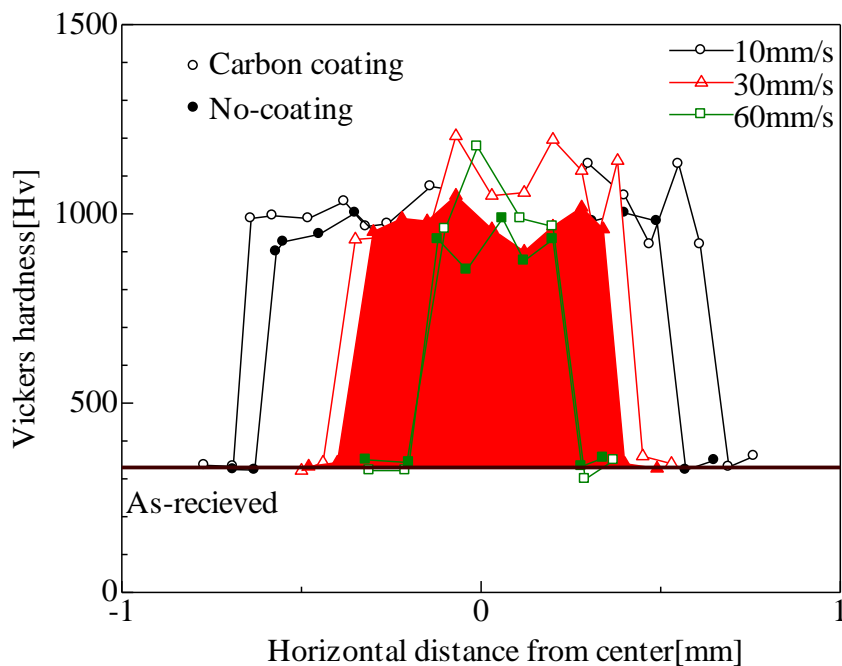


Fig.4-11 S45C's hardness distribution along width direction of Winecup type molten metal.

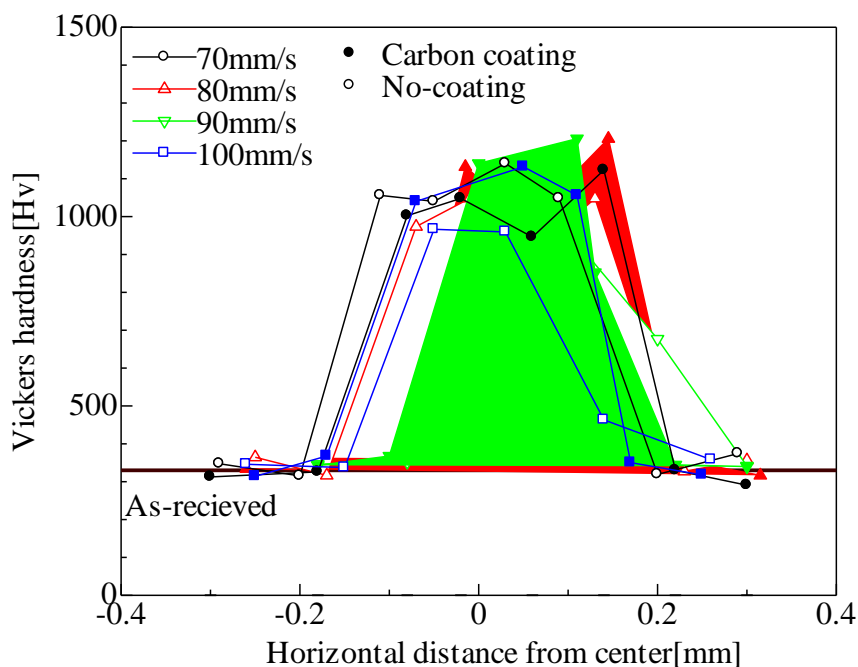


Fig.4-12 S45C's hardness distribution along width direction of Semiellipse type molten metal.

10mm/s

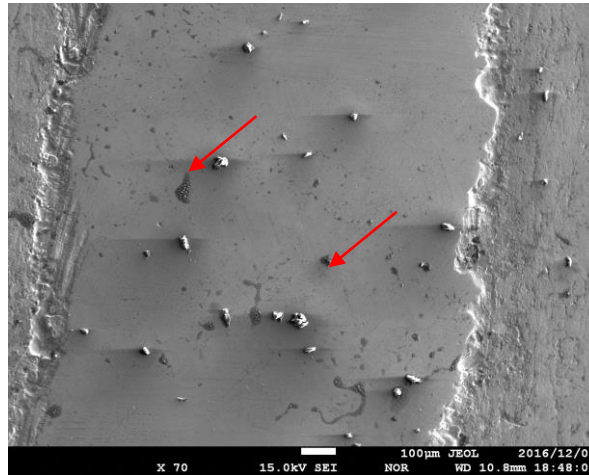


Fig.4-13 Black particles observed on molten surface of S45C by carbon coating.

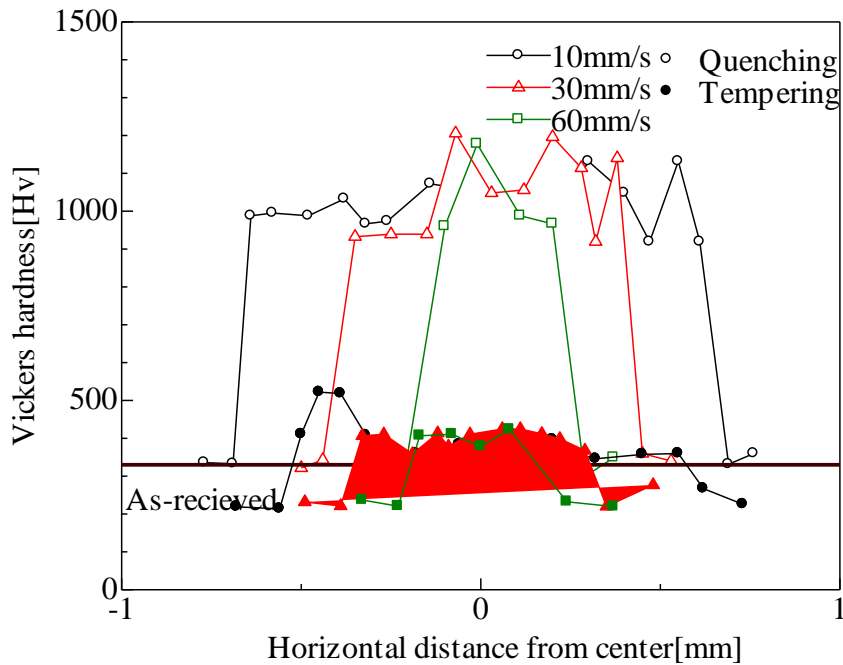


Fig.4-14 Hardness after tempering distribution along width direction of Winecup type molten metal of S45C.

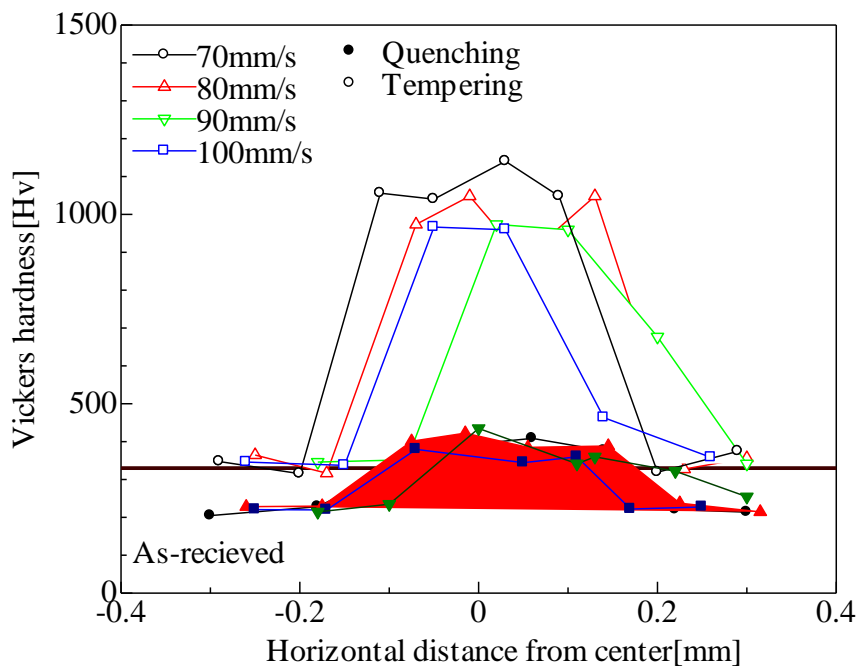


Fig.4-15 Hardness after tempering distribution along width direction of Semiellipse type molten metal of S45C.

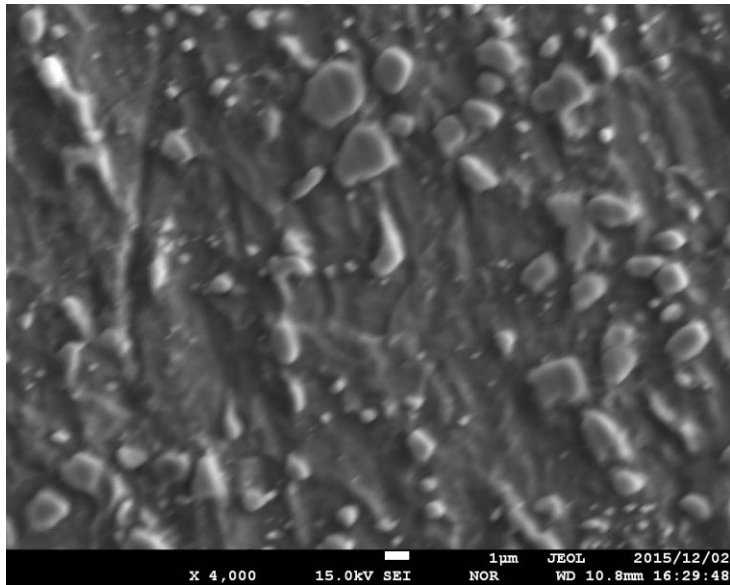


Fig.4-16 SEM image of molten metal surface of S45C of Winecup type.

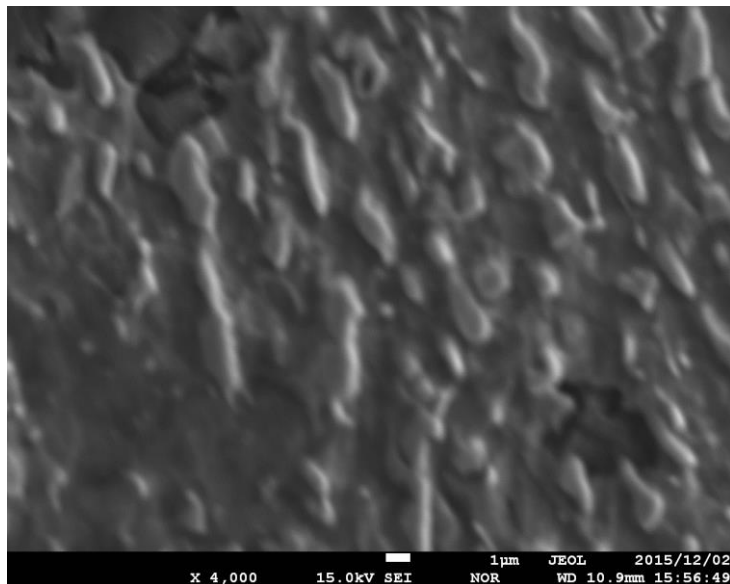


Fig.4-17 SEM image of molten metal surface of S45C of Winecup type with carbon coating.

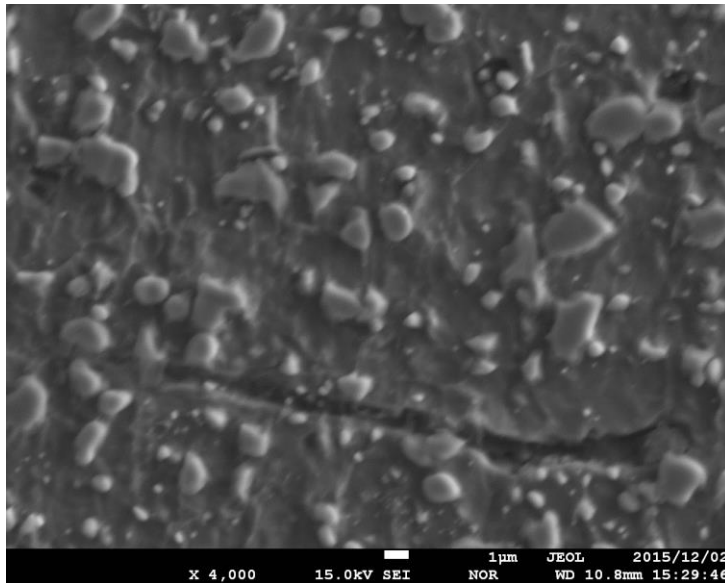


Fig.4-18 SEM image of molten metal surface of S45C of Semiellipse type.

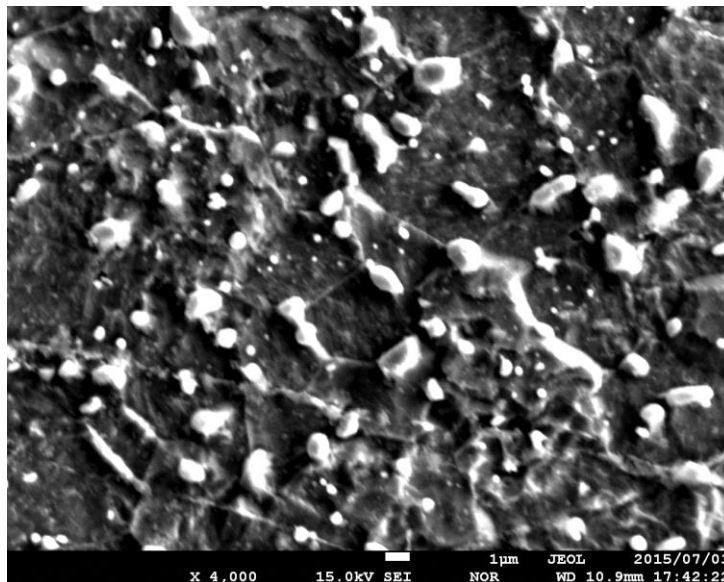


Fig.4-19 SEM image of molten metal surface of S45C of Semiellipse type with carbon coating.

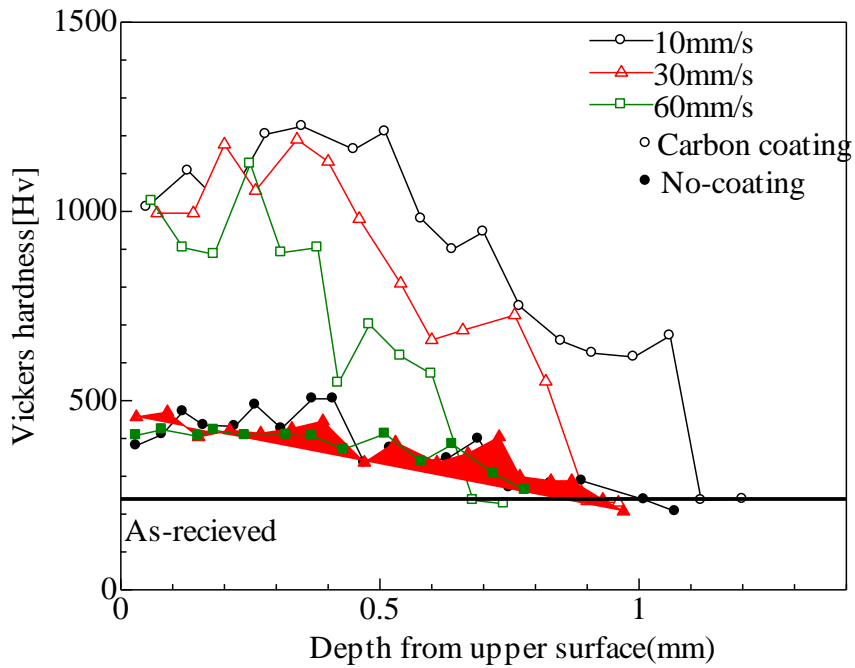


Fig.4-20 Hardness distribution along depth direction of Winecup type molten metal of SWRM10.



Fig.4-21 Black particles inside molten metal of SWRM10.

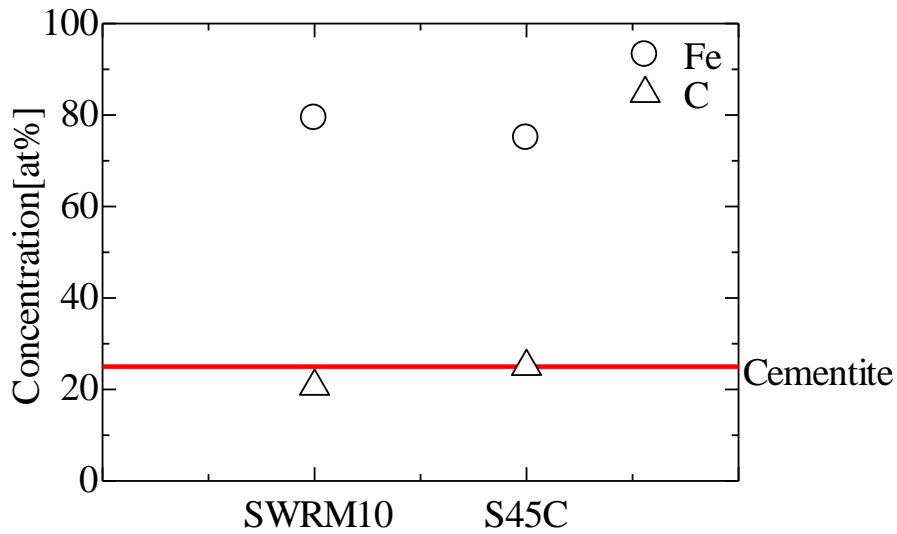


Fig.4-22 EPMA point analysis result of black spots inside molten metal.

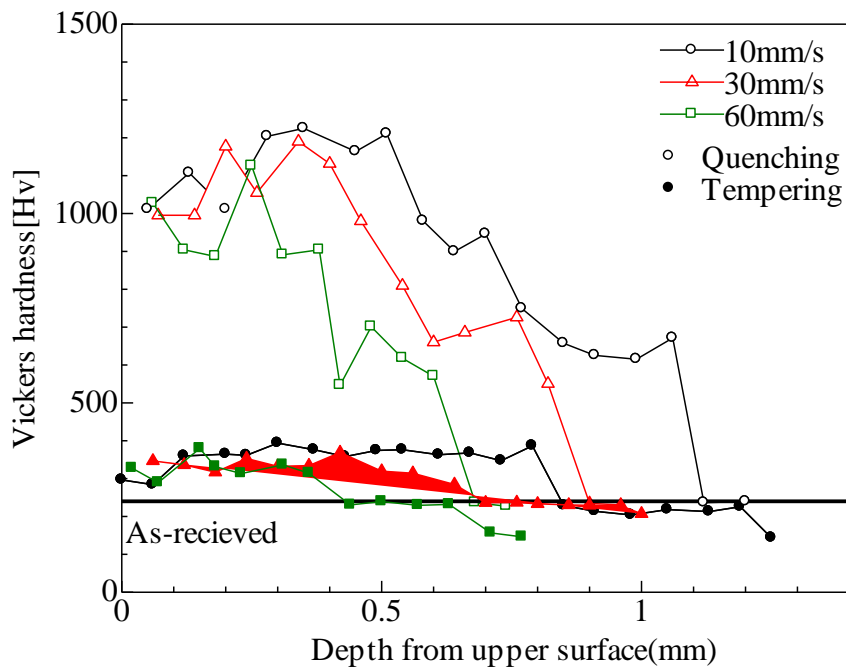


Fig.4-23 Hardness after tempering distribution along depth direction of Winecup type molten metal of SWRM10.

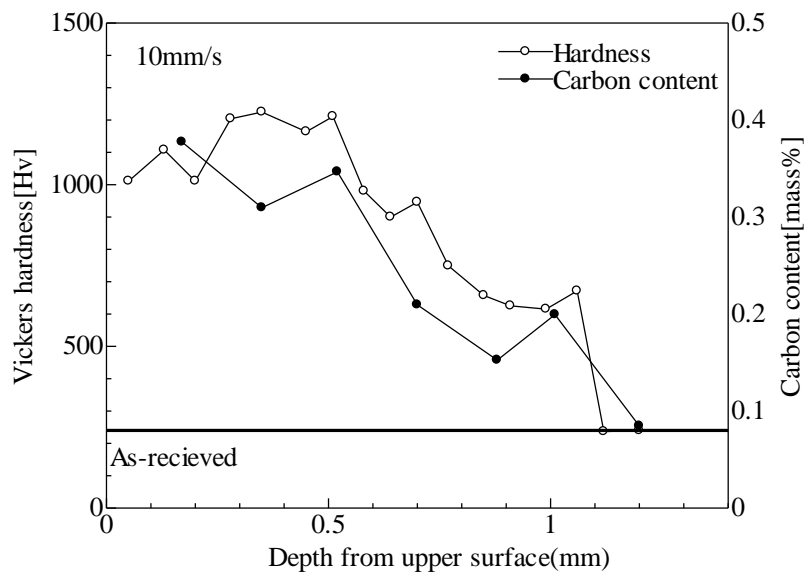


Fig.4-24 Change of carbon concentration along depth direction of molten metal of SWRM10 by carbon coating.

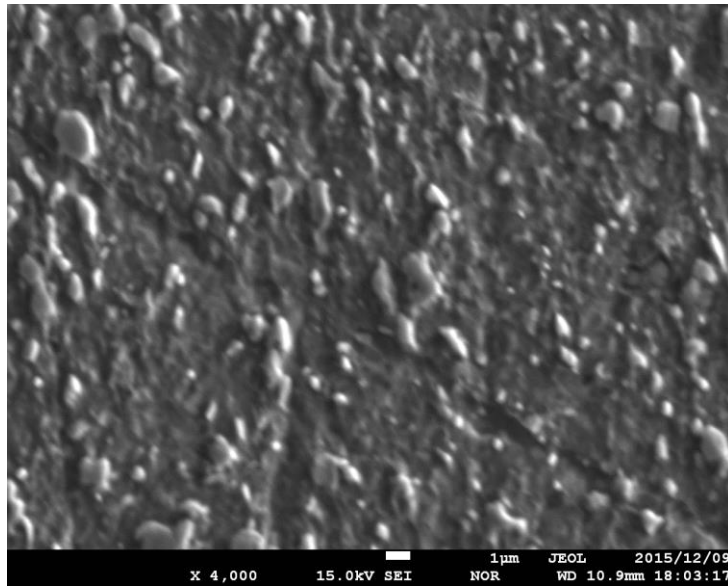


Fig.4-25 SEM image of upper part of molten metal of SWRM10 of Semiellipse type.

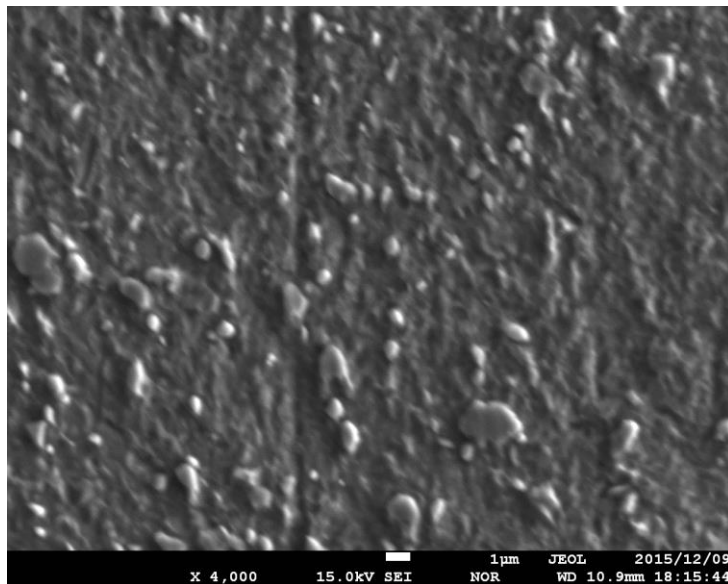


Fig.4-26 SEM image of lower part of molten metal of SWRM10 of Semiellipse type.

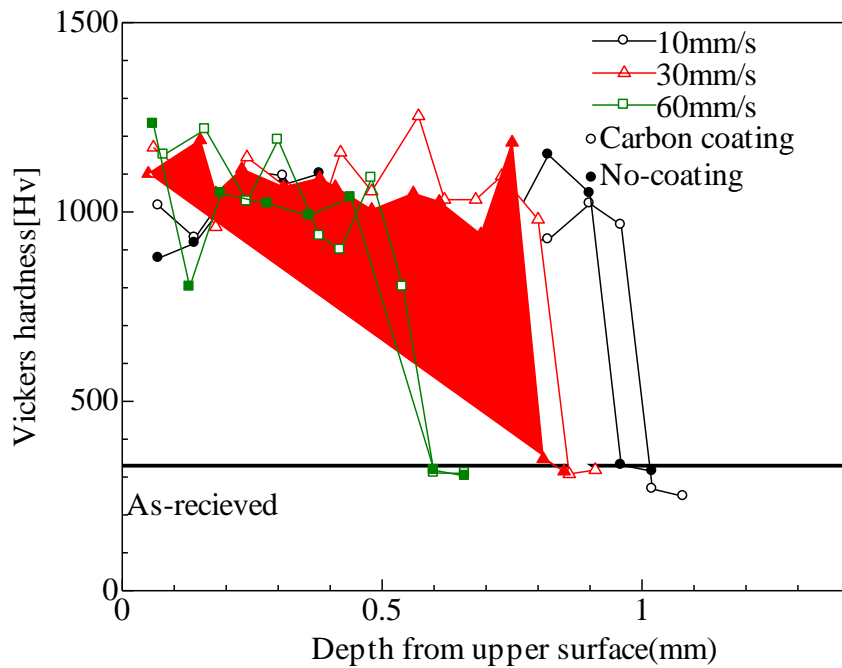


Fig.4-26 Hardness distribution along depth direction of Winecup type molten metal of S45C.

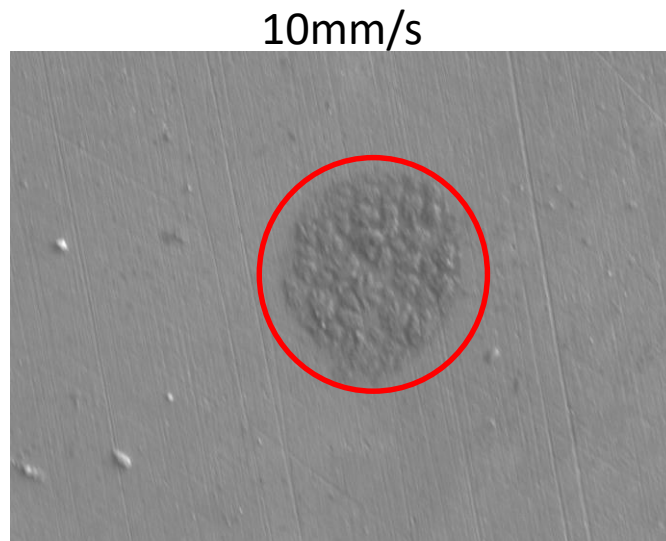


Fig.4-27 Black particles inside molten metal of S45C.

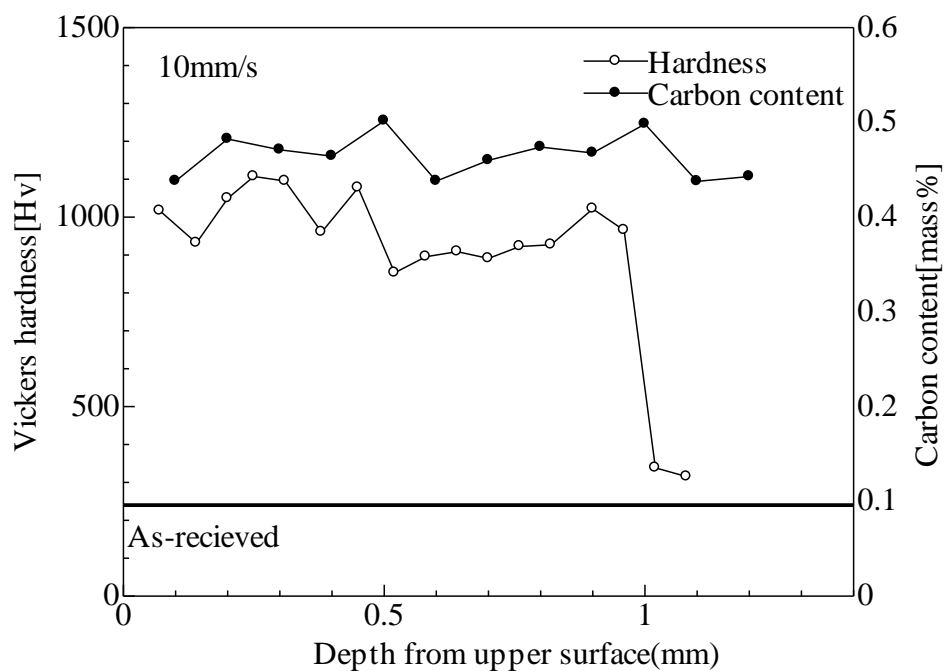


Fig.4-28 Change of carbon concentration along depth direction of molten metal of S45C by carbon coating.

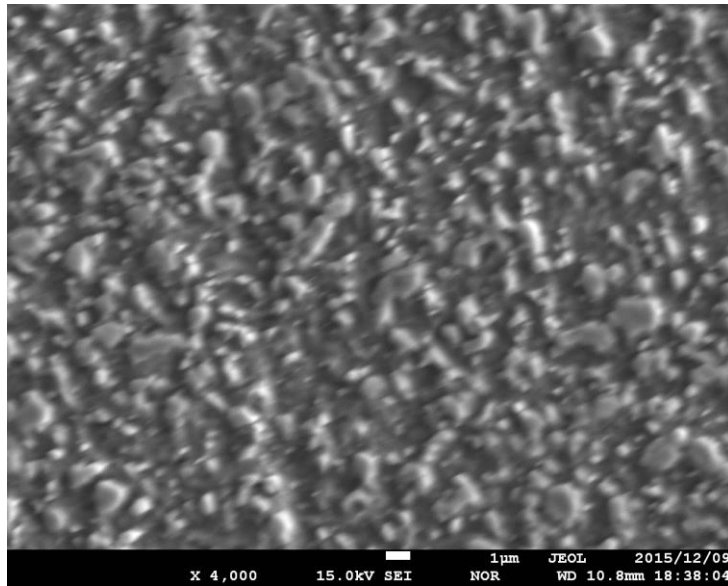


Fig.4-29 SEM image of upper part of molten metal of S45C of Semiellipse type.

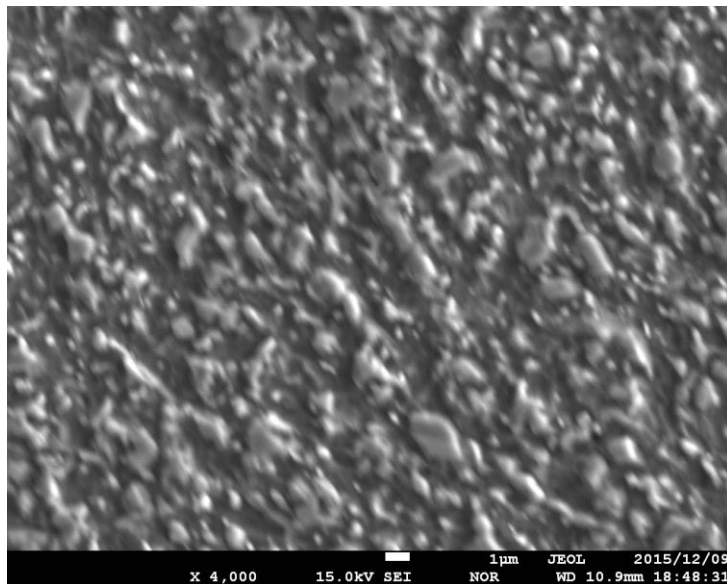


Fig.4-30 SEM image of lower part of molten metal of S45C of Semiellipse type.

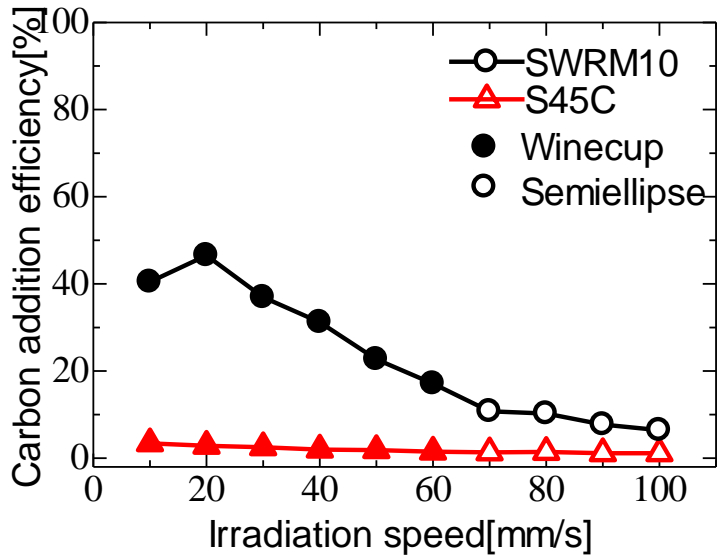


Fig.5-1 Carbon addition efficiencies of SWRM10 molten metals of SWRM10 and S45C by carbon coating.

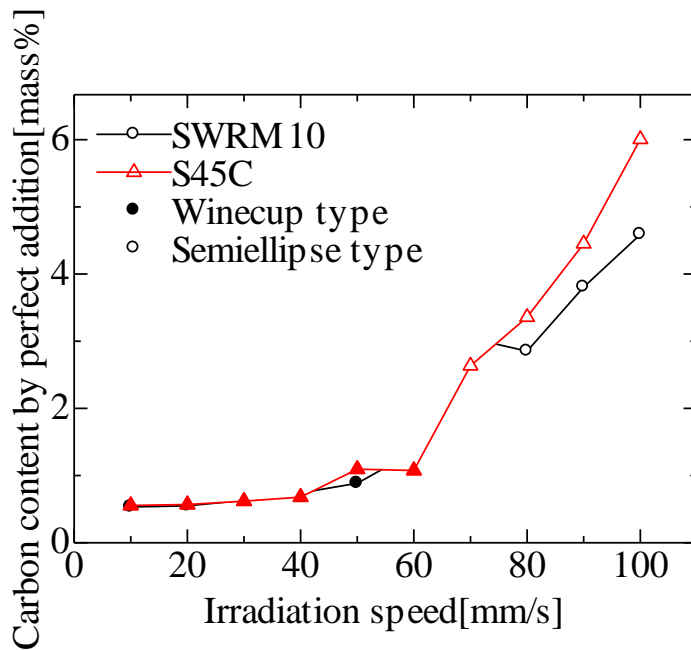


Fig.5-2 Relationship between x_{max} and irradiation rate.

(a) Defocus distance +5mm,
10mm/s



(b) Defocus distance +5mm,
40mm/s



(c) Defocus distance -5mm,
10mm/s



(d) Defocus distance -5mm,
40mm/s



Fig.5-3 Cross section areas of molten metal by defocusing of SWRM10 with carbon coating.

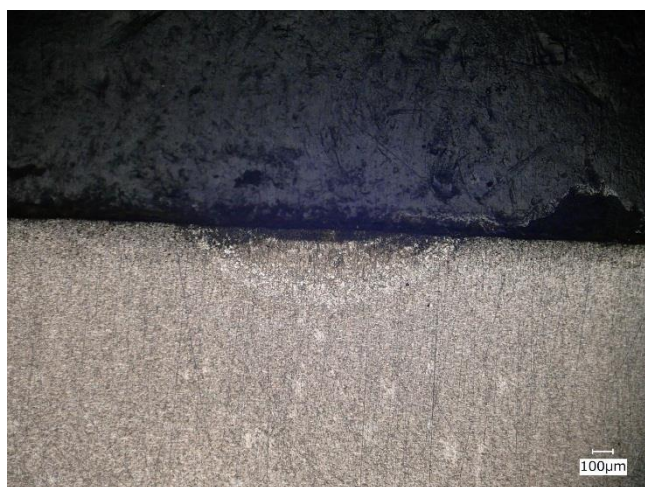
(e) Defocus distance +10mm,
10mm/s



(f) Defocus distance +10mm,
40mm/s



(g) Defocus distance -10mm,
10mm/s



(h) Defocus distance -10mm,
40mm/s



Fig.5-3 Continued.

(a) Defocus distance +5mm,
10mm/s



(b) Defocus distance +5mm,
40mm/s



(c) Defocus distance -5mm,
10mm/s



(d) Defocus distance -5mm,
40mm/s

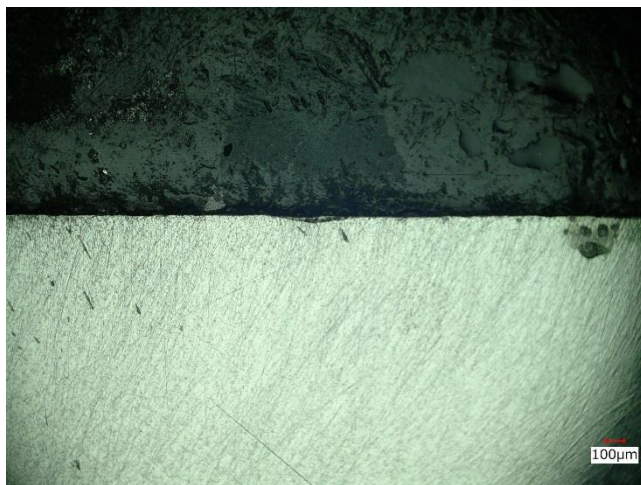


Fig.5-4 Cross section areas of molten metal by defocusing of S45C with carbon coating.

(e) Defocus distance +10mm,
10mm/s



(f) Defocus distance +10mm,
40mm/s



(g) Defocus distance -10mm,
10mm/s



(h) Defocus distance -10mm,
40mm/s



Fig.5-4 Continued.

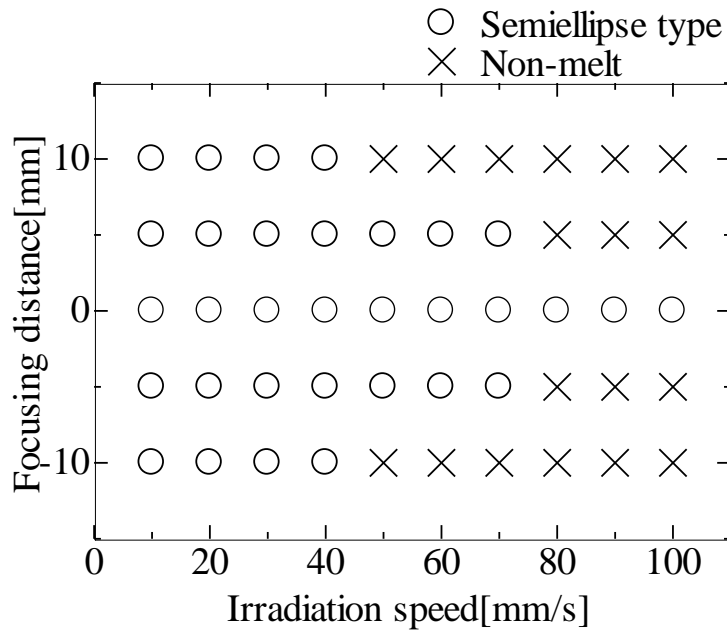


Fig.6-3 Focusing and formation of molten metal of SWRM10 with carbon coating.

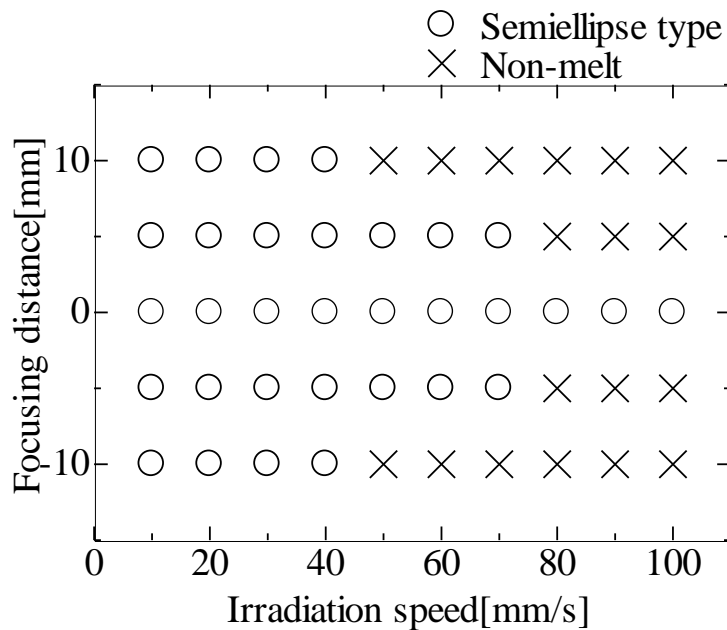


Fig.6-4 Focusing and formation of molten metal of S45C with carbon coating.

(a)SWRM10

(b)S45C

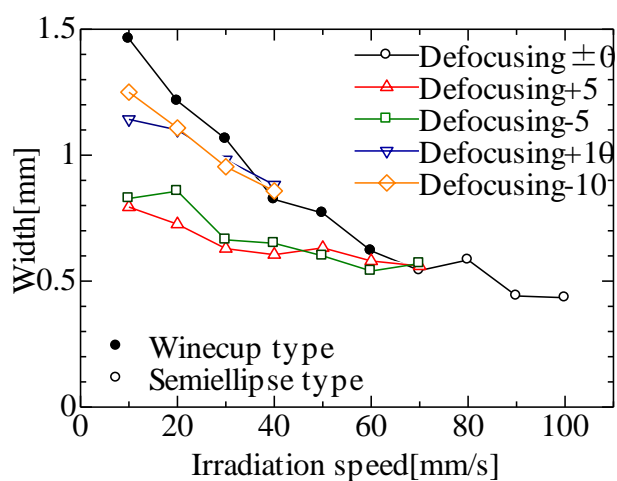
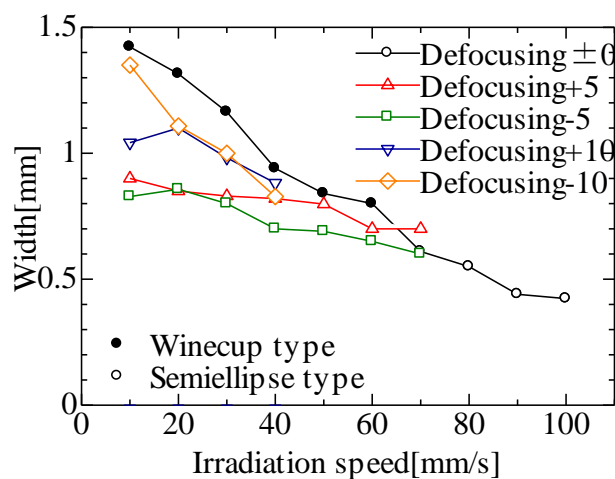
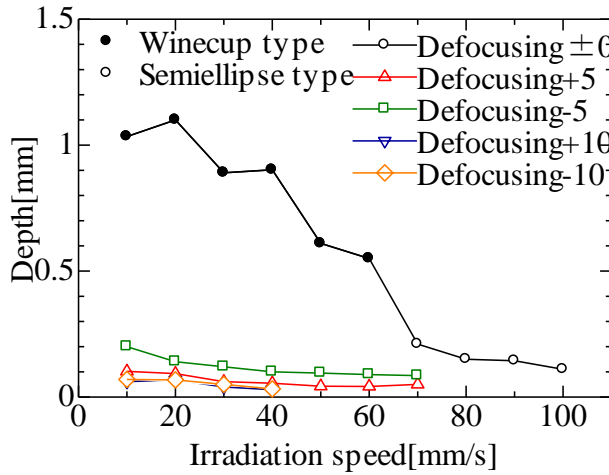


Fig.6-5 Change of width of molten metal by defocusing with carbon coating.

(a)SWRM10



(b)S45C

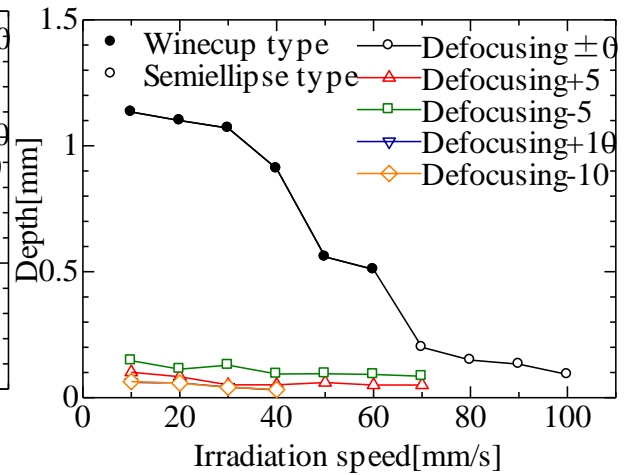
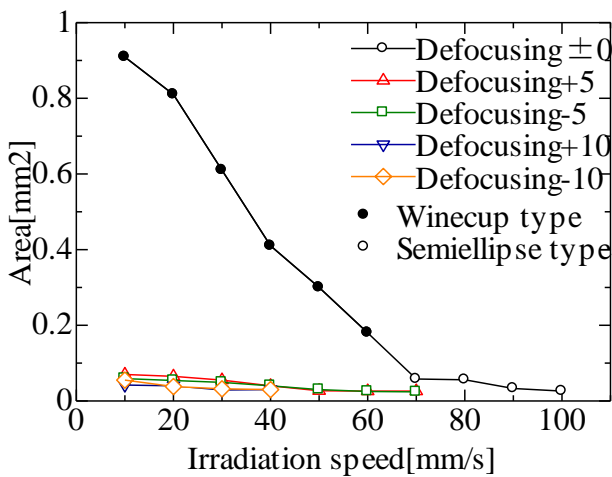


Fig.6-6 Change of depth of molten metal by defocusing with carbon coating.

(a)SWRM10



(b)S45C

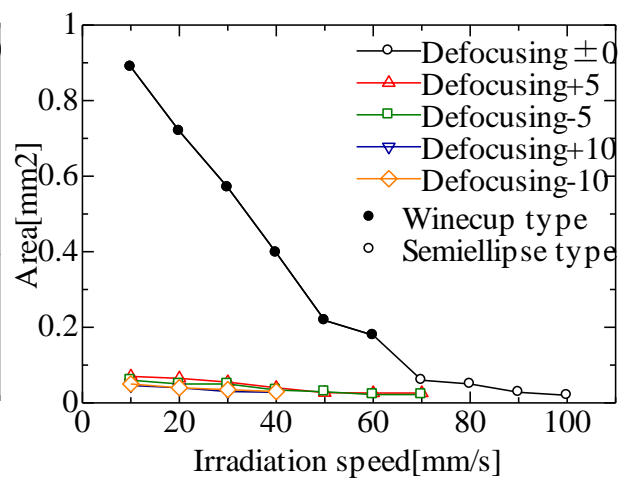


Fig.6-7 Change of area of molten metal by defocusing with carbon coating.

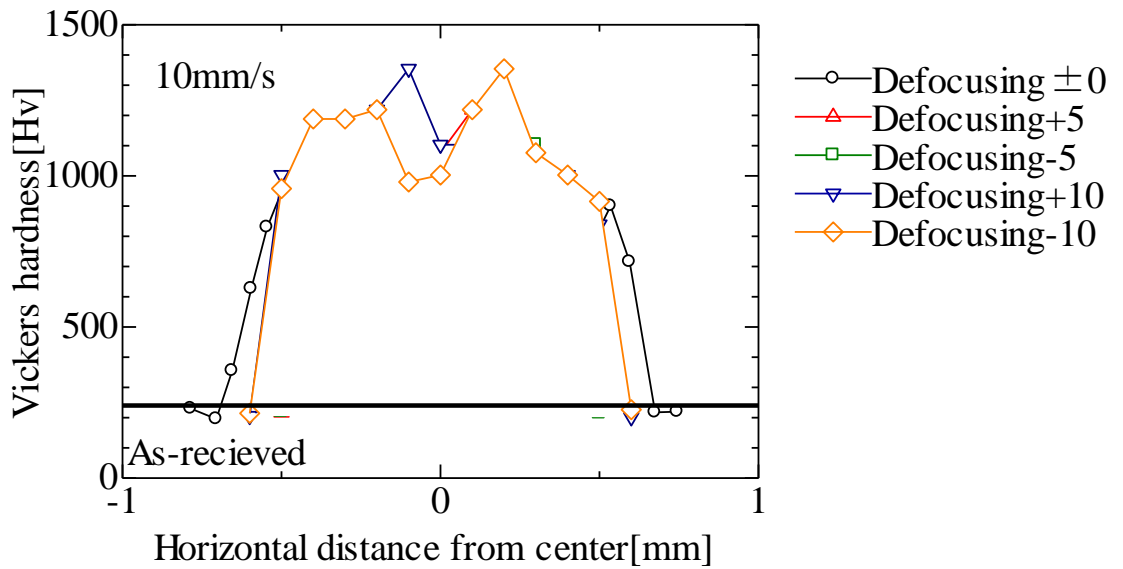


Fig.6-8 Hardness distribution along width direction of focusing of SWRM10.

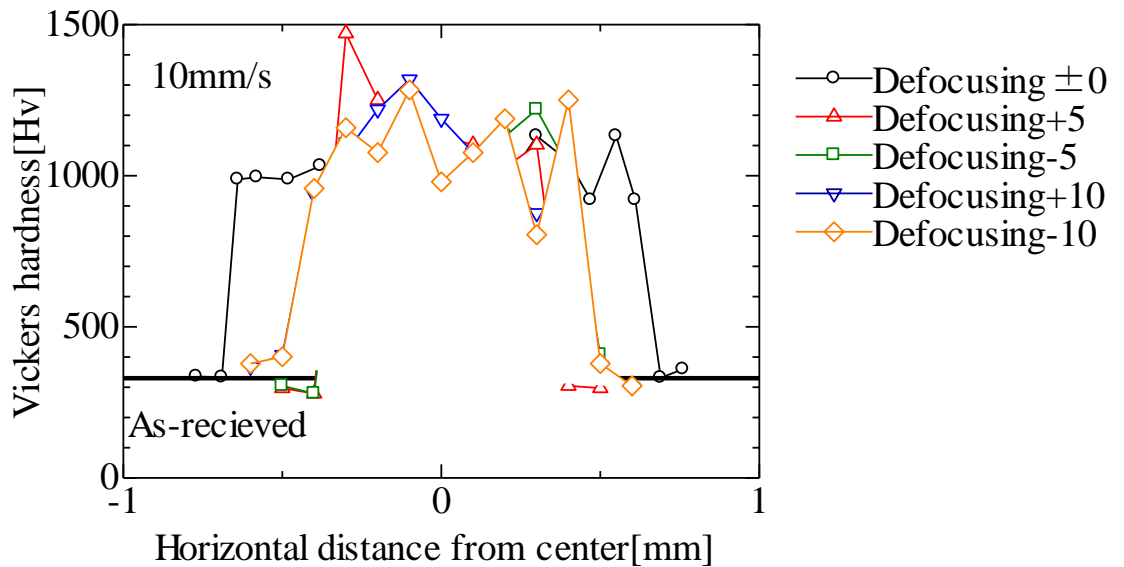


Fig.6-9 Hardness distribution along width direction of focusing of S45C.

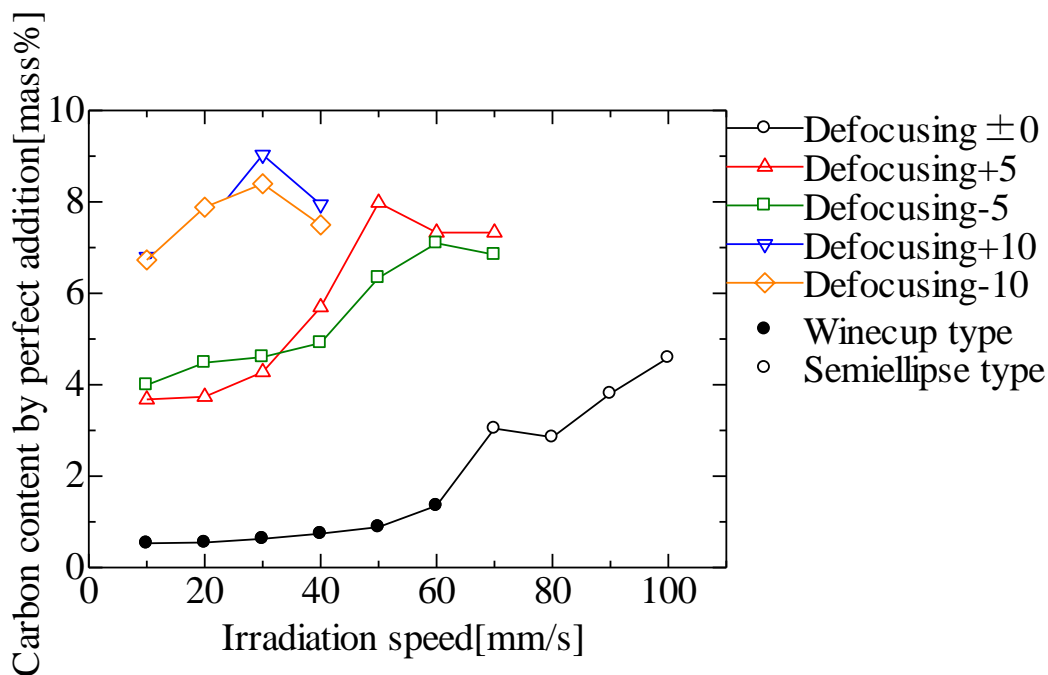


Fig.6-10 Relationship between x_{max} and irradiation rate with defocusing by SWRM10.

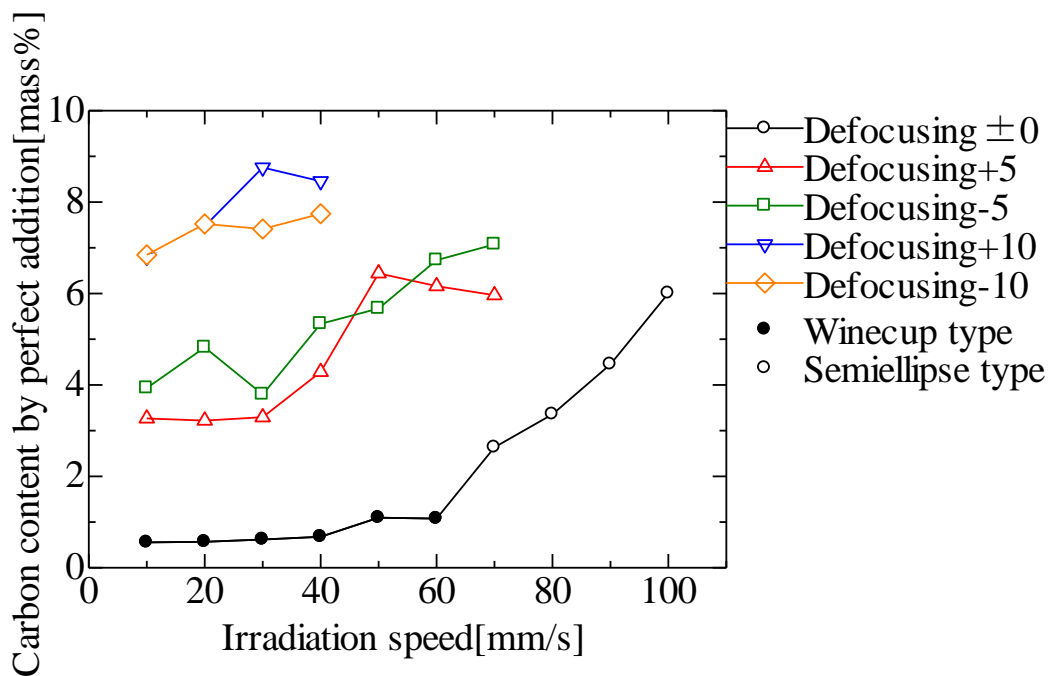


Fig.6-11 Relationship between x_{max} and irradiation rate with defocusing by S45C.

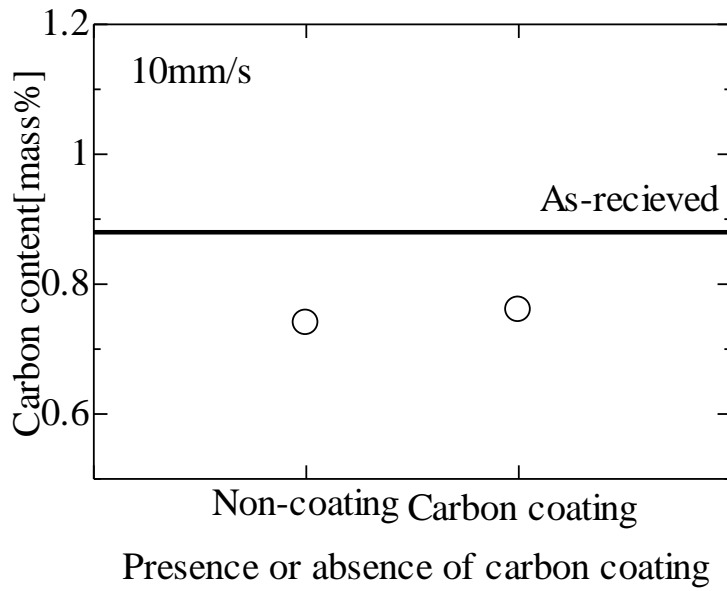


Fig.7-1 Carbon content of molten metal at each condition of SK5.

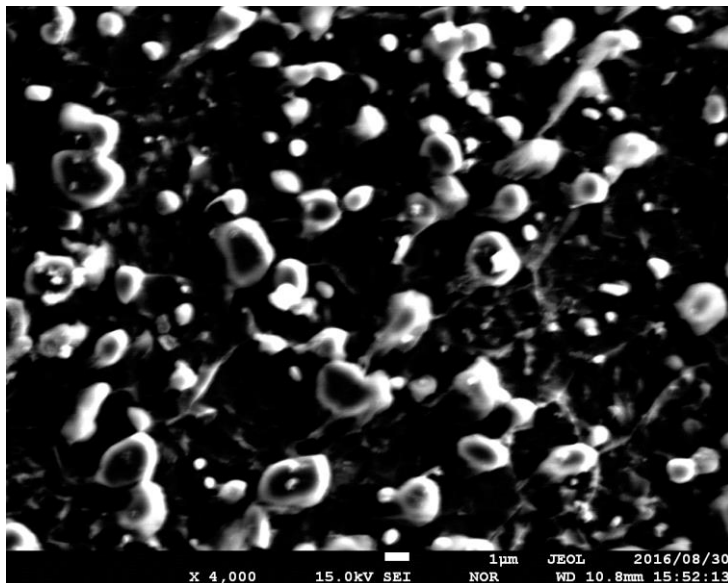


Fig.7-2 SEM image of SK5 base metal.

10mm/s

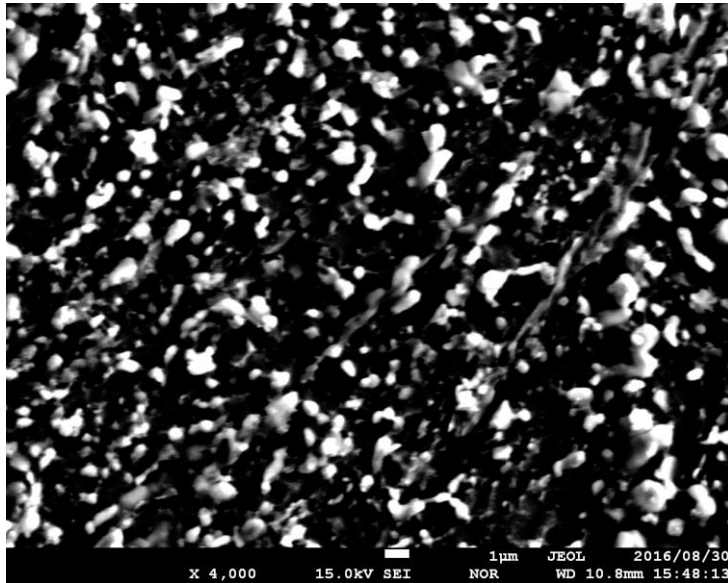


Fig.7-3 SEM image of molten metal of SK5 without carbon coating.

10mm/s

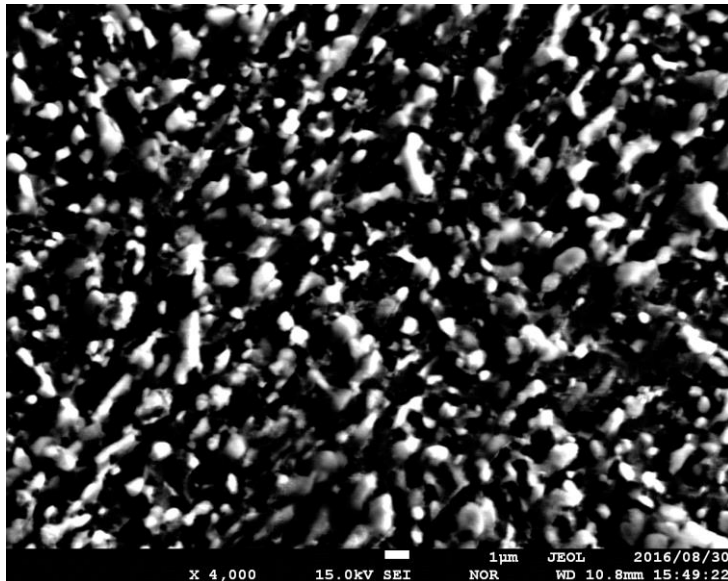


Fig.7-4 SEM image of molten metal of SK5 with carbon coating.

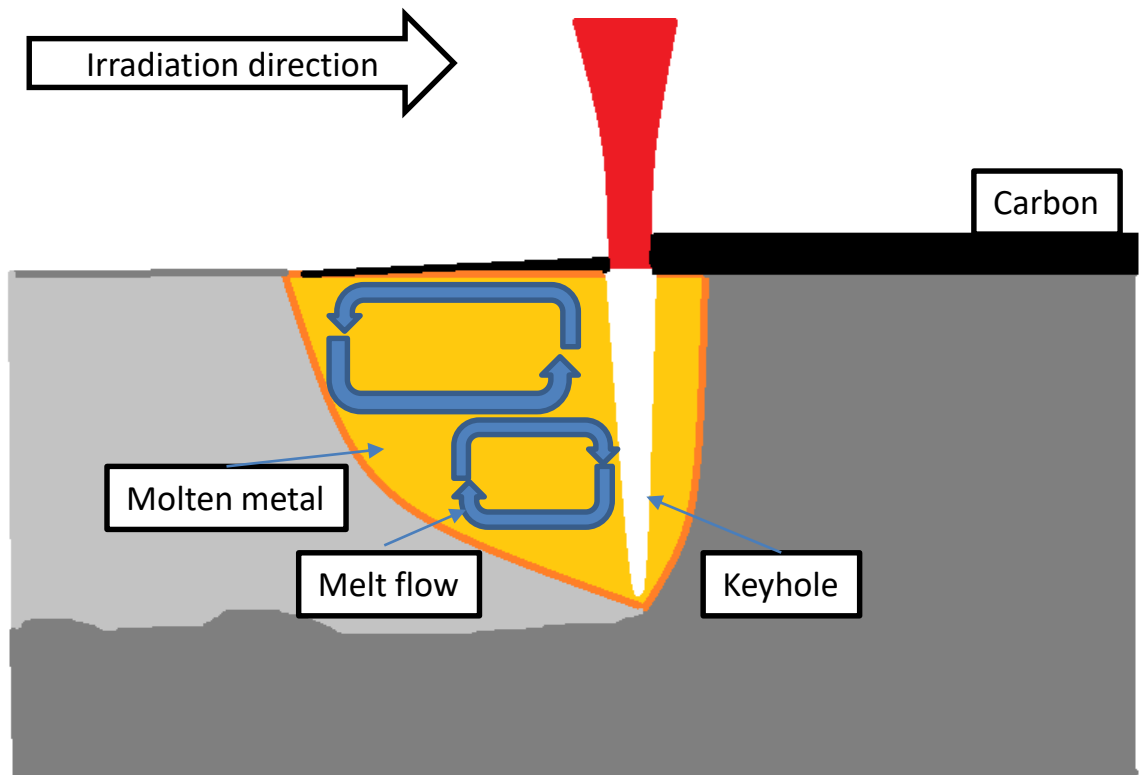


Fig.7-5 Melt flow of Winecup type.

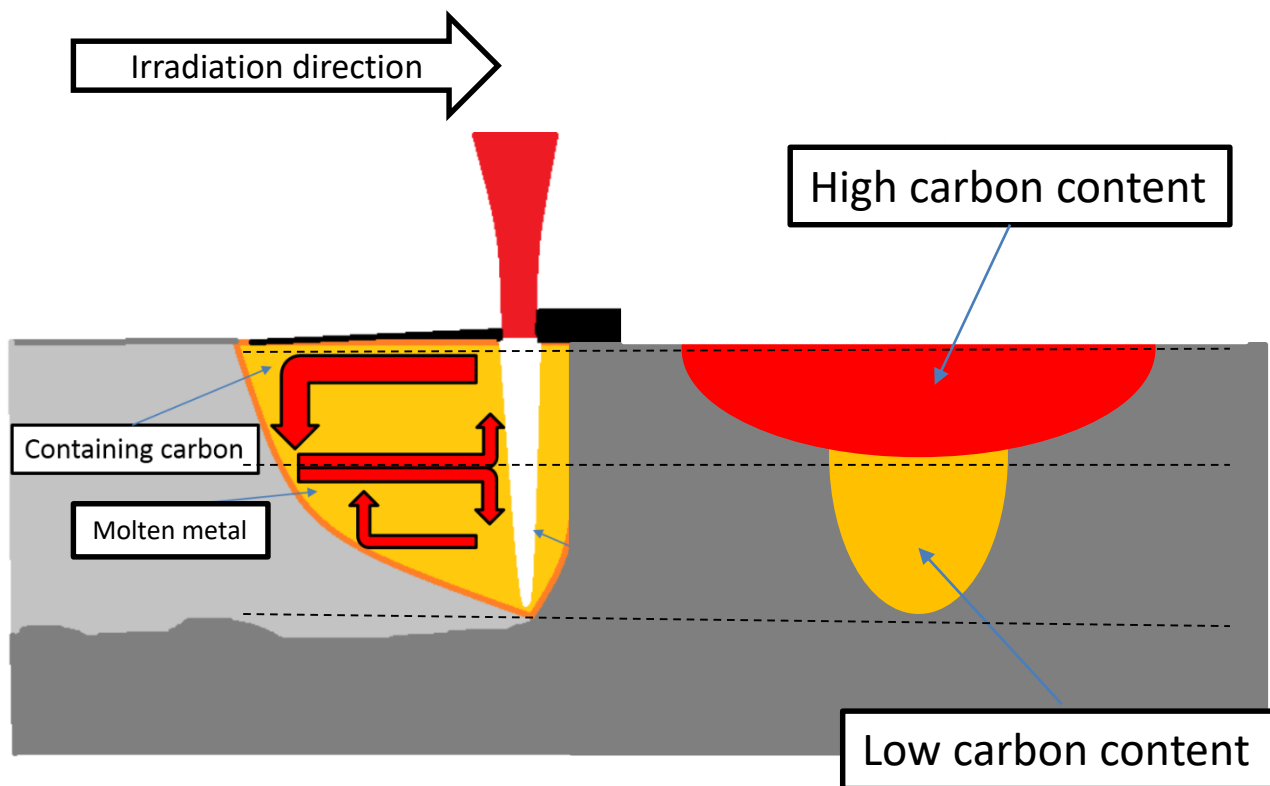


Fig.7-6 Carbon penetration by molten metal flow.