

駆動系浸炭部品のオーステナイト粒径異常成長因子の影響度定量化

伊藤 靖朗* 加藤 豪* 前田 誠**

抄 録

冷間鍛造で成形した浸炭部品は、強度低下を引き起こすオーステナイト粒径の異常成長が発生することがある。影響因子は定性的に知られているが、その影響度合いは明確ではない。そこで、部品製造工程を模擬した試験片を用いて、各影響因子と浸炭後のオーステナイト粒径との関係を実験によって明らかにした。⁽¹⁾

1. 背景

浸炭焼入れ焼き戻し処理（以下、浸炭）は、耐摩耗性と疲労強度を両立させるための重要な熱処理法として自動車駆動系部品で広く採用されている。しかしながら、この処理過程においてオーステナイト結晶粒の異常成長（grain growth以下、G.G.）が発生すると、部品の機械的特性が著しく低下し、製品寿命や信頼性に悪影響を及ぼすことが報告されている⁽²⁾。また、異常成長の発生に関する因子についても先行研究で述べられており、析出物の分布、塑性加工時の歪、および熱処理条件における温度などが主な因子として挙げられている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、G.G.に対するこれらの因子の相互作用や影響度について未だ不明な点が多いのが現状である。

本研究では、冷間成形後の浸炭部品を模擬したテストピース（以下TP）を用いて、G.G.の発生に影響を及ぼす因子の特定とその影響度の定量化を行った。

2. 課題

G.G.の発生に関わる先行研究では、単一の因子を変化させ、G.G.に及ぼすその因子の影響について報告されている⁽⁵⁾。しかし、実際の部品製造においては、G.G.の発生に関わる因子は多数存在する。そのため、G.G.の発生を効果的に防止するためには、それら多数の因子を総合的に考慮し、各因子がG.G.に及ぼす影響度を定量的に評価する必要がある。

また、影響度が定量化された因子であっても、それが部品製造プロセスにおいて制御可能な因子でなければ、製造条件へのフィードバックが困難となる。

したがって、本研究における課題は製造条件に直接フィードバック可能な因子を特定し、それらの影響度を定量的に評価することである。

3. 課題解決方法

G.G.は金属組織の変化に伴い発生する現象である。そのため、発生メカニズムに関わる因子とそれに影響する因子を、金属組織の変化の過程ごとに体系的に設定した。具体的にはFig. 1に示すように、以下の4段階のSTEPに分けて分析を行った。

STEP 1: G.G.と浸炭後の組織の関係

STEP 2: 浸炭後の組織と冷間成形後の組織の関係

STEP 3: 冷間成形後の組織と素材組織および製造条件の関係

STEP 4: 製造でコントロール可能な因子とG.G.の関係

各STEPにおいて、目的変数と説明変数の関係を多変量解析により分析し、相関の高い因子を抽出した。

最終的にSTEP 4では、製造工程で制御可能な因子とG.G.との関係を多変量解析により定量化した。

本手法により、中間工程における組織変化の影響度を段階的に分析することが可能となる。これにより、素材特性や部品製造条件など、実際の製造プロセスで制御可能な因子がG.G.に及ぼす影響度を明確に把握することができる。

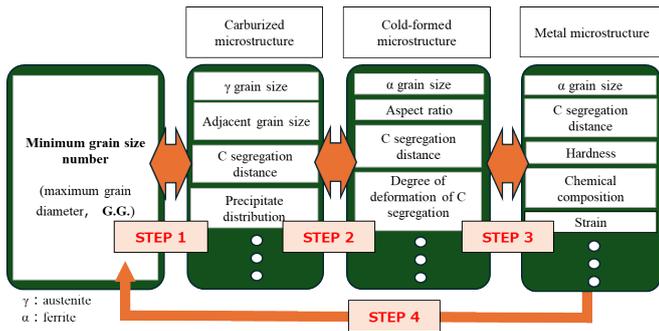


Fig. 1 Extraction and quantification procedure for G.G. influence parameters

4. 因子抽出の考え方

4.1 G.G.発生メカニズム

一般にG.G.は隣接する結晶粒のエネルギー差を低減するために発生する現象であり、この現象におけるエネルギー因子は粒界エネルギーである。

しかしながら、G.G.の発生機構は粒界エネルギーのみに依存するものではなく、歪エネルギー、熱エネルギー、および析出物による粒成長抑制エネルギーなどの複数の外的因子の影響も受ける。このような複合的な影響を考慮するため、本研究では各エネルギー因子に関連する影響因子を体系的に抽出した。

4.2 粒界エネルギーに関わる因子

粒界エネルギーは、粒界自体が持つ固有エネルギーであり、結晶学的因子によって決定される。

浸炭過程で発生するG.G.は、結晶粒界の曲率差により生じるエネルギー勾配を緩和するための現象である。そのため、歪エネルギーおよび熱エネルギーが一定条件下にある場合、G.G.の発生は主に隣接する結晶の粒径差に起因する。この観点から、本研究では金属組織の粒径およびその分布に関わる因子を抽出した。

4.3 歪エネルギーに関わる因子

歪エネルギーは、冷間成形などの塑性変形過程において材料内部に蓄積されるエネルギーである。この歪エネルギーは浸炭昇温時の再結晶温度や相変態温度に直接的な影響を与えると同時に、結晶粒成長の挙動を支配する重要な因子である。このことを考慮し、本研究では冷間成形条件および冷間成形後の組織に関わる因子を抽出した。

4.4 熱エネルギーに関わる因子

熱エネルギーは、浸炭などの熱処理過程で材料に付与されるエネルギーである。このエネルギーの大きさは、再結晶および相変態後の結晶粒の成長挙動に顕著な影響を与える。この影響を定量的に評価するため、本研究では浸炭工程における温度条件を重要な因子として抽出した。

4.5 炭素濃度分布

素材中の炭素濃度が変化すると、金属組織の変態温度や材料の成形性が変化する。特に冷間成形過程において、炭素偏析部位（以下、C偏析部位）周辺のフェライト粒（以下、 α 粒）は、偏析が存在しない部位と比較して大きく変形し、より多くの歪エネルギーが蓄積する傾向がある。この現象に着目し、本研究ではC偏析部位付近の組織特性に関わる因子を詳細に抽出した。

4.6 粒成長抑制エネルギーに関わる因子

析出物を粒界に微細分散させることで、結晶の粒成長を効果的に抑制することが可能である。先行研究によれば、直径20nm以下の析出物が粒成長の抑制に有効であることが報告されている⁽⁶⁾。この知見に基づき、本研究では析出物のサイズ分布に関わる因子を抽出した。

以上の原理に基づき、G.G.の発生機構に関わる各種エネルギー因子を体系的に分類し、それぞれに影響を及ぼす因子を包括的に抽出した (Table 1)。

Table 1 Extracted parameters

Material and forming parameters	Hardness	
	α particle size No. ave.	
	α particle size No. σ	
	C segregation width ave.	
	C segregation width σ	
	C segregation width ave.- σ	
	C segregation interval ave.	
	C segregation interval σ	
	C segregation interval ave.- σ	
	Chemical composition	
	Shear strain	
	Equivalent strain	
	Post-cold forming and carburization parameters	α particle size No. ave. in C segregation
		α particle size No. σ in C segregation
α particle size No. ave.		
α particle size No. σ		
Aspect ratio of α particles		
P-F angle		
L \times Φ		
T \times Movement distance		
Hardness \times C segregation movement distance		
C segregation interval ave.		
C segregation interval σ		
C segregation interval ave.- σ		
C segregation width ave.		
C segregation width σ		
C segregation width ave.- σ		
Post-carburization parameters		Carburizing temperature
	γ particle size No. ave.	
	γ particle size No. σ	
	γ particle size area ratio (No. \leq 5)	
	γ particle size area ratio (No. \geq 10)	
	Area ratio of particle size No. \leq 5 near C segregation	
	Area ratio of particle size No. \geq 10 near C segregation	
	γ particle size No. ave around maximum γ particle	
	γ particle size No. σ around maximum γ particle	
	Distance from maximum γ particle to C segregation	
	C segregation interval	
	C segregation width	
Quantity of fine precipitates		
Precipitate size ave.		

5. 実験方法

本研究では、実際の部品製造工程を模擬したTPを用いて実験を実施し、製造過程における金属組織の変化を詳細に調査した。

5.1 供試材

供試材にはJIS G 4053に規定されているSCr420を使用した。析出物の析出状態を変化させるため、3つの異なる製造ロットの材料を実験に供した (Table 2)。

Table 2 Chemical composition (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	N
A	0.21	0.31	0.89	0.017	0.015	0.044	0.021
B	0.22	0.33	0.86	0.017	0.015	0.038	0.018
C	0.22	0.33	0.86	0.019	0.015	0.043	0.018

5.2 素材組織

冷間成形時に α 粒へ付与される歪は、4.5で記載したように素材組織の影響を受ける。そこで、供試材を $\phi 8 \times 12\text{mm}$ の円筒状のTPに機械加工後、 γ 単相域まで加熱し、その後冷却速度を変化させ (Fig. 2)、異なる金属組織を有するTPを作製した (Fig. 3)。

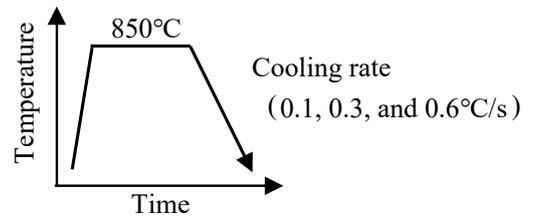


Fig. 2 Conditions for controlled microstructures

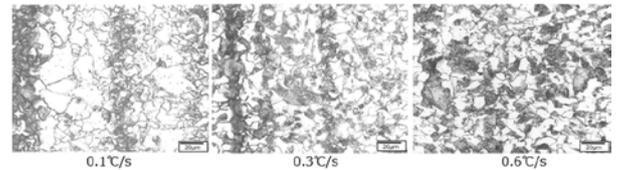


Fig. 3 Examples of controlled microstructures

5.3 冷間成形による歪エネルギーの付加

$\phi 8 \times 12\text{mm}$ の円筒状TPを単純圧縮する冷間成形を実施した。付与した相当歪およびせん断歪は有限要素法解析により求めた。また、TP内の歪分布が異なる部位の金属組織の変化を調査した (Fig. 4)。

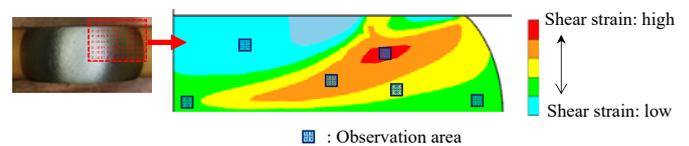


Fig. 4 Finite element analysis of strain distribution during compression testing

5.4 浸炭による熱エネルギーの付加

浸炭温度を950℃, 970℃, 1,000℃の3水準に設定し, 各温度で所定時間保持後, 油焼入れを実施した (Fig. 5).

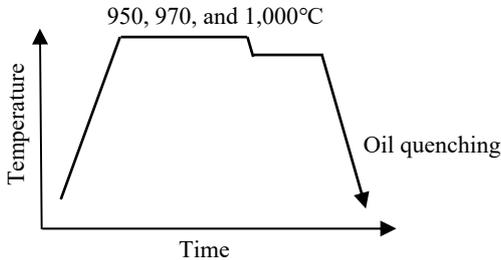


Fig. 5 Carburization Conditions employed in the study

5.5 G.G.の発生と各因子との関係

各工程における金属組織を観察し, Table 1に示す因子の定量化を行った. 本研究では, 金属組織の粒径をJIS G 0551に準拠し, 結晶粒度番号 (以下, 粒度No.) を測定した. この規格では, 粒度No.の数値が大きくなるほど結晶粒径 (以下, 粒径) が微細になることを示している.

金属組織を調査し, 金属組織に関わる因子を数値化した. これを用い, Fig. 1に示した各STEPにおける目的変数と説明変数の関係を多変量解析により分析した.

6. 解析結果

6.1. 中間工程でのG.G.影響因子

6.1.1. G.G.と浸炭後の組織との関係 (STEP 1)

先行研究の報告の通り, G.G.は浸炭後の金属組織と高い相関を示した (Table 3, Fig. 6). G.G.はγ粒径のばらつきが大きいC偏析の周辺部付近で顕著に発生し (Fig. 7), それに関わる因子の影響を強く受けていることが明らかとなった.

Table 3 G.G. parameters of carburized microstructure

Objective variable name	R ²
Maximum γ grain size number	0.78
Explanatory variable name	Standardized regression coefficient
Distance to C segregation in maximum γ grain	0.50
Area ratio of γ grains with size number < 5 near the C segregation	-0.31
Average size number of the grains surrounding the maximum γ grain	-0.24
Amount of AlN fine precipitates	-0.04
Average diameter of AlN precipitates	0.00

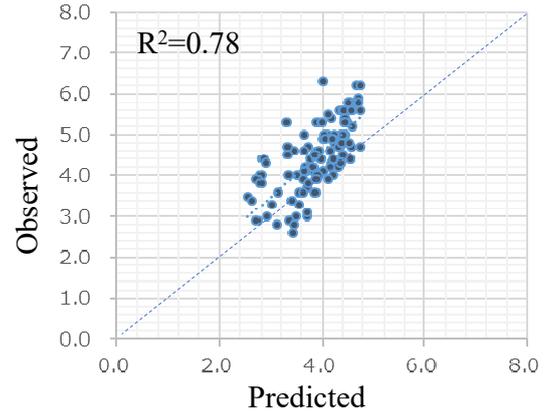


Fig. 6 Multivariate analysis results using carburized metal microstructure parameters (STEP 1)

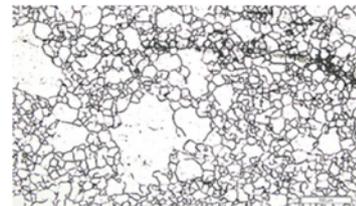


Fig. 7 An example of post-carburizing microstructure where G.G. occurs

6.1.2. 浸炭後の組織と冷間成形後の因子との関係 (STEP 2)

6.1.1.で抽出した浸炭後の組織との相関が高かった因子は, 冷間成形後のα粒度No.のばらつきとその平均粒度No., C偏析の間隔, および結晶の変形度を表すC偏析付近の変形角度が支配的因子であることが判明した (Table 4).

この結果から, G.G.に影響する浸炭後の組織は, 冷間成形後の粒界エネルギーおよび冷間成形時の歪エネルギーと関係があることがわかった.

Table 4 Relationship between post-carburizing microstructure and parameters after cold forming

G.G. correlated to the post-carburization microstructural parameters	Highly correlated post-cold-forming parameters	Standardized regression coefficient	R ²
Average grain size number of the surrounding γ coarse grains (No. 4 and below)	Variation in the α grain size	-1.09	0.70
	Average α grain size number	-0.43	
Area ratio of crystals with an γ grain size number ≥ 10 near the C Segregation	Carburization temperature	-0.60	0.55
	Average α grain size number	-0.49	
	Variation of α grain size	-0.35	
Distance to C segregation in the maximum γ grain	C segregation deformation angle	1.69	0.34
	C segregation interval	-0.47	
Area ratio of crystals with an γ grain size number < 5 near the C segregation	C segregation deformation angle	0.70	0.30
	Carburization temperature	0.54	
	C Segregation interval	-0.36	

6.1.3. 冷間成形後の因子と素材組織，製造条件の因子との関係 (STEP 3)

6.1.2.で抽出した冷間成形後の因子と相関が高かった因子は，素材の α 粒度No.とそのばらつき，C偏析の幅と間隔，およびせん断歪であることが判明した (Table 5)。

STEP 3においてもSTEP 2と同様に，粒界エネルギーと歪エネルギーに関わる因子が，G.G.に影響する冷間成形後の因子と関係があることがわかった。

Table 5 Relationship between parameters after cold forming and material microstructure and manufacturing condition parameters

Parameters after cold forming	Highly correlated material factors	Standardized regression coefficient	R ²
α grain size after cold forming	α grain size of the material	0.82	0.67
C Segregation interval after cold forming	C segregation interval in the material	0.30	0.30
Variation in the α grain size after cold forming	Variation in the α grain size of material	0.52	0.29
	C segregation width of material	-0.55	
Deformation angle of C segregation after cold forming	Shear strain	0.55	0.31
	C segregation width of material	0.18	
Shear energy	Shear strain	0.61	0.39
	C segregation width of material	0.33	
Carburization temperature	Carburization temperature	-	-

6.2. G.G.と製造でコントロール可能な因子との関係 (STEP 4)

6.1.で実施した組織分析により，6.1.3.で抽出した因子に浸炭温度を加え，G.G.との関係を解析した。その結果，素材の α 粒度No.がG.G.への影響度が最も高く，次いで素材の α 粒度No.のばらつき，素材C偏析幅，そして浸炭温度とせん断歪の順となった (Table 6)。

この結果から，G.G.の発生は粒界エネルギー (素材組織)，歪エネルギー (冷間成形条件)，熱エネルギー (浸炭温度) の影響を受けることが確認できた。

Table 6 Relationship between G.G., material structure and manufacturing parameters

Objective variable name	R ²
Maximum γ grain size number	0.21
Variable name	Standardized regression coefficient
Material α grain size number	-0.72
Variation σ in the α grain size	-0.53
Width of C segregation in the material	0.43
Carburization temperature	-0.35
Shear strain	-0.34

7. 考察

製造でコントロール可能な因子のうち，素材の α 粒度No. (α 粒径)は，下記現象が生じるためG.G.と高い相関があったと考える。

- ① α 粒度No.が大きい (α 粒径微細)と，変態後の γ 粒径も微細になる。そのため，わずかな粒径差であっても粒界エネルギーが高いため，粒成長が促進される。
- ② 一般に結晶粒が微細であると，材料強度が増加し，成形加工時の変形性能が低下する。そのため，変形しにくい微細粒が混在する材料を成形すると，微細粒の組織とそれ以外の組織との間で歪に差異が生じる。これは，4.5と同様の現象になるので粒成長が促進される。

一方，析出物に関わる因子は，Fig. 1に示すSTEP 1において，G.G.への影響を示す有意な因子として抽出されなかった (Table 3)。これは，大きな塑性変形を伴う冷間成形部品では，析出物による粒成長抑制エネルギーよりも，粒成長を促進するエネルギーの方が支配的であるためと考えられる。

本研究ではFig. 8に示すように段階的に中間因子との因果関係を考慮することによりG.G.への影響度が高い制御可能な因子を特定した。しかし，この特定した因子をFig. 9に示すように直接G.G.との関係を確認したが相関性は低かった (6.2の結果，Fig. 10参照)。

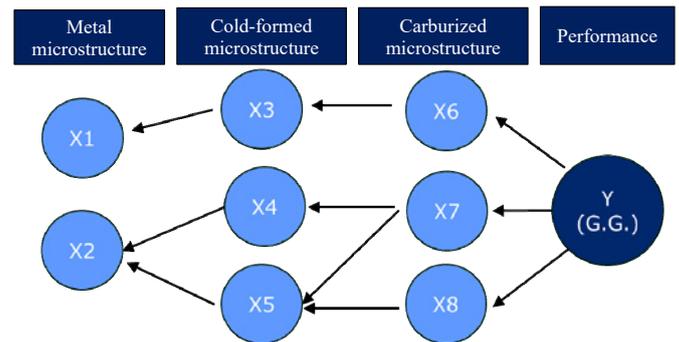


Fig. 8 Method for identifying the influencing factors

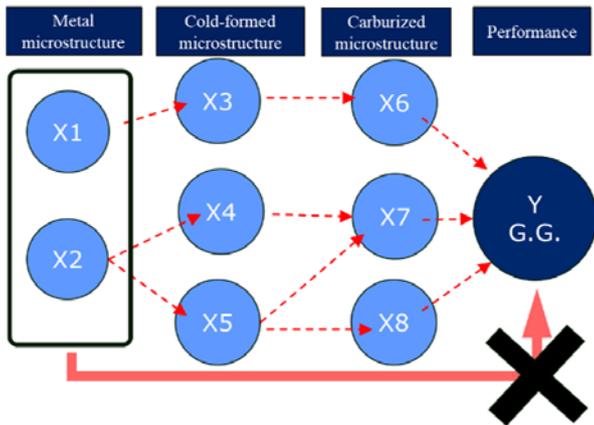


Fig. 9 Method for predicting the G.G.

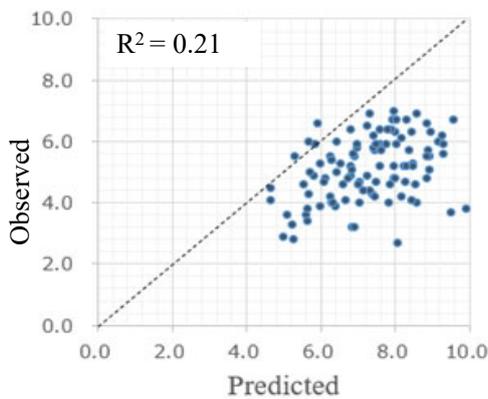


Fig. 10 Multivariate analysis results using material microstructure and manufacturing condition parameters (STEP 4)

これはFig. 8のような中間因子との因果関係を考慮せず、予測したためであると考えられる。したがって、本事例のように複数回組織変化が生じる現象では、その変化の過程ごとに因子間の関係を考慮し、変化後の組織を予測する必要がある。

またFig. 11に示すように、素材および浸炭温度が同一であるにもかかわらず、G.G.の発生が冷間歪みの高い仕様ではなく、歪みの低い仕様において生じた事例も確認された。本研究では、因子間の関係をすべて線形関係として捉えたため、Fig. 12の破線で示すような非線形関係にある因子を重要度の高い因子として抽出しなかった。そのため、今回特定した因子だけでは説明できない現象が発生したと考える。

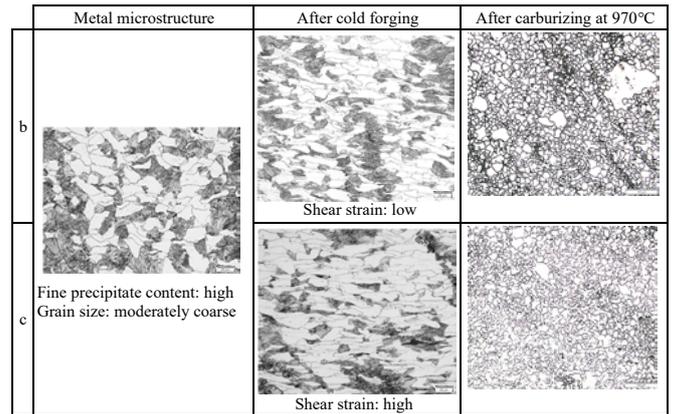


Fig. 11 Comparison of the pre- and post-carburization microstructures

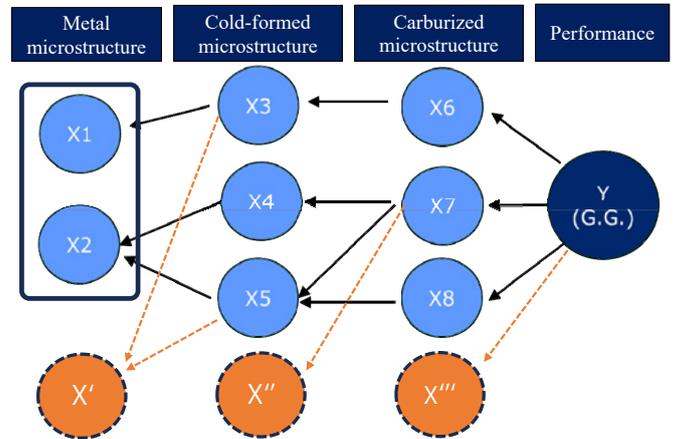


Fig. 12 Issues in the current influencing factor identification approach

8. 結言

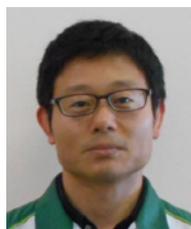
本研究により以下の知見が得られた。

- ① 部品製造時に制御可能なG.G.に影響する因子を抽出し、その影響度が明らかとなった。
- ② 影響度が高い制御可能な因子のうち、G.G.に最も影響した因子は素材の α 粒度No.であった。次いで、 α 粒度No.のばらつき、素材C偏析幅、浸炭温度、せん断歪の順で影響度が高いことが明らかとなった。
- ③ 直接的に制御可能な因子とG.G.との関係を検討すると、その相関関係は低くなる。これは、G.G.が組織変化を繰り返す現象であるため、変化に影響する中間因子やその組み合わせを考慮することで、相関が高まると考えられる。

9. 参考文献

- (1) 伊藤 靖朗, 加藤 豪, 前田 誠: 駆動系浸炭部品のオーステナイト粒径異常成長因子の影響度定量化, 2025年 春季大会 学術講演会予稿集(春), (公社)自動車技術会, 2025年, pp. 1-5, 許諾を得て転載
- (2) 瓜田 龍実, 並木 邦夫, 飯久保 知人: 電気製鋼, 59, 1, 33
- (3) 藤松 威史, 中崎 盛彦, 福本 信次, 山本 厚之: 鉄と鋼, Vol. 95 (2009), No. 2
- (4) 藤松 威史, 橋本 和弥: Sanyo Technical Report, Vol. 17 (2010), No. 1
- (5) 久保田 学, 越智 達朗: 新日鉄技報, 378 (2003), 72
- (6) 神谷 尚秀, 田中 優樹, 石倉 亮平: 電気製鋼, 89 (2018), 1

■ 著者 ■



伊藤 靖朗



加藤 豪



前田 誠