以上のことから、Ca脱酸快削鋼 S30CY および S45CY の工具寿命曲線で切削速度 150~250 m/min の範囲に認められたクニックは十分発生し得る現象であり、その発生原因は第1に工具摩耗基準の選定、第2に切削工具面に生成する付着物中の CaO, SiO₂, Al₂O₃ 3元系のうち、特に SiO₂ に起因し、SiO₂ 含有量の減少することにあると考えられる。

5. 結 論

Ca 脱酸快削鋼の被削性について特に工具寿命の立場からその特性を調べた結果つぎのことがわかった。

(1) Ca 脱酸快削鋼の工具寿命は Ca 含有量および C 含有量に大きく影響される。すなわち、Ca 含有量の 0.0040~0.0060 % のとき工具寿命はもっとも長い。C 含有量では 0.10, 0.20, 0.55 % で良好である。

(2) Ca 脱酸快削鋼の工具寿命は切削速度、送りに敏感で、ほかの快削鋼とその感受性が異なり、特定の送り、切削速度で工具寿命に極小値を生ずる。この現象は工具すくい面付着物中の SiO₂ 含有量の変化とは

ば一致する。

(3) Ca 脱酸快削鋼の工具寿命は工具材種に敏感で超硬工具 P, M 系、特に P10 はよい。

以上、Ca 脱酸快削鋼の工具寿命曲線のクニックについては工具すくい面の付着物中の SiO₂ が少ない場合に発生しており、クニック発生条件は付着物中の SiO₂ が減少することにあると考えられる。今後、なぜ SiO₂ がある切削条件のもとで減少するかを研究し、その根本原因を明らかにしたい。最後に本研究を進めるにあたり、当所物理冶金研究室吉田鎮雄氏のご協力によるところ大であります。ここに厚くお礼申し上げます。

〔文 献〕

- 1) たとえば、W. Adalbert ら; Stahl und Eisen, 19 (1967), 精密機械学会切削性分科会; 精機学会42年秋季講演会前刷集(1967)11月
- 2) 竹山; 難削材(特にステンレス)の切削講習会テキスト, (1968) 9月
- 3) 奥島ら; 第8回切削加工研究会資料, (1968) 7月

UDC 669.14.018.23 : 669.15.-194
543.423.8 669.891

Ca 快削鋼の EPMA による Belag の観察

吉 田 鎮 雄* 加 藤 剛 志**

An Analysis of Belag on the Tool-chip Contact Surface with Electron Probe Microanalyzer using Specially Deoxidized Steels

Shizuo Yoshida and Kôshi Katô

【概 要】

Ca 鋼を切削した際観察される Belag について、介在物形態と切削条件との関係を EPMA により調べた。

Belag 組成は被削材中の介在物組成および切削条件に支配されることを認めた。

なお Belag を作りやすい条件は工具では TiC の多い超硬工具で被削材としては組成がアノルサイト系の A₂ 系介在物をもったものであることがわかった。

昭和43年10月10日受付

* 大同製鋼中央研究所

** // , 工博

1. ま え が き

Ca脱酸鋼の工具寿命はそのベースとなる鋼に比べて、はるかに優れている。このような相違は工具面にCaを含んだBelagが付着し、工具摩耗を防止するためと言われている。

このBelagは工具材種、切削速度等の切削条件のような外的条件の影響を受ける。またBelagは被削材中の非金属介在物が集積あるいは変化したものと考えられ、非金属介在物組成のような内容条件にも影響される。

このようなBelagの挙動を追求することにより、Ca快削鋼の被削性の良い原因が明らかになれば、さらに新しい発展が期待されよう。

そこで工具材種、切削速度、送り等の切削条件および介在物形態とBelagの関連性についてX線マイクロアナライザー（以下EPMAと略記する。）により調査したのでその結果について述べる。

2. X線マイクロアナライザーによる測定方法

使用した装置および主要条件はつぎのとおりである。

EPMA：日本電子製JXA-3型

X線取り出し角：20°

X線分光結晶：Quartz (Fe, Mn, Ca 検出用)

Mica (S 検出用)

K・A・P (Al, Si 検出用)

2.1 定量分析

被削材中の非金属介在物と工具すくい面上のBelagについて定性分析を行なった後検出された元素について定量分析を行なった。

非金属介在物の定量条件は電子線加速電圧 20kV、試料吸収電流 0.15~0.25 μ A、電子線スポット径 1~2 μ である。

Belag 定量の際、その厚さ、凹凸等により定量精度が問題になるので表面をダイヤモンドペーストでごく軽く研磨し、きれいな面を測定するようにしたので、凹凸については問題はなかった。電子線スポット径は Belag について線分析を行なったところ、50~100 μ の距離は組成が比較的均一であったので、30 μ のスポット径で Belag を定量して平均組成を求めることにした。Belagの厚さは数 μ 程度と考えられ、測定において加速電圧を高くしすぎると分析される領域も深くなり、電子線が Belag を通過して工具までも定量することになるので注意した。しかし EPMA による定量分析で真の意味で補正が可能なものは測定対象が単相の場合で、工具と Belag のような比較の原子番号の低いものと高いものがいっしょに存在するような場合の定量補正は精度の高い結果を得ることはむづかしい。そのためできるだけ Belag のみを定量することが必要である。そこで、Belag の主成分である Ca, Al, Si 等の最低励起電圧を考慮して、加速電圧 15~30kV において定量したところ、Belag の定量には 15kV が定量精度が最も高かったので、Belag 定量

Mat. cut.: S45CY, Tool: P10, Feed: 0.2 mm/rev, Cut. speed: 200 m/min, Depth of cut: 2 mm

Photo.1. Scanning image of cutting tool surface.

は15kVで行なうことにした。その時の試料吸収電流は0.1~0.2 μ Aである。なお、定量補正はFilibertの方法を用いた。

2.2 線分析

工具すくい面上のBelagの元素分布を調べるのに線分析を用いた。走査像(反射電子線像)で工具すくい面を観察するとPhoto. 1に示すようにBelagは刃先より境界摩耗まで横切刃と直角方向に均一に付着している。そこで刃先と境界摩耗の中央を横切刃と垂直に沿って線分析を行なった。

測定条件は電子線加速電圧20kV, 試料吸収電流0.15~0.25 μ A, 電子線スポット径1~2 μ である。

なお線分析の結果に示した縦軸の目盛は標準試料のX線強度を基準とした相対強度である。これは厳密には補正を施さなければ真の含有量を示さない。しかし先に述べたように2~3相が混在するところでは正確な補正が困難なので相対強度を第1近似として用いた。

3. 実験結果

3.1 工具材種とBelag

3.1.1 実験条件

Belagの付着の度合は工具材種によって影響を受ける。そこで超硬工具P10, M10, K10の3種について切削試験を行ない、その工具すくい面の元素分布をEPMA線分析により調べた。被削材はCa脱酸によるS20CY*と比較材としてAl脱酸したS20Cを用いた。その化学成分をTable 1に示す。切削条件は

Table 1. Chemical composition of S20CY and S20C.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S 20CY	0.20	0.30	0.74	0.016	0.013	0.12	0.07	0.14
S 20C	0.20	0.29	0.73	0.015	0.014	0.11	0.05	0.10

送り0.2mm/rev, 切込み2.0mmとし、切削速度を100m/min, 200m/minの2条件とし、フランク摩耗巾VB=0.3mmまたは切削時間100minまで切削した。

3.1.2 EPMAによる観察結果

切削試験後使用した工具すくい面の元素分布を調べた結果をFig. 1, 2に示す。

Fig. 1は切削速度の影響、すなわち工具P10, 切削速度200m/minと100m/minの場合を比較した図である。各条件共Ca, Si, Alの濃度分布傾向は類似

し、クレータ後方に付着し、Feはその前に付着している。しかし切削速度200m/minではCa, Si, Alは後方にゆくにしながら増加の傾向があり、Feもその前で同じ傾向であるが、切削速度100m/minではCa, Si, Alの付着位置は速度200m/minの場合とほぼ同じであるが、切刃先端に比較的多く付着している。しかし量的にはわずかである。

Feについても同様の傾向があるが、切削速度200m/minの場合は後方にゆくにしながら多いのにくらべ、切削速度100m/minでは最も多い位置が前方(横切刃側)によっている。これは切削温度と関連し、切削速度200m/minでは付着物が流動状態になり、接触域後方に押し流されているためと考えられる。

Fig. 2は工具材種の影響、すなわち、切削速度200m/minにおけるP10工具とM10工具について比較した図である。工具材種についても切削速度と同様の傾向があることがわかる。

Belagの工具材種、切削速度による付着状態をCaの分布で代表させてFig. 3に示し、Feの付着状態をFig. 4に示した。工具P10, 切削速度200, 100m/minと工具M10, 切削速度200m/minにおけるCaの付着位置は前に述べたようにほぼ同じであるが、工具M10, 切削速度100m/minにおける付着巾はせまくなり、K10については切削速度100, 200m/min共に付着は部分的である。

FeはCaとは逆の傾向でCaの付着位置では少なく、Caの付着の多いものほどFeの付着は少なくなる傾向がある。

これらCaおよびFeの付着の割合を次のようにして求めた。すなわち、Fig. 5における斜線の部分の面積を求め、Caについては最も多い工具P10切削速度200m/minの場合を1とし、それぞれについてその割合を付着率とした。その結果をFig. 6に示す。

同様にFeについても図から面積を求め、最も多い工具K10, 切削速度100m/minの場合を1として付着率を求め、その結果をFig. 7に示した。

Caの付着はFig. 3より推定されるように工具P10, 切削速度200m/minの場合が非常に多い。工具別に見ると切削速度100, 200m/min共にP10, M10, K10の順に減少している。切削速度別では各工具共高速の方が多い。すなわち、従来いわれるようにTiCの多い工具ほどCaの付着は多く、また切削速度が大きい方がCaの付着が多い。

Feについて見るとFeはCaとは逆で工具別では切

* Ca脱酸した快削鋼には鋼種記号のあとにYを付して区別する。

Tool ; P10(-5, -5, 5, 5, 0, 0.4 mm), Feed ; 0.2 mm/rev, Depth of cut ; 2 mm

Fig. 1. Relation between cutting speed and distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface (Material cut : S20CY).

Cutting speed : 200 m/min, Feed : 0.2 mm/rev, Depth of cut : 2 mm

Fig. 2. Relation between tool and distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface (Material cut : S20CY).

Distance from side cutting edge (mm)
 Feed : 0.2mm/rev, Depth of cut : 2mm
 Fig. 3. Distribution of Ca on the tool-chip contact surface (Material cut : S20CY).

Fig. 5. Example of distribution of chemical elements.

Fig. 4. Distribution of Fe on the tool-chip contact surface (Material cut : S20CY).

Fig. 6. Relation between tool and adhesion-percentage of Ca (Material cut : S20CY).

Fig. 7. Relation between tool and adhesion-percentage of Fe (Material cut : S20CY).

削速度 100, 200 m/min 共に P10, M10, K10 の順に Fe の付着が多くなっている。また切削速度別では各工具共に低速の方が Fe の付着が多い。以上の結果より Ca と Fe の付着に逆の傾向が見られ、Ca 鋼の効果と考えられるが、Fe の付着は Ca を含まない S20C を切削した際にも以下に述べるように同様の傾向を示すので、工具材種の影響も考えられる。比較材 S20C を切削した際の Fe の付着状態を Fig. 8 に、Fe の付着率を Fig. 9 に示す（付着率の標準は Fig. 7 と同様に被削材 S20CY, 工具 K10, 切削速度 100 m/min の場合を 1 とした）。

Fe の付着は Ca 鋼を切削した際と同様工具材種別

では各切削速度に P10, M10, K10 の順に Fe の付着が多い。切削速度別でも各工具共に低速の方が Fe の付着が多い。

以上の結果より、Fe の付着は Belag ができたために少なくなると共に工具材種によっても変化があることがわかる。

Ca 鋼の効果を見るため各条件毎に Fe の付着率の S20CY/S20C と比を求め、Fe の付着比とした。その結果を Fig. 10 に示す。Ca 鋼の Fe の付着は P10 では切削速度 100, 200 m/min 共に比較材の 4 割程度と Ca 鋼の効果が見られるが、M10, K10 では比較材よりわずかに減少する程度で Ca 鋼の効果は少ない。

Fig. 8. Distribution of Fe on the tool-chip contact surface (Material cut : S20C).

Fig. 9. Relation between tool and adhesion-percentage of Fe (Material S20C).

Fig. 10. Relation between tool and adhesion-ratio of Fe.

3.2 切削速度と Belag 組成

3.2.1 実験条件

切削条件は工具 P10 (−5, −5, 5, 5, 30, 0, 0.4 mm), 送り 0.2 mm/rev, 切込み 2.0 mm とし, 切削速度を 150, 200, 250 m/min の 3 段階でおのおの, 2 min 切削後の Belag を EPMA により定量した。定量は各条件共に 2 点ずつ行なった。なお被削材は Ca 脱酸による S45CY を用いた。その化学成分を Table 2 に示す。

Table 2. Chemical composition of S45CY.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S 45CY	0.44	0.33	0.65	0.015	0.024	0.14	0.07	0.12

3.2.2 EPMA による観察結果

定量補正した結果を Fig. 11 に示す。Belag 組成はすべてゲーレンナイトである。Belag 組成を融点について見ると切削速度が速いものほど高融点組成であり, 切削温度と Belag 組成は密接な関係があると考え

Fig. 11. Relation between cutting speed and Belag composition.

えられる。なお被削材の介在物については 3.4.1 に述べるがほとんど C 系介在物でその組成は Belag 組成より Al₂O₃ が高く, SiO₂ はほぼ同じで, CaO が低かった。

3.3 送りと Belag 組成

3.3.1 実験条件

実験条件は前項とはほぼ同じで, 工具 P10 (−5, −5, 5, 5, 30, 0, 0.4 mm), 切削速度 200 m/min, 切込み 2 mm とし, 送りを 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm/rev と 4 段階にし, 各 2 min 切削後の Belag を EPMA により定量した。試料は各条件毎に 2 個作り, 1 試料につき 2 点, すなわち, 各条件毎に 4 点測定した。なお被削材は前項と同じものである。

3.3.2 EPMA による観察結果

定量補正した結果を Fig. 12 に示す。組成はゲーレンナイトであるが送り 0.2~0.4 mm/rev と 0.1 mm/rev では大きな差がある。すなわち, 送り 0.2~0.4 mm/

Fig. 12. Relation between feed and Belag composition.

Photo.2. Inclusion of S45CY.

revにくらべ0.1mm/rev では SiO_2 が増加し, CaO が減少している。

Belag 組成を融点について 見ると 0.1 mm/rev が最も低く, 0.2 mm/rev 以上でも送りが増すと高融点側に向っている。送りについても切削速度と同様切削

Fig. 13. Composition of inclusion and Belag (Material cut: S45CY).

Material cut: S45CY, Cutting speed: 200m/min
Feed: 0.2mm/rev, Depth of cut: 2.0mm

Fig. 14. Distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface.

温度と Belag 組成の間に密接な関係が見られる。なお、被削材には 3.2 に述べた介在物のほかに送り 0.1 mm/rev の Belag に対応しそうな介在物も見られた。

3.4 介在物形態と Belag

Ca 快削鋼において観察される酸化物系介在物には代表的なものとして C 系と A₂ 系がある。これらの介在物と工具面に付着する Belag の関係について調べた。

3.4.1 C 系介在物と Belag

3.4.1.1 実験条件

被削材は 3.2 に述べたと同じ S45CY を用い、切削条件は工具 P10 (−5, −5, 5, 5, 30, 0, 0.4 mm), 切削速度 200 mm/rev, 送り 0.2 mm/rev, 切込み 2.0 mm とし, EPMA では介在物の定量と工具すくい面の線分析を行ない, その関連性について調べた。

3.4.1.2 EPMA による観察結果

被削材の酸化物系介在物は Photo. 2 に示すように, C 系介在物がほとんどで, その組成を Fig. 13 に示す。

C 系介在物でも組成的にはいろいろあり, SiO₂ について見ると 10% 程度のものから 30% 程度のものまである。融点では SiO₂ 量の少ないものは高く, SiO₂ 量の多いものは低い。Fig. 14 に示す Belag の元素分布について見ると Belag の主成分である Ca, Si, Al は 3.1 で見たと同様, クレーター後部に行くに従い多くなる。この Belag の組成を次のようにして推定した。すなわち Ca, Si, Al について 3.1, Fig. 5 で求めたと同じ方法で面積を求め, これを介在物について補正したと同程度と考え, 各元素についてその比率で補正した。これを酸化物としての量に換算し, その合計に対する各酸化物の比率を求め, Belag 組成とした。以上の方法により推定した Belag 組成は Fig. 13 に示すようにゲーレンナイトである。この Belag を定量した 3.2 の結果と比較すると大差ない。介在物組成と比較すると Belag 組成は SiO₂ 量はほとんど変化なく, Al₂O₃ 量が少なく, CaO 量が多い。しかし介在物中にはこのような組成のものもあると思われる。

3.4.2 A₂ 系介在物と Belag

3.4.2.1 実験条件

被削材は Ca 脱酸した S53CY と SCM22Y を用いた。その化学成分を Table 3 に示す。切削条件は S53CY の場合は切削速度 200 m/min, SCM22Y は 150 m/min でほかは 3.4.1 と同様である。

3.4.2.2 EPMA による観察結果

S53CY, SCM22Y 共に A₂ 系介在物が主体で代表

Table 3. Chemical composition of S53CY and SCM22Y.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
S53CY	0.52	0.33	0.68	0.011	0.018	0.10	0.06	0.05	—
SCM22Y	0.20	0.29	0.72	0.014	0.022	0.18	0.08	1.03	0.18

(×600)

Photo.3. Inclusion of S53CY.

Fig. 15. Composition of inclusion and Belag.

的な介在物を Photo. 3 に示す。定量結果を Fig. 15 に示す。

S53CY の A₂ 系介在物組成はゲーレンナイトであるがアノルサイトよりの組成の一般の C 系介在物の組成より SiO₂ 量が多く融点も低い。C 系介在物組成は A₂ 系にくらべて SiO₂ 量が少なくなっている。

SCM22Y の A₂ 系介在物組成はアノルサイトであ

る。C系介在物はやはり SiO_2 量が少なく、 Al_2O_3 量が多くなっている。

A_2 系介在物をもった被削材を切削した際の工具すくい面上の元素分布を Fig. 16, Fig. 17 に示す。

Fig. 16. Distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface.

Fig. 16 は S53CY を切削した際の元素分布であり、Fig. 17 は SCM22Y の元素分布である。SCM22Y, S53CY 共に C 系介在物を切削した工具すくい面と異なり、Ca, Si, Al は横切刃先端よりクレータ後方まで付着している。しかし、クレータ中央部あたりでは Ca, Si, Al はほとんど見られない。この附近は切削時最も圧力の高い所と考えられる。またこの Belag を 3.4.1 に述べたと同じ方法で Belag 組成を推定すると、Fig. 15 に示すように介在物組成と類似している。

3.4.3 S 入り複合快削鋼の Belag

3.4.3.1 実験条件

切削条件は 3.4.1 と同様である。被削材は SCM22 および S50C の Ca 鋼に S を添加したものをを用いた*。

Fig. 18. Composition of Inclusion and Belag.

* Ca と S の複合快削鋼を YS の記号で示す。

Material cut ; SCM22Y Cutting speed ; 150 m/min
Feed ; 0.2 mm/rev Depth of cut ; 2.0 mm

Fig. 17. Distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface.

($\times 600$)

Photo. 4. Inclusion of S50CYS.

その化学成分を Table 4 に示す。

Table 4. Chemical composition of S50CYS and SCM 22YS.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
S50CYS	0.48	0.22	0.63	0.013	0.067	0.12	0.06	0.06	—
SCM 22YS	0.20	0.23	0.68	0.018	0.062	0.15	0.08	1.02	0.17

3. 4. 3. 2 EPMA による観察結果

S50CYSの介在物の代表的なものを Photo. 4 に示

す。硫化物は非常に多くⅠ型とⅡ型の混合である。酸化物はC系が主体で硫化物と複合した A_2 系も見られる。これら A_2 系、C系介在物の各々の組成について定量した結果を Fig. 18 に示す。C系介在物はゲーレンナイト近傍組成であるが、 A_2 系は Al_2O_3 が多くコランダムと考えられる。

工具すくい面をEPMAで観察した結果を Fig. 19 に示す。Ca, Si, Al はクレータ後部のみでMn, S もクレータ後方の Ca, Si, Al と同じ位置で多くなる。また Mn, S の付着傾向は類似していることから

Material cut : S50CYS Cutting Speed : 200m/min
Feed : 0.2mm/rev Depth of cut : 2.0mm

Fig. 19. Distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface.

MnS となっていることが推定される。

SCM22YSの介在物のうち硫化物は1型で比較的にたまご形に近く均一に分布している。酸化物はC系が主体でこの他に単独のA₂系や硫化物と複合した細かいA₂系のものもかなりある。これらC系、A₂系の介在物組成をFig. 18に示す。A₂系介在物はアノルサイトであるが、C系介在物はAl₂O₃が多くコランダムとみなされる。

EPMAにより工具面を観察した結果をFig. 20に示す。Ca, Si, Alは横切刃先端よりクレータ後方ま

で見られ、Mn, SはBelagの前方に多くクレータ後部ではわずかである。

4. む す び

以上各種Ca鋼を切削した工具すくい面をEPMAにより調査した結果つぎのようなことがわかった。

(1) 工具ではTiCの多いP10にCa, Si, Al等の付着が多く、Feの付着が少ない。

(2) 酸化物系介在物組成とBelag組成はほぼ類似している。C系介在物をもった材料を切削した際の

Material cut ; SCM22YS Cutting speed ; 200m/min
Feed ; 0.2mm/rev Depth of cut ; 2.0mm

Fig. 20. Distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface.

Belag はクレータ 後方のみであるが, A_2 系介在物をもった材料を切削した際の Belag は横切刃先端よりクレータ後方まで付着している。

(3) 切削条件が変わると Belag 組成も変わってくる。すなわち, 切削温度が低いと Belag 組成も融点の低い組成になる。

(4) 以上より, 切削条件の広い範囲に有効な Ca 快削鋼は Ca-Si-Al 系介在物でも低融点の組成をもったものがよいと考えられる。

終りにあたって, 本研究に際し EPMA 測定でご協力いただいた物理冶金研究室早野武彦氏をはじめ, 当所関係者一同に深く感謝致します。

(390頁より続く)

“ “ 第10号 (43-10)
鉄鋼界 第18巻第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
“ “ 第10号 (43-10)
TOKICO REVIEW 第12巻第3号 (43-8)
特殊鋼 第17巻第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
東京工業試験所報告 第63巻第6号 (43-6)
東京工業試験所報告 第63巻第7号 (43-7)
“ “ 第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
東芝レビュー 第23巻第9号 (43-9)
“ “ 第10号 (43-10)
東工試ニュース 第3巻第3号 (43-6)
“ “ 第4号 (43-7)
われらの科学と技術 第1巻第6号 (43-7)
製鉄技術総覧 第28巻第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
生産と電気 第20巻第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
“ “ 第10号 (43-10)
製鉄技術総覧(別冊) 第74号 (43-7)
生産研究 第20巻第9号 (43-9)
“ “ 第10号 (43-10)
耐火材料 第107号 (43-9)
鋳鍛造 第21巻第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
“ “ 第10号 (43-10)

〔文 献〕

- 1) 村田, 清野, 竹山; 機械試験所所報, **22**(1968)3, 25
 - 2) カルシウム脱酸快削鋼に関するシンポジウム (1968)
 - 3) H. Opitz, W. König; Archiv Eisen., **33** (1962) 12, 831
 - 4) H. Opitz, M. Gappisch, W. König, R. Pape, A. Wicher; Archiv Eisen., **33**(1962) 12, 841
- 溶接界 第20巻 第8号 (43-8)
材 料 第17巻第180号 (43-9)
“ “ 第181号 (43-10)
材料科学 第5巻第1号 (43-3)
自動車技術 第22巻第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
秋田大学鉱山学部地下資源開発研究所報告 第36号 (43-5)
月刊文献ジャーナル 第7巻第9号 (43-9)
九州大学工学集報 第41巻第4号 (43-8)
Proceedings of the Fujihara Memorial Faculty of Engineering Keio Univ. 第20巻第79号 (43-9)
九州大学工学部紀要 第28巻第1号 (43-9)
金沢大学工学部紀要 第5巻第2号 (43-8)
セラミックス 第3巻第9号 (43-9)
“ “ 第10号 (43-10)
チタニウムジルコニウム 第16巻第8号 (43-8)
“ “ 第9号 (43-9)
中部鉄鋼情報 第231号 (43-8)
“ “ 第232号 (43-9)
鉄と鋼 第54巻第9号 (43-8)
“ “ 第10号 (43-8)
“ “ 第11号 (43-9)
鉄鋼界報 第811号 (43-8)
“ “ 第812号 (43-8)
“ “ 第814号 (43-9)
“ “ 第815号 (43-9)
鉄道技術研究資料 第25巻第9号 (43-9)