

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22686067

研究課題名（和文） 包晶反応と共析逆変態反応による超微細粒鋼の創製

研究課題名（英文） Development of ultra-fine grained steels by controlling peritectic and inverse eutectoid reaction processes

研究代表者

大野 宗一 (OHNO MUNEKAZU)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30431331

研究成果の概要（和文）：本研究は、炭素鋼において高温で形成する結晶粒(オーステナイト粒)組織を、変形によるひずみを付与することなく、合金の成分調整と凝固・熱処理プロセスの制御のみで微細化することを目的としたものである。Ti、V、Nb の添加、凝固中の冷却条件制御、その後の加熱条件制御による効果を理論・実験・シミュレーションによって検討し、微細化条件を探索した。その結果、Ti を添加し、金型 casting 後に速やかな加熱を行うことで、おおよそ 1 ミクロンのサイズまで微細化することが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to obtain carbon steels exhibiting very fine austenite grain structures by controlling solidification and heat treatment conditions without the deformation processes. Effects of Ti, V, and Nb additions, different cooling and heating conditions on the grain structure were investigated in detail by means of the theories, simulations and experiments to elucidate optimal conditions for the grain refinement. It was found that the carbon steel with Ti addition fabricated by permanent mold casting followed by rapid heating process exhibits very fine grain structure, the average size of which is as small as about 1 micron.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	19,600,000	5,880,000	25,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 ・ 材料加工・処理

キーワード：微細粒鋼・ casting ・凝固・シミュレーション ・包晶反応 ・共析反応

## 1. 研究開始当初の背景

鉄鋼材料の強度を飛躍的に向上する方法として結晶粒の超微細化が挙げられる。現在までに超鉄鋼プロジェクト、スーパーメタルプロジェクトなどの国家プロジェクトの重

要課題として鉄鋼材料の結晶粒を超微細化する技術の発展が試みられてきた。その技術においては主にひずみで1もしくは2を超えるような大ひずみ加工を付与する方法が用いられる。このような大ひずみ加工を用い

た微細化に関しては国内外の研究グループによって精力的に研究されてきたものの、合金の成分調整や熱処理による相変態過程を利用した微細化技術、特に、凝固組織の微細化を起点として最終組織を微細化する技術は十分に発展しているとは言い難い。

## 2. 研究の目的

上記の背景を受けて、本研究では炭素鋼のオーステナイト ( $\gamma$ ) 粒組織を対象として、強加工プロセスを用いない微細化法の発展を目指した。すなわち、成分調整と鑄造条件の制御によって鑄造段階での微細化を実現し、その後の熱処理 (特に逆変態処理) によって微細分散したピン止め粒子を利用して超微細 $\gamma$ 粒組織を得ることを狙ったものであり、その微細化条件の探索および指針の構築を試みた。

## 3. 研究の方法

本研究では、0.1mass%から0.5mass%炭素濃度範囲の鋼種 (Si, Mn, 等の元素は炭素等量で0.1mass%以下) を対象として、以下の二点の項目を遂行した。

(1) Ti, Nb, V 炭窒化物の微細分散による鑄片 $\gamma$ 粒組織の微細化条件の調査

(2) 鑄造組織からの加熱過程におけるピン止め粒子を利用した結晶粒微細化条件の調査

(1) においては、状態図解析・熱伝導解析、フェーズフィールド・シミュレーションによる高温相変態過程の調査を行い、凝固現象の解析と鑄造条件を検討した。特に、炭窒化物形成条件と鑄造組織の関係性を調査した。(2) では、(1) で得られた鑄造組織を初期組織として、逆変態過程の実験的調査を進め、逆変態現象における組織微細化法を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 鑄造組織の微細化

#### ① 徐冷過程における炭窒化物の影響

まず、0.03°C/s の徐冷中に形成する鑄片 $\gamma$ 粒組織に対する Ti, Nb, V 添加の影響を調査した。DTA を用いた熱分析および状態図計算から、Ti, Nb, V 添加鋼における各炭窒化物形成温度を求めた結果、本研究が対象とする添加量 0~0.5mass% の範囲では、高濃度側で Ti(C,N) は凝固中に初晶として形成し、Nb(C,N) は $\gamma$ 相と平衡して液相から晶出、V(C,N) は $\gamma$ 相から析出することが明らかになった。したがって、凝固組織の微細化には、Ti と Nb が有効であると予想した。実際に、例えば 0.2mass% 炭素鋼は冷却中 1100°C において約 4.5mm 程度の粗大結晶粒組織からなっていたが、Nb と Ti を添加することでその添加量とともに粒径が徐々に減少すること

が示され、0.5mass% Nb 添加鋼においては平均粒径が 500 $\mu$ m 程度の組織が形成した。一方で、V 添加も若干 $\gamma$ 粒組織を微細化したが、その効果は、Ti や Nb ほどではなかった。これらの観察事実は上記の相平衡の解析から予想される結果と符合した。

#### ② 金型鑄造における炭窒化物の影響：不連続粒成長による粗大粒組織の形成防止

本研究が対象とした鋼種の連続鑄造鑄片には、粗大で柱状の $\gamma$ 粒組織 (Coarse Columnar  $\gamma$  Grain, CCG) が形成することが知られている。したがって、ここでの鑄造組織の微細化とは、CCG 組織の形成防止に相当する。我々のグループの調査において、炭素濃度によって柱状 $\gamma$ 粒組織の形成メカニズムが異なり、それに応じて異なる微細化方法を用いる必要があることが分かった。金型鑄造や連続鑄造における冷却条件では、0.1~0.37mass% 炭素濃度範囲の鋼種において、CCG 組織は初晶 $\delta$ デンドライト中に形成する微細で柱状の $\gamma$ 粒組織 (Fine Columnar  $\gamma$  Grain, FCG) からの不連続粒成長によって形成する。したがって、鑄片 $\gamma$ 粒組織の微細化のためには、この不連続粒成長を抑制する必要がある。本研究では、不連続粒成長の kinetics を理論・シミュレーションから検討し、不連続粒成長発生の臨界条件を明らかにした。その結果、ピン止め粒子を用いた場合、不連続粒成長を完全に抑制するためには、そのピン止め力  $P_{pin}$  が、

$$P_{pin} = \frac{\sigma_g}{\xi \cdot \lambda_1}, \quad (1)$$

で与えられる大きさになる必要があることが分かった。ここで、 $\sigma_g$  は $\gamma$ 粒界エネルギー、 $\xi$  は定数、 $\lambda_1$  は $\delta$ デンドライトの主軸間隔である。式(1)は CCG 組織の形成防止に対する定量的な指針を与える。ピン止め力に基づくこのような指針は国内外において未だ提案されたことがなく、本研究において明らかになった重要な知見の一つである。

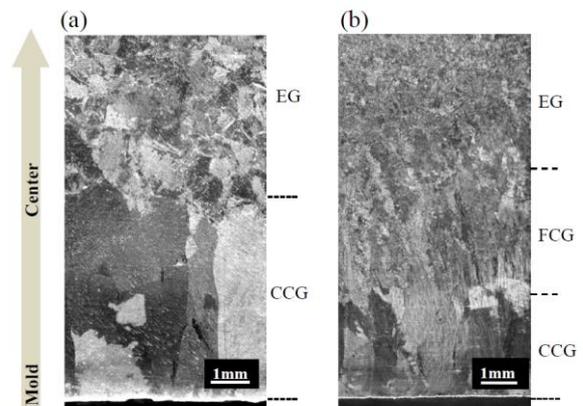


図 1. 0.2% 炭素鋼の金型鑄造における鑄片 $\gamma$ 粒組織。(a) 0.0% Nb、(b) 0.1% Nb.

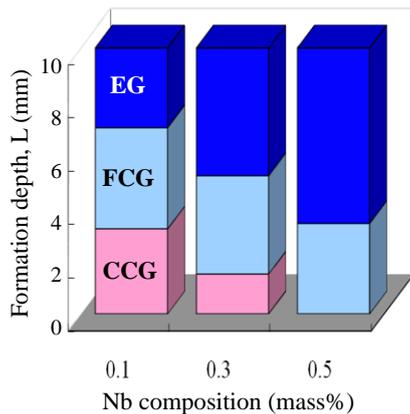


図2 铸片 $\gamma$ 粒組織の形成深さと Nb 添加量との関係

実際、炭窒化物を形成させることで、不連続粒成長を抑制し、CCG の形成を防ぐことに成功した。図1に示したのは金型铸造した炭素鋼铸片における $\gamma$ 粒組織である。Nb 無添試料においては、CCG が試料の半分以上を占めているが、0.1mass%の Nb を添加することで CCG 領域長さは4mm 以下まで減少している。0.5mass%の Nb を添加することで、CCG が完全に消滅し(図2)、短径が dendrite 主軸間隔(数百 $\mu\text{m}$ )程度の微細な柱状 $\gamma$ 粒 (FCG) が代わりに形成した。この挙動は、Nb 添加量の増加によって凝固中に晶出する Nb(C,N)の体積割合が増加し、結果として式(1)における  $P_{\text{pin}}$  が増加することによって説明される。このような効果は 0.1mass%炭素濃度においても実証され、広い炭素濃度範囲で有効であることが分かった。

②の実施項目における最大の関心は、Dendrite 組織の柱状晶-等軸晶遷移(CET)を利用した铸造組織の微細化にある。①で述べた相平衡の解析から、CET に有効なのは初晶として晶出する Ti(C,N)であることが分かった。そこで、Ti(C,N)による CET 発現の有無を Dendrite 成長速度の計算並びに Hunt の CET モデルを組み合わせた解析によって調査した。図3に示したのは、0.2mass%炭素鋼

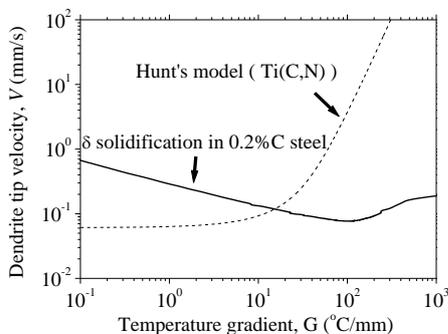


図3  $\delta$  dendrite 凝固中の成長速度と温度勾配の関係と Hunt の CET モデルとの比較

における $\delta$  dendrite 凝固中の成長速度  $V$  と温度勾配  $G$  の関係、ならびに Hunt の CET モデルから予想される  $V$ - $G$  関係の閾値である。このような解析から、本铸造実験において、Ti 添加による CET が発生する条件を検討した。そして、Ti 添加によって $\delta$  dendrite の CET が生じ、 $\delta$  dendrite が等軸微細化することを見出した。しかしながら、これらの鋼種は、上記の通り、不連続粒成長によって铸片 $\gamma$ 粒組織が粗大化する。その結果、 $\delta$  dendrite の等軸微細化にも関わらず、 $\gamma$ 粒組織は $\delta$  dendrite の主軸間隔程度(100mm 程度)までしか微細化しなかった。これは、実用の铸造プロセスにおいて問題となっている铸片表面割れを低減させる重要な微細化効果であるが、本研究が目標とする数十 $\mu\text{m}$  レベルの微細化には相当しない。一方、次に述べるように、铸片組織の劇的な微細化は不連続粒成長が発生しない 0.37mass%以上の鋼種において可能であることが分かった。

### ③ 金型铸造における炭窒化物の影響: $\gamma$ 初晶モードにおける柱状粒組織の微細化

上記の通り、炭素濃度が 0.37mass%以下の鋼種の凝固においては初晶 $\delta$  dendrite から FCG が形成し、不連続粒成長が生じる。しかしながら、炭素濃度が 0.37mass%以上の鋼種においては、初晶として成長する $\delta$  dendrite よりも、 $\gamma$  dendrite の方が低過冷度で成長することができ、これらの鋼種においては $\gamma$ 凝固モードで铸造組織が形成することが明らかになった。したがって、このモードにおける微細化は、 $\gamma$  dendrite の等軸微細化を要することになる。一方、Ti を添加することで溶湯中に Ti(C,N)を形成させると、成長している $\gamma$ 相の前方で Ti(C,N)上に $\delta$ 相が形成して $\delta$ 相の CET が生じ、その後、包晶反応を経て微細な $\gamma$ 粒が形成することが明らかになった。図4に示すように、その平均粒径はおおよそ 10 $\mu\text{m}$  レベルである。このような铸片組織の劇的な微細化は、初晶 $\gamma$ モードの鋼種において発現することを明らかにした点が、本研究における最大の成果の一つである。初晶 $\gamma$ モードの発現は、冷却条件の他、溶質元素の

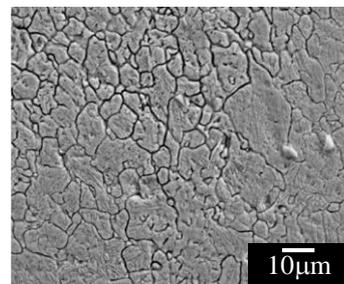


図4  $\gamma$ 凝固モードで成長する鋼種(0.45C 鋼)の $\gamma$ 粒組織を Ti(C,N)による CET で微細化した例。

成分に依存することが示されており、そのモードが発現する冷却条件・濃度範囲は本研究で開発した定量的フェーズフィールド・モデルによって高精度に求めることが可能である。

(2) 加熱処理による逆変態 $\gamma$ 粒組織の微細化

加熱実験の試料として、炉凝固材、金型鑄造材を作製し、それぞれ  $A_1$  温度近傍を空冷、水冷により冷却してフェライト+パーライト( $\alpha+p$ )組織、マルテンサイト( $m$ )組織の試料を得た。加熱速度は  $0.014^\circ\text{C}/\text{s} \sim 70^\circ\text{C}/\text{s}$  の範囲で変化させ、加熱温度は  $A_1$  温度以下から最高で  $1400^\circ\text{C}$  までとした。

まず、Ti, Nb, V 添加鋼におけるピン止め効果を系統的に調査する目的で、炉凝固材を空冷して得た  $\alpha+p$  組織を  $0.014^\circ\text{C}/\text{s}$  で共析逆変態させた際に形成する  $\gamma$  粒組織を調査した。Ti, Nb, V のいずれも  $\gamma$  粒組織の微細化に効果的であったが、中でも Ti が最も高温まで微細化効果を示した。この Ti(C,N) によるピン止め効果は、共析逆変態が開始した直後から発現し、 $\alpha+\gamma$  二相領域においても  $\gamma$  粒は Ti 添加によって細粒化することが分かった。また、逆変態が終了後の  $\gamma$  粒の粒成長は、以下の方程式で記述できることが明らかになった。

$$\frac{dr}{dt} = \sigma_s m \left( \frac{1}{r} - \frac{6f_v}{r_p} \right), \quad (2)$$

ここで、 $r$  は  $\gamma$  粒の平均半径、 $m$  は  $\gamma$  粒界の移動度、 $f_v$  と  $r_p$  はそれぞれ Ti(C,N) の体積割合と平均半径である。ここで、 $r_p$  は Lifshitz, Slyozov, Wagner(LSW)理論に従って時間変化する。また、Ti(C,N)の粒子分布を含めた析出過程の詳細を N モデルによっても解析したが、上記の Zener 型のピン止め力によってうまく実験結果が整理できることが示された。

図 5 に示したのは、0.2mass%炭素鋼を炉冷後、 $30^\circ\text{C}/\text{s}$  で  $900^\circ\text{C}$  まで加熱した際の粒径のデータである。初期組織を  $\alpha+p$  とした方が一回の加熱過程で微細な  $\gamma$  粒が形成することがわかる。一方で、初期組織がマルテンサイト( $m$ )の場合は 1 回の加熱では  $\alpha+p$  試料よりも

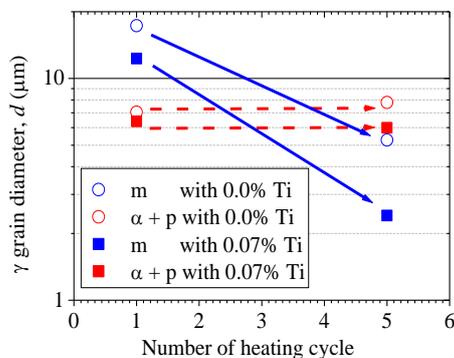


図 5 繰り返し加熱回数と  $\gamma$  粒径の関係 (0.2%炭素鋼の炉凝固材)

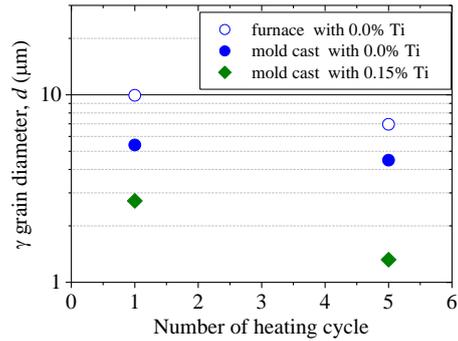


図 6 繰り返し回数と  $\gamma$  粒径の関係 (0.45%炭素鋼の炉凝固材と金型鑄造材)

大きな結晶粒が形成するが、繰り返し回数の増加によって粒径が小さくなる。また、昇温速度依存性に関しても同様の傾向が示され、 $\alpha+p$  組織からの  $\gamma$  粒径は加熱速度に大きな影響を受けず、 $m$  組織からの  $\gamma$  粒径は加熱速度の増加とともに減少することが示された。つまり、 $\alpha+p$  組織を加熱した場合、加熱条件の影響を大きく受けずに微細な  $\gamma$  粒が形成するが、さらなる微細化を達成するためには  $m$  組織からの加熱が有効であることが分かった。また、いずれの場合も、Ti 添加によって  $\gamma$  粒組織はさらに微細化することも示された。

図 6 に示したのは、0.45mass%炭素鋼の炉凝固材と金型鑄造材をマルテンサイト化処理後に  $900^\circ\text{C}$  まで加熱した際の  $\gamma$  粒径である。青色のプロットは  $30^\circ\text{C}/\text{s}$  の昇温速度を用いている。鑄造組織の違いが逆変態  $\gamma$  粒組織に著しい影響を及ぼすことが明らかになった。これは、当初の狙い通り、鑄造組織の微細化が逆変態  $\gamma$  粒の微細化に有効であることを示す重要な事実である。さらに、いずれの場合も Ti 添加によって逆変態  $\gamma$  粒径はさらに微細化することも示された。緑色のプロットは 0.15mass% 添加した 0.45mass%炭素鋼を  $70^\circ\text{C}/\text{s}$  で昇温した際のデータである。(1)~(3)において述べたように、この時の鑄片  $\gamma$  粒は  $10\mu\text{m}$  程度の微細粒組織である。この微細な鑄片組織からの逆変態によって超微細な  $\gamma$  粒組織が形成することが分かった。5 回の繰り返し加熱を行うことで、その  $\gamma$  粒径は  $1.3\mu\text{m}$  程度の微細粒となった。

(3) 総括と今後の展望

本研究では、包晶凝固鋼を対象として、炭窒化物形成元素の添加による鑄造組織の微細化条件を詳細に解析した。熱力学計算、Hunt の CET モデル、フェーズフィールド・シミュレーション、鑄造実験を実施することで、各鋼種における微細化条件を求め、一部定量的な指針も発展することができた。さらに、冷却後の再加熱過程で形成する  $\gamma$  粒組織の微細化についても系統的な調査を行い、微細

鑄造組織からの再加熱プロセスによって、従来型の強加工プロセスを用いずに、1 $\mu$ mレベルの超微細 $\gamma$ 粒組織を得ることが可能であることが分かった。本研究で得られた凝固・熱処理プロセスを組み合わせた微細化指針・技術は他の鋼種に展開できることが期待でき、今後の省エネ・省プロセス化における高品質鋼の製造技術に大きく貢献するものと期待される。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① M. Ohno, T. Yamaguchi, D. Sato, K. Matsuura, "Existence or nonexistence of thermal pinning effect in grain growth under temperature gradient", *Computational Materials Science*, 査読有, 69 巻, 2013, 7-13.
- ② M. Ohno, "Quantitative phase-field modeling of nonisothermal solidification in dilute multicomponent alloys with arbitrary diffusivities", *Physical Review E*, 査読有, 86 巻, 2012, 051603-1-15.
- ③ M. Ohno, S. Tsuchiya, and K. Matsuura, "Austenite Grain Growth in Peritectic Solidified Carbon Steels Analyzed by Phase-Field Simulation", *Metallurgical Materials Transactions A*, 査読有, 43A 巻, 2012, 2031-2042.
- ④ M. Ohno, C. Murakami, K. Matsuura and K. Isobe, "Effects of Ti Addition on Austenite Grain Growth during Reheating of As-Cast 0.2 mass% Carbon Steel", *ISIJ International*, 査読有, 52 巻, 2012, 1832-1840.
- ⑤ L. Chen, K. Matsuura, D. Sato, M. Ohno, "Effects of Second Phase Particle Dispersion on Kinetics of Isothermal Peritectic Transformation in Fe-C Alloy", *ISIJ International*, 査読有, 52 巻, 2012, 434-440.
- ⑥ S. Tsuchiya, M. Ohno, K. Matsuura, "Transition of solidification mode and the as-cast  $\gamma$  grain structure", *Acta Materialia*, 査読有, 60 巻, 2012, 2927-2938.
- ⑦ M. Ohno, T. Yamaguchi, K. Matsuura and K. Isobe, "Suppression of Coarse Columnar Grain Formation in As-cast Austenite", *ISIJ International*, 査読有, 51 巻, 2011, 1831-1837.
- ⑧ M. Ohno, S. Tsuchiya, K. Matsuura, "Formation conditions of coarse columnar austenite grain structure in peritectic carbon steels", *Acta Materialia*, 査読有, 59 巻, 2011, 5700-5709.
- ⑨ T. Tsuchiya, M. Ohno, K. Matsuura, K. Isobe, "Formation mechanism of coarse columnar  $\gamma$  grains in as-cast hyperperitectic carbon

steels", *Acta Materialia*, 査読有, 59 巻, 2011, 3334-3342.

[学会発表] (計 24 件)

- ① 大野宗一, 松浦清隆, "包晶凝固鋼鑄片における粗大柱状  $\gamma$  粒組織形成の選択条件", 日本鉄鋼協会 第 165 回 春季講演大会, 2013 年 3 月 27-29 日, 東京電機大学.
- ② 大西亘, 大野宗一, 松浦清隆, 磯部浩一, "Ti 添加した炭素鋼鑄片における逆変態オーステナイト粒組織の微細化", 平成 24 年度 日本金属学会・日本鉄鋼協会 両支部合同冬季講演大会, 2013 年 1 月 24,25 日, 室蘭工業大学.
- ③ 丸山正人, 大野宗一, 松浦清隆, 磯部浩一, "0.2mass%炭素鋼における粗大柱状  $\gamma$  粒組織の形成条件", 日本鉄鋼協会 第 164 回 秋季講演大会, 2012 年 9 月 17-19 日, 愛媛大学.
- ④ 大西亘, 大野宗一, 松浦清隆, 磯部浩一, "Ti 添加鋼における逆変態オーステナイト粒組織に及ぼす繰り返し加熱の影響", 平成 24 年度 日本金属学会・日本鉄鋼協会 北海道支部合同サマーセッション, 2012 年 7 月 24 日, 北海道大学.
- ⑤ 星洋平, 大野宗一, 松浦清隆, 磯部浩一, "炭素鋼における逆変態  $\gamma$  粒組織に対する初期組織の影響", 平成 24 年度 日本金属学会・日本鉄鋼協会 北海道支部合同サマーセッション, 2012 年 7 月 24 日, 北海道大学.
- ⑥ 丸山正人, 大野宗一, 松浦清隆, 磯部浩一, "0.2mass% C 鋼における粗大柱状  $\gamma$  粒組織の形成条件", 平成 24 年度 日本金属学会・日本鉄鋼協会 北海道支部合同サマーセッション, 2012 年 7 月 24 日, 北海道大学.
- ⑦ 大野宗一, 松浦清隆, "包晶凝固鋼の連鑄鑄片における  $\gamma$  粒径予測式の検討", 日本鉄鋼協会 第 163 回 秋季講演大会, 2012 年 3 月 30 日, 横浜国立大学.
- ⑧ 大野宗一, "包晶凝固鋼における連鑄鑄片  $\gamma$  粒組織の形成機構", 第 146 回製鋼部会, 2012 年 3 月 15 日, ホテル日航姫路.
- ⑨ 大野宗一, 松浦清隆, "不連続粒成長シミュレーション法の開発と鋼の連鑄鑄造への応用", 東京大学物性研究所協同利用スパコン成果報告会「計算科学の課題と展望」, 2012 年 2 月 20 日, 東京大学物性研究所.
- ⑩ 土屋真悟, 大野宗一, 松浦清隆, "炭素鋼の鑄片  $\gamma$  粒組織形成機構の解明", 平成 23 年度 日本金属学会・日本鉄鋼協会 両支部合同冬季講演大会, 2012 年 1 月 20 日, 北海道大学.
- ⑪ 佐藤大祐, 大野宗一, 松浦清隆, "炭素鋼の  $\delta/\gamma$  異相界面移動に及ぼすピン止め効果に関するフェーズフィールドシミュレーション

オン”、日本金属学会 第 149 回秋季講演大会、2011 年 11 月 7 日、沖縄コンベンションセンター。

- ⑫土屋真悟、大野宗一、松浦清隆、“過包晶鋼の鑄片  $\gamma$  粒組織に及ぼす炭素濃度の影響”、日本鉄鋼協会 第 162 回春季講演大会、2011 年 9 月 2 日、大阪大学。
- ⑬大野宗一、松浦清隆、“フェーズフィールドシミュレーションによる連鑄鑄片  $\gamma$  粒の柱状粗大化過程の解析”、日本鉄鋼協会 第 162 回春季講演大会、2011 年 9 月 22 日、大阪大学。
- ⑭大西亘、大野宗一、松浦清隆、磯部浩一、“炭素鋼の凝固後及び逆変態後の結晶粒組織に及ぼす V 添加の影響”、平成 23 年度日本金属学会・日本鉄鋼協会 北海道支部合同サマーセッション、2011 年 7 月 22 日、室蘭工業大学。
- ⑮山口鉄矢、大野宗一、松浦清隆、磯部浩一、“包晶凝固及び共析逆変態の  $\gamma$  粒組織に及ぼす Nb 添加の影響”、日本鉄鋼協会 第 160 回秋季講演大会、2010 年 9 月 25-27 日、北海道大学。
- ⑯大野宗一、“時間分解観察による凝固現象の素過程の解明と課題（計算）”、東北大学金属材料研究所シンポジウム、2010 年 7 月 27 日、東北大学。
- ⑰村上ちひろ、大野宗一、松浦清隆、磯部浩一、“Ti 添加による中炭素鋼の逆変態オーステナイト粒微細化挙動”、日本鑄造工学会 平成 22 年北海道支部大会、2010 年 4 月 23 日、JST イノベーションプラザ北海道。
- ⑱土屋真悟、大野宗一、松浦清隆、磯部浩一、“包晶凝固過程における粗大柱状オーステナイト結晶粒組織の形成メカニズム”、日本鑄造工学会 平成 22 年北海道支部大会、2010 年 4 月 23 日、JST イノベーションプラザ北海道。

この他、6 件

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大野 宗一 (OHNO MUNEKAZU)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30431331