

技術資料

Technical Data

8%Crダイスイ鋼における溶解-鍛造プロセスのザク圧着一貫評価手法

千羽克征*, 中川純一*, 鷲見芳紀*

Integrated Prediction Method of Porosity Closure in Melting and Forging Processes for 8%Cr Die Steel

Katsumasa CHIBA, Junichi NAKAGAWA and Yoshinori SUMI

Synopsis

The solidification of special steels often results in the generation of porosities due to shrinkage in the liquid phase. The aim of this study was to develop a method for predicting the closure of these porosities during the casting and forging processes. Laboratory-scale experiments were conducted to evaluate the formation and closure behavior of porosities in steel ingots. Initially, small ingots containing fine porosities were produced using a modified Sato-mold. A hot forging test was conducted to investigate the conditions necessary for porosity closure. Subsequently, casting and forging simulations were conducted to replicate the experiment, in order to calculate the porosity generation index (Niyama criterion) and the porosity closure index (Q-value). The study was focused on identifying conditions under which porosities are closed.

1. 緒言

特殊鋼の製造プロセスでは、しばしば casting 中における溶鋼の凝固収縮によって空隙状の欠陥（以下、ザクという）が鋼塊内に生成される。ザクの残留は製品特性へ影響をおよぼすため、後の鍛造・圧延工程で完全に圧着される必要がある。圧着のために導入できる鍛錬量は、最終製品形状や鋼塊寸法によって制限されるため、鑄込み条件や鑄型形状といった鑄造工程設計も加味し、ザク圧着に必要な鍛造条件を評価することが望ましい。

従来のザク圧着評価手法として、サンプル内に人工欠陥を導入し、圧縮試験をすることで欠陥の圧着挙動を評

価した例¹⁾や、実鋼塊を用いた熱間鍛造試験によって圧着挙動を評価した例²⁾がある。一方、特殊鋼におけるザク生成挙動は液相粘性や固液幅によって異なるため、多様な鋼種におけるザクの生成と圧着挙動を簡便に評価する手法の確立が望まれる。以上の背景から、辻らはラボスケールの試験において、凝固欠陥を意図的にサンプル内に導入する佐藤鑄型³⁾の技術を応用し、小型のS45C凝固サンプルを用いた熱間鍛伸試験を行うことで、ザク圧着条件を評価する技術を考案した⁴⁾。上記試験は小型インゴット内のある高さにおいて急激に冷却し、凝固組織のブリッジングを誘起させ、液相供給から切り離された領域を意図的に作り出すことで、粗大なザク欠陥を生

2024年4月17日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

成させている。しかし、小型インゴットであることから冷却速度が非常に速く、凝固組織やザク形状が実機と異なることが予想される。実機鋼塊ではしばしば低速凝固下で緩やかにブリッジングが生じることにより、微細なザクが形成されるが、その生成と圧着挙動を工程一貫で着目した調査はほとんどない。そこで本研究では、まず佐藤鋳型を改良し、断熱性耐火物の鋳型内で緩やかにブリッジングを誘起させ、実機を想定した微細なザクを有するインゴットを作製した。次に、分塊鍛造を想定した熱間鍛伸試験に供することで、ザクの閉塞および鍛伸条件の影響を調査した。その後、試験条件を再現するように鋳造シミュレーションと鍛造シミュレーションを組み合わせ、実験結果と照合することで、ザクの生成と閉塞挙動を工程一貫して評価する手法を提案する。

2. 実験方法

2. 1 インゴットの作製方法

Table 1 に鋳造試験に用いた 8%Cr ダイスイ鋼の組成を示す。8%Cr ダイスイ鋼は SKD11 をベースとし、耐磨耗性と靱性の向上を図った合金工具鋼である。当研究所ではマクロ偏析やザク生成挙動調査のためのモデル合金として着目してきた⁵⁾。Fig. 1 に本試験の下注ぎ鋳造実験方法の模式図を示す。真空溶解炉内で原料を約 30 kg 溶解した後、タンディッシュに注湯することで改良佐藤鋳型内へと鋳造した。鋳型は断熱性の高い多孔質耐火物 A と、優先冷却部に相当するムライト耐火物 B で構成されている。A、B 両耐火物の熱伝導率はカタログ値でそれぞれ 0.09 W/(m·k) および 4.2 W/(m·k) であり、断熱性耐火物部では緩やかに凝固が進行する一方で、ムライト耐火物部ではやや優先的に凝固される。これにより、低速凝固下で緩やかにデンドライトのブリッジングが生じ、ブリッジング直下への液相供給が遮断され、ザクが形成されることを狙っている。液相線・固相線温度は商用の熱力学計算ソフト Thermo-calcTM により計算し、鋳込温度は液相線温度から 220 K 高い温度を狙い鋳造した。Fig. 2 にインゴットの外観を示す。インゴットは本体部 (□ 58 mm × 200 mm) と押し湯部で構成される。インゴットは計 5 本、下注ぎ鋳造によって作製した。1 本は縦断面のマクロ観察によりインゴット内に発生するザクの分布調査に用い、残り 4 本は圧下率を変化させた熱間鍛伸試験で使用した。

Table 1. Chemical composition of 8%Cr-die steel (mass%).

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
1.0	0.9	0.4	8.0	1.8	0.2	Bal.

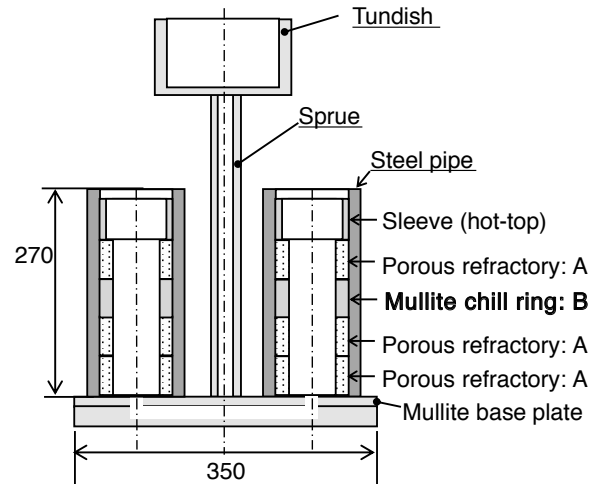


Fig. 1. Schematic of modified Sato-mold.

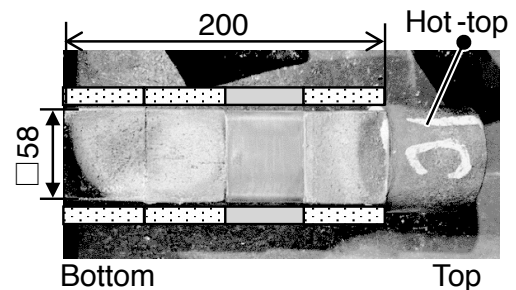


Fig. 2. Exterior photo of an ingot.

2. 2 鍛造試験片の作製方法とザク分布調査

インゴット内のザク分布を調査するため、1 本はサンプル中心軸を通るように垂直方向に縦断後、マクロ観察を実施した。残りの 4 本は後の鍛造試験で均一にひずみを導入するために全側面 2 mm のフライス加工を施した。その後、底面から 150 mm の高さで切断後、持ち手の SUS 支持棒を溶接することで、Fig. 3 に示す鍛造試験片へと加工した。また、鍛造前には水浸超音波探傷試験を行うことで、非破壊で内部のザク分布を調査した。

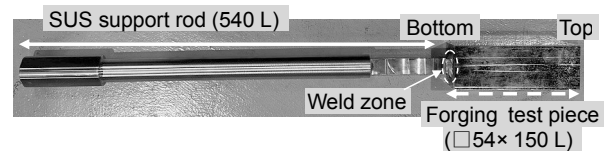


Fig. 3. Exterior photo of a forging sample.

2. 3 熱間鍛伸試験

熱間鍛造は大同特殊鋼(株)保有の 500 t 油圧プレス機を用いて行った。Fig. 4 に試験の模式図を示す。試験片を鍛造前にマッフル炉によって 1130 °C まで加熱し、その後鍛造試験機へと搬入した。試験中の抜熱を防ぐため、金型と試験片を加熱炉内で 1000 °C に加熱し、アイソサーマル鍛造を実施した。Table 2 に鍛造条件を示す。

熱間鍛造試験はインゴット Bottom から Top にかけて一方向、一軸圧縮によって行われ、狙いの圧下量を 30, 40, 50, 70 % の 4 水準とすることで、内部に導入するひずみ量を制御した。

Table 2. Hot forging conditions.

Sample No.	Target reduction rate [%]	Forged thickness [mm]	Actual reduction rate [%]	Feed rate [mm]
1	30	36	33.3	15
2	40	32	40.7	17.5
3	50	26	51.9	20
4	70	18	66.7	25

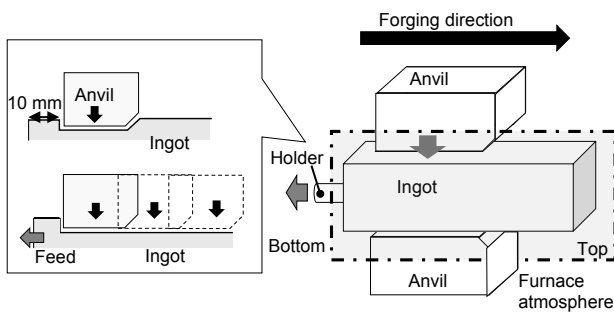


Fig. 4. Schematic of hot forging test.

2. 4 ザク圧着挙動調査

鍛造後の各サンプルを、中心軸を通るように長手方向に縦断し、断面のマクロ観察と浸透探傷試験を行うことで、圧下率ごとのザク圧着挙動を評価した。また、縦断面においてザク近傍箇所の観察用サンプルを切り出し、樹脂埋め後、観察面を鏡面に仕上げ、ナイトール水溶液で腐食後、光学顕微鏡にてミクロ観察を実施した。

2. 5 シミュレーションによるザクリスク評価

ザクの生成・圧着条件の評価は、凝固シミュレーションと鍛造シミュレーションを連成することで実施した。まず、ザクの生成挙動評価のため、商用の鋳造シミュレーションソフトウェア THERCAST[®] を使用し、本鋳造試験の再現計算を行った。得られた凝固中の温度プロファイルから、凝固過程におけるザクの生成指数の 1 つである Niyama 指数⁶⁾ を、式 (1) を用いて求めた。ここで、G[K/mm] は凝固中の温度勾配、R[K/s] は冷却速度である。

$$Ny = \frac{G}{\sqrt{R}} \quad (1)$$

なお Niyama 指数が小さいほど、凝固中デンドライト樹間の圧力低下が大きく、ザク欠陥が生成しやすいことを

意味している。

次に、熱間鍛伸試験によるザク閉塞挙動を再現するため、商用の FE (Finite Element) 解析ソフトウェア FORGE[®] を用いた計算を実施した。この時インゴットには内部にザクを有さない中実モデルを採用し、空隙閉鎖パラメータ Q 値⁷⁾ を、式 (2) を用いて算出した。ここで、 σ_m は静水圧応力、 σ_{eq} は相当応力、 ϵ_{eq} は相当ひずみ、 ϵ_f は鍛造後の相当ひずみである。

$$Q = \int_0^{\epsilon_f} \left(-\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d\epsilon_{eq} \quad (2)$$

また、このとき式 (1) で求めたインゴット内の Niyama 指数分布を、鍛造によるメタルフローに追従して再分布する取扱いとした。これにより、 Q 値、再分布された Niyama 指数および実際のザク残留位置を照合し、鋳造から鍛造工程まで一貫でザク圧着挙動を評価した。

3. 結果および考察

3. 1 インゴット内のザク分布

Fig. 5 にインゴット内におけるザクの分布調査結果を示す。(a)、(b) はそれぞれインゴット縦断面におけるマクロ観察、浸透探傷結果である。冷し金直下の部分において微細なザクが多数形成されていることが分かる。一方、(c) は鍛造前の複数サンプルに対して水浸超音波探傷試験を行った結果である。白色の部分は超音波の反射源であり、マクロ写真と浸透探傷結果よりザク部と判断した。複数の浸透探傷結果において、同じような形状の反射源が確認されていることから、鍛造前のザク形状はおおむね同程度に制御できていることを確認した。

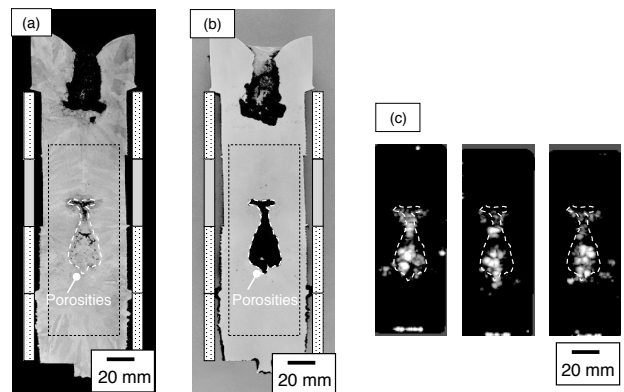


Fig. 5. Porosity distribution in an ingot.

3. 2 ザク圧着挙動の評価

Fig. 6 に鍛造後の、各圧下率における縦断面の観察結果を示す。圧下率 0 % (鋳造まま材) は比較として

マクロ写真を、圧下率 30 ~ 70 % 材については浸透探傷結果を示している。試験片内に残留したザクはおよそ Top-Bottom 方向に二分して点在する傾向が見られた。これは鑄込みまま時のザク形状がくびれを持ったような形状をしており、くびれ部が優先的に圧着したためと考えられる。また、圧下率が大きくなるにつれ、浸透探傷で検出されるザク領域が小さくなる傾向が確認され、圧下率 70 % では Top, Bottom 部ともに目視では残留ザクが観察されなかった。

Fig. 7 に各鍛造条件におけるザク部近傍のミクロ観察結果を示す。ミクロ写真から、いずれの圧下率における断面においても、デンドライト組織の残存が確認された。画像処理によって、各観察視野内におけるザク部の面積率を測定したところ、圧下率が増えるほどザク部の面積率が低くなる傾向が確認された。

Reduction rate (%)	Longitudinal section photographs	
0 (As cast)	Bottom	Top
30	Bottom	Top
40	Feed direction Reduction direction	
50		
70	No porosities were observed.	

Fig. 6. Longitudinal section photographs at each reduction rate.

Reduction rate = 30 %	40 %
Porosity ratio = 16.3 %	10.3 %
50 %	70 %
6.8 %	0 %

Fig. 7. Microstructural photographs of porosities.

3. 3 Niyama指数によるザク分布の評価

Fig. 8 に鑄造シミュレーションで求めた Niyama 指数の等高線図と、マクロ写真を比較した結果を示す。Niyama 指数が小さいほどザク生成リスクが大きいことを示しており、本試験ではおよそ Niyama 指数が 2.50 ~ 1.67 以下の領域でザクが形成されていることが確認された。このザク形成の Niyama 指数閾値は、過去の 8%Cr ダイスイ鋼で調査された報告値⁸⁾ (1.6 ~ 2.9) とおおむね一致している。

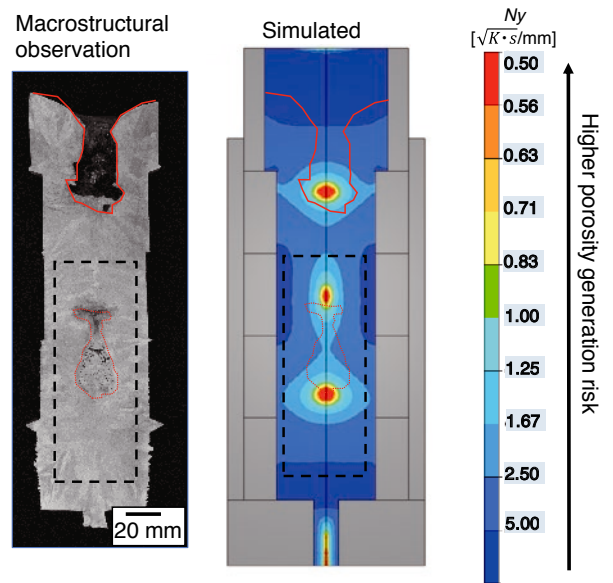


Fig. 8. Contour diagram of N_y .

3. 4 鍛造後のザク分布の評価

次に鍛造後インゴット内の実測したザク分布と、シミュレーションにより計算した Q 値、および鍛造により再分配された Niyama 指数の分布との比較を行った。圧下率 50 % の水準を例に、その比較プロセスを Fig. 9 に示す。(a) は縦断面の浸透探傷結果であり、Top 側と Bottom 側にザクの残留部が確認される。(b), (c) はそれぞれ鍛造後の Q 値のコンター図と、再分配された Niyama 指数のコンター図である。(d) はインゴット中心軸における、Bottom からの位置に対応する Q 値、Niyama 指数の値をそれぞれプロットした 2 軸グラフである。なお、持ち手近くの Bottom 部で Q 値が著しく大きい値を示している部分は、鍛造開始 1 打目の箇所である。2 打目以降の Q 値はおよそ距離によらず 0.3 ~ 0.4 程度であることが確認できる。一方、Niyama 指数分布は鑄込みまま時の情報を引き継いでいるため、Bottom と Top 部に極小値を有する分布となり、この Niyama 指数の極小値をもつ箇所が、シミュレーション上においてザク残留リスクが最も高い位

置であると考えられる。Fig. 10 は実測のザク残留位置と、シミュレーション上においてザク残留リスクの高い位置を圧下率ごとにプロットしたグラフである。Bottom部のザク位置に関してはシミュレーションによる予想位置と実測位置とよく一致した一方、Top部のザク位置に関しては、圧下率によらず実測位置と予測位置で乖離があった。これは、本試験がBottomからTopにかけて一方向に鍛造しているため、鍛造後期ではシミュレーションと実測の乖離が蓄積され、ズレが大きくなっているものと考えられる。よって今回、ザク閉塞条件の評価に用いる範囲は、シミュレーションと実態の整合性が確認できた、インゴット最Bottomから1/2Topまでの範囲とした。

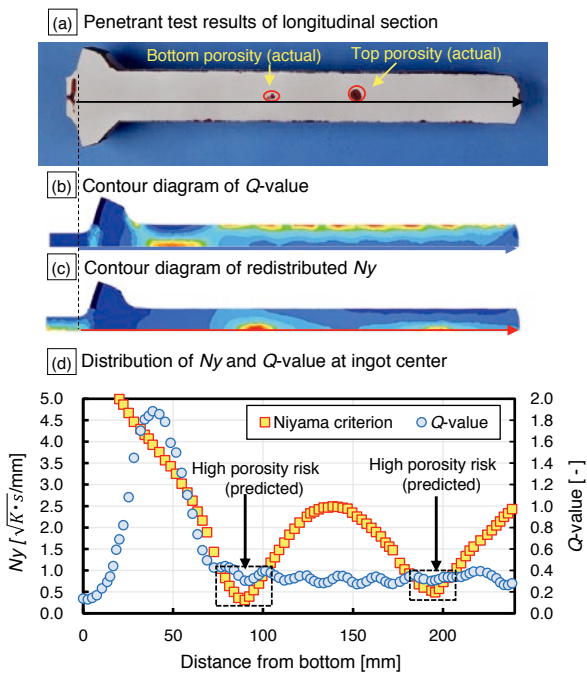


Fig. 9. Evaluation process of residual porosity.

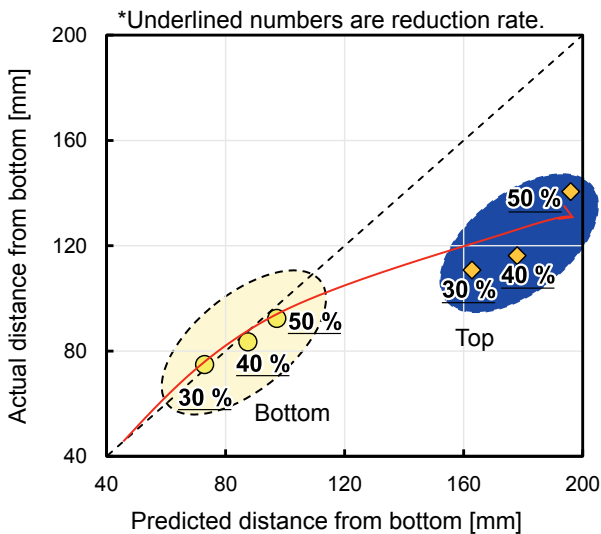


Fig. 10. Relationship between actual and predicted porosity location.

3. 5 ザク圧着条件の整理

Fig. 11 に Niyama 指数と Q 値を考慮したザク閉塞条件を整理したグラフを示す。圧下率ごとに、サンプル中心軸の各点について、Niyama 指数と Q 値の対応をプロットしている。なお、浸透探傷試験結果と照合し、ザクが残留している点を×、ザクが見られない点を○として整理している。この結果より、もともと铸造まま時の状態でザク生成リスクが高い領域、つまり Niyama 指数が低い領域ではザクの圧着のためには、より高い Q 値が必要であり、Niyama 指数が高い領域ではより低い Q 値でザクが圧着される可能性が示唆された。得られたプロットから圧着のための条件の定量化を試みた。铸造・鍛造工程通しておよそ式 (3) を満たすことでザクの圧着が促進される可能性が示唆された。

$$N_y \times Q \geq 0.2 \tag{3}$$

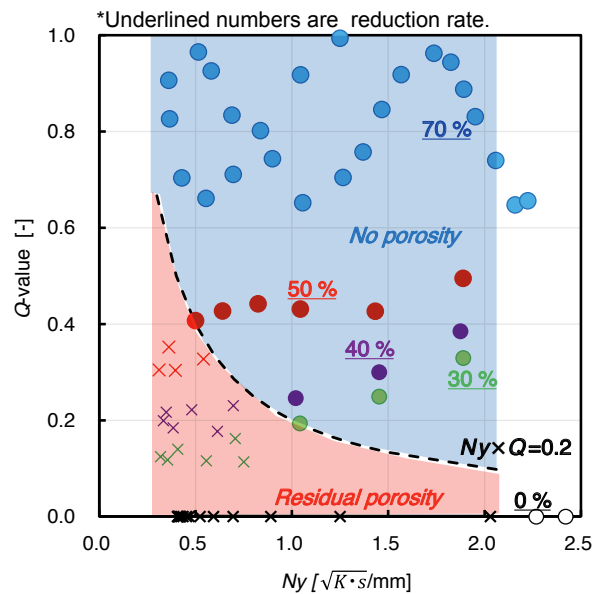


Fig. 11. Residual porosity prediction considering both Niyama parameter and Q -value.

4. 結 言

8%Cr ダイス鋼を改良佐藤鋳型へ注湯することで、微細なザクを多数内包するインゴットを作製し、圧下率を変えた熱間鍛伸試験へ供することでザク閉塞条件を調査した。また、試験を再現するように铸造・鍛造連成シミュレーションを行い、ザク生成指標 (Niyama 指数) とザク閉塞パラメータ (Q 値) を算出し、実験結果と照合することでザクの圧着条件を評価した結果、以下の結

論を得た。

・鍛造試験後に確認されたザクの領域は、圧下率を上げるにつれ小さくなる傾向が見られた。特に圧下率 70 % の水準では、浸透探傷試験においてザクの残留が確認されなかった。

・Niyama指数が低い領域で生成したザクは、圧着のためにより高い Q 値が必要であり、Niyama指数が高い領域では、より低い Q 値で圧着する可能性が示唆された。特に本試験系では $N_y \times Q \geq 0.2$ を満たすことで、ザクの残留リスクを抑制できる可能性が示唆された。

(文 献)

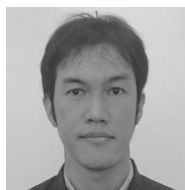
- 1) 柿本英樹, 有川剛史, 岸本敦: 神戸製鋼技報, 64 (2014), 2, 33.
- 2) 岸本敦, 有川剛史, 香川恭徳, 高原浩司: 塑性と加工, 60(2019), 167.
- 3) 佐藤文人, 江坂久雄, 篠塚計: 鉄と鋼, 99(2013), 108.
- 4) 辻知輝, 杉野敦, 岡島琢磨: 電気製鋼, 92(2021), 45.
- 5) Y. Sumi, S. Narita and M. Yamashita: ISIJ International, 63(2023), 1131.
- 6) 新山英輔, 内田敏夫, 森川穰, 斎藤茂: 鋳物, 54 (1982), 507.
- 7) 荒木重臣, 津田充, 松下富春, 佐藤隆夫, 落敏行: 塑性加工春季講演会, (1986), 383.
- 8) 鷺見芳紀, 宮原広郁: 材料とプロセス, 36(2023), 429.



千羽克征



中川純一



鷺見芳紀