

大型のダイカスト金型に適した 高靱性鋼

河野正道

大同特殊鋼(株)

大割れを回避するため、高靱性鋼 DHA™-GIGA を開発した。大きな金型の内部でも、晶出炭化物や非金属介在物が少なく、焼入れ組織も微細となる。靱性の高さは厚さ 600mm のサンプルでも確認された。

1. はじめに

近年、型締め力 6000t 以上の超大型ダイカストマシンの登場¹⁾によって、多数のパーツを一体化した大型車体部品の実用化が進んでいる。超大型ダイカストに用いられる非常に大きな金型は、複数のインサートブロックを組み上げて構成するタイプが多い。このような分割式では、金型寸法精度の厳格な管理と、組み上げ技術の高さが求められる。また、铸造品にパーティングラインが転写されやすい。

今後、上記の問題を回避するため、インサートブロックの分割数削減や一体化が進むと予想される。分割数を減らせば、個々の金型は大きくなる。

一般に、既存鋼の大きな金型は中心部側の靱性が

低い。原因は、鋼塊の大きな晶出炭化物が残存すること、焼入れ組織が粗大なベイナイトになること、である。このため亀裂が発生・進展しやすく、大割れ²⁾が懸念される。

上記の認識から、大型のダイカスト金型に適した DHA™-GIGA を開発した。金型の中心部側でも、大きな晶出炭化物が少なく微細なベイナイト組織を呈し、高靱性である。こうして大割れリスクを軽減し、超大型ダイカストのインサートブロック大型化ニーズに応える。本稿では、DHA-GIGA の開発方針と諸特性を紹介する。

2. DHA-GIGA の開発

2.1 方針

ダイカスト金型の大割れは重大なトラブルである。意匠面（あるいは押出しピン穴）と水冷孔を亀裂が貫通し、冷却水や水蒸気が意匠面に漏れる。亀裂が深いことから溶接補修は困難な場合が多い。その大割れを高靱性によって回避し²⁾、計画された金型寿命への到達を目指す。

また、高靱性に加えて充分な被削性も確保し、大きな金型の加工量の多さに対応する。

2.2 成分系と焼入れ温度

目指す組織は、①V系の大きな晶出炭化物が僅少、②焼入れ速度が小さくても微細なベイナイト（理想はマルテンサイト）である。

①のため、V量を既存鋼より大幅に削減した。この結果、焼入れ時の微細なピン止めVCも減少し、結晶粒の粗大化が懸念される。そこで、通常より低温の焼入れで粒成長を抑制する。

低温化は、炉のダメージ軽減やCO₂排出量削減にもつながる。超大型ダイカストの金型は焼入れ温度

の自由度が高いと考えた。サイズの関係上、1型～数型で炉の積載重量上限に達し、既存鋼と混載されにくいと予想したためである。

②に対しては、Mn-Cr-Moの総量と比率を適正化した。こうして焼入れ性向上³⁾を更に進めると同

時に、良好な球状化焼なまし性も確保した。

また、充分な被削性⁴⁾の観点から低Siを避けた。被削性と相反する耐ヒートチェック性⁵⁾は、高硬化・表面处理⁶⁾・離型剤微量塗布⁷⁾・溶接補修⁸⁾などで軽減を図る。

3. 小鋼塊材の特性

3.1 供試材の化学成分

DHA-GIGAとの比較材2鋼種の成分を表1に示す。SKD61はダイカスト金型の代表である。NADCA GRADE C登録鋼種のDH31-EXTMは焼入れ性向上元素の量が多く、既存鋼の中で焼入れ性が最も高い。

全3鋼種を150kgの小鋼塊に鑄込み、充分なソーキングを実施した。凝固の速さと高温長時間の保持によって、大きな晶出炭化物の残存は回避される。ソーキング後、鋼塊をφ80mmの棒鋼に鍛造し、球状化焼なまし(SA)で229HB以下に軟化させた。このSA材を用いて、各種の評価をおこなう。

3.2 変態温度

金型の焼入れでは、急冷される端部がMs点で、緩冷となる中心部側はBs点で変態する。Bs点がMs点と同等に低い鋼種、すなわち焼入れ性の高い鋼種は、中心部側の高靱性化に有効である。

3℃/minの緩冷におけるBs点をMs点と比較すると(表2)、SKD61は約70℃も高温である。焼入れ性の高いDH31-EXでも、Ms点に対して約20℃高い。DHA-GIGAではBs点がMs点と同等であり、3℃/minは臨界冷却速度に相当すると考えられる。

3.3 靱性

焼入れ速度1.35℃/minの緩冷における靱性は、

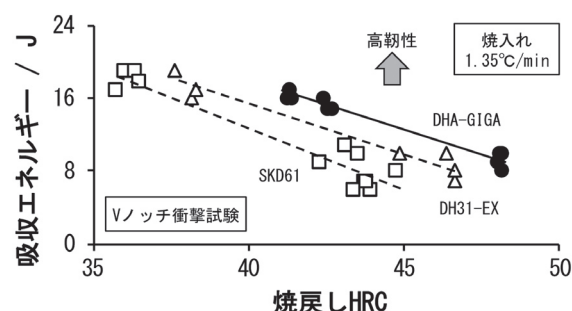


図1 緩冷材の靱性

鋼種によって顕著に異なる(図1)。8Jに対応する硬さは、SKD61、DH31-EX、DHA-GIGAについて、それぞれ43～44HRC、46～47HRC、48～49HRCである。焼入れ性の高い鋼種ほど靱性を確保できる硬さも高い。

上記のVノッチ吸収エネルギー8Jは、Uノッチ衝撃値20J/cm²に相当する⁹⁾。なお、焼入れ速度として靱性への影響が大きい¹⁰⁾低温域に注目した。以下、本稿においては同様である。

42HRCにおける靱性は、焼入れ速度と鋼種によって大きく変化する(図2)。SKD61が30℃/minの急冷で22Jと高位な理由は、大きな晶出炭化物が残存せず(3.1章)かつマルテンサイトだから(3.2章)である。一方、粗大なベイナイトになる1℃/minの緩冷では約10Jに低下する。DH31-EXの挙動は

表1 供試材の化学成分(mass%, 真空溶解)

鋼	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	備考
JIS SKD61	0.38	0.9	0.4	5.2	1.2	0.8	AISI H13
DH31-EX	0.34	0.3	0.8	5.7	2.5	0.6	NADCA GRADE C

表2 等速冷却の変態点

鋼種	Ms点 (48～12℃/min)	Bs点 (3℃/min)	臨界冷却速度 (マルテンサイト)
SKD61	297～305℃	371℃	12℃/min
DH31-EX	298～303℃	322℃	4℃/min
DHA-GIGA	311～316℃	316℃	3℃/min

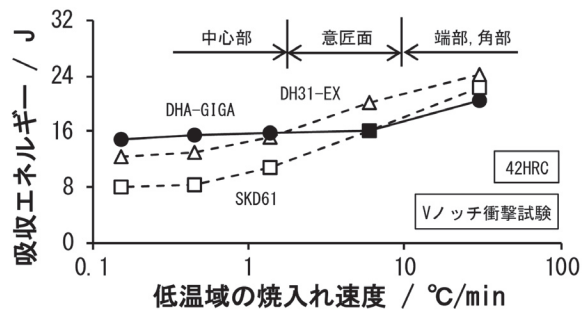


図2 焼入れ速度と靱性の関係

SKD61に類似であるが、 $\leq 1^\circ\text{C}/\text{min}$ でも12Jを確保する。DHA-GIGAは急冷側で既存鋼より低位な反面、 $\leq 6^\circ\text{C}/\text{min}$ では約15Jの高位安定である。DH31-EXに対しては、 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{min}$ で優位となる。

図2上部には、非常に大きな金型の該当部位を示した。真空焼入れシミュレーション結果からの推測である。これらの情報から、既存鋼の大きな金型でも、端部や角部は高靱性と考えられる。一方、中心部側はDHA-GIGAの方が優位と予想される。

破面は靱性によって異なる(図3)。高靱性な $30^\circ\text{C}/\text{min}$ では、いずれの鋼種も破面が起伏に富み、幅側の端部には延性破壊域(図中、矢印)も認められる。靱性の鋼種間差が大きい $1.35^\circ\text{C}/\text{min}$ では、DHA-GIGAにのみ延性破壊域が確認される。

組織にも、靱性と破面に応じた差異が認められる(図4)。表2と併せ、 $30^\circ\text{C}/\text{min}$ はマルテンサイト、 $1.35^\circ\text{C}/\text{min}$ はベイナイトと推測される。ベイナイトブロックの厚さはDHA-GIGA<DH31-EX<SKD61である。焼入れ性の高いDHA-GIGAでは、緩冷

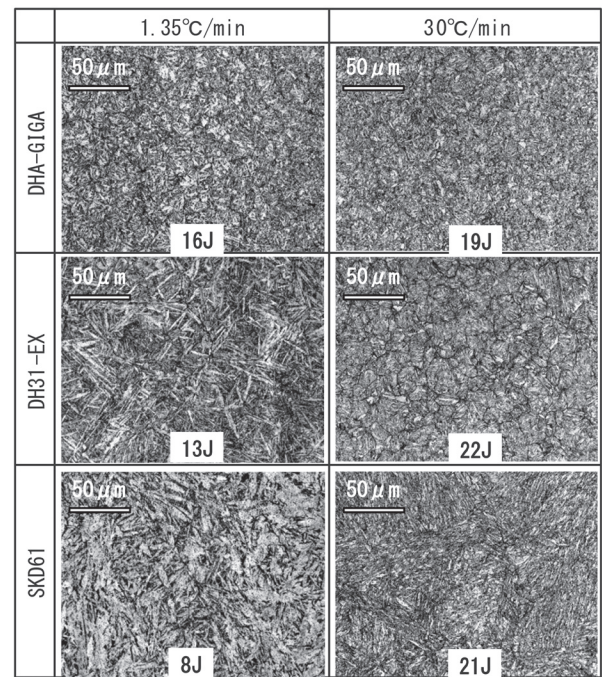


図4 焼入れ速度と組織の関係

でも低温で変態した微細なベイナイトが得られる。

3.4 SA材の被削性

SKD61のエンドミル加工では(図5)、工具摩耗量は初期の急増後に進行が非常に遅くなる。DHA-GIGAを加工した場合の摩耗は、初期には進行が遅く、その後にやや加速する。2鋼種の最終的な摩耗量は同等である。一方、DH31-EXは(図6)、摩耗量 $300\mu\text{m}$ の切削距離がSKD61の約半分である。

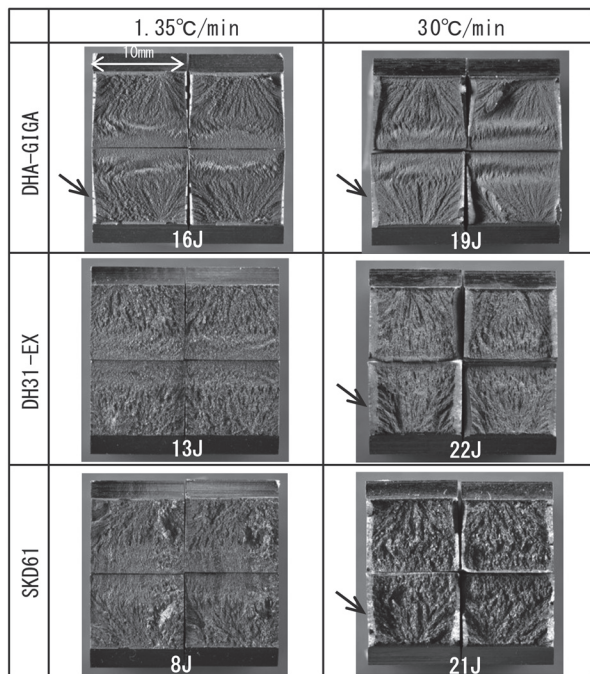


図3 焼入れ速度と衝撃破面の関係

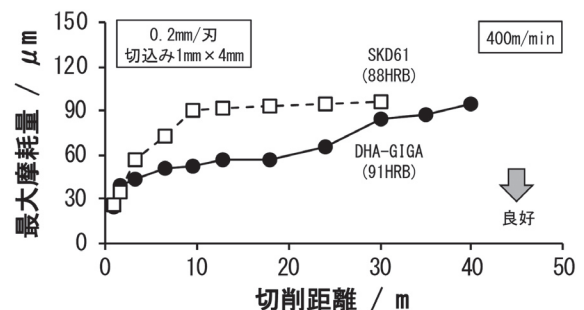


図5 切削工具の摩耗(DHA-GIGA)

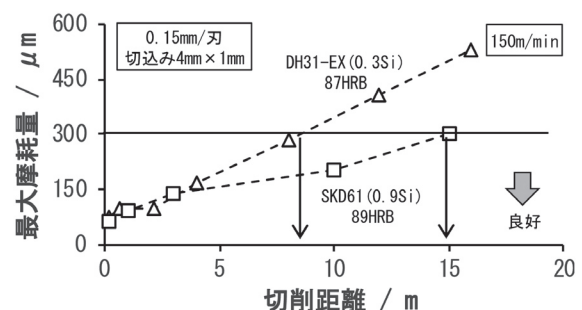


図6 切削工具の摩耗(既存鋼)

以上より、DHA-GIGAのエンドミル被削性はDH31-EXより高く、SKD61に近いと考えられる。

ドリル加工の工具寿命では(図7)、DHA-GIGAはSKD61に劣り、プラスチックの射出成形に用いられるSUS420J2系と同等である。一方、43HRC材のガンドリル加工では¹¹⁾、SKD61改良鋼のDHA-WORLDに対し、DHA-GIGAは工具の負荷が約半分である。

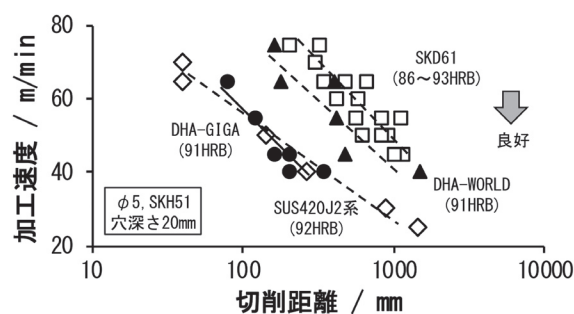


図7 ドリルの寿命

被削性の市場評価はDH31-EX<DHA-WORLD<SKD61であり、Si量の少ない鋼種ほど難加工である⁴⁾。DHA-GIGAがDHA-WORLDよりガンドリル加工性に優れることは、Si量の多寡と矛盾しない。金型加工の実際に即した評価が今後の課題である。

3.5 耐ヒートチェック性

φ72mmの円柱端面に対し、560℃の高周波加熱と噴射水による60℃への冷却を繰り返した。この温度振幅を5000サイクル付与し、ヒートチェック(熱疲労亀裂)を発生させた。

試験後は、加熱冷却面の4部位を90°間隔で切出し、各部位で最も深い亀裂の1本を選別する。これら4本の平均値を亀裂の深さとした。

図8および図9に示す通り、耐ヒートチェック性はSKD61<DHA-GIGA<DH31-EXである。Si量の少ない鋼種⁵⁾ほど亀裂が浅い。DHA-GIGAは、汎用鋼としては良好である。

試験後の表面は軟化している(図10)。深さ約1.5mmまでの硬さはSKD61<DH31-EX<DHA-GIGA

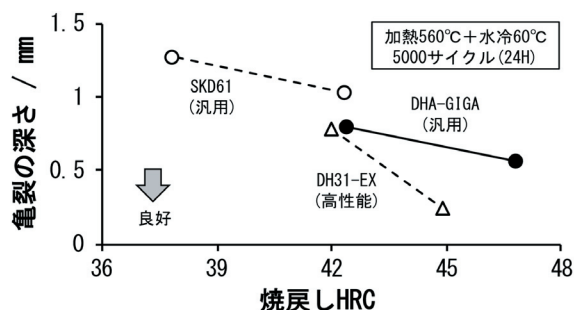


図8 耐ヒートチェック性

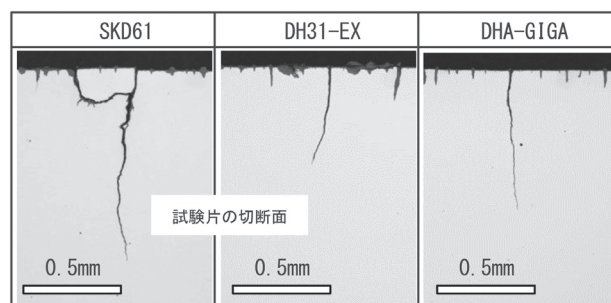


図9 内部に進展したヒートチェック

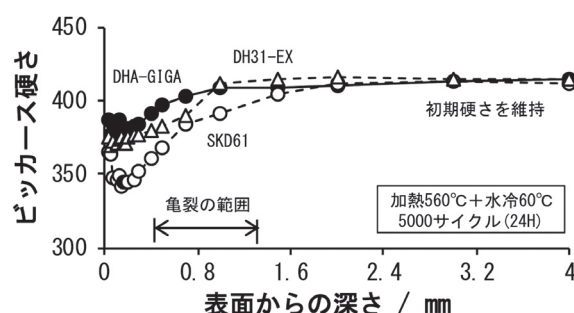


図10 ヒートチェック試験片の軟化

であり、軟化抵抗はDHA-GIGAが最も高い。図8における4部位の亀裂はSKD61が0.8~1.3mm、DH31-EXは0.5~1.0mm、DHA-GIGAは0.4~1.1mmであった。この亀裂深さは、軟化した領域の深さと一致する。

3.6 その他の特性

ヒートチェックを発生させる熱応力 σ は、次式(1)と(2)によって与えられる。

$$\sigma = C \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \text{式(1)}$$

$$\Delta T = f(\lambda) \quad \text{式(2)}$$

ここで、Cは定数、Eはヤング率、 α は熱膨張係数、 ΔT は温度差、 λ は熱伝導率である。 σ による熱疲労への抵抗力が高温強度である。ヒートチェック抑制には、低ヤング率、低熱膨張係数、高熱伝導率、高強度が有効である。

図11に示す通り、42HRC材の室温における熱伝導率[W/m/K]は、SKD61が25~29、DHA-GIGAは

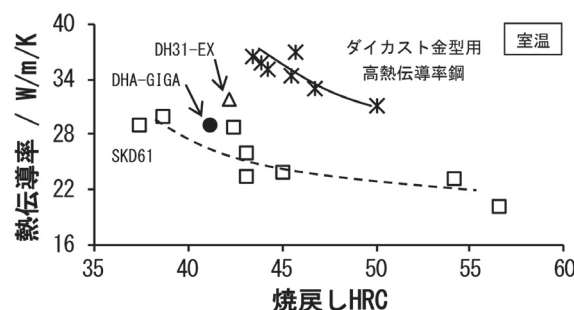


図11 熱伝導率

29、DH31-EX は 32 である。DHA-GIGA は SKD61 よりやや高熱伝導率と考えられる。DH31-EX は高熱伝導率鋼には及ばないが、他の 2 鋼種よりは優位である。

図 12 に示す通り、意匠面に相当する 200 ～ 600℃ における熱膨張係数の順列は、DH31-EX < DHA-GIGA < SKD61 である。ただし、鋼種間差は顕著で

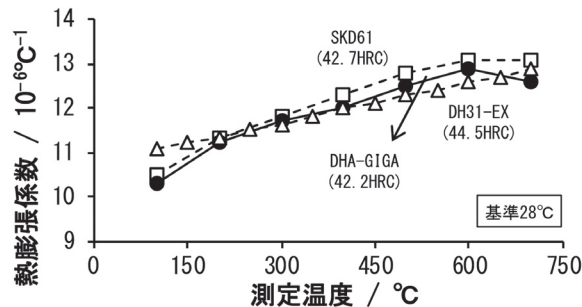


図 12 平均熱膨張係数

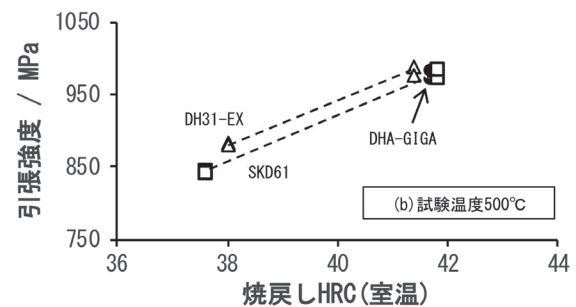
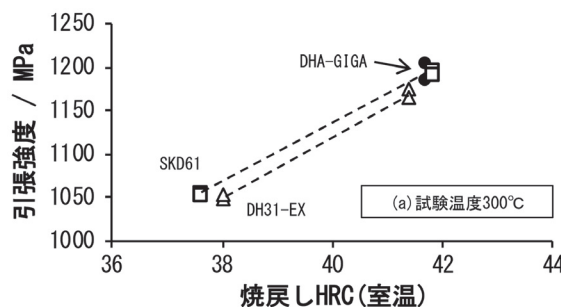


図 13 温度と引張強度の関係

4. 大鋼塊材の評価

4.1 素材と検証工程

工程の概略を図 14 に示す。DHA-GIGA の 10t 鋼塊から鍛造した厚さ 600mm で 2.4t の直方体を 12.5Bar で真空焼入れした。中心部の熱電対で計測

された焼入れ速度は約 1.7℃ / min である。焼入れ後は複数回の焼戻しで 42HRC に調質し、端部と中心部から H 方向で衝撃試験片を 3 本ずつ精加工した。

厚さ 355mm の SKD61 大気溶解材からは、焼

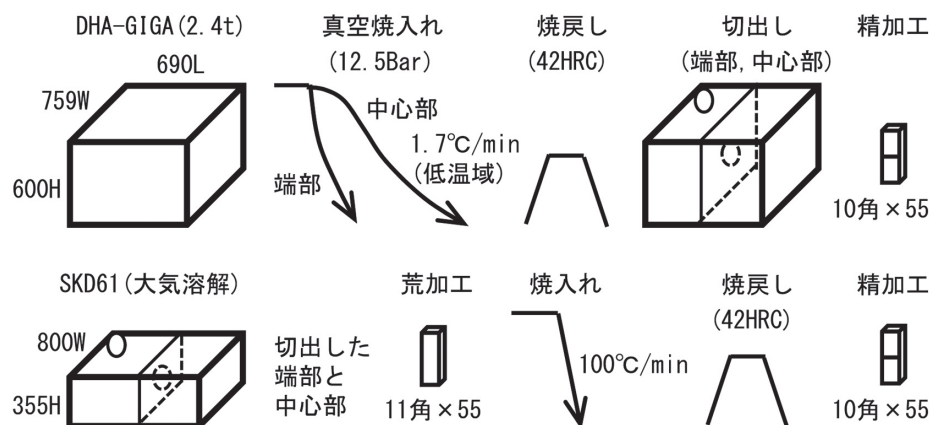


図 14 大鋼塊材を用いた検証

入れ前に端部と中心部の荒加工試験片を4本ずつ作製する。100℃/minの焼入れと42HRCへの焼戻し後、衝撃試験片を精加工した。

4. 2 韌性

日本国内の慣例に準じ²⁾、Uノッチの衝撃値で評価した。表3に示す通り、DHA-GIGAは急冷される端部が約56J/cm²と高位である。焼入れ速度1.7℃/minの中心部は、端部には及ばないものの、33～38J/cm²の高韌性である。SKD61の端部は45～53J/cm²と良好である。中心部は、最高値がDHA-GIGAと同等の36J/cm²である反面、最低値は大割れが懸念される20J/cm²未満²⁾となった。

中心部の組織を焼入れ速度や韌性に対応付けて

図15に示す。DHA-GIGAの1.7℃/minはベイナイトと判断されるが(表2)、低温で変態するため微細である。

この組織は、SKD61の2.2℃/minにおける粗大なベイナイトと対照的である。

SKD61の100℃/minは微細なマルテンサイトであるが、衝撃値のバラつきが大きい。特に、16J/cm²の低衝撃値であった水準では、破面に晶出炭化物²⁾が確認された。

DHA-GIGAの中心部には、V系の大きな晶出炭化物は認められず、衝撃値のバラつきも小さかった。焼入れ性の高さに加え、高韌性化のもう1つの要件である「大きな晶出炭化物が少ないこと」を大鋼塊でも達成した。

表3 Uノッチ衝撃値の比較

	焼入れ	端部	中心部
DHA-GIGA	600×759×690 12.5Bar	55～56J/cm ² (M)	33～38J/cm ² (微細なB)
SKD61	11角×55 100℃/min	45～53J/cm ² (M)	16～36J/cm ² (M)

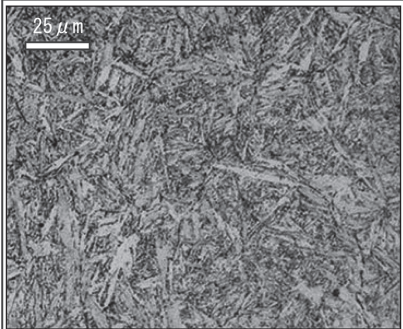
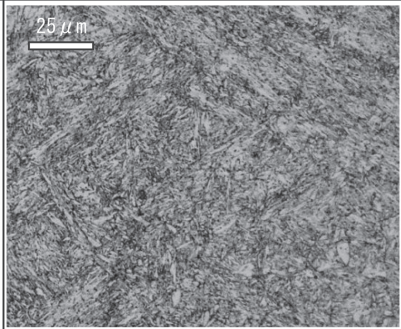
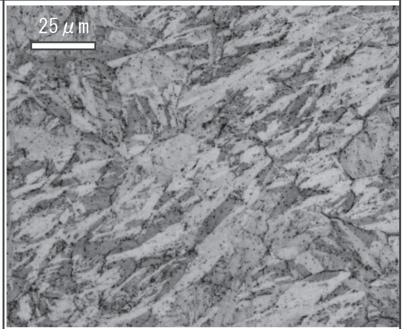
図14の焼入れテスト		参考データ
		
DHA-GIGA (600H×759W×690L)	SKD61 (355H×800Wから切出し11角×55)	SKD61 (250Hで0.5tの模擬型)
1.7℃/min, 33～38J/cm ²	100℃/min, 16～36J/cm ²	2.2℃/min, 17～20J/cm ²

図15 組織と衝撃値

5. おわりに

DHA-GIGAの狙いは、大きな金型の大割れを高韌性によって回避することである。超大型ダイカストの金型が分割数の削減で更に大型化するケースを想定した。一方で、小さな金型の方が有益な場合もある。流通・加工・熱処理・表面処理が確立された既存鋼の利点は多い。

既存鋼の最大活用と併せ、超大型ダイカストの多様化と高度化にDHA-GIGAで貢献してゆく。

謝辞

大鋼塊材の評価に協力いただいた無錫頂鋒日嘉金屬制品有限公司様に深謝の意を表する。

DH31-EX、DHAは大同特殊鋼株式会社の登録商標または商標です。

参考文献

- 1) 林文勇：型技術，Vol.38，No.7（2023），p.64-66.
- 2) 井上幸一郎 他：電気製鋼，Vol.76，No.4（2005），p.287-292.
- 3) K. Namiki, et al.: NADCA DIE CASTING CONGRESS & TABLE TOP（2013）.
- 4) 藤井利光 他：電気製鋼，Vol.74，No.2（2003），p.83-92.
- 5) 河野正道：アルトピア，Vol.50，No.6（2020），p.25-30.
- 6) 北川利博 他：型技術者会議 2010 講演論文集（2010），p.212-213.
- 7) 古川雄一 他：2004 日本ダイカスト会議論文集（2004），p.63-68.
- 8) 梅森直樹 他：電気製鋼，Vol.85，No.1（2014），p.63-70.
- 9) 河野正道 他：型技術，Vol.39，No.8（2024），p.92-93.
- 10) 渡辺憲一 他：型技術者会議 2011 講演論文集（2011），p.200-201.
- 11) 河野正道 他：2024 日本ダイカスト会議講演論文集（2024），p.1-6.