

博士学位論文

実操業の品質向上に適用する浸炭熱処理における組織
と変形の高精度制御

High precision control of microstructure and deformation in
carburizing heat treatment applied to quality improvement

埼玉工業大学大学院 工学研究科

博士後期課程 電子工学専攻

杉本 剛

令和元年 9 月

目次

1. 緒論	5
1.1. 緒言	6
1.2. 熱処理実操業の動向と品質課題について	9
1.2.1. 浸炭熱処理における商品および生産プロセスの動向	9
1.2.2. 熱処理ひずみ・品質およびそのばらつきの最小化	11
1.2.3. 熱処理部品の高強度化動向	17
1.3. 浸炭熱処理部品の品質シミュレーションに関する従来の研究とその動向	20
1.3.1. 浸炭手法のシミュレーションに関する研究動向	21
1.3.2. 冷却手法のシミュレーションに関する研究動向	23
1.4. 浸炭実操業に熱処理シミュレーションを適用する上での課題	24
1.5. 本研究の目的と構成	26
2. 浸炭熱処理シミュレーション基礎理論	29
2.1. 概論	30
2.2. 熱処理シミュレーションとその構成	31
2.2.1. 浸炭シミュレーションの構成	32
2.2.2. 焼入れシミュレーションの構成	33
2.3. 熱処理シミュレーションの構成方程式	36
2.3.1. 変態と熱力学	36
2.3.2. 混合測	36
2.3.3. 熱伝導方程式	37
2.3.4. 拡散方程式	37
2.3.5. 硬化測	38
2.3.6. 変態塑性	38
2.3.7. 応力-ひずみ速度の相関関係	40
2.3.8. 変態塑性の応力依存性	43
2.3.9. 硬さの導出	45
3. 実操業における浸炭熱処理シミュレーションの検証	47
3.1. 集団熱処理での熱処理品質のばらつきとそのシミュレーション	48
3.1.1. 実験方法	49
3.1.2. 計算方法	52
3.1.3. 実験結果と計算結果の比較	53
3.1.4. 結果と考察	54
3.1.5. 流体解析による熱伝達率の導出	56
3.1.6. 流体解析によるひずみ解析結果	57
3.1.7. 議論	58
3.1.8. 集団荷姿での熱処理シミュレーション小括	58
3.2. 歯車での熱伝達率が熱処理変形に与える影響	60
3.2.1. 実験方法	60
3.2.1.1. 用いたギヤと熱処理条件	60

3.2.1.2.	冷却速度の測定	61
3.2.1.3	熱処理シミュレーションの実施	62
3.2.1.4.	冷却に関する結果と考察	66
3.2.1.5.	熱伝達率の同定	68
3.2.1.6.	実験及びシミュレーションでの歯面変形の解析	68
3.2.1.7.	まとめ	70
3.3.	集団熱処理品質シミュレーションの展望	71
4.	浸炭熱処理シミュレーションの精度検証	75
4.1.	ASME V&V について	76
4.2.	PIRT による熱処理シミュレーション品質の定性的な検証	80
4.2.1.	浸炭焼入工程	80
4.2.2.	PIRT の内容	81
4.2.3.	プロセスパラメータ	81
4.2.4.	設計パラメータ	82
4.2.5.	熱処理シミュレーションモデル	83
4.2.6.	熱処理 PIRT	85
4.3.	品質工学手法による熱処理シミュレーション品質の定量的な検証	85
4.3.1.	品質工学による感度解析	85
4.3.2.	熱処理解析モデルと解析手法	86
4.3.3.	結果と考察	87
4.3.4.	まとめ	87
4.4.	熱処理シミュレーションの改良すべき点	90
付録 PIRT 表		81
5.	高強度熱処理の課題と高濃度浸炭シミュレーション	97
5.1.	高強度熱処理シミュレーションの必要性和研究動向	98
5.2.	実験方法	99
5.3.	浸炭解析の実施	100
5.4.	結果と考察	102
5.4.1.	一次浸炭に関する検証	102
5.4.2.	二次析出に関する検証	104
5.4.3.	Cr 偏析の検証	105
5.4.4.	二次析出後の硬さ	107
5.5.	まとめ	107
5.6.	高強度熱処理シミュレーションの今後の展望	108
6.	熱処理シミュレーションを実工程に結び付ける為に	111
6.1.1.	IoT 及び MI について	112
6.1.2.	流体解析, 沸騰現象の解明	113
6.1.3.	大規模解析	114
7.	総括	117
	本研究に関連する業績	121
	謝辞	125

第一章 緒論

1. 1. 緒言..

人間が道具を作成するようになって以来、加工技術の進歩により石器、陶器、銅器とより高機能な道具が作成されるようになってきている。鉄の利用は紀元前 25 世紀ごろのアナトリアに始まり日本では紀元前 1 世紀ころからたたら製鉄による鉄を原料とした道具の制作が始まっている。以来、鉄は機械材料の主力となり、4500 年を経た現在に於いても変わらず主力である^[1]。鉄は炭素等の強化元素を含侵させ、焼入れと呼ばれる組織制御を行う事で性質が大きく変化するという特性によって古来から現代まで機械産業の中心にあり続けている。

1769 年にキューニョにより石炭で水を沸騰させて駆動力を生成する蒸気機関を動力とする自動車が発明された。その後は、電気自動車が発売され、1873 年には電気式のトラックが発明され、自動車は実用の物となっていく。1886 年にゴットリーブ・ダイムラーやカール・ベンツにより化石燃料を燃焼させてその熱エネルギーを直接駆動力に変換する内燃機関が発明され、以降現在まで内燃機関自動車 (Inner Convection Engine 車, ICE 車) は自動車の主力のままである^[2]。

実用面で有益となって以来、そのサイズ、必要台数等において自動車は重量ベースで人間の製作する機械の主要な位置を占める様になった。1997 年にトヨタ自動車より動力源にモーターを併用するハイブリッドカーのプリウスが発売され、それ以降動力は電気、内燃機動力も含め複雑な構成になりつつある^[3]。

近年の自動車に対する CO₂ 排出削減要求の高まりから、急速に自動車動力源のハイブリッド化・電動化は加速しつつある。2019 年には中国にて NEV 規制 (New Energy Vehicle 規制) が導入され、自動車メーカーは最低でもその生産台数の 10% を EV としなくてはいけなくなり、動力の電動化の流れは不可避のものとなった。

ハイブリッド車両のパワートレインでは従来車両のエンジン、トランスミッションに加え、発電機、専用の増/減速機、動力分割機構、駆動用モーター等多数のコンポーネントが必要となる (Fig. 1.1.)。これら多数のコンポーネントを ICE (内燃機) 車同等のスペースに収める為、ハイブリッド車のコンポーネントでは従来にない小型化が要求され、またこれらの複数の動力を統合するための駆動系ユニットには急速な進歩・変革が求められるようになる。更にそれら新しい方式についての覇権争いを征しさらにそのデファクトスタン

ダード化といった過程を経ての生産方式の最適化及び量産化手法・手段をいち早く確立するためには更なる短時間開発が要求される^[4]。

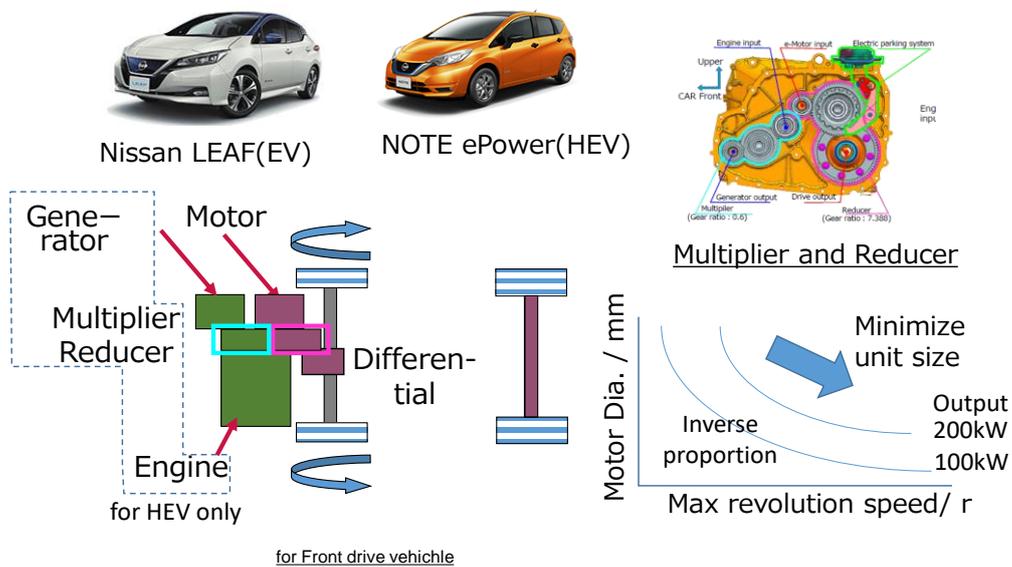


Fig. 1. 1. 自動車の電動化と必要なコンポーネンツ

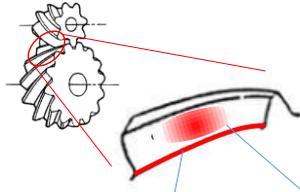
小型軽量の動力源，駆動系を実現するためには小型化による各部の負荷入力上昇に耐える各部品の高強度化が重要となる．Table 1. 1. に示すようなエンジン・モーター・動力伝達系の主要部品について強度要求特性とその達成の方向性を示したものである．駆動系ユニットの構成部品においては従来から面疲労強度，曲げ疲労強度が必要とされている．今後，エンジンに比べ歴史の浅いモーターでは進歩の速度は急速で要求値や達成目標の値は飛躍的に向上し，各特性値においては2倍以上の高回転化による滑り速度上昇，数10%程度のユニットの小型化による高面圧化が要求されると推測される^[5]．また，それらに伴い面疲労強度への要求が高まることが想定される．

Table1. 1. 自動車の鋼部品と高強度化の方策

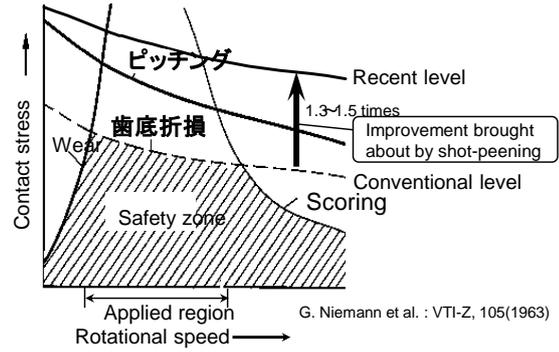
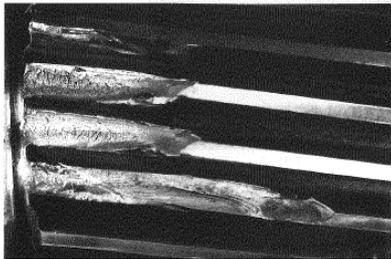
ユニット	部品	要求強度	高強度化手法
エンジン	回転部品 例；クランク	曲げ疲労強度 耐摩耗性	高強度材 高周波焼入れ 窒化 浸炭
	ロッド部品 例；コンロッド	座屈強度 引張強度	高強度材 浸炭 ショットピーニング
モーター	センターシャフト	曲げ疲労強度 耐摩耗性	高周波焼入れ 調質(焼入れ)
トランス ミッション	歯車	ピッチング疲労強度 曲げ疲労強度 (衝撃強度)	浸炭 窒化 ショットピーニング
	CVT プーリー	面疲労強度 曲げ疲労強度	浸炭 窒化 ショットピーニング

駆動系歯車を小型化するために必要な高面圧・高回転で運転した際の懸念点を Fig. 1. 2. に示す。歯元折損，歯面の疲労破損等の破損形態が懸念され，その中でも高回転化では特にスコアリング，ピッチング等の破損が懸念されるためこれらの対策が必要となってくる。また，ハイブリッド車・電動車ではエンジンの発するノイズが小さくなり，相対的に歯車の発するノイズがとりわけ強調されるようになる。小型軽量で高速回転する歯車では上述の小型高面圧，高滑り速度かつ低ノイズに対応に一挙に対応する方策としての高精度化が重要課題となってくる^{[6], [7]}。このように技術革新の波は従来の延長線上とは全く異なる目標値を産み，また異分野の技術領域に踏み込むような変化の必要性を急激に求めており，要求される技術レベルは激変しつつある。

歯車における強度課題 歯車の破損



歯底；衝撃・折損・塑性流動 等



歯面；ピッチング・摩耗 等

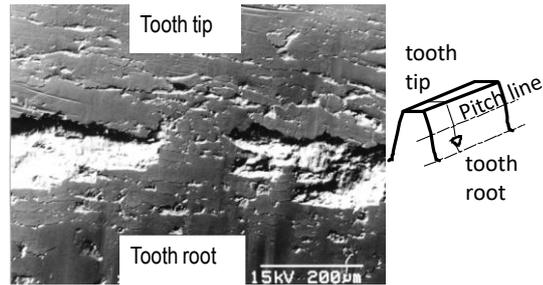


Fig. 1. 2. 歯車の要求強度

そしていずれの場合でもこのように自動車部品の性能を向上させるためにはその品質や製造条件をより一層高精度に定め、部品製造に当たる必要性が益々高まっており対応が迫られている状況にある。

1. 2. 熱処理実操業の動向と品質課題について

1. 2. 1. 熱処理における商品および生産プロセスの動向

歯車をはじめとする自動車部品の強度・疲労強度向上による長寿命化の為、金属部品には熱処理による組織・硬さ制御が施される。熱処理では、金属材料に加熱、冷却の熱操作を加えることにより、耐久性、耐摩耗性、耐疲労性、さらに耐食性、耐熱性といった種々の特性が向上する。この為、熱処理は、自動車、建設機械、家電、航空機、工作機械、工具など種々の機械部品に施され、最終製品化される。

熱処理産業を取り巻く社会的、経済的環境はここ 10 数年で大きな変化を示しており、例えばエネルギーコストに於いては 2004 年時点の石油価格は 1 バレル約 30 ドルだったものが、その後一旦急騰し、2008 年に入り、1 バレル 100 ドルを超えさらに 140 ドル台に突入した (Fig. 1. 3.)。その後、米国のサブプライムローン問題に起因した金融不安

から、石油価格が急落し、現在は 70 ドル程度で推移しており、乱高下しているといえよう。 [8]



Fig. 1.3. 石油価格の推移

イラク戦争，中国とアメリカの対立，イスラエルとパレスチナ，日本と韓国の関係不安といった世界の政情不安に加え，中国やインド等新興国の目覚ましい経済発展により資源の獲得競争が激化しており，石油，鉱物資源など原材料価格は今後も不安定な様相が予想されている．熱処理産業は，大量に電気，ガス，油などの熱エネルギー資源を消費する産業であり，さらには地球温暖化防止の社会的制約も厳しい．熱処理業界では，このようなエネルギーコスト高騰や大気汚染防止などの問題解決のための効率的な熱プロセス技術の開発が喫緊の課題となっている．

自動車を中心にした日本のものづくりは，中国，インドなど新興国の活況を受けて，ここ 2007 年頃より 10 年来好調であったが，米国トランプ政権のアメリカファースト政策を発端とし世界的な経済状況の変化があり 2018 年度末より急激な冷え込みが起こっている．中国における経済成長と市場規模の大きさ から，日本の自動車業界は中国市場で本格的な生産を進めているが，この様な状況の中，従来上昇傾向にあった現地調達率がどのように推移するかは見通しが不明である．現時点では，中国製の鋼材の品質があまり良くないこと，中国国内の熱処理技術レベルが未だ発展途上であることもあって，熱処理

品の海外現地調達はあまり進んでいないが、今後世界経済がどのように変化するかに応じ熱処理業界にはフレキシブルな展開が要求される。^[9]

こうした中で、日本の自動車産業では世界市場から求められている高品質を広く安価に、のニーズに応えるべく、生産コスト低減、高機能化・高付加価値化のための熱処理技術の高度化が重要課題となっている。

一方で国内では高齢化、少子化および技術・技能伝承の危機が依然として続いている。2007年以降の団塊世代の定年退職者の大量発生が始まり、熟練技能者や技術者が会社を去り、これまで積み重ねてきた技術・技能の伝承が消滅する危機に陥っている。さらに、大学においても材料や熱処理に関わる学科が減少してきており、素材に関わる基礎学習した技術者も不足している。こうしたなかで熱処理業界においては起きうる変化、変更に耐えうるロバスト性が高くかつ、高技能を必要としない真空浸炭等の熱処理技術の将来像を見据えた、すなわち上に述べた熱処理産業を取り巻く環境の変化と課題をふまえ将来技術を重点を絞って開発しなくてはならない状況にある。

将来あるべき熱処理技術を考えると、概略以下のようなふうになるかと思われる。すなわち、熱処理における温度や雰囲気計測・制御技術や熱、相変態によるひずみのシミュレーション技術の開発により、ひずみとそのバラツキが極めて小さくし、高精度に制御できている姿が必要である。また、部品の長寿命化、潤滑フリー化など一層の高機能化が要求される。加えて、プロセスの省エネ・高効率化、複合化、連続化、自動化、クリーン化を進め社会要請に対応しないといけない。^[10]

1.2.2. 熱処理ひずみ・品質およびそのばらつきの最小化

昨今、前述の様に自動車を取り巻く環境は急速に変化しており、その要請は前述までの情報から以下の二点に集約されよう。

- ・世界経済情勢の変化に対応できるフレキシブル・高ロバスト性を持った生産様式
- ・電動化に代表される環境等の課題に対応できる製品開発

フレキシブル・ロバストな生産様式に対してはより安定したモノづくりができる様に、真空浸炭化・小ロット生産化が進められている。従来、熱処理では1ロットに数百kgの部品を同時に載せ処理を実施していた。この場合、前工程である切削加工工程や後工程であ

る仕上げ加工工程と処理ロットサイズが違うため大量の仕掛品在庫を抱える必要があった。例えば浸炭処理工程での積載量を前後の機械加工工程と同じ「1個」とすることにより、Fig. 1. 4. の様に仕掛り品の無い工程を築くことができ、対応する設備技術・生産技術開発が進んでいる。

このような「熱処理小ロット」ラインは設備規模が比較的小さくできる為、今後考えられる需要変化にフレキシブルに対応できる。また、このようなラインでは部品の品質に関しても「1個」を徹底的に解明し、品質向上することができ、従来に比較し熱処理品質の向上、特にロット内で発生していた熱処理ひずみばらつきへの対応は容易になると言える。

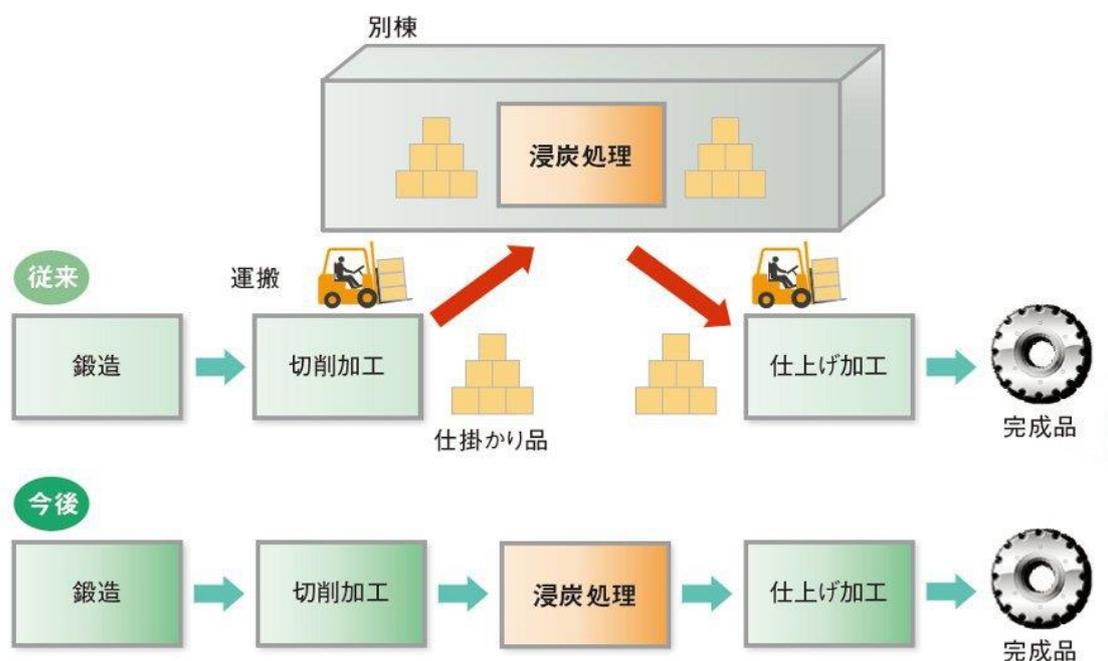


Fig. 1. 4. 浸炭生産方式の革新

昨今、自動車をはじめとする輸送機器を取り巻く環境の規制は強まる一方である。従来自動車にかけられる騒音規制は排気音規制だけであったが、昭和 26 年に導入された自動車単体騒音規制は近年になって国際標準に合わせ強化されつつあり、規制値は 86dB(1951 年)→76dB(2020 年)と大幅に強化されている。

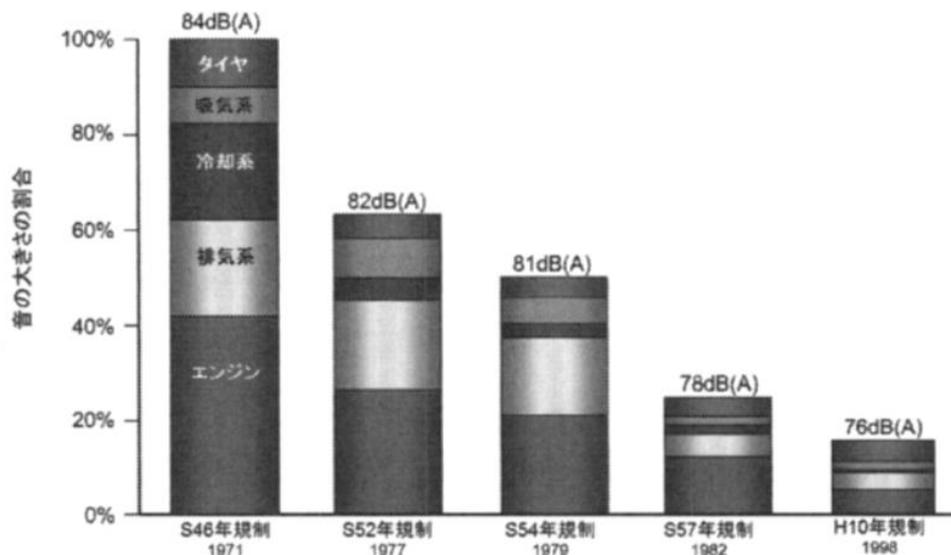


Fig. 1.5. 自動車騒音規制^[11]

これは音圧レベル(=音にして散逸するエネルギー)を 1/100 にすることを意味しており、そのエンジン、排気音だけではなく、ギヤやタイヤの発する騒音等、総合的に発する音を少なくする必要がある、例えばタイヤに於いてはすでに低騒音タイヤが発売されている。ここで主題である自動車用歯車そのものについての規制はまだないが、電動化・自動車空力性能の向上によりエンジンや車体の発生するノイズが減少している現在、従来はそれらノイズにかき消されていた目立たなかった、接触して動力を伝える自動車用歯車の発生するノイズを低減させないといけないことは容易に推測できよう。

Fig. 1.5. に自動車騒音の割合の変化を示すがエンジン(ここに駆動系の発生するノイズも含む)の発するノイズはここ 20 年で 1/10 程度になっており、トランスミッションも同様に静粛性を高める必要がある。^[12]

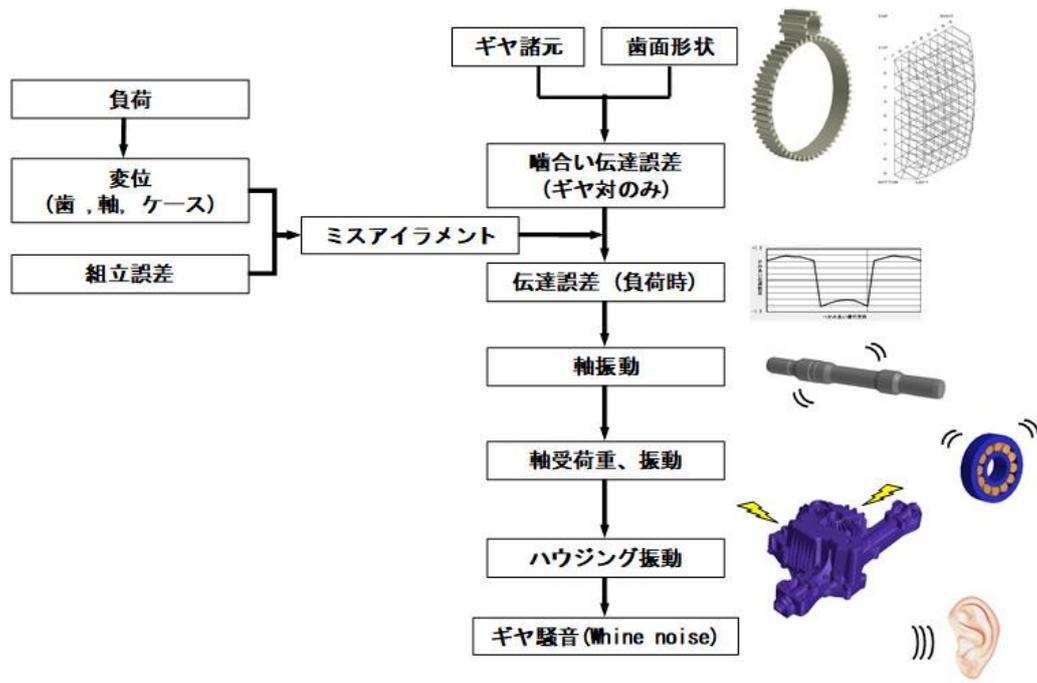


Fig. 1.6. 自動車用歯車のノイズ要因

Fig. 1.6. はギヤノイズの発生要因を示したものである。ギヤノイズは主にギヤ取り付け位置の不確実性に起因するミスアライメントと、かみ合い伝達誤差を要因として発生する。ミスアライメントはギヤの支持の手法とケースの精度・剛性によって決まる。かみ合い伝達誤差はギヤの設計値からのずれなどであり、ギヤを設計に対しどれだけ正確に製造できるかによって決まる。^[13]

歯車に浸炭熱処理を施すと Fig. 1.7. に示す様に熱処理変形が発生する。歯車における熱処理変形はかみ合い伝達誤差の主たる要因となる。熱処理変形には Fig. 1.7. 右側に示すような焼入時の油の沸騰現象(蒸気膜発生・消失)に起因する焼入時の冷却ムラをはじめとした多数の因子が起因する^[14]。

Fig. 1.8. はこれらをまとめた特性要因図である。このような複雑な要因を擁する熱処理ひずみを対策し、高精度なギヤを作成することで自動車の騒音を対策しすることは時代の要請に応じた喫緊の熱処理業界に課せられた課題と言えよう。

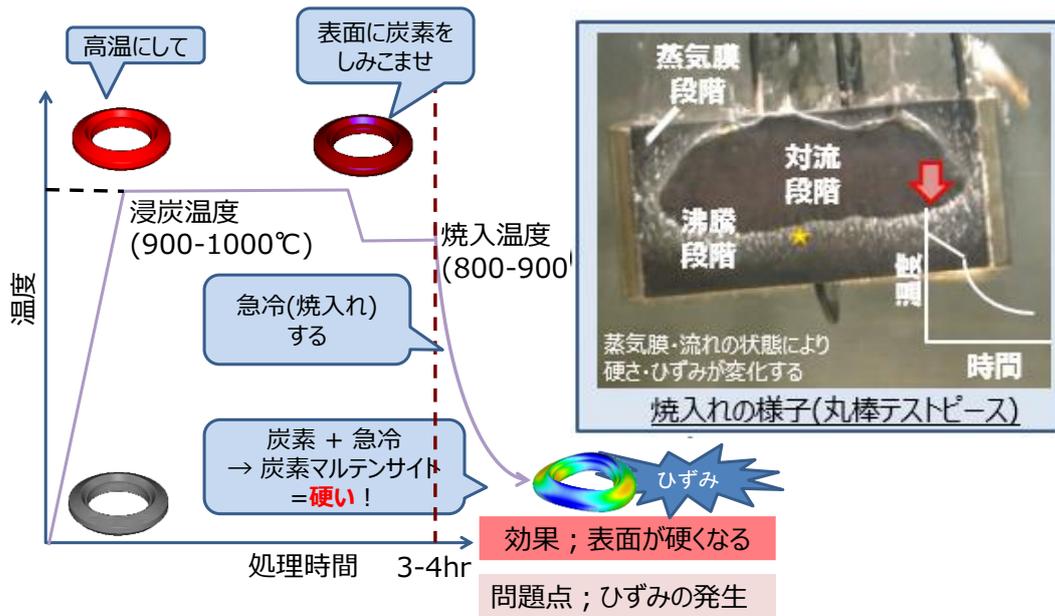


Fig. 1.7. 熱処理ひずみの発生

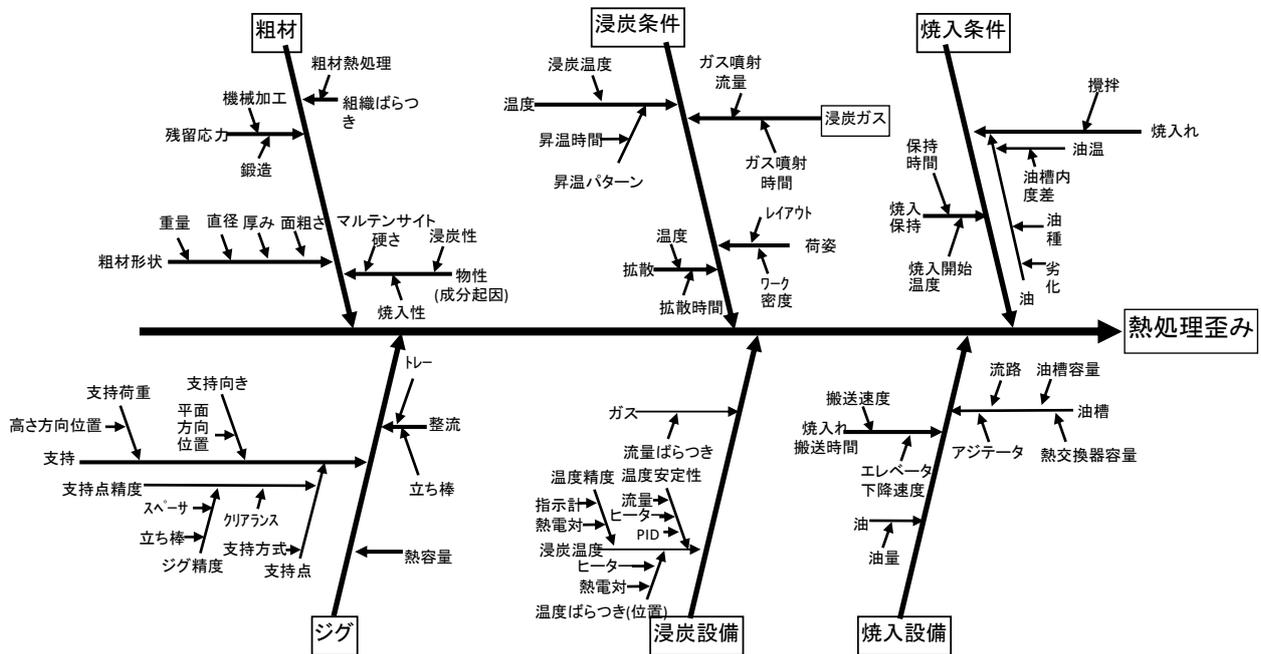


Fig. 1.8. 熱処理ひずみの要因

熱処理ひずみの対策について従来より多数の研究・開発がなされてきた。中外炉工業(株)では従来の油焼入炉を活用し、途中で部品を一度引上げ、温度均一化のプロセスを設けることによりリング部品での熱処理ひずみを1/3程度に小さくする「一槽三段焼入れ」工法を有している(Fig. 1.9)。^[15] この提案では、冷却途中で冷却中断プロセスを持つことにより温度の均一化を実現しひずみを低減しているが、その場合、引き上げ時間等の制御パラメータが追加され、従来の焼入方法に比較し精密な冷却制御が必要である。

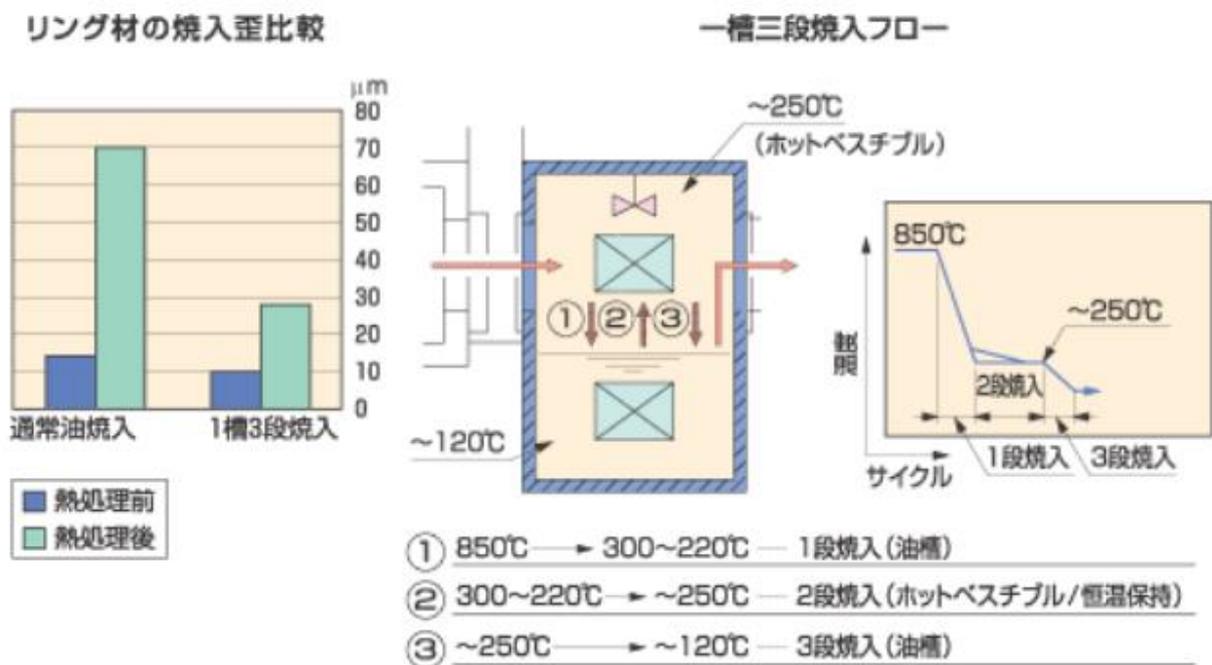


Fig. 1.9. 一槽三段焼入れの概要

前述の様に、油焼入れでは冷却時の蒸気膜発生や崩壊により冷却ばらつきが発生する。N₂ ガス等を高温に加熱した部品に吹き付け急冷するガス焼入れは蒸気膜が発生しないため冷却ばらつきが少ないことが知られているが、筆者らはそのガス焼入れの中でも条件を工夫することでさらなる冷却ばらつきの低減、ひいては低ひずみ化が行えることを見出している Fig. 1.10。^[16] しかしながらガス焼入れではその冷媒の密度が低い事、液体への相転移する際の潜熱による冷却が期待できないことにより油焼入れに比較し焼入れ後の硬さが低くなりやすく、また、ガスの流れ後背部では焼入れが行えないことより、より従来の油焼入れに比較してより複雑な冷却制御が必要とも言える。

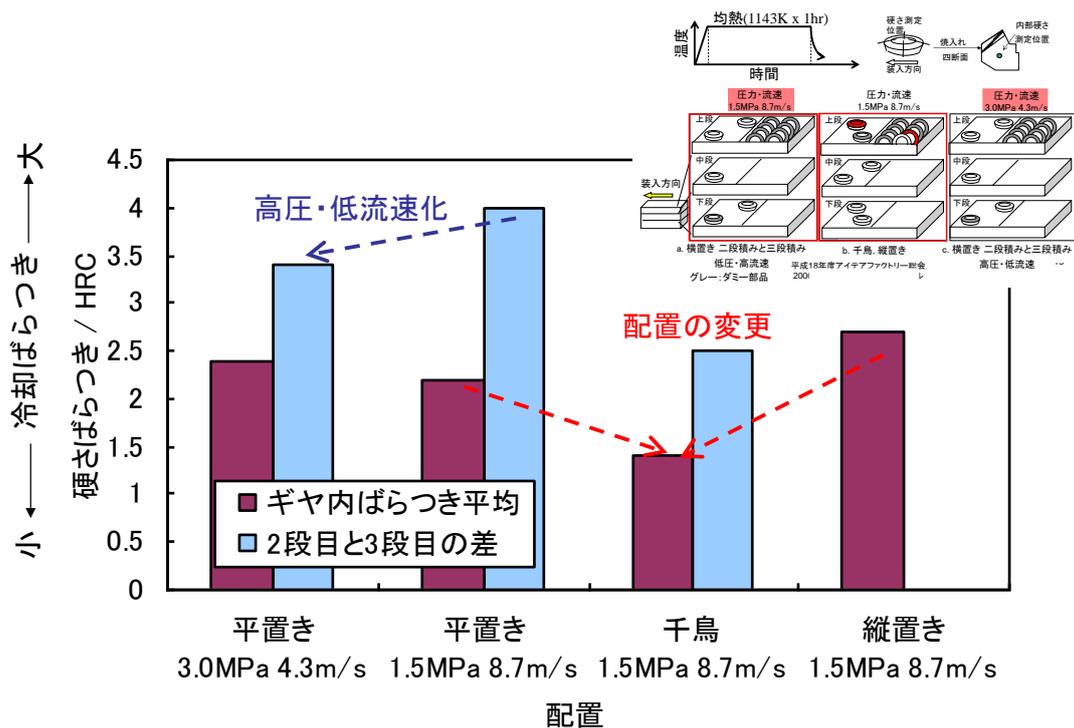


Fig. 1.10. ガス焼入れによる低ひずみ化

その他にも蒸気膜を生成しない沸点の高い亜硝酸ナトリウム等のソルト(溶融塩)を用いたソルト焼入れ, 最初から冷却液体を気体と混在をさせ, 容易に沸騰が起きる事により均一な蒸気膜発生を狙う「ミスト」を活用したミスト焼入等の低ひずみ化技術が多数提案されているが^[17], 環境負荷, 制御の難しさの面で普及しているとは言い難く, 依然として焼入冷媒には油が主流である.

以上のように更なる熱処理ひずみの低減の重要性は高まりつつあり, 対応する冷媒・冷却手法の開発が進められており, 今後の実用化の為に高精度な熱処理・冷却制御技術が必要になってくる.

1.2.3. 熱処理部品の高強度化動向

自動車のパワートレインの構造は昨今の燃費規制の流れを受けて複雑化の一途である. その状況を分析したものを Fig. 1.11 に示す. しかし, 自動車の走る道路は大きくならないのでこの複雑なパワートレインを格納する自動車のエンジンルームは大きくはならず, この複雑化するコンポーネントを従来と同様のエンジンルーム内に収めないといけない.

2006年以降、テスラ ロードスター、日産リーフ、三菱 i-MiEV、BMW i8、VW E-TRON 等多数の一般ユーザー向けEVが発売されている。当初実用上の課題となっていた一充電での走行距離において100kmに満たなかったこれらEVも、2019年現在JC08モードで570km(日産リーフ e+, カタログ値, 2019年8月現在^[18])となっておりガソリン車の航続距離と比較し遜色ないものとなってきており、更にEVの普及は加速していくと考えられ、今後は小型車・高級車への展開が望まれる。小型車ではより小型コンパクト、低フリクションな駆動系ユニットが、高級車ではより高強度、静粛性の高いユニットが望まれる^[19]。

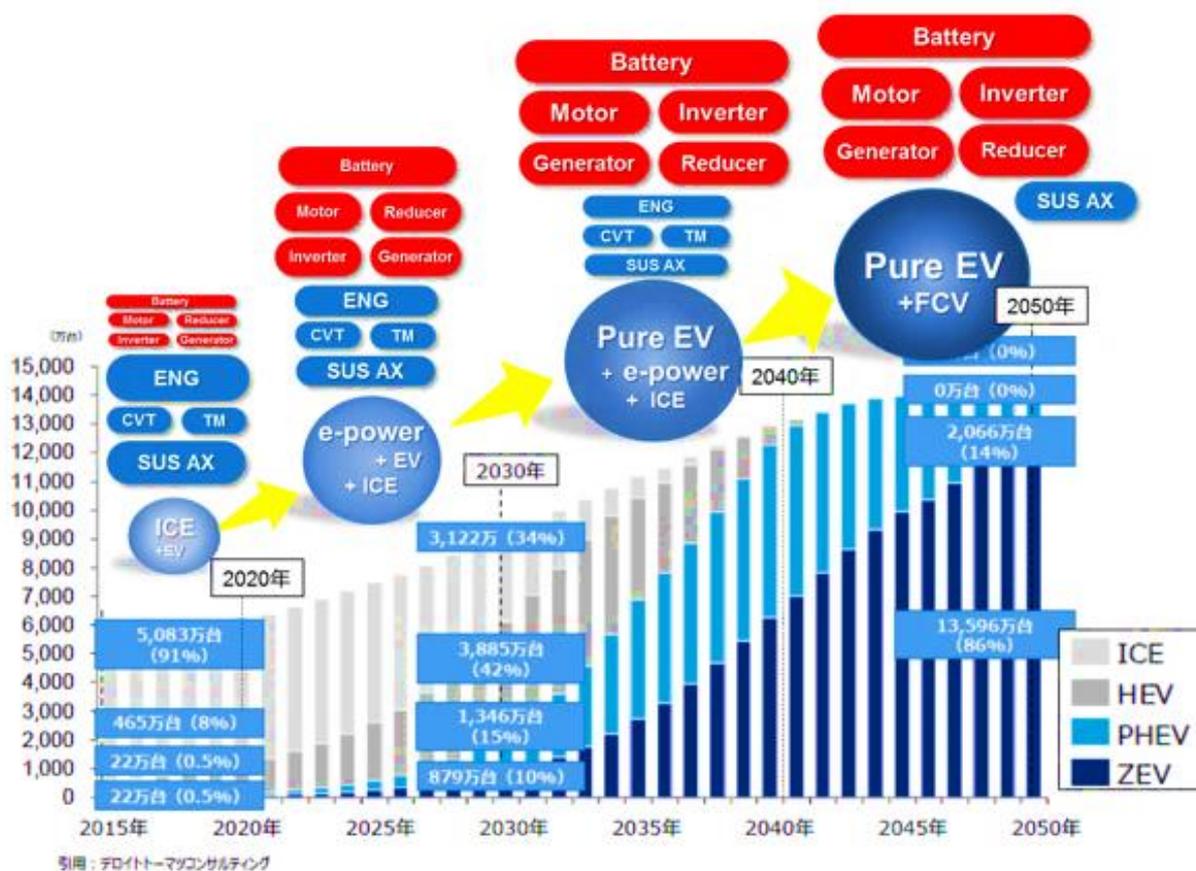


Fig. 1.11. 自動車ユニット構成の複雑化 - 熱処理要求複雑化の背景 -

また、主にプレミアムスポーツカー・SUVにおいては激しい開発競争によりハイパワー化の流れは顕著であり、ICE車においても2001年には280PSであったスカイラインGT-Rのエンジン出力は2019年現在580PS(GT-R, カタログ値, 2019年8月現在^[20])となっており、これに耐える更なる高強度な駆動系ユニットが望まれている。

これらの強度向上のためには種々の強度向上技術が検討されている。Fig. 1. 12. は歯車の精度が強度に与える影響を示した図である。伝達誤差が $60\ \mu\text{m} \rightarrow 5\ \mu\text{m}$ となることで、歯面にかかる修正ヘルツ応力は 40%減少しており^[21]、歯車高精度化が高強度化に有益な事を示している。

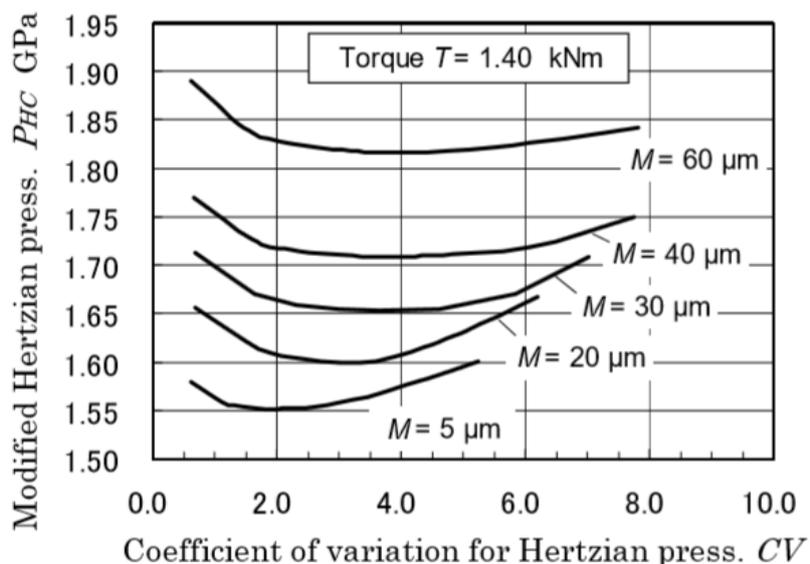
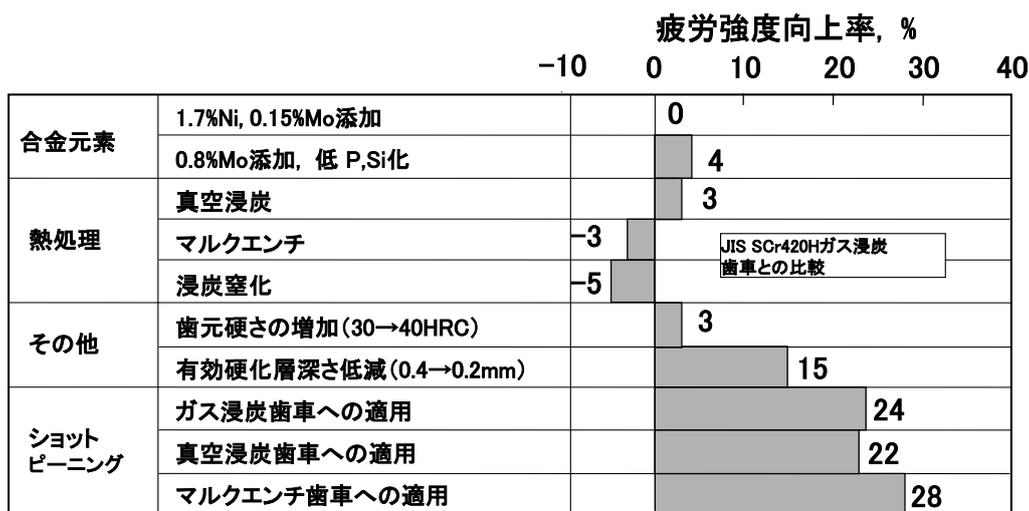


Fig. 1. 12. 歯車精度と強度の関係

その他にも高強度化に寄与する技術としては Fig. 1. 13 に示すような多数の技術が提案されている。^[22]



モジュール: 1.5 はすば歯車
動力循環式歯車疲労試験機

Fig. 1. 13. 歯車高強度化技術の一覧

高強度化に対してこのように多数の技術が提案されているがどの技術も強化手法の主力になっているとは言い難い。これはとりも直さずこれら技術の新商品への「採用の難しさ」であり、つまりそれぞれの技術を実ユニットに適用した際の使いづらさ、予想できない品質への跳ね返りの解決の困難さを意味している。

これは、熱処理をすると必ず発生する熱処理ひずみの傾向が異なるため、各工法毎にそれを明確化する必要がある事、また、特定の強度を向上させた際に発生する別の部分の強度低下を対策する困難さであると言えよう。

これら課題を解決し、歯車の高強度化を進めるためには品質向上、その跳ね返りによる寸法精度低下等を高精度に予測する技術が必要不可欠である。

1. 3. 浸炭熱処理部品の品質シミュレーションに関する従来の研究とその動向

焼入れひずみに代表される熱処理ひずみは、熱処理工程での工業的な問題となっており、その解決には種々の実験的、実生産的な対策が講じられてきた。日本の伝統的なモノづくりである刀鍛冶において焼入れによるそりを見込んで焼入れ前の形状修正の工程が採用されているのもその一つの例である。近年の熱処理における数値解析技術は、この熱処理ひずみの予測のために年々改良が加えられている。

古くは、1961年に Sachs らがリングギヤの焼入れひずみについて線膨張係数の違いや形状的な因子による簡易的なモデルでメカニズムを説明した^[23]。

1973年には、井上らが有限要素法を用いて、熱収縮、変態膨張、組織の違いによる応力差を総合的に解析して熱処理ひずみを求め丸棒試験片を用いた実験値との比較を行った^[24]。

1976年には、利岡が有限要素法を用いて、マルテンサイト一相、マルテンサイトとベイナイトの二相のケースについて焼入れひずみを有限要素法で解析しその有効性を検証した^[25]。1976年にも橋本らは有限要素法を用いて円柱の焼入れ後の残留応力と変形の解析を行った^[26]。1990年代になると、多様な熱処理変形に関する解析が紹介されている^{[27]-[29]}。リング形状に関する高周波焼入れのシミュレーション、クランクシャフトの高周波シミュレーション、また加熱工程での磁場解析にもシミュレーションが適用されるようになった。1990年代からまず、井上らは相変態を考慮した熱・力学理論を用いて熱処理シミュレー

シミュレーション手法を提案し、熱処理シミュレーションのソフトウェア[HEARTS]を開発した^[23]。それから、多様な熱処理変形に関する解析が紹介されている^{[24]-[27]}。たとえば、巨らは2002年に歯車の浸炭焼入れのシミュレーション手法を提案し、リング形状に関する高周波焼入れのシミュレーション、クランクシャフトの高周波シミュレーション、また加熱工程での磁場解析にもシミュレーションが適用されるようになった。2000年代になると、TTT (Time-Temperature-Transformation) 曲線をデータベースとしたシミュレーション、同様に様々な材料の特性をデータベース化したシミュレーションも提案された^{[30]-[32]}。熱処理シミュレーション向けの材料特性データベースとしては2003年より材料学会からMATEQが頒布されている^[31]。また熱流体解析を組み合わせた熱処理シミュレーションも報告されている^[33]。2002年に、キー溝の付いた丸棒の変形について、塑性ひずみ、弾性ひずみに分解したひずみ解析手法が提案されている^[34]。そのほか近年では、焼き割れに関するシミュレーション手法も提案されている^{[35], [36]}。これらのシミュレーションの進化をFig. 1.14.に示す。このように複雑な焼入現象を解析する技術は年々複雑な解析手法が組み合わされた形で進化してきている。

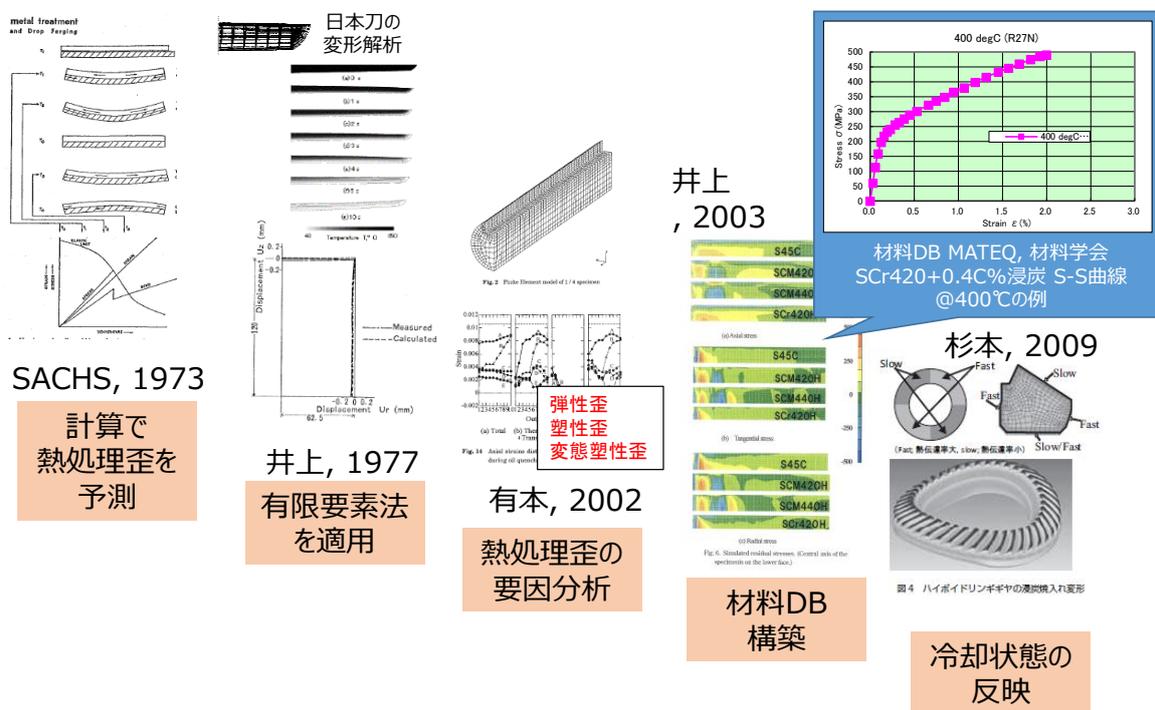


Fig. 1.14. 熱処理シミュレーションの発展の歴史

1.3.1. 浸炭手法のシミュレーションに関する研究動向

浸炭焼入熱処理のシミュレーションは主に浸炭のシミュレーションと焼入れのシミュレーションに分けられる。実際の工程においてもこれらの工程は設備上、接続されてはいるものの別の工程であり、現象としても浸炭は雰囲気から内部への元素の拡散という物質移動であり、焼入れは内部から表面への熱エネルギー拡散及びそれに伴う相変態、機械物性変化の変化であり現象が違うため別に取り扱われるべきである。

浸炭シミュレーションは供給された浸炭ガスの炉内での拡散、分解反応、部品表面での浸炭反応及び浸炭されやまた炭素の部品内での拡散移動で構成される。

これら諸現象を統合的に解析した事例は皆無であり、現在は主に炉メーカー等の設備設計を必要とする場合の炉内雰囲気流れシミュレーションと、表面反応のシミュレーションに分かれている。

Fig. 1.15. に炉内の温度分布解析の一例を示す^[37]。浸炭炉内の雰囲気は不均一であり、そのながれは複雑であるが、現状、このような解析は雰囲気の均一化等の設備改良にのみ活用されており、雰囲気の不均一がどのように品質に影響を与えるかを解析した事例は皆無である。

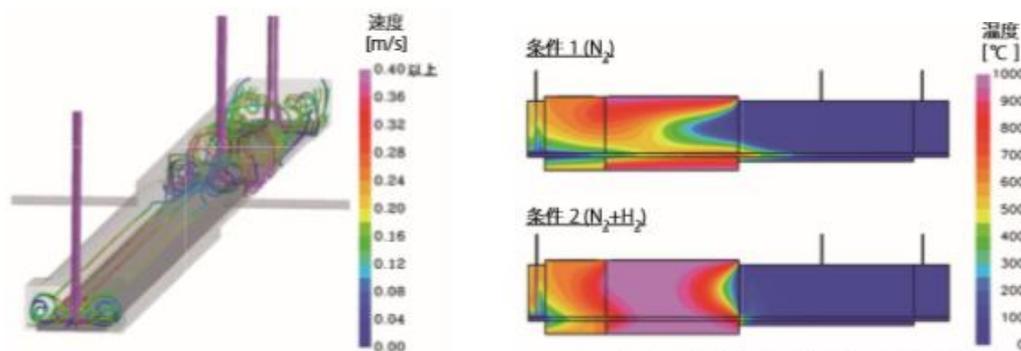


Fig. 1.15. 炉内の温度分布解析の様子

一方で雰囲気がどのように反応をし、金属が改質をされるのかを解析した事例もある。

Fig. 1.16. は森田らによる真空浸炭時の表面反応を解析した結果である。鋼材の差による浸炭量の差を再現することを試みている^[38]。

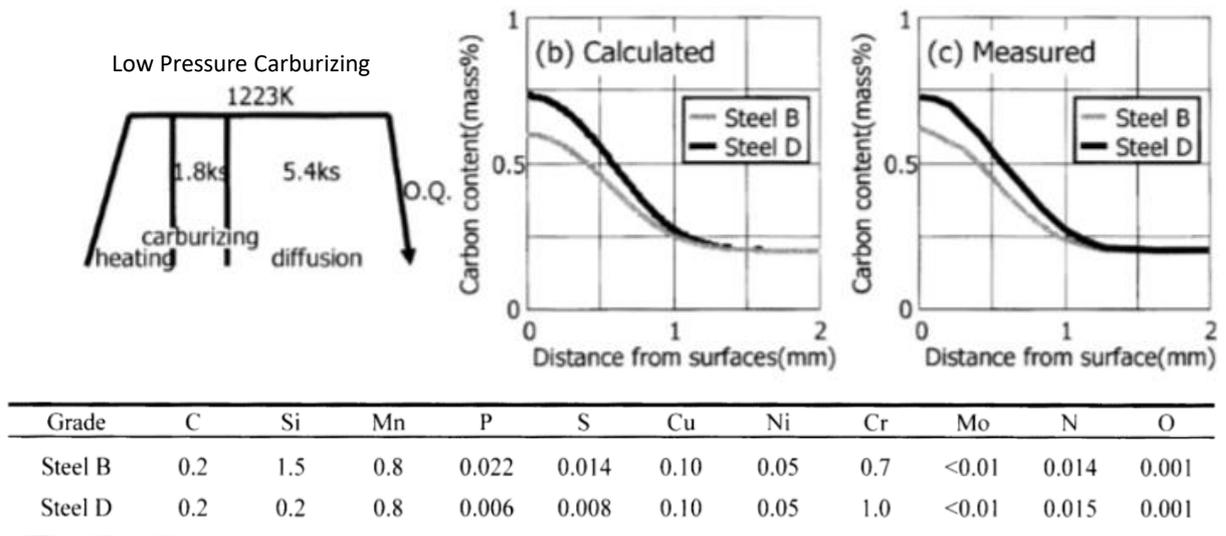


Fig. 1.16. 真空浸炭反応シミュレーションの一例

1.3.2. 冷却手法のシミュレーションに関する研究動向

前述の様に熱処理ひずみの対策は主に焼入時の対策に注力がされてきた。しかしながら焼入状況のシミュレーションについては詳細な検討が為されているとは言い難い。これは Fig. 1.17. に示すような部品表面での複雑な焼入状態によるものがおおきいであろう。

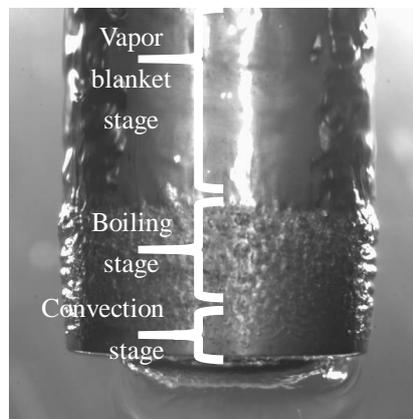


Fig. 1.17. 油焼入時の冷却の様子

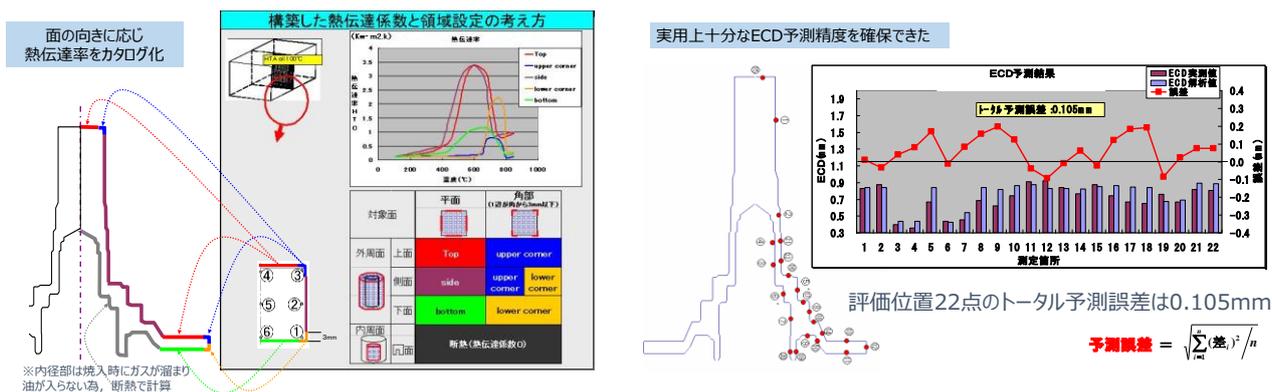


Fig. 1.18. 冷却に関するシミュレーション(データベース化)

Fig. 1.18. は筆者らによるフランジ形状部品の冷却解析の一例であるが、あくまでこれは冷却状態を実験を基に冷却状態をデータベース化し、それを境界条件として付与しているものである。一般に熱処理での焼入れシミュレーションとされるものはこれと同様に冷却状態をデータベース化しこれを付与しているものが殆どである。

1.4. 浸炭実操業に熱処理シミュレーションを適用する上での課題

油焼入れは雰囲気熱処理における最も一般的な焼入方法であり、広く実施されている。しかし、焼入時の冷却現象は蒸気膜崩落現象を含んでいるため複雑かつ繰返し再現性が低く、完全には解明されていない。このため、現在も油焼入れでのひずみ低減や安定化に関する多数の研究がおこなわれている。ひずみを低減する場合、主要なひずみ制御因子である油の熱伝達率を明確にする必要がある。油焼入時の熱伝達率は部品の形状、積載方法、油剤の種類、焼入攪拌条件及び油温等によって大きく変化するため、シミュレーションにて熱処理ひずみを予測するにはこれらの因子と熱伝達率を紐付ける必要がある。近年では油剤や流速によって熱伝達率をデータベース化する活動や^[39]、混相流解析にて焼入時沸騰現象を考慮して熱伝達率を導出が始まっている^[40]。初期に実施された熱処理シミュレーションでは全体が均一に冷却されると仮定した境界条件を付与した解析がなされていた。しかし、Fig. 1.7. 内に示すような不等方な変形は均一な冷却条件では再現することはできず、実操業での現象には、荷姿内のひずみバラツキ、不等方変形等、不均一な熱伝達率でないと再現できない現象がある。

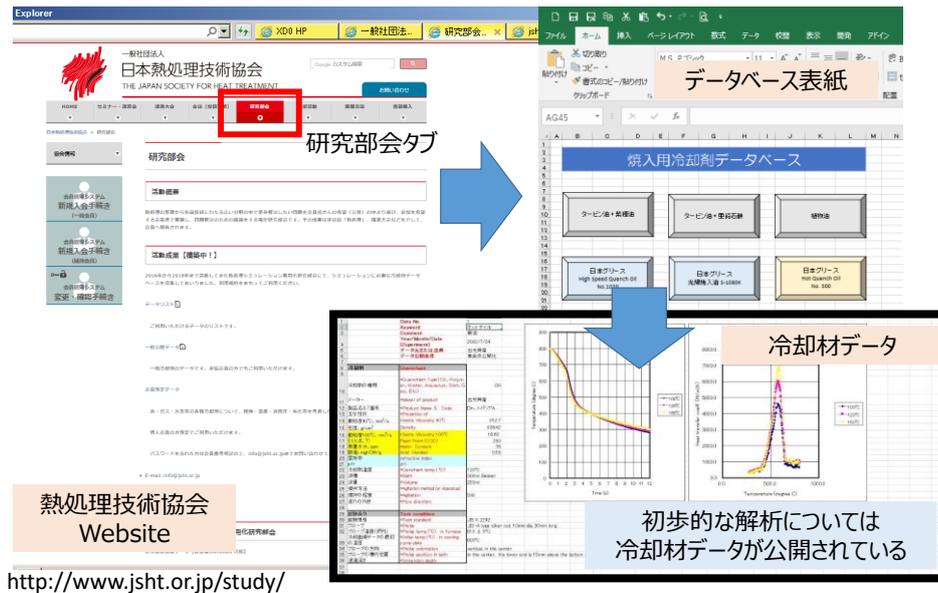


Fig. 1. 19. 冷却剤データベースの例(2019/9 現在)

この様な熱伝達率の複雑性を反映し、簡便に熱処理シミュレーションを用いる為、熱伝達率をカタログ化し、容易に焼入時の熱伝達率分布を与える取組みがなされている。2018年より熱処理技術協会では一般的な焼入冷却材のデータを収集しWebサイト上に会員向けに公開しており、シミュレーションに容易に取り組み始めることができる環境が整ってきた(Fig. 1. 19.)^[41]。

熱処理ひずみには多くの要因があるが、すべての要因を反映したシミュレーションを実現するためには、浸炭雰囲気の流れ解析、材料物性データベースの精度向上や材料物性値予測シミュレーション等の技術が必要であり、技術的、また計算機能力の観点からまだ可能とはなっていない。

1.5. 本研究の目的と構成

以上のように機械部品に求められる高強度化、高精度化の要求を受け、熱処理においても高精度化、高強度化が強く要望されている。熱処理シミュレーションを用いてこれら技術進歩に寄与するため、本研究では熱処理シミュレーションの実適用を目指して以下の研究を行った。

- ・熱処理シミュレーションを用いた熱処理実操業での高精度制御を目指し、実用条件での精度検証とその向上すべき項目を明確化
- ・高強度化に対応できる熱処理シミュレーション技術の開発とその精度検証

前者においては熱処理シミュレーションを実部品かつより現実に近い熱処理条件に適用した場合、どのような解析品質が得られるのか、またその際に入力すべき点は何かを調査した。これより商用にシミュレーションを用いる際に課題となる解析結果がどの程度信用でき、実際に信用して使える結果なのか、使える結果を得るためにはどこを重点的にコストをかけデータを取得すべきなのかを明らかにした。

後者においては、今後、特に重要になる高強度熱処理のうち、シミュレーション手法についてあまり調査・研究が進んでいない析出強化型の強化手法である「高濃度浸炭」、特に今後主流となるであろう真空浸炭を用いた同手法についてシミュレーション手法を明らかにした。

本研究ではこれらの調査研究により熱処理シミュレーションを実ライン課題・次世代の高強度化技術に適用し、熱処理高強度・高精度化に寄与できるものとするを目的とする。

参考文献

- [1] 田口勇, 化学と教育, 40(1), 1992, 10-13
- [2] 樋口健治, 日本機械学会誌, Vol. 83(740), 839-846
- [3] https://gazoo.com/article/car_history/130530_1.html
- [4] 杉本剛, 日本熱処理技術協会 2019 年度第三回熱処理セミナー講演概要集
- [5] 牧田真治, 2015 年度名古屋大学 博士論文
- [6] 木野伸郎, 馬淵豊, 小柳貢士, 村上亮, 電気製鋼, 85(2), 2014, 97-107
- [7] 堺和人, 荻原敬三, 平野恭男, 東芝レビュー, 60(11), 2005, 41-44
- [8] 三井住友銀行, 原油価格の動向,
https://www.smbc.co.jp/hojin/report/investigationlecture/resources/pdf/3_00_CRSD_Report078.pdf.
- [9] 一般財団法人 素形材センター, 素形材戦略, 260-294
- [10] 日経モノづくり, 709(10), 2013, 54-59
- [11] 環境省, 国連四輪車走行騒音規制 (UN-ECER51-03) における加速走行騒音試験法及び規制値等の導入について, https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y071-17/mat%2002_2.pdf/03_資料17-2-2.pdf
- [12] 高井誠治, 松井隆一, 日本音響学会誌, 69(9), 2013, 489-493
- [13] 橋間 弘明, ヤンマーテクニカルレビュー, 2018,
https://www.yanmar.com/jp/technology/technical_review/2018/0413_6.html
- [14] 吉崎正敏, 日本機械学会論文集(C編) 783(11), 2011, 4274-4287
- [15] 中外炉工業 WebSite, https://chugai.co.jp/01_parts_shintan/
- [16] 杉本剛, 覃明, 渡邊陽一, 勝俣和彦, 自動車技術, 2007, 38(6), 305-308
- [17] 大久保英敏, 西尾茂文, 鉄と鋼, 79(4), 1992, 67-73
- [18] 日産自動車, 日産リーフカタログ
- [19] 塩飽紀之, 2018 表面改質技術研究会講演資料
- [20] 日産自動車, GT-R カタログ
- [21] 吉崎正敏, 日本機械学会論文集, 783(11), 2011, 4274-4287
- [22] 杉本剛, 2014 出光興産熱処理技術研究会講演資料
- [23] Sachs, K, Metal Treat. Drop Forg., 28, 281 (1961), 281-287.
- [24] 井上達雄・田中喜久昭, 材料, 22-218(1973), 218-223.

- [25] 利岡靖継：鉄と鋼，62-13(1976)1756-1766.
- [26] 巨東英，向井竜二，町田一成，歯車の浸炭焼入れシミュレーションと実験検証，熱処理，Vol. 42, No. 5, pp. 365-371(2002)
- [27] 有本享三・生田文昭・井上達雄：熱処理，34-6 (1994)，332-338.
- [28] T. Inoue and K. Okamura, D.Y. JU, Material Database for Simulation of Metallo-thermo-mechanical Fields, Proceedings of 20th ASM Heat Treating Conference and 5th International Symposium on Quenching and Distortion Control, ASM International, St Louis, October, pp.753-760(2000)
- [29] 生田文昭・堀野 孝・井上達雄：材料，47-9(1998)，892-898.
- [30] Arimoto, K., Huang, D., Lambert, D. and Wu, W. T., Proc. of the 20th ASM Heat Treating Society Conference, 1(2000)，737-746.
- [31] 岡村和夫，溶接学会誌，72-8 (2003)，603
- [32] 井上達雄・森本吉浩，材料，52 -10(2003)，1192-1197
- [33] 大木 力，NTN Technical Review, 69 (2001)，61-68.
- [34] 有本 享三・奈良崎 道治，熱処理，42-5(2002)，346-352.
- [35] Arimoto, K., Ikuta, F., Horino, T., Tamura, S., Narazaki, M. and Mikita, Y. , Trans. Mater. And Heat Treat., 25-5(2004)，486-493
- [36] 内田 富士夫・後藤 正治・進藤 亮悦・永田 新：鑄造工学
- [37] 山口雅志，中林宏行，堀野太希，太陽日酸技報，31，2012，30-31
- [38] 森田敏之，羽生田智紀，鉄と鋼，92(4)，2006，268-273
- [39] 市谷克巳，熱処理シミュレーション実用化研究部会 最終報告会 講演概要集
- [40] 杉本剛，渡邊陽一，第60回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集，(2005)，3-4
- [41] 住田雅樹，杉本剛，熱処理シミュレーション実用化研究部会最終報告会 概要集，pp. 36-40

第二章 浸炭熱処理シミュレーション基礎理論

2.1. 概論

1954年にSachsが線膨張率を用いた熱処理シミュレーションを始めて以降、1970年代には井上らに変態・熱・力学の理論 (metallo-thermo-mechanical theory) ^[1] を提案して以来、有限要素法(Finite Element Method)をもちいた熱処理現象のシミュレーション技術が発展してきた。

熱処理シミュレーション用のコードは井上らが発表したHEARTSに端を発し、Table 2.1.に示すような多数のコードが発表されている^[2]がどれも井上の提唱するmetallo-thermo-mechanical theoryに従っておりその基本構成は同様の物である。

本章ではこれら熱処理シミュレーションの基本構成について説明する。

Table 2.1. 商用熱処理シミュレーションソフトウェア

ソフト名称	開発者 (国内販売元)	開発年	開発国
HEARTS	CRC (現CTC, サポート終了)	1993	日本
YSWELD	ESI	1993	仏
GRANTAS	コマツ (クオリカ)	1996	日
DEFORM-HT	SFTC (ヤマナカコーキン)	1999	米
QUESS	住友金属(非売)	1999	日本
DANTE	Dante solutions (CAEソリューションズ)	2000	米
QSIM	キャタピラ(非売)	2001	米
FINAS-TPS⇒Star Edition	CTC伊藤忠テクノソリューションズ (同上)	2005	日
COSMAP	IMS Project- VHT (アイデアマップ)	2005	日

熱処理シミュレーションに代表される材料プロセスのシミュレーションでは多種の方法が研究・実用化されており、概ねその空間と時間スケール別で分類される。Fig. 2.1. はスケール別の解析手法を分類したもので^[3]、原子レベルの現象を解析する第一原理計算から、分子動力学(MD)や、フェーズフィールド(PFM)を経て、可視サイズの解析である熱力学的なFEMまでがある。熱処理工程の熱力学的な課題解決に活用されている、一般に言われる「熱処理シミュレーション」は主にFEMを用いた計算を示すことが多い。但し、近年では

Phase Field 法をもちいた結晶粒成長計算等が熱処理課題解決に使われるなど (Fig. 2.2) [4], その領域は拡がりつつある.

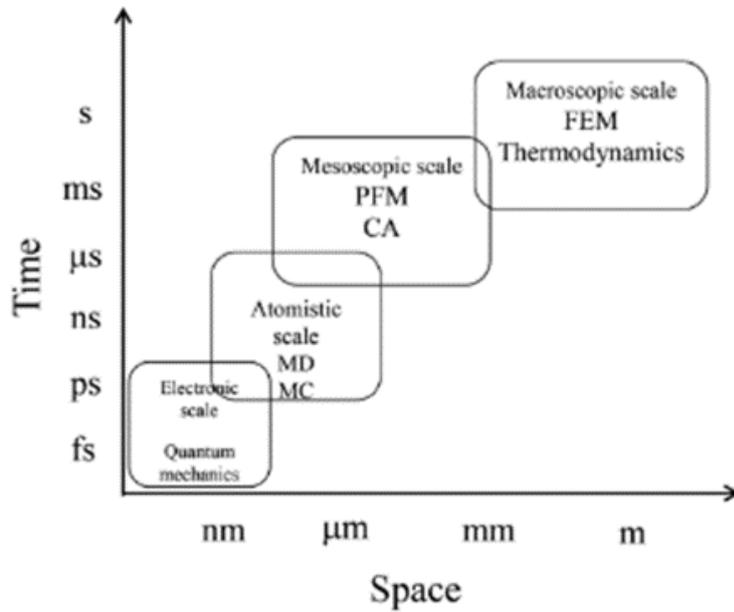


Fig. 2.1. 材料プロセスシミュレーションの分類

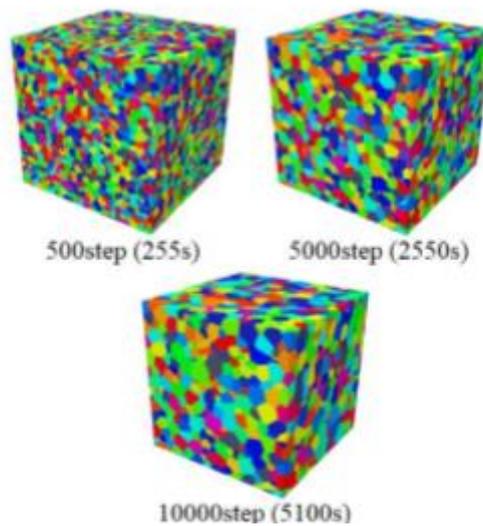


Fig. 2.2. Phase Field 法によるマルテンサイト結晶粒粗大化シミュレーション結果

2.2. 熱処理シミュレーションとその構成

熱処理工程では多くの条件に対して多くの品質が決まる. Fig. 2. 3. は主要な熱処理シミュレーションの入力因子と出力因子, その計算の構成を示したものである. 実際のシミュレーションでは部品の形状や浸炭・焼入れの状態を因子とし, これを流体解析や沸騰解析を用いて解いたうえで, Fig. 2. 3. の左に示す境界条件として反映させたい熱処理シミュレーションを実施する. 熱処理シミュレーションでは熱伝導解析・弾塑性応力解析・炭素濃度拡散解析・金属相変態解析を強連成にて計算し, 熱処理品質を結果として得る.

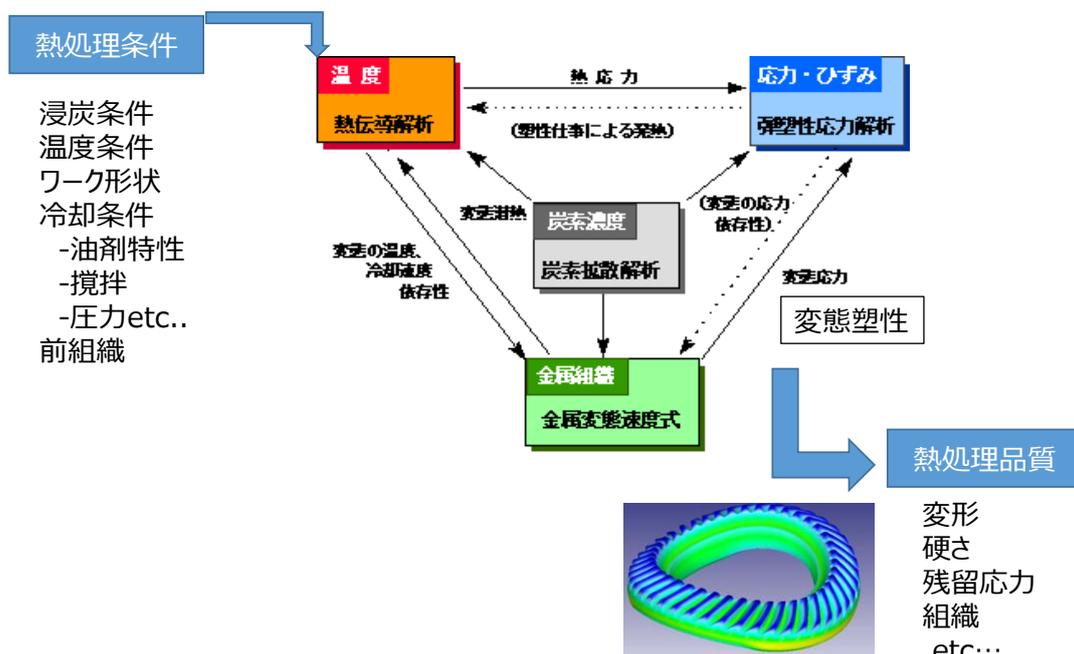


Fig. 2. 3. 熱処理シミュレーションの構成

2. 2. 1. 浸炭シミュレーションの構成

浸炭は処理雰囲気中から部品の表面を境界として内部に炭素が拡散する現象である. 一般的に工業的に用いられる浸炭は Table2. 2 に示す様に表面の炭素濃度が速度論で決まるものと雰囲気の化学ポテンシャルと平衡になる平衡論で決まるものがある.

Table2. 2. 浸炭反応の種類

浸炭手法	反応支配方程式
真空浸炭, 固体浸炭等	速度論
液体浸炭, ガス浸炭等	平衡論

熱処理部品の表面の炭素濃度が Table 2. 2. にて示す様式で決まったのち、部品内部の炭素濃度は Fick の第二法則，いわゆる拡散方程式を支配方程式として決定される．実際の浸炭反応では粒界拡散，粒内拡散の別や，過剰に炭素が含侵された際の炭化物析出等が起こるがそのような現象を解析した事例は従来にはない．

2. 2. 2. 焼入れシミュレーションの構成

浸炭プロセスの後の焼入れプロセスでは金属変態速度式，熱伝導，弾塑性応力解析を基礎とした metallo-thermo-mechanical theory による解析が行われる．この解析の中では相変態時の相分率の変化が Fig. 2. 4. に示す変態図によって計算されるとともに，各時点での材料物性値は相分率に重みづけされた混合則で求められる．

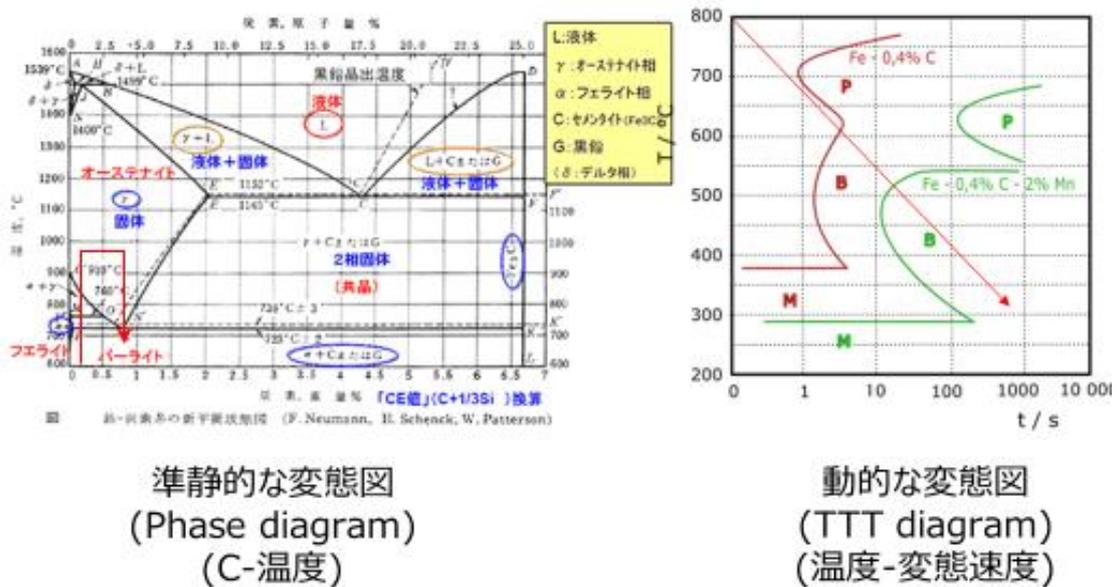


Fig. 2. 4. 熱処理シミュレーションの基礎となる状態図

一般にこれら多数のカイネティクスを包含した計算で相互作用を考慮した厳密解を求めるのは非常に困難である．そこで一般的な熱処理シミュレーションではこれら三種(浸炭を含み四種の場合もある)の構成方程式をそれぞれ順序通りに繰り返して解き，一巡したら時間増分を 1Step 進めるといふ準強連成となる解析を行う．その連成の手法はシミュレーションコード毎に若干ずつ異なるので，ソフトウェア別の結果を比較する際は注意が必要である．

焼入れシミュレーションではその入力条件として冷却境界条件を入力する必要がある。冷却境界条件を導出するには Fig. 2.5. に示す様にジグを含む部品積載全体をモデリングし、流体解析による冷却状態の調査を行う必要がある。

Fig. 2.6. に実際の油焼入れとガス焼入れの様子を示す。ガス焼入れではガスの流れと流速・圧力等の関数で決まる部品表面の熱伝達率を、油焼入れでは沸騰を考慮した熱伝達率を導出する必要がある。

しかしながら油焼入れにおける沸騰流解析の研究は依然黎明期であり、原子力分野等利用範囲の広い定常沸騰に関する解析事例は多数あるが、焼入れをはじめとする非定常沸騰流の解析事例は非常に少ない。

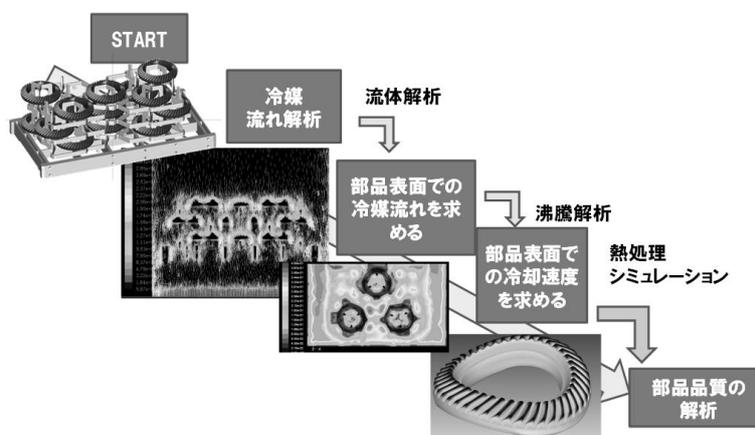


Fig. 2.5. 冷却境界条件のシミュレーション

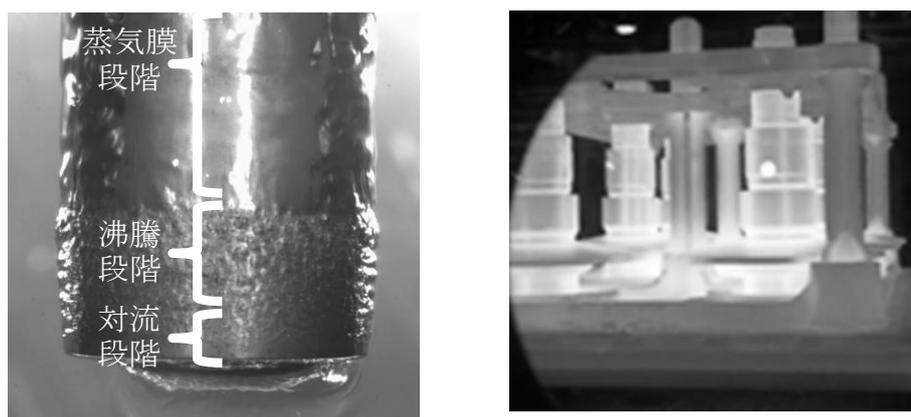


Fig. 2.6. 焼入れ冷却の様子(左, 油焼入れ, 右, ガス焼入れ)

これは現象そのものが複雑で未解明な部分が多いことに加え、蒸気泡の微視的な破裂から巨視的な流れまでを非定常で同時に解析しないといけないことによる計算機負荷の問題、一般に焼入れ油は不透明もしくは高屈折率であり可視化が困難な事、現象が非常に高速であ

るため、従来の熱電対の応答速度では温度現象をとらえることが困難、等々に起因しシミュレーションを実施するための基礎技術の蓄積が不十分な事によるところが大きい。

2.3. 熱処理シミュレーションの構成方程式

現在市場で頒布されている熱処理シミュレーションソフトウェアは Table 2.1. に示すように井上による混合測に基づいているものが殆どである。これより熱処理シミュレーションの構成とその理論を示す

2.3.1. 変態と熱力学

材料の特性は焼入れ、焼戻し等の相変態を用いて制御することができる。相変態は熱力学や機械的な変化を伴って発生する。パーライトとフェライトの初期組織を持つ鋼の焼入れの場合を考えてみる。鋼を A_{c1} 温度以上に加熱するとオーステナイト組織になり、室温まで適度に冷却されると、元のパーライトとフェライト組織に戻る。一方で水、油、またはポリマー溶液による焼入冷却プロセスで冷却速度が十分に高い場合、ワークの各場所での冷却速度の違いに応じて、パーライトに加えてマルテンサイトまたはベイナイト構造が生成する。

このような熱処理の計算では3種類のフィールドが考慮される：温度フィールド、金属構造の相、弾塑性-応力およびひずみフィールド。3つのフィールドの変化は、他のフィールドに影響を与え、この相互作用は metallo-thermo-mechanical coup と呼ばれる。^[2]

2.3.2. 混合測

相変態計算の対象材料は N 成分（パーライト、オーステナイト、マルテンサイト等）からなる微細組織の混合物と仮定される。シミュレーションのなかではこれらは連続体として仮定され、任意の体積は N 種類の構成要素の線形結合よりなると仮定される。： I 番目の構成要素を ξ_I と表現し、機械的・物理的な特性は χ で表現され、 χ_I の線形結合で表現される^[11]。

$$\chi = \sum_{I=1}^N \chi_I \xi_I \text{ and } \sum_{I=1}^N \xi_I = 1 \quad (2.1)$$

2.3.3. 熱伝導方程式

焼入れシミュレーションの熱伝達方程式については、通常の熱伝導方程式に加え、相変態によって生成される潜熱と応力によって生成される熱を考慮する必要がある。

$$\rho c \dot{T} - k \Delta T - \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p + \sum \rho_l l_l \dot{\xi}_l = 0 \quad (2.2)$$

ここで、 c 、 k と l_l は比熱、潜熱、 l 番目の構成要素の熱伝導率である。 ρ 、 T と σ_{ij} は密度、温度と応力である。表面の熱伝達の対流境界条件は次のように定義される。

$$-k \nabla \cdot T \cdot n_i = h_T (T - T_w) \quad (2.3)$$

h_T と T_w は熱伝達係数と冷媒の温度であり、 n_i は界面に対する法線方向を示す。

2.3.4. 拡散方程式

鉄マトリックス内の非定常炭素拡散は式(2.4)で示される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D \frac{\partial c}{\partial x_i} \right] \quad (2.4)$$

ここで D は拡散定数で c は炭素濃度である。偏微分変数は時間 t と位置 x_i である。組成に依存しないと仮定すると、拡散係数が一定で、式 (2.4) は次のように簡略化できる。：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \text{grad } C \quad (2.5)$$

これより拡散係数 D は、表面層全体の境界条件によって次の式で決まってくる：

$$D \nabla \cdot C \cdot n_i = h_c (C_e - C_s) \quad (2.6)$$

ここで、 h_c は表面反応速度の係数、 C_e は外部環境の炭素含有量、 C_s は表面の炭素含有量である。結果として D は式 (2.7) より炭素依存性が付与された関数となる。

$$D = f(C_e, t) \quad (2.7)$$

ここで、 C_e は含有する炭素の濃度で、 t は浸炭時間である。

2.3.5 硬化則

硬化則は塑性ひずみ ε_{ij}^p とスカラーの硬化則パラメータ κ によって表現される硬化は履歴と応力、温度を考慮して表現される。；

$$F = F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, \kappa, T) \quad (2.8)$$

κ と 温度 T は式 (2.8) で表現され、等方硬化則に拡張するために F は降伏曲面で表現され、テンソル値 ε_{ij}^p は不等方硬化則をしめし、

$$F = F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) - K(\kappa, T) \quad (2.9)$$

で表現される。硬化に従い降伏曲面が等方的に拡大していく等方硬化則を仮定するとした場合、この仮説により中心は移動せず、 ε は無視できるため降伏関数を次の形式で与える。

$$F = F(\sigma_{ij}, \kappa, T) = f(\sigma_{ij}) - K(\kappa, T) \quad (2.10)$$

逆応力と呼ばれる応力空間の降伏面の中心が α_{ij} で示され移動する場合の移動硬化則では数学的な記述において、硬化則パラメータ κ が消え、 σ_{ij} と σ_{ji} により $\sigma_{ij} - \alpha_{ji}$ を代入することにより導出される

$$F = F(\sigma_{ij} - \alpha_{ji}, T) = f(\sigma_{ij} - \alpha_{ji}) - K(T) \quad (2.11)$$

上記の等方性硬化則と移動硬化則の2つの仮説を組み合わせた場合、それぞれ (2.11) と (2.12) とされる。

$$F = F(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}, \kappa, T) = f(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - K(\kappa, T) \quad (2.12)$$

2.3.6. 変態塑性

総ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ は 弾性ひずみ, 塑性ひずみ, 熱ひずみ, 変態ひずみと変態塑性ひずみの総和であり, 以下で記述される.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \dot{\varepsilon}_{ij}^T + \dot{\varepsilon}_{ij}^{tr} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} \quad (2.13)$$

弾性ひずみは一般的に以下で表現される:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{kk}) \delta_{ij} \quad (2.14)$$

ここで E はヤング率, ν はポアソン比, δ_{ij} は応力テンソルの偏差成分である.

熱ひずみは温度変化 $(T - T_0)$ の関数で示され, 熱膨張率 α は以下で定義される.

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (2.15)$$

ここで α は炭素濃度と各組織の体積分率にて決定される.

塑性ひずみ速度は温度に支配される物性値に縮退して表現される

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.16)$$

$$\lambda = \hat{G} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \sigma_{kl} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} + \sum_{l=1}^N \frac{\partial F}{\partial \xi_l} \dot{\xi}_l + \frac{\partial F}{\partial C} \dot{C} \right\} \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{\hat{G}} = - \left\{ \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{mn}^p} + \frac{\partial F}{\partial k} \sigma_{mn} \right\} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \quad (2.18)$$

F は温度依存の降伏関数として表現される

$$F = F(T, C, \sigma_{ij}, \varepsilon^p, \xi_l, \kappa) \quad (2.19)$$

ここで T は温度, C は炭素濃度, σ_{ij} は変形応力であり, ε^p は塑性ひずみである, ξ_l は個々の相分率, κ は硬化率である.

ひずみ速度は I 番目の構成要素に依存する.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tr} = \sum_{l=1}^N \beta_l \dot{\xi}_l \delta_{ij} \quad (2.20)$$

ここで, β_l は I 番目の成分の相変化による無限小時間の長さの変化である [8], [9].

I 番目の成分の変態塑性は以下で記述される

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} = 3K(1 - \xi) \dot{\xi} \delta_{ij} \quad (2.21)$$

ここで K_I は マルテンサイト, ベイナイト, パーライト変態の変態塑性係数であり, I 番目の成分の膨張を示しており, δ_{ij} は応力の偏差成分である [8].

2.3.7. 応力-ひずみ速度の相関関係

全ひずみ速度は弾性ひずみ速度, 塑性ひずみ速度からなり, 無限小成分で考えたとき, 以下で記述される;

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2.22)$$

全ひずみの弾性成分はフックの法則で記述される.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \delta_{ij} \dot{\sigma}_{kk} \right) + \delta_{ij} \alpha \dot{T} \quad (2.23)$$

ここで G , ν と α は横弾性係数, ポアソン比と線膨張率である. 以上より全ひずみ速度は以下で表現される.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \delta_{ij} \dot{\sigma}_{kk} \right) + \delta_{ij} \alpha \dot{T} + \hat{G} \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \dot{\sigma}_{kl} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.24)$$

一定の体積塑性ひずみでの降伏を仮定したうえで応力速度にて展開し $\dot{\sigma}_{ij}$ は以下で記述される

$$\dot{\sigma}_{ij} = 2G \left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \frac{1}{S_0} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right) (\dot{\varepsilon}_{kl} - \delta_{kl} \alpha \dot{T}) - \frac{1}{S_0} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} \quad (2.25)$$

ここで

$$S_0 = \frac{1}{2G\hat{G}} + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \quad (2.26)$$

ここで本式を有限要素法(FEM)で取り扱うため, 構成式を行列形式. [] で表現してみる.

$$\{\dot{\sigma}\} = [D^{ep}] (\{\dot{\varepsilon}\} - \{\alpha\} \dot{T}) - \frac{1}{S_0} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} \quad (2.27)$$

ここで工学表記の応力・ひずみ及び線膨張率はそれぞれ以下で記述される.

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{xz}\},$$

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{xz}\},$$

$$\{\alpha\}^T = \{\alpha \ \alpha \ \alpha \ 0 \ 0 \ 0\}. \quad (2.28)$$

ここで行列 $[D^{ep}]$ は[]で記載される.

$$[D^{ep}] = [D^e] - [D^p] \quad (2.29)$$

ここで

$$[D^e] = 2G \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & & & & & & \text{sym.} \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & & & & & \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

そして

$$[D^p] = \frac{2G}{S_0} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_x}\right)^2 & & & & & & \text{sym.} \\ \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} & \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_y}\right)^2 & & & & & \\ \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} & \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} & \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_z}\right)^2 & & & & \\ \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} & \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} & \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} & \frac{1}{4} \left(\frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}}\right)^2 & & & \\ \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}} & \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}} & \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}} & \frac{1}{4} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{xy}} \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}} & \frac{1}{4} \left(\frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}}\right)^2 & & \\ \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}} & \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}} & \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}} & \frac{1}{4} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{xy}} \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}} & \frac{1}{4} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{yz}} \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}} & \frac{1}{4} \left(\frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

降伏関数の例として, 等方硬化を伴う Von Mises 条件がある.

$$F = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \frac{1}{3} \bar{\sigma} (\bar{\epsilon}^p)^2 \quad (2.32)$$

ここで, 変形抵抗 $\bar{\sigma}$ の温度性は単純化のために無視できる. $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = s_{ij}$, として硬化測は以下で簡単化される.

$$\frac{1}{\bar{G}} = - \left(\frac{2}{3} S_{mn} S_{mn} \right)^{\frac{1}{2}} \left(- \frac{2}{3} \bar{\sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}^p} \right) = \frac{4}{3} \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\epsilon}^p} \quad (2.33)$$

これより *Prandtl-Reuss flow rule* が導かれる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{\bar{\epsilon}^p}{\bar{\sigma}} s_{ij} \quad (2.34)$$

硬化係数 H' は (等価) 応力- (等価) 塑性ひずみ曲線の傾きとして定義される。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{\bar{\sigma}}{\sigma H'} s_{ij} \quad (2.35)$$

行列 $[D^{ep}]$ はこの場合単純化され、

$$[D^p] = \frac{2G}{s_0} \begin{bmatrix} S_x^2 & & & & & & \text{sym.} \\ S_x S_y & S_y^2 & & & & & \\ S_x S_z & S_y S_z & S_z^2 & & & & \\ S_x \tau_{xy} & S_y \tau_{xy} & S_z \tau_{xy} & \tau_{xy}^2 & & & \\ S_x \tau_{yz} & S_y \tau_{yz} & S_z \tau_{yz} & \tau_{xy} \tau_{yz} & \tau_{yz}^2 & & \\ S_x \tau_{zx} & S_y \tau_{zx} & S_z \tau_{zx} & \tau_{xy} \tau_{zx} & \tau_{yz} \tau_{zx} & \tau_{zx}^2 & \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

ここで

$$s_0 = \frac{2}{3} \bar{\sigma} \left(1 + \frac{1}{3G} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}^p} \right) = \frac{2}{3} \bar{\sigma} \left(1 + \frac{H'}{3G} \right) \quad (2.37)$$

Von Mises 降伏関数は $\bar{\sigma}_0$ を用いて移動硬化測として表現される。

$$F = \frac{1}{2} (s_{ij} - \beta_{ij})(s_{ij} - \beta_{ij}) - \frac{1}{3} \bar{\sigma}^2, \quad \beta_{ij} = x_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \alpha \quad (2.38)$$

二次元問題への拡張のため、行列 $[D^{ep}]$ は [] に縮退する

$$[D^{ep}] = [D^e] - [D^p] \quad (2.39)$$

ここで弾性応力-ひずみ行列は以下となる

$$[D^e] = \begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{1}{1-\nu} & & \text{sym.} \\ 2G \frac{1}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} & \text{平面応力} \\ \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & & \text{sym.} \\ 2G \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} & \text{平面ひずみ} \end{cases} \quad (2.40)$$

$[D^p]$ は以下で記述される

$$[D^p] = \frac{2G}{S_0} \begin{bmatrix} S_1^2 & & \text{sym.} \\ S_1 S_2 & S_2^2 & \\ S_1 S_3 & S_2 S_3 & S_1^2 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2.3.8. 変態塑性の応力依存性

前述の文献によると、塑性ひずみは以下で記述される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} = \sum_{I=1}^N 3K(1 - \xi) \dot{\xi} s_{ij} \quad (2.42)$$

ここで一軸ひずみの場合の変態塑性応力は次のように示される。

$$K = \frac{\bar{\varepsilon}^{tp}}{\sigma} \quad (2.43)$$

ここで $\bar{\varepsilon}^{tp}$ は等価ひずみであり、変態塑性係数 K は定義される相変態が起きた際の引っ張りである。

しかし、加熱段階では、オーステナイト変態が起こるとき、変態塑性は結晶粒系に依存すると予測され、変態塑性ひずみは次式で表される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} = 3 \frac{-3\Delta\varepsilon_{1 \rightarrow 2}^{th}}{(\sigma_0 + k_y \cdot d^{-0.5})} \ln(\xi) \dot{\xi} s_{ij} \quad (2.44)$$

ここで一軸ひずみの場合の変態塑性応力は次のように示される

$$\bar{\varepsilon}^{tp} = \frac{2\Delta\varepsilon_{1 \rightarrow 2}^{th}}{(\sigma_0 + k_y \cdot d^{-0.5})} \bar{\sigma} \quad (2.45)$$

ここで σ_0 は多結晶粒内の転位の移動に対する摩擦である。 k_y 塑性流動のために転移が移動するのに必要な局所応力の規模である。 d は平均結晶粒径、 σ_0 は一定である。 k_y は実験的に同定するのは困難である。

オーステナイト変態が発生すると、変態塑性ひずみと応力との線形性は次のように記述される。

$$K(\bar{\sigma}) = \frac{\bar{\varepsilon}^{tp}}{\bar{\sigma}} \quad (2.46)$$

$$K = a_1 + a_2 \bar{\sigma} + a_3 \bar{\sigma}^{-2} \quad (2.47)$$

具体的には、次の Fig. 2. 7. に示す実験結果から、応力依存性を最小二乗法で近似しその結果を式 (12) に示す。

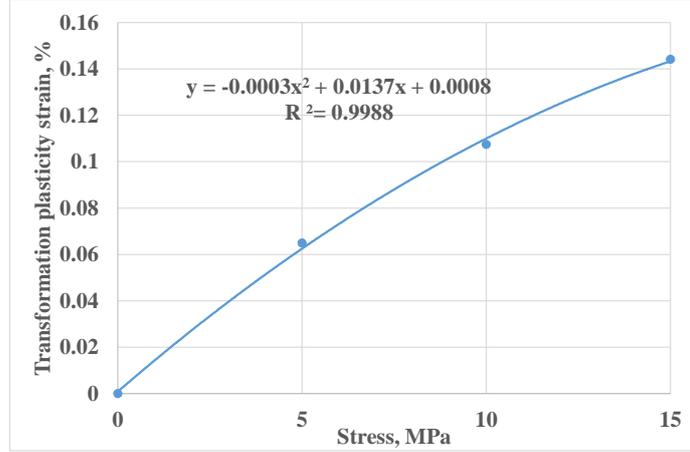


Fig. 2. 7. 変態塑性の応力依存性

$$K = 0.008 + 0.0137\bar{\sigma} - 0.0003\bar{\sigma}^{-2} \quad (2.48)$$

上記により、オーステナイト変態の変態塑性ひずみを考慮した有限要素法の応力/ひずみ定式化は次のように表現できる。

$$\begin{aligned} \{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \{\sigma\} + \sum_{I=1}^N \alpha_I (T - T_0) d\xi_I \{1\} + \sum_{I=1}^N \alpha dT \{1\} + \sum_{I=1}^N \beta_I d\xi_I \{1\} \\ + 3K(\bar{\sigma}) \ln(\xi_I) d\xi_I \{s\} + \hat{G} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial T} dT \right) + \sum_{I=1}^N \frac{\partial F}{\partial \xi_I} d\xi_I \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\{d\sigma\} = [D^e] \cdot \left(\begin{array}{l} \{d\varepsilon\} - \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \{\sigma\} - \sum_{I=1}^N \alpha_I (T - T_0) d\xi_I \{1\} - \sum_{I=1}^N \alpha dT \{1\} - \sum_{I=1}^N \beta_I d\xi_I \{1\} - 3K(\bar{\sigma}) \ln(\xi_I) d\xi_I \{s\} \\ - \hat{G} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial T} dT \right) + \sum_{I=1}^N \frac{\partial F}{\partial \xi_I} d\xi_I \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \end{array} \right) \quad (2.50)$$

熱処理シミュレーションにおける、炭素濃度分布・温度変化・変態・応力・変形等は以上の構成式によって計算される。

2.3.9. 硬さの導出

ジョミニー曲線は Fig. 2.8. の様に円柱材を一定の速度で冷却し，冷却端からの距離と硬さの相関をしめしたもので，鋼材毎に定義される．冷却端から試験片内の位置までをジョミニー距離と呼び，ジョミニー距離は焼入時の 800℃から 500℃の冷却時間と相関を持つ．これより鋼材，もしくは炭素濃度毎のジョミニー距離のデータベースを用い，式(1)にて算出される．

$$H = f(Q, C) \quad (2.51)$$

ここで H は熱処理完硬さ， Q は 800℃から 500℃への冷却時間， C は鋼材成分(主に炭素濃度)である．

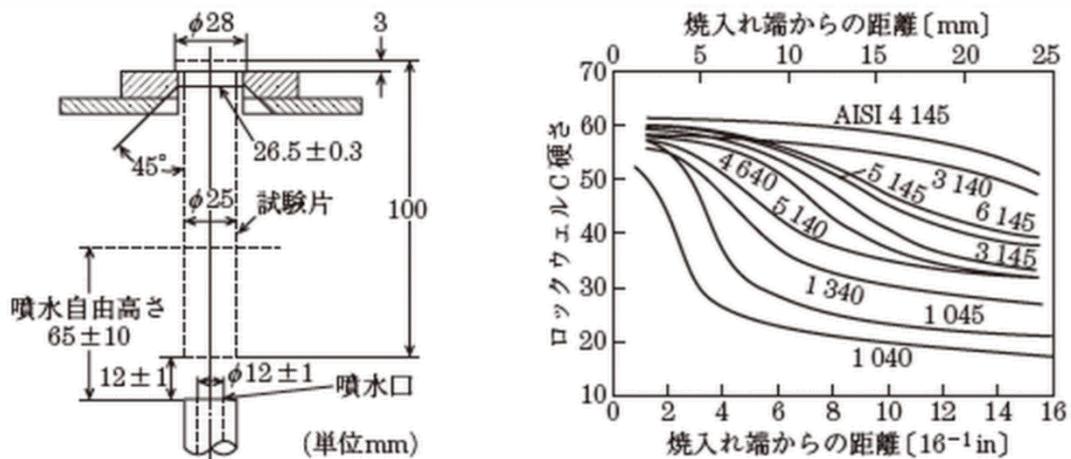


Fig. 2.8 ジョミニー試験(左)とジョミニー曲線の例(右)

以上の構成式を FEM を用いて解くことにより，熱処理シミュレーションにより熱処理変形，熱処理後応力分布，熱処理後組織，硬さ等の熱処理品質を求めることができる．

参考文献

- [1] 井上達雄・田中喜久昭：材料，22-218(1973)，pp. 218-223.
- [2] 杉本剛，2015 日本熱処理技術協会 熱処理セミナー講演資料
- [3] 小野寺 秀博，阿部 太一，下野 昌人，小山 敏幸，鉄と鋼，Vol. 100(2014)，10，pp. 1207-1219
- [4] 岡本成史，山中晃徳，下川辺隆史，青木尊之，Transactions of JSCES, Paper 20130018
- [5] 近藤喜之，程凌，小室吉輝，児玉教司，三菱重工技報，55(2)，2018，1-5
- [6] たとえば
<https://www.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/doc/users/forum/forum20190426/ohshima.pdf>
- [7] 時弘義雄，田村今男，鉄と鋼，(60)12，1974，1639-1645
- [8] Yu, H., Li, C., Xin, Y., Chapuis, A., Huang, X. and Liu, Q., Acta materialia, 2017, vol. 128, 313-326
- [9] Cordero, Z., Knight, B. and Schuh, C., *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, no. 8, 495-512

第三章 実操業における浸炭熱処理シミュレーション の検証

3.1. 集団熱処理での熱処理品質のばらつきとそのシミュレーション

熱処理工程で発生する熱処理ひずみは様々な損失を生んでおり、これを解決するために様々な実験的・実生産上の対策が行われている。近年、コンピュータの進歩に伴い数値解析技術が大きく進歩し、熱処理シミュレーションによる熱処理ひずみの予測手法についても多くの研究がなされている^[1]。近年、駆動系の静粛化と自動車の低コスト化の要求により、熱処理変形の予測精度要求が高まっている^[2]。特に大量生産においては、大量処理における熱処理ひずみの変動を推定することが非常に重要である。

浸炭油焼入工程で発生するひずみには、多くの要因が影響を与えることが報告されている。これらの個々の要因の影響は経験的に知られている。Table3.1.に熱処理ひずみおよび各ひずみ現象に影響を及ぼすプロセス因子の関係を示す。Table3.1.に示す様に一般に熱ひずみおよび変態ひずみの影響が特に重要である^[3]。本研究では、量産で用いられる複数個同時処理である団体熱処理における個々の部品の熱処理ひずみを推定するために、熱処理シミュレーションとコンピュータ流体力学(CFD)を組み合わせることで焼入工程の現象を説明することを試みた。

Input parameter		Thermal deformation	Trans-form deformation	Creep deformation	Carburizing deformation	
Boundary Conditions	Carburizing, diffusing and keeping temperature	○	○	○	○	
	Thermal boundary conditions	Quenchant type	◎	◎		
		Flow speed of quenchant	◎	◎		
		Flow velocity of quenchant	◎	◎		
		Atmosphere pressure of vestibule	○	○		
		Surface roughness of parts	○	○		
	Radiation	Surface roughness of parts	○			
		Equipment wall type	○			
	Mechanical boundary conditions	Fixture and parts load setting	○	○	○	
	Chemical boundary conditions	Gravity			○	
Carbon potential of atmosphere			○		○	
Carbon reaction coefficient			○		○	
Material Properties	Carbon diffusion coefficient	○	○	○	○	
	Transformation properties		○			
	Mechanical properties	○	○	○	○	
Effect of Preprocess	Heat properties	○	○			
	Residual stress	○				
	Metallographic structure and its distribution		○			

◎Factor interest in this paper the factor associate with cooling
○Factor

Table 3.1. 熱処理におけるひずみへの寄与

3.1.1. 実験方法

熱処理ひずみを確認するために、浸炭焼入実験を行った。焼入実験は、不二越（株）製のマッフル型雰囲気炉を用い、不活性窒素雰囲気下で行った。Fig. 3.1. に示す代表的な自動車部品に対して Fig. 3.2. 及び Fig. 3.3. に示す条件で熱処理を行った。浸炭後、応力除去焼鈍を行って、前加工工程で加えられた残留応力を除去し、850℃の焼入温度で1時間保持した後、油中に焼入れた。焼入れはプロペラ型のアジテータ及び整流板をもつ焼入槽にて、焼入油は出光興産（株）製ハイテンプ-Xを用いた。同時に Fig. 3.3. に示す部品に熱電対を取り付けた部品を装入し、冷却状況を測定した。

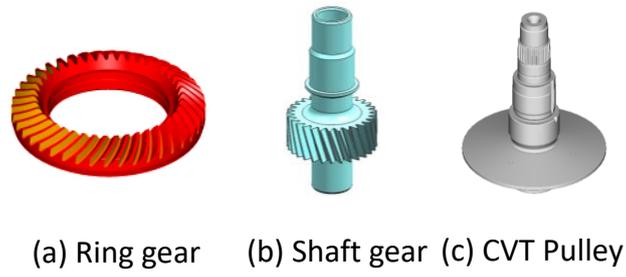


Fig. 3. 1. 本研究で用いた自動車用部品

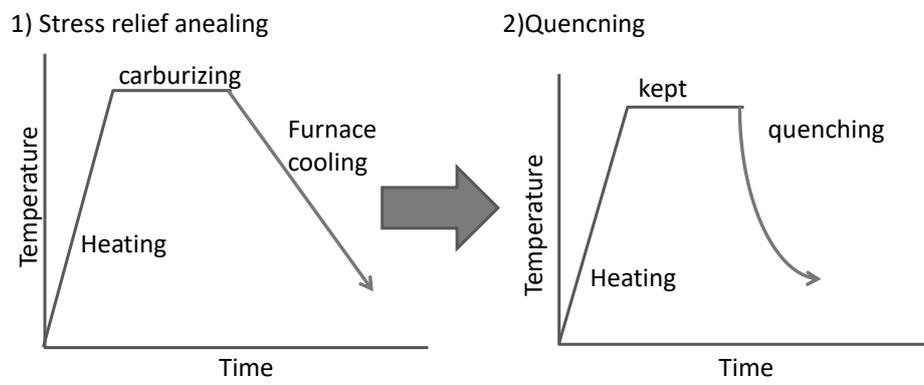
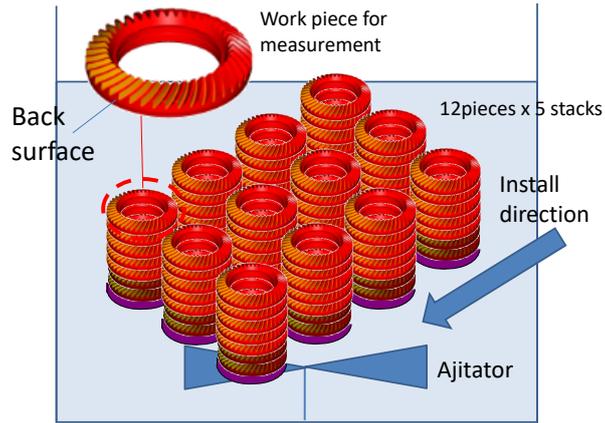
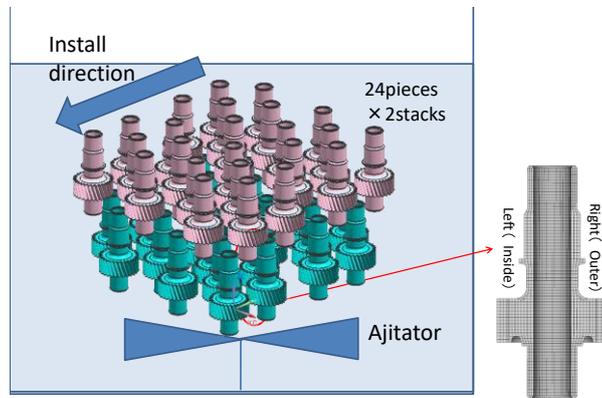


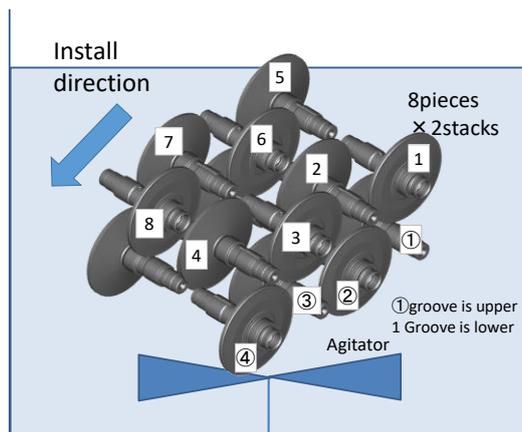
Fig. 3. 2. 熱処理条件



(a) ハイポドギヤの熱処理荷姿



(b) シャフトギヤの熱処理荷姿



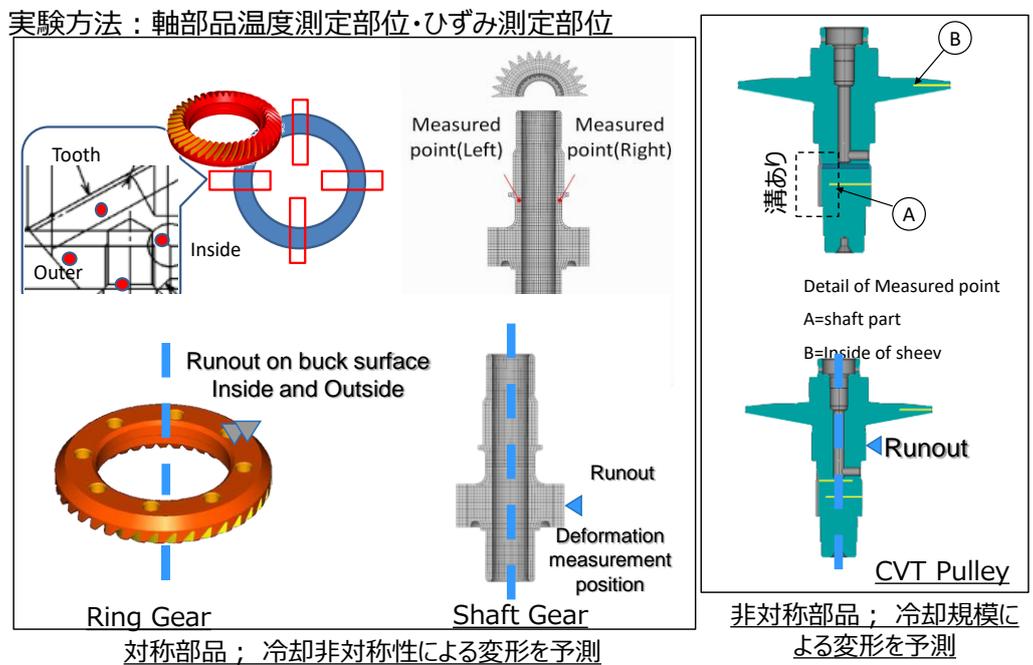
No.; Distortion and Temperature were measured

(c) CVTプーリーの熱処理荷姿

Fig. 3.3. 焼入荷姿

3.1.2. 計算方法

CFDによる油槽中の油流れの計算では簡便の為に熱対流，熱伝達および沸騰の影響を無視した。リングギヤ，シャフトギヤについては前述の条件で実測した冷却曲線を基にして逆問題法にて熱伝達率を計算した。これらの逆問題計算は，部品表面のFig. 3.4. 部位に熱電対を装着し，図に示すいくつかの領域に分割して実施した。この熱伝達率を用いて熱処理シミュレーションにてひずみの推定を行った。リングギヤ・シャフトギヤの計算結果に基づきCVTプーリーについて焼入時熱伝導率の近似式を検討し，これを用いることで流体解析結果を用いた焼入冷却シミュレーションを実施した。本実験の流れをFig. 3.5. に示す。CFD条件をFig. 3.6. に示す。



(a) ring gear

(b) shaft gear

(c) CVT Pulley

Fig. 3.4. 各部品のひずみ測定と温度測定

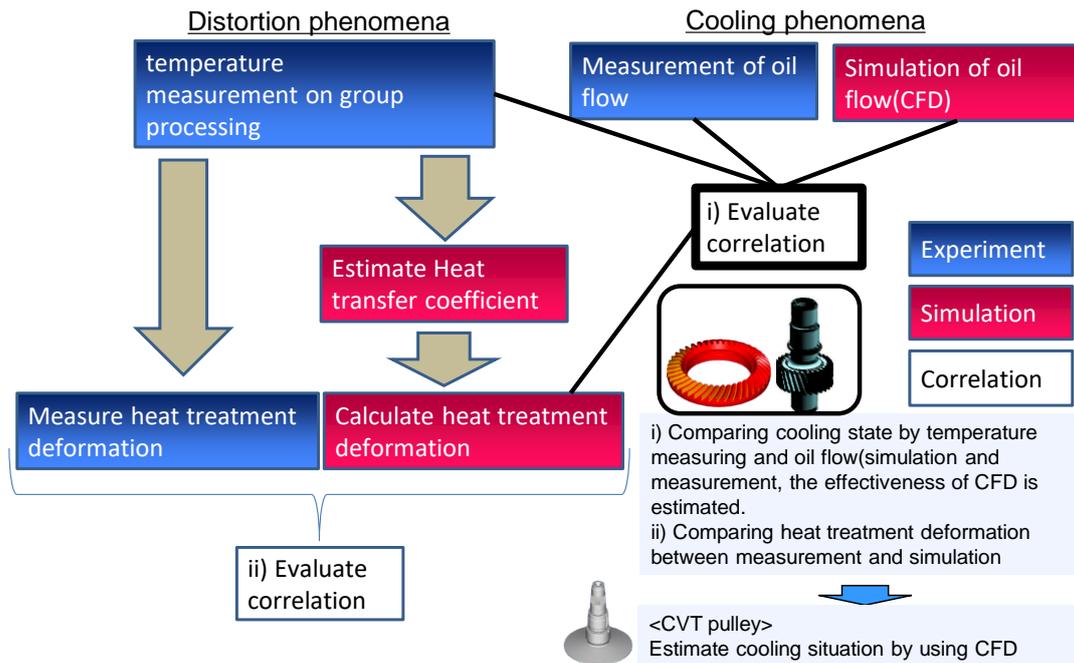


Fig. 3.5. 本研究での実験の流れ

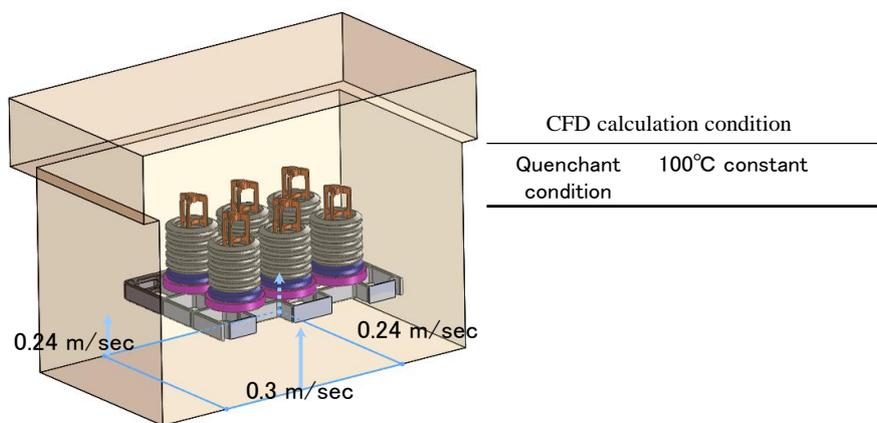


Fig. 3.6. 流体解析条件

3.1.3. 実験結果と計算結果の比較

CFD解析の結果と実験結果の流速を比較した。熱処理シミュレーションは、測定された冷却曲線から推定された熱伝達率を用いて行った。

CFDでは、炉内を空荷にした場合の炉床の実際の流速測定値に基づいて不均一な油流入条件を設定した。熱処理シミュレーションでは、硬化層の炭素濃度、組織勾配等を再現

するために、要素のサイズを1mm未満に設定した。材料物性値には一般に利用可能な材料データとしてUES Software Asia CompanyのJMatProのデータと、日本のVHT Projectの過去に研究された材料特性データベースを用いた^[4]。なお、本件で用いる鋼材の熱容量値に関しては磁気変態の影響を評価したうえで、磁気変態(キュリー変態)を考慮した^[5]。

3.1.4. 結果と考察

リングギヤとシャフトギヤについて測定した冷却曲線に基づき、実体形状について熱処理シミュレーションを用いた逆問題法にて焼入時の熱伝達率を求めた。この熱伝達率に基づいてシミュレーションにより熱処理ひずみを計算した。また、流体解析を並行して行い、流体解析の結果と熱伝達率の結果も比較した。これらの結果をFig. 3.7., 3.8., 3.9., 3.10. に示す。両者とも、熱処理ひずみの方向は実際の測定結果・計算とも一致しており、熱処理シミュレーションを用いて団体荷姿の定性的なひずみ傾向を予測できることが確認できた。リングギヤとシャフトギヤとも、実際の測定とシミュレーションは近いものとなった。

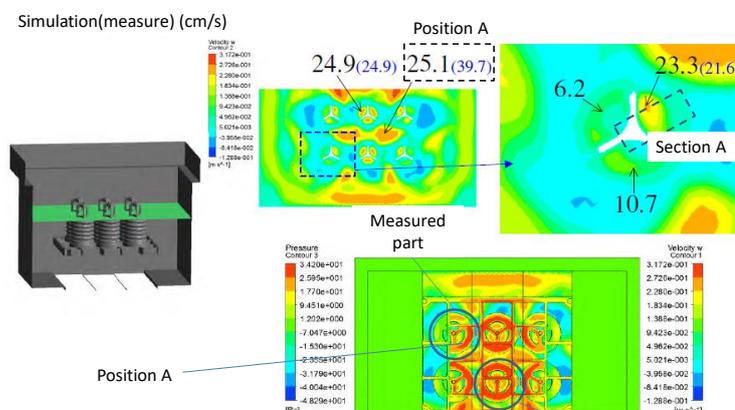


Fig. 3.7. ハイポイドギヤの流体解析結果

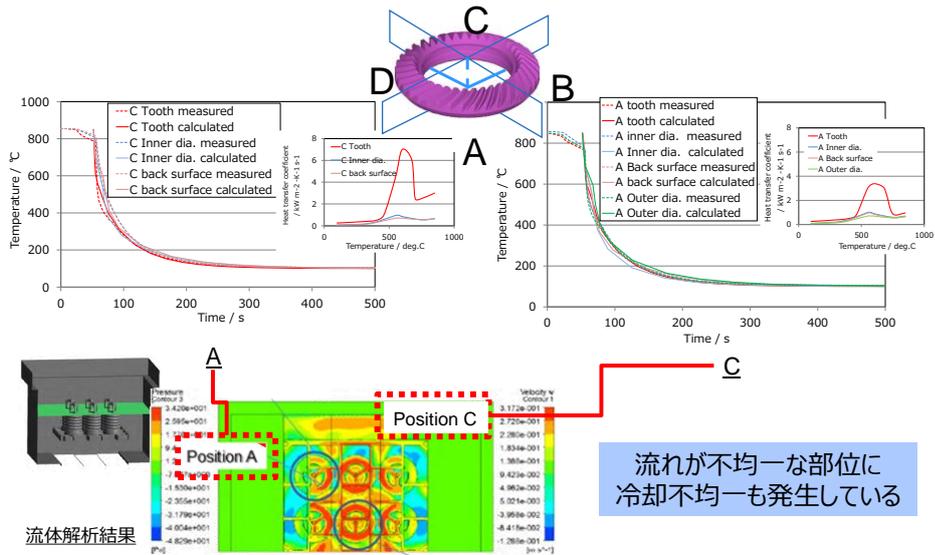


Fig. 3.8. ハイポイドギヤの熱伝達率導出結果

シャフトギアでの流れ、冷却曲線と熱伝達率

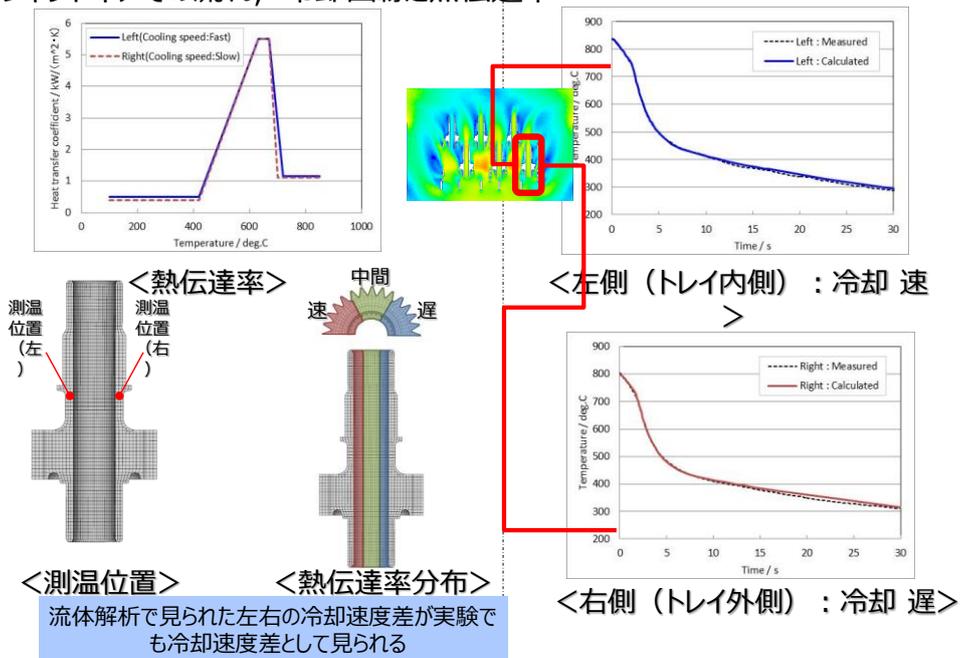


Fig. 3.9. シャフトギヤの熱伝達率導出結果

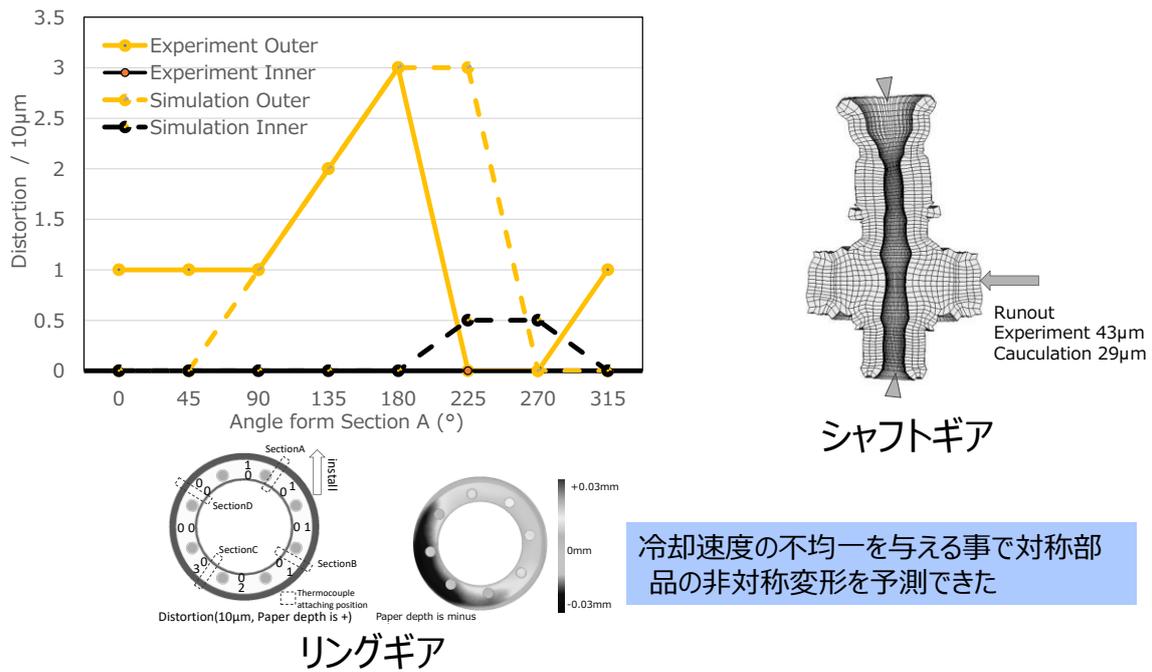
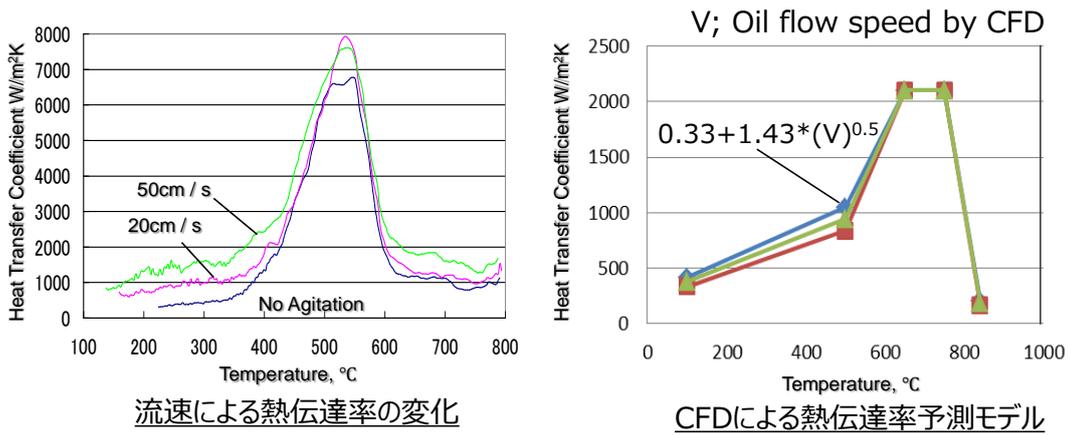


Fig. 3.10. リングギヤとシャフトギヤのひずみ

3.1.5. 流体解析による熱伝達率の導出

上記より流体解析の結果と冷却の結果に定性的な相関がみられたため、熱伝達率のモデル化を行い、流体解析結果を用いた熱処理シミュレーションによるひずみ解析を試みた。

Fig. 3.11. 左側のグラフに示すように、油焼入れでの油の流速が変化すると、熱伝達率は主に対流段階で変化することが実験的に見て取れる。これより、Kramer の法則に基づき Pr 数、Re 数を定め Fig. 3.11. 右側に示す定式化を行った。



Kramer's law; Non-dimensional HTC Nu

$$Nu = Pr^{0.3} \cdot (0.97 + 0.68 \cdot Re^{0.5}) \quad 1 < Re_d < 2000$$

Fig. 3.11. 熱伝達率のモデル化

この式を用い、ワークの表面の冷却状態を予測した結果と実験値の比較をFig. 3.12. に示す. 部位による冷却速度の差異を表現できているといえる.

CFDによる冷却曲線の予測

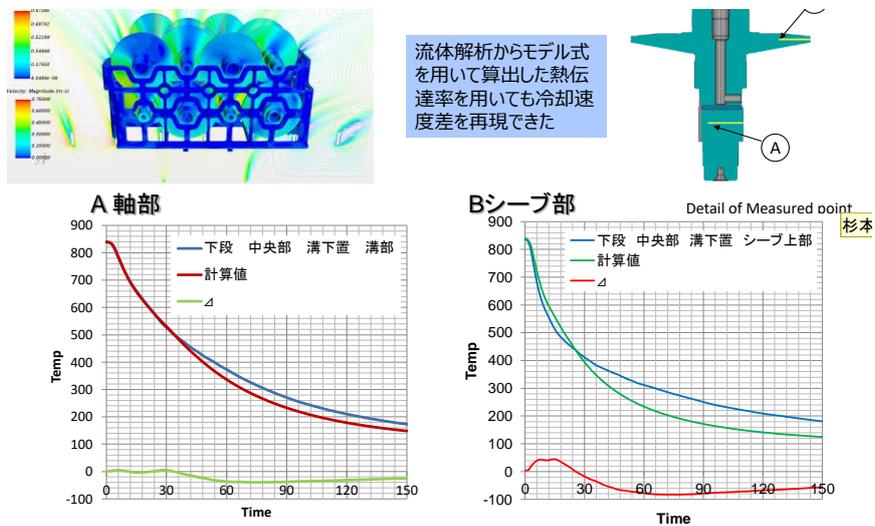


Fig. 3.12. モデル化した熱伝導率による冷却予測結果

3.1.6. 流体解析によるひずみ解析結果

前述より得られた熱伝導率を用い, Fig. 3.3. (c)の CVT プーリーにおける集団荷姿でひずみの予測を行った. 結果を Fig. 3.13. に示す. 複数個の荷姿内に熱処理ひずみの方向は一致したがそのひずみ規模は特にみぞが上になる荷姿では一致しなかった.

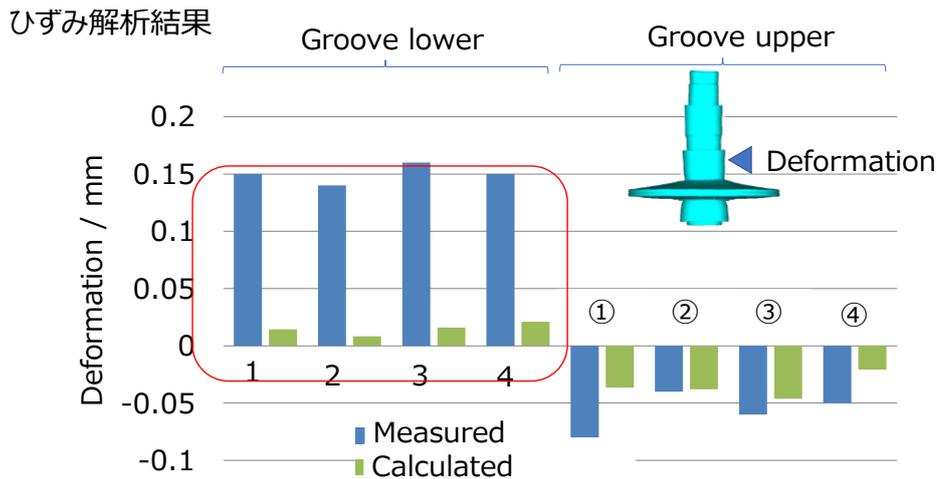


Fig. 3.13. 流体解析と連成したひずみ解析結果

3.1.7. 議論

シミュレーションにより団体焼入熱処理ひずみを予測するには、焼入油の流れを予測し、流れの状態から冷却状態を予測した上で、冷却状態からの熱処理変形を予測する必要がある。この手順にてシミュレーションの結果と実験値を各ステップで比較した。その比較結果を Table 3.2. に示す。CVT プーリでは、流れの状態から冷却状態を予測する際にずれが生じていることが分かった。Fig. 3.14. に示すように、低速流つまり層流となる領域では、流速と熱伝達率との相関は良好ではない。この乖離の原因は油槽内のアジテータ攪拌回転数が遅い焼入条件ではエレベータ下降もしくは熱対流起因の流れが相対的に大きく、攪拌を主たる流れの要因とするシミュレーションでは誤差が大きくなる為と考えられる [6], [7].

3.1.8. 集団荷姿での熱処理シミュレーション小括

代表的な 3 種類の自動車用熱処理部品形状について、熱処理シミュレーションを用いた実際の実装形態の品質予測を行い、以下の結果を得た。

(1) 流体解析及び熱処理シミュレーションにより、実際の荷姿における冷却傾向を予測し、定性的なひずみ傾向を予測することができる。

(2) 但し、部品の形状や装荷方法によって一致の状態が異なり、特に焼入油の攪拌速度

が遅い領域では誤差が大きくなる。

Table 3.2. 部品毎の熱処理シミュレーション結果の比較

	Calculation accuracy between actual distortion on each parts		
	Oil flow speed between simulation and measurement	Measured cooling speed and calculated flow speed	experimented and calculated distortion
Ring gear	Good	Good	Good
Shaft gear	Good	Good	Good
CVT pulley	Good	Slightly good	Slightly good

Good; Quantitative and Qualitative consist, Slightly good; Qualitative consist

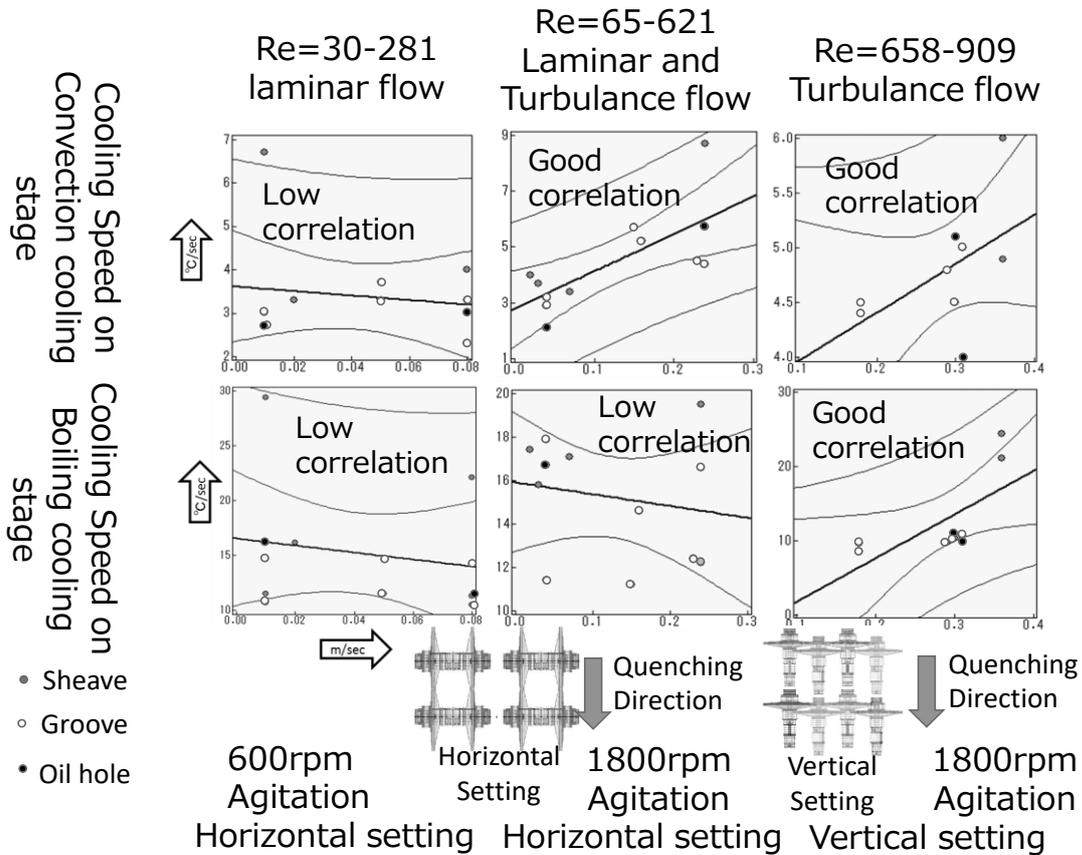


Fig. 3.14. CVT プーリー荷姿における実測冷却速度と流れの関係

3.2 歯車での熱伝達率が熱処理変形に与える影響

前項にて流体解析を用いて部品表面に冷却状態を付与する有益性を明確にした。本項では冷却状態を詳細に付与することが熱処理品質シミュレーションに対し有益かどうかを検証する。実用面を考慮し、焼入冷却状態が歯車の歯面精度に与える影響をシミュレーションにて評価した。

前述の様に焼入時部品積載方法が熱処理ひずみに大きく影響を与える事が知られているため、本章では部品積載方法が熱処理ひずみに与える影響を評価できるよう、冷却状態の与え方を検討した^[8]。積載方法に起因する部品の形状によって引き起こされる、冷却速度のギヤ表面位置による冷却速度の差(ばらつき)を分析し、本値をシミュレーションに付与し、そのひずみ結果を分析することで冷却速度ばらつきを付与する効果を検証した。

最初に、水平および垂直の積載荷姿での焼入中の歯の表面およびブランク形状の表面の冷却条件を測定した。歯の表面の熱伝達率は、iSight®およびDEFORM-HT®2D Ver 8.0を使用しこれらの測定値から計算した。その後、DEFORM-HT®3D Ver. 5.0.3により熱処理ひずみをシミュレーションにて計算した。最後にシミュレーションから得られたひずみの結果を実験結果と比較した。

3.2.1. 実験方法

3.2.1.1. 用いたギヤと熱処理条件

過去の解析事例を参考に^[9] 歯車の歯のひずみに対する焼入れの影響を調べるために、自動車トランスミッション用はすば歯車を使用した。SCr420H鋼で作られた歯車の寸法と仕様をFig. 3.15. に示す。はすば歯車の実験で浸炭処理を行った後、オーステナイト化温度から 373 K に油焼入れを施した。Fig. 3.16. に、浸炭および焼入条件と 4 つの焼入姿勢を示す。浸炭条件は 歯のドライブ表面のピッチ点にて浸炭深さ(Effective Case Depth, ECD)を 0.9 mm とした。処理前後の歯の寸法の変化を歯の熱処理ひずみとして定義した。CNC 歯車測定機を使用して熱処理ひずみを測定した。焼入れた各歯車について、90° ごとに 4 つの歯を測定した。

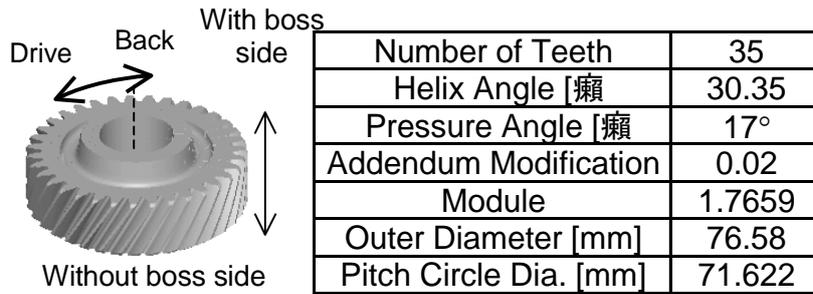


Fig. 3.15. 実験に用いたヘリカルギヤの諸元

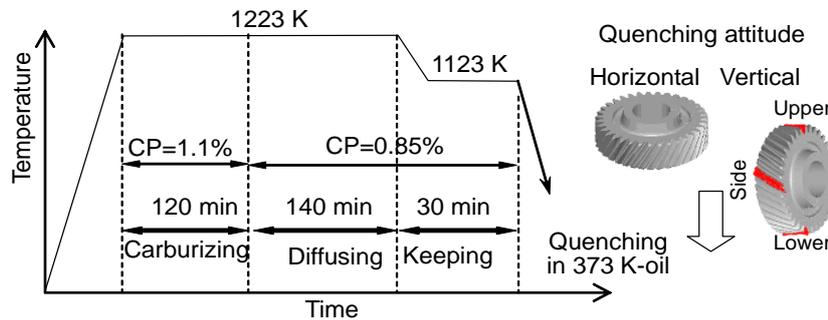


Fig. 3.16. 熱処理条件

3.2.1.2. 冷却速度の測定

ギヤの表面の冷却曲線は、K型熱電対をギヤの深さ 0.5 mm に埋め込んで測定した。直径 0.5 mm の熱電対を使用して、歯の表面の温度の焼入状態を測定した。熱電対は一歯とブランク断面 3ヶ所の系 12箇所に取付けた（歯幅方向の 3つの断面、ドライブ側 4点、つまり、ドライブ側とバック側の歯の高さの中間、歯の先端、歯の根元、Fig.3.17.）。焼入前のオーステナイト化温度は 1223 K とした。N₂ ガスにて、初期焼入温度を 1123 K に保持した。

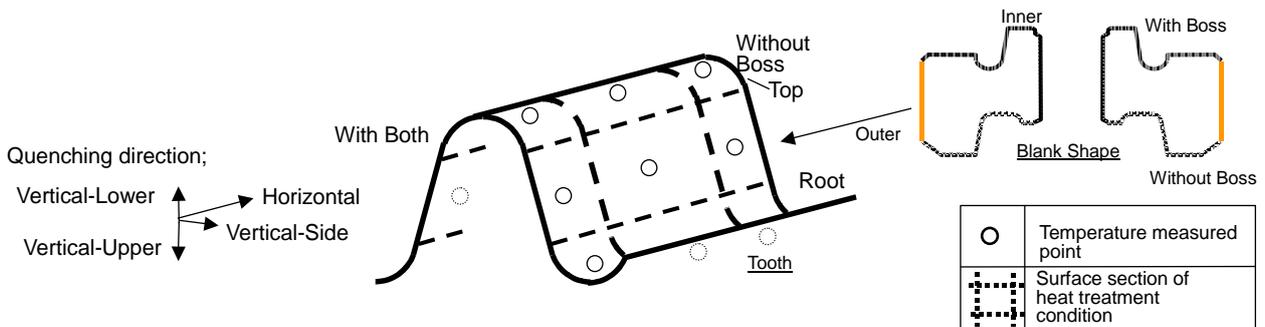


Fig. 3.17 温度測定点と熱伝達率導出における表面分割

3.2.1.3. 熱処理シミュレーションの実施

シミュレーションにて使用して、冷却状態が歯形誤差と歯筋誤差偏差に及ぼす影響を分析した。計算は逆問題手法を用いて行った。評価関数の考え方は式(1)及び Fig. 3.18. に示す。浸炭焼入ひずみは、水平、垂直、上部、側面、および下部の姿勢の測定された冷却曲線に基づいて、不均一表面熱伝達率モデルを使用して計算された。また、計算モデルと同じバルク冷却速度を持つ均一な表面モデルを使用して計算した。不均一モデルにおいては、内面、下面、上面に表面を分割し熱伝達率モデル^[10]を適用した。

加熱→浸炭→油焼入れでの熱処理ひずみシミュレーションを DEFORM-3D HT®Ver. 5.0.3 で実施した。計算負荷削減の為、一歯の有限要素モデルのモデルを作成した (Fig. 3.19.)。浸炭、マルテンサイト変態は井上のモデルにて表現した^[2]。室温条件の初期状態では、モデルにはベイナイトのみが含まれ、昇温後は全てがオーステナイトに変態、このオーステナイトのみがマルテンサイトとベイナイトに変態したと仮定した^[11]。このシミュレーションで使用される材料特性は、経済産業省 IMS 事業の VHT プロジェクトで測定されたものを用いた。

Fig. 3.17. には、歯の表面とブランク形状の表面の分割を示している。熱電対で測定した冷却曲線から Fig. 3.20. に示す構成で iSight®を用い熱伝達率を計算した。逆問題手法における表面分割は、ボスのある側(ボス側)、中央、およびボスのない側(ボスなし側)の断面とした。計算ポイントは Fig. 3.17. のとおりである。最適化の目的変数は、計算された冷却曲線と測定された冷却曲線の差の時間積分の関数として定義される。

$$F = \int_{t=0}^{t=\infty} |T_{calc} - T_{measure}| dt \quad (3.1)$$

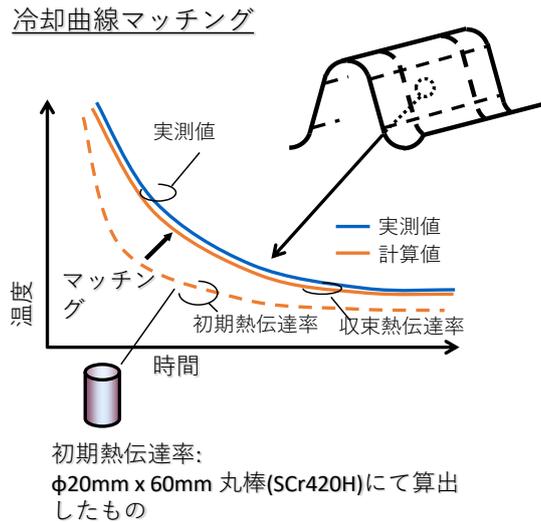


Fig. 3.18. 逆問題手法による熱伝達率の導出

熱伝達率曲線の4つの制御変数 (H_{rt} , H_{co} , H_{bo} , および H_{vp} , 各変数は、室温、対流ステップ、沸騰ステップ、および蒸気ステップでの熱伝達率に対応) で表される、これら制御変数は Fig. 3.21. に示した単純化された熱伝達率曲線にて目的関数 F を最小化する様に最適化された。最初に、関数 F に対する各 H 値の影響を推定するために、L14 実験計画法 (DoE) にて計算を実施した。2次ASAメソッドを使用して、グローバルパラメータ空間の H_{rt} , H_{co} , H_{bo} , および H_{vp} 値を最適化した。最後に、非線形プログラミング2次線探索 (NLPQL) を実行して、局部パラメータ空間での各値を最適化した。

以上のように導出した熱伝達率を用い、歯車歯面の熱処理変形シミュレーションを実施し、歯面の変形(以下、誤差；熱処理前形状からの変化)を求めた。計算条件を Fig. 3.22. に示す。負荷を削減するため、ワークは一歯に切り出し、切断面に周期境界条件を設定し計算を実施した。

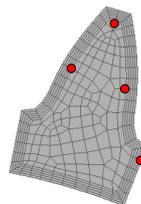


Fig. 3.19. Calculation points for inverse analysis

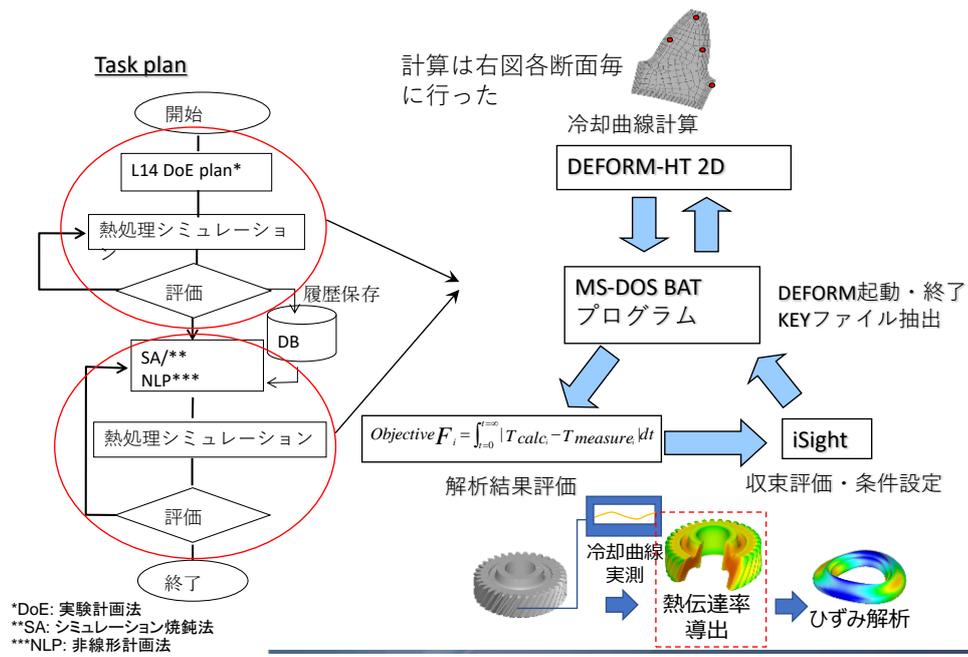


Fig. 3.20. 熱伝達導出計算の構成

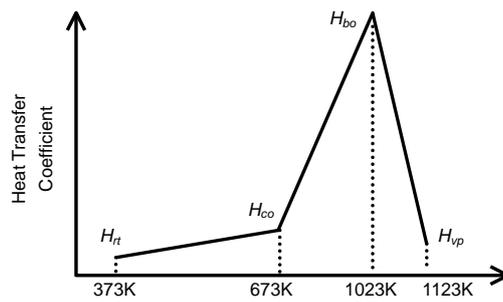


Fig. 3.21 熱伝達率の構成

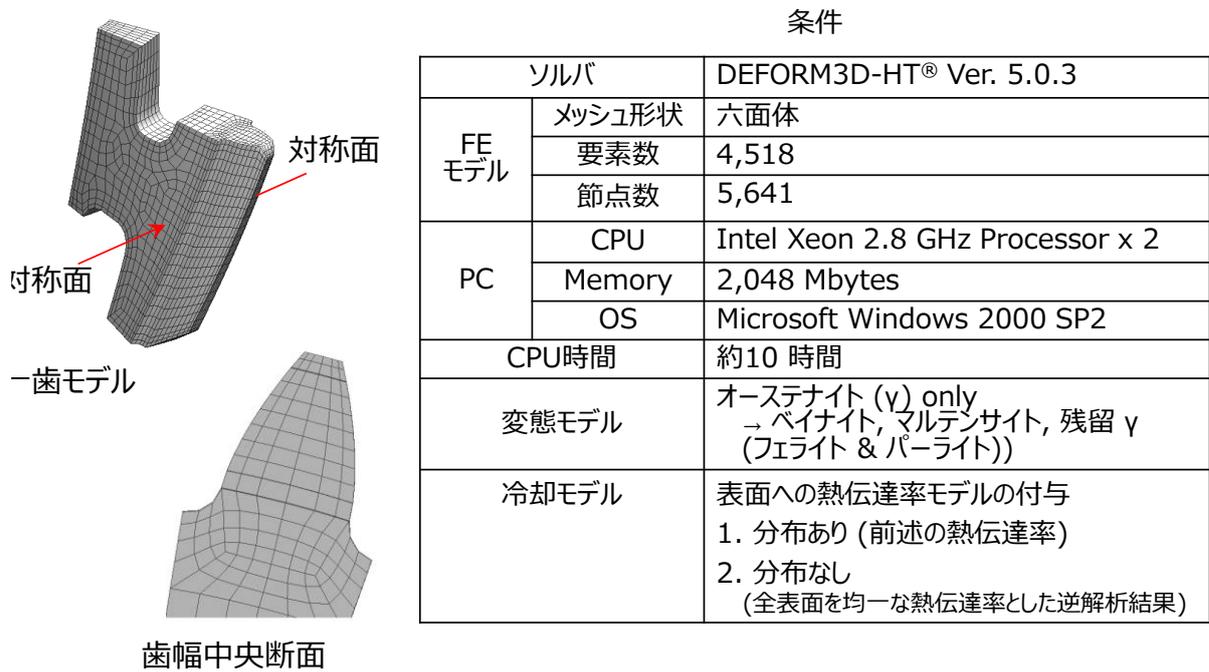


Fig. 3.22. 形状シミュレーションモデルの概要

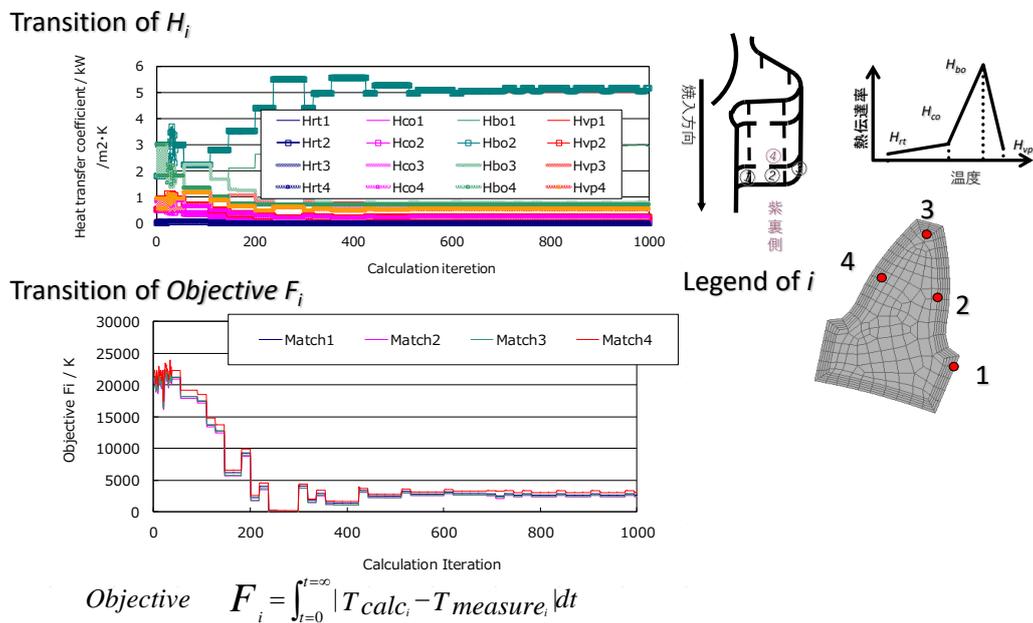


Fig. 3.23. 逆問題手法での導出過程

3.2.1.4. 冷却に関する結果と考察

熱伝達率の逆問題手法による導出結果を Fig. 3.23. に示す. 各変数は正常に収束しており熱伝達率が導出できた.

水平姿勢で測定された冷却曲線を Fig. 3.24. に示す. 冷却曲線は次のように要約される.

(1) 最大温度ばらつきは, 平均温度が約 973 K である 2 秒ポイント付近に現れた. この点以降, ばらつきは減少し (平均温度は約 723 K). 平均温度が 373 K に近づくとばらつきは少なくなり, その時点で差はほぼ 0 K であった.

(2) 723 K の間の焼入開始からの平均冷却速度は, 特にボス側の上側姿勢の場合, 歯の上部で根元よりも高く, 歯のエッジで中央よりも高かった. これは, 973 K 付近で発生した蒸気膜の減少が温度ばらつきにとって最も重要だからと考えられる.

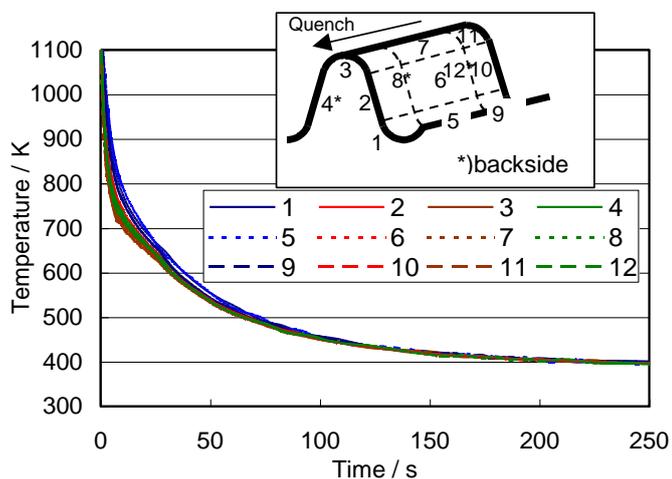


Fig. 3.24. 得られた冷却曲線

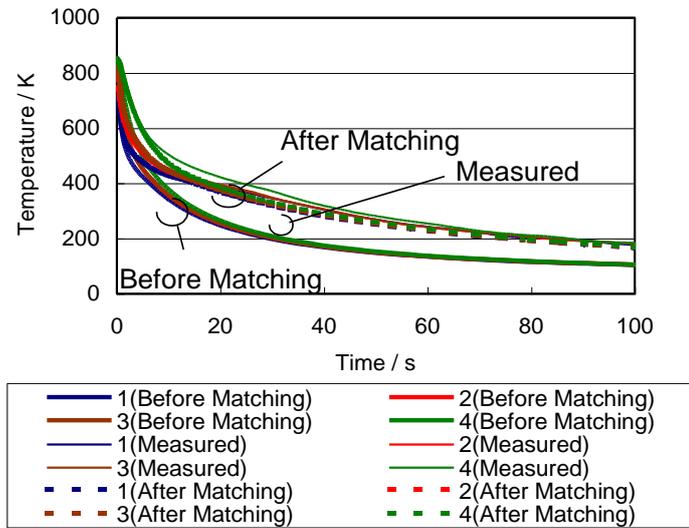


Fig. 3.25. 冷却曲線の逆問題手法による冷却曲線マッチング結果

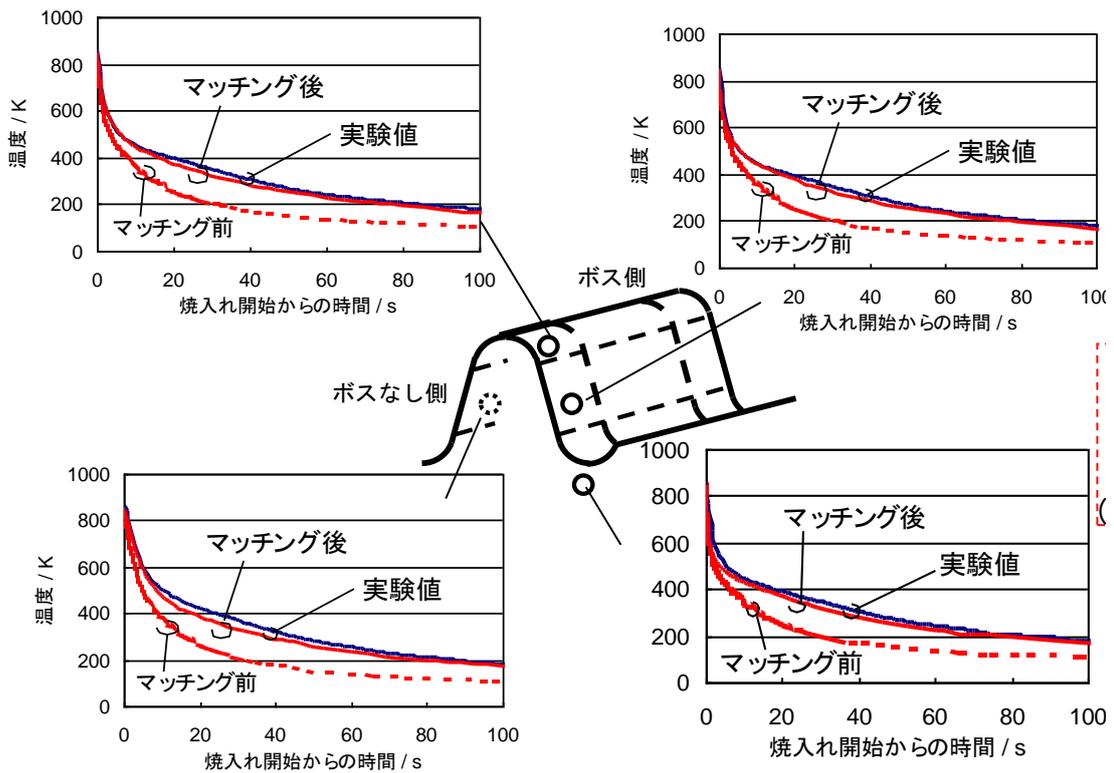


Fig. 3.26. 冷却曲線同定結果

3.2.1.5. 熱伝達率の同定

Fig. 3.26. は、逆問題手法で求めた冷却曲線のマッチングの様子を示している。Fig. 3.27. は、ドライブ面/焼入姿勢で分類された各部品品の計算された熱伝達の分布を示している。分布状況は、蒸気、沸騰及び対流の3つのステップで異なった。蒸気膜段階では、係数は放射状の分布を示す。沸騰段階の場合、流速が速い部分で熱伝達率は高い。対流段階では、係数は流量分布を示すと考えられる。これらの結果は、蒸気段階では、分布は蒸気膜の厚さに依存し、沸騰段階では蒸気膜の落下に依存し、対流段階では油の流れの順序に依存することを示唆している。

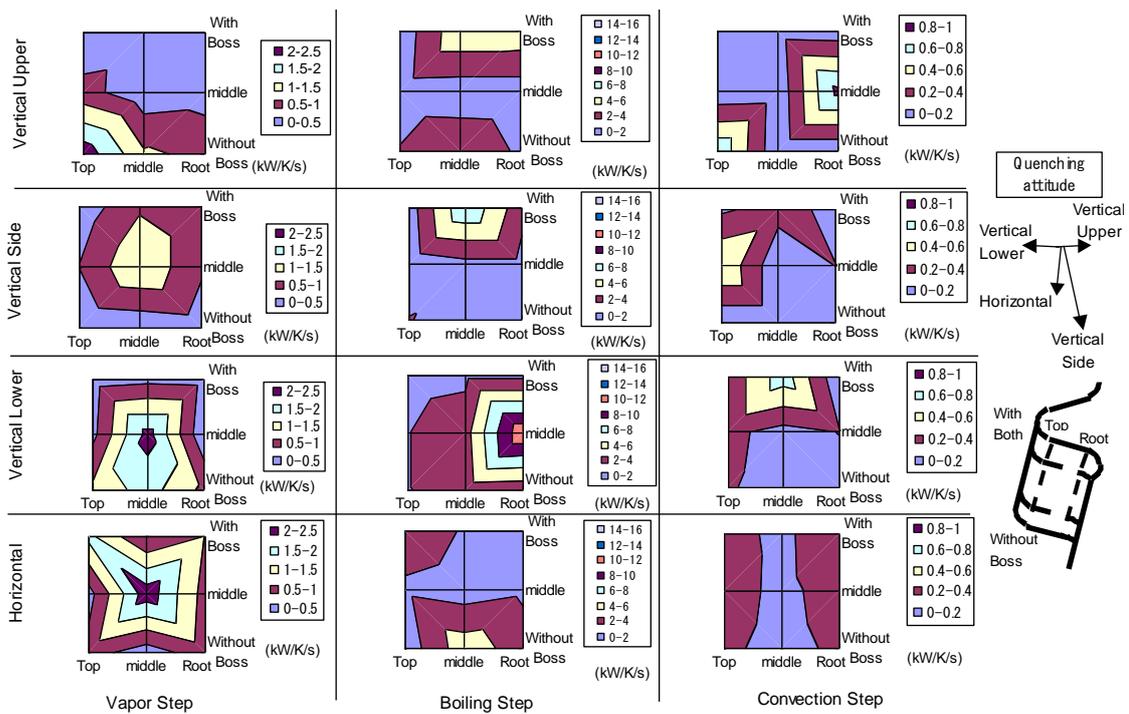


Fig. 3.27. 荷姿毎の熱伝達率の分布

3.2.1.6. 実験及びシミュレーションでの歯面変形の解析

Fig. 3.28. はドライブ面のシミュレーションされた歯形と歯筋誤差曲線を示している。横軸は歯の高さ/幅/上または側面からの距離の位置を示し、縦軸は誤差

を示す。形状誤差（左側のグラフ）は、各荷姿を反映した条件と、均一条件との間に、ねじれ角誤差（右側のグラフ）よりも大きな違いを示している。形状誤差は局所冷却条件によって支配されるが、ねじれ誤差は局所冷却条件だけでなく、ブランク形状ボディの冷却としての巨視的冷却条件によっても支配される。したがって、そのような違いが均一な熱伝達率を与えた場合と本件の熱伝達率を与えた場合で現れている。

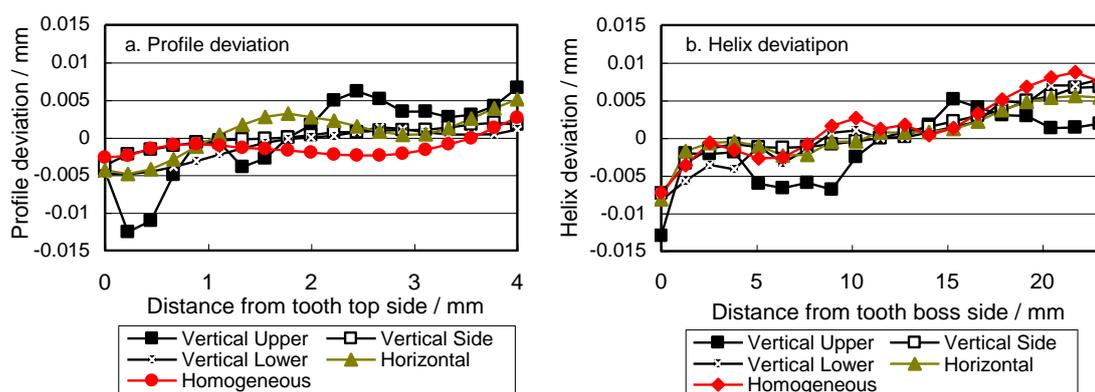


Fig. 3.28. 計算で求めた歯型形状誤差とねじれ角誤差

これらのプロファイル曲線から、歯形勾配誤差 ($f_{H\alpha}$)、歯形形状誤差偏差 ($f_{f\alpha}$)、歯筋勾配誤差偏差 ($f_{H\beta}$) および歯筋形状誤差偏差 ($f_{f\beta}$) を計算した。

Fig. 3.29. は、ドライブ歯面におけるこれらの結果と、実験結果の比較を示している。歯筋誤差では、垂直姿勢における形状誤差のばらつきは水平姿勢よりも小さくなった。歯筋勾配誤差のばらつきは、垂直姿勢の方が水平姿勢の焼入れよりも大きくなった。垂直姿勢での上中下の間で、実験的なねじれ角誤差とそのばらつきの差は歯形方向よりも小さくなっている。垂直姿勢では、ブランク形状の表面の流速分布は小さくなっている。したがって、これらの違いはわずかである。

形状誤差では、計算された変化は実験値のばらつきの範囲に近かった。しかし、計算された歯筋誤差、特に形状誤差はのばらつきは、実験ばらつきと近くはならなかった。これは、全体的なブランク表面での冷却条件の形状効果が、局所

的な冷却ばらつきよりもねじれ角のずれよりも強いためと考えられる。今回、ブランク表面の冷却状態は一断面しか計測していないが、今後はより詳細なブランクの表面の熱伝達率の調査が必要である。ブランク部位における効果は、冷却ステップ効果での差よりもその冷却条件に対してより強くなっている。したがって、歯筋の垂直、上、横、下の姿勢にはほとんどない。歯筋誤差の水平姿勢と 3 つの垂直姿勢の違いは、ブランクボディの平均冷却速度の違いを意味すると考えられる。

3.2.1.7. まとめ

1. 実験計画法と ANA / NLPQL 手法を使用した逆解析を用いて、歯の表面の熱伝達率を推定できる。
2. 歯の歯形形状誤差については、不均一条件な熱伝達率分布を与えることで均一な熱伝達率のシミュレーションよりも高い精度となった。
3. シミュレーションで予測した勾配誤差・ねじれ角誤差は実験値と同程度の規模となった。ただし、均一境界条件と不均一境界条件のシミュレーション結果の違いは明確ではない。ねじれ角誤差については、不均一な冷却条件により形状シミュレーションの精度が向上した。

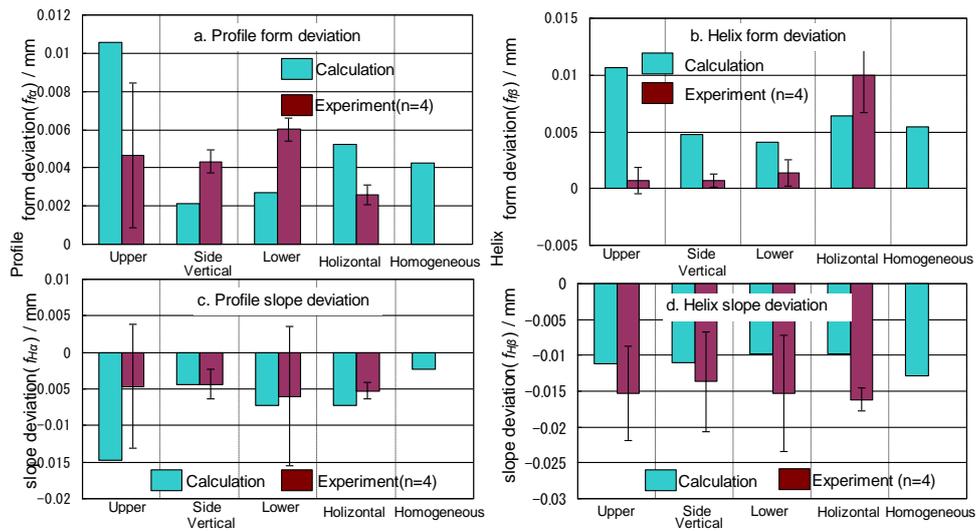


Fig. 3.29. 実験と計算での誤差の比較

3.3. 集団熱処理品質シミュレーションの展望

本項における研究の結果、流体解析を用いたひずみの予測手法の可能性を示すことができた。特に歯車の歯面の変形を予測するには歯面を詳細に分割し、その冷却状態を調査することでひずみの予測精度を向上させることができる。今後は計算機能力の上昇に応じ、経済的に見合う冷却速度予測が行われるべきであろう。

参考文献

- [1] Sachs, K, Avoidance of distortion in heat treatment, Metal Treatment and Drop Forging, 28, 281 (1961), 281-287.
- [2] Sugimoto, S., Watanabe, Y., The reports of 60th Japanese heat treatment society conference, (2005), 3-4
- [3] Narazaki, M., Quenching cooling and quenching simulation, NACHI Technical report A18 (2008) pp1-11
- [4] Inoue, T., Watanabe, Y., Okamura, K., Narazaki, M., Shichino, H., Ju, D., Kanamori, H., and Ichitani, K., A Cooperative Activity on Quenching Process Simulation --- Japanese IMS-VHT Project on the Benchmark Analysis and Experiment, Transactions of Materials and Heat Treatment, Vol.25, No.5 (2004-5) pp 28-34
- [5] Sonobe, M., Sugimoto, S., Taniguchi, K., Yamada, S., Matsuno, T., Kijima, S., the effect of latent heat in quenching simulation of steel, 53th the research committee for material of Toyama University.
- [6] Morrison, F. A., Morrison, Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere, Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI, <http://www.chem.mtu.edu/~fmorriso/DataCorrelationForSphereDrag2016.pdf>
- [7] Nakamura, G., Kamemoto, S., Numerical Simulation of Unsteady Heat Transfer around a Circular Cylinder to a Uniform flow by a Vortex and Heat Elements Method, 14th numerical fluid dynamics symposium, pp1-7
- [8] Shichino, H., Takasaki, T., and Nagasaka, Y.: Proceedings of the 20th JSME International Conference on Motion and Power Transmission, p. 273-278 (2001)
- [9] Takasaki, T., Fujiwara, Y., Aoyama, Y., and Kozuka, T.: Proceedings of the 20th Heat Treating Conference, ASM International, p. 680-687 (2000)
- [10] Narazaki, M.: Summary Reports of Japanese VHT Project, p. 11-12

(2004)

- [11] Haung, D., Arimoto, K., Lee, K., Lambert, D., and Narazaki, M. :
Proceedings of the 20th Heat Treating Conference, ASM International,
pp. 708-712 (2000)

第四章 浸炭熱処理シミュレーションの 精度検証

4.1. ASME V&V について

シミュレーションとは現実世界に起きる現象を数学モデルで記述し、この数学モデルを用いて計算機上の仮想空間で現象を再現したうえで仮想空間上にて起きた現象を用いて課題解決に取り組む手法である。

この言葉は極めて広義の意味を持つが、「ものづくり支援のため」の「工学シミュレーション」には、機械・構造物等を主たる対象とする力学シミュレーションのほか、集積回路作成支援のための半導体シミュレーションあるいは化学分野における分子設計シミュレーション等、それぞれの分野において様々な方法がある。本報告では連続体を対象とする力学シミュレーションに議論を絞ることとする。（以下ではこの言葉を単にシミュレーション、解析、あるいは CAE 等の言葉で表す）計算力学シミュレーションの基礎となる計算力学の代表的な手法としては、有限要素法、差分法、有限体積法等が挙げられるが、これらはそれぞれ、構造、流体、熱移動等の連続体 に対して、連立偏微分方程式の初期値問題あるいは境界値問題で表される場の問題を離散化して解く汎用的な工学シミュレーションの手法として、1960 年代から 1970 年代にかけて開発された手法であり、電子計算機（以下コンピュータという。）の発展とともに発展・普及してきた。70 年代には NASTRAN 等の汎用プログラムが開発され、ユーザー は自分でプログラムを作らなくてもこれをブラックボックスとして利用することが可能になり、また当初それぞれ別の分野で研究・開発が行われていたこれらの手法が計算力学と総称され、実験、理論に次ぐ第三の方法として認知されるようになった。研究面では IACM (International Association of Computational Mechanics) が 1981 年に設立され、以降、各分野にわたり、上記の構造力学、流体力学、熱工学等にをコアとして、材料工学を初めとして広い分野で研究がなされており、シミュレーションは総合工学としての特徴を持っている。我が国においては、1988 年に日本機械学会において材料力学、機械力学、流体工学、熱工学等に携わる研究者・技術者らが横断的に集まって計算力学部門が新たに設置され、また 1995 年には、機械工学、

建築・土木工学，電気・電子工学，原子力工学，情報科学，応用数学等の多様な分野の研究者・技術者で構成される日本計算工学会が発足して活発な活動を展開している．このほか日本シミュレーション学会，日本応用数理学会ほかの多数の学協会においても，計算力学に関する研究あるいはこの手法を用いた研究は活発に行われている．先に述べたようにこの手法がこれまでの実験，理論に次ぐ第三の方法として地位を築きつつある^[1]．一方，産業界におけるものづくりの現場においては，従来は実験および理論に基づく研究開発と，経験の積み重ねに基づいた規格・基準に依拠して設計が行われていた．70年代から80年代にかけて，コンピュータの能力の飛躍的发展とあいまって計算力学シミュレーションの有効性が立証され，各種汎用プログラムが整備されるとともに，産業界においてはこれらの活用が始まった．例えば既存の機械・設備等における運転中の事故などのトラブル発生等緊急の対応を迫られた折に，実験による検証は時間がかかりすぎ，またパラメーター・スタディは困難であるなどの理由で，シミュレーションによる事故原因の究明に活用されて成果を挙げた．次いで自動車や航空機に於いてはさらなる性能追及をするにあたり，より突き詰めた設計をするためにシミュレーションが有力な手法として活用されるようになった．しかしこれらの解析は，大型の計算サーバー，を用いて解析の専門家により行われていた．90年代に入って，エンジニアリング・ワークステーション（EWS）やパーソナルコンピュータ（以下パソコンという．）が普及し，またその能力が高まり，設計・生産技術の技術者が直接シミュレーションをする環境が整ってきた．設計・生産技術の技術者は通常，CAD（Computer Aided Design）のツールを使って設計図面を描いたり，工程設計をする．まず作るべき製品の形状を決め，強度，振動，流体特性，熱特性等を検討したうえで，シミュレーションにてその最適化を図る．

このようにシミュレーションの活用が進む中，新たな問題が発生してきている．すなわち必ずしも計算科学の専門家ではない一般の設計・生産技術者がシミュレーションツールを正しく使いこなせるのかという問題である．すなわち，計算の品質をいかに保証するかという問題である．計算力学シミュレーション

のツールは正しく使いこなせれば極めて有効であるが、誤った使い方をした場合にはそれによって開発された製品の安全性は必ずしも保証されず、使用中に破壊する等の思わぬ事故のもとになる可能性がある。

部品の強度を決める「熱処理」のシミュレーションにおいてはその技術レベルが未だ黎明期であり、従来個別の「計算ができるようになるための」研究が主体を占めてきた。しかその技術も進歩しつつあり、先に示したように集団の焼入等複雑な現象が解明できる様になってくると、その結果の検証は直感的には困難となってくる。

また、先述のように熱処理工法自体が複雑化し、その中で熱処理シミュレーションに対する期待・要求も大きくなってきているため、その精度も重要になってきている。熱処理は強度を造るための工程でありその重要度は高く、熱処理シミュレーションの品質保証は喫緊の課題となりつつあるといえよう。

Fig. 4.1. は CAE (Computer Aided Engineering) による自動車の商品開発手法の進歩を示している。自動車の世界に於いては 1985 年頃より CAE の導入が始まって以来、FEM による要素部品の設計が取り組み始められている。その後、CAD (Computer Aided Design) の普及によりより複雑な Assembly での仮想世界での性能検証が進められてきた。

ASME (American Society of Mechanical Engineering) 2006 ではシミュレーションの工学的な品質を保証するため V&V による品質の保証を求めている。これはシミュレーションと実際の結果が一致することだけを求めるのではなく、その途中の状況及びその現象の繋がりを検証することで、シミュレーションがより正しい現象を示している事を検証するための手法である。(Fig. 4.2.)

更に 2010 年頃より現実の世界での実験が複雑すぎて困難となってくる事例も多くなり、検証ではなく System そのものの設計を仮想世界で行う MBD (Model Base Development) の概念が取り入れられつつある (Fig. 4.3.) .

このようにシミュレーションを活用した商品開発の流れの中ではシミュレーション自体の品質保証が必要不可欠となっており、V&V の考え方もシミュレー

ションだけを視野にするだけでなく、統合した開発製品の品質保証と一体となり、開発プロセスそのものとなりつつある。

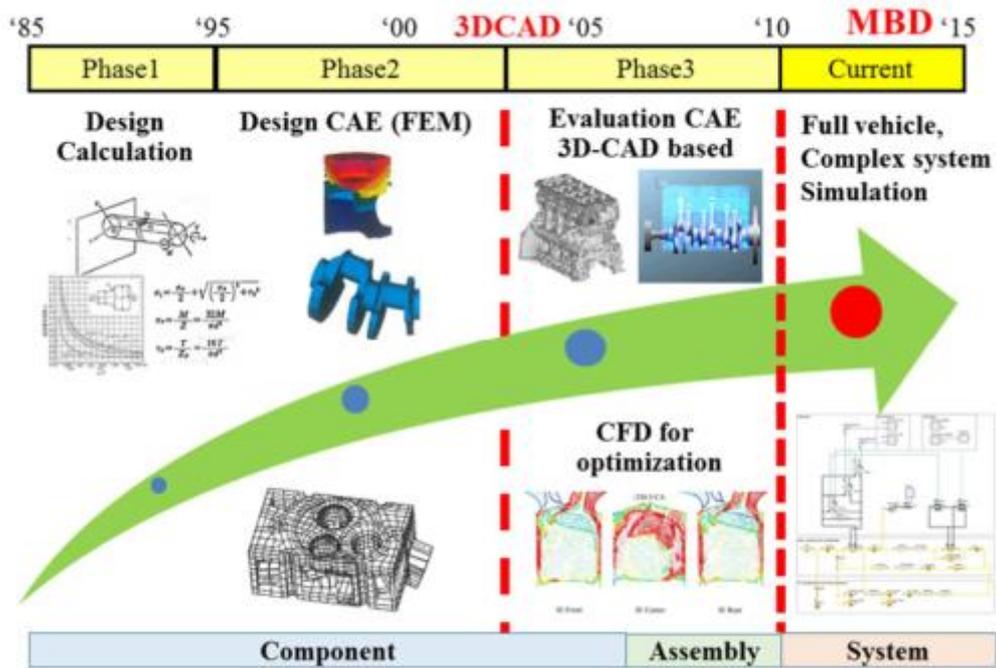


Fig. 4.1. 自動車開発における CAE の進化

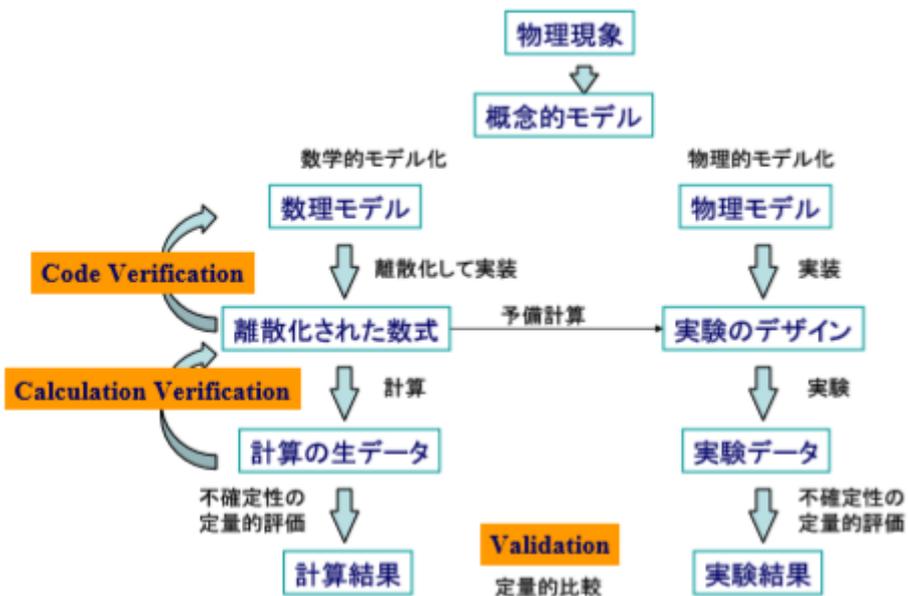


Fig. 4.2. ASME V&V の考え方

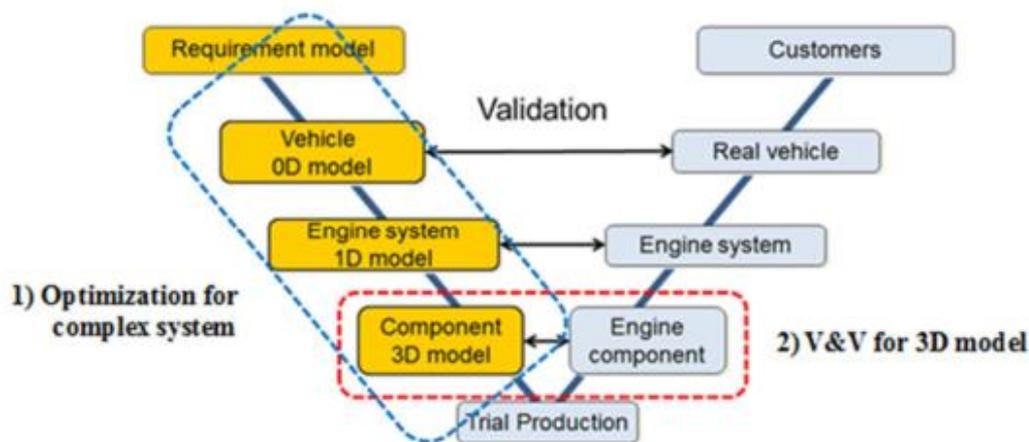


Fig. 4. 3. 自動車開発における V&V の考え方.

4. 2. PIRT による熱処理シミュレーション品質の定性的な検証

熱処理シミュレーションを実務レベルで用いる為、ASME V&V 10-2006^{[4], [5]}を参考に、PIRT(the Phenomena Identification and Ranking Table)の作成を試み、考慮する物理現象と入力データとの関連を明確にした。またその中で特に重要と判定された熱伝導に関する部分については実工程での変動を加味し、特に鋼材成分の変動が熱処理シミュレーション結果に与える影響を評価した。

4. 2. 1. 浸炭焼入工程

熱処理には、浸炭焼入れ、高周波焼入等があるが、今回は浸炭焼入れを対象としている。その工程はFig. 4. 4. のようになっており、本稿では、赤破線枠内を対象範囲とし、後述のPIRTでは加熱、浸炭、焼入工程のみ示す。

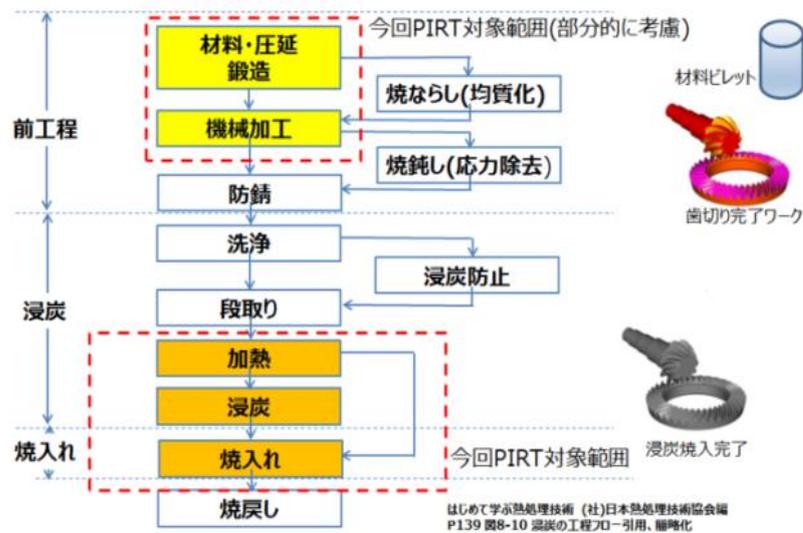


図 4. 4. 熱処理の工程

4. 2. 2. PIRTの内容

PIRT は、焼入工程で生じる種々のプロセスパラメータと形状，材料等の設計パラメータに分け，それに対する，実ラインで管理するパラメータ，入力データ等につき評価された．Table 4. 1. に検討した PIRT フォーマットを示す．

4. 2. 3. プロセスパラメータ

実ラインで評価されている因子を調査し，評価項目とした．因子は前工程の影響を示すもの，及び浸炭焼入工程内の状況を反映するものに分けられる．前工程の影響については材料の特性に関する因子及び残留応力の影響がある．浸炭焼入工程内の因子については雰囲気・ジグ・加熱条件及び焼入条件に分類される．

Table 4.1. 検討した PIRT フォーマット

	評価内容				
	実ラインで管理 するパラメータ	入力データ	解析入力 データ区分	解析出力	実課題適用
プロセス パラメータ (Px)	評価基準				
設計 パラメータ (Dx)	<ul style="list-style-type: none"> ・因子 ・結果への感度 ・対応する入力値 	<ul style="list-style-type: none"> ・計測難易度 ・変換難易度 (難/中/易) ・入力値信頼性 (難/中/易) 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期条件 ・境界条件 ・物性値 	<ul style="list-style-type: none"> ・要求精度 ・信頼性 	<ul style="list-style-type: none"> ・影響度 (難/中/易)

(1) 前工程の影響：材料の特性に関する因子について

前工程の因子は主に鋼材メーカーから部品製造メーカーへの鋼材納入時にもっている材料不均一性やロット間の材料成分のバラツキ等が挙げられる。

(2) 前工程の影響：残留応力の影響について

前工程で成形の為に加工を行うとその変形によって部品内に応力が付与される。応力は浸炭熱処理工程内で部品を変形させる要因になる。

(3) 浸炭熱処理工程内の影響因子について

浸炭熱処理は表面に炭素を含浸させて急冷する処理なので、浸炭条件、焼入条件により品質は変化する。紙面の都合上、非常に多数の条件の一部のみを後述の PIRT に示すが、それ以外にも温度や雰囲気化学ポテンシャルに加え、部品の保持方法や集団処理時の部品のレイアウト等がある。

4.2.4. 設計パラメータ

部品の設計パラメータについては材料の仕様やそれによって決まる物性値、部品の形状やシミュレーションにおいて設定するメッシュ密度、その形態等が挙げられる。

4.2.5. 熱処理シミュレーションモデル

熱処理シミュレーションで用いるモデルについて示す。Fig. 4.5. は焼入工程におけるモデル抽出をしたものである。Fig. 4.6. は丸棒を油中に焼入れた際の油の沸騰の様子を撮影したものである。丸棒の各部は油の蒸気膜で覆われた蒸気膜段階、蒸気膜が破断した沸騰段階、温度が低下し蒸気膜の発生がなくなった対流段階に区分される。丸棒の表面での冷却状態は均一ではなく、表面での冷却速度分布は複雑なものとなる。現状のシミュレーションでは冷却状態を熱伝達率に代表して付与している。

4.2.6. 熱処理PIRT

上記のパラメータ及びシミュレーションモデルを考慮して作成された熱処理部分の PIRT を Table4.2. に示す。実ラインで管理するパラメータは多数の因子に分類されるが熱処理シミュレーションに入力するパラメータは多くのものは熱伝達率に分類される。

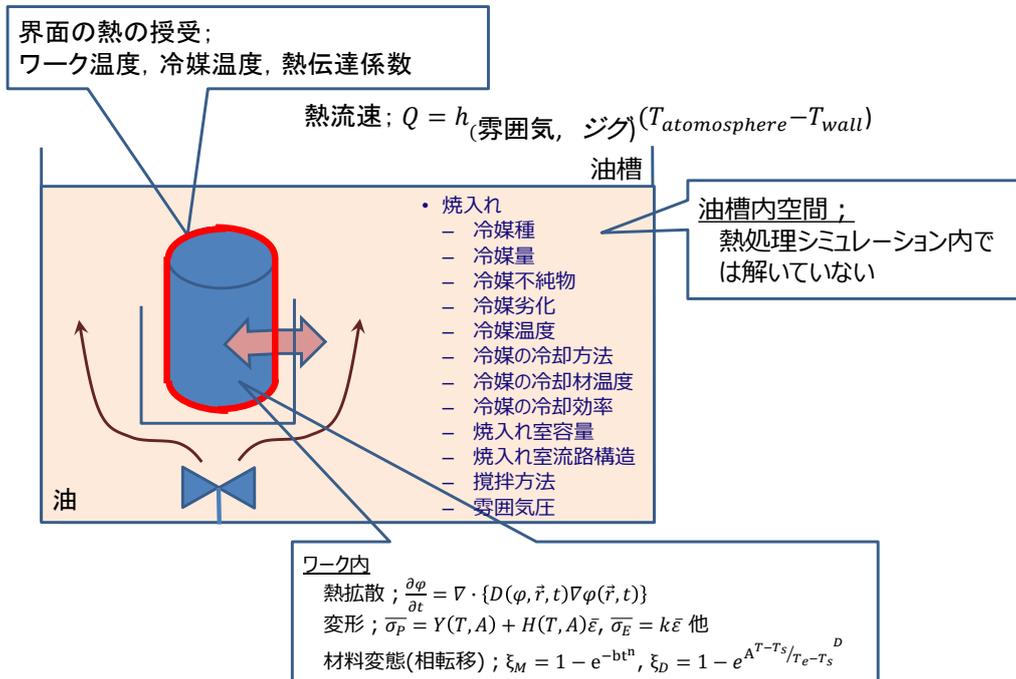


Fig. 4.5. 冷却工程のモデリング



Fig. 4.6. 油焼入れの様子

Table 4.3 L18 直交表

	C	Cr	Mn	Ni	Si	冷却速度	
1	0.18	0.9	0.6	0	0.15	20	水準 低 中 高
2	0.205	1.05	0.75	0.125	0.25	50	
3	0.23	1.2	0.9	0.25	0.35	80	

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		0.18	0.9	0.6	0	0.15	20	
2		0.18	1.05	0.75	0.125	0.25	50	
3		0.18	1.2	0.9	0.25	0.35	80	
4		0.205	0.9	0.6	0.125	0.25	80	
5		0.205	1.05	0.75	0.25	0.35	20	
6		0.205	1.2	0.9	0	0.15	50	
7		0.23	0.9	0.75	0	0.35	50	
8		0.23	1.05	0.9	0.125	0.15	80	
9		0.23	1.2	0.6	0.25	0.25	20	
10		0.18	0.9	0.9	0.25	0.25	50	
11		0.18	1.05	0.6	0	0.35	80	
12		0.18	1.2	0.75	0.125	0.15	20	
13		0.205	0.9	0.75	0.25	0.15	80	
14		0.205	1.05	0.9	0	0.35	20	
15		0.205	1.2	0.6	0.125	0.25	50	
16		0.23	0.9	0.9	0.25	0.15	80	
17		0.23	1.05	0.6	0	0.35	20	
18		0.23	1.2	0.75	0	0.25	80	

$$\rho \dot{T} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + L_{IJ} \dot{\xi}_{IJ}$$

$$\xi_{IJ} \text{ 変態相分率 (I} \rightarrow \text{J相)}$$

Table 4.4. 実験に用いた鋼材の特性と成分範囲

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Max	0.23	0.35	0.90	0.03	0.03	0.25	1.20	97.01
Mean	0.205	0.250	0.750	0.015	0.015	0.125	1.050	97.59
Min	0.18	0.15	0.60	0.00	0.00	0.00	0.90	98.17

JIS規格によるSCr420の成分範囲を上記3水準で計算した。

計算条件
 γ粒径 : 9 ASTM
 焼入れ温度 : 860°C
 冷却速度 : 30, 50, 80°C

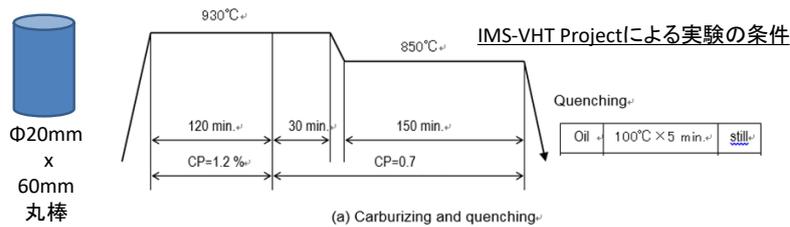


Fig. 4.7. 対象とした鋼材の成分と実験条件

4.3.2. 熱処理解析モデルと解析手法

上記で予測した各熱物性値を用い、伊藤忠テクノソリューションズ社の FINAS/STAR TPS Edition にて冷却曲線の導出を行った。形状モデルはφ20mm x

L=60mm の円柱モデルとし、全表面は均一に焼入れされる条件とした。実験条件は Fig. 4. 7. に、熱伝導の計算は式(1)で示される相変態を加味した熱伝導方程式を用いた。

$$\rho c \dot{T} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + L_{IJ} \xi_{IJ} \quad (4.1)$$

ρ ; 密度 c ; 比重 T ; 温度 x_i ; 座標 L ; 変態潜熱 (I→J 相)

ξ ; 変態相分率の時間変化 (I→J 相)

円柱の冷却は油焼入れとし、表面の熱伝達境界には NEDO の助成の元に行われた IMS-VHT 事業で得られた、出光ハイテンプ A 焼入油での熱伝達率の値を用いた^{[1], [2]}。計算に用いる材料物性は前述の品質工学で求められたものとした。

4.3.3. 結果と考察

得られた冷却曲線を IMS-VHT 事業で得た実験値と比較した結果を Fig. 4. 8. に示す。実験では熱電対を用いて温度を測定しているため、冷却速度変動に対する感度が低くなっており、500℃近傍に見られる冷却の停滞が再現できていない。しかし実験と解析で得られた冷却曲線は平均的の冷却速度は近くなり概ね冷却現象が再現できている。また、材料成分および材料成分予測時の推定の冷却速度の変動により冷却曲線が変動している様子が見て取れる。これは材料成分が冷却曲線予測精度に影響を与えることを意味している。鋼材成分の変動を Fig. 4. 9., 4. 10. 及び 4. 11. に示す。この結果より Fig. 4. 12. に示す鋼材成分及び冷却速度によりベイナイト変態開始温度が変化することが分かる。

また、この結果が熱処理変形に与える影響についても評価をした。本件の計算結果のうち、Max, Mean, Min に該当する鋼材成分の物性値を用い、変形計算を行った結果を Fig. 4. 13. に示す。変形は Max-Min の間で大きく変化しており、熱処理ひずみを予測する際に鋼材の成分を正確に入れることは重要である。

4.3.4 .まとめ

PIRT を用い、浸炭熱処理シミュレーションの種々の因子の妥当性と重要性を評価した。また、その中でも結果への影響が大きいと思われる焼入れ・冷却に関わる部分について定量評価を行った。その結果、鋼材の成分の規格内変動や材料成分の推定を行う際の仮定冷却速度が冷却曲線解析値・熱処理変形計算値に変動を与えることが分かった。

本結果より、浸炭熱処理シミュレーションにおいて定量精度に影響を与える因子を抽出したうえでそれを定量的に評価する手法を明確にした。

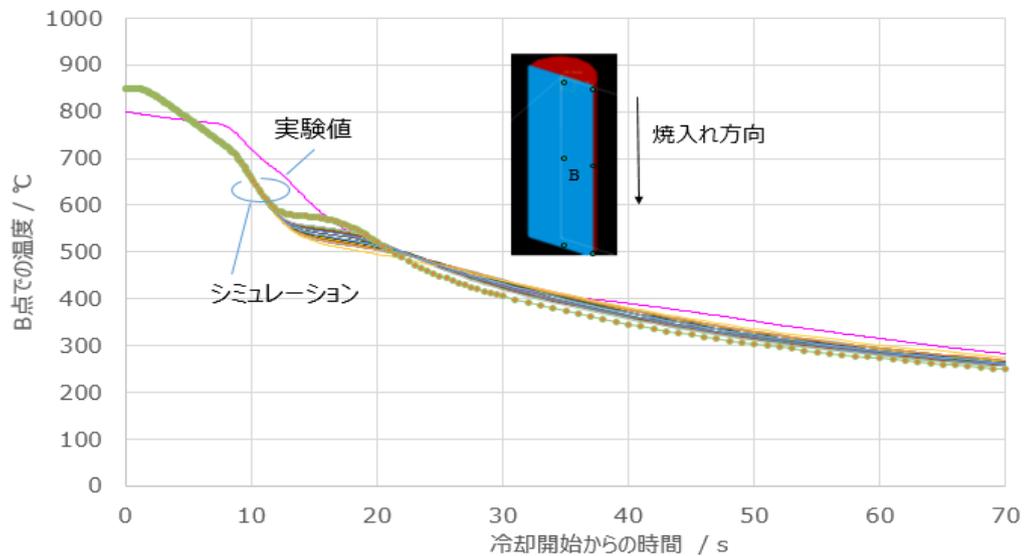


Fig. 4.8. 得られた冷却曲線の実験値との比較

熱容量についてはCrの影響が大きい

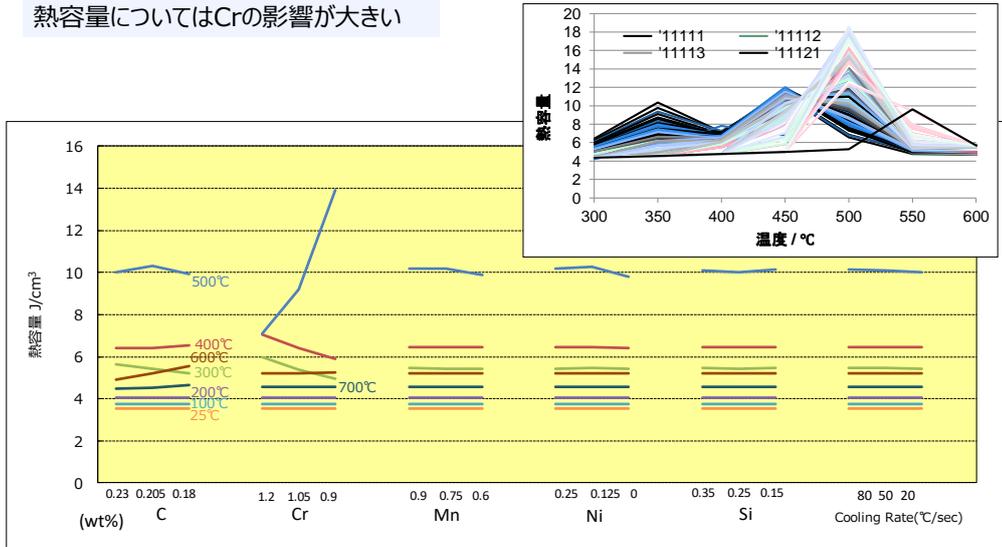


Fig. 4.9. 熱容量の成分による変動

要因の把握 -熱伝導率-

熱伝導率については各成分の影響が平均して生じている

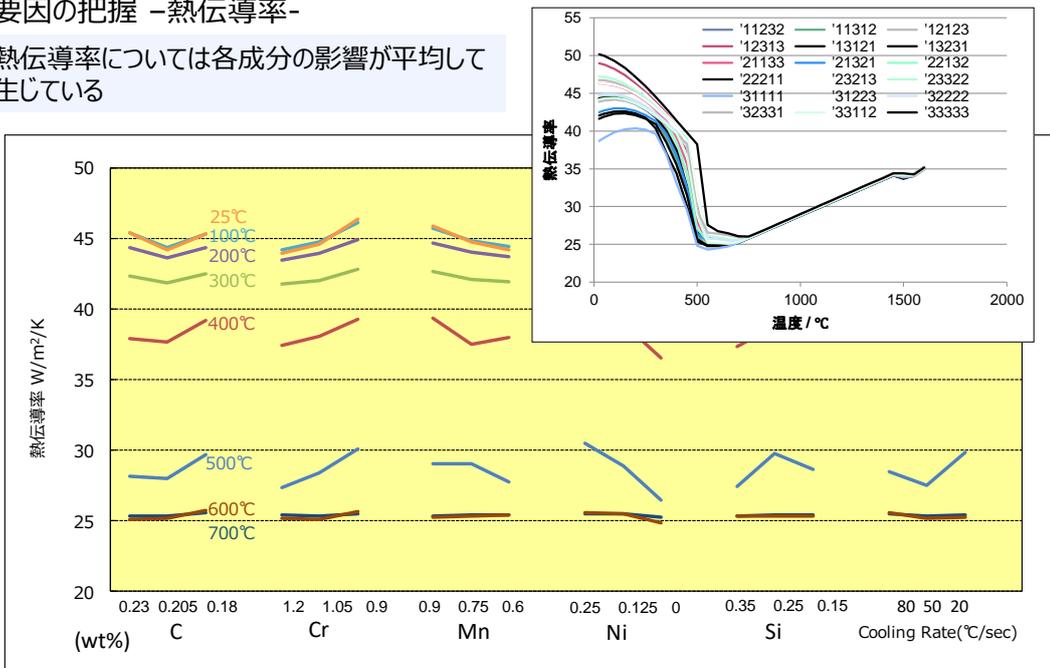


Fig. 4.10. 熱伝導率の成分による変動

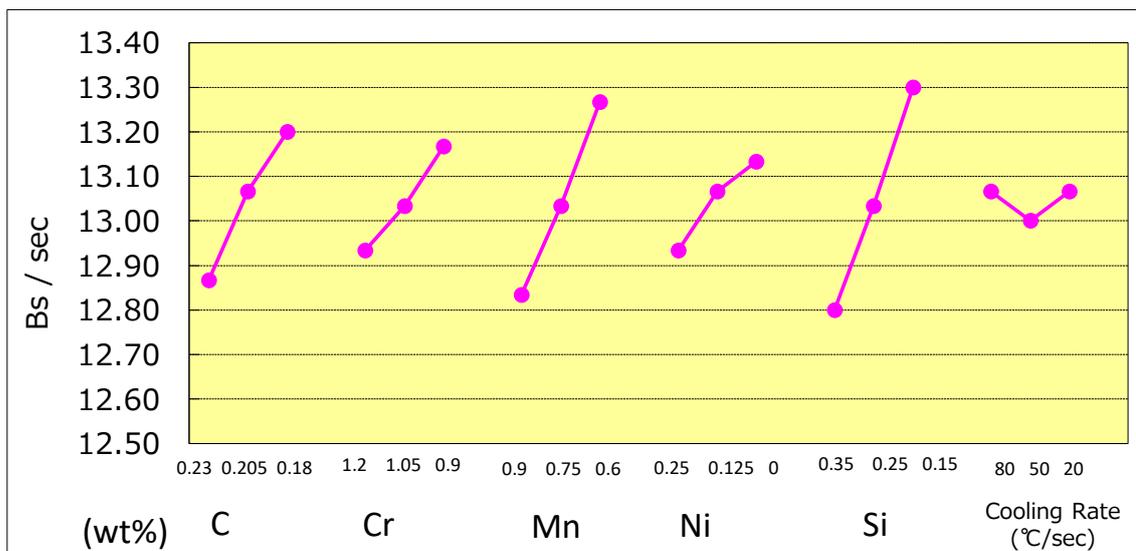


Fig. 4.11. ベイナイト変態開始時間の成分による変動

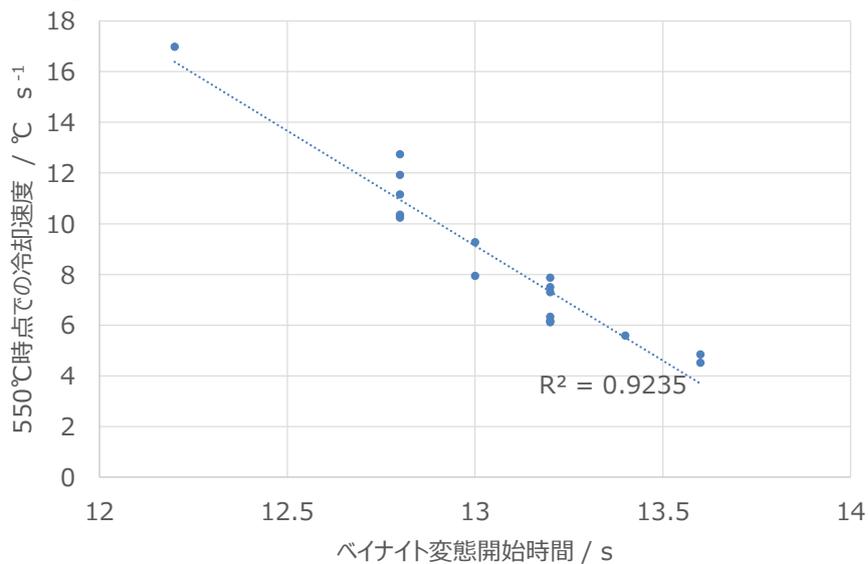


Fig. 4.12. ベイナイト変態開始タイミングの成分による変動と冷却への影響

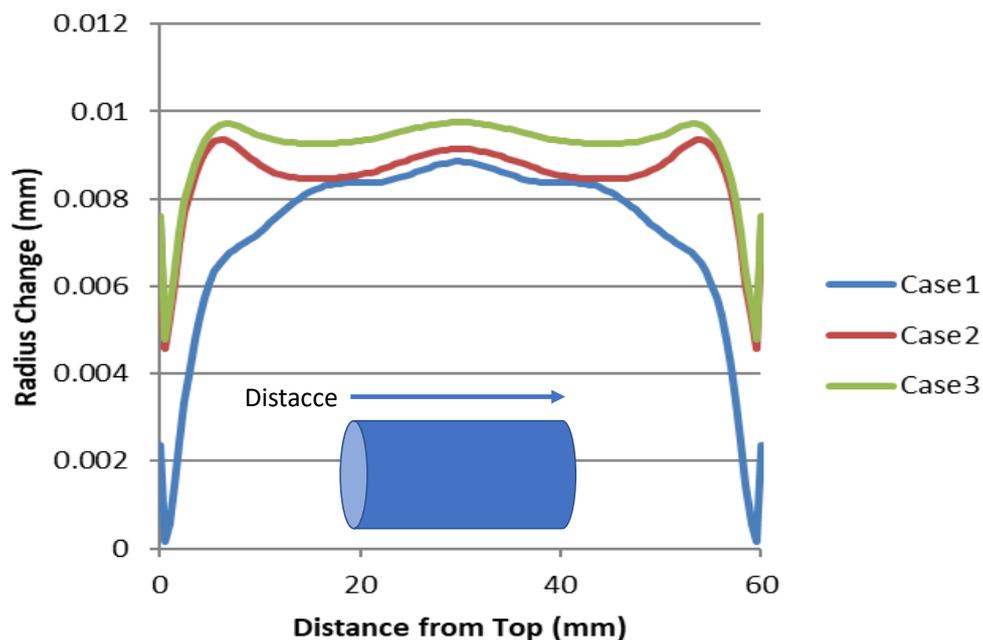


Fig. 4.13. 鋼材の成分の違いによる変形量の差異

4.4. 熱処理シミュレーションの改良すべき点

本件において熱処理シミュレーションの精度検証を行い、材料物性は熱物性を媒介に熱処理品質予測精度に影響を与える事を検証した。

但し、本件の PIRT 表を見ると分かる通り、中間変数として「熱伝達率」が多く使われており、この詳細な解明を進めないといけないことがわかる。

また、本表を実際のシミュレーション保証に用い、その使い方を明確にしたうえで表のフォーマットを改良していく必要もある。

参考文献

[1] 日本学術会議 総合工学委員会・機械工学委員会合同 計算科学シミュレーションと工学設計分科会 報告,

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-h123-2.pdf>

[2] IMS Japan: Information ,

<http://www.ims.mstc.or.jp/english/index3.html>

[3] VHT project: Information on Website;

<http://www.ims.mstc.or.jp/index2.html>

[4] 青木孝行, 高木敏行, 古村一朗, 古河敬, 遊佐訓孝, 日本原子力学会和文論文誌, 12(3), 2013, 231-241

[5] 一般社団法人 日本計算工学会, 「工学シミュレーションの品質マネジメント」第3版, 2017, 1-20

<付録>

PIRT 表全体(左側)

分類	実ラインで管理するパラメータ				入力データ									
	工程	因子	影響する因子		入力データ	測定対象	計測 難易度	変換 難易度	実験 計測 難易度	入力 データ 信頼性	解析精度 依存性 (感度)			
			直接の影響	解析への影響										
プロセス パラメータ (Px)	前工程影響	前工程残留応力	残留応力	変形	残留応力	応力	易	易	易	高	高			
		炭素濃度バラツキ	炭素濃度	物性値	物性値	濃度	難	難	難	低	中			
		形状バラツキ	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	変形	中	難	難	低	不明			
		面粗さバラツキ	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	面粗度	中	難	難	低	不明			
		材料のムラ	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	熱伝達率	中	難	難	低	不明			
		前工程残留物	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	中	難	難	低	不明			
		雰囲気	圧力	化学ポテンシャル	温度	熱伝達係数	圧力	易	中	中	中	中		
			ガス種	反応係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	中		
			ガス流量	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	流量	易	中	中	中	中		
			ガスの流れ形態	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	流速	易	中	中	中	中		
	雰囲気温度		雰囲気温度	温度	雰囲気温度	温度	易	易	易	高	高			
	保持時間		保持時間	温度	保持時間	時間	易	易	易	高	高			
	治具		Workの向き	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	向き	易	中	中	中	高		
			配置	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	配置	易	中	中	中	高		
		治具構造	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度	易	中	中	中	高			
			変位拘束	変形	変位拘束	固定位置	易	易	易	高	高			
		治具材質	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	熱伝達率	易	易	易	高	中			
		加熱 (均熱)	ヒーター配置	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度分布	易	易	易	高	高		
	ヒーター表面状態		熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	易	易	高	中			
	ヒーターPID制御		熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	易	易	高	中			
	雰囲気ガス流量		熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	易	易	中	中			
	ワーク表面状態		熱伝達係数	温度	熱伝達係数	面粗度	易	中	中	中	中			
	焼入れ温度		相変態	物性値	焼入れ温度	温度	易	易	易	高	高			
	(加熱プロファイル)		結晶粒径	物性値(感度)	物性値(感度)	観察	易	易	易	高	高			
	加熱時間		相変態	物性値	加熱時間	時間	易	易	易	高	高			
	(保持時間)		結晶粒径	物性値(感度)	物性値(感度)	観察	易	易	易	高	高			
	浸炭		炭素雰囲気濃度	炭素濃度	物性値	炭素雰囲気濃度	濃度	易	易	易	高	高		
		浸炭温度	炭素濃度	物性値	浸炭温度	温度	易	易	易	高	高			
		浸炭時間	炭素濃度	物性値	浸炭時間	時間	易	易	易	高	高			
	焼入れ (冷却)	冷媒種	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	易	易	高	高			
		冷媒量	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	高			
		冷媒不純物	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	低			
		冷媒劣化	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	低			
		冷媒温度	温度	温度	熱伝達係数	温度	易	中	中	中	高			
		冷媒冷却方法	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	低			
		冷媒冷却材温度	温度	温度	熱伝達係数	温度	易	易	易	中	低			
		冷媒冷却効率	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	低			
		焼入れ室容量	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	中			
		焼入れ室流路構造	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	中			
		攪拌方法	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	高			
		雰囲気圧	熱伝達係数	温度	熱伝達係数	温度変化	易	中	中	中	高			
		設計 パラメータ (DX)	物性値	熱物性	温度毎、組織毎	熱伝導率	温度	熱伝導率	温度	中	中	中	高	高
						比熱	温度	比熱	温度	中	中	中	高	高
						密度	温度	密度	温度	中	中	中	高	高
	変態潜熱					温度	変態潜熱	温度	中	中	中	中	高	
機械特性	温度毎、組織毎			ヤング率	変形	ヤング率	温度	中	中	中	高	高		
				ポアソン比	変形	ポアソン比	温度	中	中	中	高	高		
				線膨張係数	変形	線膨張係数	温度	中	中	中	高	高		
				初期降伏応力	変形	初期降伏応力	温度	中	中	中	高	高		
				加工硬化係数	変形	加工硬化係数	温度	中	中	中	高	高		
硬さ	温度毎、組織毎			CCT	硬度	CCT	温度	中	中	中	高	高		
				Jominy線図	硬度	Jominy線図	温度	中	中	中	高	高		
				相の硬さ	硬度	相の硬さ	温度	中	中	中	高	高		
				TTT線図	相変態	TTT線図	温度	中	中	中	高	高		
				MS点	相変態	MS点	温度	中	中	中	高	高		
形状	浸炭		メッシュ	炭素拡散率	相変態	炭素拡散率	温度	中	中	中	高	高		
				全体形状		メッシュ分布		-	-	-	-	高		
				隅R		メッシュサイズ		-	-	-	-	高		
				要素タイプ		メッシュサイズ		-	-	-	-	中		
						要素タイプ		-	-	-	-	中		
	面粗さ				熱伝達係数	温度	熱伝達係数				中	中	低	
					輻射率	温度	輻射率					中	中	低

実験計測(難易度)判定基準

各入力データは、温度依存で考える

- ・計測の難易度
易：測定工数がかからない、中：計測できるが、工数がかかる、難：方法が確立していない
条件により変化するものは、難（その都度計測しなければならないもの）
- ・入力データ変換の難易度
易：変換工数がかからない、中：変換ができるが、工数がかかる、難：方法が確立していない

入力データの信頼性

高：信頼性がある、中：信頼性に難がある、低：信頼性はない

解析精度依存性(感度)

高：感度が高い、中：感度が中、低：感度が低い、無い
感度依存性の指定は、3等分になるように決める

熱伝達係数の考え方

熱伝達係数は、各因子の足し算されたものと考えられるが、ここでは、各因子単独での熱伝達係数を考えている

第五章 高強度熱処理の課題と 高濃度浸炭熱処理シミュレーション

5.1. 高強度熱処理シミュレーションの必要性と研究動向

鉄鋼材料は樹脂，セラミック，鉄鋼以外の金属材料に比較し，比剛性率，比強度が高く，またクラック数も高いため安価で強度部材として非常に使いやすい材料である．また，熱処理によりその性質を変化させることができる為成形加工も容易で歯車等の精度が要求される部品に適している．

そのため，さらなる高強度化を求め，鉄鋼の熱処理に対しては様々な新規工法が提案されている．

鉄鋼に要求される強度は曲げ，座屈，引っ張り，摩耗，転動等と多数の特性がある．これらの特性は主に硬さや焼戻し軟化抵抗といった物性と相関が強く，浸炭焼入れによる硬さ向上は鉄鋼の使用時の強度向上に有効である．

第一章で述べた様に自動車をはじめとする産業機器にはユニット・部品強度向上が求められるが，さらなる強度向上のためには硬さの向上，焼き戻し軟化抵抗の向上，衝撃強度向上等が必要とされる．それらの寄与度を示したものが第一章の Fig. 1. 13. で示した様に窒素等のさらなる強化元素の導入，ショットピーニングの様な残留応力の活用，等がありそれぞれについて詳細な研究がなされている．

自動車用歯車部品の強度を高めるには，硬度の向上，使用中の硬度低下に対する耐久性，焼戻し軟化抵抗の向上が課題となる (Fig. 5. 1.)^[1]．このため，浸炭窒化や高濃度浸炭などの手法がよく用いられる．しかしながら，従来は，高濃度浸炭の場合，通常の浸炭方法の数倍の処理時間がかかるという問題があった．浸炭窒化の場合，別個の窒素供給装置が必要であり，これは設備コストを高価にする．

近年，真空浸炭法が普及し，部品表面にセメントタイトの溶解限界を超える高含有量の炭素を導入することが容易になったため，高濃度浸炭の処理時間を大幅に短縮することが可能になった^[2]．しかし，真空浸炭ではその品質は形状依存性が大きい^[3]，平坦部や凹部よりも端部の炭素濃度が高いという特徴が

ある。この形状依存性課題の解決の為、本研究では、形状依存性を考慮した真空高濃度浸炭のシミュレーションによる品質予測を試みた。炭素含有量の分布、析出物の量、合金元素の偏析、硬度を予測した。

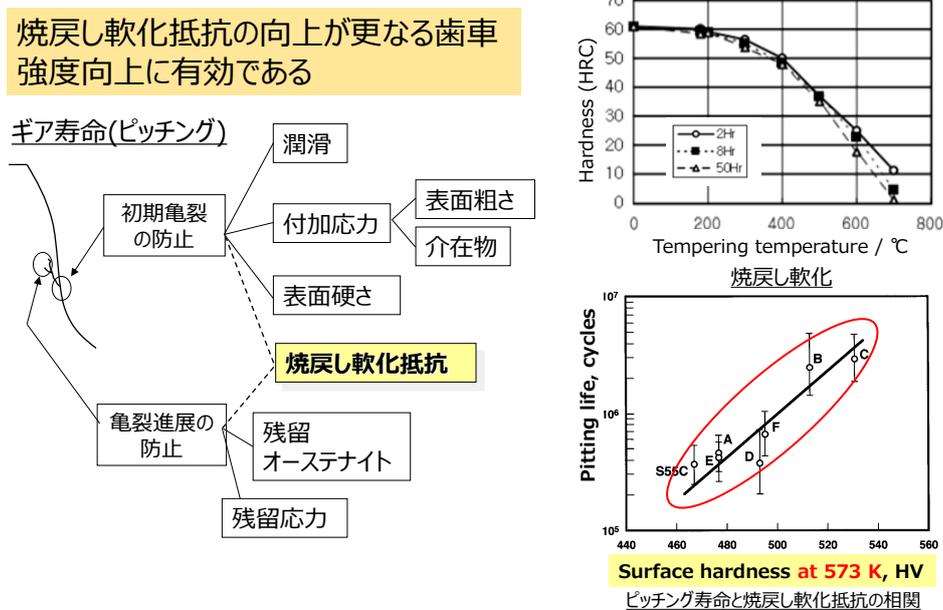


Fig. 5.1. ギヤ強度向上方策

5.2. 実験手法

実験とシミュレーションの結果を比較するために、Table 5.1. 及び Fig. 5.2. に示す歯車形状のサンプルを、Fig. 5.3. に示す条件下で高濃度浸炭に供した。中間冷却前の前半を一次浸炭と呼び、その後の部分は二次析出と呼ぶ。

Table. 5.1 本件シミュレーションで用いたギヤ

SPECIFICATION	
GEAR TYPE	HYPOID GEAR
MODULE	3.12
TARGET ECD	0.9mm @ pitch point
MATERIAL	JIS SCM420H

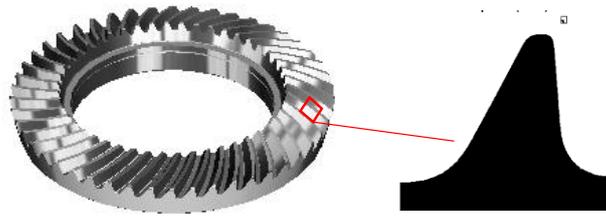


Fig. 5.2 ギヤの形状と本研究で取り扱った断面

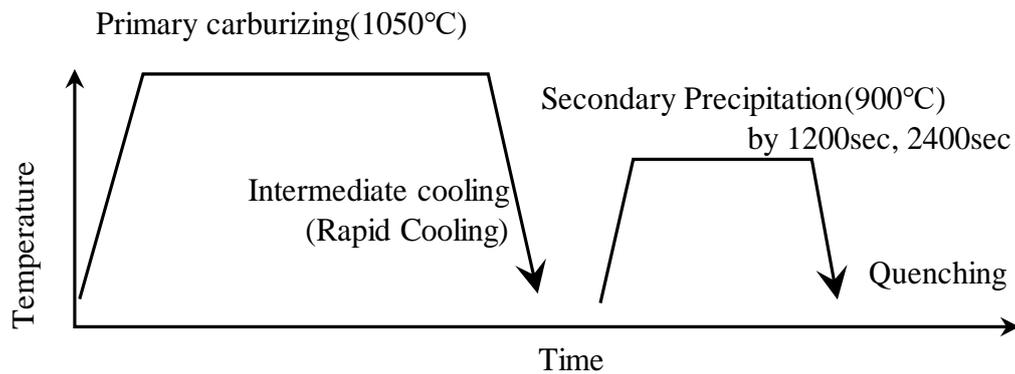


Fig. 5.3. 熱処理条件

Fig. 5.3. に示す浸炭条件については、一次浸炭条件は、1050°Cの浸炭温度で過共析にならない平坦部で1.5Cwt%に設定した。二次析出後に硬さを測定した。同様に、二次析出後にセメンタイトの量が特定され、浸炭および二次析出中に析出がどのように進行するかを確認した。

5.3. 浸炭解析の実施

浸炭、析出および硬さを、熱処理シミュレーションによって計算した。上記の実験に対応する浸炭モデルと、一次浸炭と二次析出までの定式化された方程式を調査した。一次浸炭プロセスで、浸炭の表面反応は、中間生成物としてのセメンタイトとグラファイトで発生したと仮定して定式化した^[4]。一次浸炭および二次しより析出でのセメンタイトは残り、夫々粗大若しくは微細なセメンタイトになる。セメンタイトは既存の析出核から成長するとし、粒子サイ

ズが拡散速度論的に成長し増加すると仮定した。

焼入硬さの計算では、マトリックス相とセメンタイト相について別々に硬さを計算し、これらの相分率加重和を取ることによって合計の硬さを予測した。マトリックス相の硬さは、Cr偏析と炭素濃度量で変化するジョミニー値を考慮した冷却計算から調べた^[5]。セメンタイトの硬度は一定であると仮定した。セメンタイトの粒径が大きくなることによりセメンタイトが増加すると、全体の硬度が上昇すると仮定した。

実際の計算は図3に示した方法で行った。処理温度に対する処理温度でのセメンタイト-グラファイト沈殿量はCatCalc®を使用して計算した。これらの結果を使用して、一次浸炭時の炭素拡散をSFTC DEFORM-HT®によって計算し、一次浸炭後の炭素含有量分布を取得した。一次浸炭後の浸炭と二次沈殿温度でのセメンタイト平衡炭素含有量の差を決定し、二次沈殿中の拡散速度成長の駆動力として使用した。粗大セメンタイトの析出量は、最初の析出量の計算後にセメンタイト固溶限界量を超えた部分を基に計算される。

二次析出中の粒成長については、拡散率成長を組み込んだユーザー関数を使用してDEFORM-HT®にて計算した。二次拡散後、析出量が推定される。セメンタイト析出物の周りのCr偏析によるCr量変化を考慮して、マトリックス相の硬度分布を決定するために焼入解析を実施した。FIELD法によるジョミニー値の変化に伴い、Cr偏析の効果が考慮される。セメンタイト硬度分布とセメンタイト量のこの加重和を得ることにより、高濃度浸炭後の硬度分布が得られた。

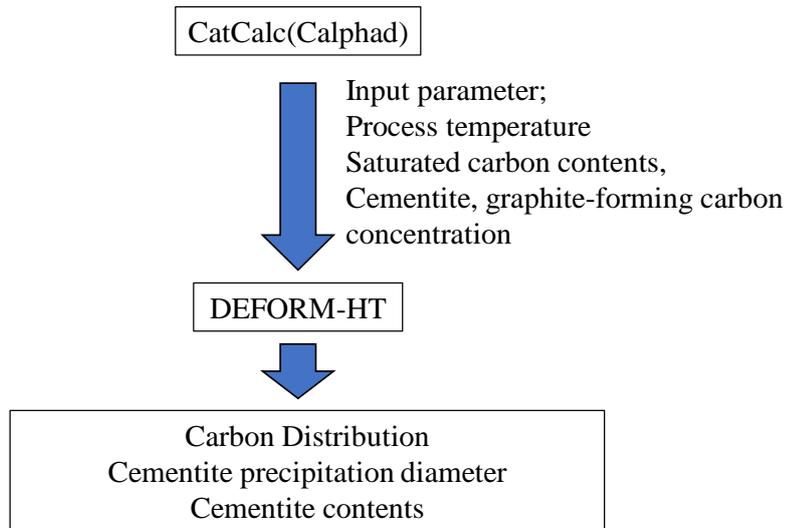


Fig5. 4. 高濃度浸炭シミュレーション構成

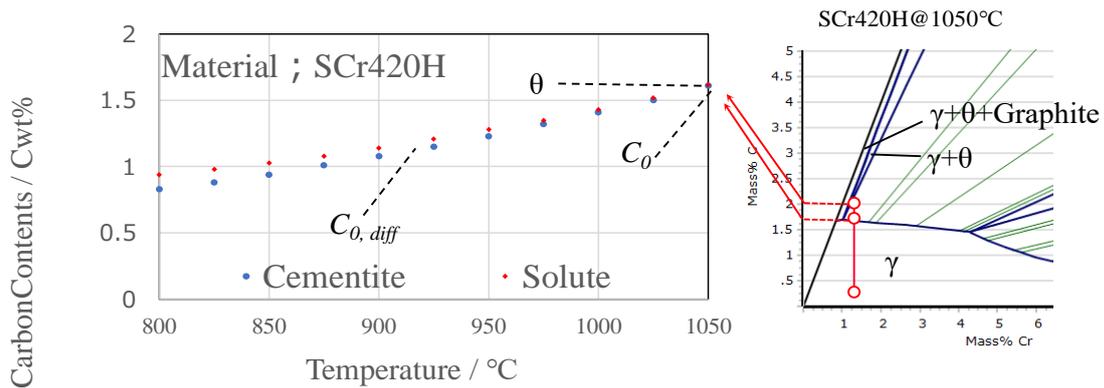


Fig. 5. 5. CatCalc®(CALPHAD 法)による炭素固溶可能量の確認

5. 4. 結果と考察

5. 4. 1. 一次浸炭に関する検証

図4に浸炭温度，セメントイト析出炭素濃度，固溶炭素量の変化を示す．処理温度が上昇すると，固体可溶性炭素含有量が上昇していることがわかる．真空浸炭では，多くの場合，パルス浸炭法がよく使用される．この場合，セ

メンタイト平衡状態で流れる炭素はパルス浸炭ガスの表面で発生し、ページガスが流れているパルス時には表面反応は発生しないと仮定した。式(1)に示すように、部品内部の炭素拡散はフィックの第2法則に従って計算された。拡散定数は、Well et al. 1950^[6]によるものを用いた

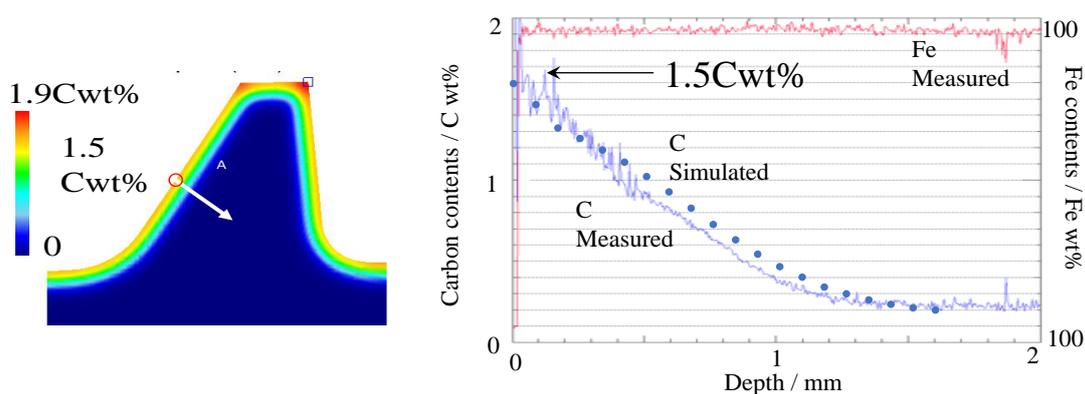
$$D(C,T) = \exp\left(18.5 - 1.5C + \frac{546C^2 + 2361C - 19410}{T}\right) \quad (5.1)$$

C_0 ; Surface carbon contents, C ; carbon contents, T ; Temperature

計算および実験での炭素含有量をFig. 5.5. (a), (b)に示す。歯面平面部分の炭素濃度の分布は、実験と分析値でよく一致した。

また、Fig. 5.6. 左側の歯断面に示すように、歯車部品の問題であるエッジ部の過剰な浸炭現象が良好に再現された。

Fig. 5.6. に示される炭素濃度のうち、浸炭温度の固溶限界を超えたものは粗大なセメンタイトとして母相外に排出される。その分布を示したものがFig. 5.7. である。実体と同様にエッジへの粗大セメンタイトの析出がみられる。



(a) Carbon distribution

(b) comparing of Carbon distribution

Fig. 5.6. 一次浸炭後の炭素濃度分布

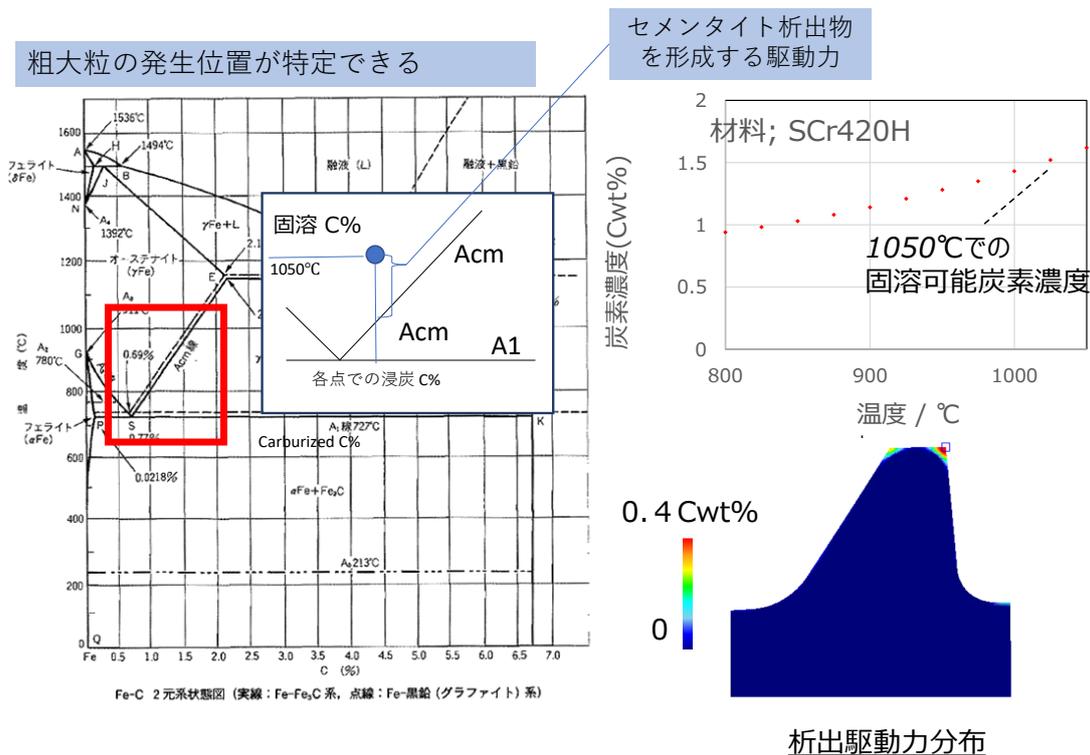


Fig. 5.7. エッジ部に発生した粗大粒の予測結果

5.4.2. 二次析出に関する検証

二次拡散中の析出は拡散速度成長になると想定した^{[6], [7]}. 拡散率成長は,^[2]に示す式に従って粒子が沈殿することを前提とする析出様式であり, 元素が移動して析出核が既に存在する周辺領域から析出することを前提とする様式である. この K は, 実験値とのフィッティング計算により $K = 3.6 \times 10^{-3}$ として推定された. また, 析出駆動力 D は二次拡散温度における固溶炭素量と存在する炭素量の差として計算され, その結果をFig. 5.8に示す. この D と K を用いた析出量の計算結果は, Fig. 5.9. に示すように, 実験値と良好な相関がある^[8].

$$\text{Precipitation diameter; } r = K(Dt)^{0.5} \quad (5.2)$$

D ; Precipitation driving force (Cwt%)

t ; Secondary diffusion time(s)

K ; constant depend on each condition

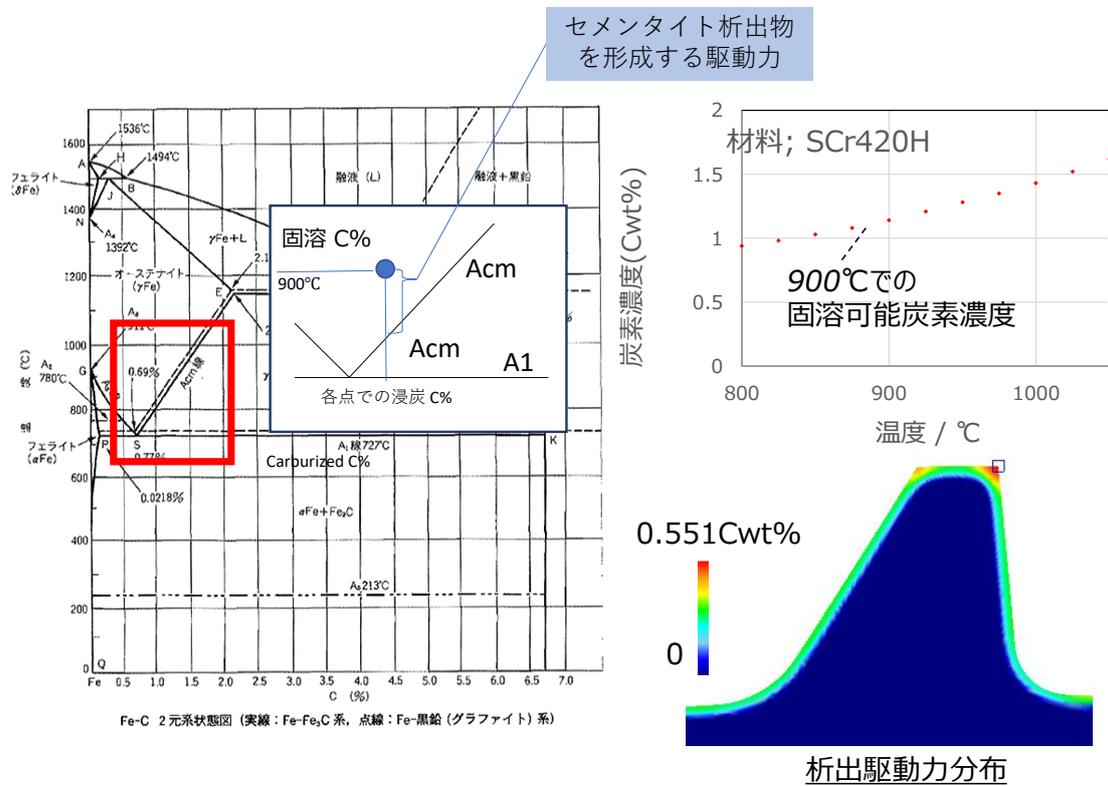


Fig. 5.8. 二次析出駆動力の算出

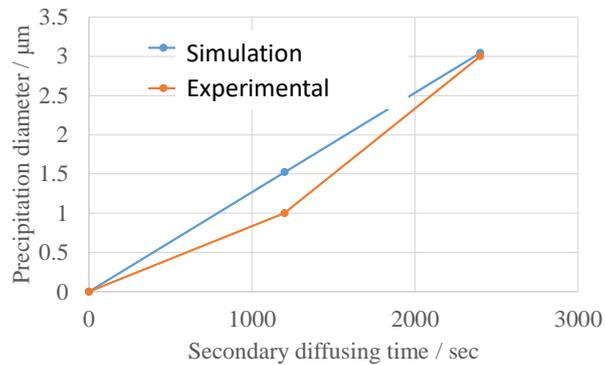


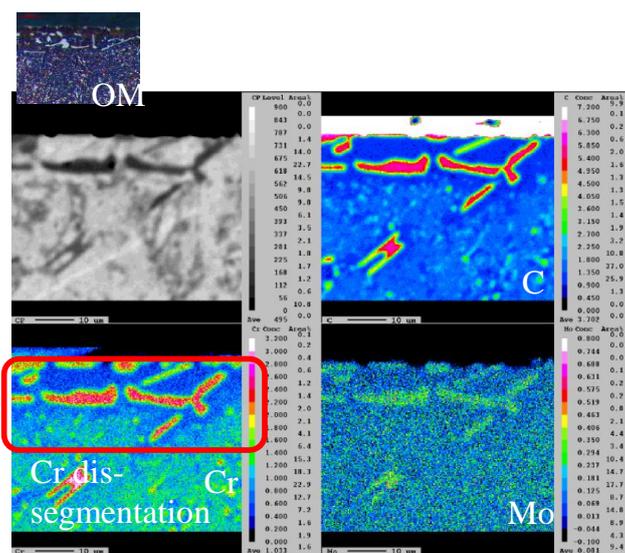
Fig. 5.9. 二次析出による粒成長の様子

5.4.3. Cr偏析の検証

一次浸炭後のセメンタイトへのCrの偏析量実測結果をFig. 5.10. の上側に示す。セメンタイト内にはCrが凝集し、これが原因でセメンタイト周辺の母相中ではCrの減少が起こる。これは、析出物の周りの広い範囲で一様に発生する。

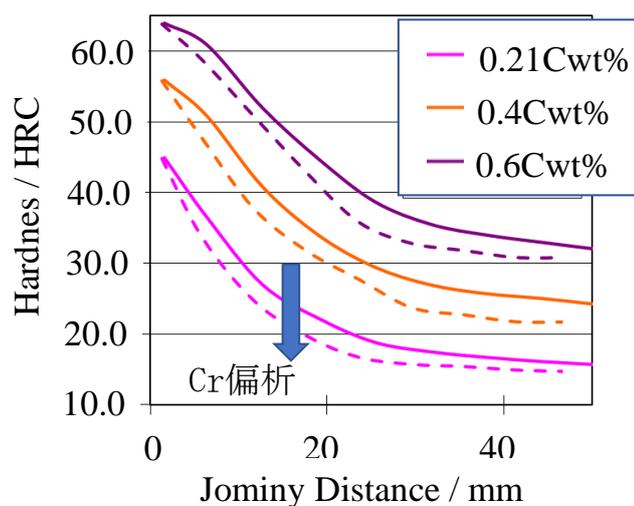
FIELD法で計算されたCrの減少によるジョミニー値の変化をFig. 5. 10. 右に示す。 Cr偏析分布は、粗大粒分布に比例して計算される。 歯先では、強いCr偏析がある。

Crの偏析についてはEPMA観察の結果、粗大セメンタイトのみに見られたため、Fig. 5. 7. に示す一次浸炭での炭化物析出量に比例し生じていると仮定し算出した。 その結果をFig. 5. 11. に示す。



EPMA : JEOL JA-8100
Probe conditions ; 15kV x 500nA

(a) EPMAによる偏析確認結果



(b) 偏析によるジョミニー値の変化

Fig. 5. 10. Crの偏析とそれによるジョミニー値の変化

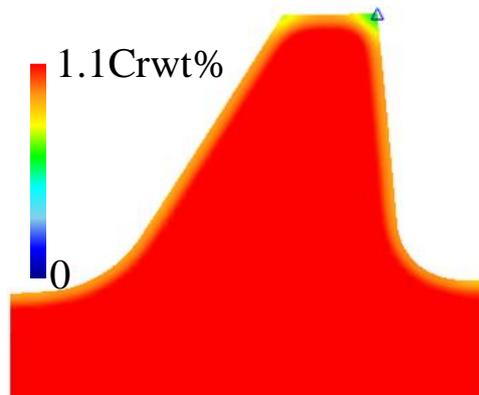


Fig. 5.11. 一次浸炭後のCr分布予測値

5.4.4. 二次析出後の硬さ

Fig. 5.12. には高濃度浸炭後の硬さ分布を示す. Fig. 5.12. (a) は, マトリックス相硬さ分布である. Fig. 5.12. (b) は, セメントタイトの析出による硬さ分布である. 全体の硬度は, セメントタイトとマトリックス相の硬度の合計によって計算した. 硬さ分布は実験値および計算値とほぼ一致しており, この場合, 高濃度浸炭の浸炭後硬さを予測することができる. Cr偏析の影響は, Fig. 5.10. に示されているように, 修正されたジョミニー曲線で計算された. 実験的な硬度と計算された硬さには, 良い相関があった. Crの偏析を考慮することにより, 特に部品表面での部品の表面の硬さ予測精度が向上した.

5.5. まとめ

低圧高濃度浸炭を実際の部品形状に適用するための条件を調査するために, 品質シミュレーション法を開発した. 実際の部品形状の依存性を考慮した炭素含有量分布解析は, CALPHAD法を併用した降水条件を組み込んだ炭素拡散解析を行うことで実施できた. 同様にCALPHAD法で求められた共析炭素濃度を超える炭素量を析出駆動力として二次析出解析を行うことにより, 巨視的に析出粒子の大きさと硬度を予測することに成功した. これらの計算では, 粗大セメントタイトの析出とCrの偏析が考慮される.

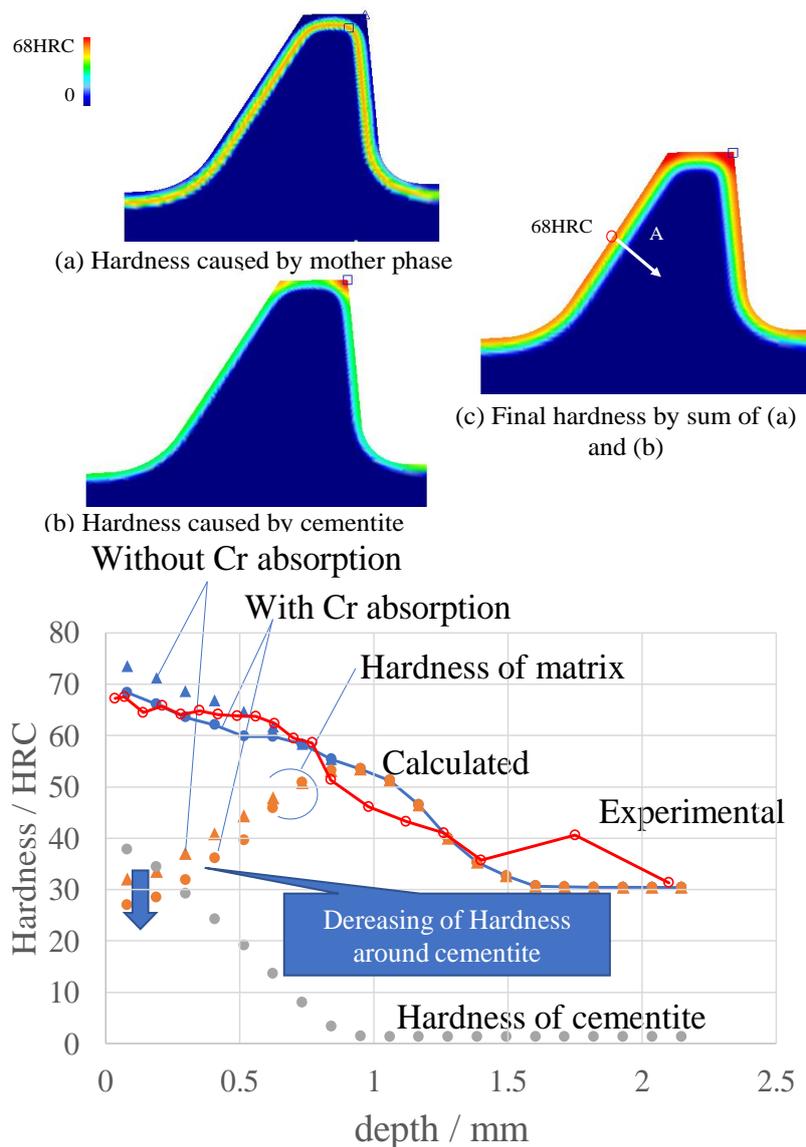


Fig. 5.12. 硬さの計算結果

5. 6. 高強度熱処理シミュレーションの今後の展望

高濃度浸炭をはじめとする高強度熱処理では従来にない高強度を得る為、従来にない金属組織を用いることが多い、高濃度浸炭では析出物を活用した強化を行うが、本研究ではこの析出過程と、それによる合金元素の偏析を定式化し、品質予測することを行った。

しかしながら、本章では析出は二次析出と仮定し、一様に起きるとしたが実際には浸炭時の析出物は浸炭反応経路から直接析出をしたり、旧オーステナイト粒界が析出に寄与することが知られている^[10]。

実用面で，このような複雑な理論式をどこまで織り込むべきか検討し，シミュレーションの精度を向上させていくべきであろう

参考文献

- [1] S. Abe, S. Ikeda, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, Vol. 54 No. 3 (2004) , 21-24
- [2] S. Todo, H. Imataka, H. Sueno, Japan Steel Engineering report, 406 (2016), 13-18
- [3] K. D. Jones and G. Krauss, Heat Treat, 79(1980), 188.
- [4] T. Morita and T. Hanyuda, Tetsu-to-Hagane Vol. 92 (2006) No. 4, 36-41
- [5] J. Field; Met. Prog., 43(1943) 3, 402.
- [6] C. Wells, W. Batz and R. F. Mehl, Trans. AIME, Vol. 188 (1950), 553.
- [7] S. Klein, L. Mujica, M. Walter, S. Weber, and W. Theisen, Journal of Material Science, Vol. 52 (2017), 375-390
- [8] K. Tanaka, H. Ikehata, H. Takamiya and H. Mizuno, Tetsu-to-Hagané Vol. 97 (2011), 3, 32-37
- [9] T. Sugimoto and D. Y. Ju, Journal of Mechanics Engineering and Automation, 1 (2019) 33-39
- [10] 田中浩司, 池畑秀哲, 高宮博之, 水野浩行, 鉄と鋼, 97(3), 2011, 130-135

第六章 熱処理シミュレーションを実工程に 結び付ける為に

6.1. IoT 及びMI について

旧来のシミュレーションでは閉じた計算機空間上でより精密に実現象を再現する取り組みがなされてきた。しかし、近年、インターネットの普及により流通可能な情報の量が増大するに従い、実験的に得る事が容易な情報は実際の観測によって入手し、シミュレーション結果を実験結果で補正することでより容易に高精度な「現象予測」を行う、「データ同化」技術の活用が進んでいる。Fig. 6.1. は気象予報におけるデータ同化の事例である。気象衛星ひまわりの観測結果を気象シミュレーションのモデルに反映させることで予報精度が大幅に増加している^[1]。

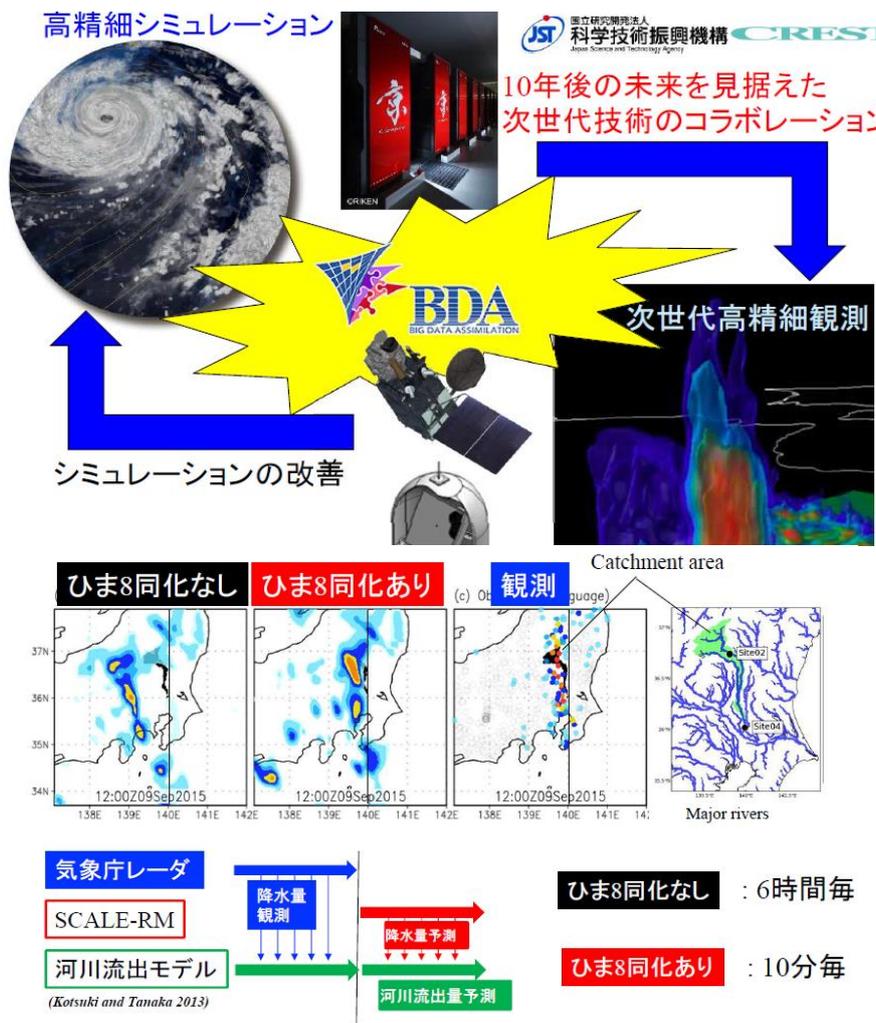


Fig. 6.1. 気象予報におけるデータ同化の事例。

同様に熱処理シミュレーションに置いても工程情報をシミュレーションに取りこみ解析に用いる応答曲面モデルを改善していく事で、熱処理シミュレーションの精度向上させていく事が考えられる。図2は筆者らによる熱処理シミュレーションにおけるデータ同化の例で、左下の様に収集したデータを統計処理しシミュレーションと連携する原始的なデータ同化から、IoTと呼ばれる広く工程からデータを収集するシステムで熱処理シミュレーションの品質を改善する研究が始まっている。

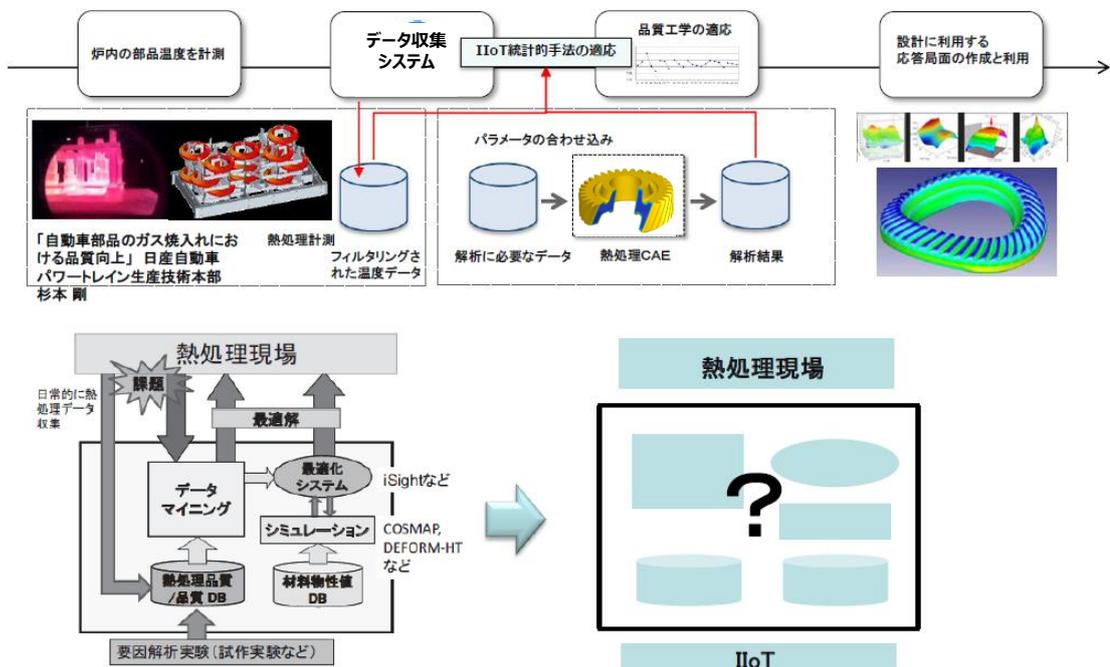


Fig. 6.2. 熱処理のIoTとシミュレーションの事例

6.2. 流体解析，沸騰現象の解明

浸炭焼入熱処理においては前述の様に冷却過程が品質に与える影響が大きい。この為、焼入冷却現象を明確にすることは大変に重要である。

油焼入れの場合，沸騰粒解析を行うことになるが，産業界で一般的に取り扱われる沸騰粒解析は主に定常沸騰であり，焼入れのような非定常沸騰は解析例

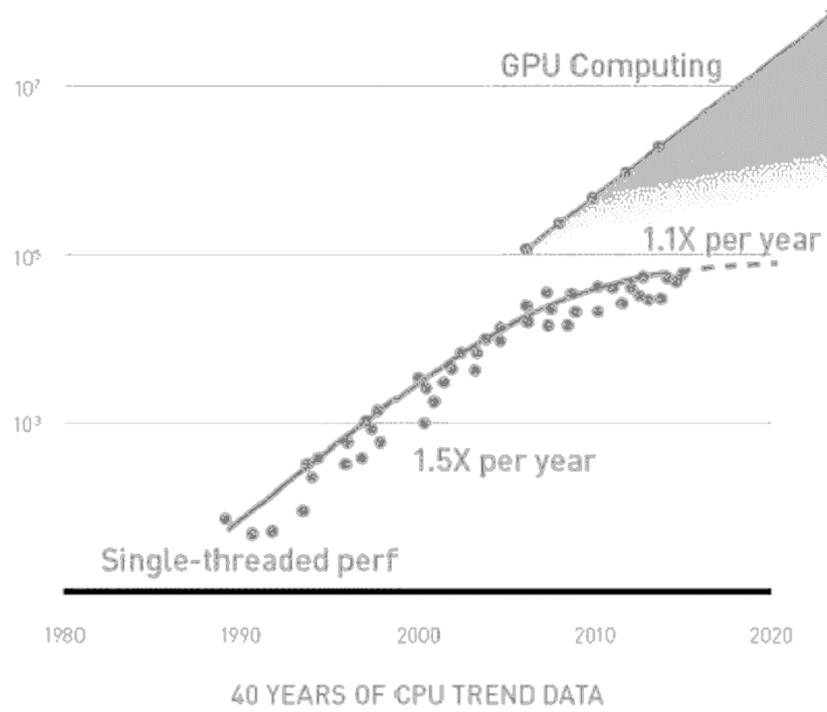
が少ない。熱処理シミュレーションをはじめとするシミュレーション需要の拡大により、非定常沸騰現象が解明され、品質が向上することを期待したい。

6.3. 大規模解析

近年、近年、コンピュータの進歩に伴いコンピュータシミュレーションで処理可能な情報量、数値解析技術が著しく進歩している。古くは18ヶ月でCPUの処理能力が2倍になるというムーアの法則^[2]が説かれ、コンピュータシミュレーションによる複雑な問題の解決は時間を待てばできるようになると考えられていた。このCPU進歩は2000年代には回路集積の物理的限界から一時期陰りが見えたが、シミュレーションの世界では並列計算であるGPUコンピューティングが提案され、再び計算速度の進歩は日進月歩の状態に戻っている (Fig. 6.3.)^[3]。

前述の様に熱処理シミュレーションに求められる項目は従来の組織変態による熱処理品質予測のみならず、析出等の高度な組織計算、流体解析による沸騰現象の解明、結晶粒成長の様なマルチスケールの現象等多岐にわたる。

このような複雑な現象を同時に解く場合、その空間、時間解像度の要求値は膨大なものとなる。従来そのような計算は効率が悪いとされ、マルチスケールの解析等が提案されてきているが今後は複雑な現象を一気に解いてみる大規模解析等も現実となってくることにより、新しい熱処理現象が発見される可能性もある。



40 YEARS OF CPU TREND DATA
 Fig. 6.3. GPUコンピューティングによる計算機の進歩

参考文献

- [1] 工学シミュレーションの品質マネジメント JSCES S-HQC001:2017, 日本計算工学会
- [2] 三好建正 : https://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/news/20170722_symposiumreport/siryoku/kouen4.pdf, 気象衛星ひまわりシンポジウム 講演資料
- [3] 林憲正, 2018CAE フォーラム講演資料

第七章 総括

本研究においては

- ・ 熱処理シミュレーションを用いた熱処理実操業での高精度制御を目指し、実用条件での精度検証とその向上すべき項目を明確化
 - ・ 高強度化に対応できる熱処理シミュレーション技術の開発とその精度検証
- を目的に研究を遂行した。

結果として、

- ・ 実用荷姿で、実用的な計算機規模にて熱処理品質を予測する手法についての調査
 - ・ 冷却境界条件の要求精度の定量的な明確化
 - ・ 材料物性値の要求精度の定量的な明確化
 - ・ 熱処理シミュレーション品質に関する要求項目の定性的な明確化
 - ・ さらなる熱処理高強度に寄与できるシミュレーション手法の開発
- を行うことができた。

「実用荷姿で、実用的な計算機規模にて熱処理品質を予測する手法についての調査」では集団焼入れでの油流れ、焼入時冷却速度、熱処理ひずみに相関があることを明らかにした。沸騰・熱伝達を考慮しない流れ解析結果を基に部品表面での焼入時冷却速度を予測する式を構築し、これを用いて流れ-熱処理品質の連成解析を行った。結果、CVTプーリーの集団焼入れにおいて焼入時軸曲がりの向きを予測することに成功した。

また、「冷却境界条件の要求精度の定量的な明確化」ではより小領域の歯車歯面においても冷却の位置による差が存在し、これが熱処理ひずみに影響を与えていることを確認した。

以上より今後、流体解析、流れの可視化等の技術進歩により焼入現象の解明が進むにつれ、熱処理シミュレーションの品質が向上することが期待できる。

「材料物性値の要求精度の定量的な明確化」においては熱処理シミュレーションの品質を検証するための方策を策定し、特に材料物性値についての検証を行うことができた。冷却曲線、熱処理変形においては鋼材成分の変動による材料物性値の変化により、冷却・変形が大きく変化することが発見された。

「熱処理シミュレーション品質に関する要求項目の定性的な明確化」においては原子力等の分野で使われつつある PIRT, V&V を産業用シミュレーションに展開し、その品質を分析することに成功した。これにより熱処理シミュレーションの品質向上、コスト低減に寄与できるものと考えられる。

本研究が今後の熱処理およびそのシミュレーションの発展に寄与できれば幸いである。

本研究に関連した業績

内、本博士論文の根拠となる論文(査読あり)

○Tsuyoshi SUGIMOTO, Kouichi, TANIGUCHI, Toshiyuki, MATSUNO, Masaru SONOBE and Dong-Ying Ju, Research for Utility of Combination Calculation Method between Heat Treatment Simulation and Computer Fluid Dynamics, Materials Performance and Characterization, Vol. 8, No. 2, pp. 37-49, 2018

○Tsuyoshi SUGIMOTO and Dong-Ying Ju, Influence of Thermal Boundary Conditions on the Results of Heat Treatment Simulation, Materials Transactions, Vol. 59, No. 6, pp. 950-956, 2018

○Tsuyoshi SUGIMOTO and Dong-Ying Ju, Heat Treatment Simulation for Low Pressure Hyper Carburizing Process , Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol.1 , pp. 33-39, 2019

関連する論文, 公開文献, 国際学会への参加 (2017 以降)

○Tsuyoshi SUGIMOTO, Kouichi, TANIGUCHI, Toshiyuki, MATSUNO, Masaru SONOBE and Dong-Ying Ju, The adaption of heat treatment simulation for the actual mass production process, 5th Asian Conference on Heat Treatment and Surface Engineering 2016, 2016, Hangzhou, PRC

○Tsuyoshi SUGIMOTO and Dong-Ying Ju, Heat treatment simulation for low pressure super carburizing process, Heat treatment simulation for low pressure super carburizing process, 25th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering, 2018, Xi' an, PRC

○Tsuyoshi SUGIMOTO, Kouichi, TANIGUCHI, Toshiyuki, MATSUNO, Masaru SONOBE, Research for utility of combination calculation method between heat treatment simulation and computer fluid dynamics, International Conference of Quenching and Distortion Engineering, 2018, Nagoya, JAPAN

○Tsuyoshi SUGIMOTO and Dong-Ying Ju, Research for heat treatment simulation on hyper carburizing process considering with diffusion of alloy elements, 26th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering, 2019, Moscow, RUSSIA (講演予定)

○杉本剛, 藤川真一郎, 熱処理ひずみ極小化のための CAE 開発, 自動車技術, Vol. 71, No. 6, pp.15-19, 2017

- 杉本剛，藤川真一郎，特殊鋼の進化を支えるシミュレーション技術 浸炭焼入れ—浸炭歯車の熱処理ひずみ予測—，特殊鋼，特殊鋼 Vol. 66, No. 4, pp. 15-19, 2017
- 杉本 剛，谷口 光一，山田茂則，松野敏之，園部勝，浸炭焼入れ実荷姿での熱処理品質解析報告，熱処理シミュレーション実用化研究部会 活動成果報告会概要集，pp1-8, 2018
- 園部勝，杉本剛，谷口 光一，山田茂則，松野敏之，鋼の焼入れシミュレーションにおける潜熱の取り扱いについて，熱処理技術協会 熱処理シミュレーション実用化研究部会 成果子報告会 概要集，pp1, 2018
- 田村茂之，河原木雄介，山本憲司，藤田崇史，賀数広海，杉本剛，中崎盛彦，堀野孝，虻川文隆，木島秀弥，熱処理シミュレーションに用いる材料データベースの影響度把握，熱処理技術協会 熱処理シミュレーション実用化研究部会 成果子報告会 概要集，pp30-35, 2018
- 住田雅樹，杉本剛，熱処理シミュレーションにおけるクラウドとデータベース公開システムの検討，熱処理技術協会 熱処理シミュレーション実用化研究部会 成果報告会 概要集，pp36-41, 2018
- 杉本剛，木島秀弥，田村茂之，高野直樹，Verification & Validation による熱処理品質シミュレーションの品質調査報告，熱処理技術協会 熱処理シミュレーション実用化研究部会 成果子報告会 概要集，pp42-45, 2018
- 杉本剛，藤川真一郎，浸炭焼入れ時の熱処理ひずみ解析技術の動向 材料プロセスへの適用，特殊鋼，Vol. 68, No. 2, pp. 49-54, 2019

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の執筆にあたり，終始ご指導を賜りました埼玉工業大学大学院工学研究科 巨東英教授に心から感謝いたします。

本論文の査読及び有益なご意見を頂きました埼玉工業大学 福島 祥夫教授，佐藤進教授，内田正哉教授に心から感謝いたします。

著者の博士課程入学へのご助言を賜り，また社会人となり日産自動車に入社以来，長年にわたり研究の御指導を頂き，本論文の査読及び有益なご意見を頂きました日本パーカラライジング株式会社 渡邊陽一様に心から感謝いたします。

本研究の遂行にあたり多大なるご協力を賜りましたジヤトコ株式会社 谷口光一様，株式会社 不二越 園部勝様，スズキ株式会社 山田茂則様，松野敏之様に感謝いたします。

本研究にあたり広くご助言をいただきました熱処理技術協会 熱処理シミュレーション実用化研究部会の皆様に深く感謝いたします。

本研究を始めるにあたりご助言，ご助力を頂きました日産自動車株式会社 シニアエキスパート 藤川真一郎様，河井聖児主担，小柳貢士主担および山本啓介主担に感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり，様々なアドバイスをいただき，また支えていただいた埼玉工業大学 金森英夫客員教授，埼玉工業大学 巨研究室の皆様に感謝いたします。

最後に，本研究を私生活の面から支え，本研究に多大な理解を示して頂きました妻晃世に感謝を表し，謝辞の締めくくりとさせていただきます。