The Society of Materials Science, Japan

219 歯車の浸炭焼入れシミュレーション および変形・残留応力の実験検証

埼玉工大［院］ ○向井竜二 町田一成 埼玉工大 巨 東英 ジャトコ(株) 陳 勇

1 緒 言

近年，歯車の機械要素の高強度化・高信頼性化が求められてきている．そこで本研究では，自動車部品でも多く使用されている SCr420 を材料としたはすば歯車を取り上げ，相変態を考慮した熱・力学理論に基づく 3 次元連成解析[1]を用い，浸炭焼入れ過程における相変態および応力ーひずみ間の複雑な連成現象（相互関係）のシミュレーションを行った．また，歯車の加工プロセスにおいて浸炭焼入れ過程がほぼ最終段階であることから，焼入れ後のひずみ制御は重要である．そこで，X線による応力測定より浸炭焼入れ後の残留応力を測定した．さらに，シミュレーションによって炭素濃度，冷却速度および相変態の変化に伴う材料の非弾性変形を計算し，その結果を実験結果と比較・検証した．そして浸炭焼入れのひずみ制御について検討した．

2 炭素濃度に依存する熱膨張係数と変態膨張係数の測定

浸炭焼入れシミュレーションを行うためには，炭素濃度に依存する熱膨張係数と変態膨張係数を測定する必要がある．本研究では，熱膨張係数と変態膨張係数を測定するために TMA（熱機械分析装置）を用い，圧縮荷重法(P = 10g)で行った．試験片は直径 3mm，高さ 18mm の円柱を作成した．本研究では炭素濃度依存性を考慮しているので，活性炭の中に試料を入れ，それを電気炉で加熱した．また，浸炭保持時間として 2, 5, 10, 50, 100 時間の 5 種類とした．実験条件としては酸化防止のために，Ar ガス雰囲気 1000ml/min 下で試験を行い，基準試料として，酸化アルミニウム（アルミナ）を用いた．また昇温速度 10℃/min，冷却速度は 10, 40, 60℃/min の 3 種類で行った．

実験結果として，Normal（浸炭前），浸炭保持 10，100 時間の冷却速度 60℃/min のものを Fig.1 に示す．測定結果より，A_{C1} 変態点の開始温度では浸炭による変化が見られないが，A_{C1} 変態点の終了温度，Ar'変態点の開始・終了温度では浸炭保持 10 時間の方が Normal のものより低温側にシフトしていることがわかる．

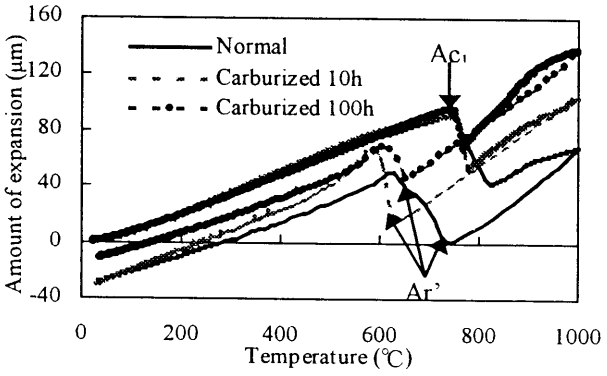

Fig.1 TMA result after certain carburizing time

3 解析のモデリング

3.1 連成解析の流れ 本研究は汎用コード HEARTS を用いて，焼入れ過程における熱，相変態および応力／変形の連成解析を行う．まず材料を加熱及び浸炭する過程について計算し，次に焼入れ過程について計算する．熱伝導解析では，相変態による潜熱の発熱および応力による仕事（発熱）を考慮した非定常・非線形解析をし，次に相変態カイネティクスにより相変態解析を行う．最後に応力ーひずみ場の支配方程式，弾塑性構成式などを有限要素法の定式化によって計算し，弾塑性領域の判断およびニュートン・ラフソン法による収束解析を行う．この連成解析を焼入れ過程の終了時間まで繰り返す．

3.2 解析のモデル 本研究で使用した歯車は，材料は SCr420，歯先円直径 29.8mm，歯底円直径 23mm，穴径 14mm，厚さ 20mm，歯数 19 個，モジュール 1.25，ねじれ角 24° (LH)のはすば歯車である．計算上では，対称性を考慮して Fig.2 のような 1/2 モデルを作成した．総節点数 8436，総要素数 5700 となった．拘束条件は，点 a1，a2 を X 軸方向および X 軸の回転方向，点 b1，b2 を Y 軸方向および Y 軸の回転方向に固定し，切断面全体を Z 軸方向および Z 軸の回転方向に固定した．焼入れにおいて，冷却剤は Dn・ブライトクエンチ油を使用する．この油の熱伝達率曲線は，リングにシース熱電対を挿し，無攪拌時での冷却曲線を測定することによって同定したものである．熱伝達境界条件としては，切断面を除く全面で行う．

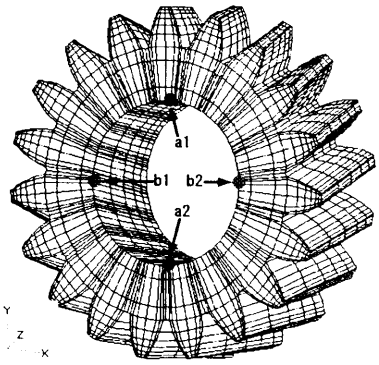

Fig.2 Finite element model

3.3 浸炭焼入れ過程の手順 今回シミュレーションで行った浸炭焼入れ過程の手順は，まず始めの 25 分間で 930℃まで加熱し，その後 210 分間その温度を保持させる．その 210 分間で 1.0%の雰囲気下で浸炭をする．次に 5 分間で 850℃まで降温し，拡散をさせて炭素濃度を目標値である 0.8%にするためにその温度を 20 分間保持させた後，50℃まで冷却する．

4 実験およびシミュレーションの結果と考察

まず，Fig.3 に測定部である歯面図を示す．残留応力の測定

NII-Electronic Library Service

はABとCD，変形量の測定はAEとCD，硬さおよびマルテンサイトの体積分率の測定はCDの各個所で行った．

Fig.4に歯面における軸方向の残留応力を示す．実際の応力測定はPSPC微小部X線応力測定装置を使用し，測定方向はFig.3に示したX軸方向を並傾法によって測定した[1]．実験値とシミュレーション値を比較しているが，歯スジ方向，歯形方向とも実験値，シミュレーション値が同様の傾向になっており，歯スジ方向では一端が高い引張り応力になることがわかる．

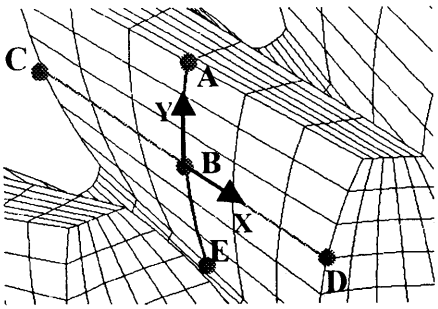

Fig.3 Enlarged view of tooth surface

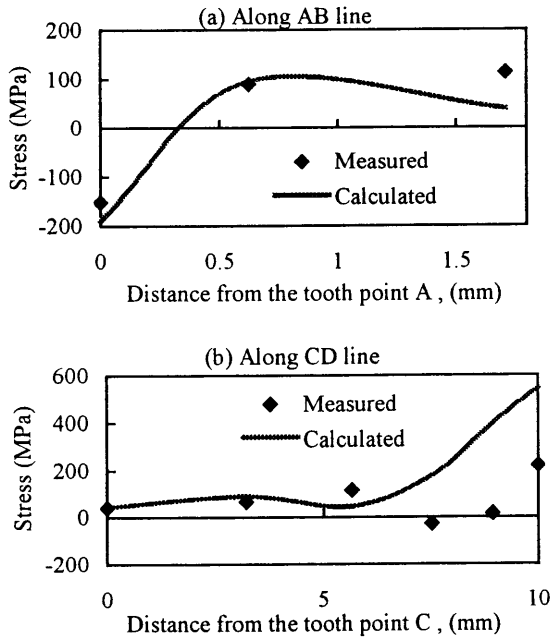

Fig.4 Residual stress σ_x

厚み方向の変形量をFig.5に示す．グラフに示すように，歯形方向の変形量では歯先と歯元が膨張しており，ピッチ円部あたりでは収縮している．(b)の歯スジ方向の変形量において，実験値では両端が膨張し，シミュレーション値でも多少ではあるが両端が膨張している．これは浸炭をすることにより普通焼入れよりも炭素量が増加され，焼入れによってオーステナイトからマルテンサイトに多く変態したためであると考えられる．結果より歯先部の変形量・応力が大きいことがわかるが，これは焼入れ時に冷却剤などによる外部からの力の影響が他の部分より大きいためであると考えられる．

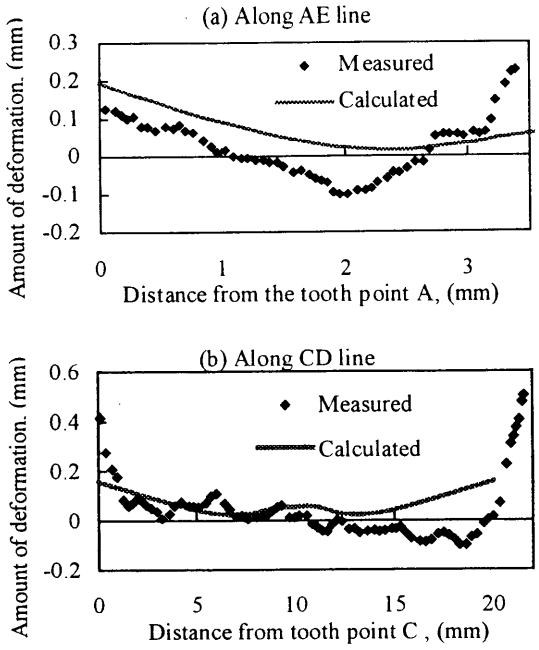

Fig.5 Amount of deformation

Fig.6に実験値における硬さおよび計算値におけるマルテンサイトの体積分率を示す．硬さはビッカース硬さ試験で測定した．焼入れ前では硬さに多少のばらつきがあるが，焼入れ後では一様になっている．またマルテンサイト変態の体積分率の値が高いと硬さの値も大きくなっている．

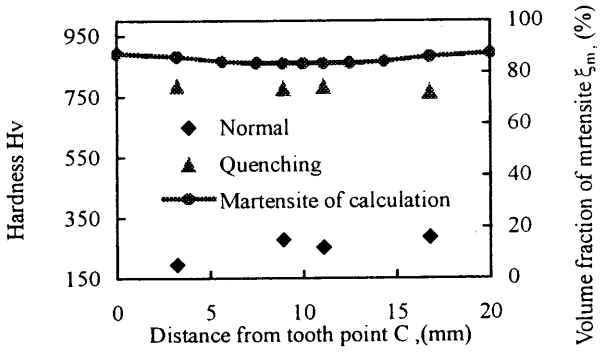

Fig.6 Hardness and martensite profile along CD line

5 結論

本研究はSCr420の炭素濃度に依存する材料の熱膨張および変態膨張係数を測定し，それを用いて浸炭焼入れシミュレーションを行った．そして種々の結果を実測値とシミュレーション値で比較することにより，浸炭焼入れ過程における残留応力と変形の挙動を明らかにした．

参考文献

(1) T.Inoue, D.Y. Ju and K.Arimoto, Proc. 1st Int. Conf. on Quenching and the Control of Distortion, ASM International, pp.205 (1992).

(2) 社団法人　日本材料学会，X線材料強度部門委員会，X線応力測定法基準(1997年版)，(1997)

NII-Electronic Library Service