



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

熱間流動応力の測定を通して

Development of Measurement for Hot Flow Curve

柳田 明

Akira Yanagida

東京電機大学
工学部 教授

1 はじめに

筆者は、本記事を執筆するには、やや年齢的には上であるとの認識はあるものの、博士取得後10年であり、研究者としては若手の部類に入ると自分では思っている。現在は塑性加工を利用した高機能材料の開発 (ECAP, 繰返し曲げ加工) や加工プロセスのトライボロジーの研究 (主にホットスタンピング) を行っており、本協会では「加工プロセスにおける酸化被膜の影響」、「熱間圧延ロール」研究会に参画させて頂いた。本稿では筆者の鉄鋼研究の始まりであった東京大学生産技術研究所 (以下: 東大生研) 柳本研究室での技術官時代 (1998年) から現在まで約20年続けている圧縮試験による流動応力の測定についてのこれまでの成果と展望を示させていただきたいと思う。

2 熱間流動応力の高精度測定

熱間流動応力の高精度の測定に取り組んだきっかけは、低炭素鋼の熱間加工中の付与ひずみと組織変化の関係を定式化するためであった。データの取得は圧延を模擬した圧縮試験より得ることが多い。圧縮試験において試験片が均熱で均一に変形すれば、組織とひずみの関係を定量的に評価できる。しかしながら実際の圧縮試験では工具と試験片の温度差による熱移動や摩擦による不均一変形が起こる。そのため組織観察部のひずみの予測が必要であり、有限要素解析等によるひずみ分布を求めることが必要であるが、その応力-ひずみ関係が正しくないと得られるひずみ分布は真の値ではなく、ひずみと組織の関係を求めることができない。このことは2000年頃にNIMSの鳥塚史郎先生 (現: 兵庫県立大) や井上忠信先生と議論させて頂き、試験片にピンやネジを埋め込みその変形状態からひずみを測定する方法を教わったが、私の実験技術が未熟であったためうまくひずみを求めることができな

かった。よって圧縮試験で高ひずみまで高精度に流動応力を求めることができれば、その応力により正確なひずみ分布を求めることができる。流動応力の測定法について文献調査を行った。摩擦を低減させるために、試験片端部を同心円状の溝¹⁾、または凹部²⁾を作成し、潤滑剤をトラップさせる方法が用いられる。それとは別に摩擦の影響を取り除く補正法が多く提案されている。CookとLark³⁾は同一径で高さの異なる試験片で、摩擦が大である場合の圧縮試験を行い、試験片高さが大きくなるにつれて、摩擦の影響が小さくなり、試験前直径/試験前高さが0となる値を外挿し、それが摩擦の影響を取り除いた真の流動応力であるとした。この方法に対してPolakowski⁴⁾は均一変形の保証がないとして、他の圧縮試験に比べると低い値が得られることを示した。圧縮試験での初等理論^{5,6)}、有限要素法^{7,8)}の利用による摩擦、加工発熱の補正など従来から行われていた。Pietrzyk先生⁹⁾が圧縮試験において実測された圧下率-荷重関係が有限要素解析による圧下率と荷重が一致するようにSwift型の応力式のパラメータを逆解析により求める手法を提案していた。

潤滑法の改善を考えたが、圧下率が60%を超える領域では潤滑切れが起こること、試験片が直径8mm、高さ12mmと小さいため、潤滑剤の封入が難しく、温度ごとに潤滑剤を変更する必要があるなど配慮すべきことが多く断念した。試験方法はそのまま、測定された実験結果から流動応力を逆解析することがこれまでの取得してきたデータにも適用可能であるので良いと考えて研究の方向性決定した。

熱間流動応力は図1に示すように内部組織変化と深く関係している。動的再結晶の開始に従い加工硬化率が減少し、再結晶の進行とともに定常応力値に漸近する。よって、逆解析に用いるために以下の構成式を提案した¹⁰⁾。

$$\bar{\sigma} = F_1 \bar{\varepsilon}^n \quad (\bar{\varepsilon} \leq \varepsilon_c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{\sigma} = F_2 \exp \left[a (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_{max})^2 \right] + F_3 \quad (\bar{\varepsilon} \geq \varepsilon_c)$$

ε_c は動的再結晶臨界ひずみであり、相当ひずみがこの値より小さい場合は加工硬化+動的回復がおり、指数則を用いた。 ε_{max} は最大応力値をとるひずみである。 F_3 は動的再結晶時の定常応力を表す。 $a, F_2, \varepsilon_{max}$ は従属定数で、 $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_c$ での応力、応力の1次微分、2次微分の連続性より求めることができる。圧縮試験（富士電波工機製：Thermech Mastor-Z）を再現できる変形-温度-磁場を連成したFEM解析コードを作成し、実験荷重と解析荷重を一致させるように応力パラメータを修正することで、不均一変形・温度の影響を含まない流動応力の取得を可能とした。もともとは磁場解析を実施していなかったが、加熱中の初期温度分布、低ひずみ速度（ひずみ速度1/s以下）では圧下率が65%を超えると試験片の温度低下が顕著になるためそれらを再現するために磁場解析を連成した¹¹⁾。また、文献10を執筆中の2003年にバルセロナのCOMPLASの参加後にポーランドのPietrzyk先生を訪問し、構成式や逆解析手法に関して議論させて頂いた。

図2にアスペクト比（高さ/直径）が異なる試験片を用いて圧縮試験を行った結果を示す。アスペクトが小さい方が摩

擦の影響を大きく受けるため図2aの「見かけの応力（均一変形を仮定して求めた応力）」ではアスペクトが小さいほど応力が大きくなっているが、図2bに示す逆解析の結果ではアスペクトによらずほぼ同一の応力が得られていることがわかる。得られた応力パラメータは温度-ひずみ速度の統合式¹¹⁾として回帰することができる。2004年に東京大学職員（技術職員）海外研修（短期）員制度によりAachen工科大学（Hirt先生）に1週間滞在し、同一素材（試験片サイズは異なる）を用いて加熱方法（工具、試験片ともに恒温槽の中で加工）および潤滑条件が異なる条件で試験を行った結果、高速加工（ひずみ速度10/s以上）ではひずみが0.7程度までは試験の手法による見かけの応力の差異が小さいことを確認した。

3 動的再結晶速度の推定

流動応力の変化と動的再結晶は密接な関係があり、その挙動を知ることは重要である。しかしながら、動的再結晶を捕らえるには、多くの組織観察を必要とするうえ初期粒径が大きい場合は未再結晶と動的再結晶の判断が粒径で判断できるが、そうでない場合は非常に難しい。Poliaikら¹²⁾は加工硬化率に着目し、硬化率-応力の関係から動的再結晶の動的再結晶臨界ひずみ開始を求めている。温度が高くなると組織変化はごく短時間で終了するため、試験片の内部と外側では冷却速度が異なるため、観察している組織は冷却中の変化を含んでいる。よって、組織観察を行うことなく応力曲線から動的再結晶速度を求める手法を提案した¹³⁾。以下に手法の概略を示す。

動的再結晶開始後、図1に示すように加工硬化+動的回復のみで示される曲線より応力値は低下する。この応力低下は動的再結晶による転位密度の減少に起因している。よって動的再結晶が起こらないと仮定した応力と動的再結晶が起こった時の応力の差と再結晶による転位消滅と関連付けることで動的再結晶速度を求めた。転位密度と流動応力は $\bar{\sigma} \propto \sqrt{\rho}$ の関係式を用いた。動的再結晶粒の転位密度は再結晶直後では

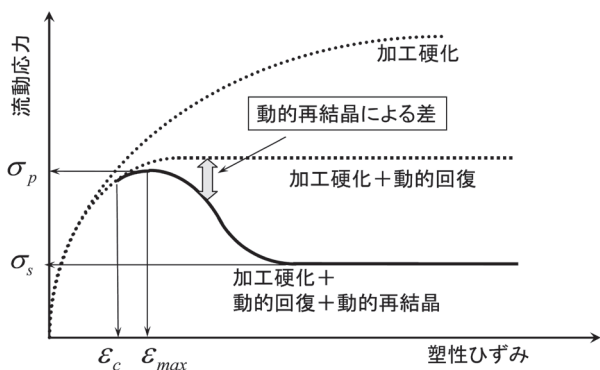
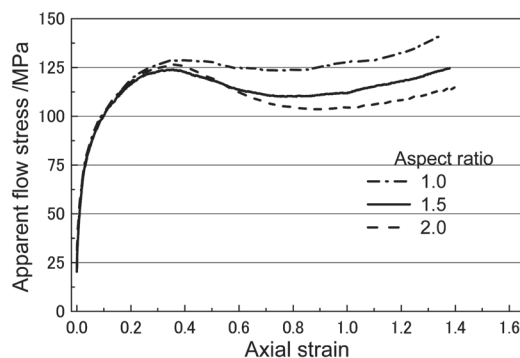
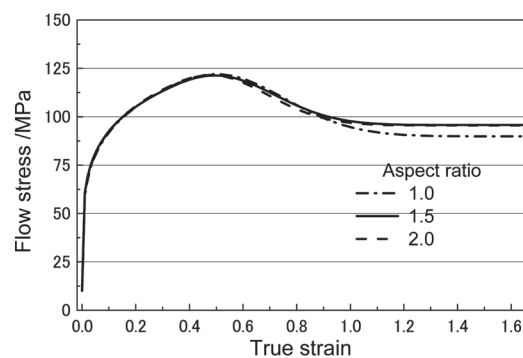


図1 応力-ひずみ曲線のタイプ¹⁰⁾



(a) 見かけの応力



(b) 逆解析結果¹⁰⁾

図2 アスペクト比（高さ/直径）の影響（S20C, ひずみ速度10/s, 1100°C）

焼鈍状態と等しくなるが、即座にひずみを受け、加工硬化と動的回復が起こる。この変化は加工前と同じ挙動であると想定し、転位密度の発展方程式を解いているのが本手法の特徴である。動的再結晶臨界ひずみは逆解析により得られた値をそのまま利用した。凍結組織観察結果と比較した結果、冷却中の組織変化の影響が少ない試験片表層部では、両者は良い一致を示した。冷却中の組織変化に関しては、研究を始めた頃は気にしていなかったが、大同特殊鋼の吉田広明氏のご指摘により配慮するようになった。学会等での意見交換の重要性を実感した。

4 軟化率に及ぼす不均一変形の影響

静的復旧の進展は組織観察もしくは、二段試験を行ったときの各段階の流動応力の変化から求める。二段試験を用いた多くの研究は報告されていたが、二段試験についてまとめられた教科書的な資料は無く、過去の論文より分類を行った。二段試験による軟化率の定義を図3に示す。冶金学的な回復、再結晶の進展は降伏点の変化に基づき、次式による軟化率 $X_{off}^{14)}$ (offset法)を用いることが多い。

$$X_{off} = \frac{\sigma_m - \sigma_y}{\sigma_m - \sigma_0} \quad (2)$$

σ_y σ_0 は0.2%耐力を用いる。その他にmean stress法¹⁵⁾、back extrapolation (BE) 法¹⁶⁾がある。図中の σ_{BE} は1段目の応力曲線と2段目の応力曲線を重ね合わせた時の2段目開始ひずみでの応力値である。Mean stress法ではoffset法に対応する平均応力が式(2)に代入され、BE法では σ_y の代わりに σ_{BE} を用いる。Strain Recovery法¹⁷⁾は応力ではなくひずみの変化より求め軟化率は次式で定義される。

$$X_e = 1 - \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_1} \quad (3)$$

ε_R は残留ひずみである。実際の再結晶率と軟化率には線形関係はない。このことに関しては多くの研究がなされている¹⁷⁻²⁰⁾。Offset法では0.2%耐力を用いた場合、軟化率0.2程度までは回復の影響とされている。

圧縮試験による二段試験では温度・ひずみの不均一分布を避けることはできない。その不均一性に起因する保持時間中の試験片内部の不均一な軟化が、測定される軟化率に与える影響についての検討を行った²¹⁾。逆解析では流動応力を関数で得ることができ、1段目、2段目の流動応力 $\sigma_1(\varepsilon)$ 、 $\sigma_2(\varepsilon)$ を、独立に求めることができる。またStrain recovery法の考え方をを用いて、各段の流動応力を式(4)のように、同一の関数系を用いて表すことができる。

$$\sigma_2(\varepsilon) = \sigma_1(\varepsilon + \varepsilon_R) \quad (4)$$

また、残留ひずみ率を用いて、 $\rho \propto \sigma^2$ の関係と式(1)の前半部の $\bar{\varepsilon} \leq \varepsilon_c$ 式から次式のような転位密度を媒介とした軟化率 $X_{\rho} = 1 - \alpha^{2n}$ を定義することができる。各要素の残留ひずみ率を用いて、軟化率 $1 - \alpha^{2n}$ を求め、凍結組織から得られた再結晶分率と試験片内部の分布を比較した結果を図4に示す。図4から不均一変形により、軟化初期では軟化率は高変形域の影響で均一変形と比べ、高くなり、終了時では、低ひずみ域の軟化が遅れるため、低い値となると考えられるが、その差は小さいことが確認された。

5 終わりに

上記の研究と並行してNEDO 3Rプログラム「環境調和型超微細粒創製基盤技術」(2002～2006年度)(リーダー：木内 学)に参加させて頂いた。私にとってのはじめての大きなプロジェクトであり30代前半に大学・企業の研究者と議論し、「粒内核生成相変態モデル^{22,23)}」、「高ひずみ速度付与試験機²⁴⁾」に関して共同で研究できたことは研究を続けるうえで

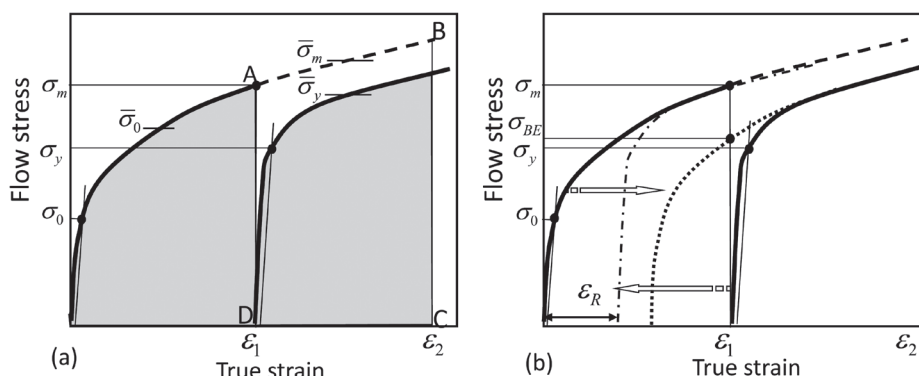
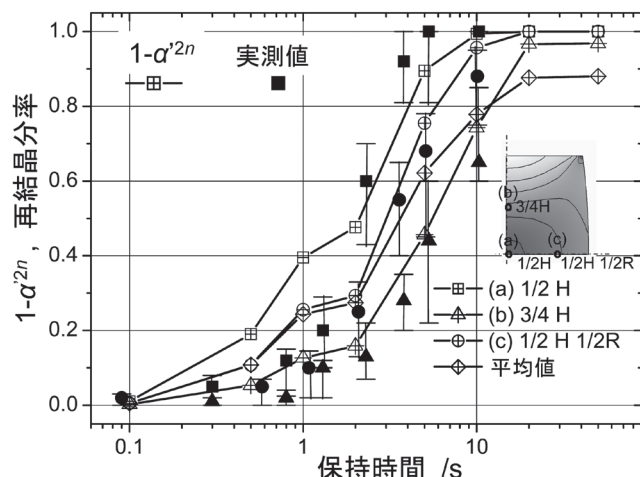


図3 軟化率の定義²¹⁾
(a) offset法, mean stress法, (b) back extrapolation法, strain recovery法

図4 測定された再結晶分率と軟化率の比較²¹⁾

私の糧になった。このプロジェクトで知り合った方々は今でも交流があり、現在でも研究面で支援を頂いている。上記成果をまとめて2007年に博士(工学)を授与された。2006年に横浜国立大学工学研究院(小豆島研)に助手として異動後は、東大生研の柳本研の博士課程の学生をサポートする形で研究を続け逆解析システムのインターフェースの改良や解析の高速化、取得データの回帰法の構築に取り組みSUS316²⁵⁾、Nb鋼²⁶⁾の組織変化の定量化を行った。自分が使うだけだと思っていたソフトウェアを人に使ってもらうには非常に多くの困難があった。その場かぎりでなく、長いスパンで研究を見据える視野が必要であったと反省している。2011年から東京電機大学の准教授に着任後は鉄鋼・素材メーカーとの共同研究を開始し、逆解析により得られた流動応力から動的回復係数・加工硬化指数、静的・動的再結晶速度を回帰し種々の鉄鋼材料に関してのデータを蓄積している。しかしながら加工硬化が小さい材料や保持時間中に析出が起こる条件では二段試験での軟化率がうまく求まらないことなどの問題を解決する必要がある。現在は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」革新的プロセスを用いた航空機エンジン用耐熱材料創製技術開発(2014年~2018年度)に参加し、誘導加熱を用いても均熱が可能である圧縮試験法の改良を含めた「革新的逆解析手法の開発」に現在取り組んでいるおり、近年注目を浴びている「マテリアルズ・ゲノム」取得の一助となれればと考えている。

参考文献

- 1) N.Loizou and R.B.Sims : J. Mech. Phys. Solid, 1 (1953), 234.
- 2) M.V.Lastegaev : Zavodskaja Laboratorija, 6 (1940), 354.
- 3) M.Cook and U.C.Larke : J. Inst. Metals, 71 (1945), 371.
- 4) N.H.Polakowski : J. Iron Steel Inst., 163 (1949), 250.
- 5) E.Siebel : Stahl und Eisen, 43 (1923), 1295.
- 6) B.Avitzur : Metal Forming Process and Analysis, McGraw-Hill, New York, (1968), 102.
- 7) K.Osakada, T.Kawasaki and K.Mori : Ann. C.I.R.P., 30 (1981) 1, 135.
- 8) 加田修, 三木武司, 戸田正弘, 小坂田宏造 : 日本機械学会論文集C, 64 (1997), 384.
- 9) M.Pietrzyk, J.Kuisak, R.Kawalla and H.Pricher : J. Mater. Proc. Technol., 60 (1996), 445.
- 10) A.Yanagida, J.Liu and J.Yanagimoto : Mater. Trans., 44 (2003) 11, 2303.
- 11) A.Yanagida and J.Yanagimoto : ISIJ Int., 45 (2005) 6, 858.
- 12) E.Poliak and J.J.Jonas : ISIJ Int., 43 (2003) 5, 684.
- 13) A.Yanagida and J.Yanagimoto : J. Mater. Process. Technol., 151 (2004), 33.
- 14) R.A.P.Djaic and J.J.Jonas : J. Iron Steel Inst., 210 (1972), 256.
- 15) D.R.Barraclough and C.M.Sellers : Met. Sci., 13 (1979) 257.
- 16) H.L.Andrade, M.G.Akben and J.J.Jonas : Metall. Trans., 14A (1983), 1967.
- 17) K.P.Rao, Y.K.D.V.Prasad and E.B.Howbolt : J. Mater. Process. Technol., 77 (1998), 166.
- 18) A.I.Fernandez, B.Lopez and J.M.Roriguez-Ibabe : Scripta Materialia, 40 (1999), 543.
- 19) S.Yamamoto, C.Ouchi and T.Osuka : Proc. Thermomechanical Processings of Austenite, ed. by J.DeArdo, AIME, New York, (1982), 613.
- 20) O.Kown and J.DeArdo : Acta Metall. Mater., 39 (1991), 529.
- 21) A.Yanagida and J.Yanagimoto : Mater. Sci. Eng. A, 487 (2008), 510.
- 22) A.Yanagida, J.Liu and J.Yanagimoto : Materials Science Forum, 706-709 (2012), 1562.
- 23) 福島傑浩, 宮田佳織, 江藤学, 柳田明, 柳本潤 : 塑性と加工, 54 (2013) 625, 148.
- 24) A.Yanagida, M.Ikeda, H.Komine and J.Yanagimoto : ISIJ Int., 52 (2012) 4, 574.
- 25) E.Dupin, A.Yanagida and J.Yanagimoto : Steel Res. Int., 85 (2014) 6, 1099.
- 26) Y.Meng, J.U.Lin, A.Yanagida and J.Yanagimoto : Steel Res. Int., 87 (2017), DOI : 10.1002/srin.201700036

(2017年10月10日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

中部大学 工学部 機械工学科 教授

石川 孝司

白 動車をはじめとした移動体の車体・部材の軽量化は、燃費削減、CO₂排出量低減に対して重要であり、そのために高張力鋼に代表される高強度材料が開発されその利用が拡大しています。塑性加工と熱処理を融合した加工熱処理法の一つであるTMCP技術(Thermo-Mechanical Control Processing)は、現在、鉄鋼だけでなく非鉄金属分野でも組織および材質(主に機械特性)をコントロールする手法として広く用いられています。組織の正確なコントロールは、合金元素および組成の適正な選択とともに非常に重要であり、特に希少金属を添加せずに微細構造の最適化により同じ特性を達成することができれば環境保護、リサイクル性、コストなどの点から非常に有効です。従来は微細組織および機械的性質の予測およびコントロールのための材料モデルの作成は、現象が複雑で影響因子が多いので膨大な時間と労力が必要で、一貫したコントロールはほとんど不可

能でした。しかし、物理冶金学、圧延および塑性加工技術、加工熱処理およびコンピュータ工学の最近の飛躍的な進歩は、それを可能にしています。柳田先生の研究は、その組織予測に必要な材料の流動応力、再結晶挙動、軟化回復挙動に着目したもので非常に重要な問題に取り組まれています。影響因子が多く複雑に関係しており、実験をするにも工夫しないと何を見ているのかわからなくなりますが、先生は地道に研究を進めておられ、成果も出されています。筆者も、必要なところに必要な特性を創形と同時に造り込む技術(ネットシェイプ+ネットプロパティ)に長年取り組んできているのでその苦労はよくわかります。当該分野の若手研究者が減少している中で貴重な存在と思っています。「マテリアルズ・ゲノム」進化のために、既成の概念にとらわれることなく、チャレンジ精神を発揮して益々活躍していただきたいと思います。

新日鐵住金(株) 技術開発本部 プロセス研究所 鋼圧一貫研究部長

江藤 学

柳 田先生は大変お若く見え、講演大会等で学生さん方と一緒にいらっしやると、その気さくで明るい性格も手伝って、学生さんの集団にすっかり溶け込まれてしまいます。しかし実際には既に教授としてご活躍のベテラン研究者です。その先生に「躍動」を書いたいただき、そこに私が(先輩からの)「エール」を送るという状況にはかなり無理があると思うのですが、圧延分野で色々とお世話になっている者からの声援という意味で書かせていただきます。

私が先生とお近づきになれたのは、記事にもある「環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発」プロジェクトにおいてでした。当時は東大生研の技術官として、柳本先生と共に参加され、新たに導入された高ひずみ速度付与試験機を駆使して結晶粒の超微細化を実現されると共に、種々のプロセス条件の影響を解明、整理されました。また、大ひずみ加工時の粒内核生成フェライト変態を定式化され、微細組織生成の数値シミュレーションを可能とされました。どちらも大変な難題に粘り強く取り組まれた末の素晴らしい成果で、敬服しておりました。

さて、今回取り上げられている熱間流動応力の測定

は、圧延研究者にとっては最も古くて最も新しい課題と言えると思います。圧延理論部会の初期の資料を見ますと第2回(1955年)の議題に「変形抵抗の実測比較」とありました。変形抵抗すなわち熱間流動応力は、圧延荷重に直結し、流動応力が分からなければ、そもそも圧延理論の出番も無いわけです。その後いくつかの予測式やモデルが提唱され、これを計算機によるパラメータ学習で補完することで、圧延の安定化、高精度化が図られてきたのですが、流動応力の評価と予測にはまだまだ課題が残されています。

記事の通り、鋼材の熱間加工時の流動応力は、組織変化と一体で考えるべきもので、流動応力の逆解析技術は、上述の超微細粒鋼の組織シミュレーションの土台ともなっていました。今後も熱間加工を活用した鋼材の組織制御は進化し続け、組織予測、流動応力予測共にその重要性は増す一方と思われます。この研究の更なる発展を期待しています。

柳田先生は、好奇心旺盛かつ勉強熱心。難しい課題にも謙虚な姿勢で果敢に取り組まれる方です。若手研究者のお手本として、ますますのご活躍を祈念いたします。