

(論文)

# 線材表面きず発生挙動とその低減

## Analysis of Surface Defect Generation Behavior and Decrease of Wire Rolling Defects



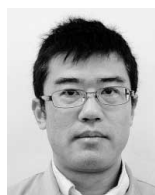
串田 仁\*1  
Hitoshi KUSHIDA



武田実佳子\*1(工博)  
Dr. Mikako TAKEDA



宮崎庄司\*2  
Shoji MIYAZAKI



久保田吉彦\*2  
Yoshihiko KUBOTA

Decreasing surface defect is one of the most important factors for increasing the quality of wire rod products. Conventional studies on surface defects mainly focused on billet defects by investigating, rolling deformation behavior. In this report, a generating mechanism was experimentally envisaged for surface defects generated in the rolling process. Next, the presumed mechanism was verified by the experiment and the numerical analysis, and a procedure to decrease defects was carried out.

まえがき＝熱間圧延された線材は、熱処理、酸洗、引抜きの後、種々の形状に鍛造される。線材の表面に疵(きず)があると、その箇所が鍛造工程での割れの起点となる。このため、過去から線材の表面疵の低減に対する様々な研究が行われ、実機適用されてきた。しかしながら、近年、鍛造加工の多様化や高精度化、工程省略の促進に伴って要求される表面品質もますます厳しくなっており、よりいっそうの表面疵の低減が求められている。

表面疵の低減に対する取組みは従来から様々な検討がなされてきたが、鋼片段階に存在していた疵の変形挙動を調査した例が主流であり、圧延変形独自で発生する疵に関して研究された例は少ない<sup>1), 2)</sup>。

本報告では、圧延工程で発生する表面疵を対象とし、実機サンプルを調査して発生メカニズムを推定し、基礎実験を通じて仮説の検証を行った。また、基礎実験と数値解析結果を比較することにより、表面疵発生指標の定量化に取り組んだ。

### 1. 表面疵の分類

線材の表面疵は一般的に、圧延後の外観によって分類される<sup>3)</sup>。圧延工程で発生する代表的な表面疵の分類を表1に示す。かき疵(①)の発生は圧延後のガイド装置との接触が原因となっており、また折込疵(②)は、圧延中に孔型から嚙(か)み出した圧延材を続く圧延で押し込むことによって生じる疵である。これら2種類の疵は、圧延後の外観、あるいは横断面の疵形状調査からの同定や対策は比較的容易である。

しわ疵(④)は、主として自由圧縮面に生じる疵で、「しわ状」に見えることが特徴である。発生部位に規則性があることから圧延変形が起因していると想定できるが、同一条件で圧延しても発生頻度にばらつきがあり、その

表1 圧延工程で発生する代表的な表面疵の分類  
Table 1 Classification of typical surface defect generated by rolling

	Form	Feature
① Scratch		Defect scratched by groove or induction device, etc.
② Overlap		Defect that overlaps along direction of rolling
③ Scale mark		Defect that scale sticks to surface
④ Wrinkle		Wrinkled defect chiefly caused on free compression side

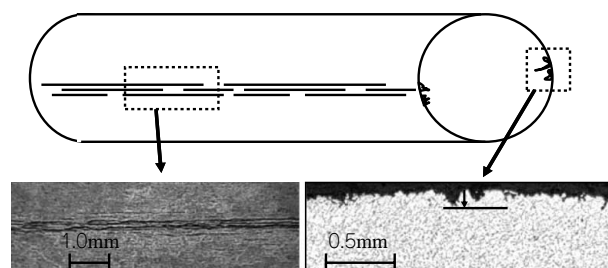


図1 典型的なしわ疵の外観写真と光学顕微鏡写真  
Fig.1 Optical photomicrograph of typical wrinkle defect on the surface and the cross-section

明確な発生原因は明らかになっていなかった。

またスケール疵(③)は、鋼材表面に部分的に残存した、あるいは鋼材表面から剥離(はくり)したスケールが圧延によって押し込まれて生じる疵であり、圧延工程の最終段階近くで発生した疵は表1のような外観となる。しかしながら、圧延工程の比較的上流で発生したスケール疵は、圧延による変形によってしわ状に変化し、圧延後の外観ではしわ疵と判定されることが考えられる。

そこで本報告では、圧延後にしわ状に発生するしわ疵を対象とし、変形、スケールの両面からその発生機構を検討した。典型的なしわ疵の酸洗後外観写真と横断面光学顕微鏡写真を図1に示す。疵発生位置には円周方向に

\*1 技術開発本部 材料研究所 \*2 鉄鋼事業部門 神戸製鉄所 線材条鋼圧延部

規則性があり、酸洗後の外観では複数の凹凸が密集したしわ状となっている。また、その疵の深さは一般的に0.01~0.05mm程度である。

## 2. 鋼材成分がスケール密着性に及ぼす影響

スケールと地金との密着性は、鋼材の成分によって変化し、SiやCrが含まれると急激に剥離性が悪化する(密着性が高くなる)ことが知られている。Siに対しては過去から多くの検討がなされているため、ここではとくにCrがスケールと地金間の密着性に及ぼす影響を調査した<sup>4)</sup>。

### 2.1 実験方法

供試材には表2に示す組成のφ8×12mmの円柱状試験片を使用した。スケール形成のために、供試材を燃焼ガス雰囲気中で加熱後、樹脂に埋込み、検鏡用試料に供した。なお、加熱雰囲気は実操業で使用されているLNGの燃焼組成(72%N<sub>2</sub>-18%H<sub>2</sub>O-10%CO<sub>2</sub>)を模擬した雰囲気とした。

加熱温度は1,373Kとし、30min保持した。所定の温度以下での酸化を防止するためN<sub>2</sub>雰囲気中で昇温し、材料が所定温度に到達した後、混合ガスを導入して所定時間保持し、再びN<sub>2</sub>雰囲気中で常温まで冷却した。図2に実験の概略を示す。加熱後には、外層にFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeOの3層スケール、内層にCr、Siが濃化したサブスケールから構成される厚いスケールが生成した。外層の3層スケールは容易にはがれるものの、サブスケールは強固に鋼に密着して残り、表面性状劣化の原因になると考えられる。このため、外層スケールをあらかじめ取り除き、サブスケール層のみ残った試験片を真空中で昇温して1,273Kに到達後、圧縮変形でサブスケールを剥離させた。図3に密着性評価試験の概略図を示す。圧縮ひずみ率は50%、ひずみ速度は10mm/sである。その後、Ar

表2 鋼材の成分 (mass%)  
Table 2 Chemical compositions of Cr containing steels

Steel	C	Si	Mn	P, S	Cr
A	0.95-1.10	0.15-0.35	< 0.05	< 0.025	1.30-1.60
B	0.33-0.38	0.15-0.35	0.60-0.85	< 0.030	0.90-1.20
C	0.08-0.13	0.10-0.20	0.30-0.60	< 0.030	

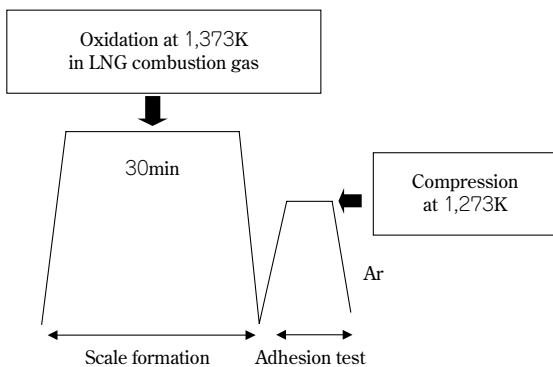


図2 実験の概略図  
Fig. 2 Schematic diagram of experiment

中で常温まで急冷し、剥離後のスケール生成を抑制した。

スケールの密着性は、全面積に対する残留したサブスケール面積の割合で定量化した。またサブスケールのCrの濃化は電子線マイクロアナライザ (Electron Probe MicroAnalyser, 以下EPMAという。日本電子製JXA-8800RL)を用いて調べた。加速電圧は15kV、照射電流は0.1μA、ビーム径を2.0μmとした。

### 2.2 スケールの密着性に及ぼす合金元素の影響

スケールの高温密着性に及ぼす鋼材Cr濃度の影響を図4に示す。残留スケール面積率が大きいほど密着性は高く(剥離性:劣)、小さいほど密着性が低い(剥離性:良)ことを示す。図から鋼材Cr濃度の増加に伴い、高温密着性が増加することが分かる。1,373Kで酸化させた鋼A、Bのスケール断面のSEM写真およびEPMAによるCr分布を図5に示す。鋼A、BともCrがスケールと地金の界面部に濃化しており、Crを含有するサブスケール層が界面部に生成している。とくにCr濃度の高い鋼AでCrの濃化の程度が著しい。このため、鋼材のCr濃度が高いほど厚いサブスケールが生成するとともに、スケールと地金間の剥離性が悪化したと考えられる。

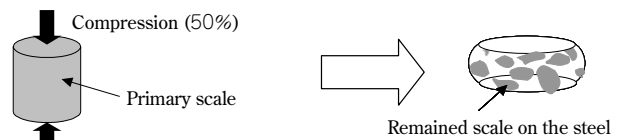


図3 スケールの高温密着性評価実験の概略図  
Fig. 3 Schematic diagram of evaluation for adhesive test at high temperature

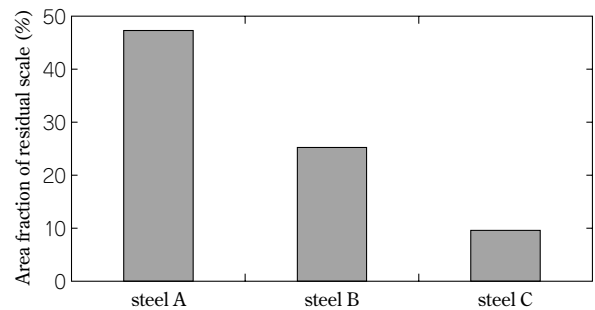


図4 スケールの高温密着性に及ぼすCr濃度の影響  
Fig. 4 Effect of Cr content on area fraction of residual scale at high temperature of primary scale

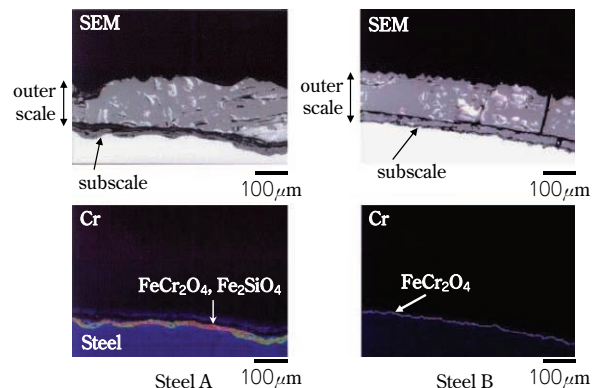


図5 サブスケール構造に及ぼす加熱温度の影響  
Fig. 5 Effect of heating temperature on structure of subscale

### 3. 表面疵発生原因の推定

#### 3.1 実機で発生するスケール・表面疵調査

##### 3.1.1 実験鋼種の選定

2章の結果から、鋼材のCr濃度が高いほどスケールと地金間の密着性が上がり、剥離性が悪化することが分かった。そこで、表面疵の生成に及ぼすスケールの影響をより顕著にするために、Cr、Si含有鋼である軸受鋼を実験鋼種として選定した。

##### 3.1.2 実機実験によるスケール、表面疵分析

選定した軸受鋼を当社神戸製鉄所第7線材工場で圧延し、圧延途中のサンプルを採取した。サンプルを採取した工程は、加熱炉出側鋼片(I)、デスケーラで剥離したスケール片(II)、圧延工程を経緯した粗列出側(III)および最終製品(IV)とし、実機圧延ラインでのスケールおよび表面疵の推移を分析した。第7線材工場のレイアウトと、サンプルを採取した工程(図中の矢印)を図6に示す。

加熱後の鋼片表層部のSEM写真を図7に、デスケーラで剥離したスケール片の光学顕微鏡写真を図8に示す。加熱後の鋼片表層部には全周にわたってサブスケールが生じており、剥離性を低下させる微細な凹凸が観察される。一方、デスケーラで剥離したスケール片はウスタイトとマグネタイトのみであり、鋼材とスケール界面に生

じていたサブスケールは観察されない。このことから、デスケーラではウスタイトより上層のスケールのみが剥離しており、サブスケールは鋼材全周に残存していると推定できる。

粗列出側サンプル、および製品サンプルにおける表面疵内部のEPMAによるCr分布を、それぞれ図9、図10に示す。両者ともに表面疵内部のスケールにのみ高濃度のCrが確認され、表面疵以外の表層部ではこのような高濃度のCrは観察されなかった。Siについても同様の傾向があり、サブスケール中のCr、Siの濃化は、長時間の高温雰囲気中で促進することから、観察された表面疵内部のサブスケールは加熱炉内で生じたものと推定できる。

##### 3.1.3 表面疵発生メカニズムの推定

実機実験によるスケールと表面疵の分析結果から、表面疵発生メカニズムを以下のように推定した。表面疵発生メカニズムの模式図を図11に示す。

- 1) 加熱炉内で鋼材全周にスケール、サブスケールが生成する
  - 2) サブスケールはデスケーリング後も残存する
  - 3) 線材圧延特有の変形によって鋼材は局部的に周方向に圧縮され、同時にサブスケールがトラップされることによって規則性を持つ表面疵が生成する。
- 生成した表面疵は、その後の圧延での延伸によ

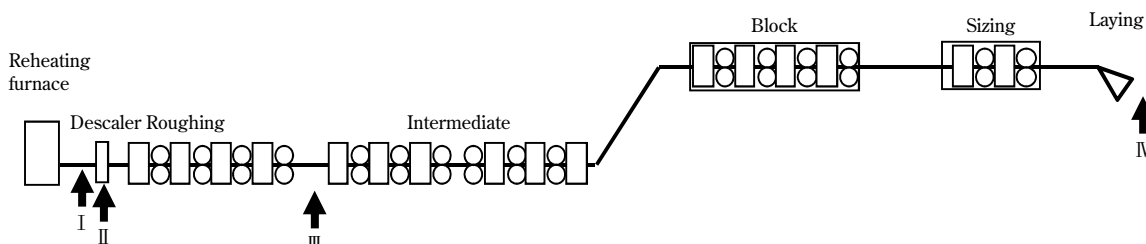


図6 7線材工場のレイアウトとサンプル採取場所  
Fig. 6 No.7 wire rod mill layout and sample collection place

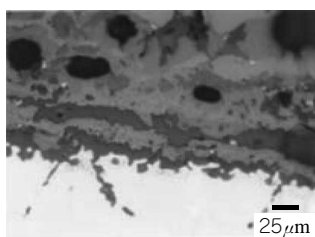


図7 加熱後の鋼片表層部のSEM写真(I)  
Fig. 7 SEM photograph on billet surface after heating (I)

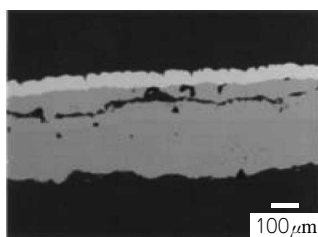


図8 加熱後の鋼片表層部のSEM写真(II)  
Fig. 8 Optical photomicrograph of scale splinter that flakes off by descaler (II)

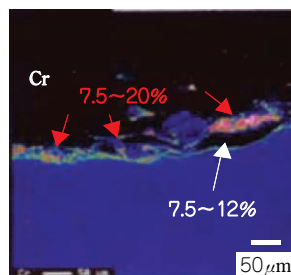


図9 疵内部のCr濃度分布(III)  
Fig. 9 Distribution of density of Cr in defect (III)

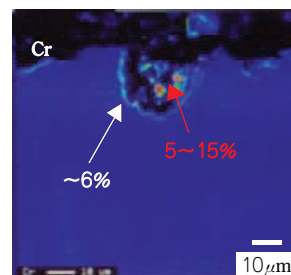


図10 疵内部のCr濃度分布(IV)  
Fig. 10 Distribution of density of Cr in defect (IV)

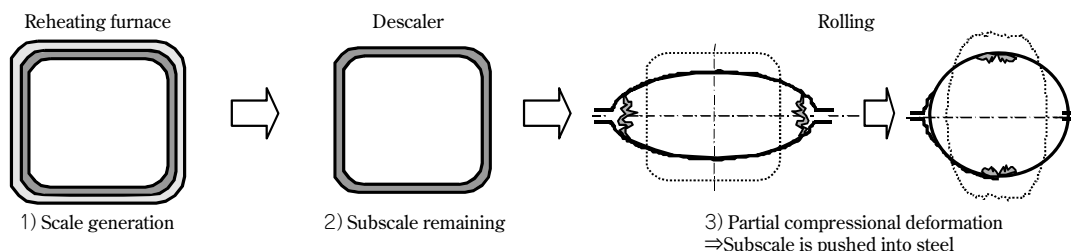


図11 表面疵発生メカニズムの模式図

Fig. 11 Diagrammatic illustration of surface defect generation mechanism

って浅くなるものの、生成した時点の表面疵が深い場合には製品まで残存する。

### 3.2 表面疵発生メカニズムの検証

線材特有の圧延変形によって表面疵が発生することを検証するために、テストミルでの基礎実験を実施した。実験に使用した孔型系列は、線材圧延で一般的に用いられる孔型系列の中でもとくに不均一変形が顕著である角一オーバーホール孔型系列とした。次に素材（ピレット）については、表面に発生するひずみを変化させるために、17角から21角、および角のコーナRの形状を変化させた素材を1パス熱間圧延後、横断面を光学顕微鏡で観察し、疵深さを測定した。実験条件を表3に示す。

20角素材（コーナR=0mm）での横断面疵発生位置と疵深さ、および表面疵写真を図12に示す。素材段階で表面疵がない状態であっても、圧延変形によってスケールがトラップされた表面疵が発生することに加え、発生した表面疵の部位に規則性があることが確認できた。

### 3.3 表面疵発生の定量化

#### 3.3.1 表面疵発生部位の推定

圧延変形における表面疵の発生指標を定量化するため、自社開発の剛塑性3次元FEM解析ソフトを用いて表面周方向のひずみを解析し、基礎実験結果と比較した。17角素材（コーナR=0mm）を対象とした周方向ひずみ分布解析結果と基礎実験で観察された表面疵との比較を図13に示す<sup>5)</sup>。

角一オーバーホール孔型系列では、素材コーナからカリバに接触する。このため、圧延変形による幅広がりカリバで拘束することとなり、カリバと自由面との接触面境界近傍で大きな周方向圧縮ひずみ（以下、局部圧縮ひずみ

表3 実験条件  
Table 3 Test condition

Material	SWRCH45K
Roll diameter (mm)	230.0
Rolling temperature (K)	1,273
Rolling speed (m/min)	1.5
Shape of groove (mm)	R=23.6 H=5.00

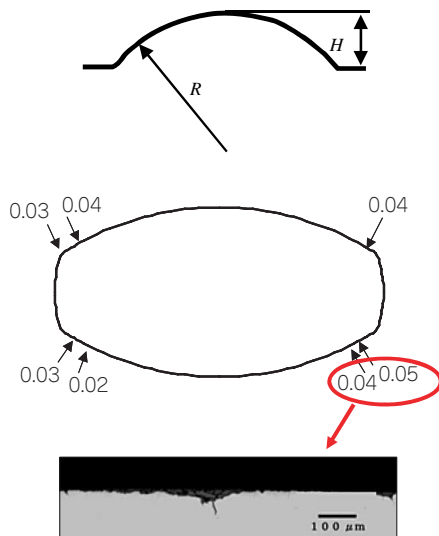


図12 圧延後の疵発生位置と疵深さ  
Fig.12 Defects position and defects depth after

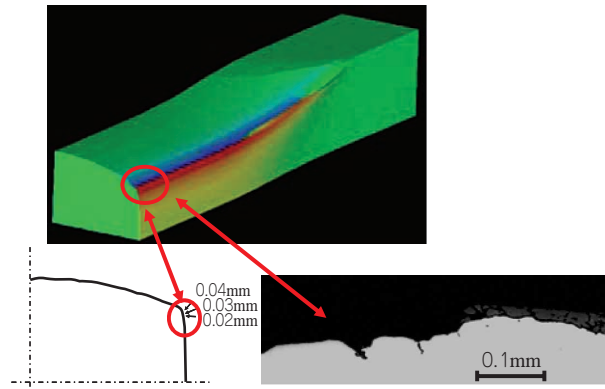


図13 FEMによる周方向ひずみ分布と基礎実験で観察された表面疵  
Fig.13 Calculated strain distribution by FEM and observed

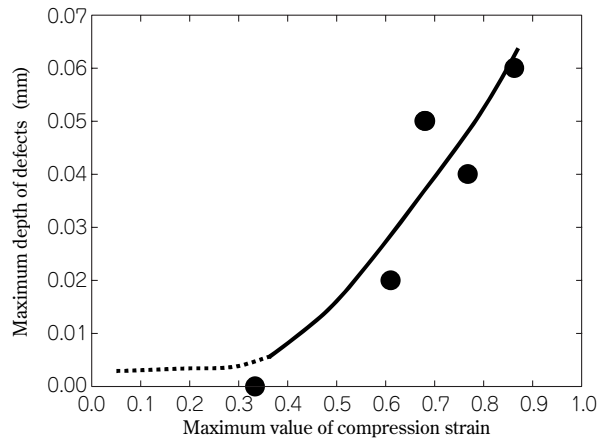


図14 局部圧縮ひずみと最大疵深さの関係  
Fig.14 Relationship between compression strain and maximum depth of defect

という)が生じる。図より、基礎実験での疵発生位置とFEM解析での局部圧縮ひずみの位置は対応しており、FEM解析によって表面疵発生部位を推定できることが分かった。

#### 3.3.2 表面疵発生指標の定量化

2章での結果から、表面疵の発生指標（疵深さ）は、サブスケールの剥離性に影響する鋼材の成分（表面疵内部へのトラップのしやすさ）にも依存するため、生成する疵深さの感受性は鋼種によって変動する。今回の基礎実験に用いたシリコンキルド鋼（JIS SWRCH45K）での、各条件における局部圧縮ひずみと、その部位における表面疵深さの関係を図14に示す。局部圧縮ひずみと表面疵深さには相関があり、局部圧縮ひずみが小さくなるほど疵深さは減少する。この結果から、局部圧縮ひずみを制御することによって表面疵深さの低減が可能であることが分かる。

## 4. 実機における表面疵の低減

前章までの結果に基づき、デスクレーン装置のヘッド改造によるサブスケール除去能力の向上、およびパススケジュール最適化による局部圧縮ひずみの低減という二つの対策に取り組んだ。図15は、当社の代表鋼種の一つである低合金鋼に対し、それらの対策を行う前と後の製品表面疵を調査した結果を示す。この図からも分かるよ

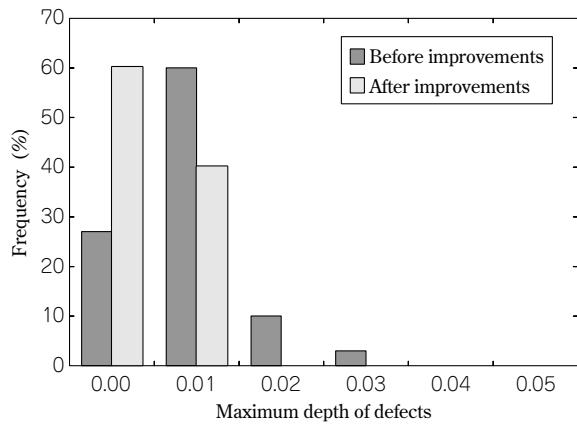


図15 製品表面疵調査結果

Fig.15 Product surface defect investigation result

うに、製品疵での最大深さの低減、および表面疵発生率の低減を実現することができた。

むすび＝線材の重要な要求品質の一つであるしわ疵の低減に対し、スケールと圧延変形の両面から検討することによってその発生メカニズムを明らかにした。また、圧延変形中の鋼材表面に作用する局部圧縮ひずみにより、表面疵の発生を予測できることを明らかにし、その発生指標を定量化した。

今後、圧延ラインでの温度分布や張力、ねじれなどに起因する各スタンドの形状変動を低減する技術を開発し、さらなる表面疵低減技術の確立を行う。

#### 参 考 文 献

- 1) 松井利光ほか：住友金属 Vol.26, No.3, pp.324-337.
- 2) 加藤健三ほか：昭和53年度塑性加工春期講演会, pp.197-200.
- 3) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧Ⅲ(2)第3版, pp.875-876.
- 4) 武田実佳子ほか：CAMP-ISIJ, Vol.15 (2002), p.1092.
- 5) 串田 仁ほか：CAMP-ISIJ, Vol.18 (2005), p.1225.