

超高周波加熱による高速精密熱処理システムの開発 (第3報)

— 合金鋼への適用と検証 —

八代 浩二・鈴木 大介・清水 誠司・杉田 良雄*¹・齋藤 基樹*²・久保田勝彦*³

Development of High-speed and Precision Heat Treatment System by Ultra High-frequency Induction Heating (3rd Report)

— An application and verification to alloy —

Koji YATSUSHIRO, Daisuke SUZUKI, Seiji SHIMIZU, Yoshio SUGITA*¹,
Motoki SAITOU*² and Katsuhiko KUBOTA*³

要 約

超高周波誘導加熱装置を利用した熱処理装置を試作して熱処理実験を行い、断面観察と硬さ分布測定を行った。その結果、SUJ2試験片の直径4mm、265V-35.0mm/sの焼入れ条件において最高硬さ約700HV、硬化層深さ約0.3mmが得られた。また、直径6mm、265V-23.3mm/sの焼入れ条件において最高硬さ約700HV、硬化層深さ約0.2mmが得られた。SUS440C試験片では、2回目加熱開始温度250℃の試験片において最高硬さ約550HV、深さ約2.0mmの硬化層が得られた。

Abstract

Heat treatment was examined by prototyped device using ultra-high frequency induction heating unit. Quenched specimen was evaluated by cross-section observation and measuring hardness distribution. As a result, in SUJ2 specimens, the condition of 265V-35.0mm/s (4mm in diameter) brought the depth of hardened zone was 0.3mm and maximum hardness was 700HV. Also, the condition of 265V-23.3mm/s (6mm in diameter) brought the depth of hardened zone was 0.07mm and maximum hardness was 700HV. In SUS440C specimens, the condition of twice heating start temperature at 250℃ brought the depth was 2.0mm and maximum hardness was 550HV.

1. 緒 言

近年、工業製品の生産が急激に海外へ移行しつつある中で、日本国内での生産は、精密・微細加工や多品種少量生産に特化してきている。一方、生産を行う上では低コスト、短納期、低環境負荷の要求は高まるばかりであり、中長期的にはこれらの生産形態に適応した企業のみが生き残るものと考えられる。このような状況を踏まえ、地場中小企業の競争力を高めるとともに、新規技術を創出して事業化することは極めて重要な課題である。

熱処理技術は、材料の特性を引き出す重要な技術であるが、処理に時間がかかる点や高温にさらされることによる製品の変形が問題となっている。また、処理設備が

大がかりなため、膨大なエネルギーを消費している。

高周波誘導加熱を利用した高周波焼入れは、急速短時間加熱、表面加熱、部分加熱が可能で消費エネルギーが少ないといった特徴があり、耐摩耗性、疲れ強さ、じん性の向上を目的に広く用いられている¹⁾。しかしながら、小径部品に対して既存の高周波熱処理装置では大きな変形の発生やエネルギー伝送効率の低さなどの問題から、活用されずにいた。

このような背景から、平成16年度は超高周波誘導加熱装置を用いて熱処理装置を試作し、直径6mm、長さ100mmの機械構造用炭素鋼 (JIS-S45C) 試験片に対し焼入れ実験を行った結果、表面近傍の最高硬さ700HV、約0.25mmの硬化層を得ることができた²⁾。平成17年度は電源出力と送り速度を変化させて焼入れ実験を行い、試験片の残留応力および変形量について従来熱処理方法との比較評価を行った。その結果、変形量は硬化層が深い

*1 ワイエス電子工業株式会社

*2 浅川熱処理株式会社

*3 有限会社丸真熱処理工業

ほどずぶ焼入れに近い傾向を示し、浅いほど未処理および焼きなましに近い傾向を示した。また、軸方向および接線方向の残留応力を測定したところ、軸方向では硬化層の厚い試験片において最表面で約400MPaであり、表面から内部へ向かうに伴い緩やかに低下していくことが判明した。それに対し、硬化層が薄い試験片では試験片最表面で約200MPaであり、硬化層の母材境界部付近で引張応力へ転じていることが判明した。一方、接線方向では硬化層の深さにかかわらずほとんど付与されていないことが判明した。³⁾

本年度は機械構造用炭素鋼 (JIS-S45C) 以外の合金鋼について焼入れ実験を行い、処理層の形成状況を検討した。

2. 実験方法

2-1 試験片

試験片として、高炭素クロム軸受鋼鋼材 (JIS-SUJ2: 以下, SUJ2試験片と表記する) およびマルテンサイト系ステンレス (JIS-SUS440C: 以下, SUS440C試験片と表記する) を用いた。SUJ2試験片は直径4mm (以降, φ4試験片と表記する) のものと6mm (以降, φ6試験片と表記する) のものを用い、SUS440C試験片は直径8.2mmのものを用いた。どちらも長さ100mmに切断後、両端に旋盤でセンタ穴加工を施したものを試験片とした。

表1および表2にSUJ2試験片の熱処理条件一覧を示す。

SUJ2試験片の受入れ状態の組織を観察したところ、図1に示すように微細な球状炭化物を形成していた。そ

表1 試験片および熱処理条件一覧 (SUJ2試験片)

試験片直径	試験片No.	焼入れ条件
4mm	4-1	265V-70.0mm/s
	4-2	265V-35.0mm/s
	4-3	265V-28.0mm/s
	4-4	265V-23.3mm/s
6mm	6-1	265V-58.3mm/s
	6-2	265V-35.0mm/s
	6-3	265V-28.0mm/s
	6-4	265V-23.3mm/s
	6-5	265V-17.5mm/s
	6-6	265V-14.0mm/s

表2 その他条件一覧 (SUJ2試験片)

	φ4試験片	φ6試験片
焼入れ長さ (mm)	70	
コイル穴径 (mm)	6.0	7.1
試験片回転数 (r/s)	30	
冷却方法	水道水による水冷	

のため、850℃-1Hの焼なまし処理を行い、図2に示すようなフェライト+パーライトの状態に調質を行ったものについて、焼入れ実験を行った。

表3にSUS440C試験片の熱処理条件一覧を示す。

表3 試験片および熱処理条件一覧 (SUS440C試験片)

試験片No.	電源電圧 (V)	送り速度 (mm/s)	冷却水量
1-1	265	14.6	小
1-2			
2-1		1回目: 13.5 2回目: 14.6	大
2-2			
2-3			

表4 2回目加熱開始温度一覧 (SUS440C試験片)

試験片No.	2回目加熱開始温度
2-1	470℃
2-2	350℃
2-3	250℃

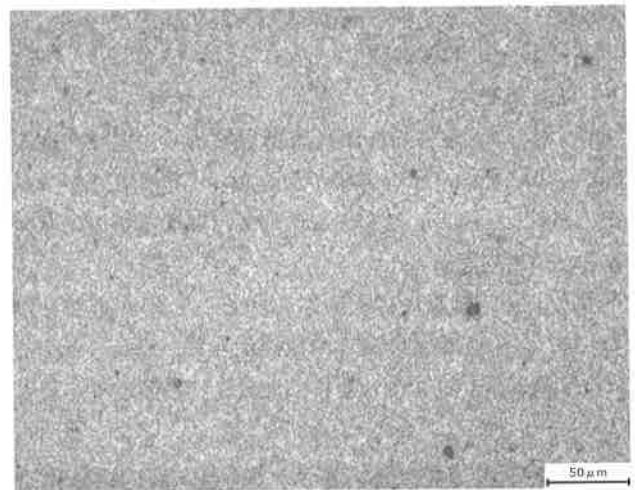


図1 受入れ状態のSUJ2組織写真

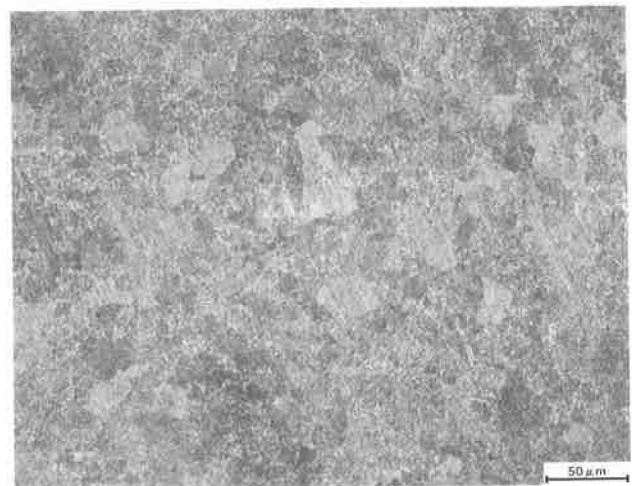


図2 焼鈍後のSUJ2組織写真

SUS440Cはマルテンサイト系ステンレスの中でもクロム含有量が多く、焼入れ温度も1010~1070℃と高いため、本試作装置を用いても熱伝達により加熱が深く行われ、結果として焼入れ深さが大きくなると考えられた。そこでまず、冷却水量を変えることで焼入れ深さにどのような影響があるか調べるために、電源電圧および送り速度を一定とし焼入れ実験を行った。次に、加熱を2回に分け、1回目を余熱とすることで、表面部のみ高温に出来るのではないかと考え、電源出力、送り速度、冷却水量を一定とし、2回目加熱開始温度のみを変えた実験を行った。表4に2回目加熱開始温度一覧を示す。

SUS440Cの焼入れには穴径9.3mmの焼入れコイルを用いた。また、SUS440C試験片については前処理を行っていないものを試験片とした。焼入れ方法は両試験片とも移動焼入れであり、冷却方法は水道水による水冷である。

SUJ2試験片およびSUS440C試験片は焼入後切断し、3%硝酸アルコール溶液(SUJ2試験片)、塩化第二鉄溶液(SUS440C)でそれぞれ腐食し、断面観察と硬さ測定を行った。

3. 実験結果および考察

3-1 SUJ2試験片

1) φ4試験片

図3にφ4試験片の断面観察結果を示す。送り速度が遅くなるに従い、熱影響層が深くなっていくことが分かる。また、No.4-1試験片においては熱影響層を確認することが出来なかった。

図4にφ4試験片の表面から内部への硬さ分布を示す。No.4-1試験片の条件では硬化していなかった。これは移動速度が速すぎたために加熱時に表面温度が焼入

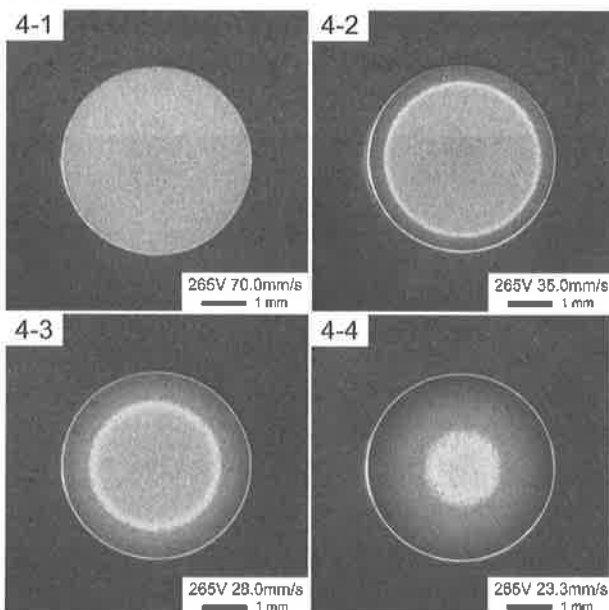


図3 φ4試験片の各条件における断面観察結果

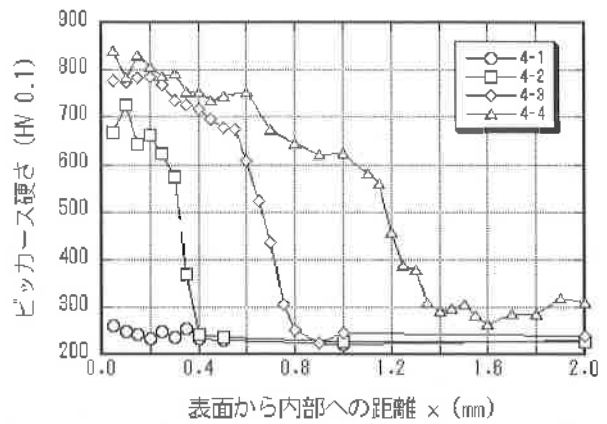


図4 φ4試験片の表面から内部への硬さ分布

れ温度以上に上昇していないことが原因である。

No.4-2試験片の条件において、表面近傍の硬さは約700HVであり、断面観察から測定した熱影響層は約0.37mmであった。SUJ2は炭素含有量が0.95~1.10であるため、JISで規定されている有効硬化層の限界硬さは500HVとなる。これより有効硬化層深さを求めると、約0.3mmとなり、今回のφ4試験片の焼入れ実験において最も良好な結果を示した。No.4-3試験片の条件では、表面近傍の硬さは約800HVであり、有効硬化層深さは約0.65mmであった。また、No.4-4試験片の条件では表面近傍の硬さは約850HVであり、有効硬化層深さは1.15mmであった。

2) φ6試験片

図5にφ6試験片の断面観察結果を示す。φ4試験片と同様に、送り速度が遅くなるに従い、熱影響層が深くなっていくことが確認できる。また、No.6-1試験片では熱影響層が確認できなかった。

図6にφ6試験片の表面から内部への硬さ分布を示す。No.6-1試験片の条件では硬化していないことが確認された。これは前述のNo.4-1試験片と同様の原因によるものである。また、No.6-2試験片の条件では表面近傍の最高硬さ約400HVと若干硬度の上昇が確認できるものの、有効硬化層の限界硬さに達していない。

No.6-3およびNo.6-4試験片の条件では、表面近傍の最高硬さ約700HVであり、有効硬化層深さはNo.6-3試験片で約0.07mm、No.6-4試験片で約0.2mmであり、φ6試験片の中で良好な結果を示した。No.6-5およびNo.6-6試験片の条件では表面近傍の最高硬さ約800HVであり、有効硬化層深さはNo.6-5試験片で約0.5mm、No.6-6試験片で約1.05mmであった。

これまで示してきたφ4試験片、φ6試験片の結果より、No.4-2試験片およびNo.6-3およびNo.6-4試験片の条件付近においてさらに適切な焼入れ条件を適用することにより、今回得られた結果以上に浅い硬化層を

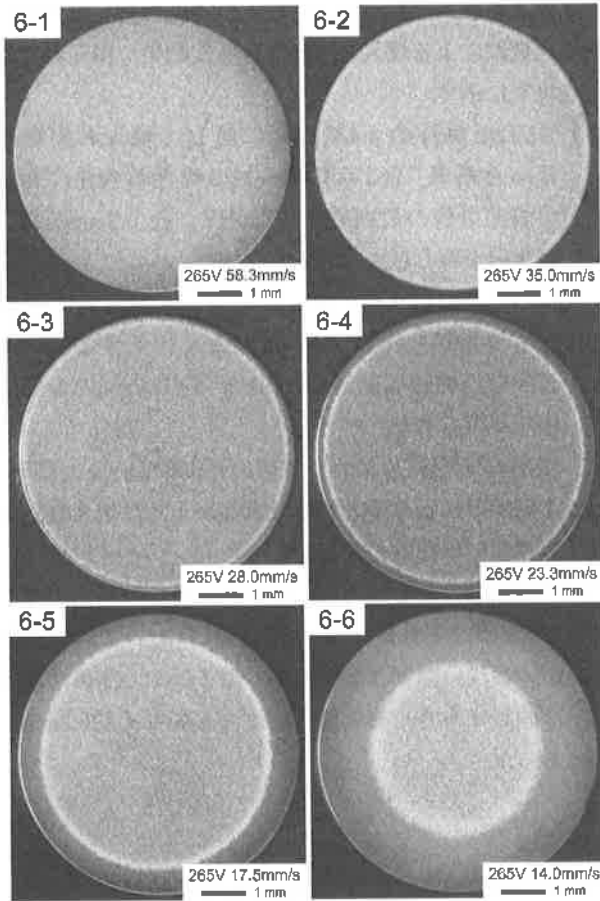


図5 φ6試験片の各条件における断面観察結果

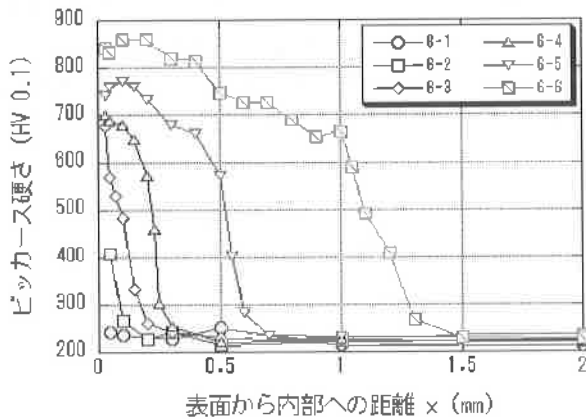


図6 φ6試験片の表面から内部への硬さ分布

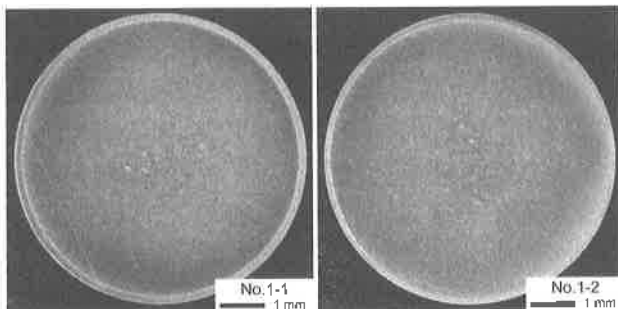


図7 冷却水量の違いによる硬化層形成状況
(写真左, 冷却水量: 小, 写真右, 冷却水量: 大)

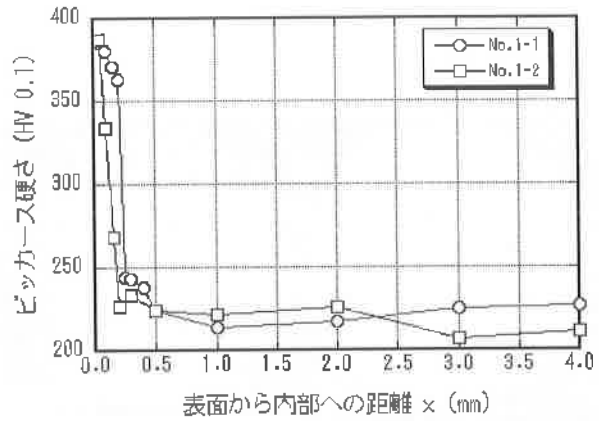


図8 No.1-1, No.1-2 試験片の表面から内部への硬さ分布

付与できる可能性があると思われる。また、冷却方法などを改良することにより、さらに高硬度かつ浅い硬化層深さが得られる可能性があるものと思われる。

3-2 SUS440C試験片

1) 冷却水量の違いによる硬化層形成状況

図7にNo.1-1 およびNo.1-2 試験片の断面観察結果を示す。

断面観察結果から測定した熱影響層はNo.1-1 試験片が0.2mm, No.1-2 試験片が0.1mmであり、冷却水量が大きなNo.1-2 試験片の熱影響層が浅い結果となった。しかし、図8に示した表面から内部への硬さ分布ではどちらの試験片においても表面近傍の最高硬さは約400HVであり、深さも約0.3mmとほぼ同じ結果であった。

この結果より、1回の加熱では表面が十分に焼入れ温度に達していないことが分かった。また、熱影響層深さに若干の差異が生じたものの、冷却水量の違いによる影響はほとんど確認することが出来なかった。

2) 予熱後の再加熱開始温度の違いによる硬化層形成状況

図9にNo.2-1, No.2-2 およびNo.2-3 の断面観察結果を示す。

2回目の加熱開始温度が低くなるにつれ、熱影響層が浅くなっていくことが判明した。断面写真から求めたそれぞれの熱影響層深さはNo.2-1 試験片が2.2mm, No.2-2 試験片が1.8mm, No.2-3 試験片が1.1mmであり、No.2-3 試験片が一番浅い結果となった。

図10に表面から内部への硬さ分布を示す。それぞれの試験片において表面近傍の最高硬さは約500~550HV程度であった。JISによれば、SUS440Cの炭素含有量は0.95~1.20%であるため、有効硬化層の限界硬さは前述のSUJ2試験片と同様に500HVであり、それぞれの試験片の有効硬化層深さはおよそ0.2mmである。

2回加熱の試験片において1回加熱の試験片よりも硬さは上昇していることから表面温度は高くなったと考え

られるが、1回加熱と同様に表面付近は十分な焼入れ温度に達していないと考えられる。

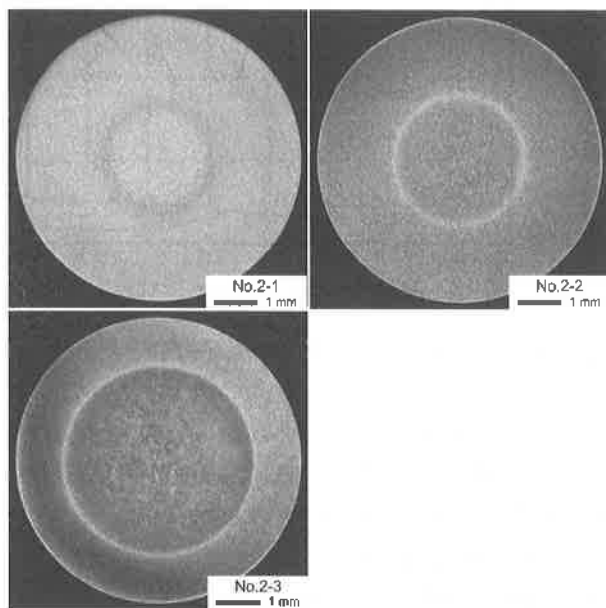


図9 再加熱開始温度の違いによる硬化層形成状況

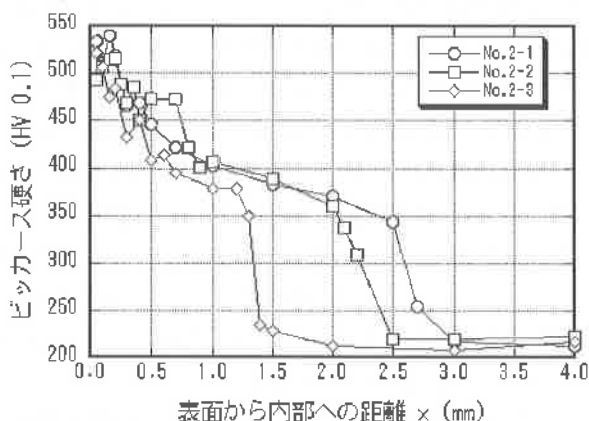


図10 SUS440C試験片の表面から内部への硬さ分布

現在、主にSUS440Cの焼入れは真空炉を用いて行っている。この手法によれば焼入れ後の硬さは700HV以上が得られるものの、ずぶ焼入れであるため、今回焼入れに用いたような直径の小さい部材に対して精密な熱処理を行う際は変形・ひずみが生じてくる。その点、2回加熱のため伝熱により硬化層が深くなってしまったものの、2回目の加熱開始温度を調整することにより、硬化層深さが変化することや硬さ分布に傾斜を持つことが判明したことから、加熱コイルの形状および効率、冷却方法などをさらに工夫することにより、精密な熱処理を行うことが可能であると思われる。

5. 結 言

これまでに報告してきた機械構造用炭素鋼 (S45C)

の成果をもとに、SUJ2およびSUS440Cに対し試作した熱処理装置による焼入れ実験を行った結果、得られた結果を以下に示す。

- 1) SUJ2試験片のφ4試験片に対して焼入れ実験を行った結果、265V-35.0mm/sの焼入れ条件において表面近傍の最高硬さ約700HV、約0.3mmの有効硬化層が得られた。
- 2) SUJ2試験片のφ6試験片に対して焼入れ実験を行った結果、265V-28.0mm/s焼入れ条件において表面近傍の最高硬さ約700HV、約0.07mmの有効硬化層が得られた。
- 3) SUS440C試験片に対して焼入れ実験を行った結果、1回加熱による焼入れでは表面が十分に焼入れ温度に達していないことが分かった。
- 4) 2回加熱による焼入れでは、2回目加熱開始温度が250℃の焼入れ条件による試験片において熱影響層が一番浅い結果となったが、硬さはその他条件とほぼ同じであり、有効硬化層深さも同じく約0.2mmであった。

参考文献

- 1) 不二越熱処理研究所：新・知りたい熱処理，ジャパソマシニスト社，p.214
- 2) 八代浩二，鈴木大介，清水誠司，佐野正明，米山陽，杉田良雄，齋藤基樹，久保田勝彦：山梨県工業技術センター研究報告，No.19，p.11-15 (2005)
- 3) 八代浩二，鈴木大介，清水誠司，佐野正明，米山陽，杉田良雄，齋藤基樹，久保田勝彦：山梨県工業技術センター研究報告，No.20，p.9-13 (2006)