

# 論文 ステンレススラグのコンクリート用細骨材としての有効利用に関する研究

岡 祐太郎\*<sup>1</sup>・高海 克彦\*<sup>2</sup>・浦木 大資\*<sup>3</sup>・松尾 栄治\*<sup>4</sup>

**要旨**：ステンレススラグをコンクリート細骨材として利用するために、ステンレススラグの物性、当該コンクリート細骨材置換率の影響、ステンレススラグ粉体混入の影響、およびその長期性状を実験的に確かめた。その結果、対象としたステンレススラグは、物性的に他のコンクリート細骨材と大差なく、これを用いたコンクリートは、従来のコンクリートと同等の性能を有することを明らかにした。

**キーワード**：ステンレススラグ、骨材物性、細骨材置換コンクリート、強度、長期性状

## 1. はじめに

近年、良質な天然骨材の枯渇や環境保全による資源採取の規制等から、コンクリート用細骨材として砕砂を使用するケースが増加している。その上、地域的・資源的制約から実務においては、それらの品質の優れているものだけを使用できる状態には無いのが現状である。

一方、循環型社会の構築を目的とした一般及び産業廃棄物の有効利用の観点から、それらをスラグ化しコンクリート用骨材として利用する努力が続けられてきた。その結果、多くのデータの積み重ねにより、高炉スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材、銅スラグなどは JIS 化され体系的に整えられている。また、ゴミ熔融スラグは、JIS 化されているものの、適用範囲に制限がかけられているものもある。

本研究も産業廃棄物をコンクリート用骨材に用いようとするものの一環であるが、これまでのところ、ステンレススラグを骨材としたコンクリートの特性把握や長期性能に関する研究は、十分ではないのが現状である。

本研究ではステンレススラグをコンクリート用細骨材として利用することを想定し、その材料物性およびこれを用いたコンクリートの基礎特性を把握することを目的としている。

## 2. 実験項目及び概要

### 2.1 ステンレススラグの物性試験

#### (1) 対象としたステンレススラグ

本研究で対象とするステンレススラグは、N 社の製鋼所で排出されるステンレススラグ(以下:NSS)である。

NSS はステンレス鋼と同時に電気炉内で副産されるスラ

グであり、有効利用のために水洗により分級されたものである。写真-1 に NSS を示す。目視では角張った形状をしている。

NSS をコンクリート用細骨材として使用するために、その基礎物性の把握を行った。



写真-1 NSS

#### (2) 試験項目および方法

細骨材の試験項目と準拠方法は以下の通りである。

- ・含有成分分析
- ・重金属溶出試験 (JIS K0120 等)
- ・密度および吸水率試験 (JIS A 1109)
- ・ふるい分け試験 (JIS A 1102)
- ・微粒分量試験 (JIS A 1103)
- ・粒形判定実積率試験 (JIS A 1104)

### 2.2 コンクリート使用材料

本研究で使用した材料を表-1 に示す。骨材の密度は表面乾燥飽水状態のものである。

\*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (学生会員)

\*2 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻准教授 (正会員)

\*3 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻

\*4 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科准教授 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	硬質砂岩砕砂	密度：2.65g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：1.85% 粗粒率：2.96，粒形判定実積率：56.0%
	石灰砕砂	密度：2.65g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：1.46% 粗粒率：2.83，粒形判定実積率：58.6%
	ステンレススラグ	密度：3.08g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：1.53% 粗粒率：2.96，粒形判定実積率：55.9%
粗骨材	硬質砂岩砕石1505	密度：2.73g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：0.63% 最大寸法：15mm
	硬質砂岩砕石2010	密度：2.72g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：0.52% 最大寸法：20mm
混和剤	高性能AE減水剤	主成分：リグニンスルホン酸，オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物
	AE剤	主成分：樹脂酸塩

### 2.3 細骨材置換率の影響

配合条件はスランブ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%とした。W/C=50%，単位水量は 170kg/m<sup>3</sup>に統一した。NSS 置換率は細骨材全体の体積比 0%，30%，60%の3配合とした。表-2 に配合表を示す。表-2 中の砕石 1，砕石 2 はそれぞれ砕石 1505，砕石 2010 を表し，Ad は高性能 AE 減水剤，AE は AE 剤を表す。また，AE の単位(A)はセメント量×0.002%を表す。

表-2 配合表（置換率変化）

NSS 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
	水	セメント	砕砂	石灰砕砂	NSS	砕石1	砕石2	Ad (%)	AE (A)
0	170	340	563	243	0	407	610	0.6	4.0
30	170	340	394	170	282	407	610	0.6	3.5
60	170	340	225	97	563	407	610	0.6	3.0

表-2 の配合でコンクリート用二軸ミキサーを用いて練り，スランブ試験，空気量試験および強度試験をそれぞれ JIS A 1101，JIS A 1128 および JIS A 1108 に準じて行った。強度試験における材齢は材齢 28 日で，試験までは水中養生とした。

### 2.4 NSS 粉体の影響

本研究では化学成分や品質が NSS と同じである NSS 粉体を使用した。この粉体は水洗分級されたものをさらにローラーミルで粉碎したものであり，比表面積 5646cm<sup>2</sup>/g，平均粒径 7.38μm であった。2.3 で使用した配合のうち，NSS 置換率 30%の配合のコンクリートを対象に，NSS 砂体に対して NSS 粉体を 0%，6%，9%，12% 質量置換した配合について検討した。表-3 に配合表を示す。基準となる NSS 粉体置換率 0%の配合において配合条件をスランブ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%とした。

表-3 配合表（粉体混入）

粉体置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									
	水	セメント	砕砂	石灰砕砂	NSS		砕石1	砕石2	Ad (%)	AE (A)
					砂体	粉体				
0	170	340	394	170	282	0	407	610	0.6	3.5
6	170	340	394	170	265	17	407	610	0.6	3.5
9	170	340	394	170	256	25	407	610	0.6	3.5
12	170	340	394	170	248	34	407	610	0.6	3.5

表-3 の配合でコンクリート用二軸ミキサーを用いて練り，スランブ試験，空気量試験，ブリーディング試験，及び強度試験を JIS A 1101，JIS A 1128，JIS A 1123，JIS A 1108 及び JIS A 1113 に準じて行った。

### 2.5 長期性状

長期性状の確認を行うため，乾燥収縮，中性化抵抗性の確認を行った。配合条件はスランブ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%とした。W/C=45%，単位水量についても 170kg/m<sup>3</sup>に統一した。NSS 置換率は 0%，60%，100%とした。表-4 に配合表を示す。

表-4 配合表（長期性状）

NSS 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
	水	セメント	砕砂	石灰砕砂	NSS	砕石1	砕石2	Ad (%)	AE (A)
0	170	378	552	239	0	399	601	0.8	4.0
60	170	378	222	96	551	399	601	0.8	2.0
100	170	378	0	0	921	399	601	0.8	0.75

#### (1) 促進中性化試験

NSS を細骨材に置換することによる中性化抵抗性への影響を実験的に明らかにするため促進中性化試験を行った。試験方法は JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に準じて行った。

#### (2) 乾燥収縮試験

NSS を細骨材に置換することによる乾燥収縮量変化を実験的に明らかにするためコンクリートの長さ変化試験を行った。試験方法は JIS A 1129 に準じて行い，材齢 1 日で脱型後，材齢 7 日まで水中養生を行い，その後乾燥を開始した。乾燥は室温 20℃，湿度 60%の恒温恒湿室にて行い，所定の日数で長さ変化と質量を測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 NSS の物性試験結果

図-1 に複数ロットでの NSS の含有成分分析結果を，表-5 に重金属溶出試験の結果を示す。表-5 中の N.D は未検出を表す。

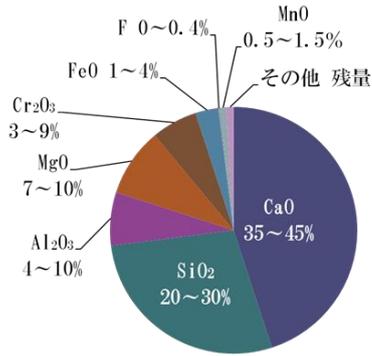


図-1 NSS 含有成分

表-5 重金属溶出試験結果

分析対象	単位	NSS	基準値	定量下限
カドミウム	mg/L	N.D	150以下	15
六価クロム	mg/L	N.D	250以下	25
シアン	mg/L	N.D	50以下	5
水銀	mg/L	N.D	15以下	1
セレン	mg/L	N.D	150以下	15
鉛	mg/L	N.D	150以下	15
砒素	mg/L	N.D	150以下	15
フッ素	mg/L	2100	4000以下	400

成分構成には若干のばらつきがあるものの、NSSを形成する主成分は酸化カルシウム(CaO)、シリカ(SiO<sub>2</sub>)である。また、重金属溶出試験の結果ではすべての項目について基準値を満たしているためNSSをコンクリート用細骨材として使用してよいといえる。

図-2にNSSのふるい分け試験を、表-6にNSSの物性試験の結果を示す。

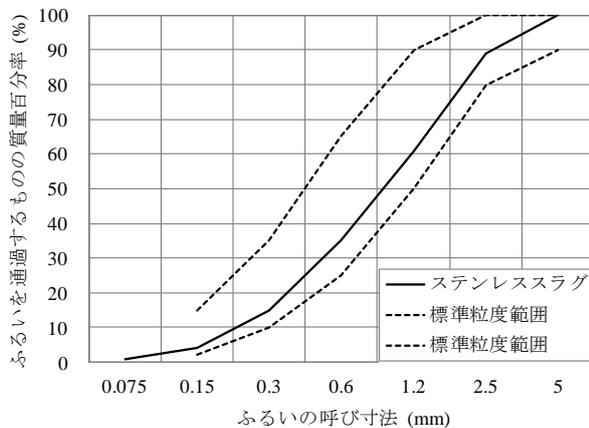


図-2 ふるい分け試験結果

表-6 NSSの物性

細骨材の種類	NSS	砕砂	石灰砕砂
絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.04	2.6	2.61
吸水率 (%)	1.53	1.85	1.46
粗粒率	2.96	2.96	2.83
微粒分量 (%)	2.0	7.5	6.4
粒形判定実積率 (%)	55.9	56.0	58.6

NSSの粒度分布は標準粒度範囲内であり、下限範囲寄りの分布であった。NSSの絶乾密度は3.04g/cm<sup>3</sup>となり、砕砂や石灰砕砂に比べ絶乾密度が大きい。吸水率については1.53%と他の骨材と同程度であることがわかる。粗粒率については砕砂と同等である。NSSの粒形判定実積率は55.9%と砕砂同様低く、粒形が扁平で角張っていることがわかる。NSSの微粒分量は2.0%と他の骨材に比べ少ない。

### 3.2 置換率の影響

#### (1) フレッシュ性状

図-3に置換率変化による各配合のフレッシュ性状を示す。NSS置換率増加により、コンクリートのスランブは低下し、空気量は増加する傾向にある。空気量に関して、配合では、置換率増加に対してAE剤を低減させているので、これはエントラップトエアの増加によるものと考えられる。他種のスラグの使用により空気量が増加するとの報告中<sup>1)</sup>、増加原因として粒子の形状や粒子の電気化学的性質の影響があげられており、本件でもこれらの要因が推察される。

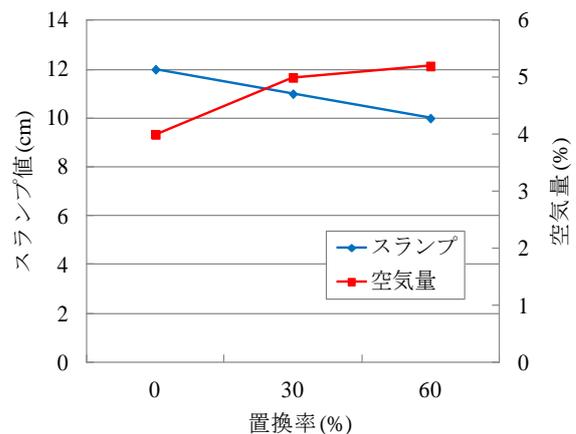


図-3 フレッシュ性状

#### (2) 強度試験

図-4に強度試験結果のグラフを示す。

NSS置換率増加に伴い強度が低下していることがわかる。

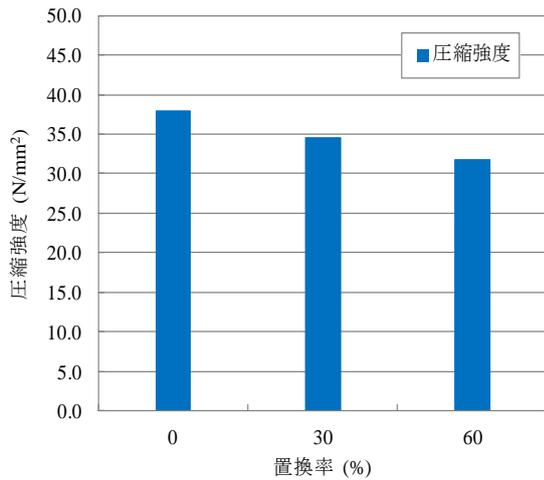


図-4 強度試験結果グラフ

### 3.3 NSS 粉体の影響

#### (1) フレッシュ性状

NSS 粉体の置換率を変えた各配合のフレッシュ性状を図-5 に示す。ブリーディング率と経過時間を図-6 に示す。

NSS 粉体置換率を 9%以上にするとスランプが低下する傾向にあることがわかる。

NSS 粉体置換率 6%では、ブリーディング率の発生傾向は NSS 置換率 0%の配合と同程度であるが、NSS 置換率 9%以上ではブリーディングが抑制され、ブリーディング速度も緩やかである。この要因として、粒子径の小さな微粉末が混入されたことで、ブリーディング水の移動経路が長くなること、セメントと比較して密度の小さいステンレスラグ粉体の沈降速度が遅くなり、ブリーディングの発生速度が遅くなることが考えられる<sup>2)</sup>。また NSS 粉体置換することによるブリーディング終了時間への影響はなかった。

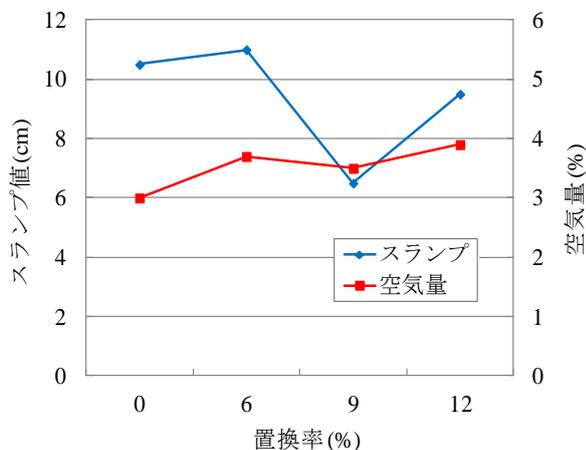


図-5 フレッシュ性状

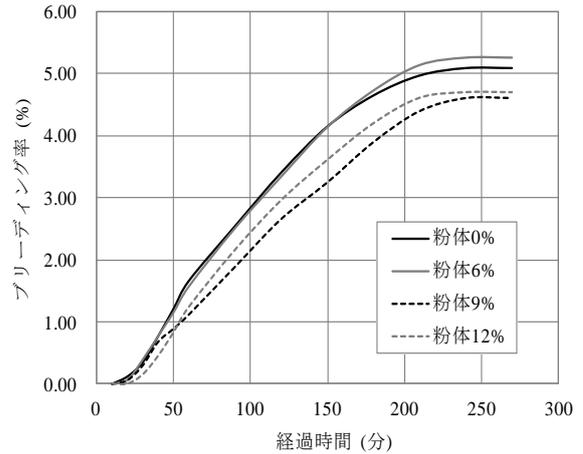


図-6 ブリーディング率と経過時間

#### (2) 強度試験

図-7 に NSS 粉体の置換率を変えた各配合の強度試験結果を示す。強度試験結果から NSS 粉体を置換することによる圧縮強度及び引張強度への影響について明確な差はなかった。

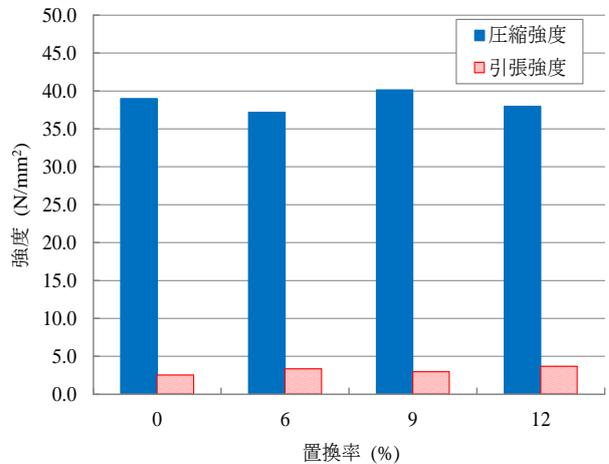


図-7 強度試験結果

### 3.4 長期的性状

#### (1) 強度試験結果

図-8 に強度試験結果を示す。

強度試験結果から、W/C を低くした場合、材齢 14 日、28 日では NSS 置換率 60%の配合のものが最も高い強度を示した。しかし、材齢 84 日の長期強度では NSS 置換を行っていない配合が最も高い結果となった。

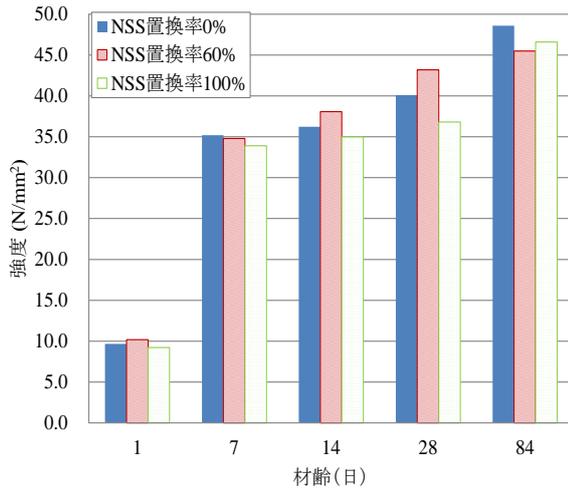


図-8 強度試験結果

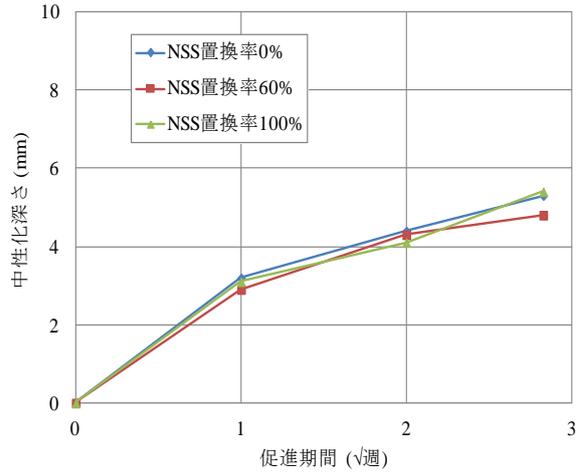


図-9 促進期間と中性化深さ

### (2) 促進中性化試験

促進中性化試験状況を写真-2 に示す。また促進期間と中性化深さの関係を図-9 に示す。

現在促進中性化試験は継続中であり、結果は8週までとなっている。各NSS置換率による明確な差は現在のところない。

本研究範囲ではNSSを細骨材としたコンクリートは強度について普通コンクリートにやや劣るものの中性化抵抗性については同等の性能を有している<sup>3)</sup>。

### (3) 乾燥収縮試験

図-10 に収縮ひずみの経時変化を示す。NSSを使用した配合について普通コンクリートに比べ収縮量が小さくなり、収縮に対する抵抗性があることが確認された。ただし、置換率60%と置換率100%には明確な差がなく、混入量に比例して収縮量が減少するわけではない。ひずみ挙動としては乾燥日数90日程度で緩やかになっている。図-11 に逸散水量と経時変化を示す。NSSを使用した配合では逸散水量が少ないことが確認できる。NSS使用による逸散水量が、乾燥収縮量に影響を与えていると推察される。

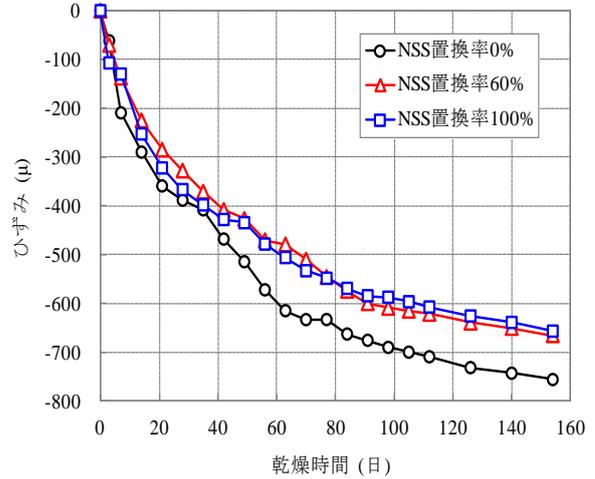


図-10 収縮ひずみの経時変化



写真-2 促進中性化試験状況

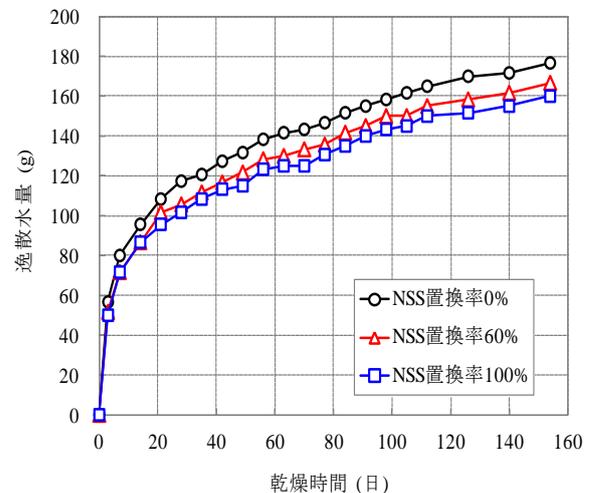


図-11 逸散水量の経時変化

#### 4. まとめ

以上、NSS をコンクリート細骨材に使用する実験的研究から、次のことが明らかになった。

- (1) NSS 置換率増加により、コンクリートのスランプは低下し、空気量は増加する傾向を示した。空気量に関して、配合では置換率増加に対して AE 剤を低減させているので、これはエントラップトエアの増加によるものと考えられる。
- (2) NSS 粉体を混入し、NSS の微粒分量を調整することでブリーディングを抑制することが可能である。
- (3) W/C が低い場合、短期強度においてはNSS置換率60%配合のものが最も高い強度を示したが、長期ではNSS置換を行っていない配合のものが最も高い強度を示した。
- (4) 8 週までの試験結果では NSS を細骨材としたコンクリートは普通コンクリートと同等の中性化抵抗性をもつことが確認された。
- (5) NSS を使用した配合は普通コンクリートに比べ乾燥収縮量が小さくなり、収縮に対する抵抗性があることが確認された。しかし、置換率 60%と 100%の間には明確な差がなく、収縮量は混入量に比例して減少するわけではない。

#### 5. 参考文献

- 1) 佐川康貴, 川端雄一郎, 松下博通, 三宅淳一, 開進一: 都市ごみ熔融スラグのコンクリート用細骨材としての適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.171-180, 2005.11
- 2) 鶴田昌宏, 小島明, 中村秀三: 細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性
- 3) 盛岡実, 樋口隆行: 非水硬性製鋼スラグの中性化抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003