

# 論文 ホタテ貝殻を細骨材として活用したコンクリートの耐久性および実証試験

山内 匡<sup>\*1</sup>・清宮 理<sup>\*2</sup>・高橋 久雄<sup>\*3</sup>・山路 徹<sup>\*4</sup>

**要旨:** ホタテ全体の約 50%を占めている貝殻の恒常的な大量リサイクル方法の確立を目指し、回転式破砕機によって細粉砕したホタテ貝殻を、細骨材としてコンクリートに活用する研究を進めている。海中暴露および気中暴露を行っている、こうしたコンクリートの材齢 1 年における圧縮強度や塩分浸透性等の耐久性は、普通コンクリートと同程度であることを確認した。また、鉄筋コンクリートへの適用性確認のため、実証試験としてケーソン本体を模擬した供試体を製作した。その結果、施工性や打継ぎ性状、また、鉄筋部への充填状況等は普通コンクリートと同等であることを確認した。

**キーワード:** ホタテ貝殻, 細骨材, 回転式破砕機, リサイクル

## 1. はじめに

筆者らは、ホタテ貝殻の恒常的な大量リサイクル方法としての確立を目指し、破砕したホタテ貝殻（以下、シェルサンド）を細骨材として活用したコンクリート（以下、シェルコンクリート）の研究を行っている。

ホタテ貝殻の破砕には、コンクリート用細骨材として適用可能な大きさまで細粉砕することが可能な回転式破砕機（図-1）を用いた。これまでに、室内試験によるシェルコンクリートの基本的性質や、実機プラントで製造・運搬し、青森県八戸港内において実規模（L5.0×B2.5×H1.4m, 16m<sup>3</sup>/個）のケーソン根固ブロックを製作・沈設した実証試験によるシェルコンクリートの実用性についての検討を行い、その結果については先に報告した<sup>1)2)</sup>。

本稿では、海中暴露および気中暴露を行ったシェルコンクリートの各種耐久性等の確認試験や、また、鉄筋コンクリートへの適用を目指して実施した実証試験の結果を報告する。

## 2. 耐久性の確認試験

ケーソン根固ブロックを製作した実証試験において、シェルサンドを細骨材の 25%, 50%（容積比）に置換したシェルコンクリートと普通コンクリートの計 3 種類について、海中および気中暴露を開始している。シェルコンクリートの耐久性を確認するため、材齢 1 年における、これらの圧縮強度や塩分浸透性に関する試験を行った。

また、ホタテ貝殻の生産量の多い地域は北海道や青森県等の寒冷地であるため、シェルコンクリートに対して、特に要求される耐凍結融解抵抗性についての評価は、JIS

A 1148（A 法）による凍結融解試験によって行った。

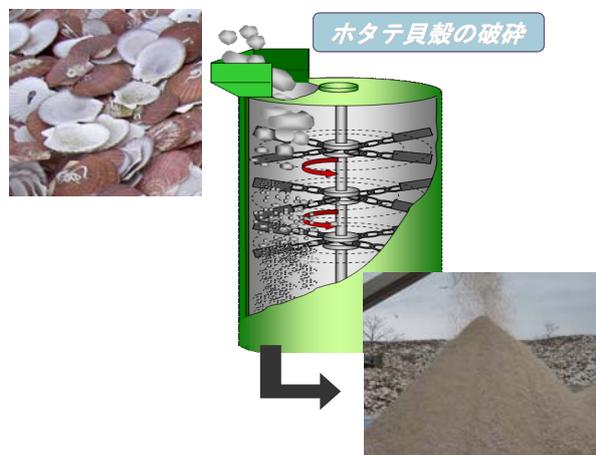


図-1 回転式破砕機

## 2.1 使用材料およびコンクリート配合

シェルサンドの物性と粒度分布を、表-1 と図-2 に示す。表中には JIS A 5308 による規定値を、図中には細骨材（置換率 0%）およびシェルサンドで置換した細骨材全体（置換率 25%, 50%）の粒度分布、また、コンクリート用砕砂（JIS A 5005）の粒度標準範囲を実線で示す。

表-1 シェルサンド（SS）の物性（耐久性確認試験）

試験項目	物性値	規定値	試験方法
表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.63	—	JIS A 1109
吸水率 (%)	1.02	3.0 以下	
微粒分量 (%)	8.5	7.0 以下	JIS A 1103
有機不純物	淡い	淡い	JIS A 1105
NaCl 含有量 (%)	0.003	0.04 以下	JASS 5T 202

\*1 日本国土開発（株） 技術事業センター コンクリート研究室 主任研究員（正会員）

\*2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 工博（正会員）

\*3 国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 技術開発課長

\*4 独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究室 主任研究官（正会員）

表-2 コンクリート配合（耐久性確認試験）

記号	水セメント比 W/C (%)	シェルサンド 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							C× (%)	
			W	C	SS	S①	S②	G①	G②	Ad	AE 剤*
SS0	65	0	149	229	0	534	292	623	553	1.00	2.00A
SS25		25	160	246	195	584	0	623	553	1.00	1.50A
SS50		50	172	265	367	366	0	623	553	1.00	0.80A

\*1A=0.003%

NaCl 含有量は規定値 0.04%以下を十分に満足する値であった。この要因としては、本試験で使用した貝殻は加工用にボイルされたものであり、また、加工後は屋外に長期間集積されていたため、この間に雨水等によって洗われていたことが考えられる。

セメントは普通ポルトランドセメント (C : 密度 3.16g/m<sup>3</sup>) および高炉セメント B 種 (C : 密度 3.04g/m<sup>3</sup>) を、細骨材は山砂 (S① : 表乾密度 2.62g/m<sup>3</sup>, 粗粒率 2.40) と砕砂 (S② : 表乾密度 2.66g/m<sup>3</sup>, 粗粒率 3.00) を、粗骨材は 2505 碎石 (G① : 表乾密度 2.70g/m<sup>3</sup>, 実積率 63.0%) と 4020 碎石 (G② : 表乾密度 2.93g/m<sup>3</sup>, 実積率 59.5%) を使用した。なお、普通コンクリートの場合には山砂と砕砂の混合比は 65:35 であるが、シェルコンクリートの場合には山砂のみを使用した。

普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。配合条件は、水セメント比 65%、粗骨材最大寸法 40mm、設計基準強度 ( $\sigma_{28}$ ) 18N/mm<sup>2</sup> とし、シェルコンクリートの配合は、スランブ 8±2.5 cm、空気量 4.5%±1.5% が得られるように、単位水量および AE 剤を用いて調整した。スランブ試験は JIS A 1101、空気量試験は JIS A 1128 に準拠して行った。なお、高炉セメント B 種を使用した配合については、AE 剤の添加量以外は普通ポルトランドセメントの場合と同じである。

2.2 海中暴露および気中暴露の試験結果

(1) 標準供試体による圧縮強度

試験室で作製した標準供試体 ( $\phi 125 \times 250$ mm) を材齢 28 日まで標準養生 (20℃水中) を行った後、神奈川県横須賀市にある自然海水を貯留した水槽中において浸漬させた (海中暴露)。材齢 1 年における圧縮強度の試験結果を表-3 に示す。同表には、標準養生を行った材齢 7、28 日と材齢 1 年の圧縮強度試験結果も示す。

セメントの種類に関わらず、普通コンクリート (SS0) と同様に、シェルコンクリート (SS25, SS50) の材齢 1 年における圧縮強度の低下はなく、また、標準養生と海中暴露での環境条件の違いによる差もみられなかった。

(2) コア供試体による圧縮強度

青森県八戸港内において製作し、平成 18 年 8 月から海中暴露および気中暴露 (根固ブロックの製作ヤード) を行っているそれぞれのケーソン根固ブロックから、材

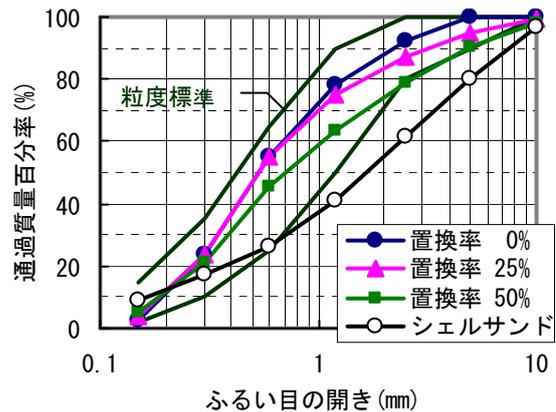


図-2 粒度分布 (耐久性確認試験)

表-3 圧縮強度試験結果 (標準供試体)

セメントの種類	記号	環境条件	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
			$\sigma_{7日}$	$\sigma_{28日}$	$\sigma_{1年}$
N	SS0	標準養生	21.5	29.3	35.5
		海中暴露	—	—	36.3
	SS25	標準養生	20.9	26.9	34.4
		海中暴露	—	—	35.1
	SS50	標準養生	21.9	28.2	36.7
		海中暴露	—	—	35.6
BB	SS0	標準養生	14.6	24.6	35.4
		海中暴露	—	—	35.8
	SS25	標準養生	14.4	24.4	36.8
		海中暴露	—	—	34.4
	SS50	標準養生	14.9	25.3	35.7
		海中暴露	—	—	35.1

齢 1 年において、JIS A 1107 に準拠してコアを採取した (写真-1)。

コア供試体は、深さ方向 90cm 程度まで採取したコアを 3 分割して圧縮強度試験用 ( $\phi 125 \times 250$ mm) に成形したものである。暴露開始前の材齢 28 日と材齢 1 年のコア供試体による圧縮強度の試験結果を図-3 に示す。なお、ケーソン根固ブロックの製作では、普通ポルトランドセメントを使用した。



写真-1 根固ブロックからのコア採取状況

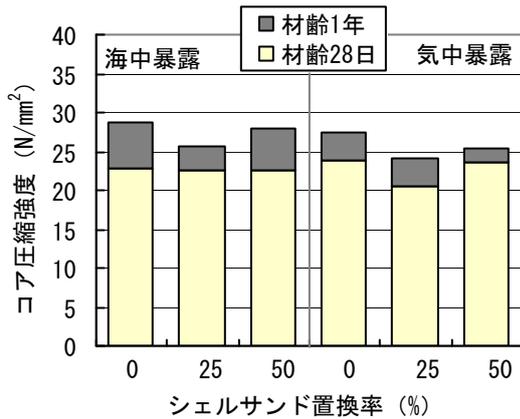


図-3 圧縮強度試験結果 (コア供試体)

普通コンクリート (SS0) と同様に、海中暴露および気中暴露ともに、シエルコンクリート (SS25, SS50) の材齢1年における圧縮強度の低下はみられなく、材齢28日からの強度の伸びも同程度であった。なお、標準供試体 (表-3) との圧縮強度の差は、横須賀市と八戸市での気温の違いによる影響が大きいと考えられる。

### (3) 塩分浸透性

打込み側の1面のみを残し、他面をエポキシ樹脂塗料で被覆して作製した供試体 (JSCE-G 572 に準拠) を用いて、材齢28日まで標準養生 (20℃水中) を行った後、神奈川県横須賀市にある自然海水を貯留した水槽中において浸漬させた (海中暴露)。それぞれのセメントについて、材齢1年におけるコンクリート表面からの深さと全塩化物イオン量の関係を図-4, 5に示す。

普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの場合には、いずれもほとんど変わらない塩化物イオン量分布を示した。一方、高炉セメントB種を使用したコンクリートの場合、普通コンクリート (SS0) に比べて、シエルコンクリート (SS25, SS50) の方が、明らかにコンクリート内部への浸透量は小さい傾向がみられた。シエルコンクリートの緻密化が生じている可能性が期待されるが、更なる詳細な検討が必要であると考えられる。

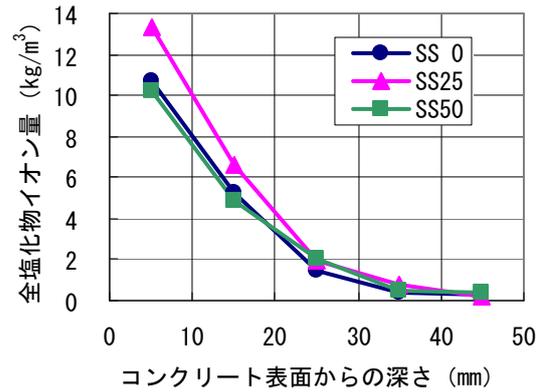


図-4 コンクリート表面からの深さと全塩化物イオン量の関係 (N)

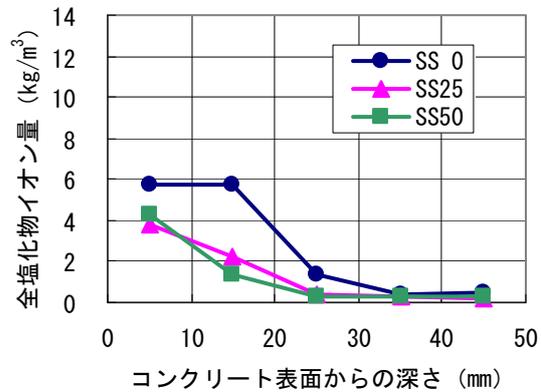


図-5 コンクリート表面からの深さと全塩化物イオン量の関係 (BB)

### 2.3 耐凍結融解抵抗性

凍結融解試験によるサイクル数と相対動弾性係数の関係を図-6に示す。

相対動弾性係数は、凍結融解に対する抵抗性を確保するうえで必要とされている60%以上をいずれも満足している。シエルコンクリート (SS25, SS50) の耐凍結融解抵抗性は、普通コンクリート (SS0) と同程度であることが確認された。

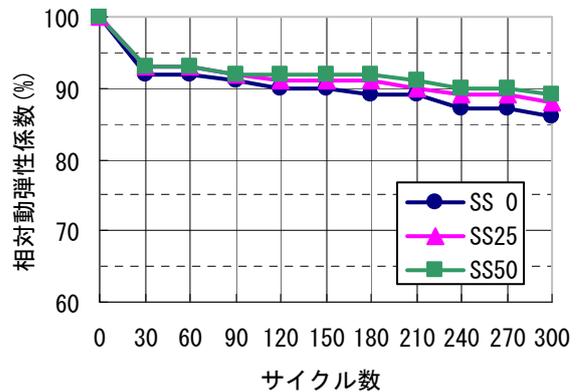


図-6 サイクル数と相対動弾性係数の関係

### 3. 鉄筋コンクリートへの適用に向けた実証試験

実証試験では、ケーソン本体の形状の一部や配筋等を模擬した供試体（図-7）を、実機プラントで製造・運搬したシェルコンクリートによって打込み、その施工性や打継ぎ性状、また、鉄筋部への充填状況等を確認した。

打継目は底版から 0.9m 上りの側壁部とし、側壁の配筋は主筋を D13@100、配力筋を D13@200 および D13@100 とした。供試体はシェルサンドを細骨材の 25%、50%（容積比）に置換したシェルコンクリートと普通コンクリートの計 3 種類製作した。

#### 3.1 使用材料およびコンクリート配合

本実証試験で使用したシェルサンドの物性と粒度分布を、表-4 と図-8 に示す。表中には JIS A 5308 による規定値を、図中には細骨材（置換率 0%）およびシェルサンドで置換した細骨材全体（置換率 25%、50%）の粒度分布、また、コンクリート用砕砂（JIS A 5005）の粒度標準範囲を実線で示す。耐久性確認試験で使用したシェルサンドに比べ、粒度は細かく微粒分量の多い材料であった。

セメントは高炉セメント B 種(C：密度 3.04g/m<sup>3</sup>)を、細骨材は砕砂(S①：表乾密度 2.68g/m<sup>3</sup>、粗粒率 3.60)と陸砂(S②：表乾密度 2.72g/m<sup>3</sup>、粗粒率 2.10)を、粗骨材は 2505 碎石(G：表乾密度 2.70g/m<sup>3</sup>、実積率 62.1%)を使用した。なお、普通コンクリートの場合には砕砂と陸砂の混合比は 30:70 であるが、シェルコンクリートの場合には陸砂のみを使用した。

コンクリートの配合を表-5 に示す。配合条件は、水セメント比 50%、粗骨材最大寸法 25mm、設計基準強度 ( $\sigma_{28}$ ) 30N/mm<sup>2</sup> とし、シェルコンクリートの配合は、スランブ 12±2.5 cm、空気量 4.5%±1.5% が得られるように、単位水量および AE 剤を用いて調整した。スランブ試験は JIS A 1101、空気量試験は JIS A 1128 に準拠して行った。

#### 3.2 施工性

プラントからケーソン模擬供試体の製作ヤードまでの、アジテータ車による運搬時間は 10~15 分程度であった。プラントと製作ヤードで行ったスランブと空気量の試験結果を表-6 に、製作ヤードで行ったスランブの試験状況を写真-2 に示す。

シェルコンクリート（SS25、SS50）の運搬によるフレッシュ性状の経時変化は、普通コンクリート（SS0）と同程度であった。

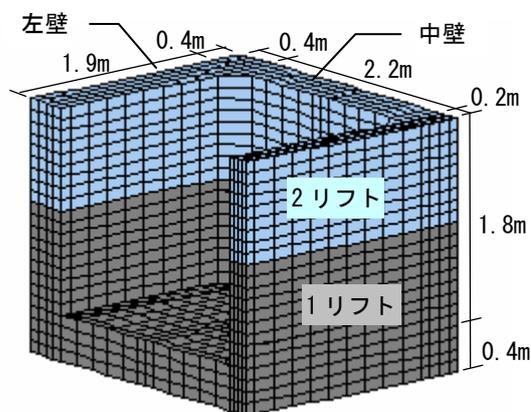


図-7 ケーソン模擬供試体

表-4 シェルサンド（SS）の物性（実証試験）

試験項目	物性値	規定値	試験方法
表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.61	—	JIS A 1109
吸水率(%)	2.12	3.0 以下	
微粒分量(%)	12.0	7.0 以下	JIS A 1103
有機不純物	淡い	淡い	JIS A 1105
NaCl 含有量(%)	0.004	0.04 以下	JASS 5T 202

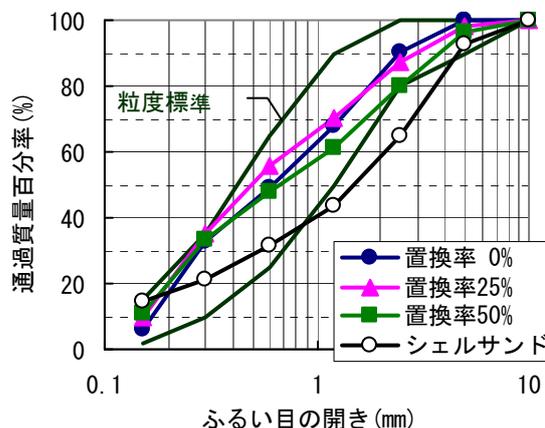


図-8 粒度分布（実証試験）

表-5 コンクリート配合（実証試験）

記号	水セメント比 W/C (%)	シェルサンド 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						C× (%)	
			W	C	SS	S①	S②	G	Ad	AE 剤*
SS 0	50	0	147	294	0	260	607	1056	0.40	1.25A
SS25		25	161	322	200	0	599	1056	0.40	1.50A
SS50		50	173	346	368	0	369	1056	0.40	2.25A

\*1A=0.004%

表-6 スランプおよび空気量の試験結果

記号	試験場所	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)
SS0	プラント	14.0	4.8	—
	製作ヤード	12.5	4.1	25.0
SS25	プラント	15.5	4.1	—
	製作ヤード	13.5	3.9	25.0
SS50	プラント	16.0	4.7	—
	製作ヤード	14.0	4.0	25.0



写真-2 スランプ試験状況

施工は2リフトで行い、いずれのリフトもコンクリートポンプ車のブームによるコンクリートの打込みを行った。圧送時のポンプ圧力は、いずれも同じであり、ポンプの閉塞や材料分離等もみられず、シェルコンクリートのポンプ打設への適用性が確認された。

目視によるワーカビリティおよびブリーディングの評価では、シェルコンクリートと普通コンクリートに大きな違いはみられなく、流動性や鉄筋部への充填状況も良好であった。

なお、表-7 に示す事前に行った室内試験によるブリーディング (JIS A 1123) と凝結時間 (JIS A 1147) の試験結果では、ブリーディングに顕著な違いはみられなかったが、シェルサンド置換率の増加に伴い、凝結時間は遅くなる傾向にあった。

### 3.3 打継ぎ性状

1リフトと2リフトとの打継ぎ間隔は9日間として、打継ぎ部は1リフトのコンクリート打込み翌日にワイヤブラシを用いてレイタンス処理を行った。写真-3 にレイタンス処理後の打継ぎ部を示す。

シェルコンクリートの打継ぎ性状を確認するため、厚さ0.4mの2方向の壁部材(中壁と左壁)中央付近から、打継ぎ面に対して水平方向にそれぞれφ75×400mmのコアを採取(写真-4)し、引張(割裂)強度試験を行った。試験用のコア供試体は寸法をφ75×100mmとし、採取したコアの中央付近から2本成形し計4本とした。打継ぎ部のコア引張強度の試験結果を表-8に示す。同表には参考値として、製作ヤードで採取し、材齢28日

表-7 ブリーディングおよび凝結時間の試験結果

記号	ブリーディング		凝結時間	
	Bq (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	Br (%)	始発時間 (h)	終結時間 (h)
SS0	0.094	2.51	6.5	9.3
SS25	0.089	2.16	7.1	9.6
SS50	0.109	2.34	7.7	10.6

Bq: ブリーディング量, Br: ブリーディング率



写真-3 レイタンス処理後の打継ぎ部

まで標準養生(20°C水中)を行った標準供試体(φ150×200mm)の引張強度の試験結果も示す。

打継ぎ部の引張強度は、いずれも標準供試体の引張強度に比べては低下しているものの、シェルコンクリート(SS25, SS50)の打継ぎ性状は、普通コンクリート(SS0)と同等の品質が確保できることが確認された。

なお、コア採取時の外観調査では、いずれのケーソン模擬供試体にも、隅角部等に大きな不良箇所はみられなかった。ケーソン模擬供試体の全景を写真-5に示す。

表-8 引張(割裂)強度の試験結果

記号	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	
	打継ぎ部のコア供試体	標準供試体
SS0	2.48	3.21
SS25	2.66	3.51
SS50	2.32	3.35



写真-4 コア採取状況

#### 4. まとめ

海中暴露および気中暴露を行っているシェルコンクリートの材齢1年における圧縮強度や塩分浸透性、また、凍結融解試験結果によるシェルコンクリートの耐凍結融解抵抗性は、普通コンクリートと同程度であることが確認された。

鉄筋コンクリートへの適用を目指した実証試験では、シェルコンクリートの施工性や打継ぎ性状、また、鉄筋部への充填状況等は普通コンクリートと同等であることが確認された。

現在も、製作したケーソン根固ブロックや、各種供試体の暴露試験を継続している。今後、長期のデータを測定し、シェルコンクリートの各種耐久性能について把握するとともに、用途の拡大に向け、更なる検討を進めていく予定である。なお、シェルコンクリートの鉄筋コンクリートへの適用に向け、鉄筋コンクリートの構成材料としての評価についても、各種強度の面から検討を進めている。

#### あとがき

本研究は国土交通省東北地方整備局、(独)港湾空港技術研究所、早稲田大学、日本国土開発(株)の共同技術開発として実施しているものである。

ケーソン模擬供試体の製作に関する実証試験にあたっては、事業者である国土交通省東北地方整備局八戸港

湾・空港整備事務所の関係者各位、また、施工者の(株)柏崎組の方々には、多大なるご協力をいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。



写真-5 ケーソン模擬供試体の全景

#### 参考文献

- 1) 山内匡, 清宮理, 横田季彦, 八木展彦: ホタテ貝殻を細骨材として活用したコンクリートの基本的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1649-1654, 2006.7
- 2) 山内匡, 清宮理, 横田季彦, 若崎正光: ホタテ貝殻を細骨材として活用したコンクリートによるケーソン根固めブロックの製作, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.487-492, 2007.7