

高炉スラグの置換率や養生期間がコンクリートの耐久性に与える影響

三井住友建設(株)	正会員	○ 藪	哲義
三井住友建設(株)	正会員	樋口	正典
三井住友建設(株)	正会員	博(工)	佐々木 亘
三井住友建設(株)		梶	貢一

Abstract : As to the concrete using high-early-strength Portland cement (HC), the effects of HC's replacement ratio with ground granulated blast-furnace slag powder (BFSP) and wet curing period on compressive strength and durability were examined. As a result, the followings were obtained. 1) If the replacement ratio is 50% to 70%, decreasing water binder ratio (W/B) up to 35%, equivalent strength can be available comparing to the W/C 40% concrete using HC without BFSP. 2) Strength wet cured 3 days is equivalent to which wet cured 28 days. 3) Replacing HC with BFSP, diffusion coefficient of chloride ions reduced but carbonation coefficient increased. Carbonation should be considered in addition with chloride diffusion to investigate steel corrosion in concrete. 4) As to cold regions, replacement ratio should be investigated considering the possibility of freezing and thawing increment.

Key words : Concrete, Durability, Blast furnace slag, Replacement rate, Wet curing period

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上や二酸化炭素の排出量削減の観点から、セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で置換したコンクリートの利用が検討されている。一方で、PCを対象とする場合には強度発現性を考慮して混和材の置換率は混合セメントB種相当として検討されている例が多い。副産物の有効利用という観点からは、さらに混和材の置換率を高めたコンクリートの適用可能性について検討しておくことも必要と考えられる。本稿では、高炉スラグ微粉末の置換率をより高めたコンクリートについて、置換率や湿潤養生期間が耐久性に及ぼす影響を検討した。また、比較としてフライアッシュで20%置換したコンクリートについても試験を実施した。試験は圧縮強度試験、促進中性化試験、浸せきによる塩分浸透試験、表層透気試験、表面吸水速度試験、凍結融解に伴うスケーリング試験である。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの条件

コンクリートの使用材料を表-1、配合を表-2に示す。各配合については、表-2に記載した記号で呼ぶこととする。基準となるH配合は、PC上部工工事で用いられる設計基準強度40N/mm²のコンクリートを想定し、水セメント比は40%、セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。混和材を置換した配合では、標準水中養生供試体においてH配合と同等の3日強度が得られるように水結合材比を35%に低減し、置換率を高めた配合も同一水結合材比とした。使用した混和材は高炉スラグ微粉末で、基準となるH配合のセメントの一部を置換することで混和材置換率の影響を検討した。高炉スラグの置換率は、副産物の有効利用という観点から、既往の研究¹⁾²⁾や指針(案)³⁾を参考にそれぞれ50%, 60%, 70%, 80%とB種からC種を超えるものとした。また、フライアッシュで置換する配合も比較として実施した。フライアッシュの置換率についてはB種の20%とした。養生の検討は試験材齢まで標準水中養生(以下Wと記載する)にしたものと、3日(以下W3と記載する)、7日(以下W7と記載する)、14日(以下W14と記載する)まで標準水中養生をおこない、その後、試験材齢まで室温20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室で保管した4水準につい

表-1 使用材料

材料		種類, 物性など	記号
水		上水道水	W
結合材	セメント	早強ポルトランドセメント(密度3.13g/cm ³ , 比表面積4610cm ² /g)	C
	高炉スラグ微粉末	密度2.87g/cm ³ , 比表面積6160cm ² /g, 石膏添加あり	BF
	フライアッシュ	JIS II 種灰(密度2.21g/cm ³ , 比表面積3770cm ² /g)	FA
細骨材		砕砂(表乾密度2.70g/cm ³ , 吸水率1.39%)	S
粗骨材		砕石1505(表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率0.82%)	G
混和剤		高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP
		AE剤(変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)	AE
		消泡剤(ポリアルキレングリコール誘導体)	DF

表-2 配合

記号	水結合材比 W/B [%]	モルタル細骨材容積比 s/mor [%]	細骨材率 s/a [%]	空気量 [%]	結合材の比率			単位量 [kg/m ³]					SP [B×%]		
					C	BF	FA	W	B			S		G	
									C	BF	FA				
H	40	48.8	43.0	4.5	1			165	413	413			764	986	0.8
B50	35	44.5	40.8	4.5	0.5	0.5		165	471	235	236		697	986	0.5
B60	35	44.1	40.6	4.5	0.4	0.6		165	471	188	283		691	986	0.5
B70	35	44.0	40.5	4.5	0.3	0.7		165	471	141	330		689	986	0.5
B80	35	43.8	40.4	4.5	0.2	0.8		165	471	94	377		686	986	0.5
F20	35	43.4	40.2	4.5	0.8		0.2	165	471	377		94	680	986	0.8

て検討した。また、練混ぜは20℃の恒温室で100リットル強制二軸ミキサを使用した。高性能AE減水剤の使用量については、配合によって大きな差が生じないように、材料分離を生じない範囲で最低限の調整にとどめた。空気量は4.5±1.5%程度となるようにAE剤と消泡剤により調整した。

2.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、静弾性係数試験は JIS A 1149 に準拠し実施した。各養生における試験材齢を表-3に示す。

表-3 圧縮強度試験材齢

養生条件	試験材齢
標準水中	2, 3, 7, 28, 56, 91日
3日水中以降20℃60%気中	7, 28, 56, 気中養生以降91日
7日水中以降20℃60%気中	28, 56, 気中養生以降91日
14日水中以降20℃60%気中	28, 56, 気中養生以降91日

2.3 耐久性に関する試験

混和材の置換率や養生期間が耐久性に与える影響を確認する目的で、表-4に示す配合と養生の試験を実施した。

表-4 耐久性に関する試験一覧

試験種類	養生	H	B50	B60	B70	B80	F20
促進中性化試験	W3	○	○	○	○	○	○
	W7	○	○	○	○	○	○
	W14	○	○	○	○	○	○
塩水浸せき	W3	○	○	○	○	○	○
	W7	○	○	○	○	○	○
	W14	○	○	○	○	○	○
表面層透気試験	W3	○	○	○	○	○	○
	W7	○	○	○	○	○	○
	W14	○	○	○	○	○	○
表面吸水試験	W3	○	○	○	○	○	○
	W7	○	○	○	○	○	○
	W14	○	○	○	○	○	○
スケーリング試験	W3	○	○	○	○	○	○
	W7	○	○	○	○	○	○
	W14	○	○	○	○	○	○

(1) 促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153 に、測定は JIS A 1152 に準拠して実施した。

(2) 塩水浸せき試験

JSCE-G 572 に準拠し、浸せきした供試体を JIS A 1154 に準じて全塩化物イオンおよび温水抽出による可溶性塩化物イオンについて実施した。

(3) 表層透気・表面吸水試験

φ100×200mmの円柱供試体を用い、Torrent法による表層透気試験⁴⁾およびSWAT法による表面吸水試験⁵⁾を行った。供試体は材齢28日で端部をカットしたうえで側面をアルミテープによりシールした。その後、材齢56日まで20℃60%RHの恒温恒湿

表-5 表層透気試験(トレント法)の計測結果に基づく評価方法⁴⁾

表層透気試験	優	良	一般	劣	極劣
kT(×10 ⁻¹⁶ m ²)	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1	1~10	10~100

表-6 表面吸水試験(SWAT法)の計測結果に基づく評価基準⁵⁾

注水完了から600秒時点での吸水速度	良	一般	劣
P600(ml/m ² /s)	0.25以下	0.25を超えて0.5以下	0.5を超えるもの

室に存置し、透気試験、吸水試験の順に実施した。Torrent法はコンクリート表層を真空状態にし、その後真空ポンプによる吸引を停止し、チャンバー内の気圧が回復するまでの時間から一次元方向の表層コンクリートの透気性を評価する手法である。表層透気係数kT(×10⁻¹⁶m²)が小さいほど表層が緻密であることを意味する。表層透気試験(トレント法)の計測結果に基づく評価方法⁴⁾を表-5に示す。また、SWAT法は、円筒状のシリンダーがついた吸水カップをコンクリート表面に密着させ、吸水カップに水を満たした直後からシリンダー内の水位の変化を時々刻々読み取ることで、表層コンクリートの吸水速度を算出し評価する手法である。計測対象のコンクリートに空隙が多い場合、吸水量が多くなり、水位の低下が大きくなる。表面吸水試験(SWAT法)の計測結果に基づく評価基準⁵⁾を表-6に示す。

(4) スケーリング試験

試験方法は ASTM C 672 に準拠して実施した。試験は、φ150×300mmの供試体の打設面に3%塩化ナトリウム水溶液の水膜を形成し、温度-18±3℃で16~18時間凍結させたのち、20℃で約6~8時間融解させるものであり、これを1サイクル(24時間)とし、50サイクルまで行った。測定は5サイクルごとに水溶液を取り除き、スケーリング量の測定と観察を行った。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

供試体作製時における混和剤の使用量とフレッシュ試験結果を表-7に示す。スランプについては一部の配合を除き15cmから20cmの範囲であった。空気量については4.5±1.5%以内であった。練上がり温度は20℃から23℃の範囲であった。

表-7 混和剤の使用量とフレッシュ試験結果

	SP [B×%]	AE [B×0.001%]	DF [B×0.002%]	SL [cm]	Air [%]	CT [°C]
H	0.80	2.0	1.5	18.5	5.1	20.8
B50	0.50	3.5	1.5	10.5	4.0	22.5
B60	0.50	4.5	1.5	15.5	4.1	22.5
B70	0.50	6.0	-	15.5	4.0	22.1
B80	0.50	6.5	-	17.5	4.0	22.0
F20	0.80	10.5	-	19.5	5.0	22.8

3.2 圧縮強度試験

標準水中養生における圧縮強度試験結果を図-1に、養生の違いによる圧縮強度試験結果を図-2に示す。混和材で置換した配合については、早強ポルトランドセメント単味のH配合と同等の3日強度が得られるように水結合材比を35%に低減しているため、材齢3日程度で50N/mm²程度の圧縮強度が得られている。また、高炉スラグ微粉末置換率50~70%では、湿潤養生を3日間実施することで、材齢28日時点で標準水中養生と同程度の圧縮強度が得られており、強度発現の観点から考えれば3日の湿潤養生期間でよいと考える。その理由としては、早強ポルトランドセメントをベースとし、粉末度が6000cm²/gと比較的大きい高炉スラグ微粉末を使用していることが考えられる。ただし、置換率80%とフライアッシュ置換率20%では、材齢28日で早強ポルトランドセメント単味のH配合と同等の圧縮強度を得るためには材齢28日まで湿潤養生を行う必要が

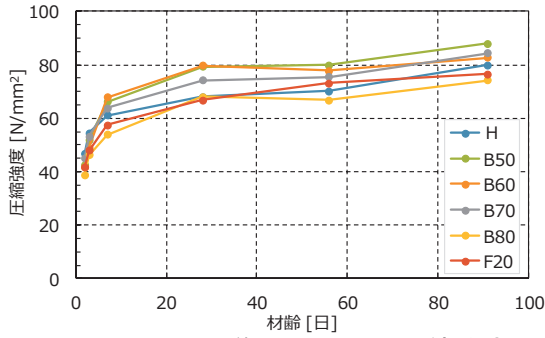


図-1 標準水中養生における圧縮強度

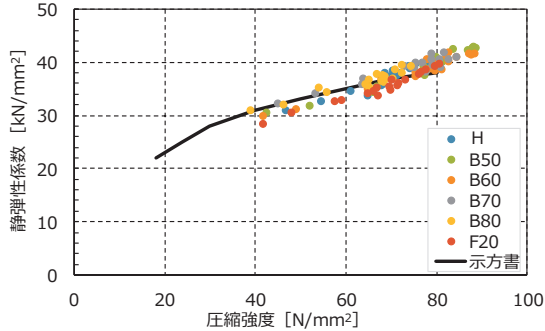


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

あり、養生期間の延長が必要である。圧縮強度と静弾性係数の関係については図-3に示すとおり、混和材の種類や置換率、養生方法が圧縮強度と静弾性係数の関係に与える影響は極めて小さいことが分かる。

3.3 促進中性化試験

促進中性化試験における中性化速度係数を図-4に示す。早強ポルトランドセメント単味のH配合と湿潤養生期間を7日間以上としたF20配合では促進期間26週においても中性化は確認されなかった。高炉スラグ微粉末で置換した配合では、置換率が高く、湿潤養生期間が短いほど中性化速度係数が大きくなる結果となった。これは、ポルトランドセメントの使用量が低減されて水酸化カルシウムの含有量が少なくなるためと考えられる。

3.4 塩水浸せき試験

塩水浸せき期間を6ヶ月間とした場合の浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験結果を図-5に示す。早強ポルトランドセメント単味のH配合と比較して、混和材を用いた配合では見掛けの拡散係数が小さくなる結果が得られた。これは硬化体の細孔構造が緻密になることと、水和生成物の塩化物イオンの固定化能力が高まることなどが理由として考えられる。高炉スラグ微粉末の置換率の違いでみると、見掛け拡散係数がもっとも小さくなるのは、湿潤養生期間が3日と7日の場合には置換率60%、湿潤養生期間が28日の場合には置換率70%となり、湿潤養生期間の延長により高置換率側にシフトする傾向がある。混和材を用いたコンクリートは塩化物イオンの侵入抵抗性に優れることが確認されたが、コンクリート中の鋼材腐食を考える場合には、中性化による細孔溶液中のpH低下や塩化物イオンの移動、濃縮の影響も考慮する必要がある。中性化に対する抵抗性が低い高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、中性化の影響も考慮する必要がある。

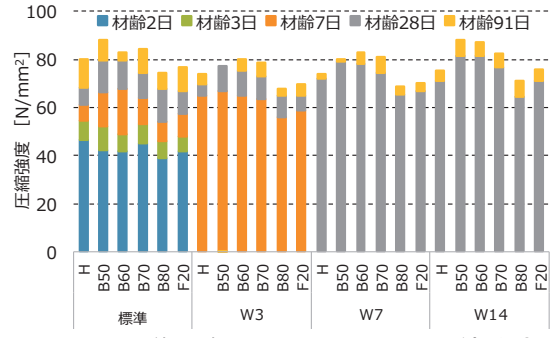


図-2 養生条件の違いによる圧縮強度

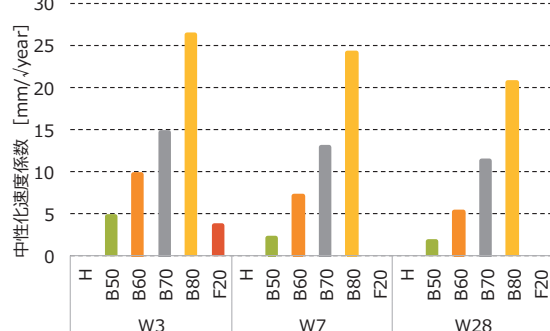


図-4 養生条件の違いによる中性化速度係数

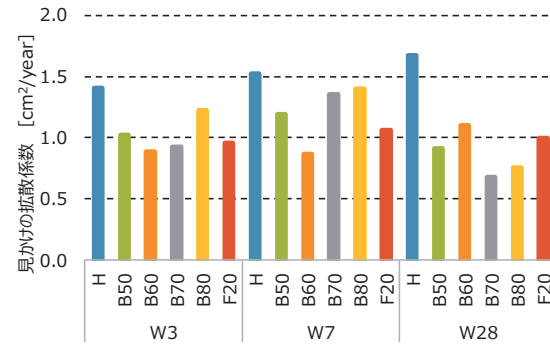


図-5 コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験結果

3.5 表層透気試験

表層透気試験結果を図-6に示す。図中には表-5による評価を標記した。高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートの透気係数が、すべての養生期間においてH配合やF20配合より小さくなる結果となった。空気の透過性を評価する試験のため、中性化に対する抵抗性に関係すると考えていたが、混和材を用いたコンクリートの中性化はポルトランドセメントの使用量にも依存することから、表層の緻密性だけでは評価できないことがわかった。高炉スラグ微粉末の置換率でみると、60~70%で透気係数が小さく、また、湿潤養生期間が長くなるにつれてより小さくなり、緻密性が高くなっていることが分かる。なお、表-5の評価方法に基づけば、高炉スラグ微粉末で置換した配合が一部を除き「優」，H配合とF20配合も「良」となった。

3.6 表面吸水試験

表面吸水試験結果を図-7に示す。10分後の吸水速度は、すべての養生期間において高炉スラグ微粉末の置換率50~70%が小さくなる結果となった。透気係数と似た傾向にあるが、高炉スラグ微粉末の置換率80%では大きな吸水速度を示した。これは透気係数の測定結果のように、養生期間が長いものほど小さくなる傾向とはなっていない。特にW28の結果では、B50, 60, 70の透気係数が空気がほとんど透過しない $0 [\times 10^{-16} \text{m}^2]$ にも拘わらず、吸水試験は水の浸入を示す結果となっている。この理由は、コンクリート表層は湿潤養生期間を長く取るほど緻密化して気体が透過しにくくなるものの、ごく表面においては、材齢28~56日まで実施した気乾養生により水分が逸散しており、そのため吸水試験ではごく表面での吸水が発生したものと推察される。湿潤養生期間については透気試験ほど明確ではないが、養生期間を長くすることにより小さくなる傾向となっている。表層部における物質透過抵抗性については、透気試験の結果も踏まえ、置換率60%がもっとも高いと考える。

3.7 スケーリング試験

スケーリング試験は高炉スラグ微粉末の置換率を50%，70%とした配合とH配合およびF20配合について実施した。50サイクル終了後のスケーリング量を図-8に示す。高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートのスケーリング量が多い結果となった。H配合，F20配合との空気量の差による影響も考えられるが、ほかの試験値には大差がない置換率50%と70%でスケーリング量に倍以上の差があることから、高炉スラグ微粉末による置換に伴う気泡構造の変化の影響も考えられ、今後検討が必要と考える。スケーリング量と目視レィティングの関係については、月永ら⁹⁾によりスケーリング量が 0.5kg/m^2 程度で目視レィティング2， 1.5kg/m^2 で目視レィティング3との関係性が示されている。今回の試験結果では、高炉スラグ微粉末の置換率を70%とした配

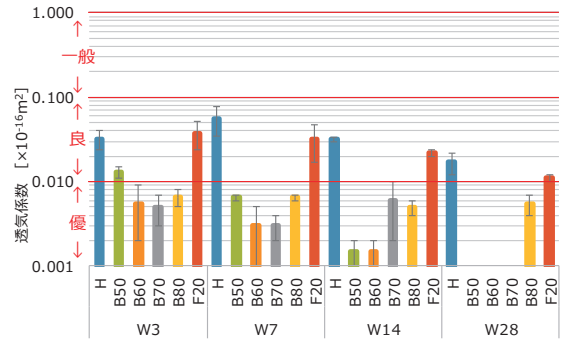


図-6 表層透気試験における透気係数

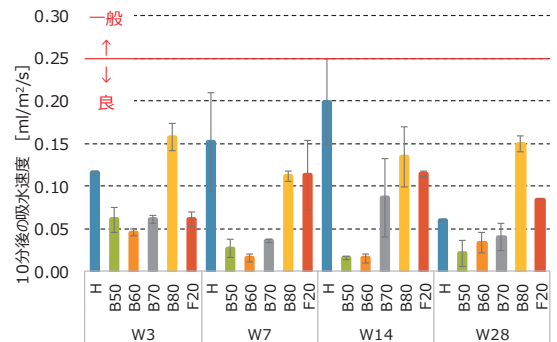


図-7 表面吸水試験における10分後の吸水速度

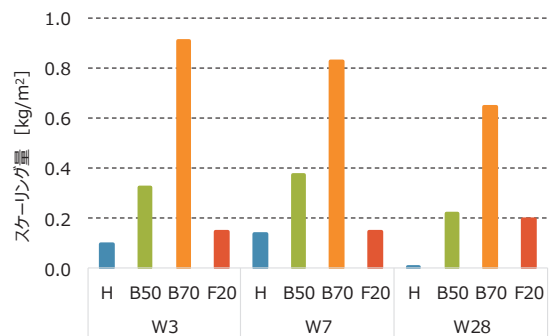


図-8 50サイクル後のスケーリング量

合以外は $0.5\text{kg}/\text{m}^2$ 以下となっており目視レィティング2 (中度まで達しないわずかなスケーリング) となっている。この結果から、凍結融解抵抗性が求められる寒冷地において高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを使用する場合は置換率に留意する必要があると考える。

4. まとめ

早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグに置き換え、その置換率や養生期間がコンクリートの耐久性に与える影響について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- ① 早強ポルトランドセメントをベースとして、その50~70%を粉末度が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ と比較的大きい高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートでは、水結合材比を40%から35%に低減することにより早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の強度発現が得られる。また、湿潤養生を3日間実施することにより、材齢28日時点で標準水中養生と同程度の圧縮強度が得られる。ただし、置換率80%とフライアッシュ置換率20%では、材齢28日で早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の圧縮強度を得るためには材齢28日まで湿潤養生を延長する必要がある。
- ② 促進中性化試験における中性化速度係数は、早強ポルトランドセメント単味やフライアッシュで20%置換したコンクリートに比べ高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートで大きく、置換率が高く湿潤養生期間が短いほど大きくなる傾向にある。
- ③ 塩水浸せき期間を6ヶ月間とした場合の見掛けの拡散係数は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、混和材を用いたコンクリートで小さく、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、湿潤養生期間が3日、7日の場合には置換率60%、湿潤養生期間が28日の場合には置換率70%でもっとも小さくなり、湿潤養生期間の延長により高置換率側にシフトする傾向がある。
- ④ 表層透気試験による透気係数と表面吸水試験における10分後の吸水速度結果は、高炉スラグ微粉末の置換率60~70%配合が小さく、湿潤養生期間が長くなるほど小さくなる傾向である。表層部における物質透過抵抗性については、置換率60%がもっとも高いと考える。
- ⑤ 凍結融解に伴うスケーリングについては、早強ポルトランドセメント単味やフライアッシュで20%置換したコンクリートに比べて高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのスケーリング量が多い。とくに置換率70%では50%の2倍以上のスケーリング量となり、凍結融解抵抗性が求められる寒冷地で使用する場合には置換率に留意する必要がある。

参考文献

- 1) 佐々木亘, 石澤正大, 梶哲義, 谷口秀明: 場所打ちPC橋への適用を想定したフライアッシュコンクリートの強度発現, プレストレストコンクリート工学会第26回シンポジウム論文集, pp. 537-540, 2017.10
- 2) 根岸稔, 檜垣誠, 西祐宣, 守谷健一: 高炉スラグ微粉末を大量混合したコンクリートの経時安定性改善に関する一提案, 土木学会第67回年次学術講演会, V-463, pp. 925-926, 2012.9
- 3) 土木学会: 混和剤を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針 (案)
- 4) 土木学会: 構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集, pp. 30-36, 2008.4
- 5) 井川倫宏, 玉岡優児, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価基準に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第29巻, pp. 101-109, 2018.9
- 6) 月永洋一, 庄谷征美, 笠井芳夫: 凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第8巻第1号, pp. 128, 1997.1