

論文 生コンクリート単位水量の微小変動調整へのパソコン コントロールシステムの検討

中垣一宏*1・田代利明*2・小河洋夫*3・鬼頭昌之*4

要旨：オンライン型水分計を生コンクリートのスランプ管理システムと一体化して管理するにあたって、単位水量の管理は極めて重要な課題である。しかし生コンクリートの製造には多くの要因が絡み合っているため、単純に両者の関係を数式化して品質管理を行うことは困難である。本研究では、単位水量の微小変動が生コンクリートの品質に及ぼす影響を調査し、その影響を定量化するとともに、単位水量の微小変動を調整して要求性能を満足する最適配合を決定するためのコントロールシステムを構築するための一連のシミュレーションを実施し、同時にパソコンを用いたコントロールシステムを検討した。

キーワード：オンライン型水分計、スランプ管理システム、表面水率、単位水量、品質管理

1. はじめに

コンクリート用細骨材の表面水率管理方法として、リアルタイムに測定可能なオンライン型水分計^{1)~3)}が使用されるようになって、かなりの年数が経過している。一方、近年の高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの需要の増加、単位水量の上限管理の必要性から、細骨材の表面水率をリアルタイムに測定し、単位水量管理^{4) 5)}に適用できるシステムの必要性はますます増大している。しかし現状では、スランプ管理システムと一体化したオンライン型水分計が、適切に使用されているとは言えない事例が少なくないと思われる。これは、フレッシュコンクリート（以下「生コンクリート」と称する）の製造に多くの要因が絡み合っているため、単純に単位水量と生コンクリートの品質との関係を数式化して品質管理を行う⁶⁾ことが非常に困難であることを意味している。

本研究は、これまでに実施したマイクロ波式のオフライン水分計⁷⁾およびオンライン型水分計⁸⁾の生コンクリート品質管理への適用に関する研究成果を踏まえて、さらに単位水量の微小

変動が生コンクリートの品質に及ぼす影響を調査し、その定量化を行うとともに、単位水量の微小変動を調整して要求性能を満足する最適配合を決定するためのコントロールシステム構築を目的として、一連のシミュレーションを実施したものである。また同時に、パソコンを用いたコントロールシステムの検討も実施した。

2. 単位水量の微小変動への対応

骨材の表面水率をオンライン測定した結果により計量値を補正してコンクリートを製造しても、他の要因により必ずしも所定のスランプが得られるとは限らない。そこでスランプ管理装置等の導入により単位水量の微小変動調整を行う必要がある。このようなスランプ管理システムの概念を図-1に、同システムを取り入れた製造システム全体のフロー概念を図-2に示す。

単位水量の微小変動調整によるスランプおよび圧縮強度変動の大きさについては、計算により定量的に予測することが可能である。しかし単位水量調整の結果発生する、細骨材率等の微小変動に伴う生コンクリート性状の変動の計算

*1 日工電子工業(株) 開発部 (正会員)

*2 (株)クレオ テクノサポート事業部 取締役事業部長

*3 晴海小野田レミコン(株) 工場次長

*4 (株)クレオ テクノサポート事業部 (正会員)

による予測は困難である。そこで、これら微小変動の影響を試練により調査し、その結果を踏まえて単位水量の変動が生コンクリートの品質に及ぼす影響の定量化を試みることにした。

3. 試験概要

3.1 配合および使用材料

試験配合は水セメント比(W/C)55%, スランプ(SL)18cmおよび8cm, 空気量(Air)4.5%, 粗骨材最大寸法(G_{MAX})20mmの普通コンクリートを想定して決定した。基準コンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントはJIS R 5210適合の普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材(G)は岩手県住田町産の碎石, 細骨材は千葉県市原市産の山砂(S1)および岩手県大船渡市産の石灰石砕砂(S2)を使用した。混和剤としてリグニンスルホン酸系A E減水剤(AD)および空気量調整剤(A)を使用した。A E減水剤の添加量はセメント量の0.25%とした。空気量調整剤は原液を100倍に希釈して用い、生コンクリートの空気連行性がスランプにより異なるため、各水準の予想スランプ値により添加量を変更した。

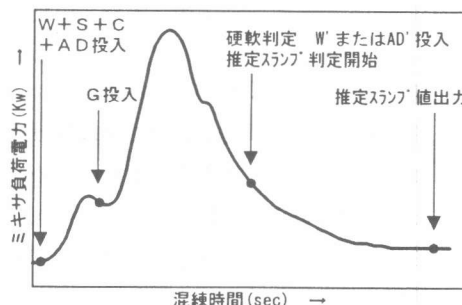
細骨材の表面水率は5%を基準として試験水準に合わせて調整し、計量直前にJIS A 1111の質量法により測定した。粗骨材の表面水率は表面乾燥飽水状態を基準とし、JIS A 1803の方法で測定した。使用材料の品質を表-2に示す。

3.2 試験水準

試験水準は、生コンクリート工場におけるスランプ変動、細骨材および粗骨材表面水率変動の大きさの実態を考慮して設定した。

山砂、川砂等がコンクリート製造に使用される場合、通常数%の表面水を含む状態で用いられる^{4) 7)}。そこで本試験では試験用細骨材の表面水率を5.0%に調整し、設定値を実際の表面水率から±2.0%および±1.0%変動させた水準を設けた。また粗骨材表面水率

変動試験では、設定値は0.5%固定として、実際の表面水率が設定値から±0.5%, +1.0%および



W: 水 S: 細骨材 G: 粗骨材 C: セメント AD: 混和剤
W': 補正水 AD': 補正混和剤

図-1. スランプコントロールの概念

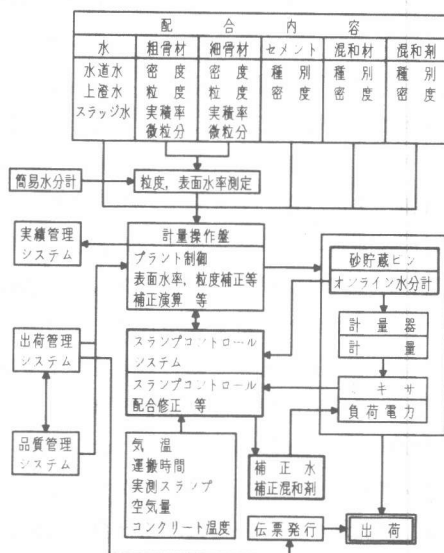


図-2. 製造システム全体フロー概念

表-1. 配合基準別示方配合表

配合基準	W/C %	スランプ cm	G_{MAX} mm	S/a %	単 位 量						
					単位	セメント	水	砂1	砂2	碎石	A E 減水剤
					(C)	(W)	(S1)	(S2)	(G)	(AD)	
I	55.0	18	20	46.5	kg/m ³	322	177	650	169	977	0.805
					Q/m ³	102	177	251	63	362	45
II	55.0	8	20	43.0	kg/m ³	276	152	637	166	1102	0.609
					Q/m ³	87	152	246	62	408	45

+1.5%変動した場合を想定した水準を設けた。ただし粗骨材の表面水率を実際に正確に変動させるのは困難であるため、試験には表乾状態とした粗骨材を使用し、想定した変動量に合わせて単位水量および単位粗骨材量を増減した。また、空気量の変動によるコンクリート強度発現の補正係数を求めるため、骨材の表面水率は設定どおりとして、空気量を基準値(4.5%)から±1.0%変動させた水準を設けた。各試験水準の条件を表-3に示す。試験水準は変動の条件により以下の3グループに区分した。

①「グループA」：配合基準Ⅰ（スランプ18cm）を用い、細骨材の表面水率設定値を±2.0%および±1.0%変動させた水準。

②「グループB」：配合基準Ⅰを用い、粗骨材の表面水率が設定値から±0.5%、+1.0%および+1.5%変動したと想定した水準。

③「グループC」：配合基準Ⅱ（スランプ8cm）を用い、細骨材の表面水率設定値を±1.0%変動させた水準。

3.3 試験方法および測定項目

1バッチあたりの練混ぜ量は40ℓとし、最大混練容量60ℓの横型二軸強制練りミキサを使用し、計量された材料をミキサ内に全量投入した後ミキサを起動して90秒間の混練を実施した。

フレッシュコンクリートの物性として空気量をJIS A 1128により、スランプをJIS A 1101により測定した。また単位容積質量をJIS A 1116により測定し、練上がりコンクリートに棒温度計を挿入してコンクリート温度を測定した。

硬化コンクリートの物性としては材齢7日および28日の圧縮強度を測定するものとし、φ10×20cmの円柱形供試体を1水準あたり6本（各、材齢3本）作製した。作製した供試体は翌日に脱型し、試験実施材齢まで標準養生した。

4. 試験結果と考察

4.1 スランプ結果の検討

フレッシュコンクリートのスランプは空気量の変動の影響を受けるため、骨材表面水率設定

表-2. 各使用材料の品質

種 類	混合比率 (%)	密度	粗粒率	実積率 (%)
セメント	—	3.16	—	—
細骨材1	80	2.59	2.54	64.8
細骨材2	20	2.68	3.49	69.1
粗骨材	—	2.70	6.60	60.4
水	—	1.00	—	—

表-3. 試験水準一覧

グループ	記 号	バ ッ チ	表面水率 (%)					
			細骨材		粗骨材			
			設定	変動	実際	設定	変動	
A	A-0	1	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	A-0-1.0	2	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	A-2	3	3.0	-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	A-1	4	4.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	A+1	5	6.0	+1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	A+2	6	7.0	+2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B	B-0	—	5.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0
	B-1.5	7	5.0	0.0	2.0	0.5	-1.5	-1.5
	B-1.0	8	5.0	0.0	1.5	0.5	-1.0	-1.0
	B-0.5	9	5.0	0.0	1.0	0.5	-0.5	-0.5
	B+0.5	10	5.0	0.0	0.0	0.5	+0.5	+0.5
C	C-0	11	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	C-0+1.0	12	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	C-1	13	4.0	-1.0	-1.0	0.0	0.0	0.0
	C+1	14	6.0	+1.0	+1.0	0.0	0.0	0.0

(注1) A-0-1.0、C-0+1.0は空気量変動の水準

(注2) B-0はA-0と同一配合となるため省略

値の実表面水率からの変動の影響を正しく評価するためには、空気量を一定とした値にスランプを補正する必要がある。土木学会コンクリート標準示方書の配合補正法によれば、スランプ一定で空気量+1%の場合単位水量は-2%変動、またスランプ+1cm変動に対応する単位水量変動は+1.2%とされている。したがって、補正後のスランプは以下の式により求められる。

$$SL = SL_m - \frac{0.02(A_m - A_0)}{0.012} \quad (1)$$

ここで SL：補正後のスランプ（cm）

SL_m：実測スランプ（cm）

A_m：実測空気量（%）

A₀：目標空気量（%）

また、骨材表面水率設定値の真の値からの変動により発生する細骨材率変動の影響を無視すれば、単位水量の変動（スランプ+1cmに対し

単位水量+1.2%)を用いて予測スランプを算出できる。ただし、スランプが19cm以上のコンクリートについては、スランプ+1 cmにつき単位水量+3 kgという別種の補正方法があるため、この領域にある水準についてはこれら2種の予測値の平均をとった。式(1)により算出した空気量変動による補正スランプと、単位水量変動による補正スランプとの比較を図-3に示す。

図-3より、空気量補正後のスランプは単位水量変動より算出した予測値とよく一致していることが判る。ほとんどの水準で両者の差はスランプの計測単位である±0.5 cm以内であった。したがって骨材表面水率設定値の変動に伴う単位水量以外の変動、すなわち骨材の単位量や細骨材率変動のスランプに対する影響はごく小さく、無視できるものと考えられる。

4.2 圧縮強度結果の検討

(1) 圧縮強度の空気量による補正

コンクリートの圧縮強度は、スランプの場合と同様に空気量の影響を受ける。空気量を全水準一定に保つことは極めて困難であるため、本試験では配合基準Ⅰ、Ⅱそれぞれに空気量のみ変動させた水準を設定し、空気量の差による圧縮強度差を算出した。その結果、空気量変動1%に対する圧縮強度の変動は、材齢7日の配合基準Ⅰでは2.0N/mm²、配合基準Ⅱでは1.1N/mm²となった。また材齢28日ではそれぞれ3.4N/mm²および1.7N/mm²となった。各水準の圧縮強度測定結果および、空気量4.5%を基準として、±1%の変動により上記の値だけ圧縮強度が変動するものとして補正した結果を表-4に示す。

(2) 空気量補正強度とセメント水比の関係

空気量4.5%を基準値として空気量補正を実施した材齢28日強度と、セメント水比の関係を図-4に示す。同図より、両者の間には一次関数的な相関が成り立つことが判る。一次回帰計算の結果得られた近似式は以下のとおりとなった。

$$\sigma_{28}=-40.5+43.0(C/W) \tag{2}$$

(相関係数 $r=0.93225^{**}$)

一般に普通コンクリートの場合、セメント水

比と圧縮強度の間にはこのような一次関数的相関の成り立つことが知られており、本試験で同

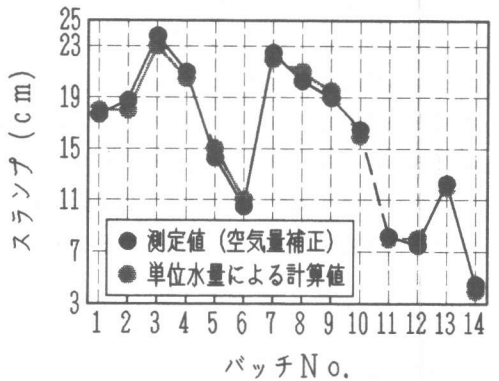


図-3. 補正スランプ値の比較

表-4. 圧縮強度測定・補正結果

バ ッ チ	W/C (%)	Air (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
			材齢7日		材齢28日	
			実測	補正	実測	補正
1	55.0	4.7	27.8	28.2	36.6	37.3
2	55.0	3.7	29.8	28.2	40.0	37.3
3	59.6	3.4	23.2	21.0	32.2	28.5
4	57.4	4.5	25.5	25.5	33.4	33.4
5	52.8	4.6	30.9	31.1	41.5	41.8
6	50.3	4.5	34.0	34.0	43.6	43.6
7	59.3	4.5	25.3	25.3	32.9	32.9
8	58.1	4.9	26.6	27.3	34.1	35.1
9	56.5	5.1	26.7	27.8	35.4	37.0
10	53.4	4.5	33.2	33.2	42.4	42.4
11	55.0	4.1	28.8	28.4	38.6	37.9
12	55.0	5.7	27.0	28.4	35.9	37.9
13	57.7	4.0	25.2	24.6	34.8	34.0
14	52.3	5.1	29.8	30.5	38.9	39.9

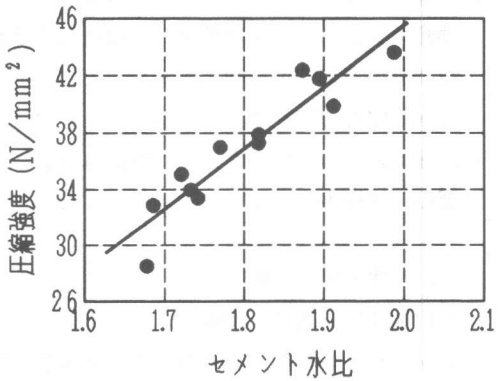


図-4. 空気量補正強度とセメント水比の関係

様な相関が得られ、かつ約0.9323と大きな相関係数が得られたことは、本試験で採用した空気量による補正が妥当なものであったことを示していると考えられる。

4.3 表面水率設定値変動の影響評価

骨材表面水率設定値の変動により、水セメント比のほか単位骨材量、細骨材率等も変動する。その結果、コンクリート容積、単位容積質量、スランブおよび空気量等にも変動が生じる。これらの要因は相互に影響を及ぼし合うほか、複雑に絡み合って強度変動の要因となる。本試験各水準の表面水率設定値変動と、その結果生じるコンクリート品質変動の関係を表-5に示す。同表の値は、次章で検討する単位水量微小変動調整システムの基礎データとなるものである。

5. 単位水量の微小変動調整システムの検討

5.1 単位水量微小変動の定量的推定

現状では、生コンクリートのスランブ管理システムによる出力項目(図-2参照)として推定スランブ(SL)、推定水セメント比(W/C)および推定強度(Fc)が挙げられる。これらの出力値から推定単位水量(W)を求める。推定単位水量の最適化を図るには、細骨材および粗骨材の表面水率変動を踏まえて補正を行う必要がある。

本研究においてはスランブの微小変動(σ_{SL})を、製造工場の工程能力指数(C_P)に基づいて次のように算出した。

一般に工程能力指数(C_P) ≥ 1.33 の場合、工程能力は十分であると判断される。この場合のスランブの標準偏差(σ)は、以下の式で求める。

$$C_P = \frac{S_U - S_L}{6\sigma} = 1.33 \quad (3)$$

ここで S_U : スランブの上限(cm)

S_L : スランブの下限(cm)

σ : スランブの標準偏差

スランブ18cm、8cm共にJISに規定されている許容差($S_U - S_L$)は5.0cmであるから、標準

表-5. 表面水率変動とコンクリート品質の関係

材 料	変 動 %	配 合 基 準	W/C %	S/a %	単 位 水 量 kg/m ³	圧 縮 強 度 N/mm ²	ス ラ ン ブ cm	容 積 kg/m ³	単 位 容 積 質 量 kg/m ³
細 骨 材	-2.0	I	+4.6	-0.5	+13	-6.1	+5.0	+9.2	-22
		II	+5.5	-0.5	+13	-7.1	+7.0	+9.1	-22
	-1.0	I	+2.4	-0.3	+7	-3.3	+2.5	+5.4	-12
		II	+2.9	-0.2	+7	-3.7	+4.0	+5.6	-11
	+1.0	I	-2.2	+0.1	-6	+3.2	-3.0	-5.5	+10
		II	-2.6	+0.2	-7	+4.0	-4.0	-4.8	+10
	+2.0	I	-4.7	+0.4	-14	+7.3	-7.0	-8.8	+21
		II	-5.4	+0.5	-14	+8.5	-7.5	-8.0	+21
粗 骨 材	-1.5	I	+4.3	+0.3	+12	-5.7	+4.0	+8.7	-21
	-1.0	I	+3.1	+0.2	+9	-4.2	+3.0	+6.1	-14
	-0.5	I	+1.5	+0.1	+4	-2.1	+1.5	+3.0	-7
	+0.5	I	-1.6	-0.2	-4	+2.3	-2.0	-2.9	+7

偏差 $\sigma = 5.0 / (6.0 \times 1.33) = 0.63(\text{cm})$ となる。

スランブ変動を推定不良率5%で管理するとすれば、許容幅は $\pm 2\sigma = \pm 1.26\text{cm}$ となる。安全側をとって $2\sigma = 1.0\text{cm}$ を微小変動幅とすると、単位水量(W)、水セメント比(W/C)および圧縮強度(Fc)の微小変動調整幅は表-5よりそれぞれ2~4kg/m³、約1.0%および約0.7N/mm²となる。一方スランブの微小変動幅 $\pm 1.0\text{cm}$ に対応する骨材表面水率の変動幅は、細骨材では約0.35%、粗骨材については約0.32%となった。また圧縮強度の変動を $1.64\sigma = 4.1\text{N/mm}^2$ 以内とするための表面水率設定値調整幅は、式(2)の係数から判断して約 $\pm 1\%$ と算出された。

5.2 微小変動調整システムの検討

今回の試験結果等より、骨材表面水率の変動が $\pm 1\%$ 以上、スランブの変動が2~3cm以上あった場合に、パソコンを利用して配合修正を瞬時に行う調整システムを検討した。同システムの全体フローの概念を図-5に示す。

6. まとめ

単位水量の微小変動を調整するシステムの構築を最終目標として、骨材表面水率設定値の変動がコンクリートの品質に与える影響を調査した。その結果、以下のような知見が得られた。

①骨材表面水率設定値のみを変動させた場合、

スランプの変化によりコンクリートの空気連行性も変動するため、コンクリートの品質変動は単位水量変動から予測される値とは異なる。基準スランプ18cmのコンクリートでは空気量変動はスランプおよび強度の変動を抑える方向に働き、基準スランプ8cmの場合には逆に増大する方向に作用する。

- ②空気量が一定となるよう調整した場合には、スランプの変動は単位水量変動から予測した計算値と一致し、表面水率設定値の変動に起因する細骨材率変動の影響は小さい。
- ③空気量の変動が圧縮強度に及ぼす影響は大きく、正確な補正による管理が必要である。本試験では空気量変動の影響が一般に言われる値より大きく出たこともあり、単位水量の微小変動が空気量補正後の強度に与える影響は予想よりも大きくなった。
- ④コンクリートの品質に対する空気量変動の影響は極めて大きい、混練全バッチの空気量を一定に保つのは困難である。空気量変動の要因を明確にし、混練前に可能な限り変動要因を排除する努力が求められるとともに、必要に応じてホッパー内のコンクリート容積を正確に測定し、空気量を推定する事による補正機能をシステム中に組み込む等の対策をとるべきと思われる。
- ⑤スランプコントロールを骨材表面水率の設定値による単位水量調整で行う場合、圧縮強度の変動幅を基準とした場合には $\pm 1\%$ 程度の調整が許容されるが、スランプの不良率5%で管理する場合には $\pm 0.3\%$ 程度に限定される。

今回の試験では温度等環境条件の影響について検討していないが、既に温度による影響については対応を実施している。今後は空気量変動等も考慮した総合的検討を加える予定である。

〔謝辞〕本研究を行うにあたり、晴海小野田レミコン㈱の清原常務取締役工場長、中津留建二氏、日工電子工業㈱の水田営業部長、㈱クレ

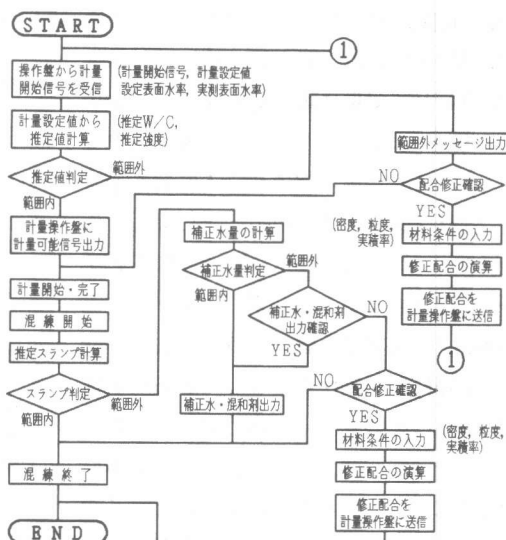


図-5. 微小変動調整システムの全体フロー

オ・テクノサポート事業部の山根ソフト営業グループリーダー、星原主管、金築主任ほか多くの方々に多大なご協力を戴きました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西 晴哉・大塩 明・曽根徳明：マイコン制御によるレディミキストコンクリートの品質管理，セメント技術年報，No. 36，1982
- 2) 西 晴哉・大塩 明・尾林清一：静電容量型細骨材水分計とスランプモニターによる生コンの品質管理，セメント技術年報，No. 33，1979
- 3) 全生工組連新技術開発委員会：表面水率自動測定装置に関する調査報告書，大5回生コン技術大会研究発表論文集，1991
- 4) 阿部 修ほか：高強度コンクリート製造における細骨材表面水の変動と圧縮強度の関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13，No. 1，1991. 6
- 5) 若松 岳・松島博之・原田 暁：ミサ-負荷電流を利用した高流動コンクリート製造管理の一考察，第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会，1994
- 6) 加藤佳孝・魚本健人・堤 知明：ニューラルネットワークによるコンクリートの配合最適化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 1，1996
- 7) 鬼頭昌之・小河洋夫・田代利明：マイクロ波ライン水分計のフレッシュコンクリート単位水量管理への適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 20，1998
- 8) 小河洋夫・田代利明・中垣一宏：オンライン型水分計の生コン工場品質管理への適用，第10回生コン技術大会研究発表論文集，1999