

論文 仮想ひび割れの進展を考慮したコンクリート引張軟化曲線の決定方法

斉藤 稔^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・田邊 忠顕^{*3}

要旨：弾性エネルギーの控除と仮想ひび割れの進展を考慮した手法により、引張軟化曲線の決定を試みた。本手法ならびに既往の各種推定法により得られた引張軟化曲線を組み込んだ仮想ひび割れモデル解析の結果を比較し、本手法の妥当性を検証した。

キーワード：引張軟化曲線、破壊力学、J積分法、仮想ひび割れ、弾性エネルギー

1. はじめに

コンクリートの破壊現象を検討するためには、コンクリートのひび割れ進展に伴う引張軟化特性が重要である。特に、コンクリートの引張軟化曲線は、破壊エネルギーとともに、構造物の靱性と密接な関係がある。

コンクリートの引張軟化曲線を推定する手法は、実験と数値解析を併用する方法とエネルギーバランスに基づくJ積分系の手法の2つに大分される。前者については、橋高ら¹⁾の逆解析を用いた多直線近似による推定法などがあるが、これは、実験結果と一致するように区分的に引張軟化曲線を与えていく手法であり、任意形状の引張軟化曲線を精度良く推定することが可能である。しかし、軟化開始応力点が唯一に決定できないことや、解析方法の一般化等に問題がある。

また、これは後者でも同様の問題ではあるが、安定した荷重-変位曲線の計測方法、測定データの精度に課題があり、標準的な試験方法の確立が求められている。

一方、後者は、Li²⁾らのJ積分法から発展してきたものであり、新J積分法³⁾や修正J積分法⁴⁾などが挙げられる。これらは、エネルギーの評価、仮定

の妥当性に問題があり、引張軟化曲線を求める際の適用性が低いことが指摘されている⁵⁾。

本研究では、エネルギー消費時における弾性エネルギーの控除と、リガメント部における仮想ひび割れの進展の2点について、修正J積分法を改善するものである。そして、本手法ならびに既往の各種推定法により得られた引張軟化曲線を組み込んだ仮想ひび割れモデル解析の結果を比較し、本手法の妥当性を検証する。

2. 新しい引張軟化曲線決定法

2.1 既往の推定法における問題点

修正J積分法は、新J積分法に含まれていた問題点の内、仮想ひび割れ幅の高さ方向の分布に関する仮定を改善したものである。しかし、修正J積分法の場合でも、外的に与えられたエネルギーが全て仮想ひび割れ部で消費されるとする仮定と、仮想ひび割れが、載荷直後にリガメント部全域に進展するという仮定は、改善されていなかった。

本研究では、以上の2点に着目して、実際の現象に近づいた形に改善し、さらに精度の良い引張軟化曲線の推定を目的とする。

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

2.2 弾性エネルギーの解放

新 J 積分法や修正 J 積分では、外的に与えられたエネルギーは式(1)で表され、全て仮想ひび割れ部で消費されると仮定している (図-1)。

$$E(\omega) = \int_0^{\delta_w} P(\delta) d\delta \quad (1)$$

ただし、 ω は仮想ひび割れ幅、 $E(\omega)$ は仮想ひび割れ幅が ω となるまでに消費されるエネルギー、 δ_w は開口変位が w となる時の変位である。ここでは、開口変位 w と仮想ひび割れ幅 ω が対応している。

しかし、仮想ひび割れ部で消費されるエネルギーは、外部エネルギーから仮想ひび割れ部以外に蓄えられている弾性エネルギーを差し引いたものである (図-2)。そこで、著者らが行った実験結果⁹⁾に基づいて、軟化域における除荷・再載荷パスを定め、弾性エネルギーの解放分を定量的に評価することにした。

除荷・再載荷パスが直線に近似できるとすれば、ひび割れ進展に使われるエネルギーは式(2)で表現できる。

$$E(w) = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta - \frac{1}{2} P(\delta) (\delta - \delta_p) \quad (2)$$

ただし、 δ_p は完全に除荷された状態での残留変位である。

表-1 に示す 3 種類のコンクリートを用いた繰り返し載荷を受ける切欠きはり (幅 10cm×高さ 10cm×長さ 84cm, スパン 80cm, 切欠き深さ 5cm) の 3 点曲げ試験より、残留変位 δ_p を求めることにした。3 種類のコンクリートの実験結果から得られた δ および δ_p を δ_{max} で無次元化し、 $\delta_p / \delta_{max} - \delta / \delta_{max}$ の関係をプロットしたものが図-3 である。図-3 中の実線は最小二乗法での近似式で、式(3)で表される。

$$\frac{\delta_p}{\delta_{max}} = \left(\frac{\delta}{\delta_{max}} \right)^{1.38} \quad (3)$$

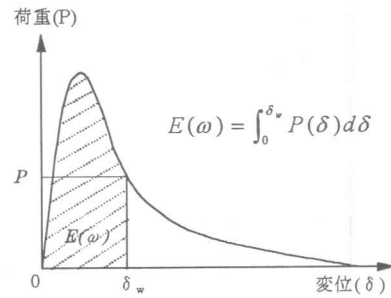


図-1 式(1)におけるエネルギー

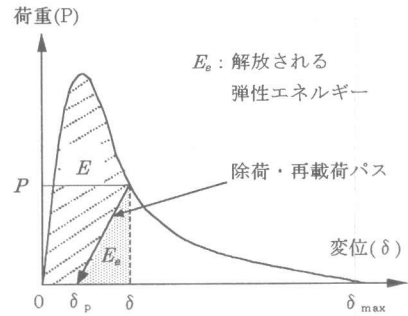


図-2 弾性エネルギーの解放

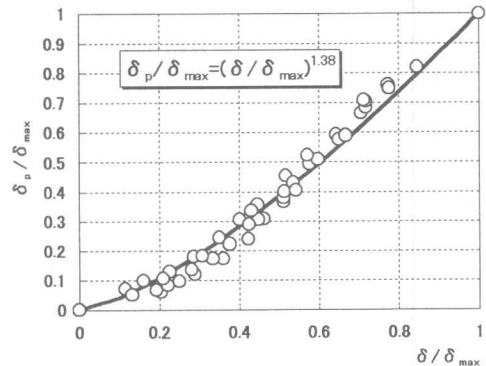


図-3 $\delta_p / \delta_{max} - \delta / \delta_{max}$ の関係

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	WB % *	s/a %	単位量 (kg/m ³)							
			W	C	F.A.	S.F.	S	G	混和剤 % **	空気量 %
自己充填	24	58	159	530	133	-	896	664	2.2	2.0
高強度	22	42	116	488	-	37	768	1084	2.4	1.0
普通強度	60	45	190	316	-	-	819	1024	-	1.0

*: WB は水と結合材(セメント+フライアッシュ、セメント+シリカフーム)の重量比

** : 混和剤の使用量は結合材量に対する重量比率

本研究では、残留変位 δ_p をこのように定め、式(2)にしたがって弾性エネルギーの解放分を評価した。

2.3 仮想ひび割れの進展評価

既往の J 積分法では、仮想ひび割れが荷重直後から直ちにリガメント部全域に進展すると仮定している。しかし、実際の現象は、はりの曲げ変形の増加に伴って、仮想ひび割れも徐々に進展していくはずである。つまり、図-4 に示すように、変形の途中において仮想ひび割れはリガメント部全域に達していない。そこで本手法では、仮想ひび割れ長さ a を開口ひび割れ幅 w の関数として表現することで、進展量を評価することとした。

リガメント長さを a_0 、仮想ひび割れ長さを $a(w)$ 、仮想ひび割れ幅を $w(y)$ 、開口ひび割れ幅を w とすると式(4)の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \omega(y) &= wy / a(w) \\ y &= a(w)\omega(y) / w \\ dy &= (a(w) / w) d\omega \end{aligned} \quad (4)$$

このとき、開口変位が w となるまでに消費されたエネルギー E は以下のようにして求められる。

$$\begin{aligned} E(w) &= b \int_0^w e(\omega) \frac{a(w)}{w} d\omega \\ &= \frac{ba(w)}{w} \int_0^w e(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $e(\omega)$ は、仮想ひび割れ幅が ω となるまでに消費される、単位面積当たりのエネルギーである。さらに変形して、

$$\begin{aligned} \int_0^w e(\omega) d\omega &= \frac{wE(w)}{ba(w)} \\ e(w) &= \frac{1}{b} \left[\left(\frac{w}{a} \right)' E + \left(\frac{w}{a} \right) E' \right] \\ &= \frac{1}{b} \left[\frac{E}{a} + \frac{wE'}{a} - \frac{wEa'}{a^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

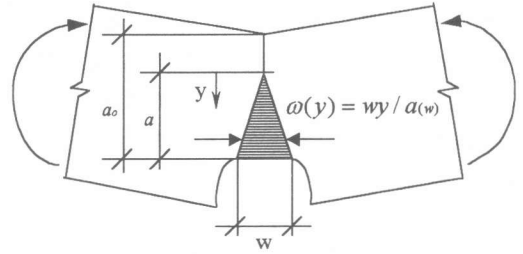


図-4 仮想ひび割れの進展状況

$$\begin{aligned} \sigma(w) &= \frac{de(w)}{dw} \\ &= \frac{1}{b} \left[\frac{E'a - Ea'}{a^2} + \frac{a - wa'}{a^2} E' + \frac{w}{a} E'' \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{a^2 - 2aa'w}{a^4} E + \frac{w}{a^2} E' \right) a' - \frac{wEa''}{a^2} \right] \\ &= \frac{1}{b} \left[\frac{E''w}{a} + \left(\frac{2}{a} - \frac{2wa'}{a^2} \right) E' \right. \\ &\quad \left. - E \left(\frac{2a'}{a^2} - \frac{2w(a')^2}{a^3} + \frac{wa''}{a^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

となり軟化曲線を得る。修正 J 積分法との違いは、軟化応力が仮想ひび割れ長さ a に依存している点である。

仮想ひび割れの長さは、はりのリガメント部の両側面に合計 5 個の π 型変位計 (標点間距離 100mm, 幅 12mm) を取り付けた切欠きはりの曲げ試験より求めることにした。 π 型変位計は、はり高さ方向に 11mm 間隔で据え付けられており、これによりリガメント部のひずみ分布を測定することができる。ひずみ分布は、線形的に変化すると仮定し、切欠き上端からひずみが 0 になる位置まで、仮想ひび割れが進展しているとした。厳密に言えば、測定されるひずみには、標点間でのコンクリートの弾性変形分が含まれており、測定値そのものが仮想ひび割れ幅ではない。しかし、弾性変形分のひずみは、 π 型変位計から得られる測定値の内、無視し得るほど小さいので、本研究では、 π 型変位計の測定値は全て仮想ひび割れ幅であると仮定した。

対象とした 3 種類のコンクリートにおいて、仮想ひび割れ長さ a をリガメント長さ a_0 で除し

た相対的な仮想ひび割れ長さ a/a_0 と相対的な開口変位 w/w_{max} の関係が図-5 である。ここで w_{max} は δ_{max} に対応する終局時の開口変位である。図-5 中の実線は実験データの近似式であり、式(8)で表される。

$$\frac{a}{a_0} = 1.0 + 0.1 \ln \left(\frac{w}{w_{max}} \right) \quad (8)$$

ただし、 $0.01 \leq w/w_{max} \leq 1.0$ である。

本研究では式(8)により、仮想ひび割れの進展を評価することにした。

3. 引張軟化曲線の比較

3.1 コンクリートの材料特性

今回対象とした自己充填コンクリート、高強度コンクリートおよび普通コンクリートの配合を表-1 に、また、早強セメントとビーライトセメントを用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。表-3 に5種類のコンクリートの寸法および材料特性を示す。

3.2 各種コンクリートの引張軟化曲線

本研究で提案した引張軟化曲線と既往の推定法(新J積分法, 修正J積分法, 多直線近似法による逆解析)により得られた引張軟化曲線を比較することとした。逆解析には、土木学会の寸法効果小委員会が公表している解析プログラム⁷⁾を使用した。なお、逆解析以外の手法によるものは、割裂試験から得られる引張強度を軟化開始点応力とした。

図-6~10 に早強, ビーライト, 自己充填, 高強度, 普通強度の各コンクリートの引張軟化曲線を示す。

図-6~10 より、早強セメント、ビーライトセメントを用いたコンクリートの引張軟化曲線は推定法により若干ばらつきがある。これは供試体のスパンが300mmと比較的小さいため、得られる実験結果の精度にばらつきがあるためではないかと考えられる。しかし、提案した手法は、従来の新J積分法、修正J積分法よりも逆解析の結果に近づいていることが確認できる。

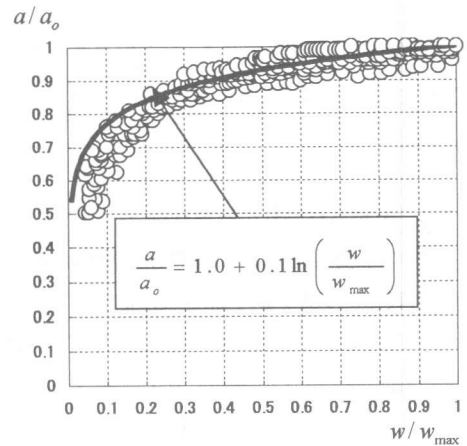


図-5 仮想ひび割れ長さ長さと相対開口変位の関係

表-2 早強セメントとビーライトセメントを用いたコンクリートの配合

セメントの種類	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	A E 剤 C×%
早強	50	48	170	340	845	955	0.2
ビーライト	50	48	170	340	848	959	0.2

表-3 コンクリートの寸法および材料特性

コンクリートの種類	寸法 (mm)	材齢 (日)	G _F (N/mm)	f _t (MPa)	f _c ' (MPa)
早強	100×100×400	28	0.112	3.14	42.0
ビーライト	100×100×400	28	0.204	3.71	41.3
自己充填	100×100×840	28	0.152	5.70	70.7
高強度	100×100×840	3	0.139	5.61	72.9
普通強度	100×100×840	28	0.106	3.71	35.8

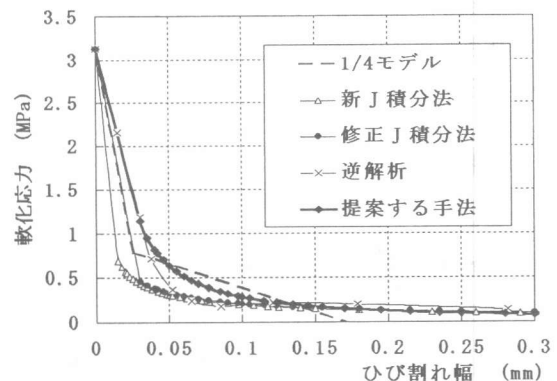


図-6 早強セメントを用いたコンクリートの引張軟化曲線

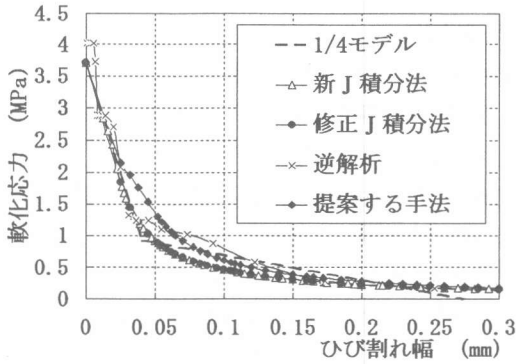


図-7 ビーライトセメントの引張軟化曲線

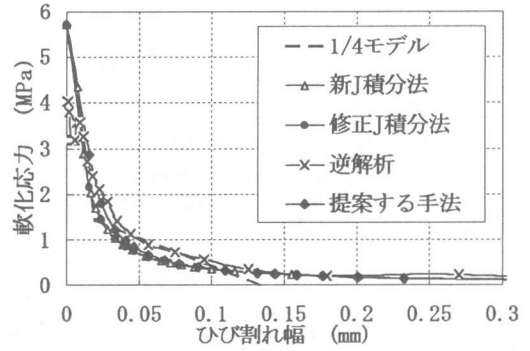


図-8 自己充填コンクリートの引張軟化曲線

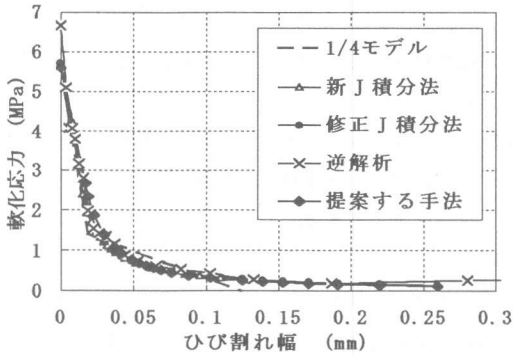


図-9 高強度コンクリートの引張軟化曲線

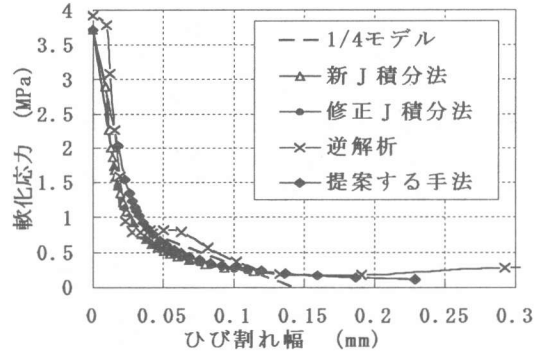


図-10 普通強度コンクリートの引張軟化曲線

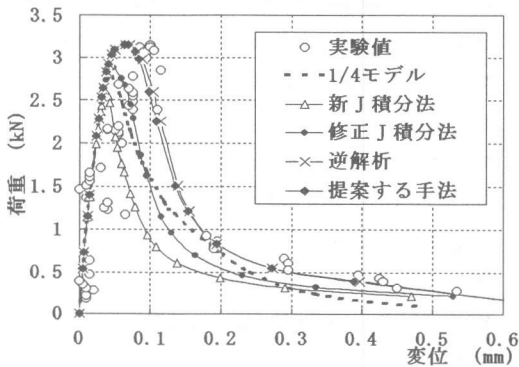


図-11 早強セメントを用いたコンクリートの解析結果

4. 各種引張軟化曲線を組み込んだ仮想ひび割れモデル解析

今回提案した手法の妥当性を検証するため、3.で得られた各種推定法による引張軟化曲線を、仮想ひび割れモデル FEM 解析⁷⁾に組み込んで、荷重-変位の解析結果を実験値と比較した。

図-11~15 に早強、ビーライト、自己充填、高強度、普通強度の各コンクリートの荷重-変位の解析結果と実験値を示す。

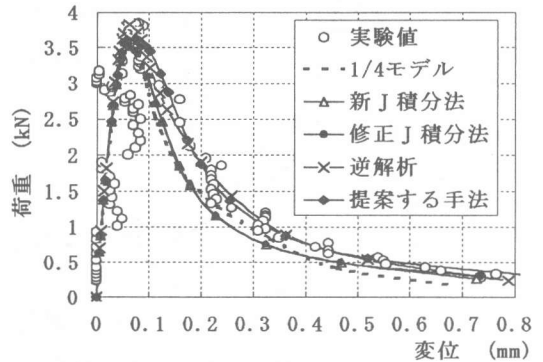


図-12 ビーライトセメントを用いたコンクリートの解析結果

図-11~15 より以下の点が観察される。

自己充填コンクリートを除く 4 種類の場合について、提案する手法で求めた荷重-変位曲線の解析結果は、逆解析とほぼ同程度の精度で、実験値を捉えていることがわかる。自己充填コンクリートにおいては、J 積分系の推定法で得られた解析結果は、ピーク荷重を実験値よりも大きく与えている。これは図-8 にあるように、軟化開始応

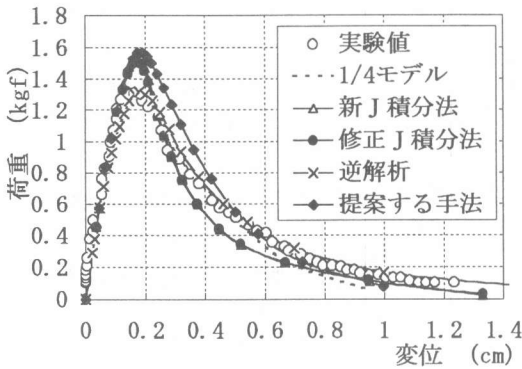


図-13 自己充填コンクリートの解析結果

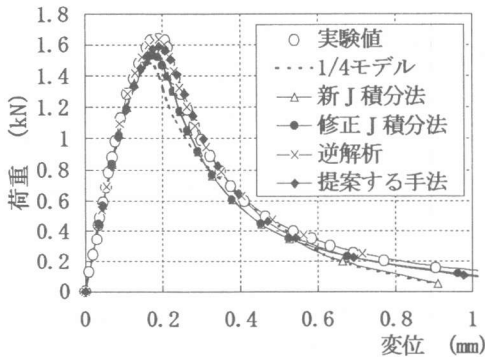


図-14 高強度コンクリートの解析結果

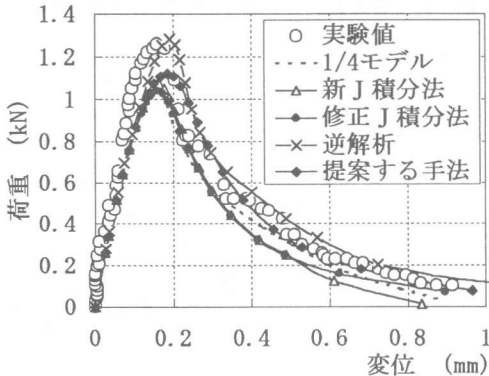


図-15 普通強度コンクリートの解析結果

力点に関する逆解析の値と割裂試験の引張強度が大きく異なるためである。荷重一変位の解析結果は、軟化曲線の形状だけではなく、軟化開始応力、コンクリートのヤング率にも影響されるため、これが実験値と完全に適合するのは困難である。この点が今後の課題ではあるが、本手法による解析結果はおおむね実験値を良好な精度で予測できていることがわかった。

5. まとめ

- (1)修正 J 積分法の問題点を改善することにより、引張軟化曲線を求める際、コンクリート種類にかかわらず、適用できることを示した。
- (2)本手法は、従来の J 積分系の推定手法に比べ、引張軟化曲線の推定精度が高い。
- (3)エネルギーバランスに基づく推定手法でも、逆解析と同等な精度で引張軟化曲線を求めることができる。
- (4)逆解析の軟化開始応力点と割裂試験による引張強度が大きく異なる場合は、提案した手法により予測されたピーク荷重と実験値は大きく異なる。
- (5)本手法はコンクリートの種類、載荷スパン長に関係なく、おおむね良好な精度で引張軟化曲線を決定できる。

参考文献

- 1) 橋高義典, 上村克彦, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 453 号, pp.15-25, 1993.11.
- 2) Li, V.C. and Ward, R.J.: A Novel Testing Technical for Post-peak Tensile Behavior of Cementitious Materials, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, pp.183-195, 1989.
- 3) 六郷恵哲, 岩佐正徳, 瀬古繁喜, 小柳 治: J 積分法を用いたコンクリートの引張軟化曲線の定量化, セメントコンクリート論文集, No.43, pp.304-309, 1989.
- 4) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No.426, V-14, pp.203-212, 1991.
- 5) 橋高義典, 栗原哲彦, 三橋博三, 中村成春: セメント系複合材料の引張軟化曲線の標準試験方法についての一考察, コンクリート年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.27~32, 1997.
- 6) 二羽淳一郎, Taweechai Sumranwanich, 松尾豊史: コンクリート引張軟化曲線の実験的決定方法, コンクリート年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.145~150, 1998.
- 7) 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会: コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線, コンクリート技術シリーズ, No.18, 92pp., 1997.