

論文 コンクリートの引張強度の寸法効果とひびわれ性状

Nguyen Van Loi ^{*1} 澤 伸繁 ^{*2} 内田 裕市 ^{*3} 小柳 洽 ^{*4}

要旨：寸法の異なる供試体を用いて一軸引張試験を行い、引張強度ならびに供試体破断時のひずみ性状を計測した。その結果、供試体破断時直前のコンクリートひずみの最大値は、ほぼ供試体寸法に比例して大きくなるが、ひずみ（微細ひびわれ）の進展長さは、かならずしも寸法に比例しないことがわかった。また、本実験の範囲では引張強度に明確な寸法効果が認められた。

キーワード：寸法効果、引張強度、ひびわれ、破壊力学

1. はじめに

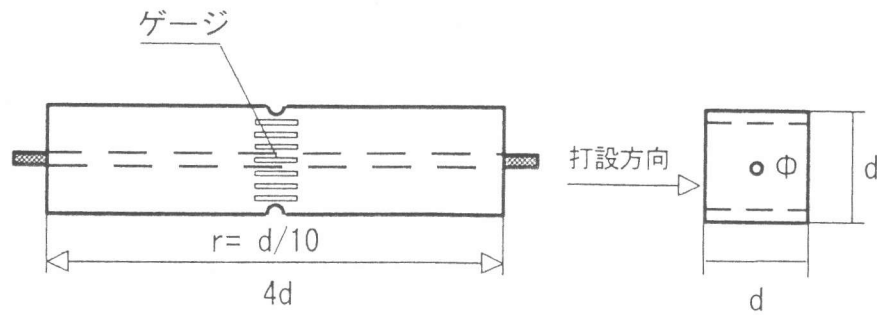
近年、鉄筋コンクリート構造物は材料、設計、施工技術の進歩にともない大型化する傾向にある。しかし、コンクリートの見掛けの強度は部材寸法が大きくなるにつれて低下することが経験的に知られており、最近この寸法効果が問題となってきた。寸法効果を説明するための理論あるいはモデルとしては、破壊時のエネルギー変換機構によるもの[1]、等価な線形破壊力学の問題に置換するもの[2]、Weibull理論に代表される統計理論によるもの、フラクタル理論に基づくもの[3]、また引張軟化特性の寄与などが考えられている。さらに、コンクリート特有の原因として乾燥収縮、材料分離あるいは施工条件なども影響するといわれている。

著者らは、これまでに曲げ強度の寸法効果がコンクリートの引張軟化特性を考慮することで、ある程度合理的に説明できることを明らかにしてきたが[4]、そこで用いられるコンクリートの引張強度については、材料定数として寸法効果はないものとして扱ってきた。しかしながら、コンクリートの一軸引張強度そのものにも寸法効果のあることが報告されている。そこで、本研究ではコンクリートの引張強度の寸法効果について実験的に検討することとし、特にひびわれの発生、進展状況をひずみゲージにより計測し、その性状と引張強度の寸法効果との関係について検討した。

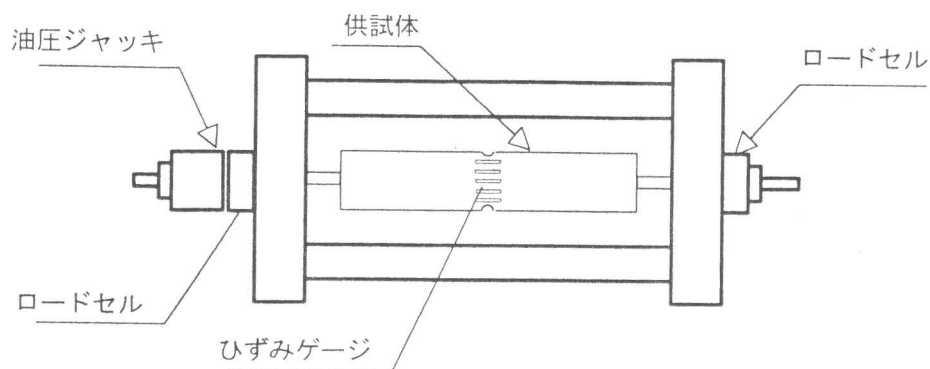
2. 実験概要

コンクリートの一軸引張試験で問題になるのは、試験機あるいは載荷治具と供試体との接続、荷重の偏心の防止、および破断位置の制御（試験区間内で破断させること）である。これらの問題を克服する最も簡単な方法として、本実験では図-1に示すような両引き供試体による引張試験を行うこととした。供試体に埋め込む鋼材としてPC鋼棒を用いることで、載荷治具との接続にナットが使用でき、載荷時に荷重の軸線が一直線となるため、荷重の偏心が生じ難くなる。また、破断位置を制御するために、本実験では供試体中央断面の両側面に半円形の切込み

*1	岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻、工修	(正会員)
*2	岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻	(正会員)
*3	岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博	(正会員)
*4	岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博	(正会員)



図一1 供試体形状・寸法



図一2 引張試験方法

を設けた。当然のことながら、切込み部では応力集中が生じるため断面内の引張応力分布は一樣とならず、理想的な一軸引張強度は得られないと考えられる。しかしながら、切込みの寸法を

表一1 コンクリートの配合

w/c (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		セメント	水	粗骨材	細骨材
50.4	44.3	323	163	1014	449

供試体寸法に比例させれば、供試体寸法が異なる場合でも応力集中の度合いは同じとなり、強度の寸法効果を検討する上では問題はないと考えた。供試体は正方形断面を有する角柱であり、基準寸法 d として断面の一辺の長さを取り $d=10, 20, 40\text{cm}$ の3種類とした。供試体の長さはすべて $4d$ と半円形切込みの半径は $d/10$ とした。また、PC鋼棒は基準寸法 $d=10, 20, 40\text{cm}$ に対して、それぞれ $\phi=11, 23, 40\text{mm}$ のものを使用することで、ほぼ試験体寸法に比例させるようにした。供試体数は、 $d=10\text{cm}$ の場合は6本、 $d=20\text{cm}$ の場合は5本、 $d=40\text{cm}$ の場合は4本とした。打設はすべて供試体を水平に置いた状態で行った。コンクリートには最大骨材寸法 15mm のレディーミクストコンクリートを使用した。コンクリートの配合を表一1に示す。載荷試験時材令(48~55日)におけるコンクリートの圧縮強度($\phi 10 \times 20\text{cm}$)、割裂強度($\phi 15 \times 15\text{cm}$)および曲げ強度($10 \times 10 \times 40\text{cm}$)は、それぞれ318、27.5、および47.6kgf/cm²であった。

載荷試験では、 $d=10\text{cm}$ 供試体については万能試験機を用いた。 $d=20, 40\text{cm}$ 供試体については図一2に示すように鋼製フレームおよび手動油圧ジャッキを用い、供試体を試験床に水平に置

いた状態で載荷した。なお、供試体と試験床の摩擦を除去するために、供試体はローラーで支持した。試験時には、引張荷重ならびに供試体中央断面（破断面）位置のPC鋼棒のひずみと供試体表面のコンクリートひずみを計測した。コンクリートひずみについては切込み部からのひびわれ（ひずみ）の進展状況を把握するために、打設面と型枠底面において電気抵抗線ひずみゲージ（ゲージ長30mm）を図-1に示すように切込み先端から5mmの位置から10mm間隔で貼り付けた。なお、供試体はひずみゲージを貼る直前まで湿布養生し、ゲージ貼り付け後24時間以内に試験した。

3. 結果と考察

3.1 PC鋼棒のひずみと偏心

図-3～図-5にロードセルで検出した引張荷重とPC鋼材およびコンクリート（供試体中央）のひずみの関係を示す。いずれの寸法の供試体においてもPC鋼材のひずみとコンクリートのひずみは最大荷重に至るまでほぼ一致しており、供試体中央断面では載荷荷重は供試体端部での付着により十分にコンクリートに伝達されているものと考えられる。

図-6～図-11には各供試体のコンクリートひずみの分布を示す。なお、図中に示した数字はそれぞれの供試体の最大荷重を基準とした荷重レベルである。いずれの供試体においても荷重レベルで0.7程度までは、打設面、型枠底面ともにひずみの分布形状がほぼ左右対称になっており、荷重の偏心は生じていないものと考えられる。しかしながら、荷重レベルが0.7を越えると、ひずみ分布は左右非対称にな

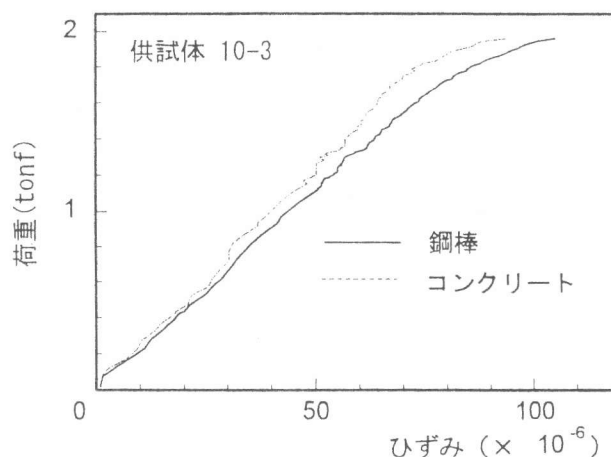


図-3 d=10cm供試体の鋼棒とコンクリートのひずみ

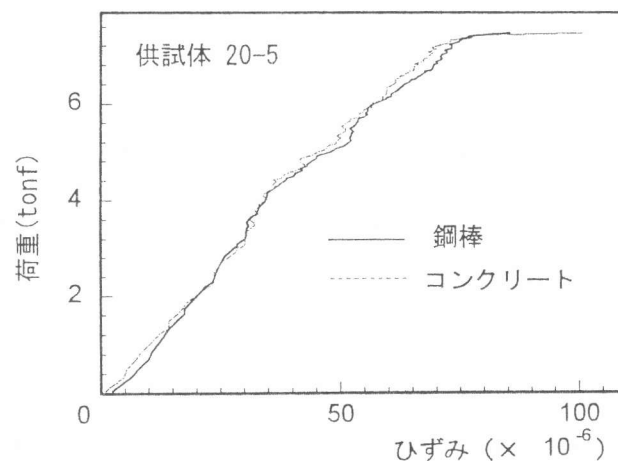


図-4 d=20cm供試体の鋼棒とコンクリートのひずみ

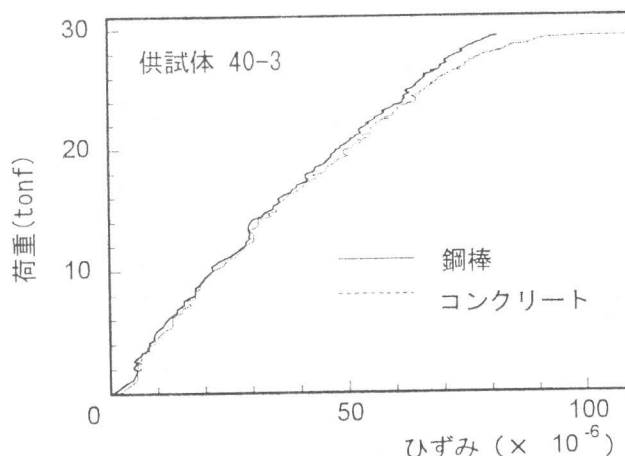


図-5 d=40cm供試体の鋼棒とコンクリートのひずみ

った。これは（微細）ひびわれが供試体断面内で対称に進展せずに、片側から進展するためであり、通常の載荷方法では避けられない現象である。また、試験全体を通じて、打設面と型枠底面のひずみを比較すると、打設面の方が大きくなる傾向が認められ、これは荷重の偏心よりむしろブリージングあるいは材料分離によって打設面の方が底面に比べて脆弱であるためと考えられる。

3.2 コンクリートのひずみ性状

表-2には最大荷重に達する直前に計測されたコンクリートひずみの最大値ならびにその時のひずみ進展長さを示す。ここで、ひずみ進展長さとは、ひずみ分布図において切込みの先端からひずみ勾配が0になる位置までの距離である。（図-6～図-11参照）

本実験の範囲では、最大荷重時直前に計測されたコンクリートの最大ひずみは、供試体寸法にほぼ比例して大きくなった。この現象は、破壊時のひびわれ開口変位が供試体寸法とともに増大するとした三橋等[5]の報告に一致するものと考えられる。

一方、図-6～図-11のひずみ分布からわかるように、最大荷重直前においても $d=20\text{cm}$ および $d=40\text{cm}$ 供試体では供試体中央部にひずみが一定となる（ひずみ勾配が0となる）区間が明確に現れたのに対して、 $d=10\text{cm}$ 供試体ではそのような区間は現れれず、ひずみの分布形状は放物線状になった。そのため、表-2に示した $d=10\text{cm}$ 供試体のひずみ進展長さは、供試体幅（8cm）の1/2を若干上回る結果になっている。また、 $d=20\text{cm}$ と $d=40\text{cm}$ 供試体のひずみ進展長さを比べると、 $d=40\text{cm}$ の方が大きくなってはいるが、かならずしも

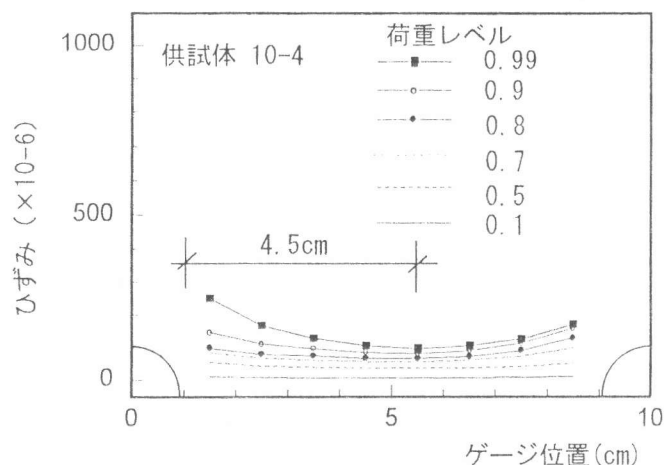


図-6 $d=10\text{cm}$ 供試体の打設面のひずみ

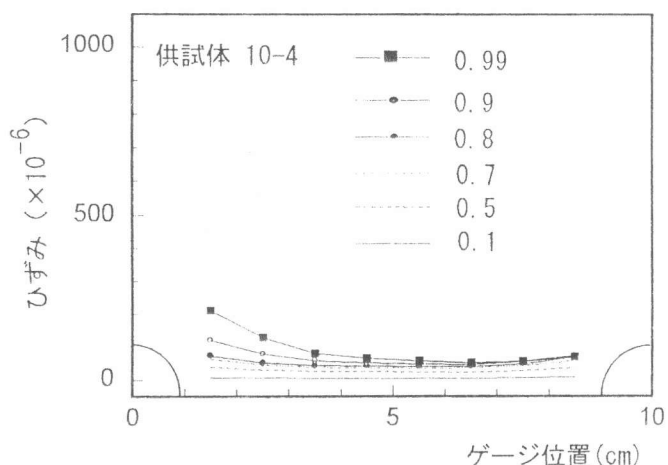


図-7 $d=10\text{cm}$ 供試体の底面のひずみ

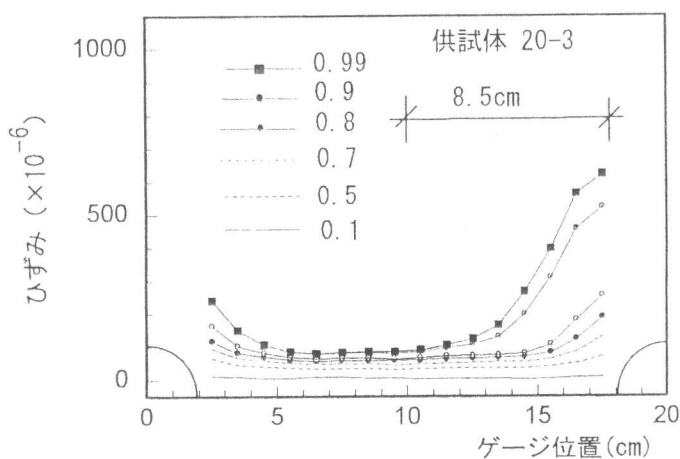


図-8 $d=20\text{cm}$ 供試体の打設面のひずみ

供試体寸法に比例しているわけではなく、平均で $d=20\text{cm}$ 供試体の1.5倍程度であった。このことは、引張供試体における最大荷重に至るまでの破壊（微細ひびわれ）の進展挙動は供試体寸法の影響を受けること、を示しているものと考えられる。

3.3 引張強度の寸法効果

図-12には供試体寸法と引張強度の関係を示す。引張強度は鋼材の分担力を差し引いた引張荷重を供試体中央断面のコンクリートの断面積で除したものである。なお、最大荷重時における鋼材の分担分は図-3～5に示した鋼材ひずみから計算すると、全荷重に対して8%程度であった。同図には過去に筆者らが本研究と同様の供試体および載荷方法によって得たデータも併記した[6]。同図により、引張強度に明確な寸法効果のあることがわかる。しかしながら、ほぼ同一の実験であるにもかかわらず寸法効果の程度（寸法増大にともなう強度低下の程度）は必ずしも一致していない。この原因については、現在のところ不明である。

4. まとめ

本研究では、寸法の異なる供試体を用いて一軸引張試験を行い、引張強度ならびに供試体破断時のひずみ性状を計測した。実験で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 本実験で採用した載荷方法は、引張荷重を確実にコンクリートに伝えることができ、しかも最大荷重の70%程度までは荷重の偏心も小さかった。
- (2) 試験全体を通して、供試体の打設面の方が型枠底面よりひずみが大

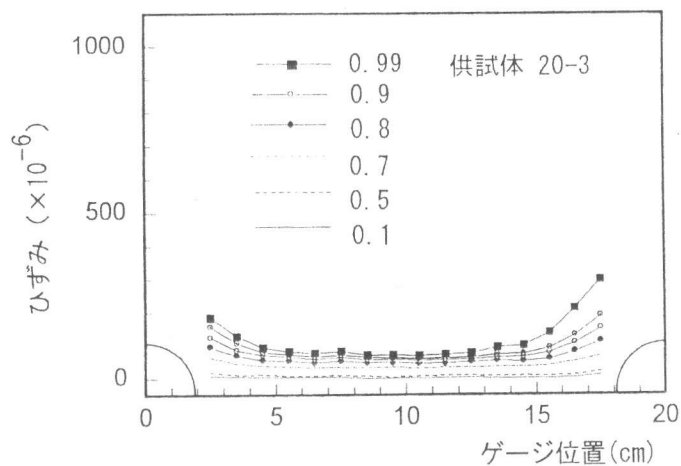


図-9 $d=20\text{cm}$ 供試体の底面のひずみ

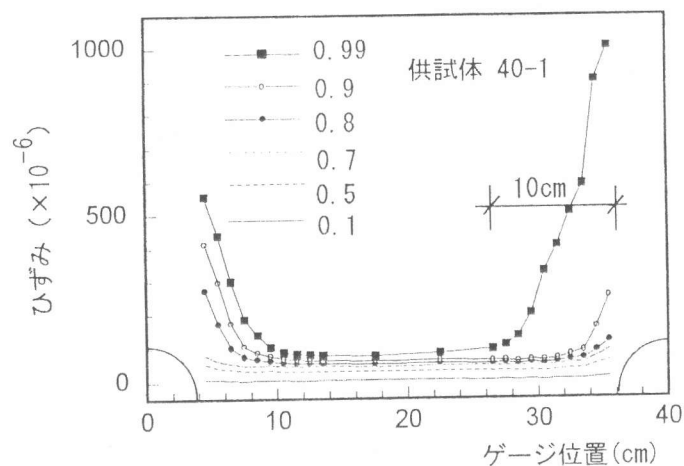


図-10 $d=40\text{cm}$ 供試体の打設面のひずみ

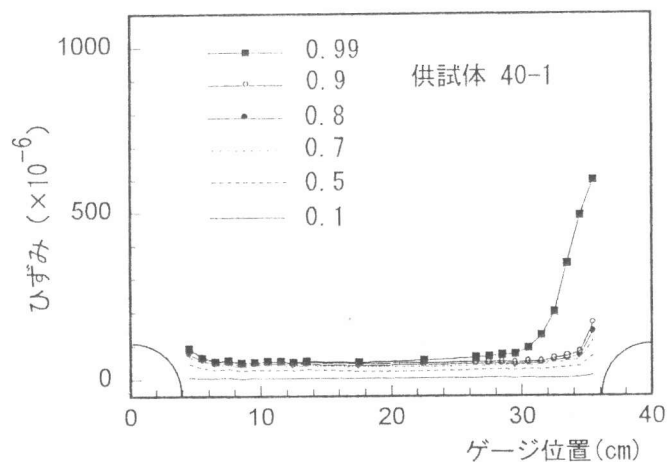


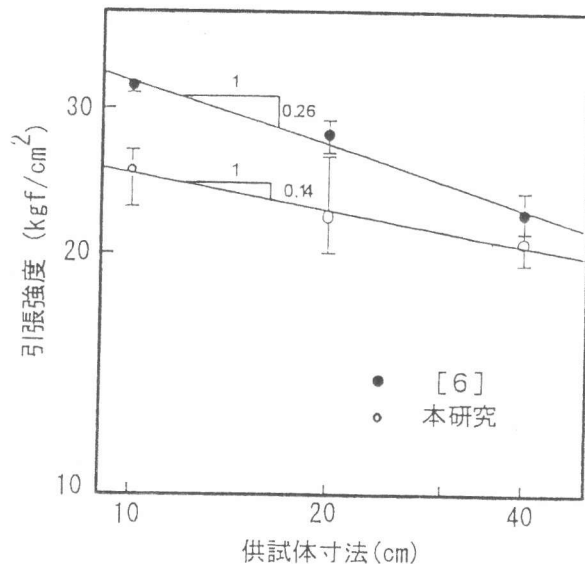
図-11 $d=40\text{cm}$ 供試体の底面のひずみ

きくなる傾向が見られた。

(3) 供試体破断時直前のコンクリートひずみの最大値は、ほぼ供試体寸法に比例して大きくなった。しかし、ひずみの進展長さは供試体寸法の増大にともない長くなる傾向が見られたが、かならずしも寸法に比例してはいなかった。

(4) 本実験の範囲では引張強度に明確な寸法効果が認められた。

現在までに寸法効果の原因として様々なメカニズムが考えられ、すでにモデル化されているものもある。今後はそれらのモデルに基づき数値解析等により本実験をシミュレートすることで、そのメカニズムが寸法効果に対してどの程度影響しているのかを明らかにしてゆく予定である。



図一 1 2 引張強度の寸法効果

表一 2 実験結果

供試体 No	引張強度 kgf/cm ²	最大歪 x10 ⁻⁶	進展長さ cm
10cm-1	27.1	210	4
2	24.9	217	5
3	23.4	282	6.5
4	24.3	251	4.5
5	23.7	225	4.5
6	27.6	299	4.5
平均	25.2	214	4.8
20cm-1	22.1	707	8.5
2	18.2	497	10.5
3	24.4	623	8.5
4	24.1	433	-
5	22.4	450	13
平均	22.2	542	10.1
40cm-1	21.8	1007	10
2	21.6	646	10
3	21.9	1310	18
4	17.5	1009	13
平均	20.7	993	12.8

参考文献

- [1] Bazant, Z.P.: Size Effect in Blunt Fracture : Concrete, Rock, Metal, J. Engineering of Mechanics, ASCE, Vol.110, No.4, pp.518-539, 1984.
- [2] Tang, T., Shah, S.P. and Ouyang, C.: Fracture Mechanics and Size Effect of Concrete in Tension, J. Structural Engineering, Vol. 118, No.11, pp.3169- 3185, 1992.
- [3] Carpinteri, A., Chiaia, B. and Ferro, G.: Size Effects on Nominal Tensile Strength of Concrete Structures : Multifractality of Material Ligaments and Dimensional Transition from Order to Disorder, Materials and Structures, Vol.28, pp. 311-317, 1995.
- [4] 内田裕市、六郷恵哲、小柳 洽：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討、土木学会論文集、No.42/V-16, pp.101-107, 1991.
- [5] 三橋博三、金 鎮根、 桐越一紀、 成田健：コンクリートの破壊力学特性と寸法効果に関する実験的検討、コンクリート工学論文集、Vol.4, No.2, pp.57-67, 1993.
- [6] Nguyen van Loi, 内田裕市、六郷恵哲、小柳 洽：コンクリートの引張強度の寸法効果、土木学会第50回年次術講演会講演概要集、第5部、pp.694-695, 1995.