

[2034] RC 柱・はり外部接合部におけるはり筋定着機構 に関する解析的研究

正会員 ○角 徹三（豊橋技術科学大学建設工学系）
宮地省次（豊橋技術科学大学大学院）

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱・はり外部接合部におけるはり主筋の定着性状については、近時実験的研究が積み重ねられてきつつあるが、定着性状と接合部コア内のせん断変形状が複雑に絡み合い力の伝達機構を解明するまでには至っていない。柱・はり接合部内の内部接合部応力状態を解析的に検討する研究はもっぱらはり主筋が上下とも通し配筋されている部材に限定されている[1]。本研究は、はり主筋が接合部内で曲げ下げ定着される外部接合部の応力状態を解析する第一歩として、Jirsa 等が行った接合部内での鉄筋の定着性状を知るために行った実験[2]の試験体を解析対象として選び、2次元の非線形有限要素解析を行った。付着剛性の大きさ及び与え方、鉄筋曲げ半径及び曲げ角度を解析パラメータとして、それぞれ、実験結果との比較検討を試みた。

2. 解析対象

2.1 Jirsa 等の実験

Jirsa 等の実験は主に荷重と鉄筋のすべり量とを測定し、付着長さ・鉄筋曲げ内法半径・鉄筋曲げ角度がそれぞれ曲げ鉄筋の定着性能に与える影響を調べることを目的としている。供試体は、柱・はり接合部をモデル化したもので代表的な形状を図-1に示す。ここで、図中点線の部分は付着が断たれ、鉄筋曲げ部及び余長部のみ影響を調べている。鉄筋の

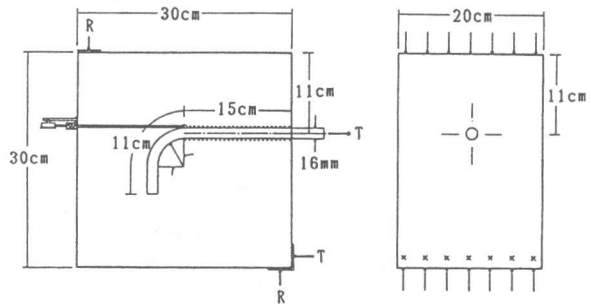


図-1 Jirsa等による実験供試体

すべり量は図にも示すように、ワイヤーを鉄筋軸に平行に取り付け定着筋と反対側のコンクリート表面まで延長し、この動きを変位計で測定している。実験結果を要約すると以下ようになる。

- ①鉄筋径に対する付着長さの比が等しければ、
 - ・曲げ半径が小さいほど与えられた応力でのすべりが大きい。
 - ・曲げ角度が大きいほど与えられた応力でのすべりが大きい。
- ②曲げ部と余長部分からなる定着鉄筋では、すべりのほとんどは曲げ部で生じる。

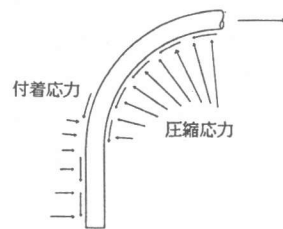


図-2 曲げ鉄筋に働くと推定される応力状態

- ③付着長さがある一定レベル以上ならば、直線定着鉄筋と曲げ定着鉄筋との間に強度差はほとんど現れない。

Jirsa 等は、①のようになる原因の一つとして図-2に示すように、鉄筋曲げ部内側及び余長部外側ではコンクリートからの圧縮力が働き付着抵抗が有効に作用するが、逆にその反対側の部分では鉄筋とコンクリートの肌離れが生じ付着抵抗が弱まり全体として直線定着鉄筋に比べてすべり剛性が弱くなる、と説明している。

2.2 解析モデル

鉄筋については弾塑性論に基づき Von Misesの降伏条件によってモデル化し、コンクリートについては等価一軸歪に基づいた Darwin&Pecknoldの直交異方性理論によるモデル[3]を用いた。鉄筋・コンクリートとも二次元平面応力問題として扱っている。さらに、両者の付着作用には2つの直交バネからなるボンドリンクを用いた。バネ剛性については、鉄筋軸に垂直な方向(V方向)は図-3に示すように鉄筋とコンクリートが肌離れを起こす場合には0、逆に押し合う場合には 10^{17} kgf/cm³(実質的には ∞)とした。鉄筋軸方向(H方向)は、図-4に示すように鉄筋とコンクリートのすべりに対して正負対称な bilinear 型とするもの(モデル1)と、図-4を基本としながらも、鉄筋とコンクリートが肌離れを起こしたときは鉄筋軸に垂直な方向(V方向)の鉄筋とコンクリートとの相対変位の大きさに応じて鉄筋軸に沿う方向(H方向)の剛性を図-5のように低減させるもの(モデル2)の2種類がある。

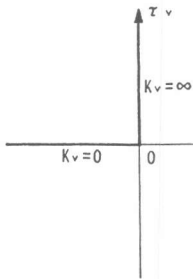


図-3 τ_v - S_v 関係(鉄筋軸に垂直方向)

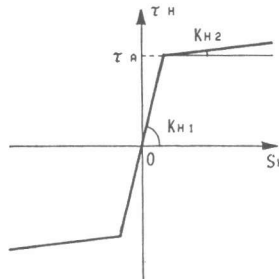


図-4 τ_H - S_H 関係(鉄筋軸方向)

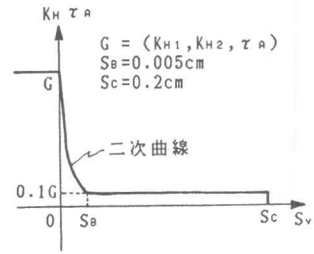


図-5 鉄筋軸に垂直方向
相対変位による剛性の低減

図-1に示した実験供試体を二次元平面応力問題としてモデル化し、8節点アイソパラメトリック要素(積分点4点)によって図-6に示すように要素分割した。当然のことながら、解析でも水平のみ込み部の鉄筋とコンクリートの付着は断られている。鉄筋及びコンクリートに与えた材料特性を表-1に示す。これらの値は Jirsaの実験で読み取れる限り実験で使用了材料特性に合わせている。解析対象鉄筋は16mmの異形鉄筋である。なお、荷重は裸部分の鉄筋応力が降伏応力に達するまで行った。

2.3 解析パラメータ

本研究で検討した解析パラメータは、①付着剛性 K_H の大きさ、②付着剛性の与え方、③鉄

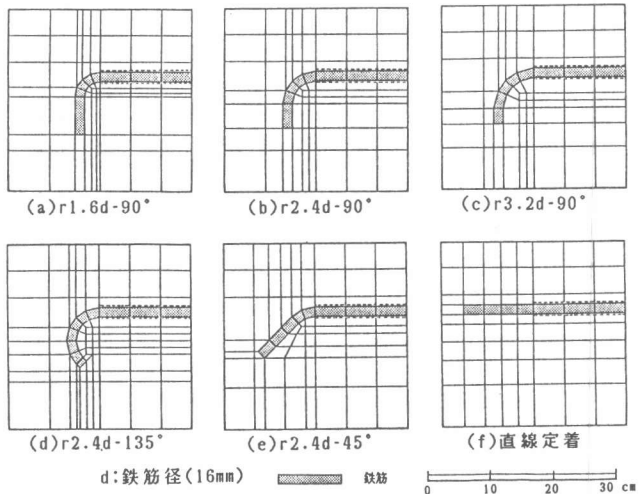


図-6 要素分割図

表-1 材料特性値

	一軸強度 (kgf/cm ²)	最大圧縮 応力時歪	ポアソン比	初期接線弾性 係数(kgf/cm ²)
コンクリート	$f_c = -316.0$ $f_t = 35.0$	$\epsilon_{cu} = -0.0025$	$\nu_c = 0.2$	$E_c = 290000.0$
鉄筋	$F_y = 4218.0$	—	$\nu_s = 0.3$	$E_s = 2100000.0$

筋曲げ内法半径、④鉄筋曲げ角度の4つである。

①を検討するための解析対象は図-6(b) [定着長7.2d, 曲げ内径2.4d] についてのみ行い、ボンドリンクはモデル1を用いた。具体的な付着剛性の大きさ及び与

え方を表-2に示す。表中N0.1はすべりが全く生じない場合を想定し、N0.2は全く付着がなく、曲げ部鉄筋の幾何学的な形状による抵抗を想定している。N0.3の剛性値は角等が行った鉄筋まわりのコンクリートの拘束が比較的大きい場合の実験結果[4]から得られたものである。N0.4,5,6の剛性値はJirsaが標準試験体として選んだ図-6(f)のストレート定着の実験の平均付着応力とすべりの関係から換算して求めたものである。

②付着剛性の与え方とは、2.1でJirsa等が指摘していることを参考に、図-7に示すように曲げ部内側及び余長部外側にのみN0.4と等しい付着剛性値を与え、曲げ部外側・余長部内側の剛性を0として解析を行ったものである(N0.5, N0.6)。N0.6は第二勾配を無視し第一勾配のみの付着剛性を持つとして計算したものである。

③鉄筋曲げ内法半径については $r=1.6d, 2.4d, 3.2d$ の3種類について、④鉄筋の曲げ角度については $\theta=0^\circ$ (ストレート定着), $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の4種類について解析を行った(図-6参照)。③④を解くときの付着剛性は表-3のN0.4の値を基準とし、ボンドリンクはモデル1, モデル2の両方について行った。これらの解析ではいずれも曲げ部以降の総定着長さは $L=7.2d$ であり一定としている。

3. 解析結果

解析結果を、解析パラメータごとに、鉄筋曲げ部近傍のコンクリートの主応力及び荷端鉄筋応力-すべり関係の2点について比較検討し、必要に応じて鉄筋のすべり分布についても言及する。なお、コンクリートの主応力図はすべて鉄筋応力で $703\text{kgf/cm}^2 (0.17F_y)$ という低応力時のもので、コンクリートに引張ひびわれが発生する直前であり、弾性応力状態を示していると考えてさしつかえない。

3.1 付着剛性の大きさによる影響 [定着長7.2d, 曲げ内径2.4d, モデル1使用]

図-8は鉄筋のすべり分布の解析結果を示したものである。付着剛性が弱まるにつれ同一荷重でのすべり量が大きくなり、すべり領域も全体に及ぶ。Jirsa等の実験結果では、すべりはほとんど曲げ部で生じ余長部に及ばないと指摘されているが、同一の付着剛性値

表-2 付着剛性の大きさ及び与え方

NO.	付着剛性(kgf/cm ²)		τ_a (kgf/cm ²)	付着剛性の与え方
	第一勾配: K_{H1}	第二勾配: K_{H2}		
1	1×10^7	—	—	完全付着
2	0	—	—	付着なし
3	20000	1100	100	全面付着
4	3250	500	130	全面付着
5	3250	500	130	曲げ部内側・余長部外側付着
6	3250	—	—	曲げ部内側・余長部外側付着

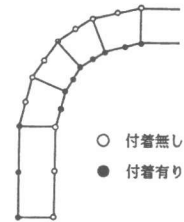


図-7 曲げ部内側・余長部外側付着

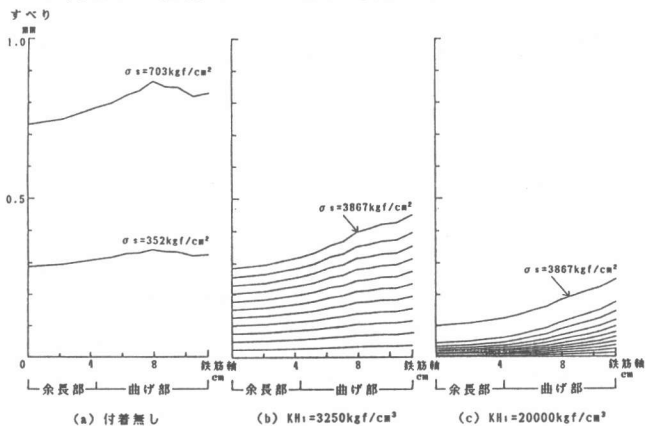


図-8 付着剛性の大きさの違いによるすべり分布図

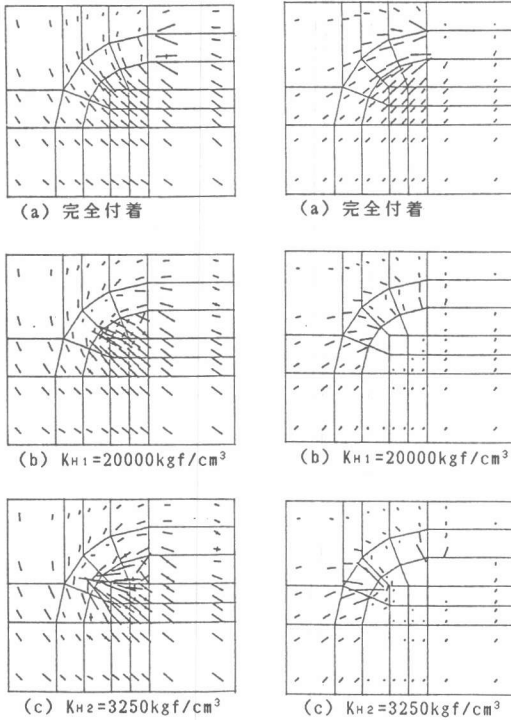


図-9 付着剛性の大きさの違いによる圧縮主応力図

図-10 付着剛性の大きさの違いによる引張主応力図

を全領域のボンドリンクに使用する限り、解析的に実験結果を再現することには無理があると思われる。図-9、図-10にコンクリートの圧縮及び引張主応力図を示す。完全付着の場合は載荷点から反力点への力の流れがスムーズであるが、付着剛性が小さくなるに従い乱れが生じる。すなわち、鉄筋曲げ部起点近傍の主応力方向が反転し、鉄筋軸に垂直方向の引張主応力が発生・増大し、結果的には鉄筋に沿ったひびわれが生じる。曲げ部内側のコンクリートの主応力の値も付着剛性が小さいほど大きくなる。図-11は鉄筋応力-すべり関係を示したもので、すべり剛性の大きさも付着剛性に対応しており、付着無しではすべり剛性も極端に低下する。Jirsa等の実験曲線は、付着剛性値 20000及び 3250kgf/cm³のいずれよりも低いすべり剛性を示す。実験曲線に無理に合わせるように付着剛性値を逆算すると 1200kgf/cm³程度となる。

3.2 付着剛性の与え方による影響 [定着長7.2d, 曲げ内径2.4d, KH1=3250kgf/cm³, モデル1使用]

図-12に図-7のようにボンドリンクを設定したときの鉄筋応力-すべり曲線を示す。これにより、初期すべり剛性については解析値と実験値が非常に良く合ってくるのが判る。さらに、

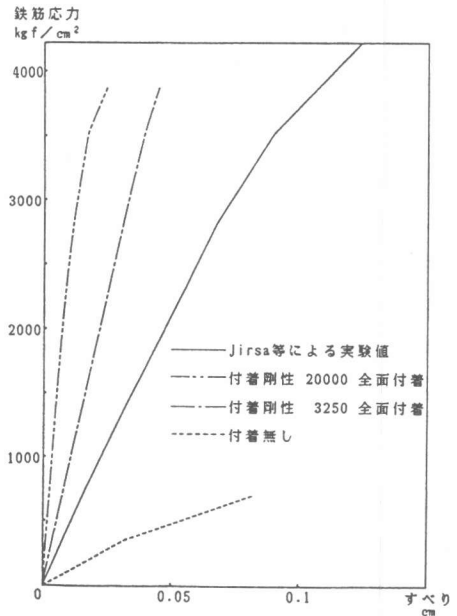


図-11 付着剛性の大きさの違いによる鉄筋応力-すべり曲線

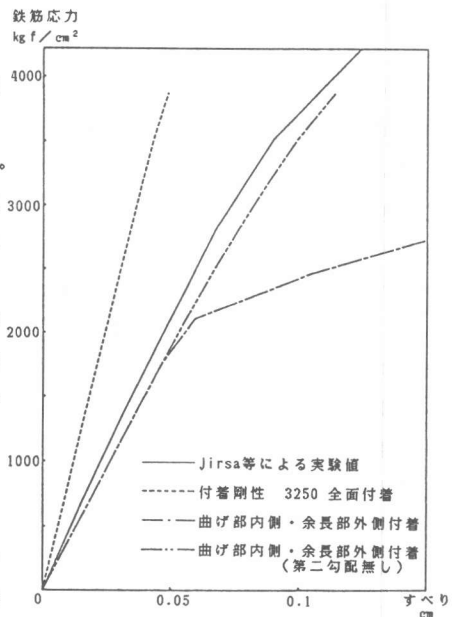


図-12 付着剛性の与え方の違いによる鉄筋応力-すべり曲線

図-4の第二勾配を無視して K_{H1} の剛性を保持しつづけるとした解析結果は、高荷重域に至るまで実験結果を再現していることが示されている。以上のことから曲げ定着域の付着すべりの解析では付着剛性値そのものをどう設定するだけでなく、ボンドリンクをどう配置するかが決定的に重要であるということが指摘できる。

3.3 曲げ半径の影響 [定着長7.2d, $K_{H1}=3250\text{kgf/cm}^2$, 全面付着, モデル1及びモデル2使用]

図-13、14は曲げ半径を3種類 ($r=1.6d, 2.4d, 3.2d$) に設定した場合のコンクリートの圧縮主応力及び鉄筋応力-すべり曲線の解析結果である。図-13より曲げ半径が小さくなるほど、鉄筋曲げ部内側の応力が大きくなっている。図には示されていないが、曲げ半径が小さくなるほど鉄筋位置のコンクリートには鉄筋軸に垂直な引張応力が大きくなり引張ひびわれが発生し、付着剛性を小さくした場合と同じ現象がみられた。しかし、モデル1の解析による鉄筋応力-すべり関係のみを限り、曲げ半径の違いによる影響はほとんどみられず、かつ直線定着との差異もみられない。モデル2による解析結果をみると高荷重域になって直線定着のものよりすべり剛性が低下し始めるが、曲げ半径の差異の影響は明確には指摘できない。Jirsa等の実験結果では曲げ半径が小さくなるほどすべり剛性が低下することがはっきりと示されており、定性的にも実験と解析が対応していない。この理由の一つとして、実験ではコンクリートのブリージングの影響で曲げ筋下端に空隙が生じ付着が悪く、この程度が曲げ半径が小さいほど顕著になることが挙げられよう。

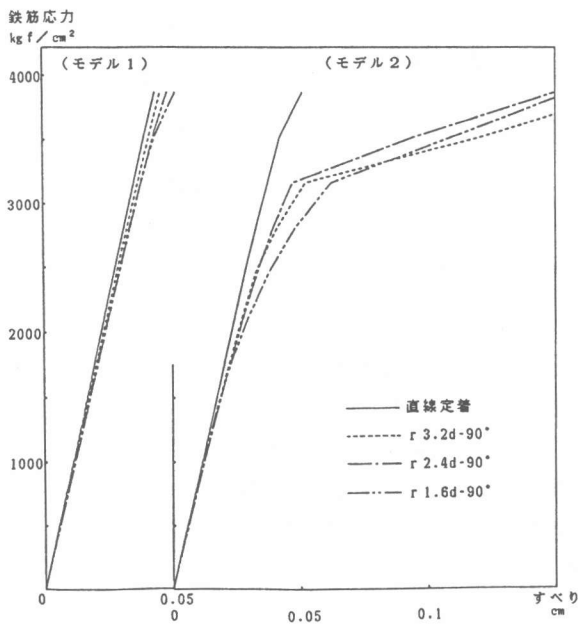
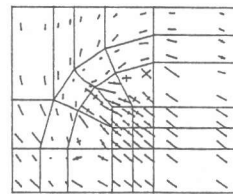
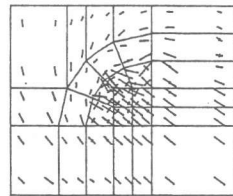


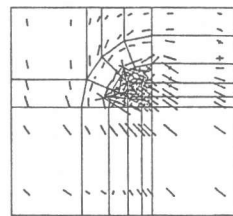
図-14 曲げ半径の違いによる鉄筋応力-すべり曲線



(a) $r = 3.2d-90^\circ$



(b) $r = 2.4d-90^\circ$



(c) $r = 1.6d-90^\circ$

図-13 曲げ半径の違いによる圧縮主応力図

3.4 曲げ角度の影響 [定着長7.2d, $K_{H1}=3250\text{kgf/cm}^2$, 全面付着, モデル1及びモデル2使用]

図-15、16は曲げ角度を3種類 ($45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) に設定した場合のコンクリートの圧縮主応力及び鉄筋応力-すべり曲線の解析結果である。図-15の鉄筋曲げ部内側のコンクリートの応力に注目すると、曲げ角度が大きくなるほどコンクリートの二軸圧縮領域が鉄筋の曲率をもつ

た全域に及んでいる。同様に、鉄筋軸に垂直に生じる引張主応力についても曲げ角度が大きくなるほど鉄筋の曲率を持った全域に及んでいる。鉄筋応力-すべり関係についてみると、モデル1の解析では曲げ角度の影響はまったくみられず、直線定着のものと同様の結果となるが、モデル2の解析では高荷重域になると明確な差が生じ、直線定着が剛性を保持しているのに対し曲げ定着したものは曲げ角度が大きいほどすべり剛性の低下も顕著になっている。この解析結果は、定性的には Jirsa等の実験結果と一致した。このことは少なくとも曲率を持って定着された鉄筋については、肌離れによる付着剛性の低下を考慮することの重要性を示唆するものと思われる。

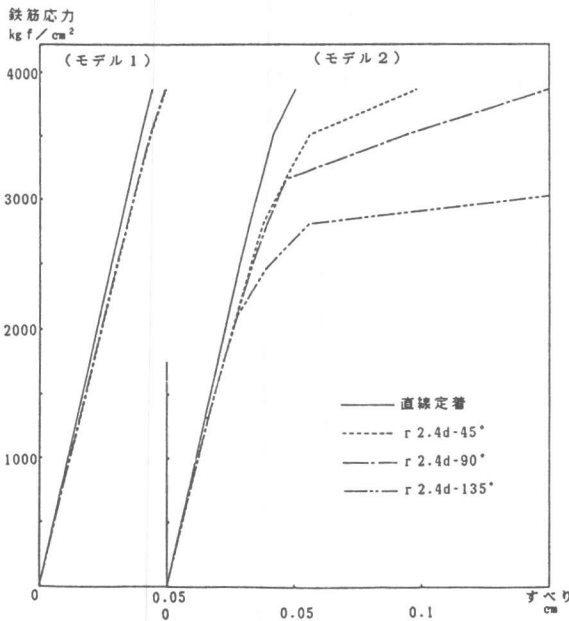
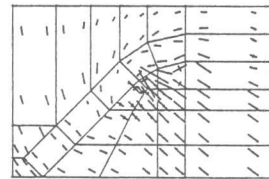
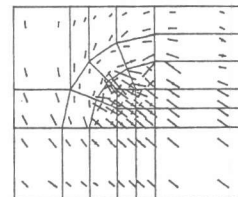


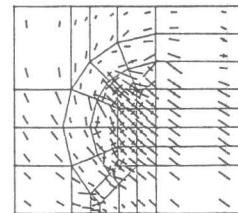
図-16 曲げ角度の違いによる鉄筋応力-すべり曲線



(a) $r 2.4d-45^\circ$



(b) $r 2.4d-90^\circ$



(c) $r 2.4d-135^\circ$

図-15 曲げ角度の違いによる圧縮主応力図

4. まとめ

以上のことから、ボンドリンクに与える付着剛性の大きさ及びその与え方が解析値に大きな影響を与えることがわかる。又、曲げ鉄筋の定着性状を解析する場合、曲げ半径及び曲げ角度の影響は従来のまっすぐな鉄筋によく用いられている、鉄筋軸方向のすべり量だけに依存した付着特性では表現し得ない。少なくとも鉄筋とコンクリートの肌離れ状況などの要因を踏まえたものでなければならないと考えられる。本研究は本学4年生柴田君の努力に負うところが大きい、深く感謝する。なお本研究は昭和61年度文部省科学研究補助金一般Cによって遂行することができたことを付言する。

<参考文献>

- [1]野口博,他: RC柱・はり接合部の非線形有限要素解析、日本建築学会大会号、昭和56年9月、p.p.1455-1458
- [2]J.Minor and J.O.Jirsa: Behavior of Bent Bar Anchorages、ACI Journal、April 1975、p.p.141-149
- [3]D.Darwin and D.A.Pecknold: Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete、ASCE、EM2、April 1977、p.p.229-241
- [4]森田司郎、角徹三: 繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究、日本建築学会論文報告集、第229号、昭和50年3月、p.p.15-24