

鋼逆 π 形箱桁橋（開断面箱桁橋）架設系の 耐荷性能に関する研究

玉田 和也*

一般的に開断面箱桁橋と称される鋼逆 π 形箱桁橋では、コンクリート床版が硬化する前の架設時構造系の耐荷力が問題となる。そのため、鋼逆 π 形箱桁断面の耐荷力性能を把握することが重要になってくるが、鋼逆 π 形断面の耐荷力性能に関する実験的研究は行われていない。そこで、本研究は実験により鋼逆 π 形断面の耐荷力特性を明らかにした。次に、パラメトリック解析により構造パラメータと耐荷性能の関係を明らかにするとともに、既往の研究で提案されている一軸対称 I 形断面プレートガーダーの曲げ耐荷力算定式を拡張することにより鋼逆 π 形箱桁橋の曲げ耐荷力算出法の提案を行い、実験結果および解析結果との比較によってその妥当性の検証を行った。

キーワード：鋼逆 π 形箱桁橋，開断面箱桁橋，耐荷力実験，耐荷性能

はじめに

本研究は大阪大学大学院西村教授(当時)、小野助教授のご指導のもと、開断面箱桁研究会(災害科学研究所)を通して実施したものである。ここでは研究の背景について報告するものとし、具体的な研究成果については、発表した文献を参照されたい。

1. 鋼橋の変遷

我が国の橋梁分野において、一時期は合成桁橋が主流であり、1959年の「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」¹⁾の改訂に伴い、コンクリート床版にプレストレスを導入する連続合成桁橋が多数建設されるようになった。しかし、1973年に改訂された「道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編」²⁾に、プレストレスしない連続合成桁が認められ、それを機にプレストレスしない連続合成桁へと変遷していった。合成桁は、床版の持つ機能が輪荷重を鋼桁

へ伝達させる版作用であることに加え、鋼桁と一体となって主構造を形成して桁作用も分担することから、合理的で経済的設計が可能な構造形式として1970年代末には主要鋼橋の40%以上にのぼり、年間300橋を越えるほど急速に発展した。ところが、当時の基準では床版支間が大きい床版にも薄い版厚が採用され、大型車両交通量の増加と過積載による輪荷重の増大に適切な強度を保持できず、鉄筋コンクリート床版にひび割れ損傷が多発した。しかし、その維持・補修が困難であることから、合成桁の建設は急速に減少した^{3,4)}。また、鋼桁と対傾構などの横補剛部材の溶接止端部に生じる疲労損傷も報告されるようになった⁵⁾。これらの経緯もあり、床版支間を3m以下として鋼桁本数を多く配置するとともに、RC床版を厚くした上で鉄筋の許容応力度を低減する設計法の改訂がなされた。主桁の設計法についても、床版に輪荷重を受け持つ版作用のみを期待し、桁作用を期待しない非合成桁設計法が主流となった。このような考え方が、中小規模の鋼橋の標準的な設計思想として20年間認知され、厚いRC床版と比較的密に配置した薄肉多補剛の鋼主桁が定着した。

*技術部設計課課長

しかし、近年の建設コスト縮減と合理化、省力化の要求が相まって、これまでの桁橋の構造形態を改めて見直し、新しい合成構造の研究・開発や、過去の橋梁形式の見直しが行われるようになり、1990年頃からは旧日本道路公団を中心として鋼桁橋の合理化設計に向けての技術的検討が進められている。その中には鋼2主桁橋、連続合成桁橋、細幅箱桁橋、鋼逆 π 形箱桁橋（一般に「開断面箱桁橋」と呼ばれているが、ここでは「鋼逆 π 形箱桁橋」と称する。）、波型ウェブPC橋、合成トラス橋等、多彩な橋梁形式が含まれているが、それぞれの構造形式ごとで特長を活かすための更なる開発研究や適用支間の系統的整理が求められている。これらは、ここ10年の間に注目されるようになった橋梁形式であり、鋼逆 π 形箱桁橋についても、近年まで本構造を採用した橋梁の施工例は、海外での実績はあるものの⁶⁾、国内では僅かであった。

2. 鋼逆 π 形箱桁橋の変遷

鋼逆 π 形箱桁橋のわが国での歴史は1960年代に遡る。第2次世界大戦後の戦災復興が一段落した1954年頃を節目として世界との技術格差を埋めるための努力が各方面で非常な熱意を持って行われた。並行して産業や経済の発展に迫りつために大規模な土木建設事業が全国的に展開し、その象徴としての東京オリンピックが開催されたのが1964年であった。当時は戦後の空白を埋めるための技術的努力と、より合理的、経済的な新工法の開発という課題を解決すると同時に、大量の建設工事を推し進める必要があった。そのため、橋梁建設工事においても事故や失敗が目立つようになってきていた。

当時のこのような背景の中で、合理的橋梁形式として海外から紹介され、国内でも建設され始めた橋梁形式の一つとして鋼逆 π 形箱桁橋があった。そして導入されたばかりの鋼逆 π 形箱桁橋についても失敗は免れず、腹板の傾斜によって下フランジに発生する橋軸直角方向水平力による下フランジの座屈やコンクリート床版打設時の不安定現象による落橋事故が発生した⁷⁾。これらの事故に対して原因解明のために現地調査、数値計算、模型実験などが行われ、鋼逆 π 形箱桁橋における架設

系における対傾構および上横構の重要性を認知することとなった⁸⁾。同時期に鋼逆 π 形箱桁橋を連続合成桁に適用する試みが堀之内橋⁹⁾(1965年竣工)で行われており、対傾構や上横構の設計方針を明確化して仮組立時に支点支持状態による載荷試験や施工中の各種計測を行うなど試験施工としての詳細な検討と施工を行った例もあった。しかしながら、1970年代の高度成長期を迎え鋼逆 π 形箱桁橋はその後国内で採用されることはほとんどなかった。その理由としては、上横構に加えて床組が必要であり経済的メリットが十分発揮されなかったこと、床版打設時の安定確保への配慮が必要であることなどが考えられる。また、施工の煩雑さや施工精度の問題、コンクリート床版の損傷事例の多発などにより連続合成桁の採用が控えられるようになったことも一因であったであろうと考える。

3. 合理化橋梁としての鋼逆 π 形箱桁橋

現在は一層の合理化・省力化を図り、経済性を向上させる橋梁形式として、鋼逆 π 形箱桁橋は再び注目されるようになり、近年では千歳JCTのCランプ橋、福岡高速5号線、第二京阪道路の木津川橋等、幾つかの行政機関において本橋梁形式が採用されてきている。この理由として鋼逆 π 形箱桁橋本来の優位性に加え、鋼・コンクリート合成床版の開発、解析・設計技術の向上、その他の技術の進歩及び社会的背景を挙げることができる。具体的には以下の通りである^{10),11),12),13),14)}。

(1) 逆 π 形断面の採用

- ① 開断面化による上フランジ及び上フランジ側縦リブの鋼重を削減できる。
- ② 腹板の傾斜により下フランジの有効幅の観点から合理的な断面構成となる。
- ③ 腹板の傾斜により道路景観上の配慮に対する優位性を有する。
- ④ 腹板の傾斜により下部構造のコンパクト化が図れる。

(2) 鋼・コンクリート合成床版の採用

- ① 床版支間の拡大により床組を省略できるため鋼桁の材片数の省略や施工性の向上が可能

能となった。

- ② 床版支間の拡大により鋼桁構造の簡素化によって疲労耐久性の向上が図れる。
 - ③ 耐久性に優れた床版の採用によりライフサイクルコストを低減できる。
 - ④ 型枠・足場を省略することが可能となり現場施工の省力化、安全性向上を図ることができる。
 - ⑤ 底鋼板を架設時に補強材として機能させることにより経済性、安全性の向上を図れる。
- (3) 連続合成桁としての設計
- ① コンピュータ等の発達により解析の実用性が飛躍的に伸び、実際の挙動を反映した合理的な設計が可能となった。
 - ② 合成桁の床版に輪荷重走行疲労試験機によって耐久性を保証された床版を使用することで構造物としての信頼性が向上した。
 - ③ 合成桁化することで鋼材を軽減できる。

4. 鋼逆π形箱桁橋の力学的問題点

鋼逆π形箱桁橋の主な特徴は、上下フランジ及び左右腹板 4 辺が鋼製の従来の箱桁とは異なり、

上フランジが床版を兼ねるコンクリート製の断面であることである。架設時には開断面であり、鋼断面は床版が完成するコンクリート硬化までの死荷重を支え、コンクリート硬化後に完全な箱断面が形成され閉断面となる。従来の箱桁ではフランジ幅が有効幅を超える部分があるため断面に無駄があり、またフランジの板厚が薄いため補剛材が多数必要となる場合等、合理性を欠く場合もあった。しかし本構造では従来の箱桁に比べ縦桁、横桁やブラケットの数が減らせることや、断面を逆π形にして下フランジの面積を小さくできることなどから、材片数や鋼材重量を削減することができる。

一方景観上の配慮及び下フランジの有効幅の観点から、腹板は外側に開いて傾斜している逆π形断面であるが、そのため架設系の開断面時には上フランジ・腹板に自重及びコンクリート重量による橋軸直角方向の水平力が発生し、上フランジと腹板で局部座屈の発生が懸念される。現行の設計では腹板の設計に際して通常の I 形断面桁つまり腹板が垂直な場合と同様に設計されている。また一般的に橋梁の架設時（コンクリート床版打設時や送り出し架設時等）は完成時に比べ、局部座屈、全体座屈及び両者が連成する座屈等が起こる危険

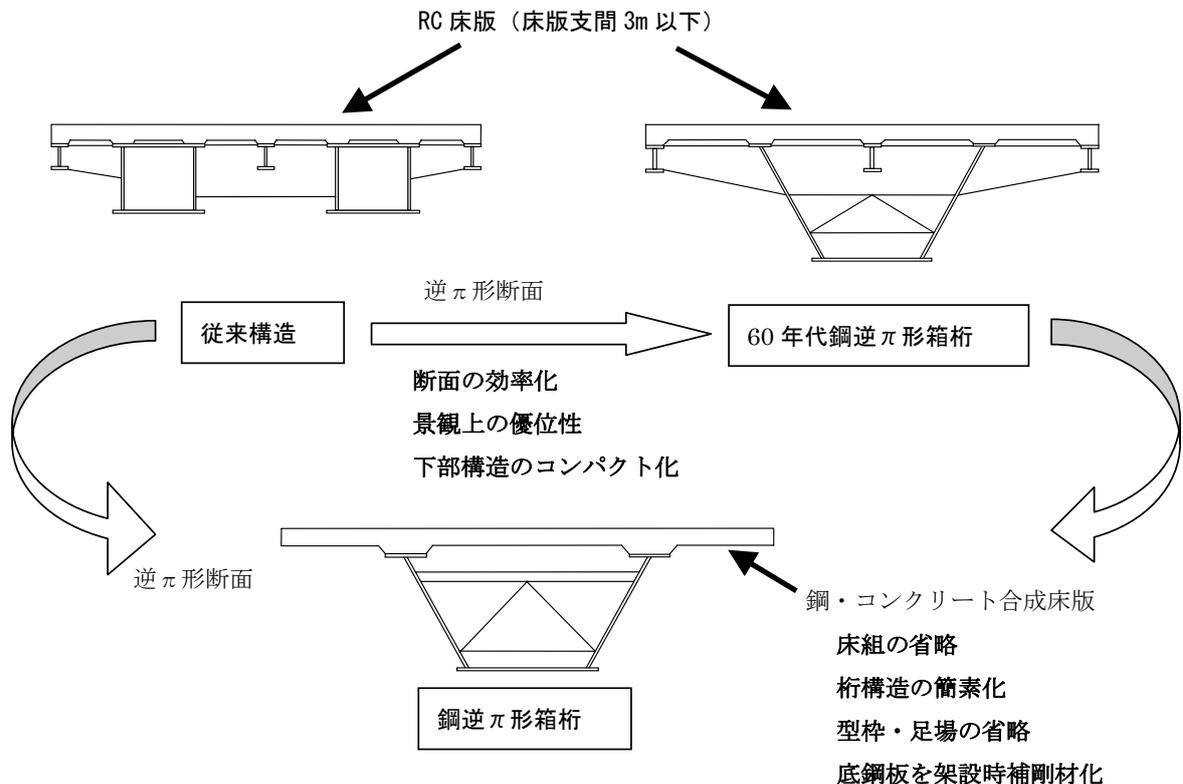


図-1 鋼逆π形箱桁の特徴

性が多く、最も不安定な状態にある。本構造のように架設時は開断面、完成時は閉断面となるような橋梁形式において、その傾向は顕著に表れる。

以上の特徴を有する鋼逆 π 形箱桁橋における力学的問題点を以下に示す。

(1) 架設時構造系の耐荷性能

実設計において、鋼逆 π 形箱桁橋のフランジおよび腹板は道示Ⅱの鋼桁（プレートガーダー）の規定を準用して設計される場合が多い。道示Ⅱの鋼桁の規定は、基本的に二軸対称 I 形断面プレートガーダーの実験結果を基に決められたものである。そして、プレートガーダーの耐荷力については実験的研究および解析的研究が多くなされ、それらの研究から曲げおよびせん断耐荷力算出法も幾つか提案されている。しかしながら、鋼逆 π 形箱桁橋は、一般的なプレートガーダーと異なり腹板が傾斜している場合が多い。よって、道示Ⅱの規定や既往のプレートガーダーの曲げ強度およびせん断強度算定式がそのまま鋼逆 π 形箱桁に適用できるか不明である。

また、鋼逆 π 形箱桁橋架設系の逆 π 形断面ではせん断中心が下フランジの下方に位置するため、桁の全体横ねじれ座屈も考える必要がある。鋼逆 π 形箱桁橋は腹板が外側に傾斜していることにより他の構造形式に比べ圧縮フランジ間隔 B が大きく、面内剛性に比べ面外剛性が高いことが特徴である。既往の研究^{15),16),17),18)}によると、支間長 L と圧縮フランジ間隔 B の比をとった構造パラメータ L/B と全体横ねじれ座屈との関係が報告されている。これらの報告によれば $L/B > 35$ の範囲になると横ねじれ座屈等の全体座屈が起こる危険性があるとされている。本構造を採用した実橋データに基づくと、 $L/B = 7.0 \sim 35.0$ の範囲であり、全体座屈が起こる危険性は薄いと言える。しかし、これらの報告は局部座屈との連成及び曲率との関係が考慮されていないため直線桁でかつ局部座屈が起こらない断面に限られる。上記のように全体座屈に対する検討は幾つか報告されているが、局部座屈に対する検討や本構造で一番懸念されている腹板が斜めに傾斜しているという特徴に関する報告もほとんどなく、他の構造形式に比べ既往の研究は少ないというのが現状である。

(2) 架設時の合成床版底鋼板と鋼桁の協働作用

鋼逆 π 形箱桁橋は鋼逆 π 形桁に合成床版を乗せて箱断面とする構造形式で、鋼桁を架設した後に床版を打設する方式が一般的である。コンクリート硬化前の構造系は、薄肉開断面である鋼逆 π 形桁の特性が支配的であるため、ねじり剛性が低い。この弱点を補うために、合成床版の底鋼板を上フランジと連結し、逆 π 形鋼桁のねじり変形を拘束する工法が採用されている。これは底鋼板の面内せん断剛性に期待する考え方であり、設計上は底鋼板を例えば 1 mm 厚の上フランジに換算し、閉断面としてねじり剛性を評価している。ところが多くの場合、底鋼板と鋼桁との接合部構造の性能と上記の設計上の仮定が整合していることを十分に確認されていないようである。また、底鋼板と主桁の接合にはスタッドボルトが用いられることが多く、底鋼板間のボルト継手に用いられるのは普通ボルトであること、さらにこれらのボルト孔は過大孔が用いられることなどから、底鋼板間のせん断力の伝達は期待できず、完全な閉断面を形成しているとは言い難い。

鋼逆 π 形箱桁橋の特徴の一つである架設時に底鋼板を補強材として機能させる場合、底鋼板がどの程度補剛効果を有するのかを適切に評価し、設計及び架設計画に反映することは極めて重要である。

(3) 曲線区間への適用範囲

鋼逆 π 形箱桁橋を曲線区間に適用する場合、架設時構造系での床版打設時の桁のねじり変形が問題となる。曲線桁橋は、鉛直荷重により曲げモーメントと同時にねじりモーメントを受ける構造物であるので、設計計算はそれらを考慮して行わなければならない。しかも鋼逆 π 形箱桁橋の架設時は、薄肉開断面材である逆 π 形鋼桁の剛性が支配的となるため、ねじりモーメントの一部は純ねじり、他はそりねじりによって分担される。これらの力学的性状を曲線桁の曲率ならびに合成床版の底鋼板と鋼桁との接合部の構造による影響による整理を行い、鋼逆 π 形箱桁橋の曲線区間への適用範囲を明らかにする必要がある。

(4) 送り出し架設時の安定性照査

鋼逆 π 形箱桁橋の約 1/3 は送り出し工法により架設されている。その場合、集中荷重を受ける傾斜腹板の座屈安全性の照査方法や下フランジに発

生ずる橋軸直角方向の水平力に対する下フランジの照査および補強方法など不明な点が多い。それに対し、実設計では FEM 解析による照査、補強方法の検討を行うことで対処している。そのため、設計及び架設計画に対して照査部位、照査方法などを整理し、補強方法についても適切な構造を提案することは鋼逆 π 形箱桁橋の採用にあたって憂慮される架設時の安全性確保のため非常に有用である。

5. 耐荷性能と立体挙動に関する研究

本研究は上述した鋼逆 π 形箱桁橋の架設時に着目し、その耐荷性能の特性について実験的及び解析的に明らかにするとともに、架設時のねじり変形に関する合成床版底鋼板と鋼桁の立体挙動を明らかにすることを目的とした。

(1) 実績調査

実務設計に直接役立つ研究成果を提供するため、対象橋梁の構造形式、寸法および各種の力学パラメータの設定範囲を調査し、その分析と結果の整理を行った。内容については下記の文献を参照のこと。

【玉田和也，小野潔，西村宣男：開断面箱桁橋の実績調査，橋梁と基礎，vol.38,2004年6月。】

(2) 断面強度に関する実験

鋼逆 π 形断面を有する 6 体の試験桁による実験を行い、架設系における鋼逆 π 形箱桁橋の曲げおよびせん断耐荷特性，並びに垂直補剛材および水平補剛材が各耐荷力に与える影響を明らかにした。これにより，弾塑性有限変位解析のためのベンチマーク用データを得ることができた。内容については下記の文献を参照のこと。

【玉田和也，小野潔，川村暁人，西村宣男：鋼逆 π 形箱桁橋架設系の曲げ耐荷性能に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 787 / I-71, pp147-160, 2005. 4.】

【玉田和也，小野潔，川村暁人，西村宣男：鋼逆 π 形箱桁橋架設系のせん断耐荷性能に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 808 / I-74, pp47-61, 2006. 1.】



写真-1 曲げ実験桁全景

写真-1 に曲げ実験桁の全景を示す。載荷実験は大阪大学構造実験棟にて実施した。

(3) パラメトリック解析

鋼逆 π 形箱桁橋の上フランジ幅厚比パラメータ，腹板幅厚比パラメータ，中立軸位置，腹板傾斜角度の 4 つの構造パラメータに着目し，曲げおよびせん断耐荷性能に関するパラメトリック解析を行い，各パラメータが耐荷性能に及ぼす影響を明らかにした。内容については下記の文献を参照のこと。

【玉田和也：鋼逆 π 形箱桁橋架設系の耐荷性能と立体挙動に関する研究，学位論文，大阪大学大学院，2005.1.】

(4) 架設系の断面強度算定式

鋼逆 π 形断面架設系の曲げ強度およびせん断強度の算定式を提案し，実験および数値解析結果との比較によりその妥当性，適用範囲の確認を行った。さらに曲げ強度に関して鋼逆 π 形箱桁橋架設系の設計・照査に供することができる限界幅厚比パラメータ曲線を提案した。内容については下記の文献を参照のこと。

【玉田和也：鋼逆 π 形箱桁橋架設系の耐荷性能と立体挙動に関する研究，学位論文，大阪大学大学院，2005.1.】

(5) 底鋼板の補剛効果と変形予測

鋼逆 π 形箱桁橋架設時の立体挙動について合成床版の底鋼板と桁の協働作用を考慮した桁のねじれ変形に関する骨組構造解析による手法の提案を行い，FEM 解析結果との比較によ

りその妥当性を確認した。次に、鋼逆 π 形箱桁橋の曲線桁への適用範囲と底鋼板と桁の接合方法の関係性を明らかにした。内容については下記の文献を参照のこと。

【加藤久人, 玉田和也, 三原邦啓, 酒井和男, 西村宣男: そりねじり変形を考慮した鋼逆 π 形合成箱桁橋設計の基本事項, 鋼構造年次論文報告集, 第12巻, pp. 91~98, 2004年11月。】

【日下敦, 玉田和也, 加藤久人, 西村宣男: 鋼逆 π 形合成箱桁橋架設系の合成床版底鋼板による補剛効果, 鋼構造論文集, Vol. 13, No. 48, 2005. 12.】

6. 今後の展望

鋼逆 π 形箱桁橋は鋼・コンクリート合成床版の登場により合理化橋梁の一つとして再登場した橋梁形式である。鋼逆 π 形箱桁橋の不安要素の一つである床版について信頼性の高い床版が開発されたことは鋼逆 π 形箱桁橋の復活にとって必要不可欠の要素であった。残る不安要素としては構造的に避けがたい架設系における構造的な不安定性状がある。これに対しては下記に示す未解決項目を含めた各種研究を今後も進める必要があると考える。

- ① 送り出し架設時の安定性照査
- ② 負曲げ+せん断が作用する中間支点部の耐荷性能
- ③ 非対称断面を念頭に置いたより合理的な腹板の補剛設計法の開発

参考文献

- 1) (社) 日本道路橋協会: 鋼道路橋の合成桁設計施工指針, 1959年。
- 2) (社) 日本道路橋協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 1973年。
- 3) 土木学会鋼構造委員会: 合成構造物の設計・施工指針の作成, 土木学会論文集, No.591, pp.1~7, 1998年4月。
- 4) 前田幸雄: 複合構造に関する研究の発展と歴史の動向, 土木学会論文集, No.344, pp.13~25, 1984年4月。
- 5) (社) 土木学会鋼構造委員会 疲労変状調査小

- 委員会: 鋼橋の疲労変状調査, 土木学会論文集, No.368, pp.1~12, 1986年4月。
- 6) Jean-Paul Lebet (訳) 橋吉宏, 長井正嗣: スイスにおける合成桁橋, 橋梁と基礎, pp.37~46, 2000年3月。
 - 7) 吉田巖: 橋梁工事における事故例・失敗例, 橋梁と基礎, pp.1~22, 1967年10月。
 - 8) 北海道開発局: 析石橋事故調査報告書, 北海道開発局, 1964年1月。
 - 9) 駒井鉄工所: 橋梁技術抄録・堀之内橋特集-, 1965年3月。
 - 10) 吉崎信之, 常松修一, 石毛立也, 小川克美: 都市内高速道路における合理化橋梁, 第4回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.25~33, 2001年8月。
 - 11) 太田哲司: 北海道横断自動車千歳~夕張間の建設と新技術・新工法, 橋梁&都市 PROJECT, pp.44~52, 1999年1月。
 - 12) 日本橋梁建設協会: 新しい鋼橋の誕生 II, 2003年5月。
 - 13) 玉田和也, 真嶋敬太, 長谷川敏之: 京都南道路木津川橋における合成化の検討, 駒井技報, vol.21, pp.31~38, 2002年3月。
 - 14) 玉田和也, 真嶋敬太, 安永正道: 京都南道路木津川橋(連続合成開断面箱桁)の設計・施工, 駒井技報, vol.22, pp.45~55, 2003年3月。
 - 15) 加藤久人, 川村暁人, 小野潔, 西村宣男: 開断面箱桁橋の架設時の耐荷力解析について, 鋼構造年次論文報告集, Vol.9, pp.527~534, 2001年11月。
 - 16) 川村暁人, 加藤久人, 西村宣男: 開断面箱桁橋架設系の耐荷力解析, 第56回年次学術講演会, pp.352~353, 2001年10月。
 - 17) 福本嘯士, 久保全弘: U形断面桁の横倒れ座屈強度, 土木学会論文報告集, 第264号, pp.17~32, 1997年8月。
 - 18) 山口慎, 板谷成敏, 松浦章夫: 鋼U形桁の横倒れ座屈の限界値に関する研究, 第56回年次学術講演会, pp.350~351, 2001年10月。