

(技術資料)

新開発アルミFCWを用いたアルミニウム合金材と鋼材の異種金属接合技術

Technology for Dissimilar Metal Joining of Aluminum Alloy and Steel Using Newly Developed Aluminum Flux-Cored Wire (FCW)



松本 剛*1

Tsuyoshi MATSUMOTO



岩瀬 哲*1

Tetsu IWASE



海読一正*1

Kazumasa KAITOKU



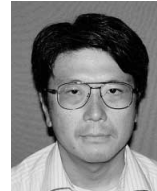
笹部誠二*2

Seiji SASABE



岩井正敏*3

Masatoshi IWAI



杵渕雅男*4

Masao KINEFUCHI

In this study, we have developed dissimilar metal joining technology for aluminum alloy and steel using MIG and laser welding equipment. By using newly developed aluminum flux-cored wire, the formation of brittle intermetallic compound in the bonding interface is suppressed and a good joint strength was obtained, comparable to that of a joining of aluminum alloy materials to each other. We evaluated the corrosion resistance of the welds and confirmed the fact that electrolytic corrosion does not occur in a butt joint. Evaluations of the strength of prototype mocks of automobile sections made using this bonding technology indicate the possibilities of its application.

まえがき＝昨今の地球温暖化抑制に対応するため、自動車軽量化の気運が高まっている。その達成には、各種材料固有の特長を最大限に活かすべく、適材適所な材料の使用が望まれる。このような適材適所化には、接合・成形・解析などの要素技術を駆使する必要がある。アルミニウム合金材と鋼材との異種金属接合もそういった要素技術の一つであり、これまで多くの取組がなされてきた¹⁾。しかし、通常の溶接方法ではアルミニウム合金材と鋼材の接合界面に脆弱なFe-Al系金属間化合物 (intermetallic compound, 以下IMCという) が形成してしまい、その継手特性の低さゆえに、機械的締結や接着接合といった方法に頼らざるを得ないのが現状である。

これまで当社では、軽量のアルミニウム合金材と、合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (以下、GA鋼板という) や冷延鋼板 (以下、CR鋼板という) などの自動車に多用される鋼材の溶融接合技術を検討してきた¹⁾。本稿では、通常のミグやレーザの溶接装置を用いながらもアルミニウム合金材同士に匹敵する良好な継手強度が得られるアルミニウム合金材と鋼材の異種金属の溶融接合技術を開発した²⁾ので報告する。

1. アルミFCWの検討

1.1 既存のFCWの課題

アルミニウム合金材と鋼材を溶接した場合、接合界面に脆弱なIMCが形成されて接合強度の低下をもたらす。このため、強度を向上させるにはIMC形成を抑制する必要がある。

これまでに得られた知見として、既存のろう付用のアルミニウムフラックスコアードワイヤ (以下、アルミFCWという) を用いたミグ³⁾ならびにレーザ⁴⁾によるラ

ボベースの接合では、IMCの形成がある程度抑制され、アルミニウム合金材同士の継手と同等の引張せん断強度を得ている。しかし、ろう付用アルミFCWをアルミニウム合金材と鋼材の異種金属接合に適用すると、ワイヤの座屈、溶滴移行の不安定、スラグの過多、接合強度の不足などの課題があり、実用化は困難と考えられてきた。

そこで当社は、これらの課題を解決し、工業的な用途にも応え得る新しいアルミFCWの開発に着手した。

1.2 供試材

供試材として、アルミニウム合金材には板材AA6022P (板厚1.0mmおよび2.0mm)、および押出形材A6061S (肉厚2.2mmおよび2.5mm) を、また鋼材には590MPa級GA鋼板 (板厚1.2mm)、590MPa級CR鋼板 (板厚1.2mm)、および980MPa級CR鋼板 (板厚1.4mm) を用いた。溶接継手は、鋼材の上にアルミニウム合金材を重ね、各溶接熱源を用いてアルミニウム合金材側を溶融させて鋼材と接合した重ねすみ肉継手を基本とした。また、アルミニウム合金材と鋼材の突合せ継手も作製した。本接合プロセスは、アルミニウム合金材を溶かして鋼材は溶かさなことから「ブレイズ溶接」と呼称することにする。

アルミFCWのシース材成分の適正化について検討するため、ソリッドワイヤをシースに見立て、アルミニウム合金材と鋼材にあらかじめフラックスを塗布した。ソリッドワイヤは、A5356-WY、A4043-WY、A4047-WYのほか、新組成のものを用いた。新組成のソリッドワイヤは、ろう付においてフラックス中のフッ化物と優先的に反応して接合不良を引き起こすMgを抑え、一方で溶融金属のぬれ性が期待できるSiを配合したものである。

つぎに、AA6022P (板厚1mm) と590MPa級CR鋼板 (板厚1.2mm) の重ねすみ肉継手をレーザブレイズ溶接

*1アルミ・銅事業部門 技術部 *2アルミ・銅事業部門 技術部 (現 社軽金属溶接協会) *3鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部 *4技術開発本部 材料研究所

にて作製した。それを用いて、**図1**に示す試験片を作製し、継手強度を評価した。引張せん断強度は25mm溶接幅に切断した短冊継手試験片を対象に、また、はく離強度はその短冊継手試験片を溶接端部から10mm離れた部分で直角に折り曲げた試験片を用い、それぞれ単位溶接長当たりの破断荷重にて評価した。

1.3 アルミFCWの検討

継手強度の評価結果を**図2**に示す。ソリッドワイヤの比較では、新組成のソリッドワイヤを用いた継手のはく離強度が最も高く、Al-Mg系のA5356-WYを用いた継手の強度が低い、との結果を得た。

接合部断面のマクロ観察、および接合界面に生成したIMC層の光学顕微鏡観察の結果を**図3**に示す。A5356-WYを用いた溶接部のIMC層厚さは今回の比較の中で最も厚く、またアルミ溶接金属内に針状のIMCが観察された。一方、A4047-WYならびに新組成によるIMC層厚さ

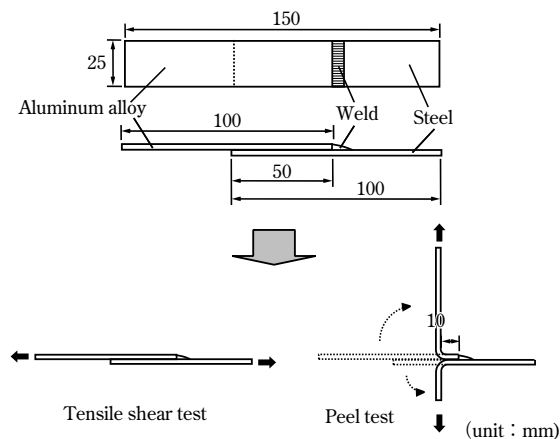


図1 継手強度の評価方法²⁾
Fig. 1 Methods for evaluation of joint strength²⁾

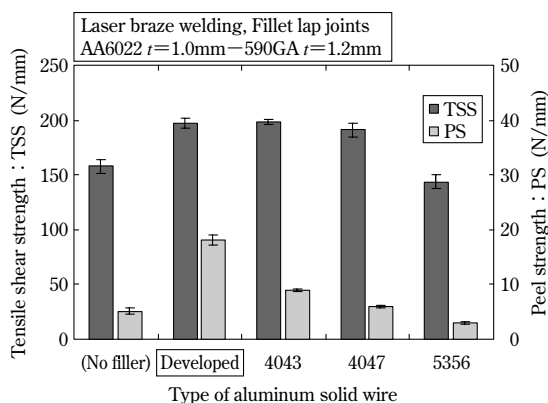


図2 アルミソリッドワイヤの種類による継手強度の比較²⁾
Fig. 2 Comparison of joint strength depends on type of aluminum solid wire²⁾

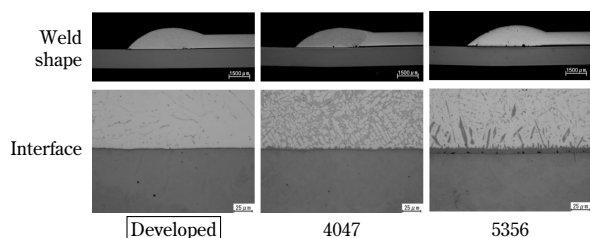


図3 溶接部の断面形状および界面の比較⁷⁾
Fig. 3 Scope of weld shape and interface⁷⁾

は全体にわたって薄く、とくに新組成のソリッドワイヤを用いた場合は、平均約 $1\mu\text{m}$ で最も薄く分布していることが確認できた。

ミグブレイズ溶接でも同様に検証した結果、新組成にて最も高い継手強度が得られ、かつIMC層厚さも抑制されており、レーザーブレイズ溶接と同じ現象が確認された。

つぎに、フラックスの種類は、ろう付用アルミFCWに用いられている非腐食性フッ化系フラックスのノコロック⁵⁾をはじめとする、**表1**に示す5種類(A1~A4, B2)のフラックスを用いた。フラックスの選定にあたっては、アルミ酸化皮膜の融解性を有し、耐食性に影響しない物質であり、かつシース内部への挿入の容易性も考慮した。その結果、フッ化アルミカリウム化合物をベースとし、フッ化アルミ化合物またはフッ化セシウムとの混合とした。さらに、前述の新組成材のシースと組合せ、フラックス充填率の適正化を図ってアルミFCWを試作した。

試作アルミFCWを用い、アルミニウム合金板とGA鋼板との重ねすみ肉継手での異種金属接合をレーザーブレイズ溶接によって行い、継手引張試験にて評価した。その結果を**図4**に示す。A3, A4は全く接合されず、A1, A2, B2は引張せん断強度がほぼ同等で、はく離強度は高い順から $B2 \gg A1 > A2$ となった。これらの試験片における破断の形態を**図5**に示す。B2では界面はく離破断をせず、アルミニウム合金側で破断しており、良好な結果が得られた。一方で、ミグブレイズ溶接した同検証の結果では、はく離強度が最も高いのはA2であった。

図6は、レーザーブレイズ溶接ならびにミグブレイズ溶接した接合部の外観を示す。とくにビード外観の改善が顕著で、新開発のアルミFCWがろう付用のアルミFCW

表1 フラックスの配合²⁾
Table 1 Combination ratio of flux²⁾

Kind of Al. FCW	Combination ratio of flux (wt%)		
	K-Al-F	Al-F	Cs-F
A1	100		
A2	75	25	
A3	50	50	
A4	25	75	
B2	75		25

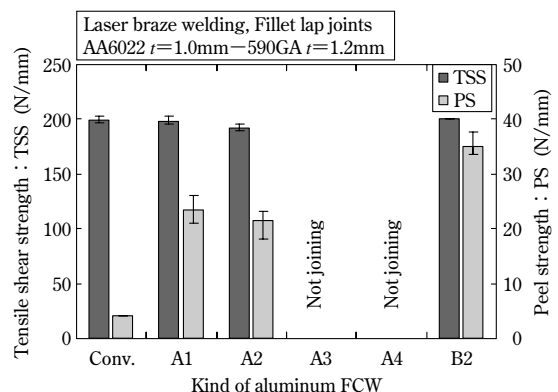


図4 アルミFCWの種類による継手強度の比較²⁾
Fig. 4 Comparison of joint strength depends on kind of aluminum FCW²⁾

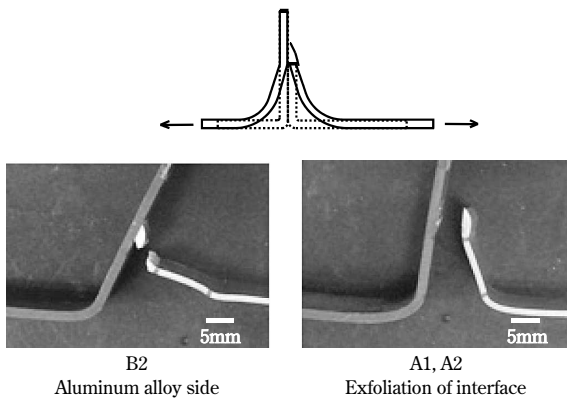


図5 はく離試験後の破断形態
Fig. 5 Fracture mode after peel test

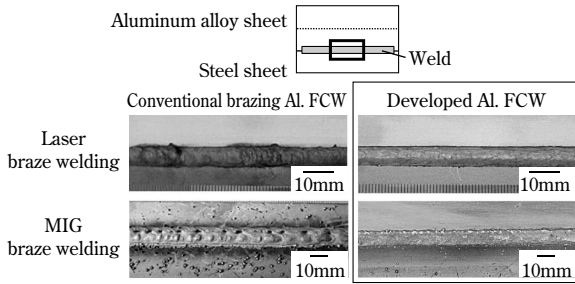


図6 溶接部外観
Fig. 6 Appearance of welding part

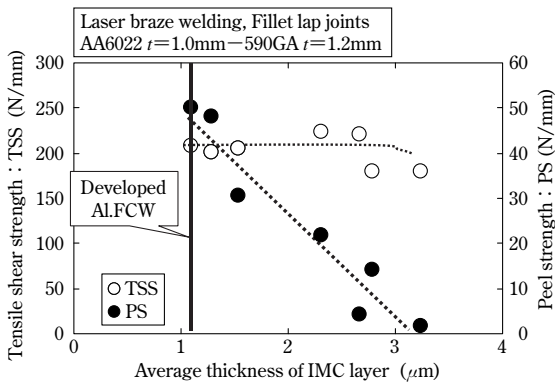


図7 IMC層厚と継手性能の関係²⁾
Fig. 7 Relationship between thickness of IMC layer and joint strength²⁾

よりも溶接部外観が良好であった。

アルミニウム合金材と鋼材との異種金属接合継手の継手性能と接合界面のIMC層厚さとの関係を整理した結果を図7に示す。本開発のアルミFCWを用いることで、IMCの成長が抑制でき、IMC層をより薄くできる。このように、IMCの形成が界面全域にわたって抑制されることにより、とくにはく離強度が大幅に改善されたと考えられる。

これらの検証から、レーザブレイズ溶接ならびにミグブレイズ溶接によるアルミニウム合金材と鋼材の異種金属接合に適したアルミFCWのコンセプトが明確になった。

2. 耐食性

アルミニウム合金材と鋼材の異種金属接合部では、両材料の間で電位差による腐食電流が流れ、アルミニウム合金材同士の場合よりも腐食が助長されること、すなわ

ち接触腐食が懸念される⁶⁾。

このため、ハイブリッド構造の実用化には、異種金属接触腐食の防止も重要な課題である。実用化されている機械的締結部においては、塗装、構造用接着剤、防水シーラなどにより接合部を完全に被覆することで耐食性を確保している。本溶融溶接部においても同様の処理により、接触腐食を防止できると考えた。

そこで、アルミニウム合金材と鋼材の接触腐食における塗装の影響を基礎的に解明するため、突合せ溶接部を用いて調査を行った。新開発アルミFCWを用い、AA6022P(板厚2mm)と590MPa級CR鋼板(板厚1.2mm)をミグブレイズ溶接にて突合せ接合し、溶接の始終端部を各25mm切断した試験体を作製した。さらにりん酸塩処理し、その上に電着塗装を施した。評価方法には、日本自動車技術会規格の複合サイクル腐食試験JASO-M0609(以下、CCT試験という)を適用した。CCT試験は、塩水噴霧を $35 \pm 1^\circ\text{C}$ で2時間行った後、 $60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ で4時間乾燥させ、さらに $50 \pm 1^\circ\text{C}$ で2時間の湿潤を行うのを1サイクルとする。このサイクルを何回か繰返すことによって腐食を評価する促進試験法の一つである。

予備試験として突合せ溶接部に塗装を施して51サイクルまで実施したが、その試験後のサンプルには鋼板の端部付近から赤錆(さび)が発生した程度で溶接部は健全であり、塗膜にもほとんど膨れが発生しなかった。このため、悪条件下を想定して改めて塗膜にクロスカットを入れて腐食の起点を作った試験体を準備し、150サイクルまでの腐食評価を行った。

150サイクル試験後のクロスカットを入れた試験体外観を図8に示す。突合せ溶接部左側のアルミニウム合金材側には、膨れや白錆はほとんど発生しなかった。鋼材側にはCCT試験の進行に伴い膨れと赤錆が発生した。溶接ビード部には錆、膨れともに認められなかった。

塗膜膨れの評価にあたっては、クロスカット部を中心にして粘着テープを貼って剥がし、その剥がれた部分の幅を測定するいわゆる「テーピング試験」を実施した。その結果、アルミニウム合金材(図8①部)、溶接部付近(図8②部)、溶接部(図8③部)は剥がれがなく、塗膜下腐食はほとんど発生していなかった。一方、鋼材側(図8④、⑤部)には大きな塗膜膨れが発生したが、④の溶接部付近が⑤の鋼材に比べてとくに塗膜膨れが大きいことはなかった。

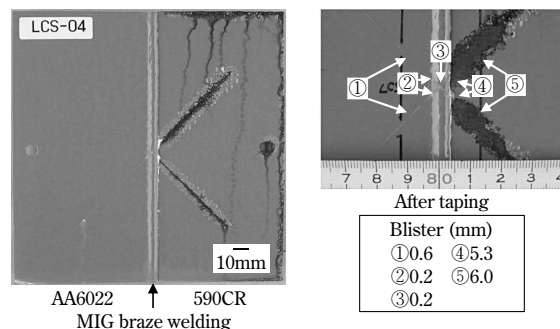


図8 150サイクル後のCCT腐食試験片²⁾
Fig. 8 Specimen of corrosion test after 150 cycles²⁾

以上の結果は、アルミニウム合金材と鋼材の接合部付近の腐食が接合部から離れた部分と変わらないこと、すなわち、今回の突合せ溶接部では異種金属の接触腐食が発生しなかったことを示している。これは、突合せ溶接部に腐食電流の流れる回路が形成されなかったことを意味するが、その理由やメカニズムについては現在検討中である。

3. ハイブリッド構造部材の試作例

新開発のアルミFCWを用いた異種金属接合を適用してハイブリッド構造の自動車模擬部材を試作し、その部材強度の評価に加えて適用可能性を検討した。本章では、その検討結果に基づく適用提案例を数件紹介する。

3.1 ハット型閉断面部材

Bピラーなど軸方向に荷重を受ける部材の例として、図9に示すハット型のアルミニウム合金材と鋼材の開口側を合せ、そのフランジ合せ部をレーザーブレイズ溶接にて接合した偏心軸圧壊試験体を試作⁷⁾した。アルミニウム合金材はA6061S-T6（溶接部肉厚2.2mm）、鋼材は980MPa級CR鋼板（板厚1.4mm）を用いた。試験体（全長900mm）のアルミニウム合金ハット端部の3箇所連続ビードにより溶接を行った。圧壊試験では、油圧シリンダーを用いて図9に示したサイドプレート部に軸圧縮荷重を付与した。

図10には、得られた荷重-変位の関係を示す。最大荷重を迎えても破壊は起こらず、その後しばらく変形が進んだ後、溶接部が破壊した。本試験より、大変形を伴わない部材に対しては、本溶接法を適用できる可能性が確認できた。

3.2 蓋もの構造部材およびパイプ締結模擬部材

アルミニウム合金材と鋼材の異種金属接合を利用したドアやトランクリッドなどの蓋もの部材の例、およびパイプ締結を模擬した部材の例を示す。図11(a)に、アウター材としてのAA6022P（板厚1.0mm）、インナー材として980MPa級GA鋼板（板厚1.2mm）を用いた蓋もの部材を示す⁸⁾。ヘム部はミグブレイジング溶接を用いてステ

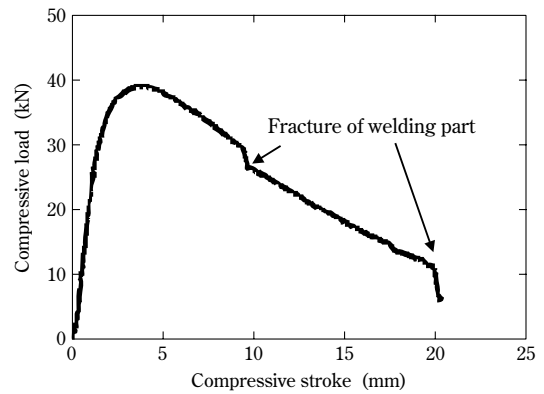


図10 軸圧壊試験結果²⁾

Fig.10 Experimental result for axial crush test²⁾

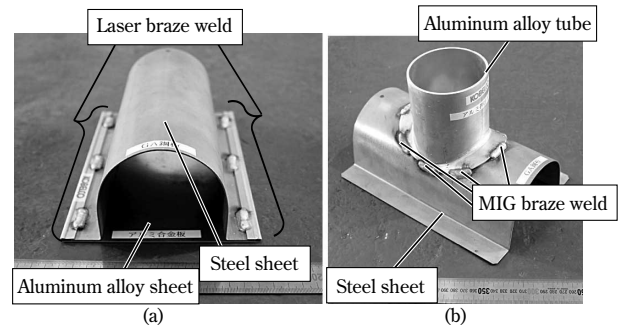


図11 溶接部品の例⁸⁾

Fig.11 Example of welding parts⁸⁾

ッチ状に接合した。

図11(b)は、A6063S（溶接部肉厚2.5mm）のフランジ成形部と980MPa級GA鋼板（板厚1.2mm）の曲げ成形部材の中央部とをミグブレイズ溶接した部材を示す⁸⁾。鋼材同士を締結したパイプ締結部材の一方をアルミニウム合金材に置換することによって軽量化が期待できる。図11(a), (b)はいずれも小サンプルであるが、蓋ものおよびパイプ締結部材といった実部材への展開を想定した基本構造の例である。

むすび=従来は困難であったアルミニウム合金材と鋼材との異種金属溶融接合を実現するため、新たにアルミ

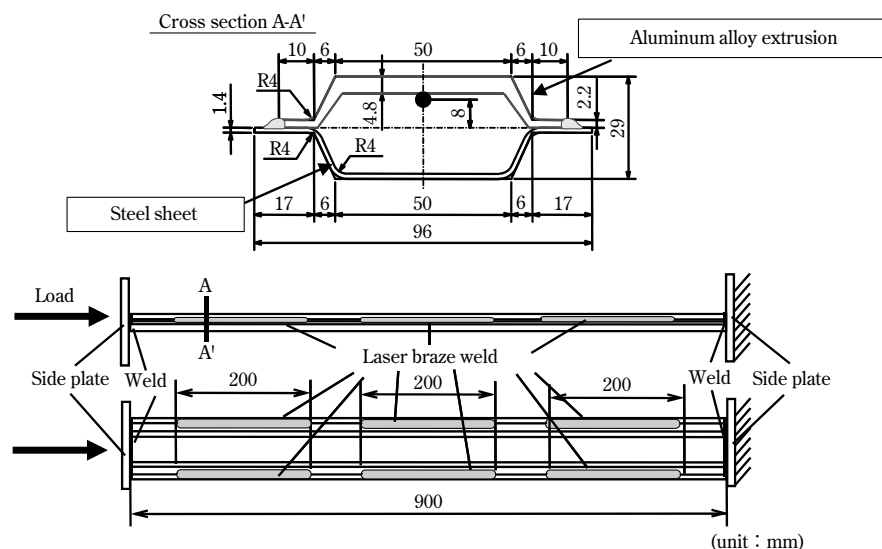


図9 軸圧壊強度評価用試験体の形状²⁾

Fig. 9 Specimen for axial crush test²⁾

FCWを開発し、ミグやレーザーによるブレード溶接に用いることで良好な継手性能を得ることができた。耐食性の評価結果、およびハイブリッド構造部材の試作結果からも適用への目処が立ったと考えられる。

しかしながら、実際の適用部位に対しては新たな課題が生じることも考えられるため、さらに完成度を高めることによって適用部位の拡大を図り、自動車の軽量化に貢献すべく実用化を目指していく。

参 考 文 献

- 1) 新エネルギー・産業開発機構. 平成17～18年度報告. 地球温暖化新技術プログラム/自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術. 2007, p.113-227.
- 2) 松本 剛ほか. 自動車技術会論文集. 2011, Vol.42, No.2, p.591-596.
- 3) 杵淵雅男. 工業材料. 2008, Vol.56, No.10, p.77-83.
- 4) 松本 剛ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2006, Vol.79, p.306-307.
- 5) (社)軽金属溶接構造協会. アルミニウムブレージングハンドブック (改訂版). 2003, p.300.
- 6) 石原只雄. 腐食事例解析と腐食診断法. テクノシステム. 2008, p.169-170.
- 7) 杵淵雅男ほか. 自動車技術会論文集. 2011, Vol.42, No.2, p.597-602.
- 8) 松本 剛ほか. 軽金属溶接. 2011, Vol.49, No.11, p.35-40.