

精密拡散接合技術による宇宙機器用推力可変噴射器の開発

Developments of Platelet Injector Diffusion Bonded for Throttleable Rocket Engine of Space Control Equipment

名古屋航空宇宙システム製作所 坂本光正^{*1} 都築圭紀^{*2}
 名古屋誘導推進システム製作所 森合秀樹^{*3}
 宇宙開発事業団 小林悌宇^{*4}
 航空宇宙技術研究所 日下和夫^{*5}

宇宙往還機、衛星に搭載される RCS (Reaction Control System) の特性向上並びに推進システムの簡素化を図るには、推力可変ロケットエンジンの開発が不可欠である。本研究では、本エンジン機構に不可欠なプレートレット噴射器を開発し、そのエンジン噴射特性の評価を行った。プレートレット噴射器の噴射面は、板厚 0.1 mm の二相ステンレス鋼薄板 60 枚から構成される。各々の薄板にはレーザー加工により噴射穴を形成し、積層・拡散接合により三次元の複雑な推進薬流路を確保した。燃焼試験の結果、比推力 280 s (膨張比 20)、燃焼効率 91 % と良好な噴射特性を示した。

A highly efficient combustion and simplified systems are keys to the reaction control systems (RCSs) of space planes and satellites. A throttleable rocket engine is expected to reduce RCS weight by minimizing the number of engines and to improve reliability by simplifying the system. A throttleable rocket engine with a platelet injector was developed and combustion efficiency evaluated. The injector face of the platelet injector consists of 60 facets of 0.1-mm-thick duplex stainless steel. Each facet has several pairs of holes laser-drilled in different patterns. Facets are sequenced and diffusion-bonded to form several pairs of complicated 3-D orifices for fuels and oxidizers. Hot-firing tests showed a 280-s specific impulse and 91% combustion efficiency in a throttled range of 10-100%.

1. ま え が き

一般に宇宙往還機、衛星等に搭載される小型スラスタは、宇宙空間での姿勢制御の精度を高め、かつ燃料を節約するためには小さな推力が望ましい。一方、大気圏への再突入時や軌道修正時には機体のトリムを確保するために比較的大きな推力が要求される。このため通常は各飛行フェーズでの推力要求を満たすため、大推力、小推力の 2 種類のスラスタが複数基搭載されており、部品点数の増加によりエンジンシステムが複雑化し、信頼性の低下、重量増大を余儀なくされている。したがって、1 基のスラスタで大小推力を可能とする推力可変ロケットエンジンの開発により大幅な重量軽減並びにシステムの簡素化による信頼性の向上が期待できる。

そこで、本エンジン機構のキーとなる推力可変噴射器 (プレートレット噴射器) の開発を行った。このプレートレット噴射器は、あらかじめ推進薬の流路パターンを穴あけ加工したステンレス鋼薄板を積層・拡散接合することによって流路構造を確保するため、三次元複雑流路構造を形成可能である。このため、これら流路の選択により推力の切替えが可能となるほか、噴射面全面で燃料と酸化剤の衝突点を形成できるため、エンジン燃焼効率の向上も期待できる。本報では、 $(\delta+\gamma)$ 二相ステンレス鋼を選定し、精密拡散接合技術の適用により、複雑流路構造を有するプレートレット噴射器を開発したので、その経緯について紹介する。

2. 供試材料及び試験方法

2.1 供試材料

供試材料として SUS 329 J 1 型二相ステンレス鋼 (板厚 0.1 mm の冷間圧延材及び棒材) を選定した。本材料は、母相がフェライト (δ)、第二相がオーステナイト (γ) の二相混合組織を有し、加

工熱処理による組織制御によって等軸微細組織を容易に形成可能であるため、高温域での塑性流動性に優れ⁽¹⁾、拡散接合時の接界面面密着化過程を短時間に実現でき、かつ変形量の少ない精密接合が可能となる⁽²⁾。また拡散接合の比較として、オーステナイト単相ステンレス鋼 (SUS 304) も供試した。

図 1 に Fe-Cr-Ni 擬二元系状態図を示す⁽³⁾。これは Fe-Cr-Ni 三元系状態図を 60% Fe として固定したときの垂直断面図である。SUS 329 J 1 型二相ステンレス鋼は 24 Cr-6 Ni-2 Mo を基本組

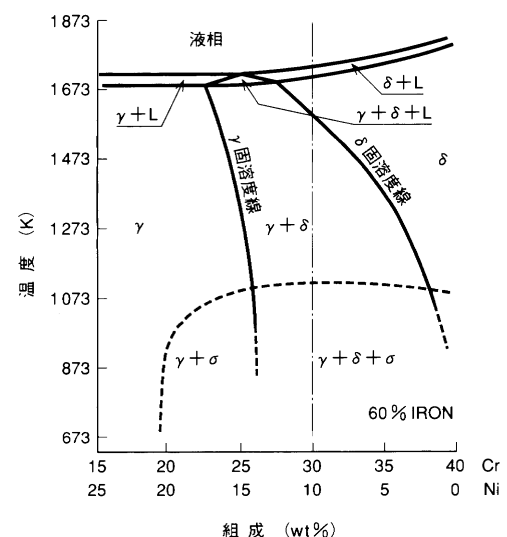


図 1 Fe-Cr-Ni 擬二元系状態図 Fe-Cr-Ni 三元系状態図を 60% Fe として固定したときの垂直断面図を示す。一点鎖線が二相ステンレス鋼に該当する。
 Vertical section of Fe-Cr-Ni phase diagram at 60% iron

*1 研究部材料研究課主席

*2 研究部材料研究課

*3 エンジン・機器部液体ロケットエンジン設計課

*4 宇宙往還技術試験機プロジェクトチーム

*5 ロケット高空性能研究室主任研究官

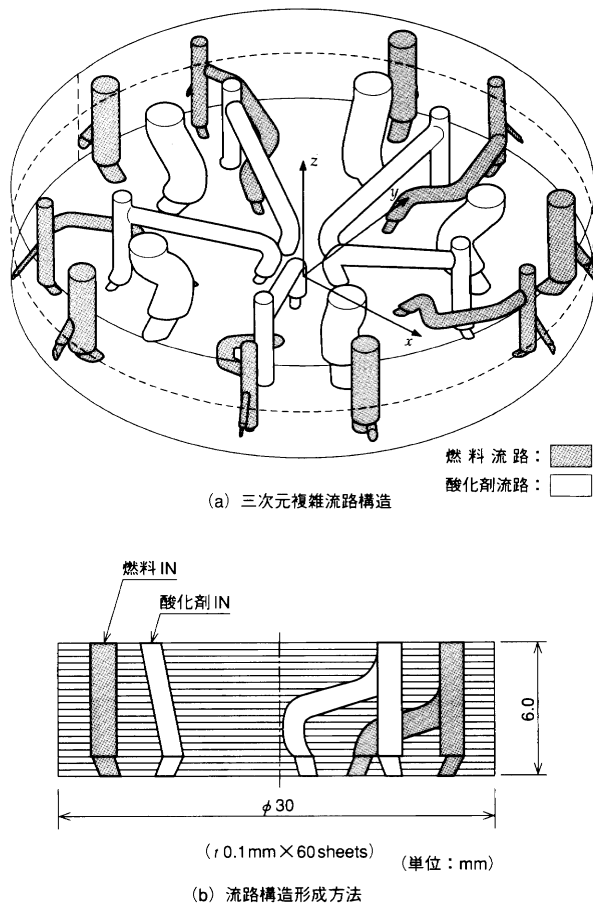


図2 プレートレット噴射器の三次元複雑流路構造及びその流路構造形成方法 流路パターンを形成した二相ステンレス鋼薄板を積層・拡散接合することによって三次元複雑流路構造を形成する。
Schematic diagram of 3-D complicated orifices for platelet injector and way of forming its orifices

成としており、組成をCr当量及びNi当量に換算すると、ほぼ30Cr-10Niとなり、図中の一点鎖線が本ステンレス鋼に該当する。本状態より、1573K以上では δ 単相、1073~1573Kでは $(\delta+\gamma)$ 二相共存、1073K以下では $(\gamma+\delta+\sigma)$ 三相共存組織であることが分かる。したがって、 $(\delta+\gamma)$ 二相等軸微細組織を早期に形成させて精密拡散接合を実現するためには、この二相共存温度域での接合が必須である。

2.2 試験方法

プレートレット噴射器は、図2に示すように大小ペアの燃料、酸化剤の三次元複雑流路構造を有し、大推力(600N)が必要な場合にはすべての流路を使用し、小推力(60N)が必要な場合にはマニホールドの回転により小さな穴径の流路のみを選択することによって推力の切替えが可能な構造となっている。このような複雑流路構造は通常の機械加工では形成困難であるため、あらかじめ燃料、酸化剤の流路パターンを段階的に穴あけ加工した二相ステンレス鋼薄板を積層・拡散接合することによって、流路構造の確保を行った。

燃料、酸化剤の流路パターン形成には、精密穴あけ加工法であるフォトレジング、YAGレーザー加工法について加工精度、品質評価試験を実施し、最適な加工法を選定した。流路パターンを形成した二相ステンレス鋼薄板は酸洗浄、その後水洗し、十分乾燥させた後、接合用ジグ内に積層した。積層後、所定の加圧力が負

荷できるおもりをジグ上に載せ、真空熱処理炉内へ導入、真空度が 10^{-3} Pa台に達したのを確認後、所定の温度域にまで加熱した。加熱はグラファイトヒータによるふく射加熱により行い、所定の温度域まで加熱・等温保持し、拡散接合を行った。

拡散接合が終了したすべてのプレートレット噴射器に対し、ヘリウムリークディテクタを用いて漏れ試験を実施し、接合体内の燃料、酸化剤流路間における接合欠陥による漏れの有無を確認することによって、接合部の品質保証を行った。また機能試験、燃焼試験を実施し、その噴射特性、燃焼特性について評価を行った。

3. 試験結果及び考察

3.1 穴あけ加工プロセス設定

二相ステンレス鋼薄板の精密拡散接合によるプレートレット噴射器製作の際、あらかじめ本ステンレス鋼薄板に燃料及び酸化剤の流路パターンを形成する必要がある。これら流路パターンには0.5~1.0mm径ほどの大小異なる穴サイズ・形状が同一面上に混在し、また燃料と酸化剤の良好な衝突パターン形成のためには数十 μm レベルの加工精度が要求されるため、精密穴あけ加工法の選定が望まれる。表1にフォトレジング、YAGレーザー加工による加工精度、穴品質評価結果を示す。YAGレーザー加工による穴周囲は、加工時の熱影響により形成した変質層が認められたが、フォトレジングによる穴周囲には変質層は認められず、穴加工表面の状態はフォトレジングの方が良好であった。また単一穴サイズの加工を行う場合には、フォトレジングの方がレーザー加工に比べ加工精度に優れるが、プレートレット噴射器のように同一面上に大小異なる穴が混在する場合には、各穴サイズによってエッチング条件が異なりエッチングむらが発生するため、レーザー加工の方が精度良く加工できる。そこで、流路パターン形成方法としてYAGレーザー加工法を選定した。

表1 フォトレジングとYAGレーザー加工の評価結果

Comparison between photo-etching and YAG laser-drilled quality

	加工精度評価結果	穴品質評価結果
フォトレジング加工	<ul style="list-style-type: none"> 同一面上に異なる穴径が混在する場合、エッチングむら発生 単一穴径の加工精度：$\pm 15 \mu\text{m}$以下 	<ul style="list-style-type: none"> 加工穴周囲に変質層の形成なし
レーザー加工	<ul style="list-style-type: none"> 加工精度：$\pm 20 \mu\text{m}$以下 	<ul style="list-style-type: none"> 加工穴周囲にδ単相組織形成(約$5 \mu\text{m}$)

注) 板厚0.1mmのステンレス鋼薄板上への穴あけ加工精度、品質評価結果を示す。

3.2 拡散接合条件設定

図3に二相ステンレス鋼及びオーステナイト単相のステンレス鋼薄板を60枚積層・拡散接合した接合部の光学顕微鏡組織写真を示す。拡散接合条件は共に同一条件であり、接合温度は1373Kである。二相ステンレス鋼薄板の接合体では、界面に沿って接合欠陥は認められず、またこの界面を挟んで第二相であるオーステナイト相が成長しており、本接合体の拡散接合がほぼ終了していることが分かる。一方、オーステナイト単相のステンレス鋼薄板の接合体では、界面全域にわたり接合欠陥が認められ、また結晶粒も二相ステンレス鋼のそれに比べて微細化が進んでいない。

拡散接合過程は、接合界面の密着化過程とそれに続く拡散過程に大きく分けて考えることができ、接合界面の密着化過程は全接合時間の大半を占める。本試験に供試した二相ステンレス鋼薄板は冷間圧延材であるために、組織内部に相当量の加工ひずみが蓄

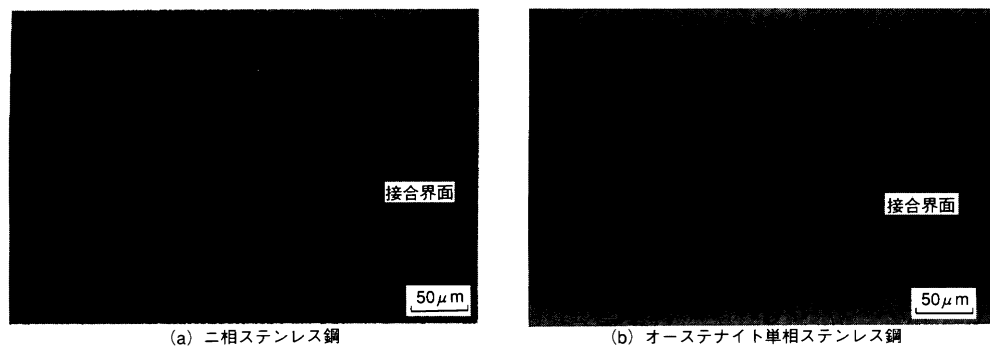


図3 拡散接合部の光学顕微鏡組織 二相ステンレス鋼及び比較としてオーステナイト単相ステンレス鋼薄板の同一接合条件での拡散接合状態を示す。
Optical micrographs of joining interface of duplex stainless steel and austenitic stainless steel

積されており、接合温度への昇温過程に組織内で回復・再結晶による組織の微細化が進み、接合温度である $(\delta+\gamma)$ 二相域において $10\mu\text{m}$ レベルの微細粒組織を形成する。また、 $(\delta+\gamma)$ 二相域に保持中は、第二相の γ 相が母相である δ 相の粒成長を抑制するため、 $(\delta+\gamma)$ 微細粒組織を維持することが可能となる。その結果、接合温度域である $(\delta+\gamma)$ 二相域において塑性流動性が著しく向上して、この接合界面の密着化過程を促進するばかりでなく、それに続く拡散過程において、全拡散量に占める粒界拡散の割合が増加・加速されるため、低加圧力条件での精密拡散接合が短時間で実現できたと考えられる。またYAGレーザ加工による流路パターン形成時、穴周囲から約 $5\mu\text{m}$ の範囲内で熱影響による変質層(δ 単相組織)が形成されるが、その箇所においても本接合条件で良好な接合状態が得られることを確認した。

これは拡散接合温度が $(\delta+\gamma)$ 二相温度域であるため、接合温度への昇温中あるいは等温保持中に δ 単相組織中に γ 相が再析出することによって $(\delta+\gamma)$ 二相組織に回復するためである。

拡散接合条件は、以上の試験結果に基づき接合温度 1373K での接合を基本条件とし、接合供試体の積層数や寸度に応じて必要により加圧力等の接合条件因子に補正を加えた。

3.3 プレートレット噴射器試作

図4に拡散接合プロセスの模式図を示す。拡散接合は、プレートレット接合体、噴射器本体との組立の計2回実施している。まず燃料、酸化剤の流路パターンを形成した60枚の二相ステンレス鋼薄板を接合ジグ内に積層・拡散接合し、プレートレット接合体を製作した。この際、流路パターンの最小径は約 0.5mm と非常に小さく、特に噴射面近傍での位置ずれは、燃料と酸化剤の噴射角度(衝突角度)に大きな影響を与え、噴射面での安定燃焼に支障を来すため、接合精度として数十 μm レベルの精密拡散接合が要求される。そこで、積層・拡散接合時の位置ずれを極力抑えるために、接合ジグ内の位置決めピンにて二相ステンレス鋼薄板を固定し、所定の加圧力を負荷できるおもりを載せて位置精度の確保を行った。本工法による拡散接合後の積層薄板の位置ずれ量は $10\sim 30\mu\text{m}$ 内であった。一方、プレートレット接合体と噴射器本体との接合では、積層供試体の位置ずれは薄板60枚の拡散接合時に比べ生じにくいと考えられるが、噴射器本体が棒材からの切削加工品であるため、拡散接合初期の界面密着化には比較的大きな加圧力が必要であると予想される。そこで極力加圧力を小さくして接合供試体の変形量を最小限にとどめ、かつ接合品質を確保するため、これら接合供試体間にインサート材を挿入することによって、低加圧力条件での精密拡散接合を実現した。

図5に流路パターンを形成した二相ステンレス鋼薄板60枚によ

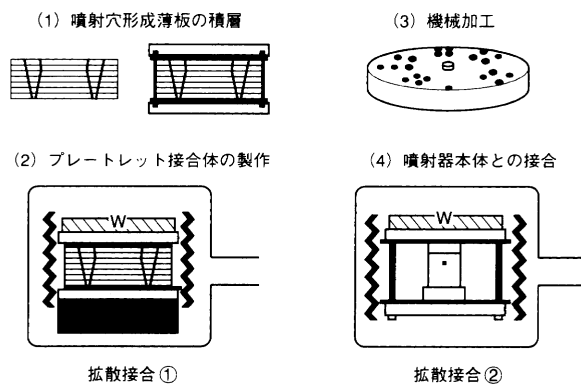


図4 拡散接合プロセスの模式図 拡散接合は、三次元複雑流路構造を有するプレートレット接合体と噴射器本体との組立の計2回実施している。
Schematic diagram of diffusion bonding process for platelet injector

るプレートレット接合体外観と、これを噴射器本体に再度拡散接合し、漏れ試験による接合品質保証を行って完成させたプレートレット噴射器外観を示す。

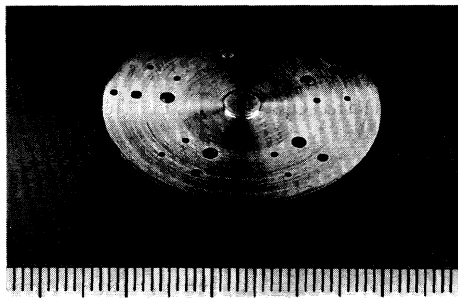
3.4 機能試験・燃焼試験

漏れ試験による接合品質保証を行ったプレートレット噴射器は、燃焼試験前に流量試験、噴射パターン試験等の機能試験に供試され、噴射特性の確認を行った。図6に 600N 、 60N モードでの噴射パターン試験状況を示す。噴射パターンは水により可視化されている。

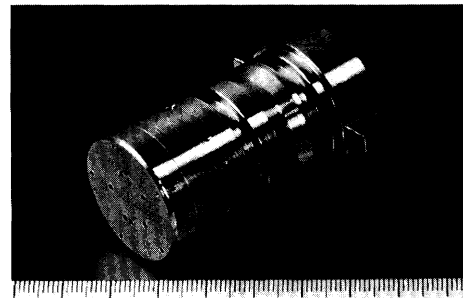
プレートレット噴射器を搭載した推力可変ロケットエンジンの燃焼試験は、宇宙空間を模擬するため、航空宇宙技術研究所角田宇宙推進技術研究センターのロケットエンジン高空性能試験設備にて実施した。図7に 600N 、 60N モードでの燃焼試験状況を示す。試験回数は26回、総燃焼秒時は 255s である。両推力モードでの試験において良好な噴射特性を確認し、 600N モードの燃焼試験では、比推力 280s (目標値 259s 、ただし膨張比20)、燃焼効率 91% を達成した。また本プレートレット噴射器での推力可変機構の成立性を実証した。今後、噴射面積の増大、噴射穴数の増加等により更なる性能向上を図る。

4. む す び

本研究では、 $(\delta+\gamma)$ 二相ステンレス鋼の高温域での優れた塑性流動性に着目し、本材料を適用した精密拡散接合技術を確認することによって、推進薬の三次元複雑流路構造を有する推力可変噴射器(プレートレット噴射器)を開発した。得られた成果をまと

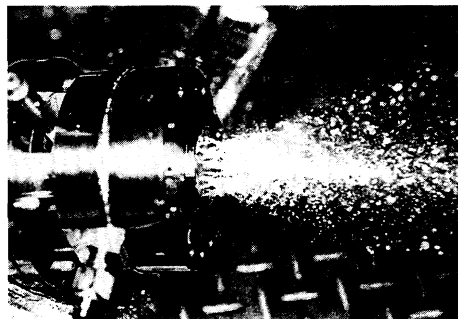


(a) プレートレット接合体

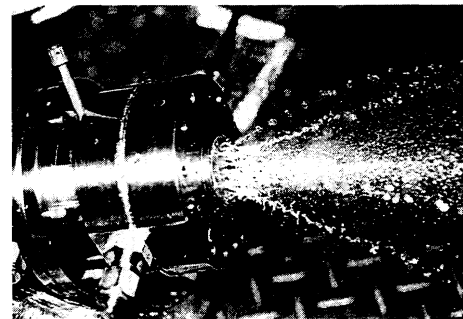


(b) プレートレット噴射器

図5 プレートレット接合体及びプレートレット噴射器外観 精密拡散接合により三次元複雑流路構造を形成したプレートレット接合体は、噴射器本体と再度拡散接合した。
Appearance of injector face, which have 3-D complicated orifices and platelet injector

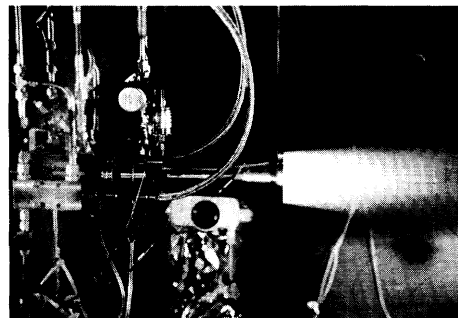


(a) 600 N モード

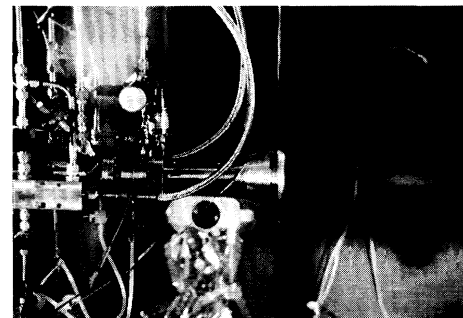


(b) 60 N モード

図6 プレートレット噴射器の機能試験状況 噴射パターンを水により可視化し、600 N、60 N 推力モードでの噴射パターンを評価した。
Appearance of functional tests for platelet injector



(a) 600 N モード



(b) 60 N モード

図7 推力可変ロケットエンジンの燃焼試験状況 600 N、60 N 推力モードでの燃焼試験を実施し、燃焼効率、比推力等の噴射特性を評価した。
Appearance of hot firing tests for throttleable rocket engine with platelet injector

めると以下のとおりである。

- (1) 二相ステンレス鋼を適用した精密拡散接合技術の確立により、積層薄板のずれ量、変形量を燃料、酸化剤の良好な衝突パターン形成のための要求値内に抑えることができた。
- (2) 精密拡散接合による界面組織は、接合欠陥のない良好な接合状態が確認された。また燃料、酸化剤流路間の漏れ試験でも、両流路間での漏れは確認されなかった。
- (3) プレートレット噴射器を搭載した推力可変ロケットエンジンの燃焼試験の結果、大推力 (600 N)、小推力 (60 N) モードで良好な噴射特性を確認するとともに、本噴射器での推力可変機構の成立性を実証した。また 600 N モードの燃焼試験では、比推力 280 s (膨張比 20)、燃焼効率 91 % を達成した。

本開発試験において、プレートレット噴射器開発実現性を実証できた。今後、更なる噴射特性の向上、噴射器本体の小型化等を

行うとともに本精密拡散接合技術の更なる玉成を進めて、実用化に向けて推進していく。

参考文献

- (1) 飴山 恵ほか, ($\delta+\gamma$) 2相ステンレス鋼の高温圧縮変形による微細二相混合組織の変化とその微細化, 日本金属学会誌 53-10 (1989) p.991~997
- (2) Kokawa, H. et al., Effect of Initial Microstructure of Intermediate Material on Superplastic Diffusion Bonding of Duplex Stainless Steel, ISIJ International Vol.35 No. 10 (1995) p.1291-1297
- (3) Nelson, D. E. et al., An Investigation of Weld Hot Cracking in Duplex Stainless Steels, Welding Journal Vol. 66 No. 8 (1987) p.241 s-250 s