第Ⅱ部 溶接・接合工学の最近の動向

I 溶接の材料科学

1. 鉄鋼材料の溶接冶金

川端 文丸*, 王 昆**, 小川 和博***,
井上 裕滋****, 佐藤 嘉洋*****, 小関 敏彦*****

Welding Metallurgy of Steels

by KAWABATA Fumimaru*, WANG Kun**, OGAWA Kazuhiro***,
INOUE Hiroshige****, SATO Yoshihiro***** and KOSEKI Toshihiko*****

キーワード：低合金鋼，ステンレス鋼，合金鋼，クラッド鋼，Ni 基合金，超細粒鋼，高強度鋼，靱性，疲労水素割れ，粒界腐食

1.1 低合金鋼溶接部

1) 05～06年にかけての溶接学会全国大会動向

05～06年の2年間に溶接学会全国大会でなされた報告総数は649件（シンポジウムを除く）である。その中で、低合金鋼に関わる報告は149件あり，約23%を占めた。さらに，溶接冶金に関するもの（分類記号I-03，III，IV-02，V-03）は，その33%（49件）であった。

溶接冶金関係を強度別に見ると，TS $\geq$ 590MPaは29%，TS $<$ 590MPaは49%，他22%である。いわゆる60キロハイテン材以上を対象とした研究が約1/3弱を占めておりこの方面への研究関心の高さが伺える。適用別に見ると，厚板関連が約51%，薄板関連が約39%で，厚板関連の報告が倍以上多い。また，要素・基礎研究が約57%，実用化研究が約43%であった。この中で，厚板主要分野（造船（2%）・建築（12%）・橋梁（18%））が約32%，薄板主要分野（自動車）が約10%を占めている。

05～06年度では，国プロ関連報告が16件あるが溶接冶金関係では「環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術研究体」（NEDO-JRCM）1件，科学研究費補助（JSPS）若手研究も4件含まれた。

2) 05～06年の研究動向

超微細粒鋼に関し，HAZ軟化および継手強度を対象とした溶接冶金（組織制御の観点）の研究は05年度に多く，様々な溶接法の試みとともに総計で9件の報告がなされた。レーザ溶接が4件¹⁻⁴⁾と最も多く，次いで超狭開先アーク溶接（2件）^{5, 6)}，摩擦攪拌接合（FSW）（2件）^{7, 8)}，摩擦圧接（1件）⁹⁾であった。Al-Si系耐候性鋼超微細粒鋼

の狭開先アーク溶接でHAZ軟化が抑制できたことが報告されている⁹⁾。

レーザ溶接の冶金的な検討も多く，先の超微細粒鋼への適用研究¹⁻⁴⁾のほか，高強度鋼（TS780MPa，TS980MPa）¹⁰⁾やTRIP鋼¹¹⁾などの高機能鋼材への適用など実用を念頭に溶接金属組織を調査した例が見られた。また，レーザ-MAGハイブリッド溶接法における凝固現象の特徴なども報告された¹²⁾。

FSWの研究は05～06年度も活発で，超微細粒鋼接合部における結晶粒粗大化の抑制^{7, 8)}や接合前の母材組織が継手強度に及ぼす影響¹³⁾，炭素鋼の母材組成，接合方法条件が組織，継手特性に及ぼす影響¹⁴⁻¹⁶⁾など，組織-特性関係が多い。このほか，スポットFSWのミクロ組織変化に関する報告も見受けられた^{17, 18)}。

06年度は，鋼構造建築分野の柱梁接合部に関して，CO₂多層溶接金属靱性についての系統的な多くの報告がなされた¹⁹⁻²⁴⁾。当該溶接金属のシャルピー吸収エネルギー（ vE_0 ）のバラツキ原因が原質部と再熱部の不均質割合の変化にあることが究明された¹⁹⁾。同時に不均質性指標（柱状組織分率： a_c ）が提唱され²⁰⁾，この組織定量評価法に基づいて粒界フェライトが20%程度存在する場合にもっとも高い vE_0 が観測されるなど²¹⁾，入熱，パス間温度の vE_0 への影響が整理されるとともに，実大模擬ボックス柱梁接合部において検証された²²⁾。柱梁接合に関しては，冷却速度や溶接金属化学組成の観点^{23, 24)}や，耐高温割れ性に関するもの²⁵⁾，さらには溶融亜鉛めっき割れの研究など^{26, 27)}多数の報告があり，鋼構造建築分野における溶接接合冶金への関心の高まりを示している。

国プロ「省エネルギー型鋼構造接合技術の開発」（NEDO-JRCM）と関連し，低変態温度溶接材料を溶接角変形低減に利用する研究が06年にほぼ完了し，大型補剛パネルによる実証を含む成果が報告された²⁸⁻³¹⁾。実用面で問題となる耐高温割れ性は，隅肉溶接金属の初晶を δ フェライトとする凝固モード制御によって確保されることが報告された³²⁾。

この他，溶接金属の凝固過程をその場観察する手法と観察結果も報告されるなど³³⁻³⁶⁾，溶接金属の相変態現象解明に向けた研究³⁷⁻³⁹⁾が続けられている。

原稿受付 平成19年5月11日

*正 員 JFEスチール(株) Member, JFE Steel
**正 員 (株)YAKIN川崎 Member, Yakin Kawasaki Co., Ltd.
***正 員 住友金属工業(株) Member, Sumitomo Metals
****正 員 新日本製鐵(株) Member, Nippon Steel
*****正 員 大阪市立大学 Member, Osaka City University
*****正 員 東京大学 Member, The Tokyo University

文 献

1) 宮崎ら, 講概, 76, 48 2) 柳田ら, 講概, 76, 50 3) 浜谷ら, 講概, 76, 52 4) 浜谷ら, 講概, 77, 430 5) 岩橋ら, 講概, 78, 20 6) 松岡ら, 講概, 79, 24 7) 上路ら, 講概, 77, 166 8) 平野ら, 講概, 77, 172 9) 木村ら, 講概, 77, 34 10) 渡辺ら, 講概, 77, 244 11) Kangら, 講概, 77, 248 12) 劉ら, 講概, 77, 258 13) 藤井ら, 講概, 77, 170 14) 藤井ら, 講概, 77, 168 15) 崔ら, 講概, 78, 58 16) 立野ら, 講概, 79, 58 17) 大橋ら, 講概, 76, 110 18) 青田ら, 講概, 77, 176 19) 津山ら, 講概, 78, 34 20) 橋場ら, 講概, 78, 36 21) 津山ら, 講概, 79, 436 22) 橋場ら, 講概, 79, 438 23) 田中ら, 講概, 79, 202 24) 田中ら, 講概, 79, 204 25) 鈴木ら, 講概, 79, 32 26) 護ら, 講概, 79, 192 27) 護ら, 講概, 79, 194 28) 森影ら, 講概, 76, 140 29) 三上, 講概, 77, 310 30) 猪瀬ら, 講概, 78, 234 31) 猪瀬ら, 講概, 78, 74 32) 渡辺ら, 講概, 79, 231 33) 山田ら, 講概, 79, 34 34) 寺崎ら, 講概, 79, 44 35) 米村ら, 材ブ, 19, 172 36) 小溝ら, 材ブ, 19, 173 37) 畑野ら, 鉄と鋼, 91, 397 38) 榎本ら, 鉄と鋼, 91, 609 39) 畑野ら, 鉄と鋼, 91, 875

1.2 ステンレス鋼

05~06年の2年間に溶接学会全国大会でなされたステンレス鋼関連の報告総数は78件(シンポジウムを除く)である。その中で, オーステナイト系ステンレス鋼に関わる報告は65件で, 約81%を占めた。二相ステンレス鋼, スーパー二相ステンレス鋼, 高窒素ステンレス鋼およびフェライト系ステンレス鋼に関する報告は9件で約12%, 異材溶接の関連は12件で約15%を占めた。溶接方法については, アーク溶接に関する報告が30件であるのに対して, レーザ溶接の冶金学的報告は18件で約23%を占め, 増加傾向がみられた。

オーステナイト系ステンレス鋼の基礎的検討として, 溶接金属におけるAF及びFAモード凝固組織の形成¹⁾, δ/γ 相及びNbC晶出を伴う溶接金属凝固割れ感受性²⁾, 溶接部におけるスピノーダル分解挙動³⁾, 溶接凝固過程のin-situ観察⁴⁻⁶⁾, アーク溶接時の溶融池内湯流れの表面・内部同期観察⁷⁾などの報告があった。また, 溶接変形に及ぼす溶込み形状の影響⁸⁾, 溶接金属の時効による組織と機械的性質変化⁹⁾, 表面強加工組織に対する溶接熱影響¹⁰⁾などの検討もなされた。原子炉用ステンレス鋼に関して, 溶接溶融部近傍の組織変化¹¹⁾, 溶接部における粒界応力腐食割れ発生機構^{12, 13)}, 粒界制御による溶接熱影響部の耐粒界腐食性の向上¹⁴⁾について報告された。また高窒素ステンレス鋼に関しては, 粒界性格分布制御¹⁵⁾, FSW部のミクロ組織¹⁶⁾について報告がなされた。

二相ステンレス鋼では, 溶接後熱処理を受けた肉盛り溶接部の性能に及ぼすフェライト相割合の影響¹⁷⁾, 抵抗溶接部の組織¹⁸⁾, 突き合わせ抵抗溶接継手性能に及ぼすアプセット圧力および時間の影響¹⁹⁾, 摩擦攪拌接合部の組織観察²⁰⁾, スーパー二相ステンレス鋼溶接ボンド部におけるフェライト粒成長・オーステナイト生成と靱性との関係が報告された。

溶接材料については, ボロン入りステンレス鋼溶接材料²¹⁾, スーパーオーステナイト系ステンレス鋼の高靱性溶接材料²²⁾に関する報告があった。また, エレクトロスラグ肉盛り溶接による347ステンレス鋼耐食層と1.25Cr-0.5Mo鋼下地との剥離性に及ぼす溶接フラックスの影響²³⁾, オーバーレイ/母材界面部における割れ感受性に及ぼす

溶接熱サイクルの影響²⁴⁾と水素の拡散集積挙動に及ぼす補修溶接熱サイクルの影響²⁵⁾が報告された。

溶接方法に関する検討では, オーステナイト系ステンレス鋼のレーザ溶接に関するものが多く, 薄鋼板の重ね溶接に及ぼす溶接条件の影響²⁶⁾, ビーム形状の影響²⁷⁾, 高出力ファイバーレーザ溶接現象と溶込み特性²⁸⁾, 快削電磁ステンレス鋼の溶接性に及ぼすTi炭硫化物の影響²⁹⁾など報告された。レーザ・アークハイブリッド溶接に関しては, コイルカバープレートへの適用³⁰⁾と高Mnオーステナイト系ステンレス鋼の溶接検討³¹⁾も報告された。摩擦攪拌接合関連では, 430フェライト系ステンレス鋼接合部のミクロ組織と機械的特性³²⁾, オーステナイト系ステンレス鋼の継手特性³³⁾, TBFJの接合パラメータに関する研究³⁴⁾, PCBN接合ツールの摩耗³⁵⁾に関する検討の報告があった。

ステンレス鋼と異材の接合に関しては, レーザ溶接を用いて, アルミニウム合金との接合³⁶⁾, プラスチックとの接合³⁷⁾, Inconel600との溶接³⁸⁾に関する冶金学的検討と異材レーザ溶接部の凝固割れ発生評価法³⁹⁾の検討がなされた。また, 抵抗スポット溶接とアーク溶接による異種金属接合の報告⁴⁰⁻⁴²⁾が見受けられた。

文 献

1) 小薄ら, 講概, 76, 24 2) 小薄ら, 講概, 78, 244 3) 西本ら, 講概, 79, 218 4) 小薄ら, 講概, 77, 212 5) 小薄ら, 講概, 79, 42 6) 米村ら, 講概, 79, 38 7) 水谷ら, 講概, 76, 162 8) 中谷ら, 講概, 77, 278 9) 桑野ら, 講概, 77, 428 10) 加藤ら, 講概, 79, 26 11) 宮崎ら, 講概, 76, 88 12) 森ら, 講概, 77, 442 13) 森ら, 講概, 77, 444 14) 道内ら, 講概, 79, 214 15) JINら, 講概, 76, 22 16) PARKら, 講概, 79, 60 17) SUNGら, 講概, 77, 440 18) 寺島ら, 講概, 78, 172 19) 野田ら, 講概, 79, 388 20) 山田ら, 講概, 79, 56 21) LUOら, 講概, 78, 240 22) 本間ら, 講概, 78, 246 23) SUNGら, 講概, 79, 216 24) 森ら, 講概, 76, 6 25) 森ら, 講概, 79, 228 26) 阿部ら, 講概, 76, 82 27) 阿部ら, 講概, 77, 246 28) 木下ら, 講概, 79, 260 29) 上仲ら, 講概, 76, 20 30) 南ら, 講概, 77, 256 31) 芦田ら, 講概, 79, 22 32) PARKら, 講概, 76, 18 33) 石川ら, 講概, 76, 108 34) 篠田ら, 講概, 76, 116 35) PARKら, 講概, 77, 174 36) 杓名ら, 講概, 79, 270 37) 片山ら, 講概, 78, 112 38) 篠崎ら, 講概, 79, 276 39) 篠崎ら, 講概, 77, 124 40) 里中ら, 講概, 76, 136 41) 才田ら, 講概, 77, 414 42) 才田ら, 講概, 78, 238

1.3 合金鋼

発電用ボイラや石油精製装置等を主とする高温用途を対象とした鋼に関する研究は, 05~06年の溶接学会全国大会で13件の報告が行われた。そのうち, 9%Crフェライト系鋼関係が7件で, HAZでのクリープ強度低下の機構と成分設計面からの改善の指針¹⁻⁶⁾ならびに溶接金属靱性の研究⁷⁾に関するもの。オーステナイト系鋼が1件で30%Cr系高耐食鋼溶接金属性能に関する検討⁸⁾, オーバーレイ関係5件で, 13Cr系肉盛溶接金属の性能改善⁹⁻¹⁰⁾, Cr-Mo鋼とオーステナイト系肉盛溶接金属との界面での水素割れに関する研究¹¹⁻¹³⁾。また耐熱鋼の溶接性に関する研究は鉄鋼協会でも一連の報告が行われた¹⁴⁻¹⁸⁾。

最も報告件数の多かった9%Crフェライト系鋼HAZでのクリープ強度低下に関しては, タイプIV破壊と呼ばれ長年の課題となっていたが, ここ数年で機構面の研究, 成分設計面からの改善指針の検討の進展が見られた。100ppm程度のBを添加してHAZ細粒化温度域での結晶

粒径を大きくする方向^{1, 2, 16, 18)}、もう一つはC量を低減してHAZ細粒化温度で強化に寄与する微細な炭化物の高温使用時の成長を抑える方向³⁻⁶⁾の二つの改善法が提案された。

オーバーレイ関係では、13%Cr系肉盛溶接金属に関して数年前から一連の研究が報告されており、耐水蒸気酸化性の観点から合金成分、特にNi量の最適化指針が示されている^{9, 10)}。また、石油精製压力容器の補修溶接を対象に2.25%Cr-1%Mo鋼とSUS309/347ステンレス鋼肉盛溶接金属との界面での熱的脆化と水素脆化の重量による剥離機構に関する一連の研究¹¹⁻¹³⁾では、炭化物の生成／固溶・水素拡散集積の制御の視点から剥離防止に有効な補修溶接の施工指針に基礎知見が示された。

文 献

- 1) 清水ら, 講概, 78, 28 2) 清水ら, 講概, 78, 30 3) 平田ら, 講概, 77, 198 4) 平田ら, 講概, 77, 200 5) 平田ら, 講概, 78, 220 6) 平田ら, 講概, 78, 222 7) 西川ら, 講概, 79, 224 8) 平田ら, 講概, 78, 236 9) 佐藤ら, 講概, 77, 204 10) 佐藤ら, 講概, 79, 246 11) 森ら, 講概, 76, 6 12) 森ら, 講概, 76, 8 13) 森ら, 講概, 79, 228 14) 杉本ら, 材料とプロセス, 18-1551 15) 久布ら, 材料とプロセス, 18-1552 16) 仙波ら, 材料とプロセス, 18-1613 17) 柚賀ら, 材料とプロセス, 19-476 18) 駒井ら, 材料とプロセス, 19-564

1.4 Ni 基合金・クラッド鋼・異材溶接

高合金鋼関連の溶接学会全国大会での講演は、直近2年間では、低温変態温度溶接材料に関する報告が11件と突出した。ただし、溶接材料開発等に係わる冶金分野の報告は3件^{1, 2)}で、残り8件は溶接継手の変形低減、残留応力低減等の力学分野の報告である。

Ni基合金の溶接冶金関連では、直近2年間の溶接学会全国大会においては、Inconel 718摩擦圧接部の組織形成機構および継手特性、Inconel 600の摩擦攪拌接合部の組織と機械的特性、MA690の多層盛溶接金属のミクロ割れとその抑制方法、レーザ表面溶融補修部の耐食性、Inconel 625溶接ワイヤの靱性改善など12件の講演が報告された。国内主要雑誌では、貴金属ろうを用いたInconel 600のレーザブレイジング性について、各種ろう材でのろう層内の硬さ、引張強度に及ぼす生成層の影響³⁾、ベジアンエキスパートシステムを用いたInconel 738LCの液相拡散接合プロセスの最適化⁴⁾などが報告されている。また、等温凝固を利用したNi基単結晶超合金(CMSX-4)の液相拡散補修による肉盛補修に関し、補修部の結晶方位解析の結果、肉盛部は母材と同一結晶方位を有し、本方法により補修部の単結晶化が可能であることが示された⁵⁾。海外誌においては、Inconel 600のレーザブレイジング⁶⁾、Inconel 718の電子ビーム溶接^{7, 8)}が報告されたほか、MA690の多層盛溶接金属のミクロ割れ感受性と割れメカニズムおよび割れ抑制方法について報告された⁹⁻¹¹⁾。MA690の再熱溶接金属に発生するミクロ割れは、凝固割れ、液化割れおよび延性低下割れに大別でき、凝固割れおよび液化割れはP、Sの粒界偏析に起因し、延性低下割れはオーステナイト粒界強度が低く、すべり量が多いことに起因している。MA690に適正量のLaを添加してすべてのミクロ割れは抑制されるが、過剰添加では凝固

割れおよび液化割れが増加する。Laによる割れ抑制機構としては、PおよびSを化合物として固定することによる粒界偏析の低減、高温での粒界強度の上昇が挙げられるが、一方、過剰のLa添加は低融点金属間化合物を形成し、粒界の局部溶融・液化、固液共存温度域が拡大し、凝固割れおよび液化割れを増加させる。

クラッド鋼の溶接関連では、抵抗クラディング法によって形成した超合金クラッドに関し2件が溶接学会全国大会で報告された。研究論文としては、純Alと炭素鋼を真空圧延接合法で製作したクラッド材の接合部強度および接合界面組織に及ぼす素材、接合条件の影響が報告されている¹²⁾。工業用純Alの場合、接合界面には金属間化合物は認められず、Al-Fe-Si-Oを含有するアモルファス層を介して接合し、母材破断が達成される。真空度の上昇でアモルファス層の厚さは増加するが、逆に、真空度が低くなると界面にFe₃O₄が形成されて引張強度は低下する。また、99.99mass%Alの場合、接合界面はAl-Fe-Si-Oを含有する2層のアモルファス層およびAl-Fe-Si-Mn-Oを含有するナノ結晶帯からなる中間層を介して接合され、母材破断が達成されることが報告されている。

文 献

- 1) 銭谷ら, 溶論, 23, 95 2) 本橋ら, 溶論, 24, 223 3) 宋ら, 溶論文集, 23, 587 4) 坂元ら, 溶論, 24, 100 5) 藤田ら, 溶論, 24, 233 6) Saidaら, STWJ, 11, 694 7) Lundbackら, STWJ, 10, 717 8) Sivaprasadら, STWJ, 11, 127 9) Nishimotoら, STWJ, 11, 455 10) Nishimotoら, STWJ, 11, 462 11) Nishimotoら, STWJ, 11, 471 12) 山口ら, 溶論, 24, 215

1.5 新技術関連

過去2年間の溶接学会全国大会での報告の中から新技術として、(1)超微細粒鋼関連、(2)低変態温度溶接材料関連、(3)粒界制御材料関連、(4)摩擦攪拌接合関連、(5)放射光を用いた溶接凝固過程のin-situ観察の5つに注目した。各々の報告件数は、(1)9件、(2)14件、(3)5件、(4)24件、(5)9件であった。超微細粒鋼に関連する報告は、やや減少している。低変態温度溶接材料に関する報告は、依然として活発である。摩擦攪拌接合に関する研究は非常に活発であり、鉄鋼材料に関する研究も増加傾向にある。また、放射光のような高輝度光源を用いて溶接における凝固過程をその場観察する試みがなされた。

5μm以下やサブミクロンの結晶粒径の「超細粒鋼」は、高強度とともに延性・脆性遷移温度が低く、疲労限も高いなど、機械的性質の優れた材料である。しかし溶接・接合性については課題も多く、アーク溶接法等では熱影響部の軟化が懸念され、接合プロセスの確立が課題である。このためレーザ溶接^{1, 2)}、狭開先アーク溶接³⁾、摩擦攪拌接合(FSW)^{4, 5)}、摩擦圧接⁶⁾および電子ビーム溶接⁷⁾が試みられると同時に、溶接熱影響部の軟化機構⁷⁻⁹⁾が検討された。依然として課題も多いが、着実に克服されてきている。

低変態温度溶接材料は、変態膨張するマルテンサイト変態を利用して溶接部に圧縮の残留応力を誘起し、これにより溶接部の疲労強度を向上させる。マルテンサイト

変態開始温度を低下させるため、Cr, Ni 量を考慮した合金開発^{10, 11)}が行われるとともに微量酸素の影響¹²⁾も検討された。また、溶接部の機械的性質¹³⁻¹⁵⁾および変形挙動¹⁶⁻¹⁸⁾も調べられ、さらに、特性について各種数値解析法を用いた検討¹⁹⁻²³⁾が行われた。

粒界制御によるステンレス鋼の耐食性向上が、窒素ステンレス鋼²⁴⁾、SUS316 鋼²⁵⁻²⁸⁾において検討された。

摩擦撹拌接合 (FSW) およびスポット摩擦撹拌接合に関する研究は活発である。研究対象は Al 合金など低融点金属が多いものの、鉄鋼材料に関する研究も増加してきている。Al 合金や Zr 合金と炭素鋼の異材接合²⁹⁻³³⁾、各種炭素鋼³⁴⁻⁴⁶⁾およびステンレス鋼⁴⁷⁻⁵²⁾の接合が検討された。また、加工ツールの摩耗挙動、被接合材料の炭素量および接合過程での冷却の効果等が調べられた。鉄鋼材料の摩擦撹拌接合の実用化も近いように思われる。

放射光の高輝度光源を用いて溶接における凝固過程をその場観察する試みが行われ、ステンレス鋼⁵³⁻⁶⁰⁾やインバー合金⁶¹⁾の凝固過程がその場観察された。

文 献

- 1) 宮崎ら, 講概, 76, 48 2) 柳田ら, 講概, 76, 50 3) 松岡ら, 講概, 79, 24 4) 上路ら, 講概, 77, 166 5) 平野ら, 講概, 77, 172 6) 木村ら, 講概, 77, 34 7) 浜谷ら, 講概, 76, 52 8) 浜谷ら, 講概, 77, 430 9) 岩橋ら, 講概, 78, 20 10) 渡辺ら, 講概, 78, 226 11) 渡辺ら, 講概, 79, 150 12) F. Gunic ら, 講概, 76, 10 13) 三上ら, 講概, 77, 310 14) 金ら, 講概, 78, 232 15) 金ら, 講概, 79, 158 16) 猪瀬ら, 講概, 78, 234 17) 猪瀬ら, 講概, 79, 154 18) 中島ら, 講概, 79, 156 19) 山本ら, 講概, 76, 148 20) 藤田ら, 講概, 77, 390 21) 森影ら, 講概, 78, 228 22) 望月ら, 講概, 78, 230 23) 三上ら, 講概, 79, 152 24) ジンら, 講概, 76, 22 25) 道内ら, 講概, 77, 438 26) 道内ら, 講概, 77, 210 27) 宮城ら, 講概, 79, 212 28) 道内ら, 講概, 79, 214 29) 石井ら, 講概, 76, 106 30) 高橋ら, 講概, 76, 114 31) 山本ら, 講概, 76, 118 32) 石井ら, 講概, 77, 158 33) 安井ら, 講概, 78, 184 34) 大橋ら, 講概, 76, 110 35) 上路ら, 講概, 77, 166 36) 藤井ら, 講概, 77, 168 37) 藤井ら, 講概, 77, 170 38) 平野ら, 講概, 77, 172 39) 青田ら, 講概, 77, 176 40) 西原, 講概, 77, 178 41) 立野ら, 講概, 78, 54 42) 崔ら, 講概, 78, 58 43) 山口ら, 講概, 78, 60 44) 上路ら, 講概, 78, 64 45) 池田ら, 講概, 78, 78 46) 立野ら, 講概, 79, 58 47) 石川ら, 講概, 76, 108 48) 朴ら, 講概, 76, 18 49) 朴ら, 講概, 77, 174 50) Y. S. Sato ら, 講概, 78, 152 51) 山田ら, 講概, 79, 56 52) 朴ら, 講概, 79, 60 53) 小薄ら, 講概, 76, 24 54) 小薄ら, 講概, 77, 206 55) 米村ら, 講概, 77, 208 56) 寺崎ら, 講概, 77, 210 57) 小薄ら, 講概, 77, 212 58) 米村ら, 講概, 79, 38 59) 小薄ら, 講概, 79, 42 60) 寺崎ら, 講概, 79, 44 61) 米村ら, 講概, 79, 40