



鉄鋼における最近の計測技術

安藤 繁*

Recent Measurement Technologies in Japanese Steel Industry

Shigeru ANDO

Synopsis : This article reviews the developments of the measurement technologies in the Japanese steel industry based on the papers published in the biannual conferences of The Iron and Steel Institute of Japan. We classify the roles of measurement technology into the one for automatic control, the one for inspection and quality improvement, and the one for scientific and technological developments. The needs for the measurement technologies shows a clear shift from the first one to the second one in this decade. Towards the next decade, we describe the increasing demand for the quality assurance and specialization, the micro parameterization and the multifactorial characterization of the quality, and the cooperation of multiple sensors in the ubiquitous network environments.

Key words : radiation; ultrasonic; electro-optical; magnetic; measurement; sensor; sensing; inspection; testing.

1. はじめに

日本鉄鋼協会から表記の報告の執筆を依頼された。著者にとっては努力を要しかつ知識の不足を露呈することではあるが、特定の分野や自己の研究に偏ることを避け、この機会をとらえてすべての分野を資料的な価値も考えて記述することにした。以下では、最初に計測技術の役割を三つに分けて論ずる。次に最近10年の鉄鋼計測技術の開発を網羅的に紹介し、簡単なコメントを加える。最後に、これまでの著者の経験をふまえつつ、今後の計測技術の方向性全般に関していくつかの観点から指摘を行う。

1.1 制御ループのための計測技術

周知のように計測と制御の結びつきは製造技術に大きな革新をもたらした。製造条件の安定化が製品のばらつきを減少させ、品質を安定化し、製品の信頼度を高め、低コスト化自動化省力化省エネルギー化を実現し、また製造の情報化やシステム化によって高効率と高速化を可能にする。このようにして改善された製造システムは競争力を得て多くの富をもたらす。計測制御の技術はかくのごとくキーテクノロジーである一方、いつまでたっても脇役でしかない。用いられる計測技術自体の新規性は必ずしも高くはない。むしろ時宜を得て安定技術や他技術をすばやく活用し、常に半歩でも前にいるような技術開発が好まれる。このような技術の特徴のゆえに日夜を分かたぬ競争は際限なく続く。

1.2 品質高度化のための計測技術

品質検査の始まりは出荷時の抜き取り検査であった。一

部の検査でロット全体の良否を判定し、そのロットの出荷を止める。製品自体の改善は手遅れだが、不良の原因を調べ、工程を改良し、同じ不良の発生を防止する。品質検査の計測技術は、製造技術全体の改善を目的とした知的フィードバックを可能にする。これが進展し工程が安定してくると異常は例外的な形でしか生じなくなる。品質高度化のための計測技術は、特定のパラメータ値の監視と管理から多数の不特定なパラメータの総合的監視・異常検出へと移行する。新たな計測技術の導入、複数のセンサ情報の蓄積と統合による高度な判断がこの段階の品質高度化には本質的となる。異常検出はまた本質的に全数検査を必要とする。異常が発見された際にその異常を分析し原因を調べ改善を行うには全工程での継続的監視が不可欠である。この結果実現される全数検査と全工程監視の体制は確実な品質保証を実現する。確実な品質保証は顧客にとって製造者と製品への価値感を転換する。素材提供から機能提供への転換である。高コストだがハイレベルな品質保証による高付加価値、顧客要求機能の素材への作りこみによる高付加価値がレベルの高い競争力と利益を生み出す。

1.3 分析探索のための計測技術

これは科学研究や新技術開発の基礎である。新現象の発見、新材料、新機能の創出は新たな計測技術が主要な駆動力となる。新しいシステムやサービスの背景にも、多くはセンサやセンシング技術の発明がある。このような計測技術は必要から生み出されるものとは限らず、学術的興味や副産物として生じるものも多い。このため良くも悪くも独自性が高く、ゆえにその価値は未知数である。しかしこの

ような計測技術の創出は科学技術レベルの高さと深さを証明する。そして当該分野のリーダーシップや発言力の上昇として返ってくる。これは無形だが大きな価値である。特にリーダーシップと発言力が「事実上の標準」に結びつく分野では決定的な意味をもち得る。米国のベンチャー企業や情報関連産業などを見れば分かるように、このような探索型の技術開発は将来ますますその比重を増すことは明らかであろう。

2. この10年の鉄鋼計測研究の概要

以下に鉄鋼協会講演会の発表の要約をまとめる。分類は旧NKK およびJFE 技研ご提供の資料に基づく。要約は講演予稿のみに基づくもので、あくまで私見やメモに類する参考程度のものでご了解いただきたい。

2.1 温度計測関係

[真鍋 et al. 1993]¹⁾ 対象表面の反射エネルギーの角度分布から放射率を測定する方法を述べている。反射率と放射率の和が1となることを用いて、赤外域での半球反率を3種類の角度に関して求め、1からさし引く。

[真野 et al. 1993]²⁾ 衛星搭載用のInSb検出素子を用いた100度以下の低温領域の鋼板温度計を開発した。

[真野 et al. 1994]³⁾ 表面から200 μm だけ浮かせた間隙に圧縮空気を通し、温まった空気の色を熱電対で測定する方式の温度センサを報告している。

[安達 et al. 1994]⁴⁾ 反射率と放射率の和が1となることから、2つの角度で反射率を求めて放射率を推定する方法を実用化した。オンラインで測温精度 ± 10 度が得られるとのこと。

[植松 et al. 1994]⁵⁾ 放射率関数が波長の1次関数で安定して近似できることを利用した多波長温度計を電磁鋼板ラインに適用した。

[若井 et al. 1994]⁶⁾ 金属管被覆光ファイバを溶銑中に挿入する消耗型の放射温度計を開発した。先端付近から光ファイバを伝搬してくる光を放射温度計に導入する。

[山田 et al. 1994]⁷⁾ 消耗型光ファイバ放射温度計の長さ補正方法を述べている。500mのファイバに対して誤差1度以内を実現した。

[旗手 et al. 1994]⁸⁾ 消耗型の光ファイバ放射温度計でタンディッシュの温度測定を行い、従来の熱電対型と同等の精度が得られたと報告している。

[岡田 et al. 1995]⁹⁾ 音波CTを用いる炉内温度分布の測定法を述べている。投影データ数は音源8 \times マイク6。

[前川 et al. 1995]¹⁰⁾ OTDRのラマン散乱光の位置検出にM系列信号を用い、距離分解能0.4mで1200度の測定が行えたと述べている。

[前原 et al. 1995]¹¹⁾ 消耗型光ファイバ温度計を溶銑温度測定用に実機化したことの報告。精度は1.2度。

[前田 et al. 1995]¹²⁾ 消耗型光ファイバ温度計を連銑タンディッシュで実機化したことの報告。精度は0.98度。

[岡田 et al. 1995]¹³⁾ 音波CTによる熱処理炉の炉内温度分布計測への適用例を報告している。音波の発生にはガスの爆発音を使用した。

[橋本 et al. 1995]¹⁴⁾ 4波長を用いる鋼板の幅方向の走査式の放射温度計を報告している。精度は5.3度。

[鈴木 et al. 1995]¹⁵⁾ 穿孔中の鋼管の内面の温度を測定する光ファイバ式放射温度計を報告している。外面に対して内面は50度高いとのこと。

[前川 et al. 1996]¹⁶⁾ M系列利用のOTDRを溶銑樋に敷設し、耐火物の残厚分布を計測した。光ファイバは3ヶ月の連続測定に耐えたとのこと。

[山田 et al. 1996]¹⁷⁾ カラー鋼板温度を測定可能な放射温度計を報告している。1次元走査型の放射温度計で鋼板表面からの反射光を角度の関数として捉え、放射率を補正する。精度は2度。

[中居 et al. 1996]¹⁸⁾ 音波CTによる炉内温度分布計測に関する総括報告。

[手塚 et al. 1997]¹⁹⁾ M系列利用のOTDRによる高炉鉄皮の温度分布計測結果の報告。SUS管と金属管被覆ファイバの二重管構造。

2.2 流量計測関係

[佐竹 et al. 1993]²⁰⁾ 連銑用の冷却空気のカルマン渦流量計のレンジ拡大に関する報告。検討しているのは流体振動の電気変換部のみ。

2.3 位置計測関係

[古川 et al. 1993]²¹⁾ 超音波探傷のための溶接部の画像計測による自動追尾システムの報告。2次元CCDを用いているが、なぜ改善されるのか不明。

[藤沢 et al. 1994]²²⁾ 棒鋼の3個の圧延ロールの自動調整装置の開発。逆側から透過照明し、カメラを回転させながら輪郭を読み取る。

[太田 et al. 1998]²³⁾ 画像計測による溶接部の自動追尾システムの報告。適用対象の拡大が実現されたとのこと。照明法と2次元CCDがポイントのようだが、詳細は不明。

[関屋 et al. 1999]²⁴⁾ 溶融亜鉛メッキの際の鋼板の横位置の自動制御システムの報告。位置計測は板厚変化にも対応できる電磁式。

[松藤 et al. 2000]²⁵⁾ 超音波探傷のための溶接部中心の渦電流検出方式の報告。検出ヘッドを回転走査する。

[児玉 et al. 2000]²⁶⁾ 連続熱間圧延の際の接合点を圧延荷重計の出力波形のフィルタリングで検出する。フィルタの設計や根拠については述べられていない。

2.4 レベル計測関係

[手塚 et al. 1993]²⁷⁾ 溶銑表面のマイクロ波レベル計の報告。2周波数と3値のM系列を用い、複数反射体の弁別

能力は40 cm, 単一反射面で測定精度30 mm。

[手塚 et al. 1995]²⁸⁾ 2周波数のM系列時間差検出を電極式の溶銑レベル計測に適用している。原理の詳細は不明。

[香月 et al. 1997]²⁹⁾ スラグ下の湯面レベルの測定を渦電流により行っている。センサ湯面間が長距離であることがポイントで、電磁場解析によって逆問題的に距離を推定している模様。

2・5 断面計測関係

[古川 et al. 1994]³⁰⁾ 鋼管の溶接部内面の切削後の超音波検査装置の報告。

[河野 et al. 1995]³¹⁾ 熱間圧延後の鋼板の種々のパラメータを同時測定する装置の報告。光ファイバを用いた複数のレーザ距離計を用いてコンパクト防塵防熱化している。

[杉浦 et al. 2003]³²⁾ コークス炉の炉幅測定装置の報告。移動耐熱測定部と固定部とは無線で通信する。

[山下 et al. 2003]³³⁾ 同じくコークス炉の炉幅測定装置の報告。移動測定部にカメラを装着し、固定部から照射されるレーザ輝点の位置を撮像して姿勢を推定する。

2・6 速度計測関係

[伊勢居 et al. 2003]³⁴⁾ レーザドップラ法による圧延の際の鋼板速度計測の報告。X線厚み計と組み合わせて鋼板の質量流量を測定できる。

2・7 濃度計測関係

[徳田 et al. 1993]³⁵⁾ マイクロ波水分計を微粉炭製造設備の原料石炭供給コンベヤに設置した。

[種本 et al. 1997]³⁶⁾ 中性子弾性散乱水分計を乾燥期間中の取鍋不定形耐火物に適用した。

[井上 et al. 1999]³⁷⁾ 溶鋼の酸素濃度センサの改良。低酸素濃度でのジルコニア電極表面での分極を抑制する。

[種本 et al. 1999]³⁸⁾ 放射線障害防止法の規制外の微小線源を用いた中性子弾性散乱水分計の報告。反射材と減速材の配置に工夫がある。

2・8 光学的表面欠陥検査関係

[田中 et al. 1993]³⁹⁾ レーザ表面疵検査装置を連続焼鈍ラインに適用した。鋼板表面の水切を強化した。

[縄田 et al. 1993]⁴⁰⁾ 簡易なレーザ走査表面疵検査装置を重大欠陥検出に適用した。疵判定にはニューラルネットを適用したとのことだが詳細は不明。

[和田 et al. 1993]⁴¹⁾ 同じく簡易なレーザ走査表面疵検査装置とニューラルネットを用いた検査システムの報告。暗視野と明視野の出力を同時に用いている。

[毛利 et al. 1993]⁴²⁾ 光学式検査装置の疵の形状の判定アルゴリズムの報告。

[矢追 et al. 1994]⁴³⁾ レーザ走査表面疵検査装置の適用事例の報告。目視検査との比較も行っている。

[磯部 et al. 1994]⁴⁴⁾ レーザ走査表面疵検査装置のステン

レス冷延鋼板への適用事例の報告。30 mごとに求めた代表疵の情報からコイルの合否を判定し、その検査記録を製品に添付する。

[吉原 et al. 1995]⁴⁵⁾ 8個のCCDラインセンサと高速画像処理装置を用いた表面疵検査装置の適用結果の報告。レーザ走査式の走査速度の制約をなくし、580 mpmの高通板速度に対応した。

[岩田 et al. 1995]⁴⁶⁾ ステンレス冷延鋼板用のCCD式の表面疵検査装置の検討結果の報告。

[堀沢 et al. 1995]⁴⁷⁾ レーザ走査式表面疵検査装置の直前に油除去ロールを設置し、出荷直前の検査を可能にした。

[松蔭 et al. 1995]⁴⁸⁾ 微小欠陥検出用の砥石掛けロボットを報告している。詳細不明。

[金山 et al. 1995]⁴⁹⁾ スラブ表面を溶剤する際に生ずる火花を、映像信号のアナログ微分処理により強調し、表層直下の介在物を検出する。

[福高 et al. 1995]⁵⁰⁾ レーザ走査式表面疵検査装置の改善結果の報告。背景の低周波成分をデジタル信号処理によって除去し、閾値設定の精密化を実現する。

[山家 et al. 1995]⁵¹⁾ ビレット溶剤不良の画像検査システムの報告。

[波多野 et al. 1997]⁵²⁾ 鋼管溶接部の光切断法による検査システムを報告している。アンダーカット疵測定精度は0.1 mm, 検出率は95%。

[設楽 et al. 1999]⁵³⁾ 酸洗ラインにレーザ走査式表面疵検査装置を適用した。

[奥野 et al. 1999]⁵⁴⁾ 酸洗ライン用のCCDカメラ式の表面疵検査装置を開発した。明視野観察と暗視野観察を併用している。

[波多野 et al. 1999]⁵⁵⁾ 露光自動調整機構をもつCCDラインセンサ式塗装ラインの表面検査装置の報告。

[大重 et al. 1999]⁵⁶⁾ 鉄鋼プロセスのための赤外計測技術の総括報告。非冷却型赤外線カメラの低価格化が背景。照明光を要しないこと、破断の際の局部的温度変化の検出などが有望とのこと。

[波多野 et al. 1999]⁵⁷⁾ 光切断法による鋼管溶接部の検査システムに関する総括報告。

[杉浦 et al. 2002]⁵⁸⁾ 偏光を利用した表面欠陥検査装置の報告。直線偏光を入射し、反射光の3方向の偏光成分を計測し、油などによる無害模様と有害疵とを弁別する。基本的にはS3を除く3個のストークスパラメータ測定。

2・9 表面性状計測関係

[島田 et al. 1993]⁵⁹⁾ レーザの正反射光を用いた合金化度測定において、レーザを面上に走査することにより鋼板振動の影響を除いている。

[寺井 et al. 1993]⁶⁰⁾ 圧延ロールの黒皮の剥離を検出する画像処理の報告。亀甲状の亀裂の線素検出と接続、亀裂

内の剥離の検出の手順による。

- [館野 et al. 1993]⁶¹⁾ 白色光とレーザー光を用いた光沢度・白色度評価にニューラルネットを適用した。
- [柳本 et al. 1993]⁶²⁾ レーザ励起蛍光法を用いた塗油量計をオンライン測定に適用した。下地の鋼板と油の種類により受光蛍光強度を補正する。
- [前田 et al. 1993]⁶³⁾ 缶用材料の表面色調を分光反射率の平均傾きと反射強度で定量化するオンライン色調計を開発した。
- [風間 et al. 1994]⁶⁴⁾ 赤外の偏光解析による有機被覆鋼板の樹脂膜厚の測定実験を報告している。直線偏光を入射し、反射光を4個の固定角検光子で検出する。
- [福高 et al. 1994]⁶⁵⁾ 面積可変の補助熱源を半開と全開にしたときの放射量の比と溶融亜鉛メッキ鋼板の合金化度との関係を用いた合金化度計を開発し、X線法に対して0.5Fe%の精度を得た。
- [壱岐島 et al. 1995]⁶⁶⁾ β 線の後方散乱を利用した膜厚計において、塗料成分と後方散乱強度との関係を事前予測する方法を検討している。
- [森 et al. 1995]⁶⁷⁾ 溶融亜鉛メッキ鋼板の合金化度と強い相関を有するX線回折線を見出した。
- [虎尾 et al. 1995]⁶⁸⁾ ダル仕上げステンレス鋼板の白色光に対する拡散反射成分を測定し、目視による評価量と良い対応を得るインライン測定装置を開発した。
- [虎尾 et al. 1998]⁶⁹⁾ 鋼板表面の光学的計測技術の総括報告。知能化に着目し、光沢度と白色度などの複数情報の統合、測定範囲の拡大、塗油量測定における補償法などを例示している。
- [虎尾 et al. 1998]⁷⁰⁾ レーザ励起蛍光法を用いた塗油量計をオフラインの微少塗油量の測定に拡大した。励起は紫外パルスレーザー、検出は分光器と光電子増倍管。
- [杉浦 et al. 1999]⁷¹⁾ 熱延黒皮鋼板のスケール厚を黒皮内の遠赤外線吸収と下地表面での反射によって測定する。

2・10 形状計測関係

- [前田 et al. 1993]⁷²⁾ レールの局所的な波状の曲がりの振幅と波長をオンライン測定する装置を開発した。
- [北条 et al. 1993]⁷³⁾ 2台の赤外線カメラを用いた厚板の輪郭形状測定システムを開発した。
- [土屋 et al. 1993]⁷⁴⁾ 熱延時のクロップ(切り捨て部)の無駄をなくすシステムについて述べている。
- [楢田 et al. 1993]⁷⁵⁾ 缶用表面処理鋼板の品質保証のための寸法計を開発した。
- [小田 et al. 1994]⁷⁶⁾ 連続焼鈍ラインの炉内で鋼板形状と蛇行量を測定するシステムを開発した。凹凸計測はレーザー光走査と1次元CCDを用いた三角測量方式。
- [森 et al. 1995]⁷⁷⁾ 4台の2次元レーザー距離計を円周状に配置した熱間ビレットの外形測定装置を開発した。

- [片山 et al. 1995]⁷⁸⁾ カメラやレーザー距離計を組み合わせ、厚板の外形の各種パラメータを一括計測するシステムを開発した。
- [片山 et al. 1996]⁷⁹⁾ 6台のレーザー距離計を両側から2セット組み合わせ、H型鋼の外形を熱間で一括計測するシステムを開発した。
- [横山 et al. 1996]⁸⁰⁾ レーザ距離計を複数台用いて、形鋼の対称軸の偏りを計測するシステムを開発した。
- [穴吹 et al. 1997]⁸¹⁾ ロードセルを利用した分割ロール型の形状検出器を開発した。詳細機構は不明。
- [松本 et al. 1998]⁸²⁾ 2台の1次元レーザー距離計を回転・平行移動走査し、形鋼の断面形状を測定する装置を開発した。精度は0.5mm。
- [森 et al. 1998]⁸³⁾ 熱延クロップ形状測定装置の改善結果の報告。
- [前田 1993]⁸⁴⁾ 形鋼のオンライン寸法計を開発した。6台の固定レーザー距離計と昇降ヘッド搭載の6台の可動式レーザー距離計を用いる。精度は0.5mm程度。
- [安達 et al. 1999]⁸⁵⁾ 赤外半導体レーザーを用いて長距離用のレーザー距離計の開発結果の総括報告。波長680nmでレーザー出力20mWに450MHzの振幅変調を施す。
- [片山 et al. 2001]⁸⁶⁾ H型鋼の反り計の稼動状況報告。
- [岩田 et al. 2003]⁸⁷⁾ レーザシート光と1次元CCDを用いた棒鋼の曲がり計の開発結果の報告。

2・11 厚さ計測関係

- [湯浅 et al. 1993]⁸⁸⁾ チャープ波によるパルス圧縮超音波距離計測法を厚さ計測に適用した。周波数帯域は3.5から7.5MHz。
- [兵藤 et al. 1993]⁸⁹⁾ 鋼管の内面疵の最深部から表面までの残肉厚を超音波で測定した。斜め入射超音波の疵の先端部からの反射と内面からの反射とを弁別する。
- [古川 et al. 1994]⁹⁰⁾ 鋼管肉厚の熱間計測装置の報告。放射線による厚さ計測とカメラによる外形計測を組み合わせている。
- [兵藤 et al. 1997]⁹¹⁾ 鋼管の残肉厚の超音波計測法の報告。
- [竹久 et al. 1999]⁹²⁾ 厚板仕上げミルの出口に設置する γ 線厚さ計の改善に関する報告。
- [奥村 et al. 1999]⁹³⁾ γ 線による熱間肉厚計に関する総括報告。基本的にCTの再構成原理を用いているが角度分割は数個以下。
- [兵藤 et al. 1999]⁹⁴⁾ 鋼管の疵検査技術の総括報告。
- [吉田 et al. 2002]⁹⁵⁾ 2層材料の厚さを電磁超音波の共鳴スペクトルから求める方法を検討している。
- [飯塚 et al. 2003]⁹⁶⁾ ポリエチレン管製造時に内側に溶融層が残る状態で厚み計測を行う方法を検討している。3.5MHzで64回の同期加算で固相溶融相境界からの反射波が検出されたとのこと。

2・12 長さ計測関係

[山本 et al. 1993]⁹⁷⁾ オンライン幅計の報告。斜め入射の平行光とイメージセンサを用いるが詳細は不明。

[白神 et al. 1994]⁹⁸⁾ 超音波距離計でH形鋼のフランジ高さを測定する際のフランジの横ずれや傾きの影響を数値計算で求めている。

[大平 et al. 1995]⁹⁹⁾ 形鋼の熱間での形状計測システムを報告している。上下2台のxyステージに取り付けたレーザ距離計に放射温度計を組み合わせ、冷間寸法への換算も行う。

[中本 et al. 1997]¹⁰⁰⁾ レーザドップラ速度計の積算による測長装置を報告している。多点での通過時刻の測定と求められた形鋼の移動速度を組み合わせている模様。

[片山 et al. 1997]¹⁰¹⁾ 厚板の測長計の報告。レーザドップラ速度計と機械式速度計に厚板の前端検出器を組み合わせている。

2・13 超音波探傷関係

[古川 et al. 1993]¹⁰²⁾ 電縫鋼管の超音波探傷設備の改善報告。

[飯塚 et al. 1993]¹⁰³⁾ バースト波を用いた超音波探傷法の実験結果の報告。アレイ送信子の共振周波数によらず周波数が揃い超音波強度が向上する。

[村山 et al. 1993]¹⁰⁴⁾ 油井管用の多目的超音波探傷設備を紹介している。

[石川 et al. 1993]¹⁰⁵⁾ 継目無鋼管用のプロープ回転型の超音波探傷装置の改善結果の報告。

[江種 et al. 1994]¹⁰⁶⁾ 上記装置の設置報告。

[江種 et al. 1994]¹⁰⁷⁾ ロール表面の疵検査用の超音波探傷装置の設置報告。

[飯塚 et al. 1994]¹⁰⁸⁾ 超音波エコー信号の同期加算処理を検討している。移動しながらの最適な平均化回数はパルス密度0.25mmで8回。

[飯塚 et al. 1994]¹⁰⁹⁾ 上記システムの電縫鋼管への実機適用結果を報告している。

[兵藤 et al. 1995]¹¹⁰⁾ 油井管に斜めにはいった疵を検査する方法を提案している。入射角を固定して垂直軸まわりに回転させる模様だが詳細は不明。

[越野 et al. 1995]¹¹¹⁾ 駆動タイヤと探傷タイヤを別にした熱延用の超音波探触子の報告。探傷タイヤのゴム厚を薄くできるため高感度とのこと。

[中沢 et al. 1995]¹¹²⁾ 高分子圧電薄膜のPVDFを使用した超音波探触子アレイの報告。低コストと形状の柔軟性を特色とする。128mm×5mmでエレメント数32、駆動周波数5MHz。

[伊藤 et al. 1995]¹¹³⁾ 電縫鋼管用の超音波探傷装置の報告。外面、内面など合計12チャンネルでシーム追従は画像処理による。

[中治 et al. 1995]¹¹⁴⁾ 送受信子分離型で多チャンネル（入

射角）の斜角探触子の報告。探触子近辺での多重反射を減らし不感帯を減少できたとのこと。

[兵藤 1996]¹¹⁵⁾ 超音波探触子と信号処理部との間に設置して、表面反射の有無から管端を検出する装置を開発した。本来は信号処理部の改善で行うべきことか。

[高田 et al. 1996]¹¹⁶⁾ 介在物探傷法の提案。薄板の上下にそれぞれ1個の1次元探触子を対向させて用いる。アレイ化による高速性や不感帯の減少を利点にあげているが、疵の上面反射と下面反射の時間遅れや干渉をコヒーレントに検出する点が本質的と思われる。

[福井 et al. 1997]¹¹⁷⁾ 丸鋼片への広帯域探触子の適用について検討している。

[奥野 et al. 1997]¹¹⁸⁾ チャープ波を用いたパルス圧縮型探傷法をレールに適用した。

[福井 et al. 1997]¹¹⁹⁾ ビレットの欠陥検査のために渦流探傷法と表面波超音波探傷法を検討している。渦流探傷法はコーナ部で適用が困難とのこと。

[飯塚 et al. 1998]¹²⁰⁾ 厚板の超音波探傷にパルス圧縮方式と同期加算方式を実機導入したことの報告。

[福井 et al. 1998]¹²¹⁾ 電磁超音波探触子の開発報告。表面波を励起し、周波数660kHz、検出可能疵深さ0.5mm、リフトオフ0.5mm。受信子の構造は不明。

[兵藤 et al. 1998]¹²²⁾ アレイ探触子を用いて均一な超音波ビームを得る方法を検討している模様。

[高田 et al. 1999]¹²³⁾ 広帯域の探触子で圧延ロールの表面疵の検出が改善されたと報告している。微小ヒートクラック集合体の誤検出防止に有効とのことだが理由不明。

[永田 et al. 1999]¹²⁴⁾ SSP (Sprit Spectrum Processing) による超音波探傷法を開発した。適切な非線形処理と組み合わせたサブバンド信号処理は現代的方法で種々の面で重要だが、この方法自体の目的と定式化は不明。

[中村 et al. 1999]¹²⁵⁾ 超音波探傷信号を伝搬時間方向と走査方向の2次元パターンとして処理する方法を検討している。画像処理手段の導入で欠陥信号と妨害信号との弁別が容易になる。

[飯塚 et al. 1999]¹²⁶⁾ 鋼管の超音波探傷や漏洩磁束探傷に関する総括報告。

[兵藤 et al. 1999]¹²⁷⁾ 超音波による鋼管の疵検査技術に関する総括報告。

[福高 et al. 2000]¹²⁸⁾ 垂直探触子と斜角探触子を組み合わせる丸ビレットの表面付近の欠陥の深さを検出する装置の報告。

[橋本 et al. 2000]¹²⁹⁾ 垂直な鋼管の溶接部の欠陥個所の検出のための超音波探傷法を検討している。チャープ波パルス圧縮法で大入射角によるS/N比の低下を補う。

[山田 et al. 2000]¹³⁰⁾ 2個素子づつを組にして階段状とした斜角探触子アレイを報告している。溶接部の前後に

64 チャンネルのアレイを4個配置して種々の入射角に容易に対応する。

[高田 et al. 2001]¹³¹⁾ 1次元探触子を対向させた内部介在物探査システムの報告。長さ60 μm ×幅30 μm の欠陥が検出可能。

[山崎 et al. 2001]¹³²⁾ 上記探査システムの酸洗ラインでの実用化の報告。

[上田 et al. 2002]¹³³⁾ 超音波反射波の位相からビレット中の介在物と気泡を弁別する方法を検討している。

2・14 電磁気探傷関係

[藤沢 et al. 1993]¹³⁴⁾ ヨークコイルとリングコイルを組み合わせた角ビレットの磁粉探傷装置の報告。

[富田 et al. 1993]¹³⁵⁾ 熱間での渦流探傷装置の報告。

[増田 et al. 1993]¹³⁶⁾ 貫通型の渦流探傷装置の芯出しを自動化した。4方向の人工疵サンプルを用いる。

[石原 et al. 1993]¹³⁷⁾ 磁気光学探傷装置の実験報告。鋼板を一様に励磁し、漏洩磁束を磁気光学結晶でレーザ走査光の偏光回転に置き換えて検出する。磁気光学結晶のリフトオフは0.2mm。

[新田 et al. 1994]¹³⁸⁾ 薄板の漏洩磁束探傷装置の報告。170個のコイルを使用しリフトオフは2.5mm。

[藤井 et al. 1994]¹³⁹⁾ 鋼管内面の渦流探傷装置の改善報告。プローブコイル形状の調整等でスケール除去なしに検出を可能にした。

[横田 et al. 1994]¹⁴⁰⁾ 介在物検査用の漏洩磁束探傷装置の報告。半導体磁気センサを使用し、励磁コイルと一体化されている。リフトオフ0.5mm。

[吉村 et al. 1995]¹⁴¹⁾ 上記センサの実用化報告。

[藤原 et al. 1995]¹⁴²⁾ 角ビレットの磁粉探傷のために励磁方式の数値解析結果を報告している。直交する2面からの励磁と1面での励磁方式を比較し、一様性の点で1面励磁が望ましいと結論している。

[津山 et al. 1995]¹⁴³⁾ 角ビレットの磁粉探傷の自動化方式の報告。欠陥検出はCCDカメラと画像処理による。

[鈴木 et al. 1996]¹⁴⁴⁾ 電縫鋼管の磁粉探傷への画像処理の適用について検討している。

[加藤 et al. 1997]¹⁴⁵⁾ 漏洩磁束探傷へのE型コアの適用を検討している。コイルは中央のコアに配置し一種の差分検出を行う。リフトオフは0.5mm。

[津山 et al. 1997]¹⁴⁶⁾ 棒鋼用の漏洩磁束探傷装置の報告。磁化器の形状を最適化し、磁気センサにはシリコン基板上に形成したマイクロコイルをフェライト片に接着して使用している。

[穂高 et al. 1997]¹⁴⁷⁾ 渦流探傷によって圧延前の鋼帯の凹凸欠陥を検出する装置の報告。検出可能な欠陥サイズは直径12mm、深さ0.5mm。

[岩永 et al. 1997]¹⁴⁸⁾ E型コアを用いた漏洩磁束探傷装置の缶用素材への実用化報告。励磁部とE型センサ部は対

向して配置している。

[飯塚 et al. 1999]¹⁴⁹⁾ 回転探触子による漏洩磁束探傷における欠陥信号とノイズとの違いに基づき、「周回差分処理」を導入している。定式化は不明。

[横山 et al. 2000]¹⁵⁰⁾ CCDカメラの画像処理と渦流探傷を組み合わせた疵検査方式の報告。疵検出は画像処理、深さの検出に渦流探傷を用いる。

[和佐 et al. 2000]¹⁵¹⁾ 角ビレットの磁粉探傷装置の改善報告。磁粉液の散布方法を工夫し、カメラをラインCCDに置き換えて解像度を向上させた。

2・15 材質計測関係

[赤木 et al. 1993]¹⁵²⁾ 電磁駆動された3種の横波縦波超音波の厚さ方向の共振周波数から \bar{r} 値を求める方法を検討している模様。

[福田 et al. 1993]¹⁵³⁾ 熱延の冷却時の変態率測定について述べているが詳細不明。

[新田 et al. 1993]¹⁵⁴⁾ 珪素鋼板の珪素含有率を電気抵抗で測定する。抵抗測定は4点接触式。

[早戸 et al. 1994]¹⁵⁵⁾ 共振電磁超音波による \bar{r} 値測定装置の実機化の報告。

[鈴木 et al. 1994]¹⁵⁶⁾ レーザ超音波を用いた非接触の結晶粒径測定法に関する総括報告。パルスレーザによって励起された超音波インパルスの多重反射波形を裏面からレーザとFabry-Perot干渉フィルタにより検出する。減衰定数の周波数依存性を見るマクロ的方法のようだが詳細不明。

[鈴木 et al. 1994]¹⁵⁷⁾ 磁気センサを用いた結晶粒径測定に関する総括報告。ヒステリシスによる方法とインピーダンスによる方法を比較検討している。

[松藤 et al. 1994]¹⁵⁸⁾ 熱延のオンライン変態率測定に関する総括報告。冷却時に磁性が出現する過程を裏面からの交流励磁磁界の表面でのロックイン検出により観測する。

[村山 et al. 1995]¹⁵⁹⁾ 超音波を圧痕の検出手段とした硬度計を紹介しているが、詳細不明。

[奥野 et al. 1995]¹⁶⁰⁾ 超音波の多重反射波形の減衰係数から結晶粒径を測定するシステムの報告。

[高田 et al. 1996]¹⁶¹⁾ 超音波の伝搬速度の違いによる珪素鋼板の結晶粒の非破壊計測方法の報告。鋼板内の多重反射干渉による振幅変化で伝搬速度変化を検出している。

[高田 et al. 1997]¹⁶²⁾ 同じく超音波伝搬時間の違いによる方向性珪素鋼板の方位不良検出法を検討している。

[中村 et al. 1999]¹⁶³⁾ 圧延方向に伝搬する板波の音速測定による結晶粒評価手法を検討している。磁気特性と音速との関係も調べている。

[Hong & Choo 2000]¹⁶⁴⁾ 超音波の減衰係数と結晶粒サイズの関係の回帰式を実験的に求めている。

[兵藤 et al. 2001]¹⁶⁵⁾ エチレン製造用の鋼管の浸炭の進行

状態の計測に関して、超音波による方法と磁気的方法について比較検討している。励磁正弦波の3倍高調波の成分比による磁気的方法が有効とのこと。

[加藤 et al. 2002]¹⁶⁶⁾ 珪素鋼板のオンライン非接触珪素濃度計の報告。渦流センサ出力と珪素鋼板の抵抗率の関係を調べる。透磁率の影響を除くため直流飽和磁界をバイアスとして与える。

2・16 文字認識関係

[館野 et al. 1993]¹⁶⁷⁾ 厚板の文字認識装置の開発報告。倉庫入り口での現品照合に用いる。

[渡辺 et al. 1994]¹⁶⁸⁾ 鋳片等の文字認識手法の報告。

[安達 et al. 1999]¹⁶⁹⁾ 文字認識装置の開発報告。

[勝見 et al. 1999]¹⁷⁰⁾ ビレット端面の文字認識装置の開発報告。工程管理と照合に利用する。

[長谷川 et al. 2000]¹⁷¹⁾ スラブ端面の数字認識装置の開発報告。

2・17 プロセス監視関係

[今野 et al. 1993]¹⁷²⁾ 高炉の炉頂固定ゾンデの両端にAEセンサを取り付けて、高炉挿入物が落下時に発する衝撃音の定位によって落下位置を推定するセンサを報告している。誤差は最大0.2m。

[向山 et al. 1993]¹⁷³⁾ 連続鋳造装置におけるパウダ不足を監視する画像計測システムの報告。画像中から炎を除くのが要点のようだがアルゴリズムの詳細は不明。

[宮原 et al. 1993]¹⁷⁴⁾ 高炉挿入物の粒径をコンベア上の原料の画像処理によって測定する装置を報告している。

[秦 et al. 1994]¹⁷⁵⁾ 加速度センサでノズルの振動を検出して溶鋼とスラグの境界を検出する方法の報告。取鍋のスラグのタンディッシュへの流出を防ぐ。

[藤岡 et al. 1994]¹⁷⁶⁾ 出銑口閉鎖時期判断のための火花の画像処理方式を検討している。

[松本 et al. 1995]¹⁷⁷⁾ 連続鋳造モールドの湯面の監視画像を画像処理して品質管理に用いていることの報告。炎と赤熱の面積値を出力する。

[田辺 et al. 1996]¹⁷⁸⁾ 天井クレーンの自動化を目指したコイル位置計測手法の報告。2シートビーム2方向撮像の光切断法を試みている。

[田辺 et al. 1996]¹⁷⁹⁾ 同じく光切断法によるコイル巻取不良検出装置の報告。

[木村 et al. 1996]¹⁸⁰⁾ 転炉の吹きこぼれ予知技術に関する総括報告。上吹ランス基部の加速度センサと煙道の音響センサを操業情報とあわせて用いる。吹きこぼれ発生80秒前に85%の予知が可能とのこと。

[松藤 et al. 1997]¹⁸¹⁾ 冷間圧延後の溶接部検出のための渦流センサの報告。直流バイアス磁界の調整と地合ノイズに応じた可変閾値が特徴とのこと。

[菅野 et al. 1998]¹⁸²⁾ 転炉から流出する溶鋼とスラグの境界を判定する画像処理を検討している。

[Kim & Kang 2000]¹⁸³⁾ 連続鋳造直後のスラブの画像監視と画像処理を検討している。ブレイクアウトの予知や工程管理が目的。

[山科 et al. 2000]¹⁸⁴⁾ コイル結束異常検出のための画像処理手法の報告。

[伊藤 et al. 2002]¹⁸⁵⁾ 多元的な高炉操業データの画像情報化手法を検討している。高炉表面の2次元座標上に温度や圧力をマップして空間的な把握を容易にする。

[松崎 et al. 2002]¹⁸⁶⁾ 同じく実機適用例の報告。

[伊藤 et al. 2003]¹⁸⁷⁾ 同じくステーブ温度の時間変化率と、炉内圧力の空間勾配の画像情報化を報告している。

[酒井 et al. 2003]¹⁸⁸⁾ 連続鋳造のブレイクアウト早期検出のための画像処理手法の報告。火花を検出しその頻度で判断する。

[及川 et al. 2003]¹⁸⁹⁾ パルスレーザスポット溶接時の挙動を高速度カメラで撮像し、プラズマの発光の推移と材料間のギャップの関係を見出した。

[伊藤 et al. 2003]¹⁹⁰⁾ 高炉操業データの画像情報化のために融着帯の推定方法と可視化方法を検討している。

3. 鉄鋼計測のこれからの課題

これからの鉄鋼計測技術は、おのずとより大きなフィードバックループを有するシステムに研究課題が移ってゆくであろう。これまでの10年の研究課題の変化の中にも、これを読みとることができる。設備の保守や延命のための計測技術、光学的表面欠陥検査や表面性状計測、三次元の寸法計測や形状計測、超音波探傷や電磁気探傷による内部介在物の検出、多元的把握を容易にするプロセス監視など、技術開発のターゲットが鉄鋼プロセス全体の高度化に広がってきている。

3・1 品質安定化から品質高度化へ

操業条件の安定化によって品質を安定化させる。不良率の低下や操業効率の向上でコストダウンが図られる。これは大量生産時代の基本的な戦略であり、大きな成功をおさめた。しかし、これからは品質の安定化と品質の高度化は必ずしも一致しない。顧客の性能要求に応え顧客の信頼を獲得すること、新たな機能を生みだし新たな顧客を獲得することが品質の高度化でなくてはならない。

3・2 マクロ計測からミクロ計測へ

要求指標に関して的確な代用指標を発見し、それを目標値としたコンパクトで効果的な制御系を組み上げる、これが計測技術者の技術センスの大きな部分を占めていた。代用指標の多くはブラックボックス的なマクロパラメータであった。しかし計測の本来の目的は知識獲得にある。より深くより正しい知識にもとづいて的確に判断し行動する、この意義を軽んじてはならない。科学的な知識獲得の基本は分析にある。発展した計測手段をよりミクロなパラメー

タの取得に振り向け、現象の本質に立脚した対処法により、確実な品質と信頼性をもった製品を目指すべきである。

3.3 点計測から多元的計測へ

高度な機能は単一のパラメータでは計れない。品質の中には感性が関係するものも多い。内部組成のように現象自体が複雑で単一の物理量では表現されないものも多々ある。これに対して、光、超音波、電磁気のように計測手段は一般に感度と性能が得られる範囲が限定される。これら測定の限界を補うのは物理的数理的なモデルや過去の経験や知識である。潤沢に利用できるようになった情報処理手段がこれらの活用を促進する。知能化計測、ロバスト計測、逆問題、センサフュージョン等々への志向性である。

3.4 情報化とネットワークセンシング¹⁹¹⁻¹⁹⁵⁾

これまでの品質管理は製造ラインの中あるいは工場の中だけであった。ネットワークセンサの発展により、これからは製品の使用中にも品質を管理し劣化の検出を行うことが可能になってくる。これらの情報は使用者にも製造者にもフィードバックされ活用される。また再資源化の際に、継続的に把握した使用データを用いて信頼度の高いリユースやリサイクルを行うことが可能になる。ネットワークセンサは計測手段をユビキタスに広げ、それらから得られる情報をユビキタスに知識ベース化し活用可能とする。「神経をもった鉄」「頭脳をもった鉄」は夢物語ではない。

文 献

- 1) C.Manabe, K.Akamatsu, T.Yanai, N.Suzuki, K.Terai and S.Fujimoto: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 326.
- 2) T.Mano, K.Hiramoto, Y.Adachi, M.Kobayashi and A.Ono: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 327.
- 3) T.Mano, K.Hiramoto, N.Takahashi and H.Tsuruki: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 348.
- 4) Y.Adachi, K.Hiramoto, T.Yamamoto and T.Shibata: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 349.
- 5) C.Uematsu, K.Hiramoto, S.Yaoi, M.Akase and N.Mita: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 350.
- 6) H.Wakai, S.Kishimoto, H.Mitsufuji, N.Takagaki, K.Mori and T.Maehara: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 976.
- 7) Y.Yamada, T.Takayama, T.Yamada, Y.Kaneda, M.Takenaka and M.Nakada: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1277.
- 8) T.Hatate, H.Yamashita, H.Miyahara, T.Egusa, K.Suzuki, H.Maeda and Z.Yamanaka: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1278.
- 9) T.Okada, H.Kamiyama, M.Inoue, H.Yamaji, K.Hayashi and M.Ichida: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 377.
- 10) T.Maekawa, Y.Matsufuji, K.Teizuka, A.Nagamune, H.Tsukiji and T.Hatate: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 378.
- 11) T.Maehara, M.Inagaki, H.Shida, S.Wakita and N.Takagaki: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1150.
- 12) H.Maeda, Y.Nimura, T.Itakura, A.Ohsumi, T.Hatate and Z.Yamanaka: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1151.
- 13) T.Okada, H.Kamiyama, Y.Fujiwara, M.Inoue and H.Yamaji: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1152.
- 14) K.Hashimoto, S.Yaoi, C.Uematsu, M.Akase and N.Mita: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1153.
- 15) Y.Suzuki, Y.Furukawa, T.Okuyama, S.Amano, F.Goto and T.Nozu: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1154.
- 16) T.Maekawa, K.Teizuka, A.Nagamune, Y.Matsufuji, T.Maehara and T.Edahiro: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 281.
- 17) Y.Yamada, D.Yuasa, T.Manabe and N.Inoue: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 946.
- 18) H.Nakai, H.Kamiyama, M.Inoue, Y.Fujiwara, T.Okada and H.Yamaji: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 912-915.
- 19) K.Teizuka, H.Tsukiji and S.Sugioka: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1029.
- 20) N.Satake, K.Kohama, M.Uchio, J.Tanimoto and M.Arakida: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 333.
- 21) Y.Furukawa, A.Yamada, M.Maeda, K.Nagao and E.Yamamoto: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1237.
- 22) J.Fujisawa, M.Yoshida, M.Nakamura, A.Otobe and H.Toda: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 354.
- 23) T.Ota, H.Kubota, K.Watanabe and T.Uezono: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 956.
- 24) M.Sekiya, H.Komastu and M.Iwasaki: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 900.
- 25) Y.Matsufuji, K.Maeda and S.Iwakura: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1042.
- 26) T.Kodama, A.Torao, K.Ueda, T.Yamazaki and Y.Ichii: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1048.
- 27) K.Teizuka, A.Nagamune and M.Sato: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 332.
- 28) K.Teizuka, A.Nagamune, H.Maeda and H.Miyahara: *CAMP-ISIJ*, **6** (1995), 379.
- 29) J.Katsuki, Y.Yajima and Y.Kawase: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 285.
- 30) Y.Furukawa, Y.Suzuki, Y.Nakamoto, T.Tanidokoro, K.Nagao and F.Yamamoto: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 355.
- 31) A.Kawano, Y.Iwasaki, A.Uehara, H.Shiojima and A.Urano: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 381.
- 32) M.Sugiura, M.Sakaida, H.Egawa, T.Kajiya, M.Yokomizo and S.Naitou: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 296.
- 33) H.Yamashita, T.Iwanaga, H.Inamasu and N.Takayama: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1104.
- 34) Y.Isei, Y.Yakita and Y.Buei: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1105.
- 35) M.Tokuda, K.Fujiwara, H.Shibuta, A.Oboso and K.Mori: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1252.
- 36) T.Tanemoto, T.Kozato, K.Dejima, M.Azuma and Y.Tanaka: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 284.
- 37) M.Inoue, K.Amada, K.Gomyou and H.Igawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 284.
- 38) T.Tanemoto, K.Dejima and Y.Yoshioka: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 902.
- 39) S.Tanaka, M.Ohkura, S.Harita, Y.Sugimoto, A.Kondo, H.Komada, M.Fukuda and K.Ishizu: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 336.
- 40) Y.Nawata, Y.Yoshioka, A.Yoshihara, K.Nakano, H.Tanaka and Y.Iwanaga: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 337.
- 41) M.Wada, N.Umeda, M.Ohnaka, H.Yokoyama and M.Mouri: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1241.
- 42) M.Mouri, T.Fukuda, M.Wada, N.Umeda, M.Ohnaka and H.Yokoyama: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1242.
- 43) S.Yaoi, K.Hashimoto, K.Kumasaka, K.Tanida, S.Mori and H.Tani: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 360.
- 44) T.Isobe, M.Ito and S.Takechi: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1268.
- 45) A.Yoshihara and H.Tanaka: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 370.
- 46) M.Iwata, N.Umeda, M.Ohnaka and K.Yokoyama: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 371.
- 47) T.Horisawa, K.Shiino, N.Tanaka, M.Sato, A.Suyama and A.Takagi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 372.
- 48) S.Matsukage, H.Ohfuji, T.Mori, K.Shiraishi, A.Kawaguchi and H.Ebisawa: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 373.
- 49) H.Kanayama, J.Matsuo and S.Sasamori: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1156.
- 50) Y.Fukutaka, Y.Kodama, N.Iida and N.Ohta: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1157.
- 51) Y.Yamaga, M.Kanamaru and S.Hibino: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1161.
- 52) T.Hatano, T.Ueki, G.Itsubo, T.Yoshida, S.Asanuma, M.Mizunuma, K.Ueki and K.Takashima: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1039.
- 53) E.Shidara, M.Koide, K.Tanaka, K.Ohtsuki, K.Tanaka and Y.Fukutaka: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 285.
- 54) M.Okuno, A.Torao, Y.Tomura, M.Tsujimoto and K.Ohi: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 286.
- 55) Y.Hatano, N.Hatanaka and J.Kotegawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 287.
- 56) T.Oshige, M.Uesugi, A.Murakami, M.Takahashi and A.Kazama: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 278-281.
- 57) Y.Hatano, K.Ueki and K.Takashima: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 933-936.
- 58) H.Sugiura, T.Kawamura, T.Oshige, M.Inomata, M.Uesugi, A.Kaza-

- ma and H.Tanaka: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 251.
- 59) K.Shimada, H.Taki and M.Masuda: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 330.
- 60) K.Terai, M.Fukuda, T.Nishimura and M.Ishimaru: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1246.
- 61) J.Tateno, S.Moriya, K.Asano, F.Ichikawa, S.Takechi, Y.Makino, T.Isobe and T.Shiokawa: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1250.
- 62) T.Yanagimoto, A.Torao, S.Moriya, F.Ichikawa, Y.Baba, Y.Kiyono, M.Suzuki, H.Yokota and F.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1251.
- 63) K.Maeda and S.Watanabe: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 352.
- 64) A.Kazama, Y.Oshige and T.Kubota: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 353.
- 65) Y.Fukutaka, N.Iida, H.Yamane, T.Suzuki and J.Nosaka: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1276.
- 66) K.Okishima, A.Kimura, Y.Sakamoto, S.Ohtani, S.Sato and S.Kometani: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 368.
- 67) S.Mori and Y.Matsumoto: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 369.
- 68) A.Torao, S.Moriya, F.Ichikawa, N.Kuriyama and Ishikawa: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 374.
- 69) A.Torao, T.Yanagimoto, F.Ichikawa, I.Yarita, H.Uchida and S.Moriya: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 916–919.
- 70) A.Torao, M.Yoroida, Y.Yamashita, T.Yasumi and K.Yahiro: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 954.
- 71) M.Sugiura, T.Kajijiya, and S.Naito: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 904.
- 72) K.Maeda, M.Inaba, I.Nakauchi and M.Takemasa: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 331.
- 73) S.Hojo, N.Fushimi, M.Sugioka, M.Takahashi and M.Uesugi: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1244.
- 74) Y.Tsuchiya, K.Masuda, A.Ikeda, K.Kurihara, A.Koido and K.Shiraishi: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1247.
- 75) Y.Kushida, K.Maeda, K.Iwanaga, M.Inaba, M.Yasuhisa and S.Watanabe: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1249.
- 76) K.Oda, T.Seike, K.Shiroto, K.Yokoyama, K.Maeda and A.Ogasawara: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 351.
- 77) A.Mori, M.Tomita, K.Mori and M.Yokoyama: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 376.
- 78) J.Katayama, N.Iida, T.Yamamoto, T.Hachiwaka and Y.Komiyama: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1162.
- 79) J.Katayama, N.Iida, Y.Fujimoto, K.Inoue and Y.Kuroda: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 282.
- 80) Y.Yokoyama, Y.Hoshino, Y.Adachi, Y.Otsuki, T.Yamamoto and E.Tamura: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 947.
- 81) Y.Anabuki and S.Harada: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 296.
- 82) M.Matsumoto, J.Katayama, Y.Anabuki and H.Hayashi: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 252.
- 83) T.Mori, K.Murayama, A.Urano and Y.Iwasaki: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 953.
- 84) K.Maeda: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 955.
- 85) Y.Adachi and Y.Tamura: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 282–283.
- 86) J.Katayama and S.Katayama: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 249.
- 87) T.Iwata, Y.Fukutaka, K.Yamashita and K.Azuma: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 297.
- 88) D.Yuasa, A.Nagamune, K.Nishifuji and Y.Iizuka: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1238.
- 89) S.Hyodo and T.Kureishi: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 284.
- 90) T.Furukawa, N.Fushimi, M.Hatanaka, K.Ikui and W.Ushijima: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 362.
- 91) S.Hyodo and T.Kureishi: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 288.
- 92) O.Takehisa, J.Katayama and Y.Anabuki: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 905.
- 93) S.Okumura, H.Sato and T.Kimura: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 926–928.
- 94) S.Hyodo and T.Kureishi: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 937–940.
- 95) M.Yoshida and T.Asano: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 923.
- 96) Y.Iizuka, M.Uesugi and M.Inomata: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 299.
- 97) A.Yamamoto, T.Uchida and T.Kodama: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 329.
- 98) M.Shiraga, Y.Fukutaka and H.Aizawa: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 357.
- 99) N.Ohira, K.Maeda and N.Kataoka: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 375.
- 100) S.Nakamoto, K.Maeda, A.Nagamune and M.Watanabe: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 287.
- 101) J.Katayama, Y.Anabuki, A.Orita and K.Miyamoto: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1032.
- 102) Y.Furukawa, Y.Suzuki, A.Yamada, T.Tanidokoro, K.Nagao and E.Yamamoto: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 339.
- 103) Y.Iizuka, K.Nishifuji and H.Horigome: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 340.
- 104) A.Murayama, S.Nakazawa, M.Tanaka and H.Horigome: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1239.
- 105) H.Ishikawa, Y.Komiya, R.Kimura, T.Egusa and N.Oyadomari: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1240.
- 106) T.Egusa, M.Nishi and I.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 356.
- 107) T.Egusa, Y.Komiya, M.Yonezawa, H.Oba and J.Murai: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 358.
- 108) Y.Iizuka, Y.Komiya, S.Nakazawa, R.Okuno, A.Nagamune and K.Nishifuji: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1271.
- 109) Y.Iizuka, Y.Komiya, A.Sato, H.Horigome, R.Okuno and A.Nagamune: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1271.
- 110) S.Hyodo and T.Kureishi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 360.
- 111) K.Koshino, T.Nonaka, H.Okubo, J.Suzuki and K.Esaki: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 361.
- 112) S.Nakazawa, A.Sato, Y.Nagahama and Y.Iizuka: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 362.
- 113) M.Ito, K.Nagao, K.Hiramatsu, S.Toyokawa and A.Takahashi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1159.
- 114) T.Nakaji, N.Takasugi, M.Matsushige and Y.Tanaka: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1160.
- 115) S.Hyodo: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 943.
- 116) H.Takada, A.Torao, F.Ichikawa and T.Shiraishi: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 944.
- 117) A.Fukui and S.Hyodo: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 292.
- 118) R.Okuno, S.Nakamoto and Y.Yoshida: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 293.
- 119) A.Fukui and K.Yamamoto: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1034.
- 120) Y.Iizuka, Y.Nakajima, T.Matsuo, S.Ohno and A.Murayama: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 957.
- 121) A.Fukui and S.Hyodo: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 958.
- 122) S.Hyodo and T.Nomura: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 959.
- 123) H.Takada, A.Torao, I.Yarita, R.Sugimoto, H.Ogawa, T.Morii, A.Sato and H.Akazawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 897.
- 124) Y.Nagata, T.Konno, S.Naito, M.Kubota, T.Kino, O.Sekiguchi and J.Hirowatari: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 898.
- 125) M.Nakamura, H.Yokoyama, M.Yamano and T.Murayama: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 899.
- 126) Y.Iizuka, S.Nakazawa, A.Sato, Y.Kaneda and N.Sato: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 929–932.
- 127) S.Hyodo and T.Kureishi: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 937–940.
- 128) Y.Fukutaka, O.Takehisa, Y.Otani and Y.Tanaka: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 216.
- 129) T.Hashimoto, Y.Iizuka, Y.Matsufuji, K.Maeda and S.Iwakura: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1041.
- 130) H.Yamada, Y.Yano and T.Udagawa: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1043.
- 131) H.Takada, A.Torao, T.Yamazaki, H.Unzaki, T.Sasaki, M.Aratani, and T.Kobashi: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 243.
- 132) T.Yamazaki, H.Unzaki, Y.Tomura, T.Sasaki, T.Kobashi and M.Aratani: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 244.
- 133) Y.Ueda and K.Yamaguchi: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 922.
- 134) J.Fujisawa, M.Yoshida, K.Kozaki, H.Kawataka and Y.Sugisawa: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 338.
- 135) K.Tomita, M.Yoshida, J.Nishino and R.Seki: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1235.
- 136) T.Masuda, A.Takahashi, M.Ikeda, T.Saka and M.Ito: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1236.
- 137) M.Ishihara, K.Haruna and M.Mouri: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1243.
- 138) K.Nitta, N.Fushimi, M.Yamada, A.Yamamoto, S.Ando and Y.Matsufuji: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 359.
- 139) Y.Fujii, T.Ohtaki, F.Takayanagi, K.Morii, A.Takahashi and M.Ito: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1269.
- 140) H.Yokota, Y.Mashino, T.Shiraishi, H.Hayashi, M.Kobayashi and T.Kodama: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1270.
- 141) M.Yoshimura, H.Yokota, Y.Mashino, Y.Takezawa and T.Yasumi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 365.
- 142) H.Fujiwara, T.Nishimine, O.Tsuyama and T.Kawakami: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 366.
- 143) O.Tsuyama, T.Nishimine, T.Kawakami and H.Fujiwara: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 367.
- 144) Y.Suzuki, T.Tanisokoro, M.Yamamoto, Y.Furukawa and T.Fukuda:

- CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 942.
- 145) H.Kato, J.Yotsuji, K.Iwanaga, K.Maeda and A.Nagamune: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 289.
- 146) O.Tsuyama, Y.Shiroto, K.Kokubo, H.Fujiwara and S.Shidama: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 291.
- 147) Y.Hodaka, K.Tanaka, Y.Anabuki and A.Kamimura: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1035.
- 148) K.Iwanaga, K.Maeda, A.Nagamune, M.Yasuhisa, H.Kato and J.Yotsuji: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1036.
- 149) Y.Iizuka, A.N.Sato, Y.Kaneda, T.Manabe and S.Nakazawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 901.
- 150) H.Yokoyama and K.Haruna: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1046.
- 151) Y.Wasa and T.Ogawa: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1047.
- 152) T.Akagi, T.Tawaraguchi and K.Kawashima: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 341.
- 153) M.Fukuda, T.Hamada, T.Yokoi, N.Inoue and N.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1248.
- 154) K.Nitta, N.Fushimi, T.Yamaji, K.Kasai, K.Niki and H.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 363.
- 155) K.Hayato, K.Yamamoto, Y.Nawata, T.Minakuchi, T.Tawarado and T.Akagi: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1267.
- 156) N.Suzuki, T.Morimoto, A.Arai and T.Ogawa: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1241-1244.
- 157) N.Suzuki, K.Takaoka, S.Yanai, A.Arai and T.Shibuya: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1249-1252.
- 158) Y.Matsufuji, A.Nagamune, K.Niki, K.Sekiguchi and T.Nakamura: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1253-1256.
- 159) A.Murayama, H.Horigome, H.Takahashi and H.Onozawa: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 363.
- 160) R.Okuno, A.Nagamune, T.Sakai, K.Maeda, T.Takano and Y.Iizuka: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1158.
- 161) H.Takada, K.Sadahiro and F.Ichikawa: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 283.
- 162) H.Takada, K.Asano, F.Ichikawa, T.Miyake, M.Kawahara and E.Yamashita: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 290.
- 163) M.Nakamura, R.Murayama and K.Hashimoto: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 906.
- 164) S. T. Hond and W. Y. Choo: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1040.
- 165) S.Hyodo and Y.Takimoto: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 245.
- 166) H.Kato, A.Nagamune, K.Kasai and K.Sohda: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 250.
- 167) J.Tateno, S.Maruyama, K.Asano, F.Ichikawa, M.Kurimoto, N.Takahashi and A.Orita: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1245.
- 168) T.Watanabe, K.Horikoshi, Y.Takayama and S.Takeuchi: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1275.
- 169) Y.Adachi, M.Hashizume, N.Takahashi, Y.Hasegawa and S.Ohwada: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 288.
- 170) H.Katsumi and H.Miyamoto: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 896.
- 171) H.Hasegawa, T.Kiyokawa, K.Higashi and T.Miyamoto: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 214.
- 172) K.Konno, H.Shiota, Y.Fujiwara, K.Araki, K.Hamada, Y.Nagai and H.Sugihara: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 106.
- 173) M.Mukaiyama, T.Hirose, H.Maeda, H.Miyahara, M.Takahashi, Y.Kaneda and A.Kazama: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1118.
- 174) H.Miyahara, S.Yamamoto, H.Sasaki, A.Shimomura, K.Ishii and H.Tsukiji: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1253.
- 175) H.Hata, H.Kawai, T.Kosuge and N.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 316.
- 176) R.Fujioka and N.Tamura: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1274.
- 177) M.Matsumoto, O.Iida, M.Takada and T.Fuchise: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 146.
- 178) H.Tanabe, H.Sekine, H.Tsukuda, T.Yamazaki, H.Ishimoto, H.Fujiwara, Y.Takabayashi, Y.Tsutsumi, I.Murata and T.Kunimitsu, H.Yoshikawa and H.Hoshina: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 268.
- 179) H.Tanabe, M.Kawakami, H.Sekine, H.Tsukuda, T.Yamazaki, H.Ishimoto, H.Fujiwara, Y.Takabayashi and Y.Tsutsumi: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 269.
- 180) A.Kimura, A.Miura and K.Sakai: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 908-911.
- 181) Y.Matsufuji, K.Iwanaga, K.Maeda, A.Nagamune, M.Yamamoto and H.Enoki: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1037.
- 182) T.Sugano, T.Danjo and Y.Tomita: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 952.
- 183) Y. Kim and Y. Kang: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1038.
- 184) S.Yamashina, M.Konishi, Y.Akechi, T.Hoshino and H.Nohara: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1039.
- 185) M.Ito and S.Matsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 927.
- 186) S.Matsuzaki and M.Ito: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 928.
- 187) M.Ito and S.Matsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 300.
- 188) J.Sakai, A.Kiriya, T.Yamauchi and M.Takashi: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 2003.
- 189) M.Oikawa, M.Shiroto and K.Minamida: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1106.
- 190) M.Ito and S.Matsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1109.
- 191) “ネットワーク社会におけるヒューマンインターフェース調査専門委員会報告I, II”, 日本電子工業振興協会, (1999), (2000).
- 192) “資源循環社会におけるネットワークセンシング技術調査専門委員会報告I, II”, 電子情報技術産業協会, (2001), (2002).
- 193) “ユビキタス情報環境におけるネットワークセンシング技術調査専門委員会報告I”, 電子情報技術産業協会, (2003), (2004).
- 194) S.Ando: *J. Soc. Instrum. Control Eng.*, **40** (2001), 43-49.
- 195) S.Ando: *IEEJ Trans. Sensors Micromachines*, **123-E** (2003), 263-270.