

NKKグループを支える基盤技術

Integration of Basic Application Technology amongst NKK Group

山岡洋次郎 基盤技術研究所 所長 工博
白井 正明 基盤技術研究所 副所長 工博
岡本 隆 基盤技術研究所 都市工学研究部 部長 工博
余村 吉則 基盤技術研究所 物性解析研究部 部長 工博

Youjiro Yamaoka
Masaaki Shirai
Takashi Okamoto
Yoshinori Yomura

基盤技術研究所では、鉄鋼事業と総合エンジニアリング事業に共通するさまざまな要素技術のうち、特に重要かつ対外的に優位にあるものを「戦略的基盤技術 - SCT」と位置付け、戦略的な育成・展開を計ってきた。その概要と代表的な適用事例を、SCTの9つの技術領域（計測、制御、数理・システム、機械、土木・建築、無機材料、物理・化学解析、環境・バイオ、触媒）ごとに紹介する。

R&D in the Applied Technology Research Center covers the technical fields common to both steel division and engineering division. The most significant and characteristic technologies, SCT (Strategic Core Technologies), and their applications are outlined.

1. はじめに

鉄鋼と総合エンジニアリングは事業としての性格は異なっているが、技術的には共通する要素も多い。それらの要素技術のなかには、たとえば鉄鋼事業部のニーズに対応して研究が開始され育成されたものが、総合エンジニアリング事業部の新商品のキーテクノロジーになることもあり、逆に、総合エンジニアリング事業部の商品開発とともに発展した技術が、鉄鋼プロセス改善のブレークスルーとなることもある。

また、これら要素技術の蓄積が新たな事業領域の展開やグループ企業を含めた合理化・商品開発の中心的な推進力になったり、要素技術が組み合わせられ、相乗効果を発揮することによって新たな商品やプロセス技術を生み出すこともたびたび経験することである。

そこで、鉄鋼事業と総合エンジニアリング事業に共通する技術を担当する基盤技術研究所では、事業の基盤として特に重要で、しかも対外的に相当に優位にあると考えられる要素技術を“戦略的基盤技術(SCT: Strategic Core Technology)”と位置付け、戦略的な育成・展開を計ってきた。それらは両事業部で幅広く活用されているため、本特集号の他の記事でも処々に取り上げられているが、本稿では、それらとの重複を避けつつ、改めてSCTの全容と代表的な適用事例を紹介する。

2. 戦略的基盤技術 - SCT

SCTとその主な適用例をTable 1に示す。ここでは27のSCTを9つの技術領域に分類しているが、第3章以降ではこれらの技術領域ごとにその概要を説明する。

3. 計測

3.1 高度信号処理技術

(1) デジタル超音波探傷技術^{1),2)}

高度技術社会の進歩に伴い、鋼材製品の品質保証に対しては常に一層の厳格化が要請され続けている。このような社会的要請に応えるため、当社は品質保証技術の開発に注力し、高いレベルの品質保証体制を構築してきた。その一例としてここに紹介するデジタル超音波探傷技術は、デジタル信号処理技術を駆使して欠陥信号とノイズの弁別性を向上させ、より微小な欠陥の検出および探傷の信頼性確保を実現するものである。

Fig.1に示すように、従来の超音波探傷技術で使用されている単パルス送信波形の代わりに、チャープ信号と呼ばれるより時間的に長く周波数変調した正弦波形を用い、かつ受信波形に送信波形とのデジタル相関演算によるパルス圧縮処理を施し欠陥信号を鋭く強調することで、高感度・高時間分解能を実現した。また、超音波が繰り返しパルスであることを利用した同期加算平均処理もノイズ低減に有効である。これらの技術は、厚板、UOE鋼管溶接部、電気抵抗溶接管溶接部などの自動超音波探傷装置に応用されている。

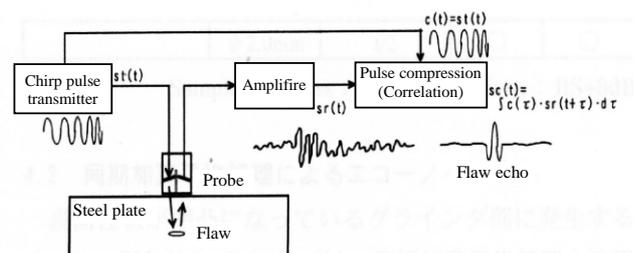


Fig.1 Chirp pulse compression for ultra-sonic test

Table 1 SCT (Strategic Core Technologies) and their applications

SCT	Application	
計測	微小磁気センシング技術	冷延・表面処理鋼板内部介在物計
	高度信号処理技術	溶銑鍋 / 軋炉受鋼鍋レベル計 埋設管塗膜損傷検知装置 厚板 / 製管溶接部自動超音波探傷装置
	内部材質計測技術	結晶粒径計, 変態率計
	表面性状計測技術	錫鍍金ラインリアルタイム油膜計測 模様状ヘゲ欠陥計 (デルタアイ)
	形状計測装置	三次元曲面形状計測装置 天井クレーンコイル位置認識装置
	放射測温技術	溶鋼温度計, 溶銑温度計
制御	制御理論応用	来島大橋などのアクティブ振動制御 CC モールド湯面レベル制御 熱延走間板厚変更 / パーヒータ制御
	ハイブリッド制御技術	熱風炉燃焼制御システム ストーカー炉ハイブリッド ACC
数理・システム	スケジューリング / シミュレーション技術	出鋼順自動編成, 熱延圧延順自動作成 コンテナードシフト計画 最適物流網提案システム
機械	メカトロ・自動化技術	パイプライン施工自動化機械 新物流機械 (RISA, PALS, CATS)
	アクチュエータ・機構解析・機械要素技術	ゴミ資源化システム, 新型バリ取り装置, 形鋼クリーンカット, ジメチルエーテル (DME) トラック実車走行
	振動・音響制御技術	設備老朽更新最適化, 薄板通板安定化・高速化
土木・建築	耐風・制振技術	吊橋, 斜張橋, 橋梁主塔制振制御, 飛来塩分シミュレーション
	鋼・コンクリート合成構造技術	ハイブリッドケーソン, 合成構造橋脚, 合成床版, MMST 工法用鋼殻, コンクリート充填鋼管柱 (CFT)
	耐火性能評価技術	FR 鋼立体駐車場, CFT 無耐火被覆構造
	耐震性能評価技術	極軟鋼制震ダンパー, 耐震ジョイント, フレームキット, 鋼製橋脚, 低温貯槽
	基礎・地盤解析技術	つばさ杭, NKK ネジール, ドレーン SP, ソイルセメント合成鋼管杭 (HYSC 杭), 斜直面ケーソン, 二重矢板構造
	水理・環境評価技術	消波機能付きケーソン, 海水交換ケーソン
	温熱環境評価技術	スチールハウス, 断熱折板屋根
無機材料	土利用技術	パイプライン埋戻し工法 (R70, SR80 工法)
	スラグ・耐火物技術	マリブロック・カリ肥料, 高炉水砕スラグ覆砂材, 直流電気炉炉底電極れんが
物理・化学解析	表面・界面評価制御技術	クロムフリー化成処理皮膜解析 CG 材断面構造制御
	介在物・析出物評価技術	ナノ析出物解析, 介在物粒度分布測定 TUCL 材清浄度評価
	リアルタイム化学計測技術	熱鋼片オンサイト分析 (レーザ ICP) ダイオキシオンサイト分析, 飛灰中重金属オンサイト分析
環境・バイオ	微生物解析制御技術	下水汚泥減容化, カリ肥料評価, アンモニア生物脱臭装置
	環境浄化化学技術	Mn 鉱石吹き込みダイオキシン分解
触媒	プロセス触媒設計技術	C ガス清浄化触媒 ジメチルエーテル (DME) 合成・利用触媒

(2) 二周波 M 系列信号処理技術^{3),4)}

製鉄，製鋼では，高温多湿や粉じん雰囲気などの悪環境における高精度なプロセス計測を実現するための技術開発が必要となる。二周波 M 系列信号処理技術は，波動応用計測においてノイズレベル以下の微弱な信号を感度良く検出するばかりでなく，簡単なアナログ回路構成で，悪環境のもとでの高精度な時間計測ひいては距離計測を可能にした画期的な技術である。

連続鋳造における自動スタート用溶鋼レベル計に適用した例を Fig.2 に示す。M 系列 (Maximal length sequence) 信号は，長い周期を有する 2 値の擬似ランダム信号である。わずかに周波数の異なる 2 つのクロック周波数でそれぞれ生成された M 系列信号の一方を送信波として電極に送出し，溶鋼面で反射して戻ってくる受信信号ともう一方の M 系列信号にビート処理による相関演算を施す。これにより，信号の往復伝播時間に対応する時間位置にパルス信号が強調されて感度良く現れる。この信号の鋭いピーク位置から溶鋼レベルの位置を高精度に計測できる。本技術は，マイクロ波の変調に応用した高感度マイクロ波レベル計，光の変調に応用した光ファイバ温度分布計などに広く展開されている。

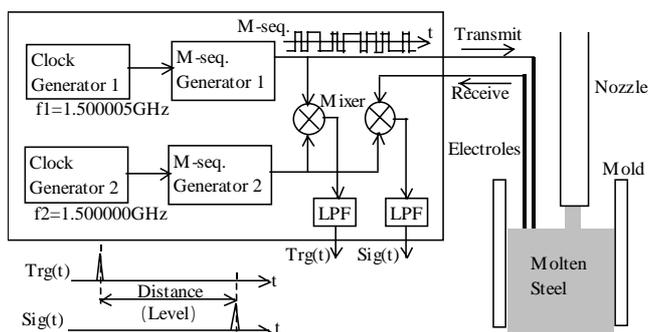


Fig.2 Two clock m-sequence signal processing

3.2 放射測温技術 - 消耗型光ファイバ放射温度計 -⁵⁾

製鉄では，溶銑温度は高炉の熱管理上最も重要な指標である。製鋼においても，溶鋼温度は予備処理から吹錬，鋳造に至るまで品質管理，エネルギー原単位低減などの点から重要である。従来，溶銑，溶鋼の温度測定には消耗型熱電対が使用されているが，使い捨てのため，測温コストが高く，自動化が困難で，高頻度の測定に不向きなどの問題があった。これらの問題を克服するため，新しい溶融金属測温方法として消耗型光ファイバ放射温度計を開発した。

消耗型光ファイバ放射温度計は，Fig.3 に示すように，光ファイバ先端を測定対象である溶融金属中に挿入浸漬し，溶融金属内部からの直接放射光をファイバを介して放射温度計に導き測温するものである。浸漬された光ファイバの先端部は，微小なガラスの円筒空洞を形成し，放射率 1 の黒体となるため，正確な温度指示値が得られる特徴がある。また，

先端部は高温のため溶融・損耗するが，温度計の応答速度が速いため溶損前に温度指示値が得られる。測定が終了し一旦引き上げられた先端部は，次の測定時にはそのまま繰り出すだけで，繰り返し測定が可能である。本技術は，高炉溶銑樋スキンマ部溶銑温度計測，連続鋳造タンディッシュ溶鋼温度計測などに展開されている。

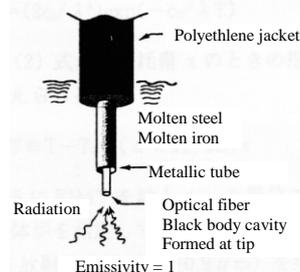


Fig.3 Immersion-type optical fiber radiation thermometer

4. 制御

H 制御に代表されるロバスト制御は，制御器の周波数領域における設計の容易性から，近年，制振などの機械制御に幅広く用いられている。当社でも橋梁の制振⁶⁾や連続鋳造設備のモールド湯面レベル制御⁷⁾に適用している。圧延機の制御の場合には，圧延材の鋼種，幅，厚さに合わせて事前に多数の制御器を設計する必要があるため，H 制御に比べ演算時のシステム次数が小さく，演算時間短縮可能なスライディングモード制御の適用⁸⁾を図っている。

一方，化学反応を伴うプロセス制御においては，系が分布定数系かつ非線形系であることから，集中定数系を前提とした制御理論の適用は困難である。このため，プロセスモデルに基づく予測計算と，モデルでは予測不可能な外乱に対応するためのファジィ制御を組み合わせたハイブリッド制御技術を開発し，高炉熱風炉燃焼制御⁹⁾やごみ焼却炉燃焼制御¹⁰⁾で効果を上げている。

Fig.4 にごみ焼却炉燃焼制御のブロック図を示す。本制御では，モデルによりごみの発熱量を推定し，ごみの投入速度や乾燥・燃焼・冷却などの空気量を予測制御するとともに，ファジィ制御により外乱の補償を行っている。その結果，ダイオキシンや窒素酸化物などの有害ガスの低減とボイラ蒸気発生量の安定化を同時に実現することができた。

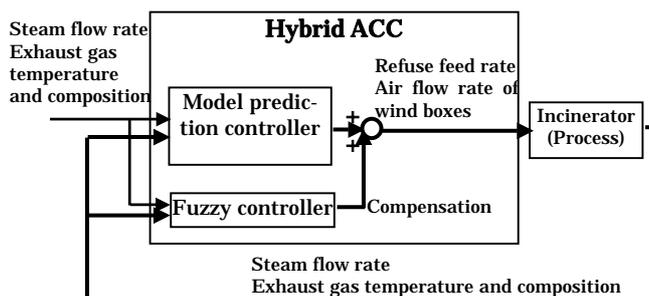


Fig.4 Block diagram of Hybrid ACC

また、この制御システムとモデルを組み込んだ運転訓練装置¹¹⁾も開発し、好評を得ている。Fig.5 は、運転訓練装置の炉内状況表示例で、モデル計算結果に基づき、立ち上る炎の動きも含めリアルな動画表示を可能にしている。

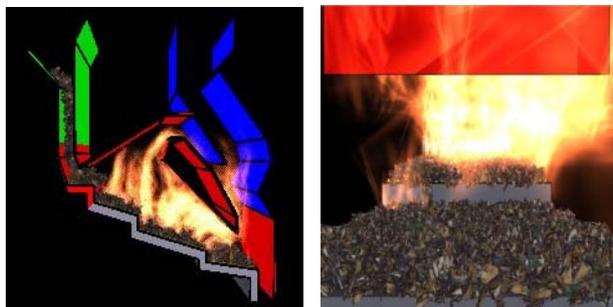


Fig.5 CG motion pictures

5. 数理・システム

当社では昨今の計算機の演算速度、記憶容量、通信速度などの著しい向上と低価格化のメリットを活用し、従来は研究の域を出なかった先端数理技術を、生産・物流の計画最適化やシミュレーションに積極的に適用し大きな効果を創出している。

(1) 生産計画最適化

鉄鋼の生産計画は、熱延装入順¹²⁾や出鋼順¹³⁾(本誌“鉄作りを支える最新の設備技術”に概説)のような順序問題が多いが、厚板板取り¹⁴⁾に代表される組み合わせ問題も存在する。これらの問題には、主にメタ戦略と呼ばれる最適化手法を適用し、計画作成の自動化、計画の精度向上を図った。最近では、薄板 SCM システム(SPEED - XU)の一環として、製鋼における出鋼順とチャージ編成(同種の注文を集約するロット編成)の同時最適化、すなわち、順序と組み合わせの混合問題最適化も実用化している。

(2) 物流シミュレーション

設備設計や工場設計における構成機器の台数や能力の評価、および、生産・物流の処理手順や運用の検証には離散事象シミュレーションが必要である。一般には市販の汎用ツールが利用されるが、機能が不足することも多いため、当社では、目的に応じて自社開発ツールと汎用ツールの使い分けを行っている。

- (a) 自社開発ツール：移動機内移動(たとえば、クレーンの走行、横行、巻き)などの複雑な事象の検証
- (b) 汎用ツール：一般的な設備能力検証
- (c) オブジェクト指向ツール：干渉の多い物流制御での、処理手順・運用ルールの検証

また、シミュレーションには、評価・検証の対象にあわせた離散事象モデルの開発のほか、能率などを向上させる運転方案や処理手順の開発が必要である。Fig.6 は、地下駐車場の能力検証を行うシミュレーションの画面であるが、この運転方案では、入出庫能力を最大化するため、出庫待ち行列の

間に入庫を割り込ませる際、作業時間が最小になる割り込み位置の探索を実施した。従来の安全率をみた表計算に比べ入出庫能率を約 15%向上することができ、公的な型式認定取得の際の上限収容台数を約 10%向上することができた。

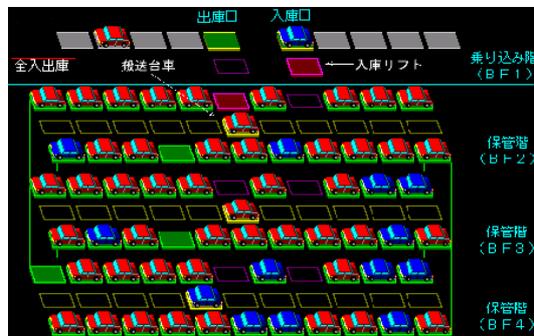


Fig.6 Simulation of automobile warehouse

6. 機械

6.1 メカトロ・自動化技術

鉄鋼事業においては、生産性向上や品質造り込みのための設備開発・改良を効率的に行うために、また、従来は不可能であった合理化を実現するために、メカトロニクス・自動化技術が従来にも増して重要な役割を果たしており、当社独自の設備が次々に開発され、工場に投入されている。

また、総合エンジニアリング事業においては、新商品開発・既存商品の競争力向上のための重要な要素であることは言うまでもない。本章では、それらの一例として、物流機器の開発に利用した例を紹介する。

(1) 物流センター向け高速仕分け装置

物流センターは、多品種・多量商品の受入れ・保管・仕分け・荷揃え・出荷のために多様な機能を持つ設備が系統的に結合された大規模機械システムであり、システム全体の効率化、安定稼動が求められている。NK-RISA, NK-CATS¹⁵⁾は、多品種段ボール商品の保管および配送順の高速仕分けを実現した物流機械設備(Fig.7)である。開発にあたり、運動解析・CAE・物流運用シミュレーション技術を駆使し、開発期間、開発コストの低減を図った。さらに、商品認識、稼動状態認識などセンサフュージョン技術によるトラッキングシステムを構築し、機械システム群の安定稼動を実現した。



Fig.7 NK-CATS (Example of NK-CATS application)

(2) 高速入出庫装置

多様な物流拠点の出荷機能強化に対応できる物流システムとしてパレットソータ(NK-PALS)¹⁶⁾を開発した。パレットソータは、分岐・合流点に小型ローラを組み込み、パレットの搬送方向に応じて角度と周速を制御することにより、分岐・合流点でも車のコーナリングのように、速度を落とさず搬送方向を任意に変更可能である。ノンストップ搬送の実現により、従来比2倍の入出荷/荷捌き処理能力を実現した。

開発に際し、パレットと駆動ローラの相互作用を定量化するマルチボディダイナミクスモデルを構築し、機構解析シミュレーション技術(Fig.8)を活用し、搬送パレットの巡回メカニズムを理論的に把握し、短期間で構造と制御の最適化を実現した。

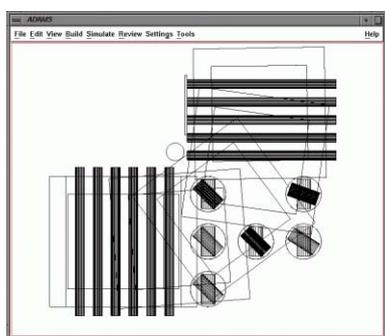


Fig.8 Results of mechanical dynamics analysis

6.2 アクチュエータ・機械要素技術

メカトロニクス・自動化技術とともに、鉄鋼設備や総合エンジニアリング事業部商品の特徴付ける技術の一つがアクチュエータを初めとする機械要素である。当社では、油空圧、加工などの要素技術の開発にも注力しており、ここでは、その一例として、条鋼・線材連続圧延設備¹⁷⁾(EBROS™)用バリ取り装置を紹介する。

EBROS™は、世界で初めて条鋼・線材の連続圧延を可能にした設備であり、ピレットを接合するフラッシュパット溶接機と溶接バリを除去するバリ取り装置で構成されている。バリ取りのためには熱間切削を行う必要があるが、バイト摩耗やピレット角部での切り屑未分離(カエリ)の問題を解決する必要があった。そこで、バイト寿命の延命化と完全カエリレスを同時に達成する“多段フリー回転円形バイト”(Fig.9)によるバリ取り方式を考案し、その実用化(Fig.10)に成功した。

現在、EBROS™は、2000年に受注したFUNDIA(フィンランド)・紹栄鋼鉄公司(香港)・Xingtai 鉄鋼廠(中国河北省)の3社で順調に稼働中である。さらに東国製鋼(韓国)からも受注し、VAI-UK(フェストアルピネグループ・英)、SMS(シュレーマングループ・独)の2社にはライセンス供与を行った。なお、本装置は2001年度日本機械学会賞(技術)を受賞した。

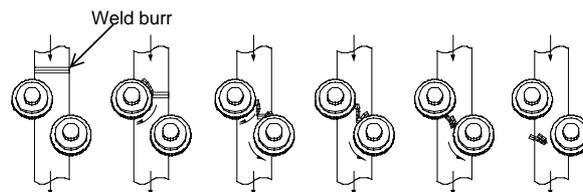


Fig.9 Principle of deburring by free rotational disk cutters

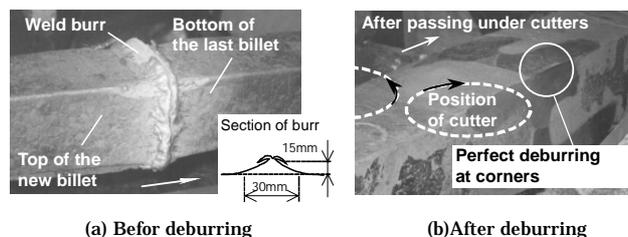


Fig.10 Weld burr of billets and results of new deburring

7. 土木・建築

7.1 地盤解析技術

土木構造物の開発・設計においては、地盤の支持力・安定性、地震時の液状化評価など、地盤と構造物の多くの静的・動的な相互作用を評価、定量化する必要がある。

当社は、1980年代中頃より、地盤~構造物系の数値シミュレーション技術を土木分野の重要技術の一つと位置付け、静的および動的解析手法の開発を行ってきた。

静的解析(施工過程を含む)については、1980年代半ばに、地盤~構造物系の汎用弾塑性解析プログラムを独自に開発した¹⁸⁾。同プログラムは、粘塑性理論に基づき定式化した弾塑性ジョイント要素により、地盤と構造物の接触問題が安定して解けるため、(1)ジャケット式人工島解析¹⁹⁾、(2)ハイブリッドケーソン~地盤系の安定性²⁰⁾、(3)二重矢板式構造物の設計技術の高度化²¹⁾など、鋼製あるいは鋼・コンクリート合成構造物の港湾構造物の開発において重要な役割を果たしている。

一方、動的解析については、液状化対策工法である砕石ドレーン工法の設計法確立を目的に、1980年代終わり頃より、京都大学・岐阜大学と共同で、多次元液状化解析技術の開発に取り組んだ(プログラム名:LIQCA)²²⁾。このLIQCAは、1995年兵庫県南部地震における多くの液状化被害を数値シミュレーションによって再現し、液状化被害の原因を究明する上で重要な役割を果たした²³⁾。さらに、これら検討結果に基づき、河川堤防の鋼矢板締切工法²⁴⁾、超多点浸透注入工法²⁵⁾などの各種液状化対策工法の検討・開発や耐震強化岸壁を経済的につくる新たなコンセプトである「斜底面ケーソン工法」²⁶⁾、などの開発に貢献している。

ここでは、河川堤防の鋼矢板締切工法の解析例について紹介する。これは、河川堤防の液状化対策の一つとして、自立鋼矢板によって盛土直下を締切り、地盤変形を抑制する工法

である。この工法の効果を検証するために、模型振動台実験および実規模盛土地盤の解析を行った²⁴⁾。実規模盛土地盤の解析では、液状化層厚 5m、堤防底面幅 24m、堤防高さ 4m の解析モデルを対象に、入力地震動や矢板の剛性をパラメータとした解析を実施した。Fig.11 に、八戸波を入力とした(a) 未対策の場合、および(b)矢板による対策を行った場合の加振終了時の変形(2倍で表示)および平均有効主応力の変化率分布を比較して示す。未対策地盤では基礎地盤および盛土の変形が大きく、一方、対策ありの場合では、矢板近傍で液状化領域は広いものの鋼矢板の剛性により側方への地盤の変形、盛土の沈下が抑制されている。本工法では、模型実験やここで示した液状化解析の結果に基づき、実務設計法が提案されている。

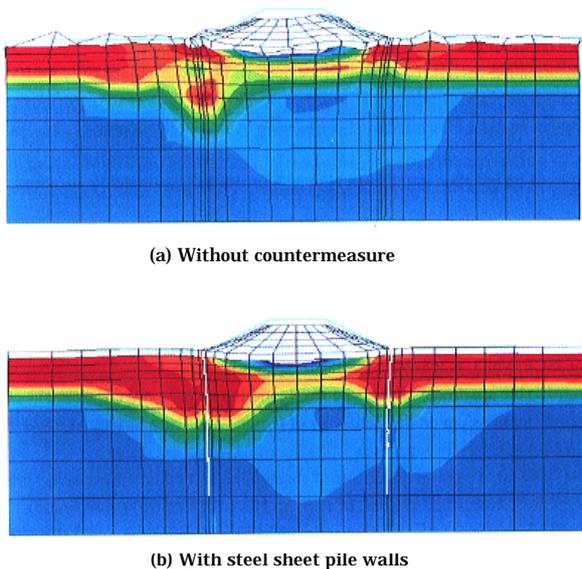


Fig.11 Deformation and distribution of excess pore water pressure ratio

7.2 耐震性能評価技術

ここでは、建築分野を中心に耐震性能評価技術について紹介する。

耐震性能評価技術は、建築構造物を構成する鋼材・部材のメーカーとして、また、プラント系を中心とした建築物のメーカーとして、耐震性能に優れた商品を開発し供給する上で、重要な役割を果たしている。

最近の高層建築物においては、主架構の損傷を最小限に抑えるために、エネルギー吸収型の制震部材を採用する例が多い。Fig.12 は、極低降伏点鋼を用いた制震ダンパーであり、開発に際して、有限要素解析により、最適な幅厚比や接合条件、エネルギー吸収量を明確にした例²⁷⁾である。

Fig.13 は清掃工場の炉体ボイラー架構に設置したオイルダンパーの減衰効果を時刻歴応答解析で確認した例²⁸⁾である。ダンパーの効果により、最大応答変位は 1/3 程度に抑制されていることがわかる。

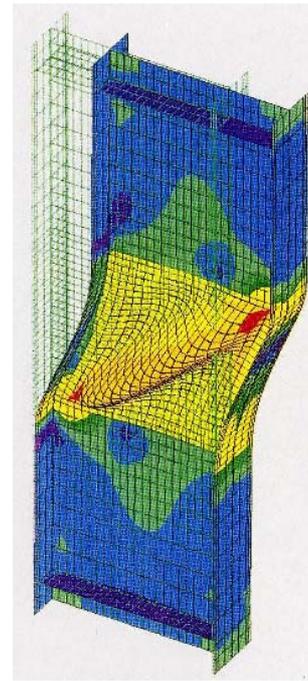


Fig.12 FEM analysis of hysteretic damper

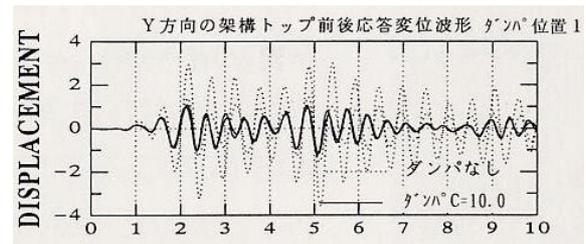


Fig.13 Seismic analysis of boiler structure with viscous oil damper

一方、解析技術とともにその結果の検証においては、実験データによる裏付けも必要である。

高速載荷試験機 (Photo 1) は、最大 150kine の載荷速度により、梁端溶接部の破断現象に及ぼすひずみ速度の影響²⁹⁾や、実地震波に対する応答挙動を確認することが可能である。

当社の建材商品である極低降伏点鋼を用いた制震ダンパーの効果も、本試験機を用いて確認している^{30),31)}。



Photo 1 Hi-speed testing apparatus

1000 トン構造物試験機 (Photo 2) および汎用構造物試験機 (Photo 3) では、地震時に発生する外力を載荷することにより柱・梁などの部材単体としての構造性能や柱材と通しダイヤフラムとの溶接部の性能確認、柱梁接合部の挙動解明などを行い、 $590\text{N}/\text{mm}^2$ 級鋼材を用いた冷間成形角形鋼管や外リングダイヤフラム付き円形鋼管柱 (NT コラム) の構造性能を検証³²⁾している。

当社の耐震関連商品は、これら高度な解析技術と日本でも有数の実験装置による確認に基づき開発されており、鉄鋼・総合エンジニアリング両事業分野の新商品開発に貢献している。

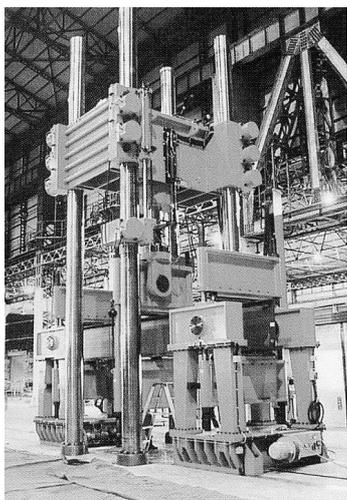


Photo 2 1000ton structural testing apparatus

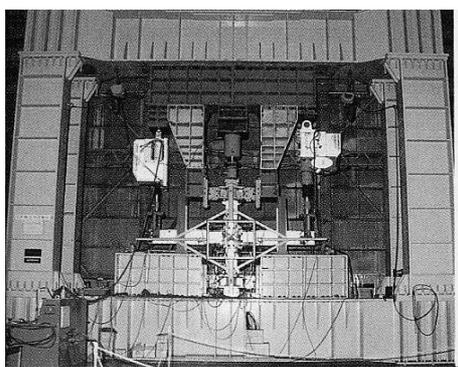


Photo 3 Multi purpose loading frame

7.3 耐風・制振技術

吊橋や斜張橋の橋桁、架設時の主塔、およびケーブルには、風によって渦励振、フラッター、ガスト応答などのさまざまな振動現象が生じるため、建設にあたっては、事前に耐風性を評価し、必要に応じて制振対策を講じなければならない。このため、当社では構造物用風洞 (測定部の幅 2m、高さ 3m、長さ 15m、最大風速 50m/s) および境界層風洞 (測定部の幅 4m、高さ 2m、長さ 26.5m、最大風速 23m/s) の 2 基の風洞を駆使し、これまで、明石海峡大橋、多々羅大橋、鶴見つ

ばさ橋、スエズ運河橋など、国内外の代表的な長大橋の耐風性評価と制振対策の提案を行い、世界に誇る長大橋建設技術の一端を担ってきた。その一例として、Photo 4 に、自然風の乱れの特徴を相似させた境界層乱流中において、長大斜張橋張出し架設時の風洞実験の状況を示す。Fig.14 は、中央径間長が 2000m を超える超長大吊橋の建設を含む、海峡を横断する大規模構造物のプロジェクトに備えて、独立行政法人土木研究所、本州四国連絡橋公団、(財)土木研究センターおよび民間 8 社が実施している共同研究の中で、当社と土木研究所が提案している桁断面形状である。現在世界最大の明石海峡大橋 (中央径間長 1990m) で用いられたトラス形式に代えて箱桁を採用しているため、経済性に優れており、また、中央径間長が 2800m の吊橋に適用した場合には、80m/s までの強風にも耐え得る目処が立っている。



Photo 4 Wind tunnel test for the aerodynamic study on a cable-stayed bridge under construction

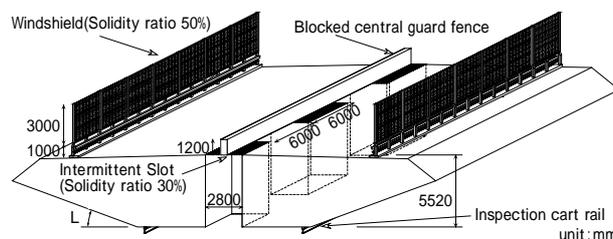


Fig.14 Proposed girder section for super-long suspension bridge project

橋梁の耐風性評価において風洞実験は不可欠であるが、たとえば、二次元模型による非常空気の測定結果を用いて三次元系である実橋のフラッター発現風速を算定するフラッター解析など、解析技術の重要性も高い。最近では、非常空気のものを解析的に求める数値風洞技術の開発にもチャレンジしている。Fig.15 は、このような長大橋の耐風性評価に関連した数値解析技術を、飛来塩分シミュレーション評価に活用した例を示す。すなわち、Reynolds 方程式と連続式から時空間的に得られる風速場を用いて、Fig.15 中に示す Fick の拡散方程式を解くことにより、地形の影響を考慮に入れた塩分濃度分布を算定するものである。最近、橋梁においても LCC (Life Cycle Cost) 低減のニーズが高まる

中で、塗替え不要の耐候性鋼を用いた橋梁の数が増加しているが、耐候性鋼は塩分濃度が高いと安定錆を形成し難いという弱点があるため、本シミュレーション技術が、耐候性鋼橋梁の建設適否を判定するための有効なツールになることが期待される。Fig.16 は、2主箱桁橋につき塩分シミュレーションを実施し、塩分濃度評価を行った結果を示す。このような解析により、橋梁のどの部位で塩分濃度が高くなるかがわかるとともに、断面形状を工夫することにより、床版下の空間への塩分の巻き込みを防止できることがわかる。

$$\rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \bar{C}_g - \bar{C}_{cut}$$

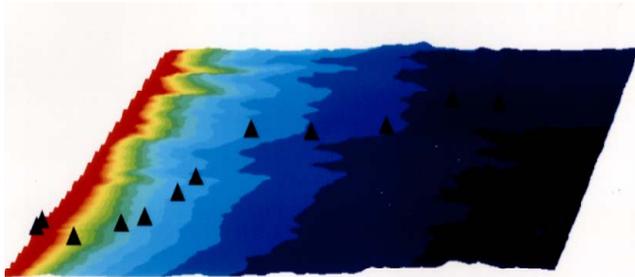


Fig.15 Example of numerical simulation result of windborne salt

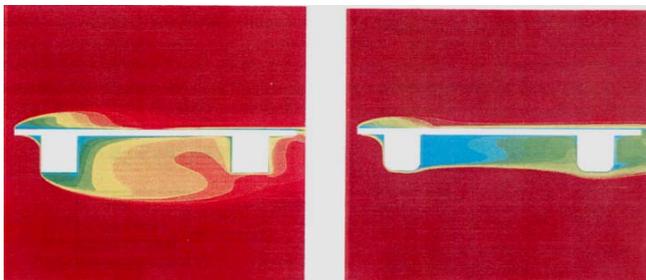


Fig.16 Distribution of salt concentration around a bridge girder section

8. 無機材料

無機材料の技術領域は、鉄鋼と総合エンジニアリング事業で共通するスラグ・耐火物技術と各種発生土の利用技術のSCTで構成され、両事業部のニーズに応えている。ここでは、これら技術の一例として、鉄鋼スラグによる環境改善技術について述べる。

近年、埋め立て用の浚渫、海砂採取などにより、浅場が消失した沿岸海域が増加している。このような海域において、浅場を造成することにより、海藻類を着生させ、魚介類の生育場を形成する環境修復が期待されている。

このため、当社では、基盤技術研究所が中心となって、高炉水砕スラグが、硫化水素の発生を積極的に抑制し、天然砂以上の青潮発生抑制効果を有することを明らかにし^{35,36}、島根県中海での覆砂材として実用化した。一方、製鋼工程か

ら発生するスラグに含まれるCaOに着目し、スラグと炭酸ガスとの反応を利用した、炭酸固化体（登録商標：マリンプロック）製造技術を開発し、藻場着生基盤材としての活用に取り組んでいる³⁷。現在、これらを組み合わせた浅場造成による環境改善を、広島県因島において、広島県の補助事業として実証試験中である。Fig.17にイメージ図を示す。

この事業では、福山製鉄所にて製造した高炉水砕スラグ覆砂材（約1000トン、800m³）および擬岩マリンプロック（20個）が使用されており、およそ600m²の海域の環境改善が期待されている。

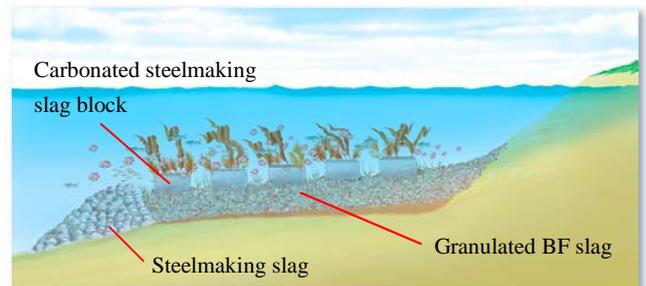


Fig.17 Scheme of demonstration test using iron and steelmaking slag and blocks

9. 物理・化学解析

9.1 物理解析技術

物理解析技術は、電子顕微鏡を中心とした微細構造解析と、表面分析や放射光利用解析を活用した状態分析技術を強みとして、鉄鋼材料・プロセスならびに環境エンジニアリング分野において、機能発現の仕組みを解析するという役割を通じて、各種新技術の開発を支えてきた。

微細構造解析では、集束イオンビーム精密加工（FIB）技術と電界放出型分析電子顕微鏡の組み合わせにより、材料の局所微細構造の解析が可能になり、材料特性の支配因子を正確かつ迅速に解析できるようになった。Photo 5は、FIB-TEM（透過電子顕微鏡）により鉄鋼材料の界面を解析した例である。材料は、Alキルド鋼を1073 Kで酸化処理し、表面にウスタイトを生成させたのち、673 Kでウスタイトをフェライトとマグネタイトに分解させたものである。FIBを用いた試料作製により、地鉄-酸化物界面から、酸化物最表層までの酸化層全体を観察できている。鋼板直上の酸化物は、厚さ1μm程度の連続的なマグネタイトである。このマグネタイトは、母相と結晶学的な整合性をもって生成することで、地鉄との高い密着性を有している。これは、鋼板表面の酸化物の密着性や剥離性の設計につながる知見を提供した例であるが、本手法は表面処理鋼板の界面構造の設計に大いに活用されている。また、同様の手法は、鋼中介在物の解析にも有効であり、たとえばCaS - CaO - Al₂O₃系の複合介在物の形態解析により、電縫溶接部の溝状腐食が抑制される機構を明らかにしている³⁸。



Photo 5 FIB-TEM observation of oxide layer on Al-killed steel

また、極低加速電圧走査電子顕微鏡法にもいち早く注目し、鉄鋼材料の極表面の観察に取り組んでいる。従来の表面分析法でも材料表面の分析は可能であるが、一般に横方向の空間分解能が不足しており、表面の組成や構造の不均一性の解析精度に難点があった。このため、加速電圧 1kV で 2.1nm の空間分解能を有し、かつ、加速電圧 100V までの極低加速でバルク試料の表面観察が可能な極低加速電圧 SEM (LEO 社製, Photo 6) を業界に先がけて設置し、新表面処理鋼板の開発を加速している。Photo 7 は加速電圧を変えて撮影した CAL 焼鈍板の観察例であり、低加速像でのみ表面の組成不均一を反映したコントラストが観察された。

材料中の各種元素の化学結合状態を解析する手法としては、一般に X 線光電子分光法など表面分析法が用いられており、当社でも表面処理鋼板の開発に有用な知見を提供してきた。基盤技術研究所では、さらに、高真空下ではなく大気中や溶液中でも注目元素の結合状態を解析できる手法として、高輝度放射光を用いた X 線吸収法 (XAFS: X-ray Absorption Fine Structure) にも注目し、試料形態や元素濃度に合わせて透過法、全電子収量法、蛍光法の利用技術開発を行ってきた。

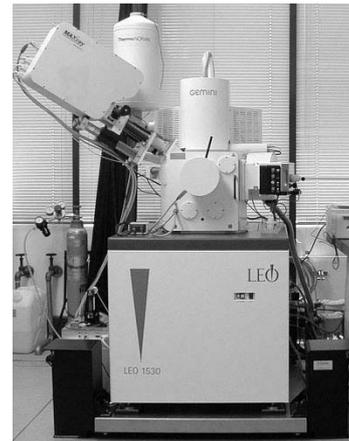


Photo 6 Ultra-low voltage SEM, Gemini

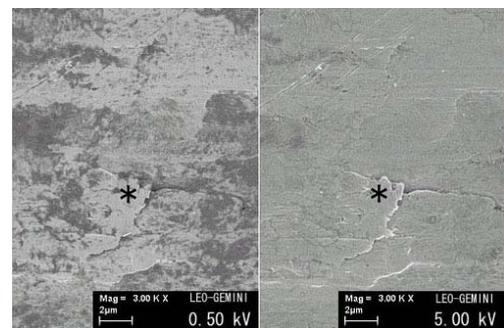


Photo 7 SEM micrographs of CAL annealed sheet steel surface at 0.5kV and 5kV

その一例として、以下に高輝度放射光研究施設 SPring-8 のビームライン BL01B1 において、蛍光 X 線検出法により実施した廃棄物焼却飛灰の解析結果を紹介する。Fig.18 に安定化処理前後の飛灰中の Pb および各種 Pb 化合物の Pb L₃ XAFS スペクトルを示す。安定化処理前の飛灰 A の Pb L₃ のスペクトルは PbCl₂ のものに、同飛灰 B のスペクトルは PbO のものに最も近いことから、これらの飛灰中の Pb はそれぞれ塩化物、酸化物を主な状態として存在している可能性が高い。2 種類の飛灰 A, B 中の Pb は、処理前の結合状態は異なっているが、液体キレート剤 (商品名 A200) と混錬した後の飛灰 A と B の Pb L₃ のスペクトルは、塩化鉛水溶液と液体キレート剤と混合して得られたる過残渣のスペクトル (Pb+A200) と非常に良く類似している。これは、飛灰を液体キレート剤と混錬することにより、Pb が不溶性のキレート錯体と同様のキレート結合を形成し安定化することを示している。

我々はこの放射光を用いた状態分析を電子顕微鏡を用いた局所解析と相補的に組み合わせ、化成処理皮膜の構造評価にも活用している³⁹⁾。

9.2 化学解析技術

化学解析分野においては超微量物質の定量技術など先進分析技術の開発とともに、リアルタイム化学計測技術、介入物・析出物評価技術などの開発を進めてきた。

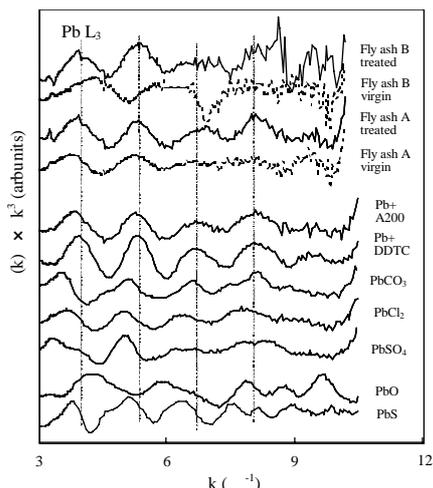


Fig.18 Pb L₃ EXAFS spectra from fly ash and standard materials

リアルタイム化学計測技術では、レーザー-ICP 分析装置を開発⁴⁰⁾し、自動車用冷延鋼板のヘゲ欠陥迅速評価や鋳片オンサイト分析などへ適用している。また、ごみ焼却炉でのダイオキシン排出量低減のために、ダイオキシン前駆体をオンサイトで迅速に測定できる装置⁴¹⁾を開発し、燃焼制御への適用を図りつつある。以下にこの装置の概要を紹介する。焼却炉から発生するダイオキシン類濃度は ppt レベル以下と非常に少なく、現在この濃度をリアルタイムで検出できる手法は実用化されていない。そこで、ダイオキシンの前駆体であるクロロベンゼン類、クロロフェノール類とダイオキシン類濃度には高度な相関関係があること (Fig.19) に着目し、ダイオキシン前駆体濃度をオンラインで自動測定する分析装置を開発し、商品化した。Fig.20 に分析装置の構成を示す。前駆体物質濃度を最短で 15 分おきに ppb レベル以下 (検出下限 0.001 μg/Nm³) の濃度域まで定量できる。これにより、前述の相関関係からダイオキシン濃度を短時間 (15 分) で推定することが可能となった。本装置は数多くのごみ焼却炉や焼結炉のダイオキシン類発生挙動調査や国家プロジェクトにおいて使用され、その性能が確認されている。

また、溶鋼中の元素濃度をリアルタイムで測定する手法、スラブ中の介在物量をオンサイトで迅速に測定できる装置の開発も進めている。

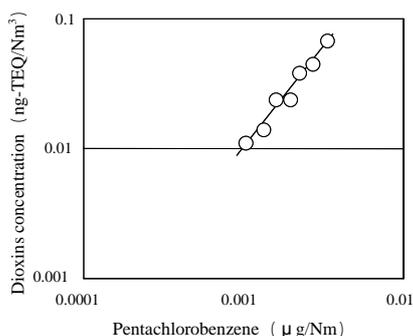


Fig.19 Relationship between dioxins concentration and dioxin precursor concentration

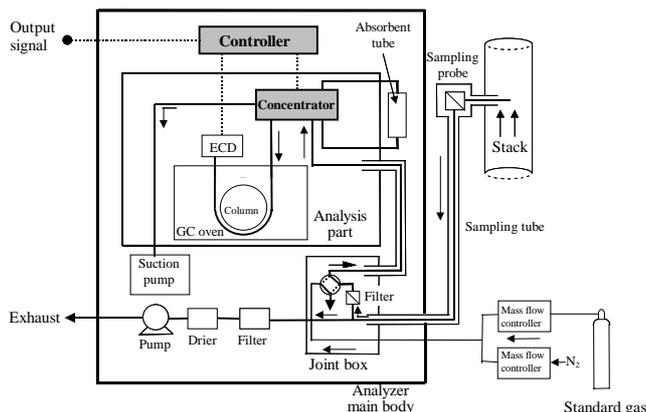


Fig.20 Configuration of dioxin precursor analyzer

介在物・析出物評価技術としては、介在物粒度分布測定法⁴¹⁾、IF 鋼中析出物高精度形態別定量法⁴³⁾などを開発した。介在物粒度分布測定技術は、酸溶解抽出法と光回折散乱法とを組み合わせたものであり、これにより、製鋼プロセス中での介在物挙動や、製鋼プロセスの違いによる介在物の違いなどを明らかにできるようになった。例として、軸受鋼製造プロセスによる介在物の粒径分布の違いを Fig.21 に示す。

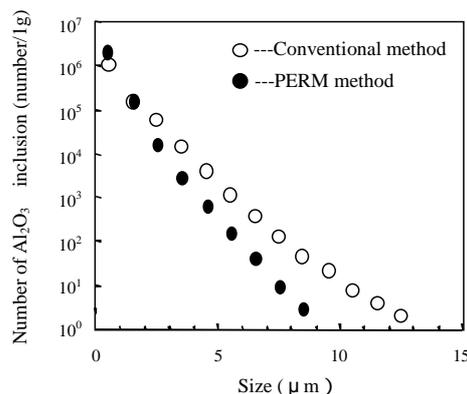


Fig.21 Comparison of size distribution of Al₂O₃ in the bearing steel obtained by conventional method and pressure elevating and reducing method (PERM)

従来プロセスに比べ加減圧精錬法⁴⁴⁾では特に大型介在物が減少することがわかる。

最近では、スラグやパウダー巻き込みによって鋼中に残存する極少量の非アルミナ系介在物を高精度に定量できる技術や、鋼中極微量炭素をその存在形態別に定量できる技術の開発を進めている。

これら介在物・析出物評価技術は、RH 加減圧精錬法の開発、TULC 用素材およびアンバー用素材の清浄化プロセスの改良、極低 S 系高効率電磁鋼板の開発などに活用されている。

10. 環境・バイオ

環境浄化化学技術および微生物解析制御技術分野では、有害物の分解除去、副生成物や廃棄物の分解・利材化において、

化学処理、微生物処理を高効率に実施する研究開発を進めてきた。

その一例として、Mn 鉱石による焼却部排ガス中ダイオキシンの低減技術がある。

これは、Mn 鉱石粉を排ガス中に吹き込むことにより、その酸化分解能を利用して、排ガス中ダイオキシン類を分解除去する技術である。ごみ焼却炉での吹き込み試験の結果、排ガス中ダイオキシン類を最高 80%、焼却飛灰中ダイオキシン類を約 65%低減する結果が得られ、従来の活性炭吹き込みに代わる、より安価なダイオキシン類除去法となり得る可能性を見出した。

微生物利用技術としては、厨芥や汚泥のコンポスト化技術⁴⁵⁾、汚泥の減容化技術⁴⁶⁾、コンポスト施設で発生する悪臭除去技術⁴⁷⁾が挙げられる。いずれも有害物質や廃棄物を、微生物反応を利用して分解する技術である。

従来ブラックボックスとなっていた微生物処理槽内の微生物相または目的とする分解反応を担う微生物の解析を行い、微生物の機能が最大になる条件を見出すことにより、分解反応を高速化していることが特徴である。Fig.22 に、微生物による汚泥減容化の最適条件を決定するために行った電気泳動法による遺伝子解析の一例を示す。本技術は、現在、環境汚染物質の生物分解技術にも展開中である。

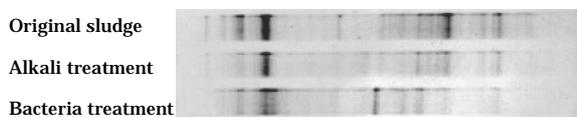


Fig.22 Bacteria monitoring in the sludge treatment using PCR-DGGE methods

また、生態評価技術も重要である。副生成物や廃棄物を利材化し自然界で利用する場合、利材化製品が生態系に及ぼす影響を評価する必要がある。たとえば、先に述べた炭酸固化体ならびに溶銑脱珪スラグを用いた緩効性カリ肥料の開発 (Photo 8) においては、これらの製品の生態系への影響を詳細に検討し、製品の最適設計に役立てている。



Photo 8 Response of paddies to NKK potassium silicate fertilizer

11. 触媒

当社においては、これまで、資源（石炭、天然ガスの変換利用技術など）、エネルギー（化学反応を利用した顕熱回収技術、高カロリーガス製造技術、ジメチルエーテル（DME）合成など）、環境（各種燃焼排ガスの清浄化処理技術など）、および化学品製造（製鉄所副生ガスおよびタール誘導体の高付加価値化技術など）の各分野において、触媒利用技術の展開を図ってきた。その結果、アンモニア酸化分解触媒、コークス炉ガス（COG）精製・高カロリー化触媒、フェノール合成触媒^{49),50)}、安息香酸合成触媒⁵¹⁾、DME 合成触媒⁵²⁾⁻⁵⁴⁾など多くの新触媒を開発した。触媒の開発は、Fig.23 に示すように触媒の調製と性能評価および物性解析の繰り返しによって行われ、この各過程で適切な作業仮説を設定することが重要なポイントとなる。かつて触媒は、偶然と絨毯爆撃的な試行錯誤の所産であり、またブラックボックス的存在といわれていたが、当社では、先進物理解析技術である放射光を用いた XAFS (X-ray absorption fine structure) による解析により、これまでに得られなかった各種の有用な情報（たとえば触媒表面に分散した活性成分分子の形態、電子状態、結晶子サイズ、原子間距離など）を得るに至っている。

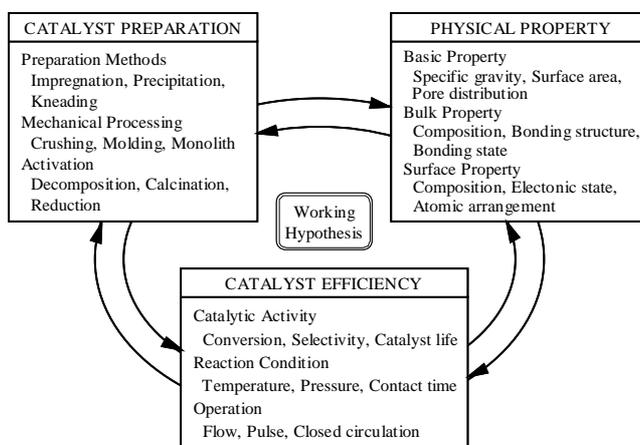


Fig.23 Catalyst design method

12. おわりに

以上、当社の鉄鋼事業と総合エンジニアリング事業を支える共通基盤技術を、その開発を担当している基盤技術研究所の「戦略的基盤技術（SCT）」を中心にしながら紹介した。

今後ますます厳しくなるグローバルな競争のもとで、先駆的かつ顧客満足度の高い新商品・プロセス技術を開発するためには、これらの基盤技術のさらなる高度化、新規化、そして、融合が不可欠である。

当社は、この目標に向かってより一層の努力をする所存である。そして、その技術と人材は、新生 JFE グループに引き継がれることになる。

参考文献

- 1) 飯塚幸理ほか. “デジタル信号処理を導入した厚板自動超音波探傷装置”. NKK 技報. No.167, pp.39-43(1999).
- 2) 飯塚幸理ほか. “高性能 UOE 交換溶接部自動超音波探傷装置”. NKK 技報. No.175, pp.1-5(2001).
- 3) 手塚浩一ほか. “M 系列電極式レベル計による溶鋼レベル計測”. 第 36 回計測自動制御学会学術講演大会, 徳島, 1997-07, 111D-5.
- 4) 長棟章生ほか. “M 系列信号変調方式マイクロ波レベル計”. 計測自動制御学会論文集. Vol.27, No.11, pp.1199-1205(1991).
- 5) 山田善郎ほか. “消耗型光ファイバ放射温度計による熔融金属测温”. NKK 技報. No.152, pp.22-26(1995).
- 6) 嶋田正大ほか. “橋梁用アクティブ制振装置”. NKK 技報. No.147, pp.35-42(1994).
- 7) 水野浩ほか. “連続鋳造モールド湯面レベル制御の高精度化”. NKK 技報. No.164, pp.7-11(1998).
- 8) 王赴国ほか. “熱間圧延システムの離散時間状態予測スライディングモード制御”. 機械学会論文集 C 編. Vol.65, No.631, pp.985-990(1998).
- 9) 田鍋実ほか. “熱風炉燃焼制御システム”. NKK 技報. No.162, pp.6-10(1998).
- 10) 藤井聡ほか. “ごみ焼却炉ハイブリッド燃焼制御システム”. NKK 技報. No.159, pp.21-25(1997).
- 11) 黒田学ほか. “ごみ焼却プラント向け運転訓練装置の開発”. 第 40 回計測自動制御学会学術講演会. 203A-1(2001).
- 12) 北條成人ほか. “熱延工場の圧延計画自動作成処理の開発”. CAMP-ISIJ. Vol.9, p.935(1996).
- 13) 藤井聡ほか. “出鋼順自動編成”. 日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会 鉄鋼業の CIM・FA 化のためのシステム技術 第 6 回フォーラム. pp.25-30(2002).
- 14) Shigeto Hojo “Autonomous Decentralized Lot-making for Plate Design Problem”. MMM2001 IFAC. pp.372-375(2001).
- 15) 鈴木ほか. “全自動ケースハンドリングシステム”. NKK 技報. No.170, pp.82-87(2000.6).
- 16) 吉永ほか. “高能力パレット搬送システム (NKK-PALS)”. NKK 技報. No.175, pp.41-45(2000.12).
- 17) 大川進ほか. “条鋼・線材用連続圧延設備”. 日本機械学会誌. Vol.105, No.1002, p.298(2002).
- 18) 関口宏二ほか. “地盤～構造物系の汎用解析プログラム NAPG/2D”. NKK 技報. No.144, pp.109-116(1993).
- 19) 東京湾横断道路調査会検討資料, 東京湾横断道路 川崎換気塔ジャケットの解析モデルの検討 (その 2) (1987).
- 20) 関口宏二ほか. “ケーソンと地盤の相互挙動に関する解析”. NKK 技報. No.150, 鋼構造・機器特集, pp.45-50(1995).
- 21) 南部俊彦ほか. “固化処理土中詰二重矢板式構造物の挙動の推定”. 構造工学論文集. Vol.48A, pp.1453-1460(2002).
- 22) Oka, F. et al. A constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its application, 10th WCEE, Madrid, pp.2529-2534(1992).
- 23) 関口宏二ほか. 委員会報告 第 1 編 液状化のメカニズムと解析手法, 3. 被害シミュレーション, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.8-13(1999).
- 24) 関口宏二ほか. 矢板締切り工を施した盛土地盤の動的有効応力解析, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, pp.457-462(1999).
- 25) 関口宏二ほか. “超多点注入工法による地盤の液状化対策技術”. NKK 技報. No.175, pp.1-5(2001).
- 26) Sugano, T. et al. Shaking table tests and effective stress analyses on the dynamic behavior of wedged caissons, 12th WCEE, Auckland, Paper No.1193(2000).
- 27) 加村久哉ほか. “座屈補剛の違いに着目した極低降伏点鋼制震壁の研究”. 鋼構造論文集. 第 5 巻第 20 号, pp.9-16, 1998.
- 28) 永関三千男ほか. “清掃工場の焼却炉ボイラ架構への制震装置の適用”. NKK 技報. No.160, pp.62-67(1997).
- 29) 伊藤均ほか. “低靱性鋼による柱梁接合部の破断性状 (その 5 ト字型動的実験)”. 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp.415-416, 1998.
- 30) 下川弘海ほか. “角形鋼管で補剛された平鋼ブレースの繰り返し履歴挙動に関する研究”. 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2663-2668, 1998.
- 31) Katayama, T. et al. “Experimental Study on Hysteretic Damper with Low Yield Strength Steel under Dynamic Loading”. Proc. the 12th WCEE, 1020/6/A, 2000.
- 32) 伊藤均ほか. “リングダイアフラム円形鋼管柱の押引試験”. 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp.611-612, 2000.
- 33) Takuya Murakami et al. “Aerodynamic Study on Box Girder Section with Windshields for Super-long Suspension Bridge”. AWAS'02.
- 34) 加藤真志ほか. “飛来塩分の数値解析的評価技術の橋梁への適用”. 鋼構造論文集. 第 7 巻第 28 号, 2000.
- 35) 宮田康人ほか. “高炉水砕スラグの海底設置実験”. 日本造船学会 第 15 回海洋工学シンポジウム要旨集. pp.339-346(2000).
- 36) 沼田哲始ほか. “高炉水砕スラグの海域適用性”. 日本海水学会 第 52 年回講演要旨集, pp.43-44(2001).
- 37) 磯尾典男ほか. “藻場造成用基質としての炭酸固化体の評価”. 水産学会誌. 66, pp.647-650(2000).
- 38) 仲道治郎ほか. “Ca 添加鋼中に形成される複合介在物の微細組織解析”. 第 128 回日本金属学会講演概要, p.220(2001).
- 39) E. Hamada et al. Structure of chromate coatings studied by TEM and XANES, GALVATECH '2001, 225 (2001).
- 40) 秋吉孝則ほか. 鉄と鋼, Vol.83, No.1, pp.42-47(1997).
- 41) 永野英樹ほか. 生活と環境. Vol.46, No.4, pp.42-47(2001).
- 42) 千野淳ほか. まてりあ. Vol.35, No.4, pp.424-426(1996).
- 43) 石黒康英ほか. 鉄と鋼. Vol.83, No.8, pp.479-484(1997).
- 44) 松野英寿ほか. 材料とプロセス. No.3, p.246(1990).
- 45) 鈴木一好ほか. “乾燥分別厨芥のコンポスト化”. NKK 技報. No.157, pp.71-75(1997).
- 46) 山口東洋司ほか. “微生物を利用した汚泥発生抑制型水処理技術の開発”. 第 39 回下水道研究発表会. 発表予定.
- 47) 野田健史ほか. “循環水の pH 制御を行った充填塔式生物脱臭装置の脱臭性能”. 日本畜産学会 第 99 回大会講演予稿集. p.93 (2001).
- 48) 八尾泰子ほか. “鉄鋼スラグを利用したケイ酸カリ肥料の肥効”. 日本土壤肥料学会誌. Vol.72, pp.25-32(2001).
- 49) 鹿田ほか. NKK 技報. No.151, pp.82-86(1995).
- 50) J. Miki et al. J. Catal. Vol.151, pp.323-329(1995).
- 51) J. Miki et al. Sekiyu Gakkai Shi. Vol.39, pp.34-40(1996).
- 52) 大野ほか. NKK 技報. No.163, pp.25-29(1998).
- 53) 大野ほか. NKK 技報. No.174, pp.1-5(2001).
- 54) T. Shikada et al. Kinetics and Catalysis. Vol.40, pp.395-400 (1999).