

(解説)

シミュレーション技術の製品開発への応用

Application of Simulation Technology for Product Development



中川知和*(工博)

Dr. Tomokazu Nakagawa

Kobe Steel has been using simulation technology for the product development since the end of the 1960's. We have developed many types of accurate and reliable simulation methods for numerical analyses and measurement/experiment techniques. We have also successfully applied our simulation technology to the manufacture of actual products. In this paper, we show how product designs or manufacturing processes can be optimized using simulation technology.

まえがき = 1970年代前半に一部の企業で利用が始まったシミュレーション技術は、計算機性能の向上とともに急速に普及し、いまでは製品開発には不可欠の技術となっている。当社においては、1960年代後半より機械製品、製鋼プロセスなどのシミュレーションを開始し、最新技術を取入れつつその適用を拡大してきた。当初は、実用に供せる市販ソフトウェアが少なかったため、理論構築から始めて独自のソフトウェアを多く開発し、現在も特殊なものについては同様に独自開発している。また、実験・測定結果を取入れて精度を向上するノウハウも蓄積してきた。当社の特徴は、このような長年にわたる技術蓄積のもとに、利用価値の高いシミュレーションを行えることである。ここでは、材料分野と機械分野における代表的な応用事例を紹介するとともに、将来展望についても触れる。なお、当社のシミュレーション技術については文献¹⁾も参考とされたい。

1. 材料分野におけるシミュレーション技術の応用

当社の材料分野におけるシミュレーションの目的のひとつは、材料の高品質化・生産性向上のために、製造プロセスを最適化することである。温度変化や塑性変形など製造工程中に材料に生じる各種の物理現象の予測とともに、生産設備・装置の挙動も把握してプロセスの最適化を行っている。もうひとつの目的は、新材料または新製造プロセス開発において、仮説の検証ならびに開発の効率化に役立てることである。以下では、これら目的に沿って具体的事例を紹介したい。

1.1 鑄造シミュレーション

当社は、鉄鋼、アルミニウム、銅、チタンなど各種の金属材料を製造している。いずれの材料においても、鑄造は素材の品質を左右する重要なプロセスであり、鑄造シミュレーションは広く利用され基盤技術のひとつとな

っている。

まず、鑄鋼品に関しては、相変化を考慮した熱・流動解析により、大型鑄塊の凝固進行状況を予測して、ひけ巣発生位置や量を推定している。さらに、固液共存領域における溶質再分配モデルと凝固解析とを組み合わせることにより、成分偏析を精度良く予測することも可能である。

鉄鋼の基幹プロセスである連続鑄造については、鑄片の熱伝導解析および熱応力解析を行って、凝固シェルの厚さや内部ひずみを予測する計算システムを開発した。解析結果の判断に重大な影響を及ぼす高温下での強度（割れ発生限界ひずみ）を独自の試験方法により求め、精度を確保している。また、鑄型内部の溶鋼の熱・流動解析により介在物の挙動を予測し、浸漬ノズル形状や電磁攪拌・電磁ブレーキ手法の最適化に利用している（図1）。

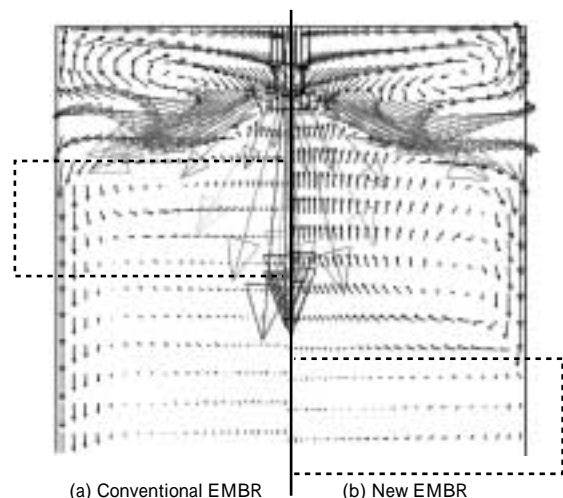


図1 鋼連続鑄造における鑄型内溶鋼流の解析(電磁ブレーキの検討)
Fig.1 Simulation of molten metal flow in the mold for steel continuous casting (evaluation of EMBR)

*技術開発本部 機械研究所

また、型鑄造において、熱伝導解析と結晶核生成・結晶粒成長の解析とを組合わせて凝固組織の予測を行い、結晶粒微細化のための鑄造条件の決定も行っている（図2）。

1.2 塑性加工シミュレーション

鑄造とともに、圧延、板成形、鍛造などの塑性加工は材料製造における基幹プロセスであり、多くのシミュレーション事例を有している。

鋼板の圧延では、ロールと材料の変形を考慮した解析を行って平坦度や板クラウンなどを予測し、圧延機の制御アルゴリズムの設計に利用している。さらに、非定常な3次元変形が生じる複雑な圧延プロセスの解析も実施している。図3はその一例で、温度差を有するスラブにサイジングプレスをした場合のひずみ分布の予測結果である。このような解析結果は、板の変形防止に必要なスラブ温度管理範囲の決定などに用いられる。

また、アルミニウム板材を成形する際に発生する異方性（成形の方向によって塑性変形量が相違する現象）を、集合組織から定量的に予測し、成形解析に反映させている²⁾（図4）。このような解析は、アルミニウム板材の成形加工方法の改善に役立っている。さらに、最近では、成形性向上を目的とした集合組織の最適制御プロセス探索にも、応用を試みている。

1.3 切削シミュレーション

切削シミュレーションは、当社機械製品の加工プロセスの適正化のみならず、当社材料の切削性能の評価・向上にも利用されている。

機械分野の主力メニューであるスクリュ圧縮機においては、複雑な3次元の歯形形状を有するスクリュロータの切削加工が重要な工程となっている。従来、加工に用いるカッタ形状の決定には試行錯誤が必要であり、時間を要していたが、切削シミュレーションを導入して加工後の形状を予測することにより、短時間で高精度加工のできるカッタ形状を決定できるようになった。

また、鉄鋼材料の切削性能を検討するために、図5のような切削シミュレーションを実施している。同図は、S45Cを切削する際の挙動を有限要素法により解析した結果であり、コンタ図は切屑周辺の温度分布を表している。切削時の温度と添加元素の快削化機能には強い相関があるため、ユーザでの切削条件に応じた成分設計を行

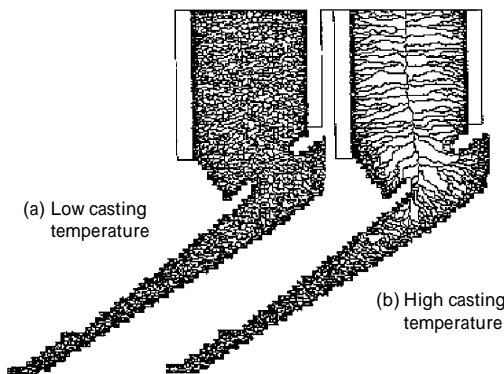


図2 高Mn鋼の凝固組織の予測
Fig. 2 Prediction of grain structure in high Mn steel casting

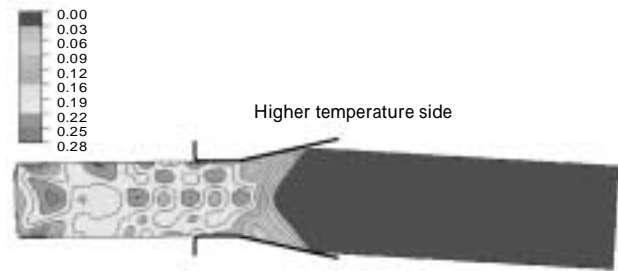


図3 鋼板サイジングプレス後の長手方向ひずみの予測
Fig. 3 Prediction of longitudinal strain after sizing press of steel plate

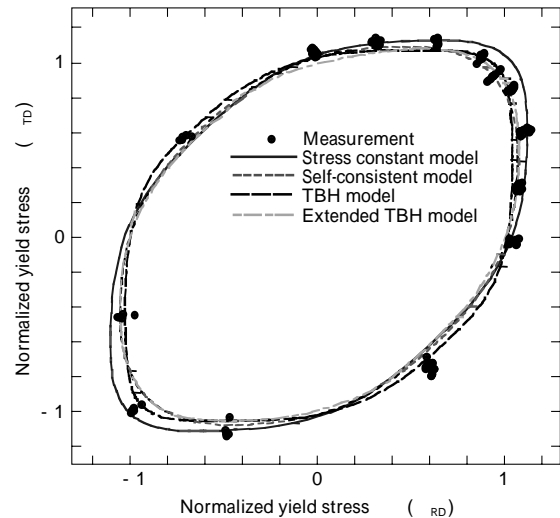


図4 種々の結晶塑性モデルにより求めたアルミニウム板材の降伏曲面
Fig. 4 Yield surfaces of aluminum sheet obtained using various models for plasticity of crystal

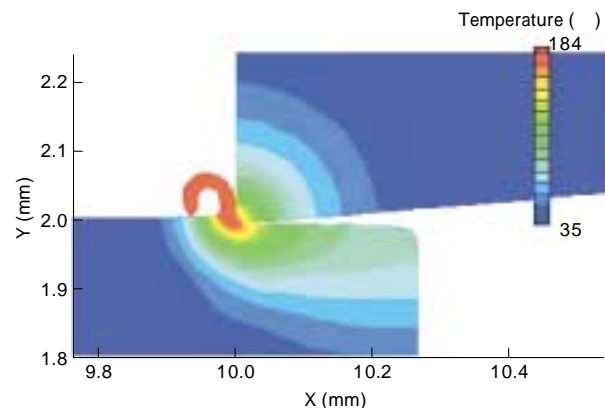


図5 S45C鋼の切削シミュレーション（切屑温度分布の予測）
Fig. 5 Cutting simulation of S45C steel (prediction of temperature distribution in chips)

うことが可能である。

1.4 プロセス制御シミュレーション

鉄鋼プロセスの生産性向上を目指して制御システムを構築または改善する際に、制御系のシミュレーション技術を活用している。

ここでは例として、連続鑄造における鑄片の表面品質を確保するための、鑄型内溶鋼の自由表面（湯面）の高さ（レベル）制御を紹介する。湯面レベル制御においては、種々の周波数の外乱に対して高い安定性が求められる。このために、ロバスト安定性を保証できる H_∞ 制御の採用を検討した。検討においては、制御系シミュレー

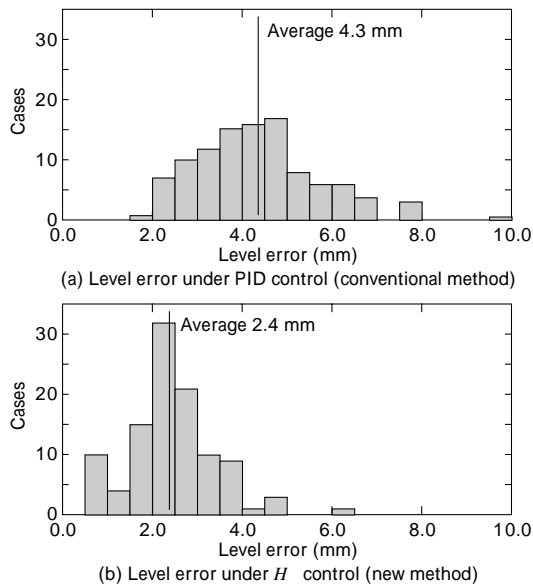


図6 鋼連続鋳造における湯面レベル制御の実験結果
Fig. 6 Experimental results of meniscus position controls in steel continuous casting

タを開発し、実生産の数値実験を行ったところ、従来の制御手法に比べてその優位性を立証することができ、実機適用となった。その結果、湯面レベル変動の平均値を約40%低減することができた³⁾(図6)。

また、熱延仕上げミルにおいて、板幅を一定に制御するための装置の設計や、厚板仕上げミルの板厚制御装置、冷延での圧延機間の荷重や電流バランスをオンラインで調整する装置の設計にも制御系シミュレータを活用している。

1.5 鋼材の材質予測シミュレーション

熱間圧延プロセスにおいては、相変態、析出物の固溶・析出、脱炭など各種の現象が発生し、材料の機械的性質や表面品質に大きな影響を与えるため、これらの現象をシミュレートして制御することは、高品質で特性が安定した鋼材を製造するために重要である。

当社では、鋼材の成分設計に利用するために、組織変化のシミュレーション技術を開発した。シミュレーションにおいては、圧延条件からオーステナイト結晶粒径と残留ひずみを計算するオーステナイト組織予測モデル、およびオーステナイトからの変態過程を計算する相変態モデルを使用している。特徴は、熱間圧延中に生じる冶金現象に対して基礎的な金属学的モデルを採用するとともに、実験結果も組み入れて、精度を向上した点である。これにより、機械的性質が高精度で予測可能となった(図7)。また、表面の脱炭挙動のシミュレーションも実施して、脱炭を最小化するプロセス設計に活用している。

従来、鋼材の組織変化や表面挙動の予測は、実験に基づく帰帰式に頼らざるを得ない状況であったが、このような基礎理論に立脚したシミュレーションを利用することによって予測精度の向上を図ることができる。

2. 機械分野におけるシミュレーション技術の応用

当社の機械分野におけるシミュレーションの多くは、

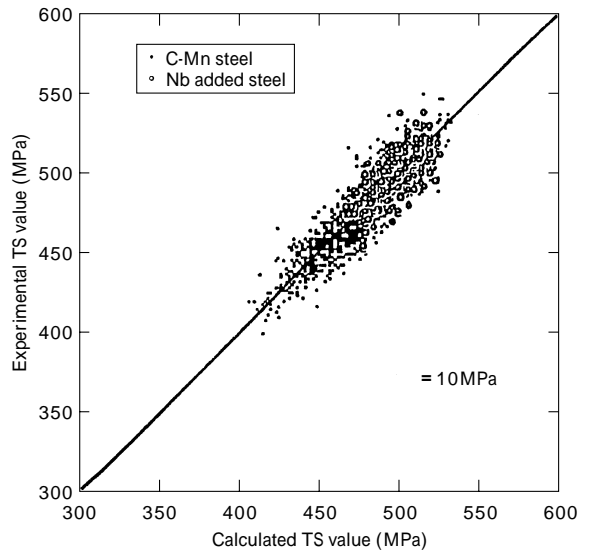


図7 鋼材の引張強度の予測値と実験値の比較
Fig. 7 Comparison between predicted and experimental values of tensile strength of steel

製品設計の合理化、すなわち最適設計および設計時間短縮を目的として利用されている。また、材料の利用技術に関わるシミュレーションも行っており、ユーザの視点に立った材料開発の促進に努めている。

2.1 建設機械の振動シミュレーション

当社グループ会社のコベルコ建機㈱の主力メニューである油圧ショベルの開発においては、振動シミュレーションを多用して設計の合理化に努めている。油圧ショベルの作業時の挙動は複雑なため、非線形解析を高効率で実施せねばならない。このため油圧制御系を含む柔軟構造物のダイナミクス解析の専用ソフトウェア(SINDYS)²⁾を開発した。これを利用して図8に示すようなラフロード走行試験の動的解析を行い、この結果をもとに溶接部近傍の局部応力を計算して、疲労耐久性を評価している。本解析においては、解析自由度数の低減や時間積分法に独自の手法を用いて、計算効率の向上を図った。また、掘削作業時のアタッチメントの動的挙動と油圧システムの挙動とを連成させた解析を行い、掘削時の消費動力と発熱量を予測して、ヒートバランスや省エネルギー性の定量的評価も行っている。

振動以外に、油圧制御、音響、構造など各種のシミュレーションも実施しており、これらの事前解析によって設計時間が従来比26%に短縮できた。

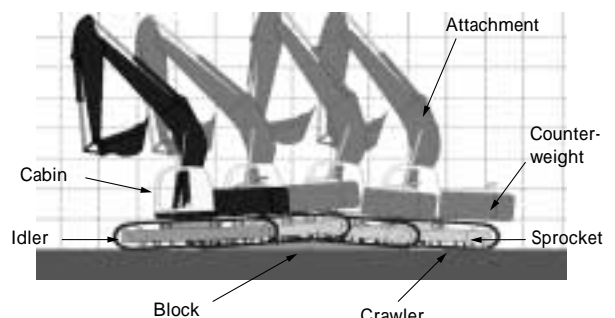


図8 油圧ショベルのラフロード走行試験の動的シミュレーション
Fig. 8 Dynamic simulation of rough road test for hydraulic excavator

2.2 音響シミュレーション

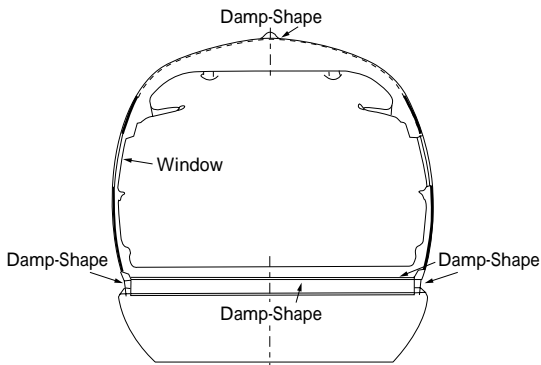
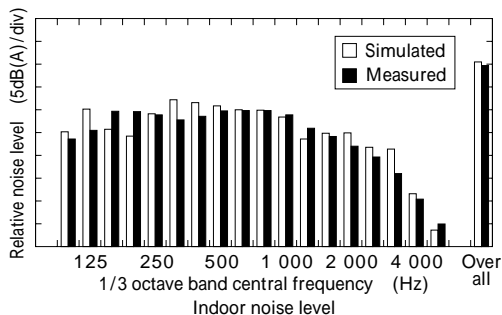
当社では、長年蓄積してきた音響技術を核として、視界性が良好かつ防音性能に優れた山形防音装置などの防音製品の開発、圧縮機や建設機械など機械製品の低騒音化、防音・快適音を達成するための材料利用技術提案などを実施している。音響シミュレーションについては、その重要性に20年以上前から着目し、境界要素法に基づくソフトウェア(ACOUSIS)を開発した。また、シミュレーションを実施する際に必要な媒質や境界条件の諸量を、全周波数領域にわたって高精度に計測できるシステム(ACIMS)の開発など、音響測定技術も蓄積している。さらに、大型の音響実験棟(写真1)も建設して、実験・解析両面から総合的な音響評価が実施できる体制を整えている。

一例として、図9に防音・制振複合形アルミ合金押出形材(ダンシェーブ®)を新幹線車両(JR西日本500系)に適用した際の、車内騒音予測シミュレーション結果を示す⁵⁾。予測値は、実測値と良く一致しており、ダンシェーブの最適配置を事前に決定可能なことがわかる。このように、利用技術も考慮した製品提案にシミュレシ



写真1 大型半無響室

Photo 1 Large scale hemi-anechoic room



Positions of " Damp-Shape "

図9 新幹線車両の車内騒音予測結果

Fig. 9 Simulated noise level in a coach for Shinkansen bullet train

ョンは活用されている。

2.3 熱・流体シミュレーション

熱・流体シミュレーションは、構造・振動シミュレーションとともに、当社機械製品の設計や製造プロセス最適化に多用されている。

図10は、原子力発電所で発生する低レベル放射性廃棄物の溶融固化体をチャンバ内で冷却する際の、空気の温度予測結果である。この冷却チャンバ内に設置された機器の熱損傷防止と安全性確保のために、適切な量の外気を吸気し、内部を換気する構造設計が求められていた。チャンバ構造は複雑であるため、吸気孔位置や吸気流量の最適化には、このような大規模シミュレーションが有用である。

直接還元製鉄法のひとつとして、当社で開発が進められているITmk3®法の開発にも熱・流体シミュレーションが利用されている。ITmk3法は、回転炉床炉に鉄鉱石・微粉炭からなるペレットを敷き詰め、バーナで加熱することによって鉄の還元を数分で終了させることが特徴である。図11のようなシミュレーションにより炉内状況を予測し、炉形状やバーナ、二次空気孔配置などの最適化を実施している。

2.4 自動車の衝撃シミュレーション

近年、自動車の軽量化に寄与する材料として、高強度鋼板(ハイテン)やアルミニウム材などの適用が増えつつあるが、従来材料に比べて歴史が浅いため、材料提案

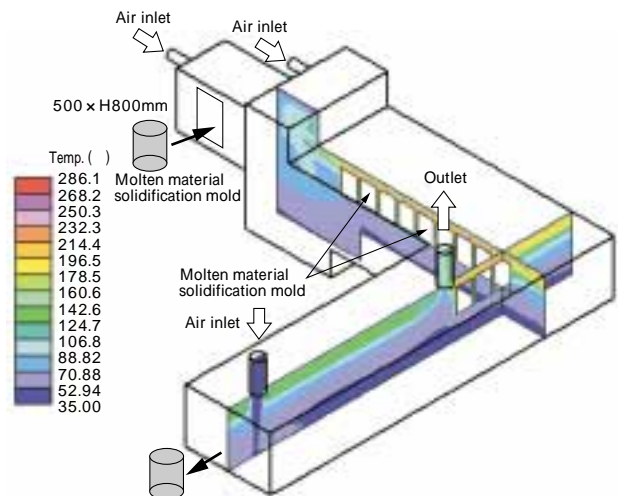


図10 低レベル放射性廃棄物溶融固化体の冷却チャンバの温度分布予測

Fig.10 Prediction of thermal distribution in cooling house for low-level radioactive wastes



図11 ITmk3の回転炉床炉内シミュレーション結果

Fig.11 Numerical analysis of rotary hearth furnace in ITmk3

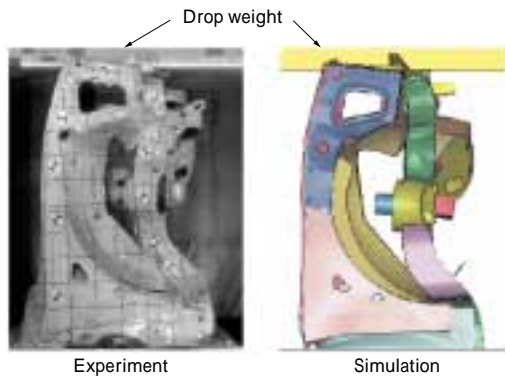


図12 自動車フロント部の落錘衝撃シミュレーションおよび実験結果
 Fig.12 Simulated and experimental results of drop tower test for automobile front structure

に際しては成形方法の提案のみならず、最終製品(部品)の性能に関する評価も実施する必要がある。これに対応するために、当社では自動車車体・部品の強度評価技術の育成を図っている。とくに、安全性に大きく寄与する衝突性能に関しては、衝撃シミュレーションならびに衝撃試験を行える体制を整えた。

衝撃シミュレーションの例として、図12に自動車フロント部の落錘衝撃実験とシミュレーション結果の比較を示す⁶⁾。部品をハイテン化あるいはアルミ化する際の衝突性能の評価には、このような解析的検討が不可欠である。なお、本実験および解析は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究：革新的温暖化対策技術プログラム「自動車軽量化のためのアルミニウム合金高強度加工・形成技術の開発事業」の成果の一部である。

2.5 HILS(Hardware In the Loop Simulation)システム

HILSとは、大規模なシステム(製品)の性能を高精度かつ簡易に事前評価するために、シミュレータと実機の一部を連動させて、全体をシミュレートする手法である。当社では、油圧ショベルを開発するために、図13に示すようなHILSシステムを構築した。同図において、エンジンとポンプは実機であり、これにショベルの機構系シミュレータを連動させて全体系をシミュレートしている。システムにはリアルタイム性が要求されるので、高速演算アルゴリズムを開発するとともに、複数の計算機を高速大容量通信により接続し、並列処理を行っている。

本システムは、オペレータがジョイスティックを用いて実作業の操作を行うと、アタッチメントの動作がアニメーション表示されるとともに、エンジントルク、回転数、ポンプ圧などがモニタリングできる。これにより、エンジン・ポンプ系の燃費性能、応答性能、制御性能などの試験を仮想的に実施できるようになった。

3. 将来に向けて

数値計算技術は、超大型並列計算機を利用したシミュレーションに代表されるように、複数の物理現象が連成した複雑な現象を、より詳細に捉えることを目標に発達しており、当社においても、流体解析や大型構造物の解析などにこのような技術を応用していきたい。一方、設

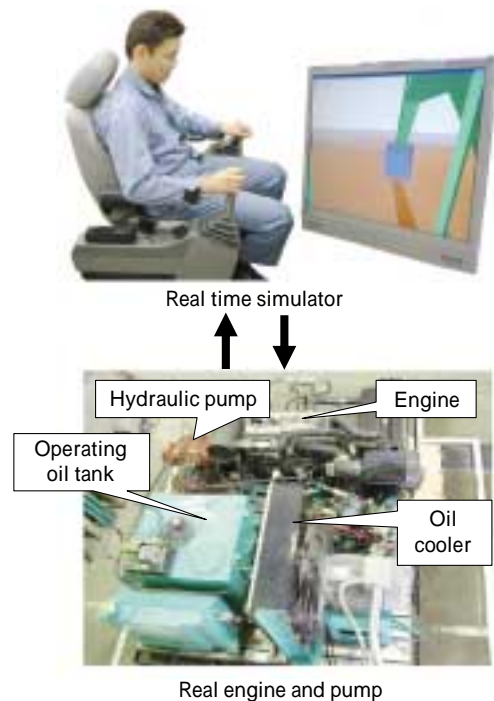


図13 油圧ショベルのHILSシステム
 Fig.13 HILS system for hydraulic excavator

計の初期段階や生産プロセス改善などの目的に利用されるシミュレーションは、やや精度を犠牲にしても迅速性が要求されるので、第一近似的な解析を簡単に実施できるようなシステムの構築を進めたい。さらに、HILSのように解析と実験を組合わせたバーチャルマシンによって設計合理化を図ること、あるいはHILSシステムそのものを製品化することも今後の目標のひとつである。

シミュレーションの精度を確保するために不可欠な、材料物性および境界条件・初期条件に関するデータベースに関しては、当社材料を中心に今後も整備を進めていく。また、解析モデルの作成や解析結果の解釈といった、シミュレーションの利用ノウハウについても共有化と普及を推進している。

むすび= 当社は、30年以上にわたりシミュレーションを各種の製品開発に応用してきた。今後、この技術蓄積を活かしてシミュレーション技術をより高度化し、高付加価値の製品創出につなげていきたい。

参考文献

- 1) R&D神戸製鋼技報, Vol.51, No.3 (2001).
- 2) Y. Hayashida et al.: Simulation of Materials Processing, Theory, Method and Applications, (1995) p.717.
- 3) 松浦 徹ほか: 電気学会研究会資料 金属産業研究会, Vol. MID-95-1 (1995) p.1.
- 4) 井上喜雄: 油圧技術, 20-1 (1981) p.25.
- 5) 吉村慎一郎ほか: 日本機械学会第5回交通・物流部門大会講演論文集, No. 96-51, 2301 (1996).
- 6) 金橋秀豪ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集, No.119-04 (2004) p.1.