

特集

ソフト及びハード磁性材料の新展開

無方向性ケイ素鋼板の最近の動向と展望

Recent progress and prospect of non-oriented silicon steel sheet

茂木 尚 (新日本製鐵)

Hisashi MOGI Member

Key Words: Non-oriented Si steel sheet, thin gauge, high tensile stress, high efficiency, residual stress

1 はじめに

ソフト磁性材料の中でケイ素鋼板は、高磁束密度・低鉄損である電気機器の鉄心材料として、きわめて安価という特徴もあり、広汎に用いられている。その中でも無方向性ケイ素鋼板は、モータや発電機のコア用として、電力・産業-機器からOA、家電機器、電装品まで、多用されており、機器の小型軽量、高効率化のため、さらなる高磁束密度・低鉄損化の技術が提案されている。

最近ではエアコンのトップランナー方式の採用、電気自動車の発展により無方向性ケイ素鋼板の低鉄損化は大いに促進し、低鉄損の無方向性ケイ素鋼板が多く使用されつつある。ここでは無方向性ケイ素鋼板の最近の動向と展望について述べる。

2 要求される磁気特性

電気機器などの高性能化(小型軽量化、高効率化)のため、コア素材である無方向性ケイ素鋼板には、高磁束密度(高透磁率)、低鉄損化が要求され、また高い機械強度や熱伝導性が求められる。代表例として電気自動車(EV)の場合を考えてみる。

EV駆動用モータの要求に応じ、コア材料である無方向性ケイ素鋼板はFig.1に示す多様な性能が必要である。

モータの高トルク化には界磁磁束と駆動電流が大きくなるため、損失による発熱の抑制が必要で、高磁束密度、すなわち高透磁率が求められる。さらに損失による発熱の抑制が必要であり、高熱伝導性も求められることがある。

界磁磁束を高くするためには、コア鉄心の寸法精

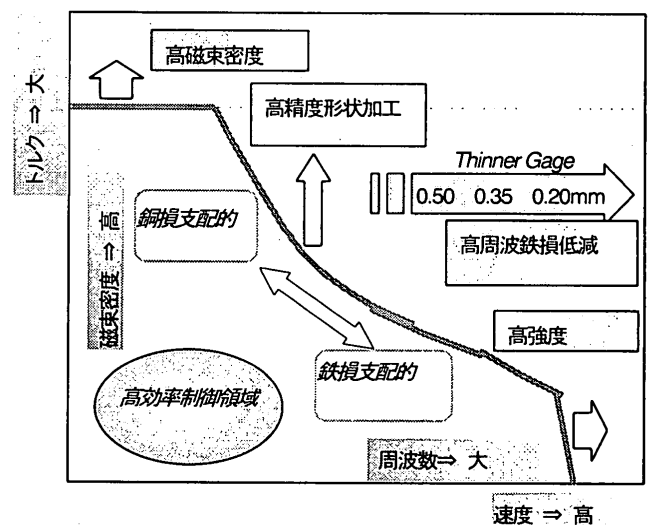


Fig. 1: Demands for silicon steel in EV motor.

度を上げ、空隙を狭くし、モータ磁気回路の磁気抵抗を低くする必要があり、無方向性ケイ素鋼板には板厚精度や高い加工性も求められる。

モータの高効率化には、高性能永久磁石等を使用し高い界磁磁束を発生させて駆動電流を低く抑え、銅損を抑制する。同時にモータ鉄心から発生する鉄損も低減する必要がある。

EVの運転モードによっても鉄心材料への要求は異なる。例えば、起動時モータは高トルクが加わり、鉄心用ケイ素鋼板には高透磁率、板厚精度や鉄心の高寸法精度のための加工性が求められる。高速運転時モータは高周波励磁によって高速回転するので、電機子用ケイ素鋼板には優れた高周波特性、特に高周波鉄損の低減が求められる。さらに回転子における遠心力発生に対して、回転子用ケイ素鋼板には強い機械強度も必要である。通常走行では使用頻度が高い領域のモータ

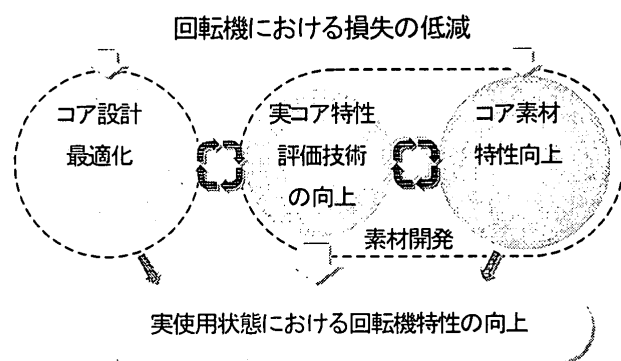


Fig. 2: Development of motor performance.

損失が重要で、低駆動電流（中レベルの磁束密度に対応）における鉄損・励磁電流の抑制がケイ素鋼板に求められる。また、全走行に対してはモータの温度上昇の抑制が求められ、ケイ素鋼板の高熱伝導性による発生熱の抜熱性アップが必要である。

このように、モータ鉄心用ケイ素鋼板には多岐に渡る要求があるが、ケイ素鋼板は日々高性能化し、各用途に応じたものが開発されている [1]。一方、電気機器におけるコア材料の実使用状態を十分に把握して、コア材料の最適選定、コア設計最適化を行うことも重要である。そのためにはコア素材の特性向上、実コア特性評価技術の向上が必要である (Fig.2)。

例えば、実使用状態における回転機コア損失の低減のためにコア素材を低鉄損化し、実使用状態でコア素材の特性を十分に発揮することが重要である。しかしながら、多くの場合、素材鉄損よりコア鉄損は劣化する。劣化を最小にするには、加工歪・応力など劣化要因の発生状況把握とこの劣化要因による素材特性の依存性を調査し、その機構を解明して、機器やコアの設計に対策を盛り込むことである。

回転機に使用される無方向性ケイ素鋼板の場合は、主に変圧器に用いられる一方向性ケイ素鋼板より加工量が多く、素材特性への影響が大きいいため、実コア特性評価技術はより重要度が高い。したがって、素材開発のためには実コア特性を常に意識した材料の作り込みが必要になる。

無方向性ケイ素鋼板は磁化曲線、鉄損、加工性を含めた総合性能のバランスが取られているため、高磁束密度域では高透磁率を示す材料と中低磁束密度域で高透磁率を示す材料がある [2] (Fig.3)。例えば、結晶粒径の粗大化で磁化力が小さくなり、Si 含有量の低減で飽和磁束密度が上がり、集合組織をそろえ磁化容

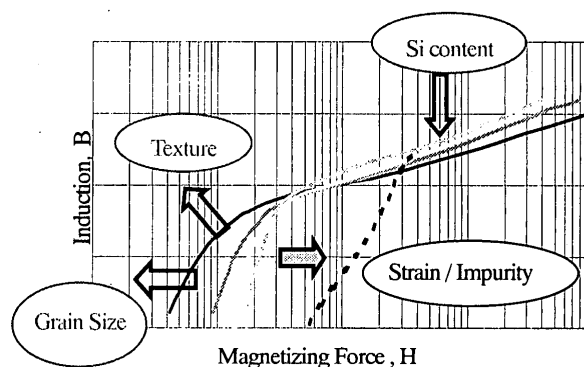


Fig. 3: Magnetizing curve of non-oriented silicon steel.

易軸の面内配向で磁化曲線が立ち上がる。

現状の無方向性ケイ素鋼板製造においては鋼板高純度化技術、結晶方位制御や結晶粒径の制御により磁化曲線を最適化する技術があり、鋼板面に磁化容易軸を多く含ませたり [3] 結晶粒径を調整したケイ素鋼板の製造技術の検討 [4] がなされ、EV における多様な要求に対応している。また、主要な使用方法が限られている場合には一方向性ケイ素鋼板 [5] や二方向性ケイ素鋼板 [6] の活用も可能である。

3 各種用途に適した無方向性ケイ素鋼板

回転機の各種用途に適した特性をもつ無方向性ケイ素鋼板を得る場合、大まかには Fig.4 に示した要素の制御を行う。

集合組織制御は全ての特性を向上させる効果がある。鋼板の固有抵抗を上げることは渦電流損失を低減するが、一方で飽和磁束密度が低下する。板厚の薄手化は高周波域の鉄損低減に効果があるが、ヒステリシス損は増加する。結晶粒径の粗大化は低周波域の鉄損を低減するが、高周波域の鉄損は増加する。鋼中介在物の低減や内部歪の低減はほとんどの特性を向上させる。

以上の知見を基にして、例えば、高効率モータに適した高効率電磁鋼板、高周波域の鉄損低減が要求される高速回転モータに通した薄手電磁鋼板、高速回転の遠心力に耐えうる高速回転ロータに適した高抗張力電磁鋼板などが開発されている。

3.1 高効率電磁鋼板

高効率モータ用には高効率電磁鋼板が開発されている [7][8]。磁化曲線の立ち上がり (B50) が高く、か

f: frequency	μm	B_s	W_{hys}	W_{eddy}	Total Loss	
					Low f	High f
Texture Control	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Increasing Resistivity	↗	↘	→	↘	↘	↘
Reducing Thickness	↗	→	↗	↘	→	↘
Increasing Grain Size	↗	→	↘	↗	↘	→
Reducing Impurity	↗	→	↘	↘	↘	↘
Reducing Internal Strain	↗	→	↘	→	↘	↘

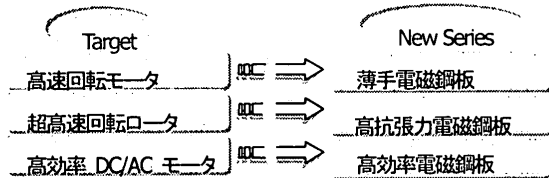


Fig. 4: Each performance satisfying the needs.

つ鉄損が低い特性を有している (Fig.5). これは主に電磁鋼板の高純度化, 析出物の低減無害化, および結晶粒の粗大化, 集合組織の最適化によりヒステリシス損を低減した. 加えて高 Si 化などによる鋼板の高固有抵抗化は渦電流が低減し, 低周波域から高周波域までの広汎な鉄損低減に効果がある. 高周波用トランス・リアクトル用には 6.5 % Si 材の使用例がある [9].

3.2 薄手電磁鋼板

マイクロガスタービン, EV 用モータのように高速回転が必要とされる用途において高周波域の鉄損を低減した, 板厚 0.15, 0.20mm の薄手ケイ素鋼板を開発した (Fig.6). 高周波で使用される場合は, 渦電流損が大きくなり, 渦電流抑制のため, 高 Si 材の板厚の薄手化が求められる. 薄手化は同時に鋼板の表皮効果を抑制し, 高周波での透磁率低減が避けられる. この種の鋼板は CD-ROM ドライブ用モータのような超小型コアで, 加工寸法精度が求められる場合にも使用される. 打ち抜き加工による鋼板のダレは板厚に比例するので, 加工寸法精度向上に薄手化は有利である.

薄手電磁鋼板の 400Hz, 1.0T の鉄損は一般的な板厚 0.50mm (50H), 0.35mm (35H) の無方向性ケイ素鋼板と比較し低い. また小さな磁化力で規定の磁束密度が得られ, 磁化曲線の立ち上がりは良い.

薄手電磁鋼板は一般に高 Si 材で, かつ薄手のため, 打ち抜き加工にノウハウを必要とする. 最近では加工性が優れた薄手電磁鋼板の検討も進んでいる.

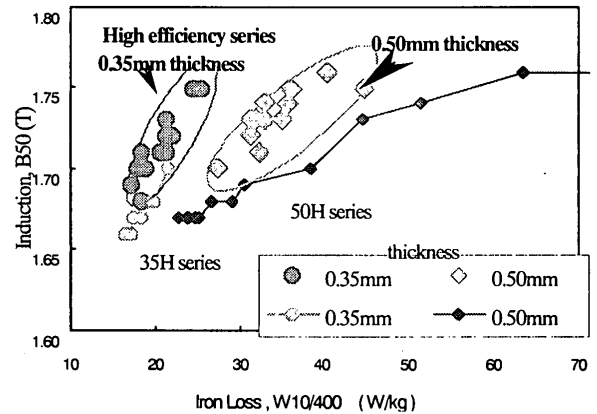


Fig. 5: Iron loss of high efficiency silicon steel.

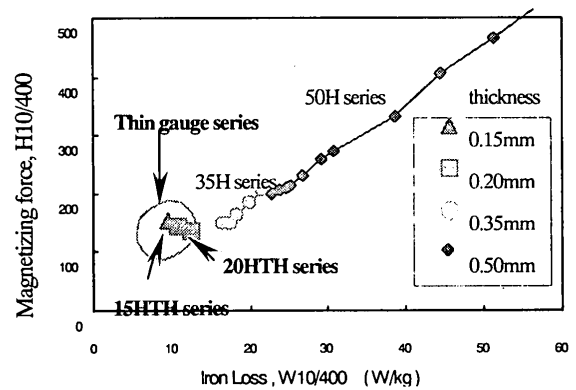


Fig. 6: Iron loss of thin-gauge silicon steel.

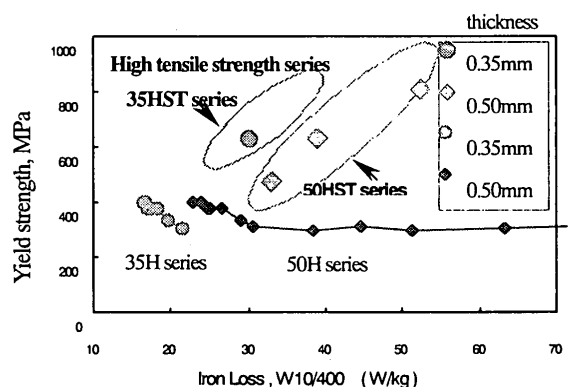


Fig. 7: Iron loss of high tensile stress silicon steel.

3.3 高抗張力電磁鋼板

高速回転モータ、マイクロガスタービンのロータ等、高速化、可変速化に伴い高強度や高疲労強度が必要となる用途において、降伏点の大きい(600MPa以上)電磁鋼板を開発した[10],[11](Fig.7). これらは従来の高強度鋼より鉄損が1/5から1/10程度低く、現行の無方向性ケイ素鋼板と同じレベルなので、ロータなどの低鉄損化に有利である。

鋼板の機械強度は、Siなどによる固溶体硬化、 $\langle 111 \rangle$ 、粒界、析出物の活用、加工硬化で高くできるが、固溶体硬化以外は磁気特性が劣化するため、磁気特性と機械強度のバランスが重要である。これを最適化したものが高抗張力電磁鋼板である。

回転機では、コアの疲労が問題となるが、疲労は機械強度と相関があり、この高抗張力鋼板が適している。

4 鉄損劣化要因

コア鉄心素材は低鉄損化と高透磁率化が必要とされるが、実際の機器鉄心の性能には素材性能以外に、機器の設計・制御が大きく依存する(Fig.8). したがって、鉄心素材が通常評価されている条件(均一で特定方向の交番磁界、正弦波励磁、無応力、室温)から離れ[12]、図中の(1)から(8)の要因の影響を受けて、回転機鉄心性能の変動や数値解析の推定差が発生していると考えられる。

モータは一般にインバータ駆動され、PWM駆動励磁が多く、(5)のキャリアなどの時間高調波の影響が大きい。また、コアのスロットにより生じる空隙磁束の空間高調波はロータ表面の損失を発生させる。

(3)の応力/歪等、回転機コアの加工歪は変圧器に比べ加工幅が狭いため、素材特性の劣化が大きい。これらの要因のいくつかは回転機の製造上、コストや生産性のために、評価・管理することが難しい。しかしながら、回転機の高効率・低損失化が法的に推進されている現状において、これらの評価・管理の回避は難しく、規制値クリアのため今後様々な手段が講じられると考えられる。

5 加工歪による影響

加工によって磁気特性は劣化する。冷延で導入した塑性歪が磁気特性に与える影響をFig.9に示す。冷

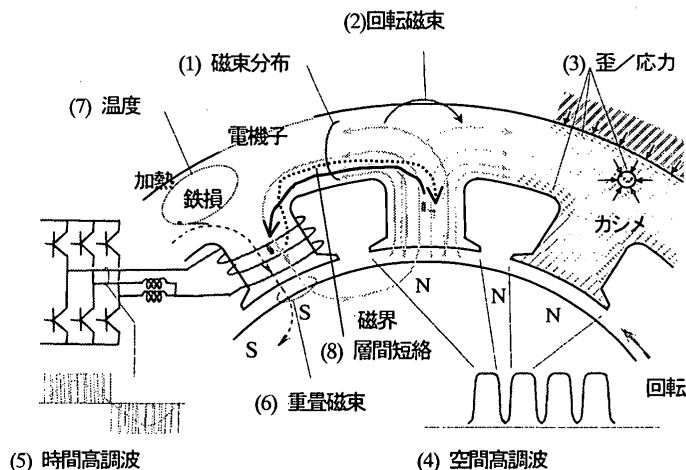


Fig. 8: Loss-increasing factors in motors.

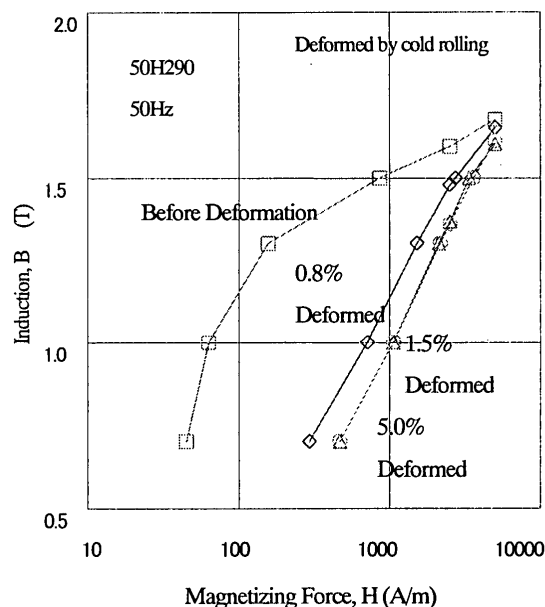


Fig. 9: Plastic stress and magnetization curve.

延率を0.8% (板厚0.8%減)にした塑性歪でも磁化曲線が立ち上がり難くなっている[13].

Fig.10には塑性歪と鉄損の関係を示す。塑性歪の導入が大きいほど鉄損は増加する。その増加量は鉄損が大きい低グレードの無方向性ケイ素鋼板で大きい傾向を示す[13].

Fig.11は鉄損と剪断後の鉄損増加量の関係を示したもので、鋼板を2枚あるいは4枚に剪断した前後の鉄損増加量をまとめたものである[14]. 剪断枚数が多いと剪断歪が多く導入されているので鉄損が大きく増加する。

材料特性によっても鉄損増加量は変化する。Si量を増加すると剪断による鉄損増加量が小さい。Si量

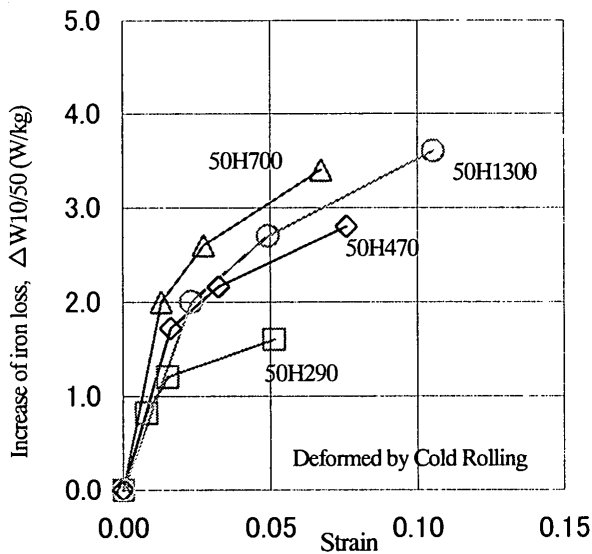


Fig. 10: Plastic stress and iron loss increase.

が約 4%である $W_0=2$ 付近では Si 量 1%と比較して鉄損増加量は半分に低減している。

この鉄損増加量の低減は磁歪定数が Si 量増加により低減するため、歪による磁気特性への影響が少なくなった理由によるものと考えられる。

一方、結晶粒径が小さくなるにしたがい鉄損増加量は減少する。これは結晶粒界が多いと歪が入り難くなり、かつ塑性変形し難くなるためと考えられる。しかしながら、結晶粒径を小さくすると鉄損が増加するので、剪断後、焼鈍による結晶粒径の粗大化が必要である。

Fig.12 は弾性歪として励磁方向に圧縮力や張力を印加して鉄損を測定した結果である。張力印加ではやや鉄損は低下し、圧縮力では大きく増加している。磁束密度が低い場合、圧縮力による鉄損の絶対値の増加は少ないものの、増加割合は 0.7T において約 90%に達する [15]。

Fig.13 は焼きばめによってコアをステンレスケースに固定した場合の磁化特性への影響を示す。周囲のステンレスケースから圧縮力がコアに加わるため磁化特性は劣化する。また、ケースの肉厚によってコアに加わる応力が増えるため、その劣化量も異なる。したがって、コアに加わる圧縮力が小さいケース形状を検討することが特性向上に有効である。

6 コア特性改善への展望

材料特性、設計パラメータは磁気特性劣化要因によって実駆動状態の特性に 100%反映し難い。劣化要

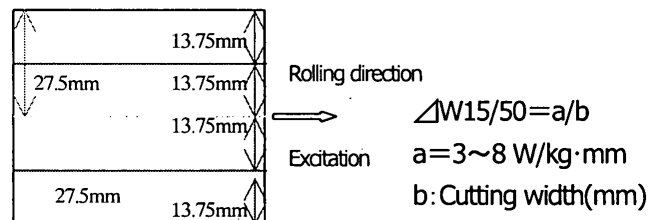
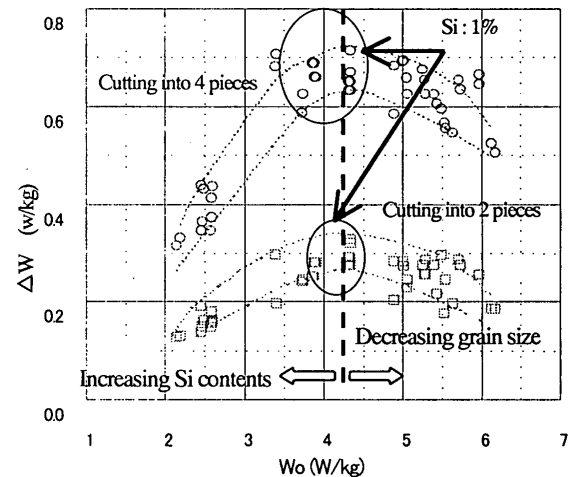


Fig. 11: Sharing stress and iron loss.

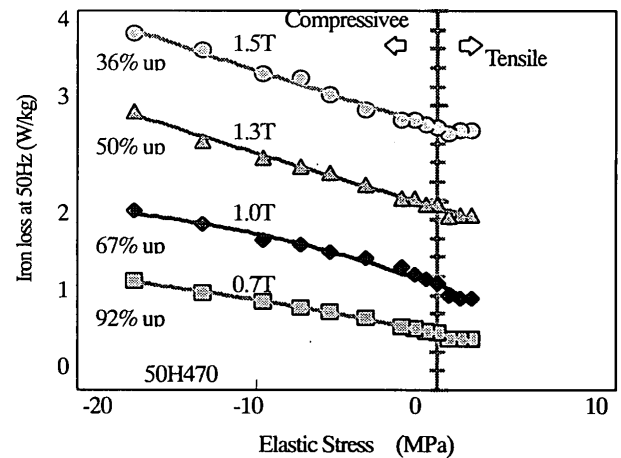


Fig. 12: Elastic stress and iron loss.

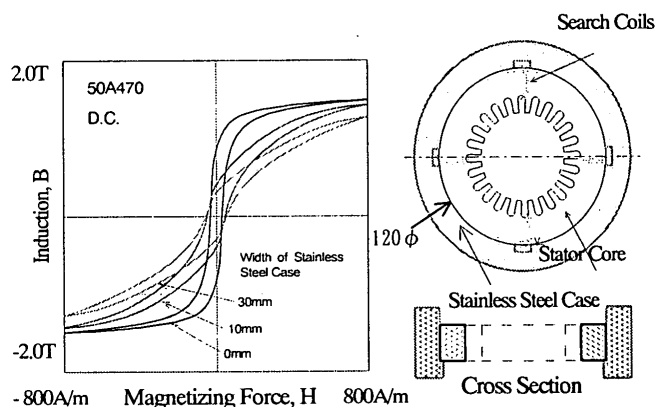


Fig. 13: Shrinkage fit stress and magnetization curve.

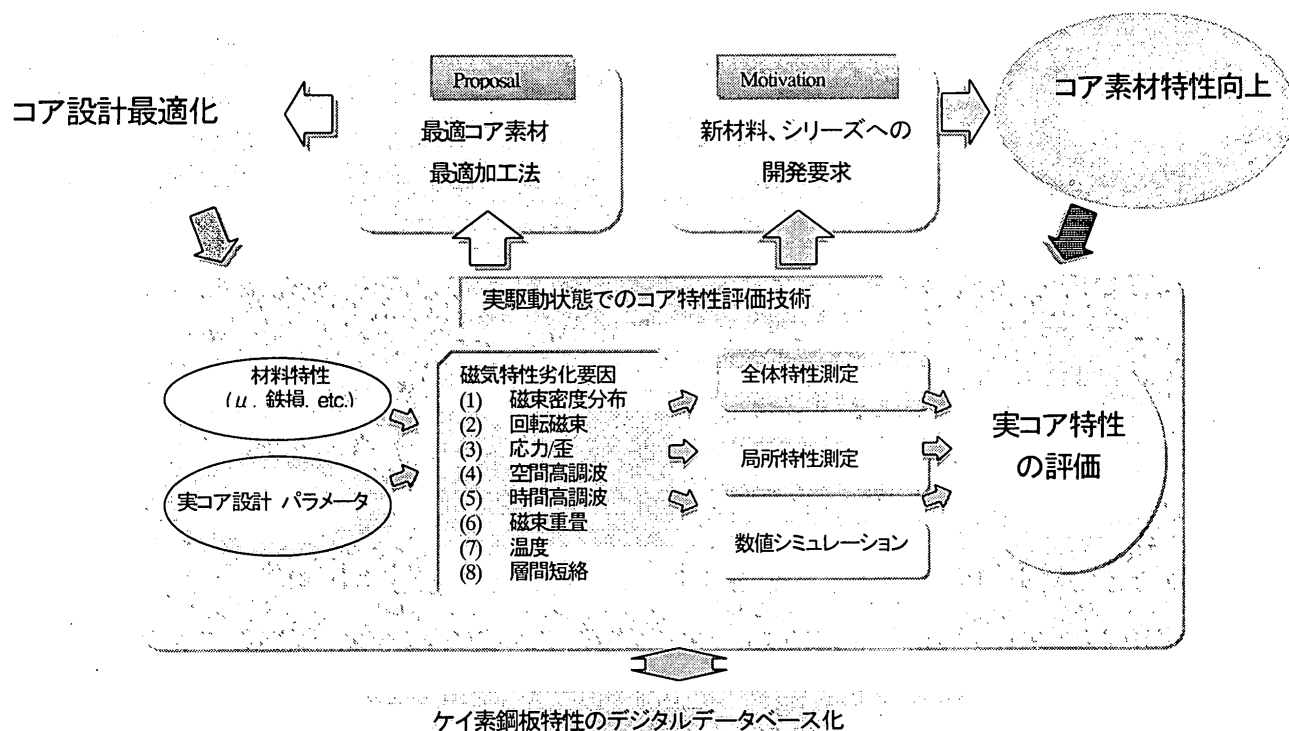


Fig. 14: Feedback cycle of development on core characteristics.

因をコアの鉄損測定により評価する全体特性測定，磁区観察等により評価する局所特性測定，磁場解析により評価する数値シミュレーション等を用いて実コア特性を調査し，劣化要因を把握する必要がある（Fig.14）。

これら一連のコア特性評価技術により最適な素材を選択し，最適な加工法を提案することでコア設計の最適化を図ることが可能になる。一方，コア特性評価から得られたシーズを材料開発に生かし，コア素材の特性向上が図られる。さらに改善した素材からコアを作って再評価し，得られた知見をフィードバックすることで，より一層のコア特性の向上が図られる。

現在，これらのケイ素鋼板の磁気特性は，デジタルデータベース化され，コア設計や数値シミュレーションへの利便性に供している。

十数年前と比較し，無方向性ケイ素鋼板周辺技術は大きく進歩している。今後は実駆動状態でのコアに必要な磁気特性の実現と，この特性を劣化させることのない迅速なコアへの適用が無方向性ケイ素鋼板の開発・利用技術者に課せられた大きな課題である。

参考文献

- [1] 荒井，石山，第 155・156 回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会 (1995)1.

- [2] 開道，'96 モータ技術シンポジウム A-2，日本能率協会 (1996).
- [3] T.Kubota and T.Nagai, *J. Mater. Eng. and Performance*, Vol.1, 2, (1992), p.219.
- [4] わかる電磁鋼板，新日鐵，(1985).
- [5] 新日鉄カタログ，新日鐵の電磁鋼板，Cat.No.SC501.
- [6] 岡崎，電学論，A, 112 巻，6 号，(1992)，p.513.
- [7] M.Yabumoto, T.Wakisaka, and C.Kaido, *20th Annual Conf. on Properties and Applications of Mag. Mater.*, (2001).
- [8] 小松原，小畑，山田，川鉄技報，32, 3, (2001), p.210.
- [9] 藤田，高田，熱処理，39 巻，4, (1999)，p.200.
- [10] 久保田，坂井田，立野，研資，MAG-95-174, (1995)，p.9.
- [11] I.Tachino, T.Kubota, A.Sakaida, T.Ueno, S.Nishida, *Anales de Fisica, serie B*, 86, (1990)，p.250.
- [12] 開道，モータ技術ハンドブック，日刊工業新聞社，(2001)，p.442.
- [13] 開道，脇坂，回転機研資，RM-99-27, (1999)，p.65.
- [14] 脇坂，開道，回転機研資，RM-98-26, (1998)，p.41.
- [15] 開道，脇坂，回転機研資，RM-99-27, (1999)，p.65.