

## — 低熱膨張材料LEXについて —

### 1. LEXとは

「LEX (レックス)」は日本鑄造が開発し、製造・販売している超高精度機器向けの素形材\*です。最大の特徴は、温度変化に伴う寸法変化(熱変形)が非常に小さいことで、室温付近では全く変形しない「ゼロ膨張」のLEX-ZERO から、鉄の半分程度のLEX 55 までシリーズ化しています。

\*素形材:「素材に熱や力に加えられ、形が与えられた部品や部材」のことをいい、素材を素形材に変えるためには、鑄造、鍛造、プレス、粉末冶金などいろいろな材料加工法が使われます。

### 2. 材料の熱膨張: 金属は伸び縮みする

我々が目にする機械や自動車は色々な材料で作られています。温度変化があると材料自体の寸法が伸び縮みします。これを熱膨張といい、材料共通の性質です。身近に経験する例としては、ジャムなどのビンのふたが固くて回らないときに、ふたを熱すると簡単に取れるようになることが挙げられます。これはガラスでできたビンよりも金属のふたがより多く膨張して隙間ができるためです。また、電車の「ガタンゴトン……」という音は、レールとレールのつなぎ目を走るときに起こりますが、このつなぎ目がないと、夏に温度が上がった時にレールが伸び、お互いに押し合っ曲がったりずれたりしてしまいます(写真1)。

ところで、青函トンネルではつなぎ目のない世界一長い52.6kmのロングレール使われています。

なぜならトンネル内は年間を通じて温度の変化がほとんどなく、伸び縮みを心配する必要がないからです。それではレールの長さはどのくらい変化するものか計算してみましょう。計算するためには材料(ここでは鉄)の熱膨張係数(線膨張率ともいう。)を知る必要があります(図1参照)。

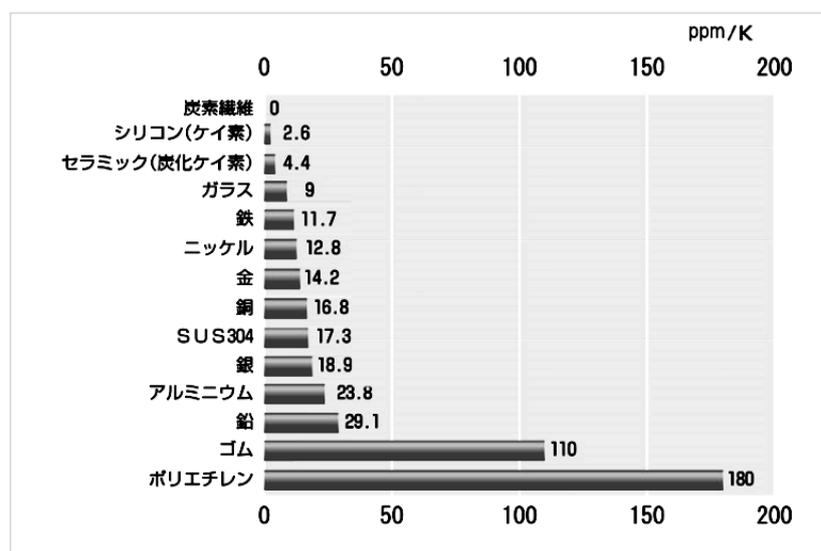


図1. 各種材料の熱膨張係数の比較

熱膨張係数(以降、 $\alpha$ )は、温度が1°C変化したとき、材料の長さが変化する割合を表わす係数で、鉄では、1K(1°C)当たり12ppm(12/1000000)変化するので、その $\alpha$ は12ppm/Kまたは $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (ppm= $10^{-6}$ )となります。

レールの長さを25m(=2500cm)、温度変化を50K(=50°C)とすれば、 $2500\text{cm} \times 12\text{ppm/K} \times 50\text{K} = 1.5\text{cm}$ 、という答えが得られます。



写真1. 炎暑で曲がったレール

### 3. なぜ熱膨張が起こる

物質を構成する原子（レールの場合、鉄の原子）は振動（格子振動）しながら並んでいます。温度の上昇とともに原子の振動が激しくなりますが、原子同士がぶつからないように原子間距離が広がります。そのため物質が膨らんだのと同じことになるのです。つまり物質を熱すると、膨張するのです。

### 4. 熱膨張制御のニーズ

近年の産業技術の高度な発達に伴って、熱膨張という材料の本質的な性質が、高精度化の障害になってきました。長さ 10cm の鉄の棒の温度が 1°C 上がると 1.2 μm（マイクロ・メートルまたはミクロン）伸びます。一般的な感覚からすればわずかな変化ですが、nm（ナノ・メートル、1/1000 μm）単位の高精度が求められる半導体デバイス製造や、部品のわずかな変形が精度に大きな影響を及ぼす精密機器では致命的となります。このため、工作機械、半導体製造装置、光学機器、計測機器、電子デバイスなどの先端産業分野においては、熱膨張制御への強い要請があります。

### 5. 低熱膨張合金インバーの発見

今から約 120 年前にスイスのギョームという物理学者が極低温から室温まで温度が変化しても、ほとんど熱膨張しない Fe-36%Ni 合金、インバー（Invar）を発見しました（図3）。この合金の室温付近の  $\alpha$  は 2 ppm/K 以下で、合金を構成する鉄とニッケルの  $\alpha$ （いずれも 12~13ppm/K）からは到底予想できない値です。「Invar」という名称は Invariable Steel（変形しない鋼）から名づけられ、日本では不変鋼と翻訳されています。温度変化によって寸法がほとんど変わらないので、時計や各種精密機器、バイメタル材料、LNG タンク・配管等に用いられます。

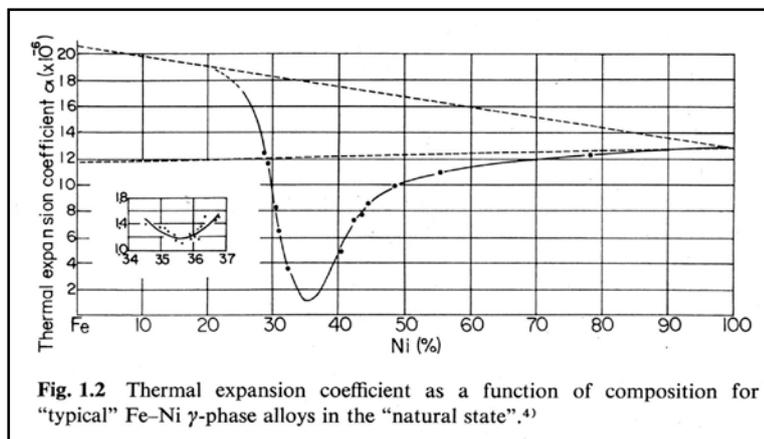


図3. 鉄 (Fe) -ニッケル (Ni) 合金の熱膨張係数（縦軸  $\alpha$ 、横軸 Ni 含有率）

出典：PHISICS & APPLICATINS OF PROPERTIES OF INVARI ALLOYS, P4（丸善）

インバーの発見から約 30 年後、東北帝国大学の増本 量 (ますもと はかる) は $\alpha$ がインバーより小さな鉄-ニッケル-コバルト合金 (Fe-32%Ni-5%Co) を発見し、これをスーパーインバー (超不変鋼) と名づけて、世界的に特許を得ました。増本は低熱膨張性が磁氣的性質に関係していることに言及しました。インバーの $\alpha$ は炭素鋼の 1/10 程度ですが、増本が発見したスーパーインバーは、インバーのさらに 1/10、炭素鋼の 1/100 の $\alpha$ を実現しました。そのため、精密機器の高精度化を一層推し進めることに貢献し、現在でも工業的に用いられています。

では、インバーやスーパーインバーはなぜ熱膨張しないのでしょうか？その仮説が提唱されたのは、インバーの発見から 60 年も経ってからのことでした。それによると「原子間距離の膨張と原子半径の収縮が同時に起きて、効果が相殺されるため熱膨張が起こらない。」というものでした。さらに最近になって、「ニッケル原子は温度上昇とともに熱膨張しているが、鉄原子は原子間距離に変化が無く、熱膨張していないため、全体としては熱膨張がない。」ことが観測されました。

## 6. LEXの開発

インバーやスーパーインバーは、その圧延材や鍛造材 (以下、鋼材) が古くから商品化されていますが、素材形状は単純な板や棒であるため、複雑形状品や大型品の製作において、除去加工や溶接加工に要するコスト (資材、時間、エネルギー) が大きく、環境負荷も大きいという問題がありました。一方、これらの合金を鋳鉄化した鋳造合金材料は、最終形状に近い素材が製造でき、サイズの制約も少ないという特徴がありますが、肝心の $\alpha$ が鋼材より相当大きいため、鋼材を代替するには至っていませんでした。

このような背景から、弊社では鋳造品の $\alpha$ を小さくできれば理想的な低熱膨張材料となり、適用範囲が拡大すると考え、約 30 年前に低熱膨張鋳造合金の研究開発に着手しました。

独自の合金設計と高度な製造技術によって低熱膨張性と鋳造性、機械加工性を兼ね備えた多くの鋳造合金を開発・商品化し、LEXシリーズとして製造・販売を行っています。

以下、開発材料の概要について説明します。

### (1) 高炭素系 LEX

ニレジスト・タイプ 5 および Type D-5 に代表される低熱膨張鋳鉄は、インバーに鋳鉄組成に近い炭素、シリコンを添加した材料で、組織中には黒鉛が存在しています。インバーの欠点であった被削性や鋳造性は大幅に改善していますが、 $\alpha$ は 5ppm/K とオリジナルのインバーに比べてかなり大きくなっています。そこで、まず化学成分を見直し、合金元素を適正化し、さらに熱処理の導入によって $\alpha$ を 1.5~2.5ppm/K に低減し、既存鋳鉄系材料の 1/2 以下としました。

高炭素系 LEX の組織中には適量の黒鉛が存在するため、図 4 に示すようにインバー鋼材より優れた被削性を有しています。

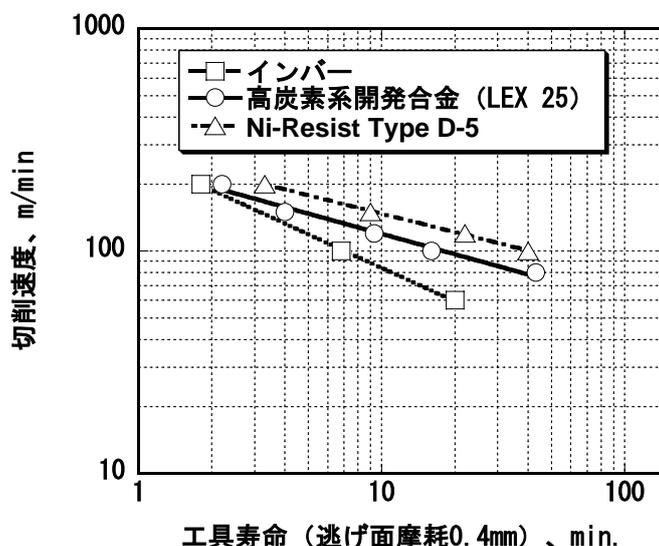


図 4. 高炭素系開発合金の工具寿命

さらに、これまで最も低熱膨張となる合金組成は高炭素系材料においても、スーパーインバーと共通であると考えていましたが、炭素が固溶している場合、炭素量によって最小の $\alpha$ を示す組成がスーパーインバーとは異なることを発見し(図5)、これを応用して $\alpha$ の大幅な低減が実現し、高炭素系鋳造合金において初めてスーパーインバーレベルの1ppm/K以下の $\alpha$ を得ることができました。この開発によって既存合金の欠点がほぼ解消できました(表1)。

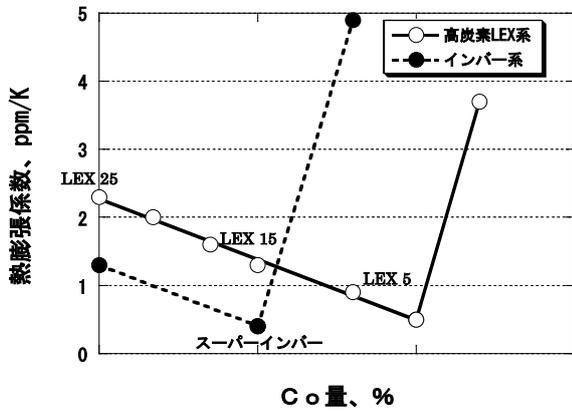


図5. 高炭素系開発合金のC o 量と $\alpha$ の関係

高炭素系 LEX では、炭素量および熱処理の調整で、表2および図6に示すように幅広い $\alpha$ の材料が提供でき、用途に合わせて最適な LEX を選択できます。また、LEX 40K は高温で低熱膨張性が必要な時に適した高温用低熱膨張合金です。

表2. 高炭素系 LEX の $\alpha$  (20~25°C 平均値)

材料	LEX 5	LEX 15	LEX 25	LEX 35	LEX 45	LEX 55
$\alpha$ 、ppm/K	$\leq 1.0$	1.0~2.5	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	5.0~6.0

表1. 高炭素系開発合金と従来材の $\alpha$

材 料		室温付近の $\alpha$ ppm/K
開 発 合 金	LEX 5	$\leq 1.0$
	LEX 15	1.0~2.0
	LEX 25	2.0~3.0
従 来 材	スーパーインバー	$\leq 1.0$
	インバー	1.0~2.0
	インバー鋳鉄	4.5~5.5

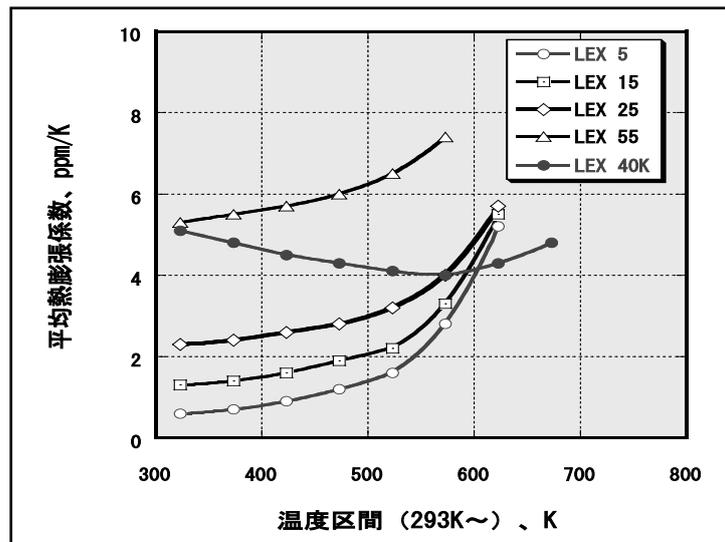


図6. 主要高炭素系 LEX の熱膨張曲線例

## (2) 低炭素系 LEX

高炭素系鋳造合金に含まれる黒鉛は被削性改善には有効ですが、いくつかの点で問題となることがあります。たとえば、部材表面の黒鉛が各種表面処理性を低下させたり、黒鉛粉が周囲を汚染したりすることなどです。加えて、高炭素系合金には相当量の固溶炭素が存在し、これ以上の低熱膨張化は難しいと予想しました。そこで低炭素系合金の短所である被削性を改善した、実用性の高い鋳造合金の開発を行いました。その結果、工具損耗がスーパーインバーより少ない低炭素低熱膨張鋳造品の製造が可能になりました (図7)。

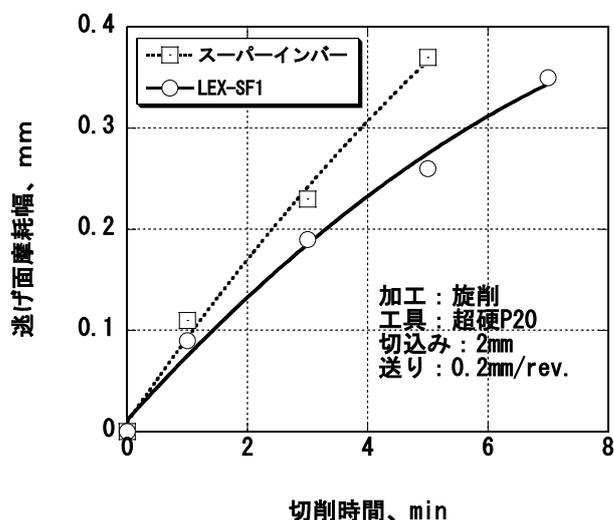


図7. 低炭素系開発合金の工具損耗

## (3) 「LEX-ZERO (「ゼロ膨張」合金)」の開発

低炭素系 LEX においては当然スーパーインバー組成が最も低熱膨張になると考えられますが、鋳造合金には鋼材と異なり、主要元素以外の炭素、シリコンを始めとする合金成分を添加する必要があります。これらの元素は鋳造性を維持する上では必須元素ですが、いずれも低熱膨張性に対しては有害元素となります。そこで、高炭素系 LEX の場合と同様、主要元素以外の元素を含む場合の最適な組成はスーパーインバーとは異なると推定し、その実証試験を行いました。その結果、従来材より低熱膨張となる新たな組成を見出しました。併せて $\alpha$ と熱処理条件の関係を詳細に調べ、最も低熱膨張となる条件を見つけました。これらの知見を組み合わせることによって極めて $\alpha$ の小さい新合金、「LEX-ZERO」を開発できました (図8)。

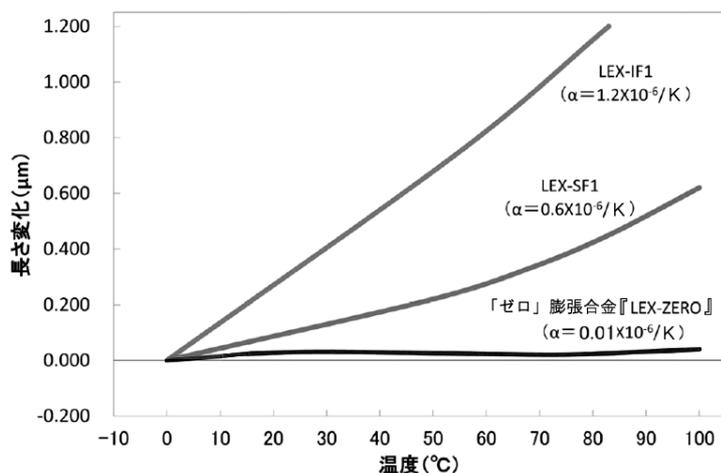


図8. 「LEX-ZERO」の熱膨張曲線例

#### (4) 「LEX-ZERO」の商品化

##### ①工業的な「ゼロ膨張」の再現

「LEX-ZERO」の商品化にとって最も重要なポイントは、合金を構成する元素すべてに高精度な成分管理を行う必要があることで、たとえばSUS304ステンレス（JIS G4303）のニッケルの規格範囲は8.0%～10.5%であり、ニッケルがこの範囲に入っていれば一応、機械的性質、物理的性質は満足します。一方、「ゼロ膨張」合金では非常に狭い範囲で管理しなければ所期の特性が得られません。弊社においては、独自に開発した取鍋精錬・真空脱ガス炉（図9）を用いた還元精錬によって、安定した状態で成分の微調整を行うことが可能です。これによりすべての元素の組成を常に狭い管理幅の中に収めることが工業的に実現でき、「ゼロ膨張」を確実に再現することができます。また、真空脱ガス処理によって高ニッケル合金に発生しやすい水素欠陥を防止し、健全な鋳造品を製造できます。以上に加え、最適な熱処理を組み合わせることによって、これまで不可能と考えられていた工業的な「ゼロ膨張」合金の製造に成功しました。

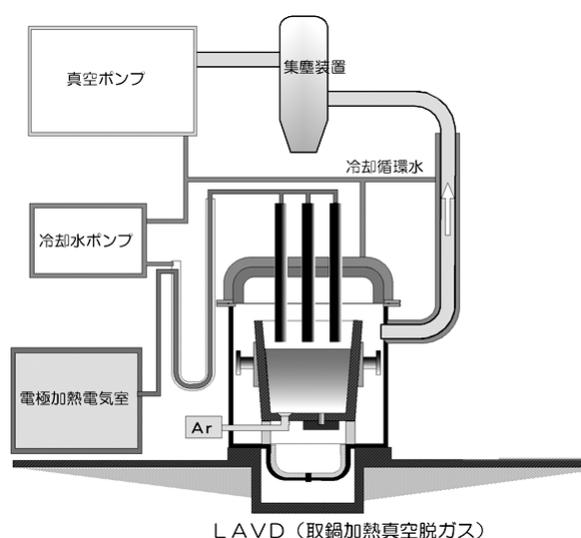
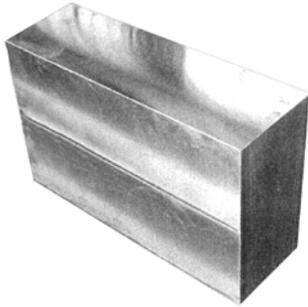
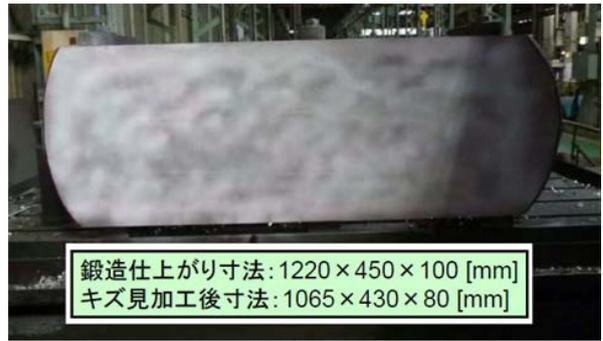
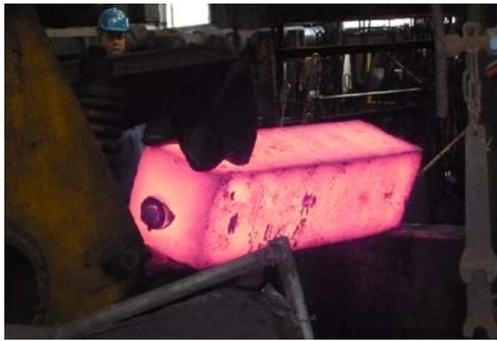


図9．取鍋精錬・真空脱ガス設備

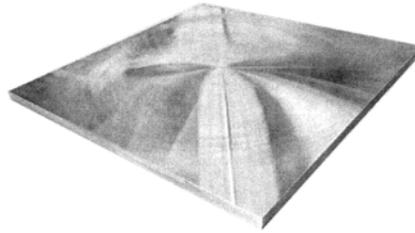
##### ②鍛造品、圧延材

LEXは本来、鋳造品の特長を活かし、塑性加工品（鍛造品や圧延材）の欠点を補うことを目標に開発した材料ですが、鋳造品の苦手とする板材、棒材、線材の「ゼロ膨張」商品を提供できれば、既存のスーパーインバーを置換えることができると考えました。また、鋳造品は大気圧下で凝固するため、微小空孔を皆無にすることは困難です。ほとんどの用途では問題にはなりません。より高度の要求に応えられないことがあります。たとえば、空孔が存在する部材を高真空下で用いると、内在しているガス成分が拡散して真空度を低下させる心配があります。また、空孔密度が高いとヤング率が低下し、弾性変形が大きくなって精度低下につながる恐れもあります。

弊社では、鋳造合金をベースに塑性加工性を改善し、鍛造品および圧延による板材、棒材、線材の製造技術を確立し、多様なご要求にお応えできます（図10）。



ブロック



プレート



箔 : 最小厚 0.1mm  
ワイヤー : 最小径φ 1.0mm

図 1 0. 鍛造状況(上)と塑性加工製品例

## 7. 開発技術の実用化例

### (1) 半導体露光装置

先端分野での高精度化が一段と高まり、実装される半導体部品の高密度化が進んでいます。たとえばメモリー回路の線幅は 5 年前には 50nm であったものが、現在は約 1/2 の 28nm に減少しています (表 3)。このような高精度化を実現するには露光装置の高精度化を行う必要があります。装置内の温度分布による投影レンズ周りの各種構成要素 (図 1 1) の位置関係の狂いをいかに小さくできるかが高精度化の鍵となります。開発合金による鋳造品は、低熱膨張でかつ薄肉複雑形状の部品を少ない除去加工で提供可能できることから、露光装置の主要ユニットの支持構造部材として適用され、精度向上に貢献しています。

表 3. 半導体ロードマップ

Table LITH3a Lithography Technology Requirements—Near-term Years

Year of Production	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DRAM ½ pitch (nm)	65	57	50	45	40	36	32	28	25
Flash ½ pitch (nm) (nm-contacted poly)	54	45	40	36	32	28	25	23	20
Overlay [Å] (3 sigma) (nm)	13	11.3	10.0	9.0	8.0	7.1	6.4	5.7	5.1
Wafer site flatness at exposure step (nm) [C]	63	54	50	45	40	32	29	22	17
Wafer size (diameter, mm)	300	300	300	300	300	450	450	450	450

出典：国際半導体技術ロードマップ 2013年12月6日 ITRS/JEITA/STRJ

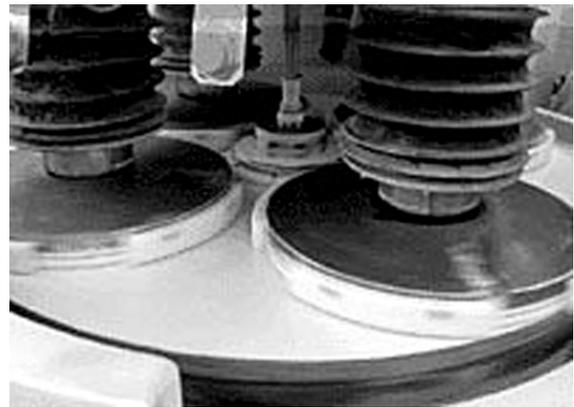
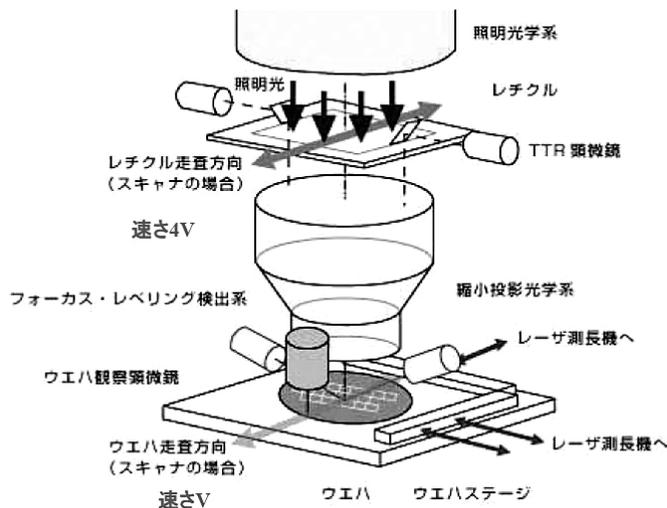


図 1 1. 半導体露光装置の概略図

写真 2. シリコンウェーハ研磨装置

出典：稲 秀樹：学位審査論文

「リソグラフィ用半導体露光装置におけるウェハアライメント計測の高精度化の研究」、  
2007年9月、P8

## (2) シリコンウェーハ研磨装置

前記半導体露光装置と同様、ウェーハの平坦度要求も年々高まっており、5年前には 50nm であったものが、現在は 1/2 以下の 22nm に減少しています(表 3)。また、平坦度ほどで頻繁ではありませんがウェーハの大径化も進んでいるため、研磨装置(写真 2)には厳しい高精度化が求められています。ウェーハは回転する水冷ジャケット構造の定盤と同じく回転する加圧ヘッドの間に挟まれた状態で研磨されますが、摩擦熱によって定盤が熱変形するとそれによってウェーハの平坦度が劣化してしまいます。開発合金による低熱膨張でかつ複雑なジャケット構造の定盤が研磨装置に適用され、ウェーハの平坦度向上に効果を発揮しています。

## (3) 計測機器

計測センサーの位置座標を一定に保持する目的で、開発合金による鋳造品が用いられます。たとえば製鉄所の熱延工場の非接触板厚測定器は熱間で圧延中の板厚を  $\mu\text{m}$  単位で計測するもので、数 m 長さのフレーム(写真 3)先端部にレーザ式測長センサーが取り付けられています。フレームは内部水冷のため、中空の薄肉構造であり、鋳造品のニアネットシェイプ性を活用したものです。その他 3次元レーザ計測器の支柱や特殊な顕微鏡のステージ等にも適用されています。また、宇宙環境をシミュレートし、搭載機器の各種計測を行う地上施設の治具にも採用されています。

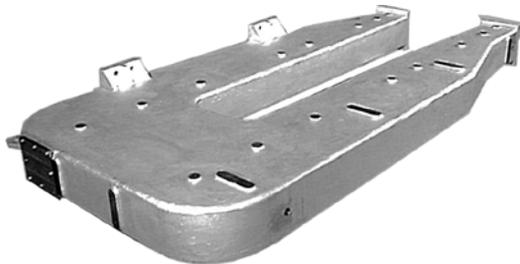


写真 3. レーザ計測器フレーム

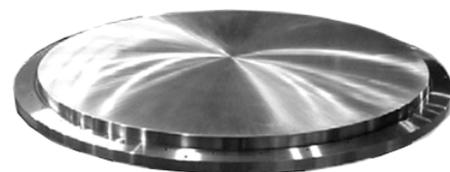


写真 4. CFRP成形用金型

## (4) その他

通信用パラボラアンテナやレーダ、半導体関連部品には CFRP 製品が使用されますが、本開発合金はその成形用金型(写真 4)に適用されます。具体例としては、人工衛星に取り付けられるアンテナ等があります。合金自体は比重が大きいため、直接飛行体に搭載されませんが、間接的には宇宙を飛行することになります。

## 8. 将来への発展性および産業への寄与

### (1) 設計思想の変革の可能性

材料は温度変化によって寸法が変化するものだというのがこれまでの常識でした。低熱膨張材料を採用した装置においてもその変化量が小さくなるだけであり、半導体露光装置では±0.1℃以下の温度制御が必要不可欠です。しかし、「ゼロ膨張」材料は、一定温度範囲であれば熱変形が全くありません。理論的には「ゼロ膨張」材料のみで構成される装置において温度制御が不要になります。

実際には、そのような装置・機器を実現するのは困難ですが、現在より大幅にラフな温度管理で済む可能性があります。

### (2) 環境や産業への寄与

3次元形状製品を製作する場合、開発合金による鋳造品はニアネットシェイプ性と被削性に優れており、鋼材の削り出しや溶接組立てに比べ、除去加工や溶接加工に要する時間が大幅に短縮できます。当然、機械加工除去量も少なく済みます。すなわち開発合金材料は加工に要する時間、エネルギー、工具が少なくなり、環境配慮型の素形材であるといえます。本開発合金材料を適用することによって、装置類の性能向上に加え、温度管理の簡略化、工期短縮、省エネルギー・省資材によるコスト削減といった付加的なメリットが得られ、我が国の先端装置産業の国際競争力に寄与するものと考えられます。

## 9. まとめ

弊社で開発し、製造・販売しているLEXのうち高炭素系材料は、鋳造性と被削性に優れ、低炭素系材料は低熱膨張性や合金設計の自由度が高いという特徴があります。

特にゼロ膨張の「LEX-ZERO」は従来の常識からは想定できない可能性を秘めており、今後さらに高まると予想される高精度化にも十分対応可能な素形材です。