

© 1991 ISIJ

技術報告

統計的手法による産業用ガスタービンの
燃焼器用 Ni 基耐熱合金の開発辻 一郎*・岡田 郁生*²Development of a New Ni-base Superalloy for Industrial Gas Turbine
Combustor by Statistical Alloy Design Method

Ichiro TSUJI and Kunio OKADA

Synopsis :

A new Ni-base superalloy has been developed for gas turbine combustor. In the first stage, multiple regression analysis was conducted on the published material data of superalloys. The estimation equations were established to estimate the mechanical properties such as stress rupture strength and tensile properties, and physical properties such as density and thermal conductivity. Alloy design program by statistical method was made to select the alloy chemical compositions which will satisfy the requirements of structural design. By means of this alloy design method, 22%Cr-8%Co-9%Mo-3%W-1%Al-0.3%Ti-Ni base alloy (% : mass%) was set up for combustor superalloy. The superalloy plates using these alloy elements were manufactured by vacuum induction and remelting process weighing 2 000 kg.

The mechanical and physical properties were examined on those plates, and it is confirmed that these estimated values by alloy design coincide with the testing measured values. As above test results, it is considered that the statistical alloy design is useful for developing new superalloys. The new Ni-base superalloy also has good workability, good mechanical and physical properties for industrial gas turbine combustor.

Key words : Ni-base superalloy ; alloy design ; physical properties ; mechanical properties ; gas turbine ; combustor ; stress rupture strength ; workability ; regression analysis.

1. ま え が き

ガスタービン熱効率是一般にタービン入口ガス温度が上昇するほど向上し、近年その温度は 1 623 K (1 350°C) まで高くなって来ている¹⁾。このようなガスタービンのタービン動翼、静翼及び燃焼器などに用いられる耐熱合金は厳しい条件で使用され、高度な材質が要求される。特に蒸気タービンとガスタービンを組み合わせて高い熱効率を得る複合発電プラントは電源の経済性、供給安定性、運転性能の面から注目され、更に地球環境の観点から低 NO_x とする必要があり、このため燃焼器の構造設計はより高度化されて来ており²⁾、それに使用される耐熱合金にも厳しい要求がなされている。

これらの要求に応えるため、Photo. 1 に示すような高度な構造設計の低 NO_x 型の燃焼器³⁾ に適用される Ni 基耐熱合金を開発することにした。

耐熱合金の合金設計は種々行われている^{4)~7)}。しかし、それらの方法は主としてクリープ破断強さをいかに高くできるかの合金設計であり、クリープ破断強さや引張性質などの機械的性質並びに比重、熱膨張係数や熱伝導率などの物理的性質を定量的に予測することは行われていない。

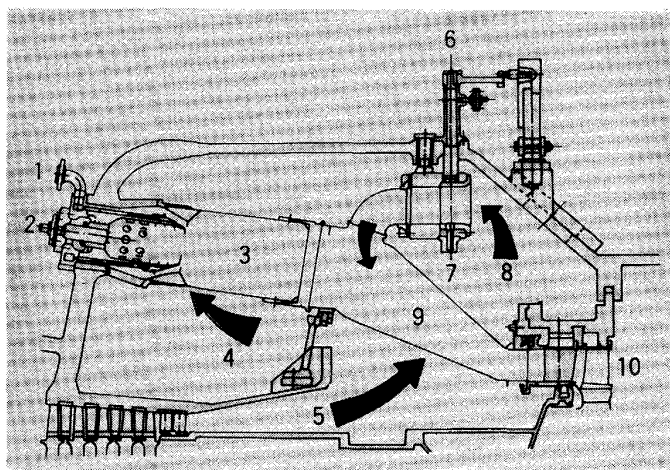
ガスタービンの構造設計では例えば Fig. 1 に示すように非定常熱応力などの応力計算には物理的性質は極めて重要で、合金開発の当初よりあらかじめ定量的に求めておくことは大切である。また、ガスタービンの高温部品用耐熱合金には単にクリープ破断強さのみならず、物理的性質、延性(伸び)、加工性、溶接性、耐高温腐食性、コストなど総合的にバランスがとれている必要がある。

今回、耐熱合金の合金設計を実施するに際し、一般公表文献データ⁸⁾⁹⁾の重回帰分析を行い、前記の材料特性を化学組成より定量的に計算する予測式を求めた。

昭和 59 年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 8 月 22 日受付 (Received Aug. 22, 1990)

* 三菱重工業(株)高砂研究所(現:三菱重工業(株)高砂製作所)(Takasago Research Development Center, Now Takasago Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2-1-1 Shinham Arai-cho Takasago 676)

*2 三菱重工業(株)高砂研究所(Takasago Research Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)



1. Main fuel 2. Pyrot fuel 3. Premix combustor 4. Air for combustion 5. Compressor discharge 6. Control linkage 7. By pass valve 8. By pass air 9. Transition piece 10. Turbine

Photo. 1. Hybrid type combustor system.

Thermal Stress

$$\sigma \propto E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta T \propto Cp \cdot \rho / \lambda \text{ (Transient)}$$

Centrifugal Stress

$$\sigma \propto \rho$$

Frequency

$$f \propto \sqrt{E/\rho}$$

NOTE

E : Modulus of Elasticity

α : Mean Coefficient of Thermal Expansion

Cp : Specific Heat

ρ : Density

λ : Thermal Conductivity

Fig. 1. Physical properties in design.

この予測式より構造設計に必要な材料特性を満足する最適化学組成を選定するための統計的手法による合金設計プログラムを作成した。

この手法により燃焼器用耐熱合金の最適化学組成を選定した。次にその化学組成の供試材を製作し、機械的及び物理的性質を実測した。これから本合金設計法は有効であることを検証するとともに、開発された耐熱合金は燃焼器用材料として、極めて優れた性状を有することを確認した。

2. 統計的手法による合金設計

2.1 統計手法

統計解析のデータには一般に公表されている材料メーカーのカタログ類⁸⁾、ASTM のデータ⁹⁾ などを用い、補足的に実測データなども用いた。耐熱合金の種類として A286 などの Fe 基耐熱合金が 14 種、Hastelloy X や Udimet 520 などの Ni 基耐熱合金が 42 種並びに Haynes' alloy 188 などの Co 基合金が 6 種で、いずれも鍛造用耐熱合金である。しかし比熱や熱伝導率について

は鍛造用耐熱合金のデータ数が少ないので Inco 713 などの鍛造用 Ni 基耐熱合金のデータも用いた。また以上の各耐熱合金のすべてについて機械的性質や物理的性質データは揃っておらず、統計解析用のデータ・ベースは、クリープ破断強さや熱伝導率など各要因ごとにおののに異なっている。

統計解析の手法としては重回帰分析を用いた。その手法は独立変数を Ni, Cr, Co, Mo, W, Nb, Ti, Al, Fe の 9 成分の合金濃度 (mass%) とし、従属変数を引張性質、クリープ破断強さなどの機械的性質並びに比重、熱膨張係数、熱伝導率などの物理的性質とした。

また化学組成の中、C, Si, Mn, P, S, Zr, 及び B は考慮しなかった。これは鍛造用耐熱合金では、これらの元素量は少量で変動範囲が狭く独立変数として採用してもその寄与率は小さいと判断したためである。

熱処理条件も考慮しなかった。これは耐熱合金では熱処理条件は Ti 量、Al 量及び Ti + Al 量にほぼ依存しており、熱処理条件を独立変数に採用しても重回帰分析で熱処理条件の要因の独立変数が Ti 量または Al 量と変数間相関係数行列で干渉し合い、棄却せざるを得ないと判断したためである。

重回帰分析では、変数間相関係数行列で約 0.6 以下の独立変数を選定し、寄与率 (Coefficient of Determination) は約 0.6 以上、F 検定は 1% 有意または 5% 有意になるようにデータを選定した。またこの独立変数の偏回帰係数の t 値はできるだけ約 1 以上になるようにデータを選定した。

重回帰分析を行う場合、式の形式をあらかじめ指定しなければならない。今回の回帰分析では線型の式 (一次多項式: K (定数項) + $a_1 \times \text{Cr}\% + a_2 \times \text{Co}\% + a_3 \times \text{Mo}\% + \dots$) を採用することにした (% は mass% で示す)。

2.2 重回帰分析の結果

重回帰分析の結果の例を Table 1 に示した。これから明らかなように寄与率も十分高く、F 検定でも 1% 有意 (高度に有意) な予測式を得ることができた。

この重回帰分析により一般的に定性的に考えられる各合金元素の効果を定量的に把握できた。例えばクリープ破断強さの重回帰分析において、Ti の偏回帰係数 (Regression coefficient) は 922 K 及び 1005 K では他の合金元素のそれより高く、Al の偏回帰係数は 1144 K では他の合金元素のそれより高くなっており、高温側では Al は Ti よりクリープ破断強さの向上に有利である。

これらの重回帰係数の結果に基づき、重回帰分析より予測される予測値 (Estimated value) と、一般文献に

Table 1. Examples of multiple linear regression analysis on mechanical and physical properties of superalloys.

Properties		Regression Coefficient										Statistics			
		intercept	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	Number of Data	Coeff. Deter.	F Value	Significant
Stress Rupture Strength for 3.6×10^6 s (MPa)	at 922°K	+ 62.19	+ 2.17		+ 2.94	+ 8.67	+ 8.33	+ 60.50	+ 110.97	+ 48.20		53	0.923	77.01	1%
	at 1005°K	36.45	+ 2.87		+ 2.99	+ 8.00	+ 4.30	+ 21.45	+ 70.65	+ 36.62		56	0.930	107.24	1%
	at 1144°K	62.82	+ 2.52		+ 0.75	+ 4.00	+ 3.82	+ 7.87	+ 20.85	+ 21.41		40	0.913	47.71	1%
Tensile Properties at 922°K	Tensile (MPa)	+ 354.58	+ 0.53	+ 0.54	+ 2.12	+ 17.20	+ 14.48	+ 93.77	+ 168.76	+ 45.60		52	0.926	66.82	1%
	Yield (MPa)	+ 430.02	6.36	2.15		+ 8.01		+ 101.93	+ 156.06	+ 33.14		52	0.880	55.05	1%
	Elongation (%)	+ 31.18	0.21	+ 0.24		+ 0.72	+ 1.16	3.08	8.09			52	0.611	11.79	1%
Density (RT) (g/cm ³)		+ 7.850	0.00091	+ 0.0095	+ 0.0093	+ 0.0238	+ 0.0621		0.0300	0.1125		52	0.972	217.02	1%
Dynamic Modulus of Elasticity at 1144°K (GPa)		+ 118.22		+ 0.40	+ 0.87				+ 1.92			36	0.722	27.68	1%
Mean Coefficient of Thermal Expansion at 1144°K ($\times 10^{-6}/K$)		+ 19.08		0.03	0.02	0.14	0.08		0.10		+ 0.02	39	0.825	25.16	1%
Thermal Conductivity at 1144°K (W/m-K)		+ 0.77	+ 0.22	+ 0.28	+ 0.37	+ 0.16	+ 0.17		0.59	0.43	+ 0.25	30	0.739	7.44	1%
Specific Heat at 1144°K (J/kg-K)		+ 296.22	+ 4.40	+ 2.66	+ 3.29		5.65	+ 4.80			+ 3.12	27	0.698	7.69	1%

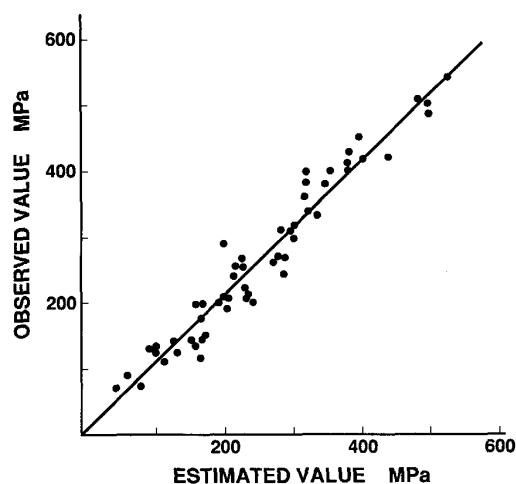
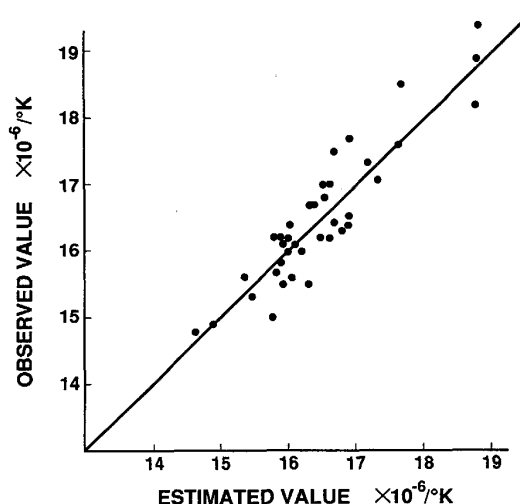
Fig. 2. Correlation on stress rupture strength for 3.6×10^6 s at 1005 K between observed values (Literature data) and estimated values (Regression Analysis).

Fig. 3. Correlation on mean coefficient of thermal expansion at 1144 K between observed values (Literature data) and estimated values (Regression analysis).

公表されている実測値 (Observed value) との相関を 1005 K における 3.6×10^6 s クリープ破断強さ及び 1144 K における熱膨張係数について Fig. 2 及び Fig. 3 にそれぞれ示した。これから予測値と実測値とはよい相関があることがわかる。

以上は鍛造用耐熱合金の重回帰分析の結果であるが、併行して鑄造用析出硬化型 Ni 基耐熱合金についても重回帰分析を行った。これらの重回帰分析を行う過程で鍛造用 Ni 基耐熱合金では 1144 K における 3.6×10^6 s クリープ破断強さが 80 MPa 以上、並びに鑄造用析出硬

化型 Ni 基耐熱合金の中で実用に供せられている耐熱合金において普通鑄造合金を始め一方向凝固合金、単結晶合金のほとんどすべての合金は Cr と Al とが相関関係にあり、 $\text{Cr mass\%} = (23.5 - 2.3 \text{ Al mass\%}) \pm 3.5$ の範囲にあることを見出した。その結果を Fig. 4 に示した。

2.3 統計的手法による合金設計

以上の重回帰分析の結果を踏まえ、最適化学組成を選定する電子計算機による合金設計プログラムを作成することにした。

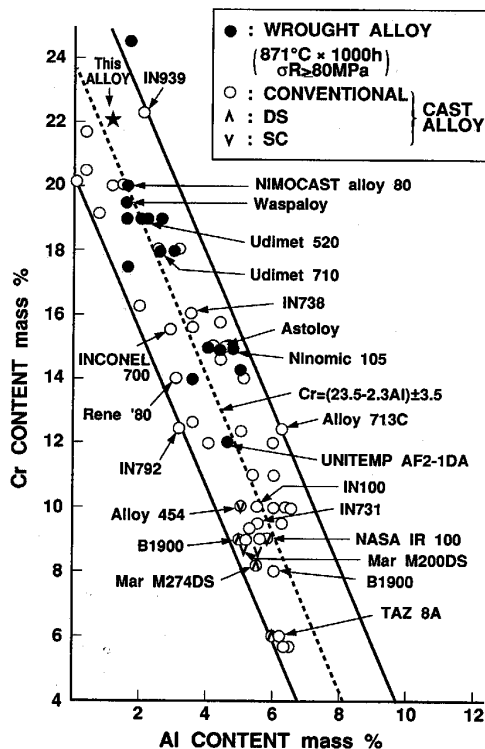


Fig. 4. Correlation on Ni-base superalloys between Cr content and Al content.

クリープ破断強さ、引張性質などの機械的性質及び比重、熱膨張係数、ヤング率、熱伝導率などの物理的性質は重回帰分析による予測式を用いた。

耐高温腐食性の予測式には原田、山崎ら¹⁰⁾の式並びに J. W. SCHULTS ら¹¹⁾の式を修正したものを用いた。

BOESCH & SLANEY¹²⁾の方法を用い、平均電子空隙数(NV)を計算しシグマ相などの TCP 相の生成の予測を行った。

計算ステップは次のとおりとした。

2.3.1 ステップ1 (化学組成の指定)

耐熱合金の文献データの重回帰分析から得た知見並びに従来からガスタービン高温部品に使用されて来た耐熱合金の化学組成からおおよその適切な化学組成範囲を推定する。この時、化学組成の範囲とその範囲を何%のステップで計算するのかについて指定する。

2.3.2 第2ステップ (要求条件の指定)

ここでは開発したい耐熱合金に必要な特性に最小値と最大値を指定する。

必要な特性 (Required properties) は次のとおりである。

(1) 922, 1005, 1144 K における 3.6×10^6 s クリープ破断強さ

(2) 常温, 922 K の引張強さ, 0.2% 耐力, 伸び

(3) 922 K におけるヤング率及び熱膨張係数

(4) 耐高温腐食性の指定

ここでは J. W. SCHULTS らの式¹¹⁾を用いる。

(5) 平均電子空隙数の指定

シグマ相などの TCP 相の生成を予測するもので、本合金設計では、C, B などの元素を無視しており、予測方法として一般的に広く用いられる BOESCH & SLANEY の¹²⁾式を用いた。

化学組成の各指定ステップごとに、以上の必要な特性を計算し、その要求値を満足する化学組成を選定する。

2.3.3 第3ステップ (その他の材料特性の計算)

以上は必要な特性を計算し、その要求値を満足する化学組成の選定であるが、その選定された化学組成について、次の材料特性をも計算し、アウトプットするようにプログラムを作成した。

(1) 1144 K における引張強さ, 0.2% 耐力, 伸び

(2) 耐高温腐食性に指数

この指数は原田、山崎¹⁰⁾らの式によるものであり、小さいほうが望ましい。

(3) 比重

(4) 1144 K におけるヤング率及び熱膨張係数

(5) 922, 1144 K における熱伝導率及び比熱

(6) 物理的性質の比

この物理的性質比とは先に Fig. 1 で示した非定常時の熱応力を求める式である。すなわち

ヤング率 $\times$ 熱膨張係数 $\times$ 比熱

$\times$ 比重 $\div$ 熱伝導率 (1)

となり、この値が小さいほど非定常時の熱応力が小さくなり有利である。

2.4 燃焼器用材料の合金組成の選定

本方法における合金設計法では、おおよその合金組成の範囲を決める必要がある。そこで Table 1 に示した重回帰分析の結果を基に次のように化学組成の範囲を考えた。

Cr: Cr は高温腐食性の向上にはなくてはならない合金元素である。従来の燃焼器用材料では Cr 量は約 20 mass% ほど含まれており、また今回の開発合金の使用条件も高温腐食性が必要になるので Cr 量は 20 mass% 以上は欲しい。

Co: Co の偏回帰係数はクリープ破断強さ、引張強さ、耐力などで + 側にあり強度上昇に有効である。また、ヤング率では Co の偏回帰係数は Ti と共に + 側にあり、ヤング率の向上に有効である。更に熱膨張係数を低め、熱伝導率を大きくする元素であり、燃焼器用耐熱合金の元素として有効であると考えられる。そこで Co は

約 6 mass% 以上添加することにした。

Mo : Mo は Co と同様の効果があることが重回帰分析の結果明らかで約 6 mass% 以上添加することにした。

W : W の効果も Co 及び Mo と同様である。特徴的なこととしては、W は比重を著しく高めて好ましくないが、一方 W は引張伸びを高め、比熱を小さくする唯一の元素であり、数 % 添加することにする。

Nb : Nb は室温及び 922 K の引張強さ、耐力並びに 922 K・ 3.6×10^6 s クリープ破断強さなどの強度向上には著しく有効な元素である。しかし、1144 K では強度向上にはあまり有効でなく、また引張伸びを低下させ、加工性を阻害すると考えられ、比熱も大きくするので、燃焼器用耐熱合金の合金元素として好ましくないと判断し、添加しないことにした。

Ti : Ti は高温強度及びヤング率を高めるので構造用材料の合金元素としては有効である。しかし、Ti は延性(引張伸び)を著しく低める。また溶接性も阻害することが考えられるので、約 1 mass% 以下とした。

Al : Al は Ti と同様の効果がある。特に 1144 K の高温側では Al は Ti より高温強度の向上に有効であり、また比重を低めるのにも有効である。しかし Al は Ti と同様に熱伝導率と延性(引張伸び)を低めるので多量の添加は好ましくない。Fig. 4 に Cr と Al との相関性を示したように、Cr 量を 20~24 mass% とした場合 Al 量は 1 mass% 前後の添加量が適当であることが推定される。

以上により燃焼器用 Ni 基耐熱合金の化学組成としては 20~24% Cr-6~10% Co-6~12% Mo-1~4% W-0~1% Ti-0.5~1.5% Al-Ni 基 (% は mass%) の範囲内より構造設計に必要な要求を満足したバランスのとれた化学組成の合金を選定するのが良いと推定される。

そこで、以上の合金組成の範囲と構造設計に必要な要求条件をインプットし、Fig. 5 に示したフローチャートに従って計算した。

この合金組成の範囲の組合せ数は 1296 ケースがある。最初に、要求条件を緩めて計算させたところ 208

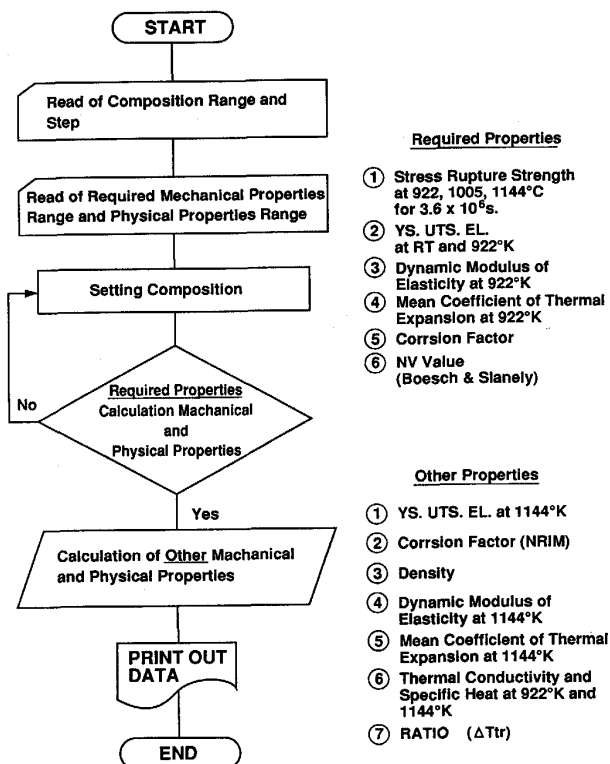


Fig. 5. Flow chart of wrought superalloy by statistical alloying design method.

ケースがアウトプットされた。更に、要求条件を厳しくすることをくり返し 36 ケース絞った。この中に Cr 量が 22% のものが 4 ケースあり、NV 値や物理的性質並びに(1)式の値などの観点から合金組成のバランスのとれた化学組成は 22%Cr-8%Co-9%Mo-3%W-1%Al-0.3%Ti-Ni 基合金であると判断された。その例を Table 2 に示した。

なお、C, B, Zr については次のとおりとした。

C : C は溶接や板金加工を必要とする Ni 基耐熱合金では 0.07 mass% 前後である。

B : B も強度向上に有効と考えられ、通常この種の合金は、0.003 mass% 程度添加されている。

Zr : Zr は高温強度向上に有効であると従来から言われてきた¹³⁾。しかし、Zr は溶接される耐熱合金のクリー

Table 2. Examples of out put by statistical alloying design method for combustor superalloy.

CHEMICAL			COMPOSITION mass %					PERCENT		TENSILE PROP.			3.6 × 10 ⁵ S		NV	CORR.	DEN	PHYSICAL		PROPERTIES*					
										TEMP.	YS	UTS	EL.	STRESS	RUP.		FACTOR		TEMP.	TEP	DME	TC	SPH	RATIO	
CR	NI	CO	MO	W	NB	TI	AL	FE	K	MPA	MPA	P.C.	TEMP.	MPA	VALUE		G/CC	K	10E-6	GPA	W/MK	J/KGK			
22.00	56.70	8.00	9.00	3.00	0.0	0.30	1.00	0.0	RT	479.9	866.4	50.1	922	318.3	2.13	0.0	8.54	922	14.7	169.8	21.5	553.5	54.980		
										922	320.0	708.4	47.6	1005	193.3		-1.737		1144	15.6	148.7	25.8	634.7	48.580	
										1144	286.0	410.9	66.0	1144	73.6										

Note : * DEN : Density TEP : Mean coefficient of thermal expansion TCD : Thermal conductivity DME : Dynamic modulus of elasticity
SPH : Specific heat RATIO : DME×TEP×SPH×DEN÷TCD

Table 3. Chemical composition of superalloy for combustor.

Item	Element (mass %)												Density ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)
	C	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	B	Ni	Si	Mn	S	
Design	0.07	22.0	8.0	9.0	3.0	0.3	1.0	0.003	Bal.	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.015	8.54
Alloy A*	0.06	21.4	8.2	9.3	3.0	0.31	0.96	0.003	Bal.	< 0.05	< 0.05	0.003	8.50
Alloy B**	0.08	21.6	8.3	8.9	2.8	0.36	1.04	0.003	Bal.	< 0.05	< 0.05	0.004	—

Note : * Alloy A : First trial charge ** Alloy B : Example of production charge

ブ破断強さには有害といわれ¹⁴⁾、また、铸造用耐熱合金について重回帰分析を別途行ったところ、Zr 添加は伸びには有効であるが、高温強さの向上には有効でなかった。そこで Zr は添加しないことにした。

以上から燃焼器用耐熱合金の化学組成は Table 3 (Design の項) に示したように設定された。

3. 材料特性の実測値と予測値との比較

3.1 試作材及び量産材と試験方法

以上の統計的手法による合金設計からガスタービンの燃焼器用耐熱合金の化学組成が設定された。そこでこの化学組成の板材を製造することにした。

製造方法は 2000 kg 真空高周波溶解後エレクトロスラグ再溶解を行い、熱間圧延により約 $0.005 t \times 1.0 w \times 2.0 \text{ lm}$ とし、1453 K で $1.2 \times 10^3 \text{ s}$ 保持後水冷の固溶化処理を行っている。

初めて試作した板材の化学組成を Alloy A とし、また現在まで 50 チャージ以上の多数の量産を行っており、その代表例を Alloy B として Table 3 (前記) に示した。

これらの試作材及び量産材について室温及び高温引張、クリープ破断などの機械的試験並びに熱伝導率及び熱膨張係数などの物理的性質試験を行い、これらの試験による実測値 (Measured value) と本合金設計から予測される予測値 (Estimated value, Table 2 に示したアウトプット) との比較を行うことにした。

また、加工性を検討するための密着曲げ試験及びマイクロ組織試験を行った。なお、2000 kg 試作材の製作に至るまでには、本合金の化学組成を基本にして Co, Mo, W の含有量のレベルを変化させた小溶解 (5~20 kg) 材のテストを行っており、その結果は別途報告した¹⁵⁾。

3.2 引張試験

室温及び 773~1273 K における引張試験の結果を合金設計の予測値と比較して Fig. 6 に示した。試作材及び量産材の引張試験結果と予測値とは室温及び 923 K においてはほぼ完全に一致していることがわかる。

3.3 クリープ破断試験

クリープ破断試験は 973~1173 K で最長約 $3.96 \times$

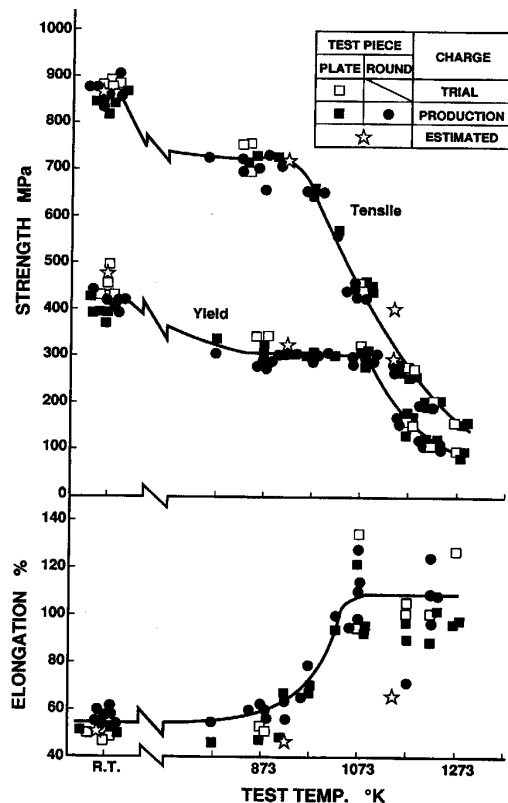


Fig. 6. Tensile properties and estimated value of new superalloy.

10^7 s の試験を行いラーソン・ミラー・パラメーターでとりまとめ、合金設計の予測値と比較して Fig. 7 に示した。試作材及び量産材のクリープ破断強さの試験結果と予測値とは良い一致を示している。

3.4 比重

試作材について比重を測定した結果は Table 3 に示したように $8.50 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ であり、予測値を $8.54 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とよく一致していることが認められた。

3.5 熱伝導率

量産材について熱伝導率をレーザフラッシュバット法により 3 本の試験片つき測定した結果を合金設計の予測値と比較して Fig. 8 に示した、熱伝導率の実測値と予測値とは良い一致を示している。

3.6 熱膨張係数

量産材について熱膨張係数を 3 回測定した結果を合金

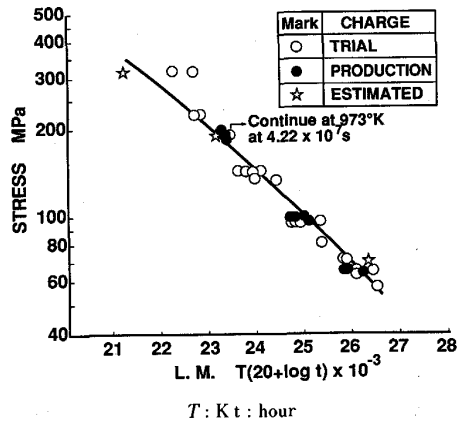


Fig. 7. Stress rupture strength and estimated value of new superalloy.

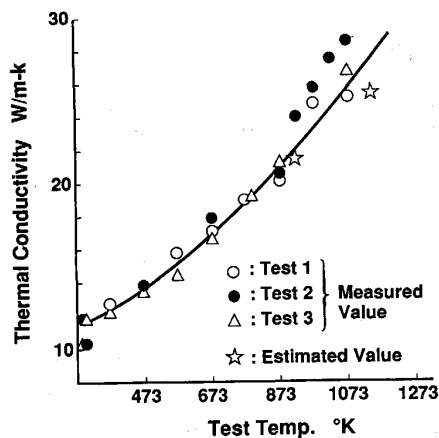


Fig. 8. Thermal conductivity of new superalloy.

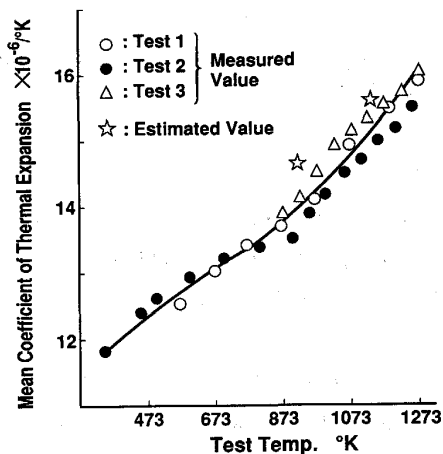


Fig. 9. Mean coefficient of thermal expansion of new superalloy.

設計の予測値と比較して Fig. 9 に示した。熱膨張係数の実測値と予測値とは良い一致を示している。

3.7 その他の物性値

ヤング率及び比熱について測定し実測値と予測値を比

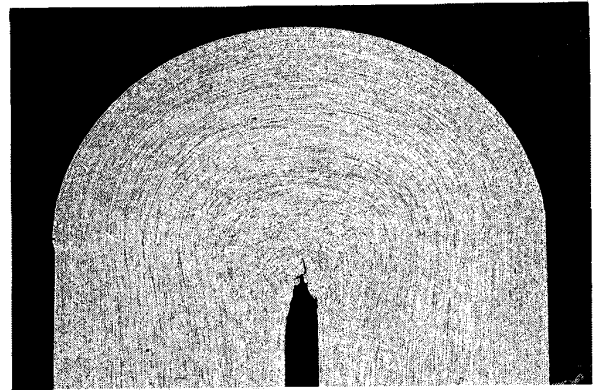


Photo. 2. Macro-structure of cross section of tight bend test piece.

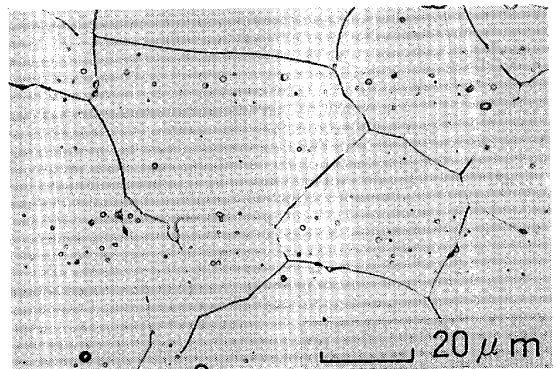


Photo. 3. Microstructure of new superalloy.

較したところ、ヤング率は良い一致を示し、比熱も比較的一致していることが認められた。

3.8 密着曲げ試験

燃焼器は板金構造物であり、冷間加工性が重要視される。そこでこの冷間加工性を密着曲げ試験で評価した結果を Photo. 2 に示した。密着曲げ加工の外表面には全くき裂は検出されず、本開発の耐熱合金は優れた冷間加工性を有していることが明らかとなった。

3.9 ミクロ組織試験

ミクロ組織試験を行った結果を Photo. 3 に示した。結晶粒度は粒度番号 No. 6 であり、整粒のオーステナイト単相組織であった。また粒内、粒界に析出物が認められ、電子線回折の結果から M_6C 及び $M_{23}C_6$ 型の炭化物と同定された。これらのミクロ組織は良好と判断された。

4. 燃焼器尾筒の製作

本耐熱合金を用いて Photo. 4 に示すような燃焼器尾筒を製作し、入口ガス温度 1423 K で約 1.8×10^5 s の

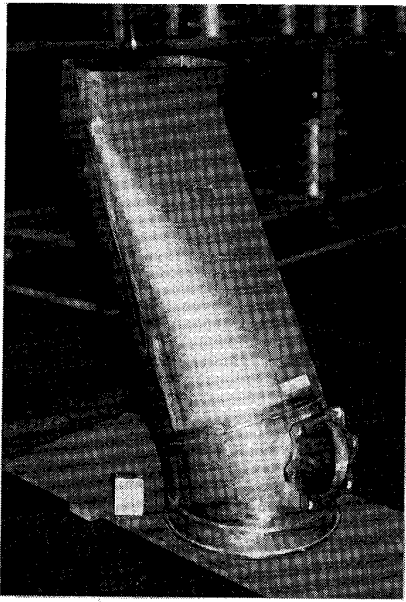


Photo. 4. Out view of trial manufactured combustor transition piece.

燃焼テストを行い良好な結果を得た。

5. ま と め

ガスタービンの高効率化に伴い入口ガス温度が飛躍的に上昇してきた。一方地球環境の問題から低 NO_x 化を図った燃焼器の開発が行われ、これに伴って燃焼器用耐熱合金の材質に厳しい要求がなされるようになってきた。そこで、この要求を満足する優れた新しい合金を統計的手法による合金設計により開発し次の結果を得た。

(1) 従来から公表されている文献データなどを用い、化学組成 (Ni, Cr, Co, Mo, W, Nb, Ti, Al, Fe) を独立変数、クリーブ破断強さや引張性質などの機械的性質並びに比重、熱膨張係数、熱伝導率、ヤング率、比熱などの物理的性質を従属変数にとり、重回帰分析を行った。その結果、寄与率は十分に大きく、F 値も高度に有意であり、化学組成より機械的性質や物理的性質を予測できる式を設定した。

(2) これらの予測式を用い構造設計に必要な材料特性を満足する化学組成を選定するための統計的手法による合金設計プログラムを作成した。このプログラムにより燃焼器用耐熱合金に最適の化学組成は 22 mass% Cr-8 mass% Co-9 mass% Mo-3 mass% W-1 mass% Al-0.3 mass% Ti-Ni 基であると判断された。

(3) この化学組成の耐熱合金板材を 2000 kg 真空高周波溶解後再溶解法により製作し、その材質を調査した。

その結果、クリーブ破断強さや引張性質などの機械的性質、比重、熱伝導率や熱膨張係数などの物理的性質の実測値と合金設計による予測値とはよく一致することが明らかとなった。

これから本合金設計法は実用耐熱合金の開発に有効であると判断された。

(4) また、開発された耐熱合金は均一なミクロ組織を呈し加工性に優れ、燃焼器用耐熱合金として良好な性状を有していることが認められた。また、本耐熱合金は実機ガスタービン燃焼器尾筒材として多数のプラントに最長 7.2×10^7 s 以上の長期にわたり実用されて、良好な結果を得ている。

耐熱合金の開発には三菱金属(株)桶川製作所及び中央研究所の関係者にお世話になりました。ここに感謝申し上げます。

本稿をまとめるに際し、貴重な助言と指導をいただいた大阪大学工学部材料物性工学科山根寿己教授に感謝致します。

文 献

- 1) 三賢憲治, 青木素直, 塚越敬三, 青山邦明: 三菱重工技報, 27 (1990), p. 29
- 2) 橋爪保夫, 土樋俊夫, 広田良夫, 灘井義和, 森 義孝, 佐藤友彦, 中原義文, 日浦治也, 福江一郎, 塚越敬三: 三菱重工技報, 22 (1985), p. 292
- 3) 萬代重実, 青山邦明: 日本ガスタービン学会誌, 16 (1990) 64, p. 25
- 4) 渡辺力蔵, 九重常男: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2275
- 5) 山崎通夫: 鋳鋼と鍛造 (1984) 370, p. 12
- 6) 森永正彦, 湯川夏夫, 足立裕彦: 鉄と鋼, 71 (1975), p. 1441
- 7) J. ZUTOS: Mathematical Modeling of the Chemical, Mechanical and Physical Properties of Engineering Alloys (1977) [Lexington Book]
- 8) High Temperature High Strength NICKEL BASE ALLOYS (3rd Edition), ed. by International Nickel Company, Inc. (1977)
- 9) W. F. SIMMONS: ASTM Data Series Publication, No. DS9E (1968) [American Society for Testing and Materials]
- 10) 原田広史, 山崎通夫: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 383
- 11) J. W. SCHULTS and W. R. HULSIZER: Metals Engineer Quarterly (1976) Aug., p. 15
- 12) W. J. BOESCH and J. S. SLANEY: METAL PROGRESS, 86 (1964), p. 109
- 13) R. F. DECKER: Steel-Strengthening Mechanisms (1969), p. 147 [AMAX]
- 14) F. C. HULL: ASME Publication, 71-PVP-64 (1971)
- 15) I. TSHUJI, H. ITO, K. TSUKAGOSHI, T. TAKEIRI, Y. KURAUCHI and T. SAHIRA: National Information Technical Service, PB-83-215889 (1982) [U. S. Department of Commerce National Technical Information Service]