

NSX用アルミニウムサスペンションの開発

Development of Aluminum Suspension Parts for NSX

小 松 泰 典*
Yasunori Komatsu

新 井 彪 雄*
Takeo Arai

阿 部 春 樹*
Haruki Abe

佐 藤 正 和*
Masakazu Sato

中 沢 靖*
Yasushi Nakazawa

入 江 卓 志*
Takushi Irie

要 旨

自動車の基本性能である走行性能の向上手段として、車体の軽量化は必須であり、スポーツカーの場合には、特にそのニーズは高い。NSXでは、スポーツカーとしての性能追求の為に、徹底的な軽量化を狙い、可能な限りアルミニウム材料の適用を図った。

本稿は、サスペンション系部品のアルミニウム化に対して、特に重点をおいた以下の内容について報告する。

- ①各部品の強度要求特性の解析とそれに基づく部品製造法の選定。
- ②市場における信頼性確保の上でシャーシ部品には欠く事のできない市場環境での材料強度劣化挙動の把握。
- ③高品質で大型薄肉鋳物の製造を可能とした新鋳造法の実用化。
- ④冷間鍛造を主体としたアルミニウム鍛造技術。

ABSTRACT

Making a lightweight chassis is an essential means toward enhancing driving performance of a car. It is especially important for a sports car. The use of aluminum was investigated toward achieving this lightweight design as is required in pursuit of sheer performance for the NSX as a sports car. In line with this requirement, aluminum was substituted as material for suspension.

This investigation contained:

- 1) analysis of rigidity of the parts as is required by specification, and selection of an appropriate manufacturing process for the parts;
- 2) the monitoring of corrosion behavior of the parts during practical use so as to ensure its reliability after sales;
- 3) a study of the practical use of a new casting method which allows production of high quality large pieces with thin casting and
- 4) development of aluminum forging techniques based on cold forging.

1. はじめに

近年のユーザーニーズの多様化は、スポーツカーをも、単なる走りのみを追求する車から、安全性・操縦性・快適性、そして経済性まで含めて、高い性能でバランスした車に変えつつある。

このような状況の中で、スポーツカーNSXは、動力性能は勿論、他の全ての性能を兼ね備えることを主眼として開発された。動力性能、操縦性能とも、その向上手段としては、軽量化が最も効果

的であり材料置換、構造簡略化、サイズダウン等、様々なアプローチが考えられる。NSXでは、強度、剛性、実績信頼性等の面で最も優れ、基本機能を損なうことなしに、車両重量の大幅な軽量化が達成できるアルミニウム材への材料置換を実施した。

本稿は、車両重量の単純軽量化以外に操縦安定性向上にも効果のあるサスペンション系部品のアルミニウム化技術について報告する。

* 栃木研究所

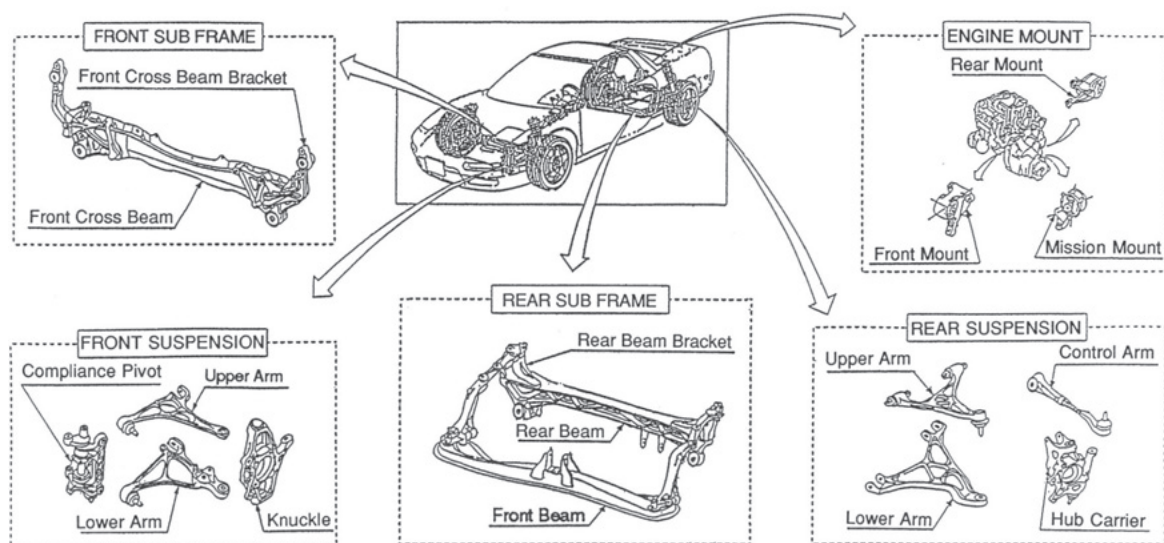


図1 NSXアルミニウムサスペンション系部品

2. アルミニウム化部品

NSXのサスペンション構造は、スポーツカーサスペンションの代表であるダブルウィッシュボーン方式を採用している。設計・構造上の優れた特性を十分に発揮させるために、サブフレームを含むサスペンション系部品のほぼ全てにアルミニウムの適用を図った。NSXでアルミニウムを適用したサスペンション系の主な部品を図1に示す。

その総重量は、図1に示した部品を含め、シャーシ系全体で約100kgとなっている。

3. アルミニウム化の効果

サスペンション系部品のアルミニウム化による軽量化設計、軽量化量について次に述べる。

3.1. 軽量化設計の考え方

シャーシ系部品のアルミニウムによる軽量化を行なう上で重要なことは、強度と剛性の確保である。アルミニウム化による軽量化率と強度・剛性の相関を表1及び図2に示す。これはベースとなる鉄製部品をアルミニウム合金で置換する場合、それぞれのヤング率、強度、密度から以下の仮定に基き、算出した結果である。

- 1) 形状: 相似形状
- 2) 入力: 曲げ、モーメント一定

3) 剛性: ヤング率×断面二次モーメントを鉄製及びアルミニウム合金化部品で一定

4) 強度: 剛性が等しくなる時の必要(要求)強度

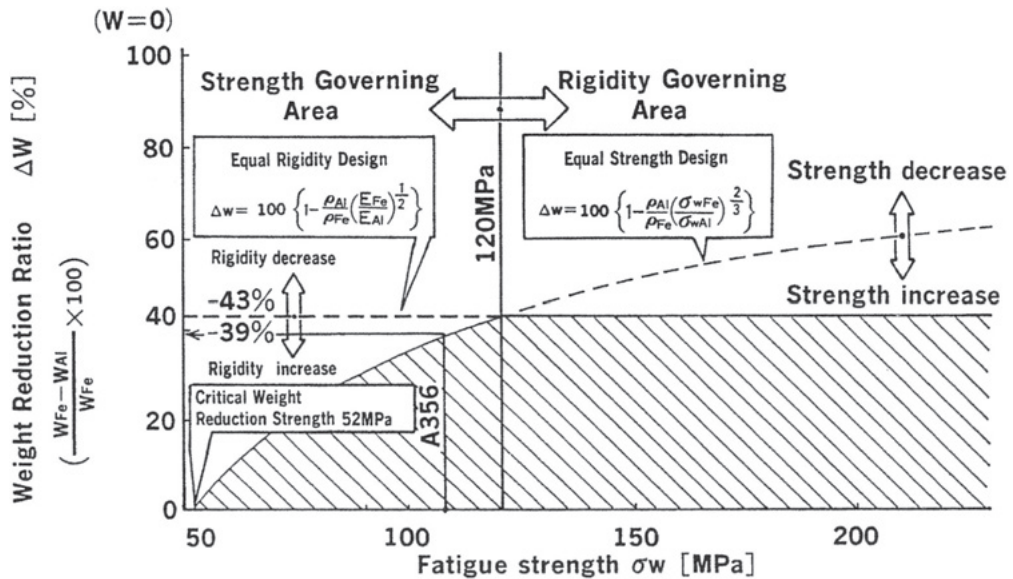
5) 重量: 断面積×荷重支点距離×密度

これにより、鉄製部品をアルミニウム合金化する場合、A356-T6材では強度律則(疲労)域である為、等強度設計をする事によって、鉄製部品以上の剛性を確保できる事がわかる。そして、この場合の最大軽量化率(鉄製部品と同等以上の強度・剛性を確保した上での軽量化率)は39%となる。又、鍛造の6061の場合も同様に31%となる。

但し、実際の製品では、アルミニウム合金化した結果、断面形状が拡大される為、製法上の制約を受ける場合が少なくなり、各部位の機能に応じた最適設計が可能となり、一層の軽量化が得られる。具体的にはFEM解析を用い、各種軽量化形

表1 鉄製部品とアルミニウム製部品の比較例

	Material	
	JIS FCD45	AA A356-T6
Young's modulus(GPa)	157	71
Tensile strength(MPa)	441	275
0.2%Proof strength(MPa)	314	226
Fatigue strength(MPa)	216	108
Density(g/cm ³)	7.0	2.7


 図2 最大軽量化曲線 (FCD45, $\sigma_w 10^7 \sim$)

状に対し予め測定した実車入力をインプットし、各部の変化、応力のバランスを比較し、許容限界にて形状を算出する。プロトタイプによる解析結果を図3、4に示す。なお、図中の矢印は入力点を、外形線は入力前後でのナックルの形状をそれぞれ示す。

3.2. 軽量化

表2に、NSXでアルミニウム化を実施した主なサスペンション系部品の製法・材料及び重量を示す。又、これらの部品を従来の鉄鋼材料で製造した場合の重量と、これと比較した場合の今回のアルミニウム化での軽量化重量・率を同時に示す。鉄鋼材料の場合と比較して、重量で約50kg、率で約49.5%の軽量化を達成している。

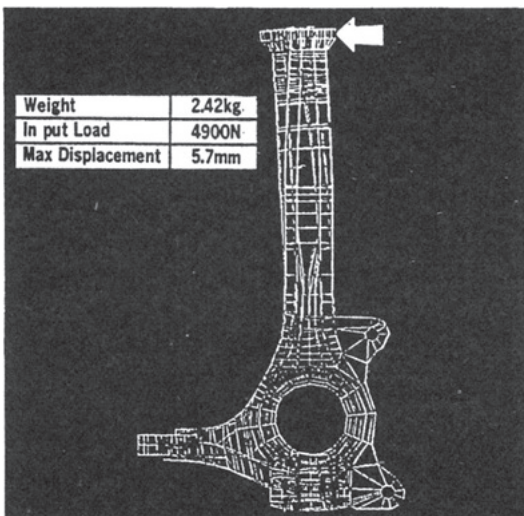


図3 フロントナックルのNASTRAN 解析 (Al 軽量化品)

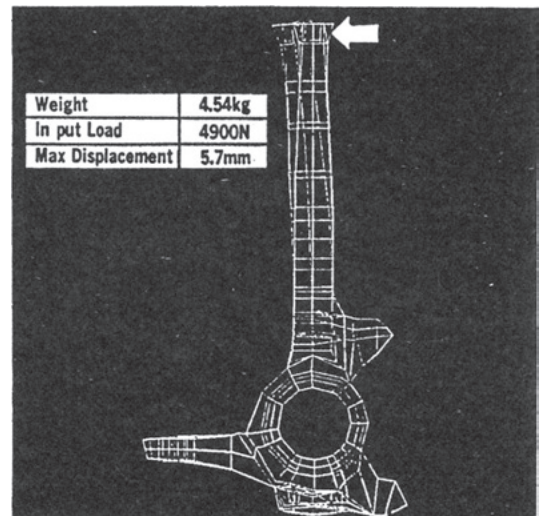


図4 フロントナックルのNASTRAN 解析 (現行 Fe 部品)

表2 NSXサスペンション系部品のアルミニウム化による軽量化効果とその材料・製法

Component	Parts Name	Units /car	Al(NSX)			Fe(Original Metal)		Weight Reduction	
			Process	Material	Weight(kg)	Process	Weight(kg)	Weight(kg)	(%)
Front Subframe	Front Cross Beam	1	Stamping	5182	1.40×1	Stamping	3.36×1	1.96×1	58.3
	Front Cross Beam Bracket	2	Casting	A356	1.90×2	Casting	3.92×2	2.02×2	51.5
Rear Subframe	Rear Beam	1	Casting	A356	6.80×1	Stamping	11.0×1	4.20×1	38.2
	Rear Beam Bracket	2	Casting	A356	4.00×2	Casting	6.45×2	2.45×2	38.0
	Front Beam	1	Stamping	5182	4.90×1	Stamping	9.80×1	4.90×1	50.0
Front Suspension	Knuckle	2	Casting	A356	1.90×2	Casting	4.45×2	2.55×2	57.3
	Upper Arm	2	Forging	6061	0.81×2	Forging	1.56×2	0.75×2	48.1
	Lower Arm	2	Forging	6061	1.76×2	Forging	4.61×2	2.85×2	61.8
	Compliance Pivot Component	2	Forging	6061	0.87×2	Forging	1.44×2	0.57×2	39.6
		2	Forging	6061	0.28×2	Forging	0.46×2	0.18×2	39.1
		2	Forging	6061	0.33×2	Forging	0.67×2	0.34×2	50.7
		2	Forging	6061	0.78×2	Forging	1.62×2	0.84×2	51.9
Rear Suspension	Hub Carrier	2	Casting	A356	2.15×2	Casting	4.44×2	2.29×2	51.6
	Upper Arm	2	Forging	6061	0.96×2	Forging	1.85×2	0.89×2	48.1
	Lower Arm	2	Forging	6061	1.56×2	Forging	4.08×2	2.52×2	61.8
	Control Arm Component	2	Forging	6061	0.20×2	Forging	0.46×2	0.26×2	57.0
		2	Forging	6061	0.16×2	Forging	0.34×2	0.18×2	52.9
	Mt. Miss.	1	Casting	A356	0.75×1	Casting	1.25×1	0.50×1	40.0
ENG. Mt.	Mt. Front	1	Casting	A356	0.65×1	Casting	1.00×1	0.35×1	35.0
	Mt. Rear	1	Casting	A356	0.65×1	Casting	1.00×1	0.35×1	35.0
Total		36	—	—	51.0	—	101.0	50.0	49.5
Original Al Parts		—	—	—	49.3	—	49.3	—	—

4. アルミニウムサスペンション系部品の材料及び製法

4.1. 材料・製法の選定

表3に、シャーシ系部品の要求特性と、今回採用した材料・製法の優劣比較を示す。材料は、耐食性、強度、靱性ともバランスの取れた、A356（鋳造材）、6061（鍛造材）、5182（プレス材）を使用している。部品毎の材料・製法は、表2に示している。

表3 アルミニウムシャーシ部品に適用した材料・製法の特徴

CHARACTERISTICS OF MATERIAL AND PROCESS	CASTING	FORGING	STAMPING
	A356	6061	5182
DESIRED CHARACTERISTICS			
STRENGTH	○	◎	
RIGIDITY	◎	◎	
TOUGHNESS		○	◎
CORROSION RESISTANCE	○	○	◎
DESIGN SHAPE FLEXIBILITY	◎	○	
WEIGHT REDUCTION POTENTIAL		○	◎

◎ EXCELLENT ○ GOOD

4.2. 材料強度の長期信頼性

シャーシ系部品の場合、特に考慮すべき材料特性のひとつに、腐食やチッピングキズなどの使用環境による強度の低下がある。常時高応力下で使用される部品のため、長期信頼性の点からも十分な確認が必要である。

図5に、A356材と6061材の市場環境をシミュレートした腐食とチッピングキズの複合による材料強度劣化特性を示す。この結果にもとずき、強度設計は、劣化した後の強度を基準とした。

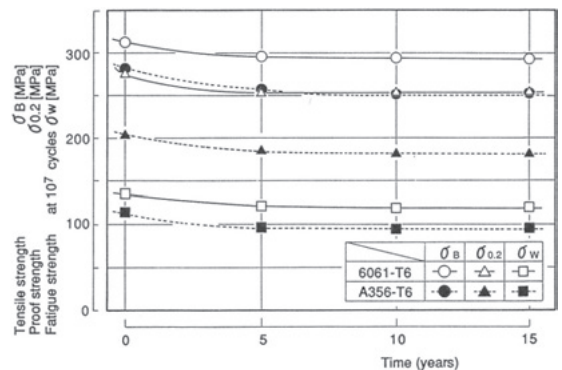


図5 市場シミュレーション試験による腐食とチッピングキズの複合ダメージでの疲労及び静的強度低下

次に図6に、鋳鉄材料と今回採用したアルミニウム材料の腐食環境下での疲労強度特性の比較を示す。鋳鉄材料では長期に渡り強度低下が継続するが、アルミニウムは両材料とも鋳鉄材料にくらべ長期信頼性保証がしやすい。

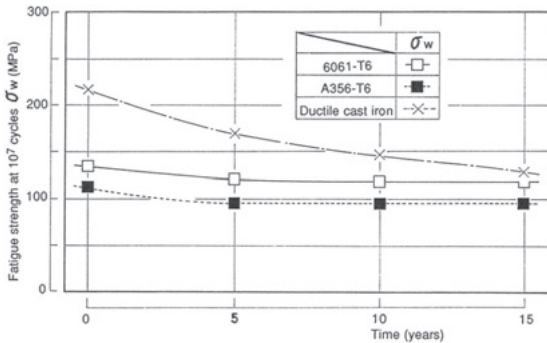


図6 市場シミュレーション試験による腐食とチッピングキズの複合ダメージでの疲労強度特性比較

4.3. プログラム制御金型重力鋳造法 (PGM-GDC)

アルミニウムの鋳造においては、鋳造欠陥(引け巣、ガスポロシティ等)の防止と結晶粒径微細化が重要なポイントとなる。そのためには、いかなる形状に対しても、指向性凝固と迅速冷却が必須であり従来の方式よりも高い再現性で制御可能なプログラム制御金型重力鋳造法を開発、実用化した。

本制御法は、予備実験から得られた最適冷却曲線を正確にトレースする様に、冷却媒体の流量を型内にセットした熱電対からの信号により連続的に制御するものである。この制御は、部品形状、注湯量等により1ヶ所～数ヶ所同時に行ない、部位別に最適冷却曲線を設定する。

図7に、自然冷却法、強制冷却法(ON/OFF制御)及びプログラム制御法の時間と金型温度変化の比較を示す。本制御方式では、他の冷却方式で問題となりやすい溶湯温度、注湯時金型温度、冷却水温等による冷却速度の乱れは原理的に発生しない。

本制御により、結晶粒は微細化され、鋳物全体

の均一高強度高靱性化が図られる。同じ金型を用いてプログラム制御を行なったものと、行なわなかったものとの製品より切出した試験片による材料特性比較を図8と図9に示す。特性向上とバラツキ低減が全ての項目で認められる。

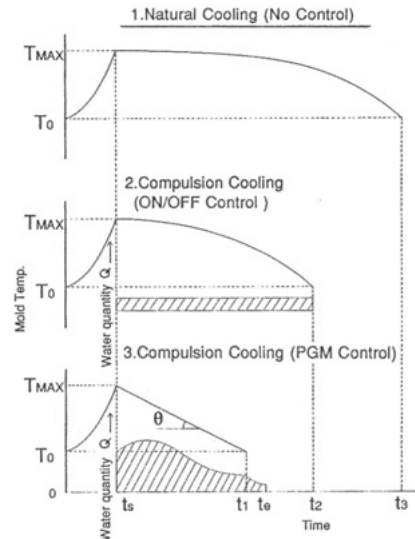


図7 各プロセスでの金型温度比較

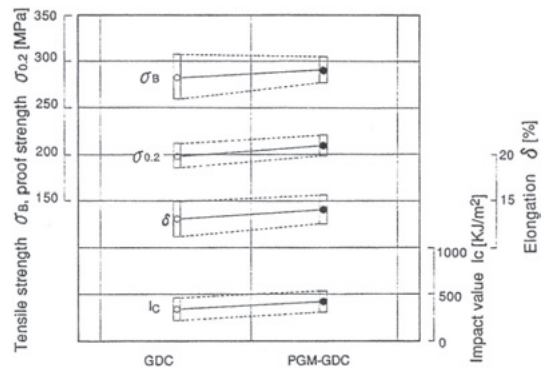


図8 PGM-GDCの材料特性

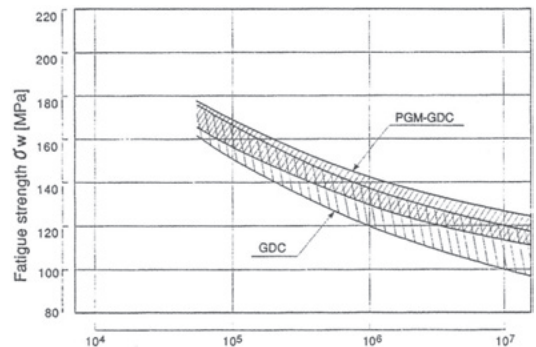


図9 PGM-GDCの疲労強度

本鑄造法で製造している代表的な部品を図10～12に示す。図10は強度、品質信頼要求の高い「KNUCKLE」、図11は大型薄肉形状の「REAR BEAM」、そして、図12は複雑骨組構造の「FRONT CROSS BEAM BRACKET」である。

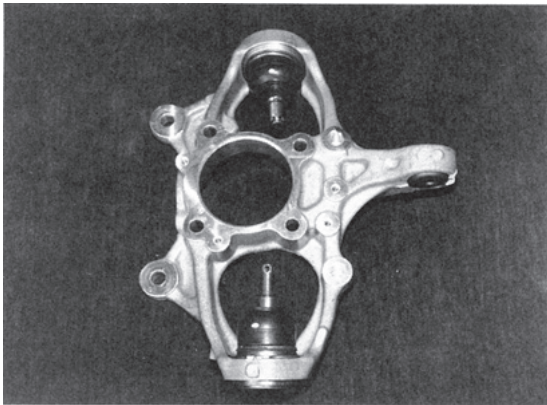


図10 KNUCKLE

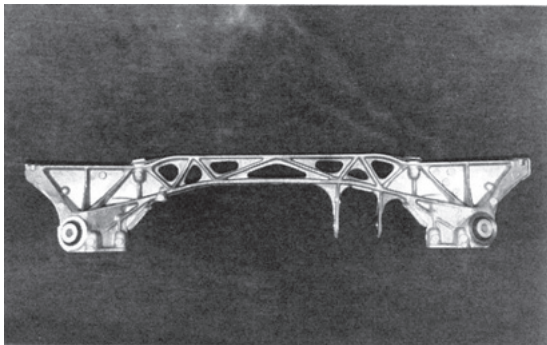


図11 REAR BEAM

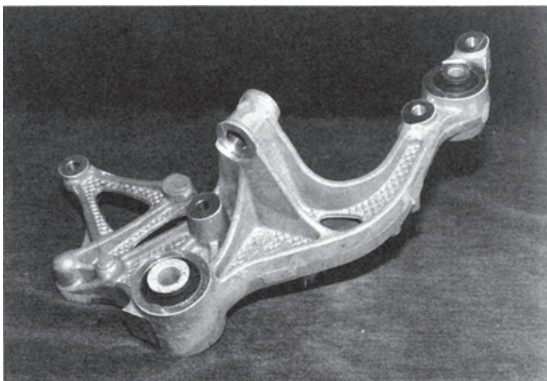


図12 FRONT CROSS BEAM BRACKET

4.4. 鍛造

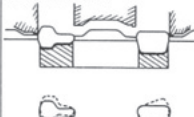
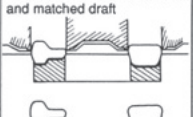
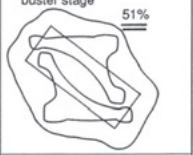
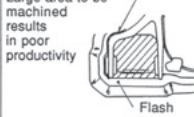
NSXに用いられているアルミニウム鍛造部品は熱間鍛造と冷間鍛造により製造している。一般的な両プロセスの特徴を表4に示す。この表からわかる様に、複雑な形状で、サスペンションアーム類等の中～大型部品には熱間鍛造を、ゴムブッシュのインナー／アウターの金具類等の小部品は冷間鍛造を採用している。

NSXのアーム類は、できるかぎりの軽量化を目的とした複雑な骨組構造となっている。軽量化と生産性を両立させる上で、表5の成型歪の低減、歩留りの改善等の種々の工夫を図っている。

表4 熱間鍛造と冷間鍛造の特性比較

ITEM	HOT FORGING	COLD FORGING
Projection area	Small to large area	Small area only
P.L. (Parting line)	Plane and curved surface (fairly complicated)	Plane and simple curved surface
Draft	From 3 to 7°	0°
Flash	Generally Yes	No
Deformation direction	Material flows toward P.L.	Material flows along processing direction
As forged material thickness	As forged is thicker than product	As forged is thinner than product
Shape	Cannot be undercut but fairly complicated shapes can be processed.	Forging against the axis of symmetry is prevalent.
Lubrication	Generally WET (graphite etc.)	Dry (Bonde etc.)
Yield	Normal	Excellent
Productivity	Normal	Excellent
Strength	Normal	Due to cold processing, generally rather high strength is obtained.

表5 熱間鍛造の改良技術

PROBLEM	FORMER CONDITION	IMPROVED CONDITION
1) Deformation of product	Product deforms when its inner flash is removed. 	Both inner and outer flashes are removed at the same time and matched draft 
2) Low yield	1 Unit at buster stage  35%	2 Units possible at buster stage  51%
3) Increased area to be machined	Large area to be machined results in poor productivity  Trim line Flash	Optimum distribution of mold volume  Trim line Flash
4) Increased number of forging steps	3 heats - 3 blows	Upper arm: 2 heats - 3 blows Pivot & adjuster: 1 heat - 3 blows
5) Forging defects occur	Suck in, flow through, etc.	Optimum shape design (e.g. optimized fillet radii, corner radii, etc.)

又、従来熱間鍛造で非常に複雑な工程を有した部品を、適切な形状設計と冷間鍛造法を採用することで、大幅な工程削減が可能となった。図13にその例を示す。なお、これにより、「BASE」と「SHAFT」の一体成型が可能となり、溶接加工が廃止できた結果、角度精度で10倍、強度的にも約20%の向上が図れた。

鍛造部品の例を図14~16に示す。図14は、熱間鍛造製のリア側「LOWER ARM」、図15は冷間鍛造製の「BRACKET B PIVOT COMPLIANCE」を示す。又、図16に、冷間鍛造により省加工化したゴムブッシュのインナー／アウターの金具類を示す。

5. あとがき

NSXのサスペンション系部品のアルミニウム化について、簡単に述べたが、冒頭にも記した様に、サスペンション以外にも、あらゆる部位にア

ルミニウムを適用している。結果として、全体車重で約200kgの軽量化を達成しており、加速性能、ハンドリング性能等、スポーツカーとしての特性を大幅に向上させた。アルミニウムによる自動車軽量化の可能性を証明したと確信している。

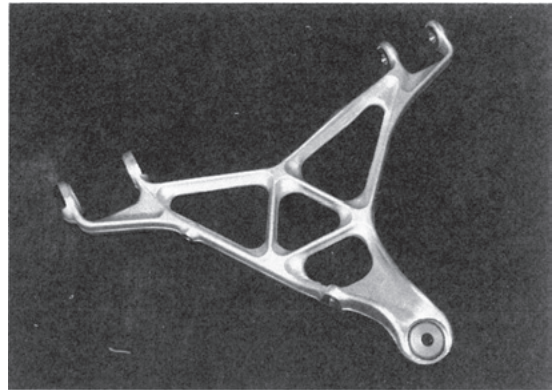


図14 LOWER ARM

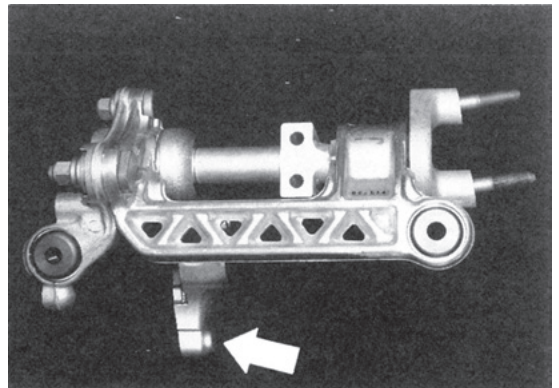


図15 COMPLIANCE PIVOT COMPONENT
(⇔ BRACKET B PIVOT COMPLIANCE)

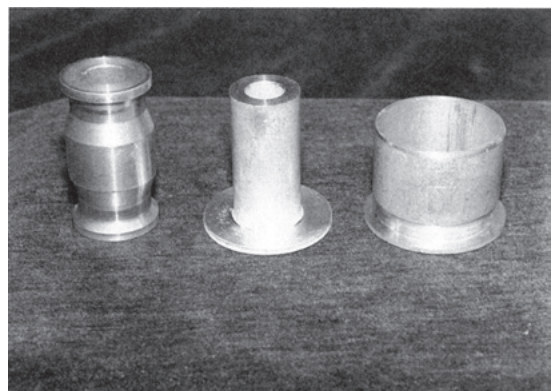


図16 BUSH COLLAR INNER/OUTER

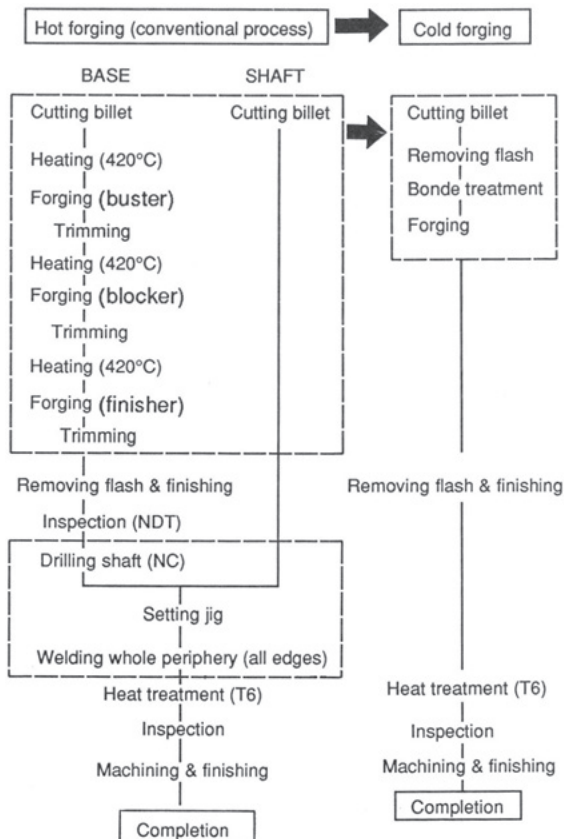


図13 冷間鍛造による工程短縮の一例
(BRACKET B PIVOT COMPLIANCE)

しかしながら、NSXは、大衆車とは若干異なる特殊車両に属するため、今後のアルミニウムの一般大量生産車までの適用拡大に対しては、まだ、様々な問題の解決が必要と考えられる。コスト、生産性さらには、廃車後のリサイクルと、今後の検討項目は多岐に渡っている。

現在、地球環境問題に端を発した燃費向上や、排出ガス規制等で自動車の軽量化が大きく脚光をあびているが、この解決手法のひとつとしても、NSXのアルミニウム軽量化技術は大きな方向性を示したと言える。今後は、早急に、アルミニウム拡大化の障害となる様々な問題点解決に着手することが必要と考える。

■著 者■



小 松 泰 典



新 井 彪 雄



阿 部 春 樹



佐 藤 正 和



中 沢 靖



入 江 卓 志