

二輪車用フレーム部品の軽量化設計解析技術の構築

Establishment of Analysis Method for Weight Reduction Design of Motorcycle Frame Parts

本 間 秀 樹*

Hideki HONMA

山 下 朗 弘*

Akihiro YAMASHITA

伊 藤 未 丈*

Mijo ITOH

土 屋 美 紀*

Miki TSUCHIYA

関 喜 孝*

Yoshitaka SEKI

要 旨

現在二輪車用フレーム部品の開発の中で、基本骨格検討は剛性、強度などの性能を満足した軽量化を達成するために、繰り返し検討をおこなって熟成している。この繰り返し検討工数を削減するために、各種構造最適化技術を検討した。位相最適化技術の設計領域を拡大する作業の代わりに、仮想的に剛性を上げる手法によって、剛性を考慮した軽量化のためのアイデアを簡易で高速に得る解析手法を構築した。

ABSTRACT

In the present development of motorcycle frame parts, basic skeleton layouts are designed by repeating some examinations in order to achieve weight reduction considering rigidity and strength targets. Various structural optimization technologies were studied to reduce the man-hours required for the repeated examination. Instead of expanding the design area of the topology optimization technology, an analysis was established by using a method of virtual rigidity enhancement. The analysis obtains ideas easily and rapidly for weight reduction in consideration of rigidity.

1. まえがき

二輪車開発において、商品性向上とともに商品魅力となる軽量化が常に求められている。また、最近では、環境問題に関係して燃費向上の観点からも軽量化の要望が高まっている。

このような要求に対して、最近では CAE を活用した部品形状の最適化技術の使用が一般化してきており、効果を上げている⁽¹⁾。

しかしながら、高度な解析技能が必要なため専任の解析技術者がおこなわなければならないことが多く、解析モデルの作成、解析、評価に多くの時間を要することなどにより、タイミングよく開発に反映することが難しい。特に二輪車のフレームは必要な強度、剛性を確保しつつ、エンジンや補器類を効率よく配置する必要があるため、開発初期段階の基本骨格の検討は、経験豊富な設計者のノウハウに依存するところが多い。

*二輪開発センター

したがって、基本骨格検討段階で軽量化のためのアイデアをタイミングよく得るための解析技術が望まれている。この要求に応えるために位相最適化技術を応用した新しい軽量化設計解析技術を開発した。本稿では、二輪車、All Terrain Vehicle(ATV)の車体部品を開発するための解析技術の概要について述べるとともにその解析事例を紹介する。

2. 開発のねらいと目標要件

二輪車の部品設計において、剛性、強度、振動などさまざまな性能評価項目を検討する必要があるが、その中でも構造の全体バランスへの寄与が大きい、剛性を考慮した軽量化技術の構築をねらいとする。

従来は、Fig. 1 に示す手法のように、過去の経験をもとに実機の繰り返しテスト、または CAE 解析を実施していた。開発効率を上げるためには、繰り返し作業を減らす必要がある。したがって、Fig. 1 の下段に示すターゲットプロセ

スを設定した。このターゲットプロセスでは、設計者自身がアイデアの検討をするために、解析時間が比較的短いこと、操作が容易であること、評価するために結果がわかりやすいことなどが求められる。

以上により下記の目標要件を設定した。

- (1) 剛性を考慮して軽量化するための形状のアイデアが得られること
- (2) トータル解析工数が1日(10時間)以内であること
- (3) 設計者が将来的に利用できる解析技術であること

3. 理論構築

3.1. 各種構造最適化手法の比較

軽量化のための従来の解析技術には、板厚最適化、形状最適化、位相最適化があり、Table 1にそれらの特徴を示す。板厚最適化は板厚を設計変数として、最適化をおこなうものである。しかし、近年、工業界では製品図の3Dデータ化普及に伴い、構造解析ではソリッドメッシュの使用が増加している。ソリッドメッシュでは、形状そのもので板厚を

表現するので、板厚という概念が存在しない。したがって、板厚を設計変数に設定できないので、板厚最適化の解析ができない。形状最適化では、設計変数にする寸法が数十以上ある場合に、多くの計算を必要とするので、モデル全体の解析には適さない。また、位相最適化では設計領域を定義するためのモデル作成工数が大きくなるという課題があるが、その代替として縦弾性係数を仮想的に高くする概念を位相最適化に導入し、新しい構造最適化解析手法の可能性について検討した。その詳細について、以下に述べる。

3.2. 従来の位相最適化

位相最適化とは、Fig. 2のように与えられた空間に設定された荷重、拘束条件のもとで、Fig. 3に示すような最適な配置(レイアウト)を求める手法である。どこに材料を集中的に配置すれば最も強い(剛性の高い)構造物ができるかを求めることができる。

位相最適化で利用する手法には、均質化法と密度法がある。ここでは、密度法について説明する。

構造解析におけるフックの式では、式(1)に示すように

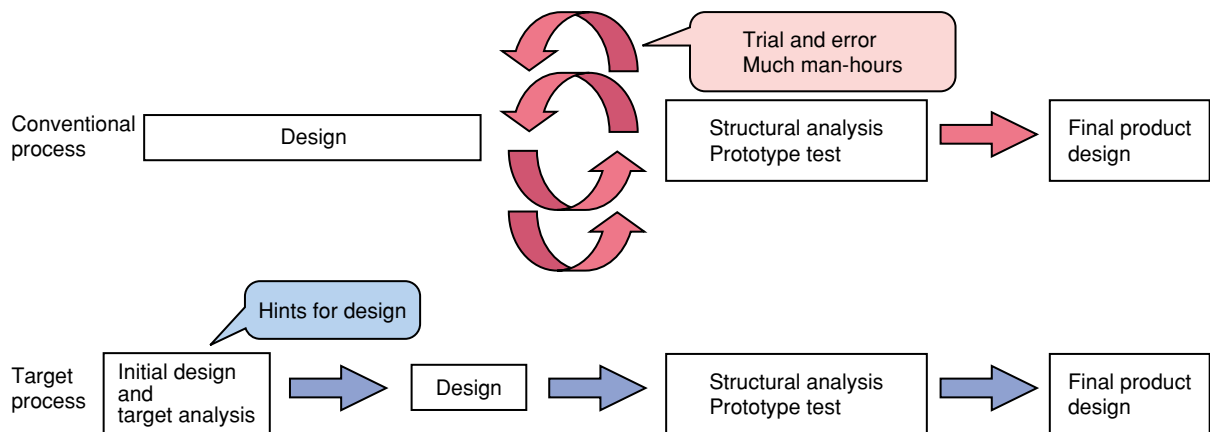


Fig. 1 Target process of design process

Method	Thickness optimization	Shape optimization	Topology optimization
Image			
Design variable	Thickness	Dimension	Density
Merit	Low analysis costs (Shell model) Easy to set design parameters Fast calculation time	Effective for finding ideal shapes	Low analysis costs Easy to set design parameters Fast calculation time
Demerit	Difficulty in analysis by solid mesh models	Large amount of man-hours Difficulty in design parameters setting Difficulty in analysis of complex shapes Long calculation time	Difficulty in design area setting of complex shapes

Table 1 Comparison of various structural optimization methods

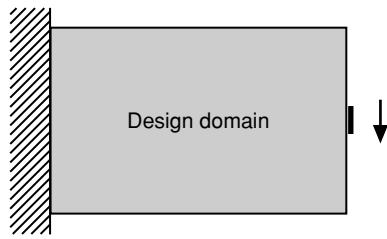


Fig. 2 Design domain for topology optimization analysis

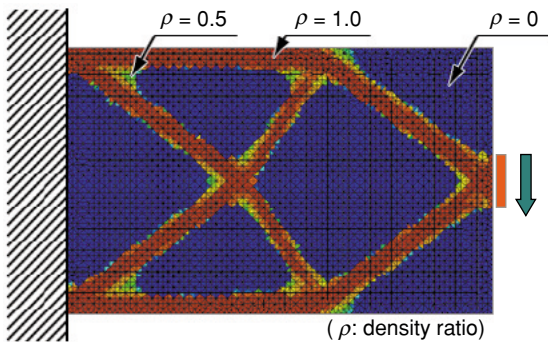


Fig. 3 Topology optimization using density approach

ひずみを変位と考えた場合、縦弾性係数が大きいほど、ひずみが小さくなるので変位が少ない。

$$\varepsilon = \sigma / E \quad (1)$$

ε : ひずみ

σ : 応力

E : 縦弾性係数

密度法は、式(2)に示すように材料の縦弾性係数が密度のべき乗に比例すると仮定して、各メッシュの密度比を設計変数として最適位相を求める方法である^{(2), (3)}。

$$E = \rho^N E_0 \quad (2)$$

E : 計算で使われる縦弾性係数

ρ : 密度

N : 乗数

E_0 : 設定した縦弾性係数

Fig. 3 のように各メッシュの密度を 0.0-1.0 に変化させることによって、計算で使われる縦弾性係数が $0.0 \cdot E_0$ に変動する。最適化としては、各メッシュが設計変数になり制約条件を満たしながら、目的関数を最大化もしくは最小化するために、繰り返し計算をおこなって最適解を求める。

3.3. 従来の設計領域設定機能の問題点

初期形状での密度を 1.0 と考えると、剛性を初期形状以上にするのは不可能である。そのため、Fig. 4 のように設計

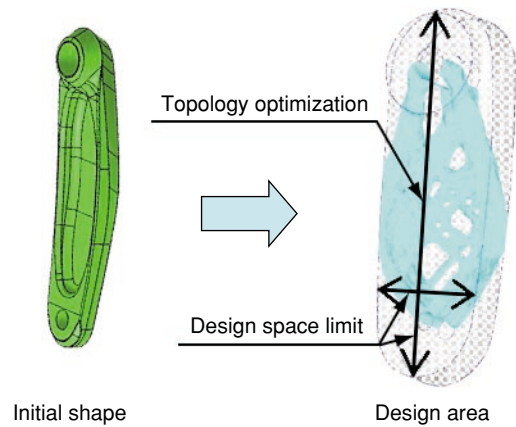


Fig. 4 Set design area

領域を拡大してから位相最適化をおこなう。しかし、単純な形状以外は、モデリング作業工数が大きいので、設計領域を拡大する作業は、トータル解析工数 1 日の目標要件を満たさない。また、二輪車フレームのような場合、エンジンや補器類の搭載があるため、設計領域の拡大は難しく最適化の効果が出しにくいという問題もある。

3.4. 概念を拡大した位相最適化手法

設計領域設定における問題点を解決する手法として考案したのは、設計領域を拡大する代替手法として、式(3)に示すように縦弾性係数を仮想的に高く設定する手法である。縦弾性係数を k 倍する。

$$E_{oi} = kE_0 \quad (3)$$

さらに、 k 倍に設定した縦弾性係数を式(2)に代入すると式(4)になる。

$$kE = \rho^N kE_0 \quad (4)$$

計算で使われる縦弾性係数は密度を 0.0-0.1 に変化させることによって、 $0.0 \cdot kE_0$ になり剛性も k 倍になる。たとえば、弾性係数を 2 倍にすることにより、変位量が 1/2 になり Fig. 5 のように仮想的に初期剛性を上げることができる。したがって、剛性に余裕が生まれるため、位相最適化手法を利用することが可能になる。仮想的に剛性を上げた結果なので、絶対値としての意味は持たない。しかし、結果は密度の濃淡

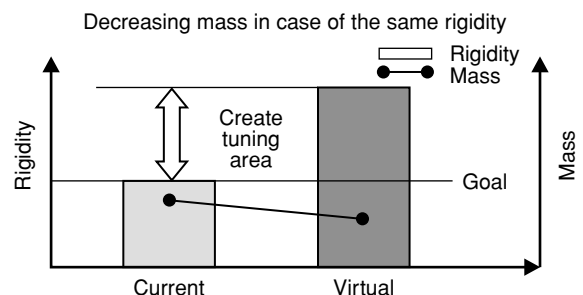


Fig. 5 Increasing virtual rigidity

で出力されるので、密度の濃い部分を強化必要部位、密度の低い部分を弱化必要部位として判断できる。いわゆる目的剛性に対する感度としてとらえることができる。計算としては、位相最適化をおこなっているが、結果の見方は感度になるので、この手法を位相感度解析と呼ぶことにした。感度の高い部位を強化し、低い部位を弱化することによって、軽量化が達成できる。もちろん、条件を変えて質量を最小限の増加で剛性向上を効率よくおこなう解析なども可能になる。開発の途中段階ではこのような必要性も多い。すなわち、質量と剛性を最適化における制約条件、目的関数として任意に設定することができる。また従来は、構造解析結果の応力図、変形図等を見ながら、対策案を総合的に考えるので、判断が困難であり、時間もかかっていたが、本解析手法では、密度分布から直接判断できるので、判断の間違いが減り時間短縮にもなる。

3.5. 応力対策手法と位相感度解析手法の比較

一般的に剛性向上を検討する場合、荷重がかかった状態において、応力の高い部分を補強する手法がとられる。この手法は間違いではないが、剛性と質量に対する手法としては、最適ではない。一方位相感度解析は、位相最適化手法いわゆる最適化問題であり、以下のように目的関数、制約条件、設計変数を設定し、繰り返し計算をおこないながら最適化していく手法である⁽⁴⁾。

目的関数：Min. {f(x)}

制約条件： $g_i(x) \leq 0 \quad i=1, 2, \dots, k$

設計変数： $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

したがって、応力対策手法より最適な形状を求める手法である。よって、位相感度解析は応力対策手法以上の効果を剛性と質量の観点で得ることができる。

4. 検証

ここで、3.4節で述べた解析手法の検証結果を二例示す。

4.1. プレート形状解析の検証

この例では、高応力部を対策する手法と位相感度による対策手法の比較を示す。位相感度の計算条件は以下の通りである。

(1) 設計変数：モデル全体

(2) 制約条件：剛性同等

(3) 目的関数：質量最小化

Fig. 6 に解析条件とそれぞれの解析結果を示す。右上が静解析の応力分布を示し、右下が位相感度解析結果である。赤い部分は感度が高いことを示し、一方、青い部分は感度が低いことを示す。パッチ追加で対策する場合は、両解析ともに赤い部分にパッチをあてた方が効果が大きい。Fig. 7に各解析結果から導いたパッチ形状を示す。パッチの質量は比

較のために同等とする。Fig. 8にその効果を示す。本解析手法が応力対策手法に対して、同一質量で剛性に関して20%近く高められる効果があることが示されている。この例は、質量を同等にしているが、剛性を同等にすれば剛性向上分の質量を下げられることになる。

4.2. フレーム部品形状解析の検証

この例では、解析結果の感度の高い部分、低い部分、中間の部分に補強パッチを貼った効果の確認結果を示す。計算条件は以下に示す。ここでは制約条件を二つ設定している。

(1) 設計変数：モデル全体

(2) 制約条件：ねじり剛性向上、横剛性同等

(3) 目的関数：質量最小化

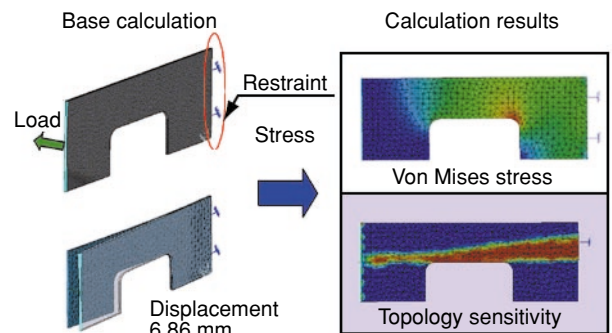


Fig. 6 Verification plate model

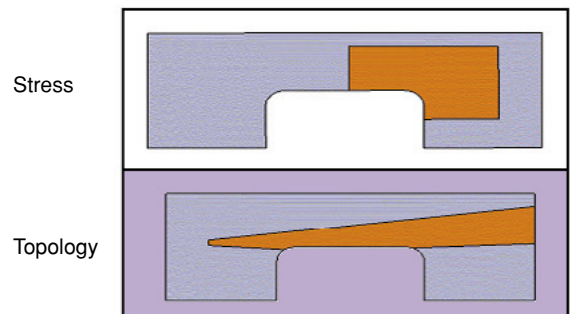


Fig. 7 Comparison of additional patch shapes

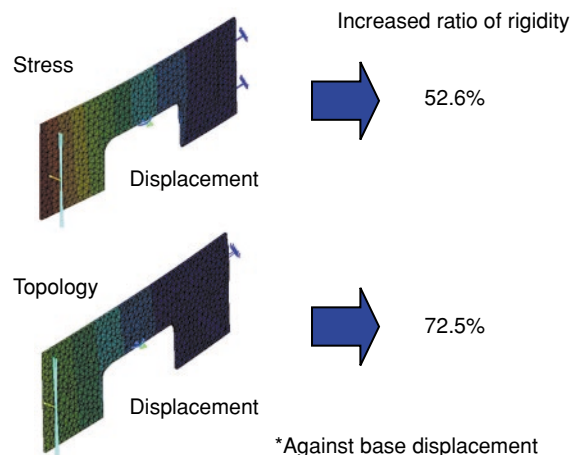


Fig. 8 Comparison of displacement

Fig. 9 に本解析の結果を示す。Fig. 10 に Fig. 9 から考案した感度の高、中、低、それぞれのパッチ図を示す。パッチ質量は比較のために同じ質量に設定した。Table 2にそれぞれの効果をまとめて示す。感度の高い場所で対策効率が高いことがわかる。また、感度の高いパッチでは、横曲げ剛性がわずかに低下しているが、一般的に、どちらかの剛性を向上すると、残りの剛性も向上するのが通例であるが、今回の結果は横曲げ剛性が低下している。感度としては、制約条件で設定した方向性と同じである。本例のように、方向性を考慮した各種剛性のチューニングに関しても有効である。

5. 適用事例

5.1. フレーム部品解析事例

この例では、スポーツ系のフレームを用いて、質量の増

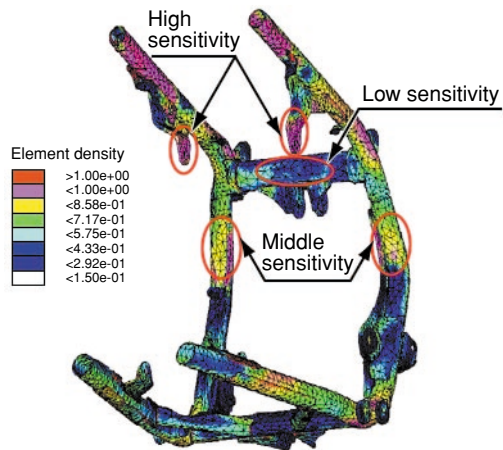


Fig. 9 Result of topology optimization sensitivity for conventional pipe frame

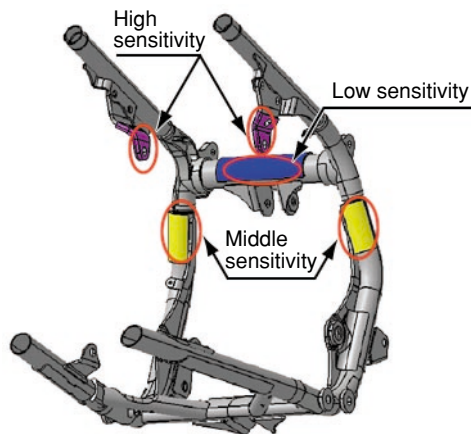


Fig. 10 Example of additional patches

Table 2 Verification effect of each patch

Sensitivity	Low	Middle	High
Torsional rigidity	0.03%	1.21%	4.31%
Lateral rigidity	0.32%	0.84%	-2.01%
Effect	Non	Small	Large

加を最小としてねらいのフレーム剛性を得るために解析した結果を説明する。計算条件は以下に示す。

- (1)設計変数：モデル全体
- (2)制約条件：ねじり剛性向上，横剛性同等
- (3)目的関数：質量最小化

Fig. 11は解析結果である。この結果から、赤、紫の部分が強化必要部位、青の部分が弱化必要部位となる。具体的には、板厚、径のチューニング、リブとパッチの追加、削除などが考えられる。場合によっては、骨格変更を検討する。ただし、他の要因、生技要件、強度、コストも合わせて検討する。従来は、強化必要部位、弱化必要部位がわからない、または間違っている場合もあったので、ねらい所がわかる効果は大きい。最終的には、対策案を入れた静解析をおこなって効果を確認する。対策案の事例を Fig. 12 に示す。この結果質量に対するねじれ剛性比で 10.7%の効率向上が確認できた。

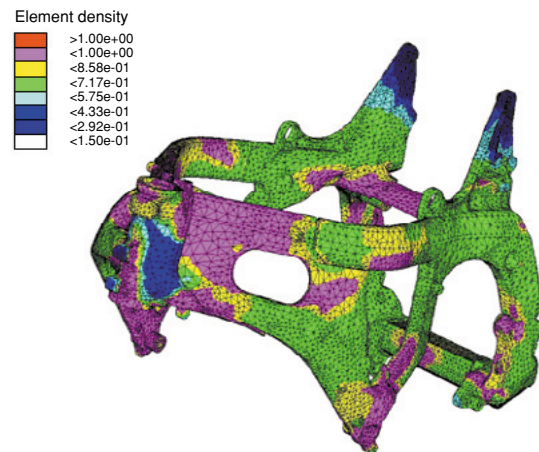
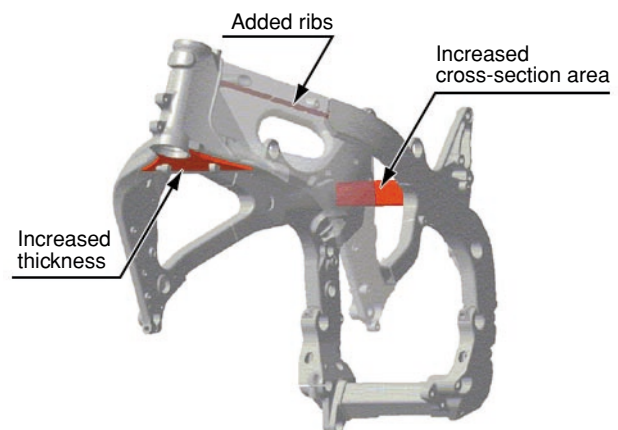


Fig. 11 Result of topology optimization sensitivity for box section frame



	Base	Modified
Torsional stiffness/Mass	100	110.7
Lateral stiffness/Mass	100	102.6

Fig. 12 Modification by using topology optimization sensitivity results

5.2. その他の解析事例

考案した位相感度解析は、フレームに限らず、剛性が必要な部品であれば適用可能である。Fig. 13はシート底板の解析事例の結果である。本来、リブの検討で設計領域を大きくとり、従来手法の位相最適化を実施するのが理想であるが、開発段階によっては、レイアウトと対策案対応時間の関係で変更できない場合が多々ある。そのような場合、本解析手法は有効である。解析結果をもとに、具体的にFig. 13に示した設計変更が可能な範囲内で検討する。たとえば、強化必要部位のリブ追加、厚肉化、弱化必要部位のリブ削除、薄肉化などが考えられる。

Fig. 11 と Fig. 13 で示した解析工数を Fig. 14 に示す。どちらも、静解析モデルが存在することが前提になるが、1日(10時間)以内に解析が可能である。最適形状に設計された部品では効果が少ない解析結果となる場合もある。通常、質量増を抑えた剛性のチューニング、または、剛性同等であれば、約 10-20%の軽量化が達成可能である。

また、本解析は、従来の静剛性モデルをベースに、モデルを変更することなく、位相感度解析用の設定をおこなうだけなので簡易化をおこなえば、専任の解析技術者を必要とせずに設計者自身が利用できる。

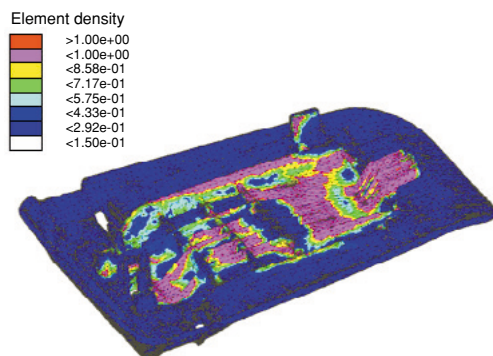


Fig. 13 Result of topology optimization sensitivity for seat bottom

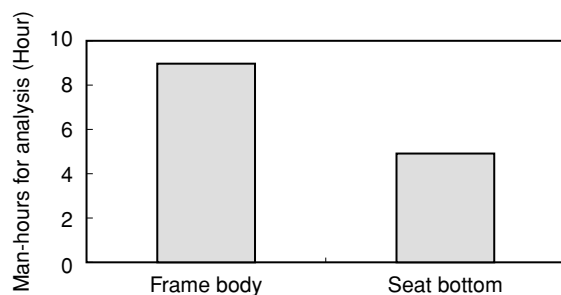


Fig. 14 Total man-hours for analysis

6. まとめ

位相最適化における設計領域拡大の代替として縦弾性係数を仮想的に大きくすることで、現在の形状における各部位の剛性に対する感度を求められることがわかった。

本解析技術を構築することによって、以下の結果を得た。

- (1) 剛性を考慮して軽量化するための形状のアイデアが得られる。
- (2) トータル解析工数が1日(10時間)以内であり、開発の流れに沿ってリアルタイムに検討することができた。
- (3) 適用した部品で剛性が同等であれば、約 10-20%の軽量化が達成可能であった。

本解析手法は、従来にない開発要望に合致した手法であり、二輪車部品だけでなく、さまざまな機械部品の設計にも適用できる技術であると考えられる。今後は、機能向上、簡易化、高速化を推進することによって、設計者自身が、利用できるようにしていきたい。

謝 辞

本解析手法を構築するにあたり、多大な協力を頂いたアルテアエンジニアリング株式会社の関係者の方々に対し、深く感謝の意を表します。

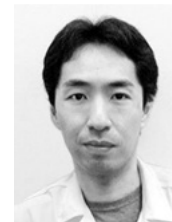
参考文献

- (1) 西方恵理：二輪車の軽量化への取組み，自動車技術，Vol.59 No.11, 20054826, p.72-76(2005)
- (2) 藤井大地，鈴木克幸，大坪英臣：ボクセル有限要素法を用いた構造物の位相最適化，Transactions of JSCE, Paper No.20000010(2000)
- (3) http://www.jsme.or.jp/dsd/dsd-sekkei/minutes/12/Ishii_2004-09-27.pdf
- (4) 川面恵司，横山正明，長谷川浩志：最適化理論の基礎と応用，東京，コロナ社，p.2-3(2000)

■ 著 者 ■



本間 秀樹



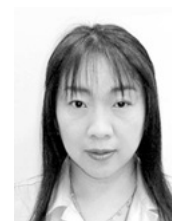
伊藤 未丈



関 喜孝



山下 朗 弘



土屋 美 紀