

トポロジー最適化技術を用いた設計手法の開発

Development of design method by using topology optimization

電子・機械技術部 機械・加工科 坂内駿平

トポロジー最適化技術を用いて、剛性を落とさずに軽量化した治具形状を導出した。得られた最適化形状をCAMに取り込んで加工パスを作成し、5軸マシニングセンタで治具を製作した。製作した治具にワークを取り付けて切削実験を行い、加工物の寸法測定と表面粗さ測定を行った。その結果、ベース治具と最適化治具との間の寸法に有意な差は見られず、たわみやびびり振動は発生していないことを確認した。

Key words: トポロジー最適化、治具、軽量化、剛性、マシニングセンタ

1. 緒言

部品の加工や組み立てなどの際、ワークを所定の位置に保持するために治具が用いられている。治具には加工の際の有害な振動やたわみを抑制するために高い剛性が必要である。そのため、治具は重量が重くなることが多く、段取り替えなどでの作業者の負担が大きという課題がある。

そこで、本研究ではトポロジー最適化技術を用いた治具の設計手法の開発に取り組んだ。トポロジー最適化とは、コンピュータシミュレーションの一つで、設定した制約の中で最大限の結果が得られる最適な形状を導出する手法である。今回は既存の治具をベースとし、剛性を落とさずに軽量化した治具の形状を導出した。導出された治具形状を5軸マシニングセンタで製作し、ワークを取り付けて切削実験を行い、使用に耐えるか検証した。

2. 治具の開発

2. 1. 治具の構成

ベース治具の外観を図1に示す。治具の材質はSS400で、円板と支柱で構成され、4か所のボルトで締結される。同様に、ワークは4か所のボルトで支柱に固定される。



図1 ベース治具の外観

2. 2. 解析手順

本研究では、始めに既存治具の構造解析を行い、構造解析の結果を基にトポロジー最適化を行った。ワーク形状は、JIS B6336-7:2018のM4_160試験体とした。治具とワークの形状を図2に示す。

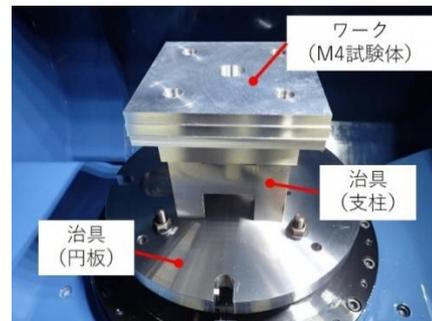


図2 ワークと治具の外観

2. 3. 切削抵抗の測定

構造解析を行う際に入力する荷重として用いるため、切削抵抗を測定した。切削抵抗は、後に実施する切削実験と同じ切削条件でアルミブロックを側面加工し、切削動力計(Kistler 9255C)を用いて測定した。切削条件を以下に示す。

- ・工具: $\phi 20$ [mm]スクエアエンドミル(4枚刃)
- ・工具回転数: 5000[rpm]
- ・切削送り: 1000[mm/min]
- ・ワーク材種: A5052

切削抵抗の概念図を図3に、測定結果を図4に示す。図4から、 $F_x=50$ [N]、 $F_y=35$ [N]、 $F_z=3$ [N]とした。

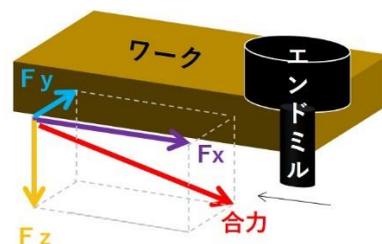


図3 切削抵抗概念図

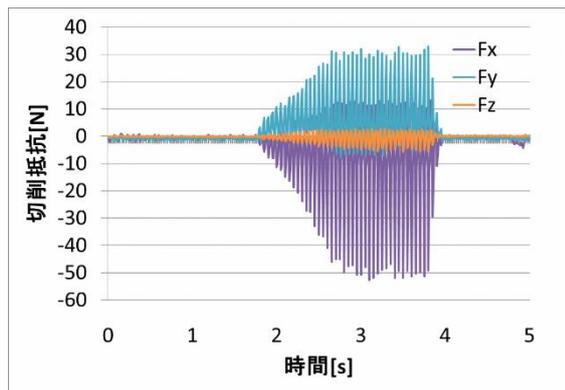


図4 切削抵抗測定結果

2. 4. 構造解析

得られたデータを基に、ベース治具の 3D モデルを 3DCAD (CATIA) で作成し、ANSYS で構造解析を行った。解析の境界条件は図 5 に示すように、円板治具のボルト穴 4 箇所とワークのボルト穴 4 か所を固定し、切削抵抗をワークの側面 4 面に付加した。治具のヤング率は 210[GPa]、ポアソン比は 0.3、密度は 7850[kg/m³] とした。得られた相当応力を図 6 に、変形量を図 7 に示す。

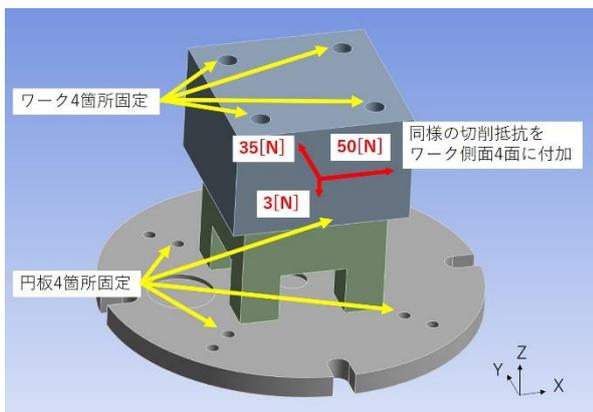


図5 境界条件

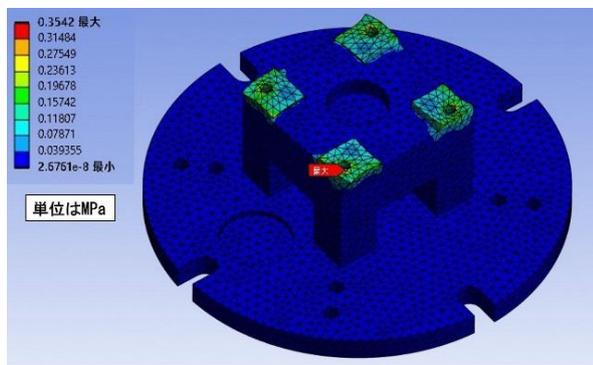


図6 ベース治具の相当応力解析結果

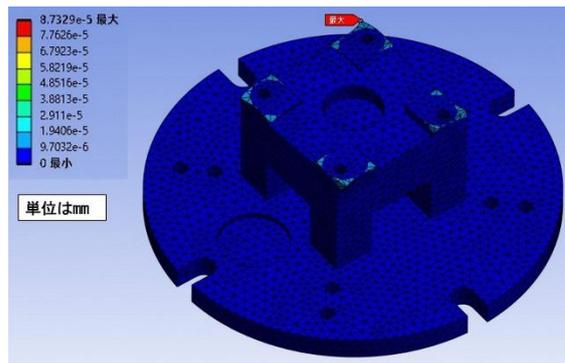


図7 ベース治具の変形量解析結果

2. 5. トポロジー最適化

構造解析の結果を基に、ANSYS でトポロジー最適化を行った。円板治具の設計領域は図 8 の紫の領域とし、赤色のボルト穴と座ぐり穴は除外領域とした。支柱治具の設計領域は図 9 の紫の領域とし、ボルト穴と座ぐり穴に加えて円板治具とワークの接触面を除外領域とした。また、除外領域の周辺はメンバー厚み 20mm 以上を確保する製造制約を設定した。最適化の条件を以下に示す。

- ・ 製造制約：メンバー厚み 20mm 以上確保
- ・ 目的関数：コンプライアンス最小化 (=剛性最大化)
- ・ 応答拘束：質量 40%削減 (初期重量比)

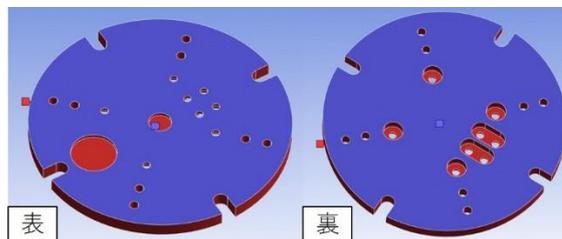


図8 円板治具の設計領域

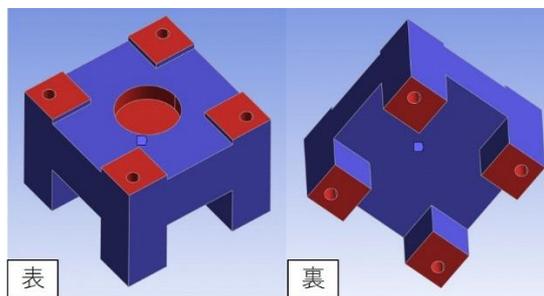


図9 支柱治具の設計領域

2. 6. 最適化結果

得られた最適化形状を図10、図11に示す。図9より、円板治具は表側よりも裏側の方が除去量が多くなっている。これは、応力が小さく剛性に影響が少ない裏側から優先的に除去されているためである。同様に、支柱治具は応力が大きい支柱の上部は除去量が少なく、応力が小さい裏側は除去量が多くなっている。

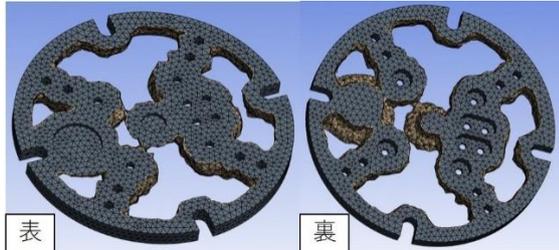


図10 円板治具の最適化形状

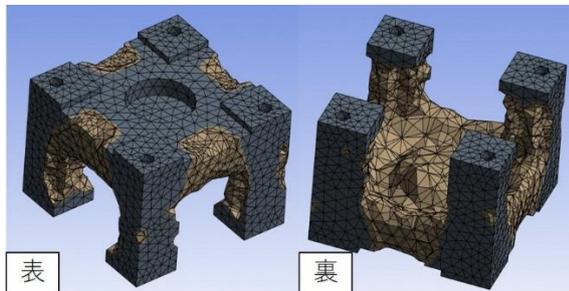


図11 支柱治具の最適化形状

2. 7. 最適化治具の評価

得られた最適化治具を STL 形式で出力し、前述の構造解析を行ってベース治具の相当応力と変形量を比較した。最適化治具の相当応力を図12に、変形量を図13に示す。相当応力、変形量共にベース治具と同等の分布を示しており、最大値も同等になっている事が分かる。この結果から、軽量化しても剛性が保たれていることを確認した。

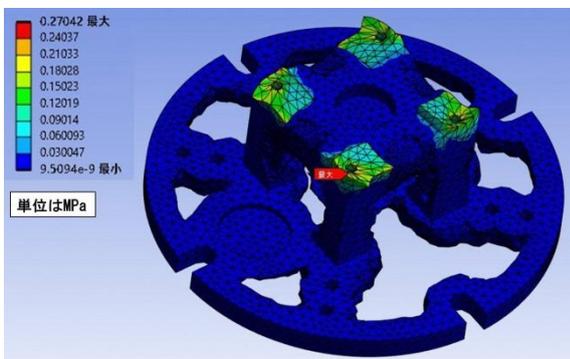


図12 最適化治具の主応力解析結果

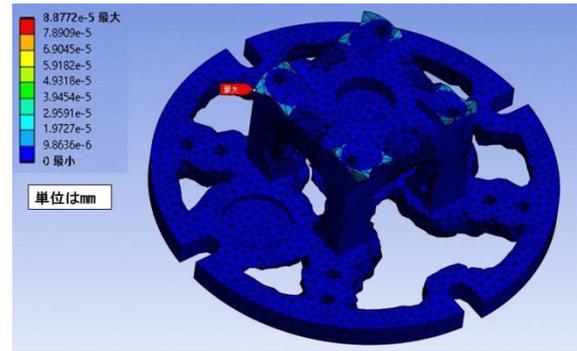


図13 最適化治具の変形量解析結果

2. 8. 最適化治具の製作

CAM ソフト (Master CAM) を用いて最適化治具の加工パスを作成した。加工は5軸マシニングセンタ (Matsuura MX-520) を使用した。製作した治具を図14に示す。重量を測定した結果、既存治具は 20.62 [kg]、最適化形状治具は 13.28 [kg] となり、重量を約 35% 削減することができた。



図14 製作した治具

3. 実験

3. 1. 切削実験

製作した治具にアルミブロックを取り付け、JIS B 6336-7_M4_160 試験体を製作した。同じ実験をベース治具でも行い、結果を比較した。切削条件を以下に示す。

- ・ワーク材種 : A5052
- ・工具 : $\phi 20$ [mm] スクエアエンドミル (4 枚刃)
 $\Phi 10$ [mm] スクエアエンドミル (2 枚刃)
- ・工具回転数 : 5000 [rpm] ($\phi 20$ mm エンドミル)
10000 [rpm] ($\phi 10$ mm エンドミル)
- ・切削送り : 1000 [mm/min]

3. 2. 寸法測定

JIS B 6336-7 に基づき、製作した M4 試験体を CNC 三次元座標測定機 (ミツトヨ CRYSTA-Apexs776) で測定した。測定箇所を図15に、測定結果を表1に示す。

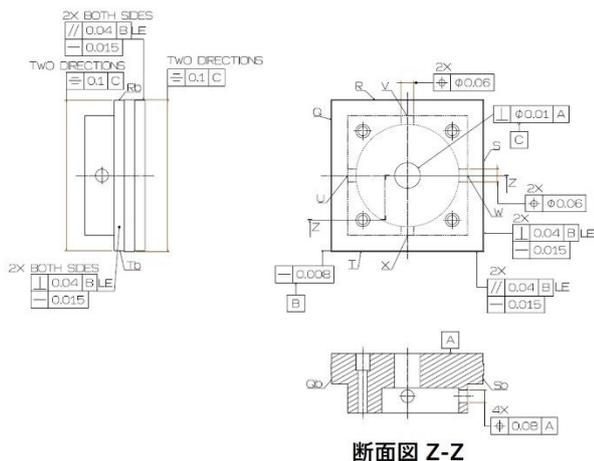


図 15 寸法測定箇所

表 1 寸法測定結果

試験事項	ベース治具 測定値[mm]	最適化治具 測定値[mm]	許容値 [mm]
側面Qの真直度	0.0003	0.0011	0.015
側面Rの真直度	0.0019	0.0017	
側面Sの真直度	0.0012	0.0016	
側面Tの真直度	0.0015	0.0011	
データム軸直線Cに対する T-R二面幅の中心面の対称度	0.0506	0.0229	0.1
データム軸直線Cに対する S-Q二面幅の中心面の対称度	0.1629	0.0046	0.1
データム平面Bに対する 側面Qの直角度	0.0082	0.0369	0.04
データム平面Bに対する 側面Sの直角度	0.0082	0.0369	
データム平面Bに対する 側面Rの平行度	0.0033	0.0036	
データム平面Bに対する 側面Tの平行度	0.0018	0.0042	0.015
側面Q ₀ の真直度	0.001	0.0009	
側面R ₀ の真直度	0.0018	0.0017	
側面S ₀ の真直度	0.0009	0.0012	
側面T ₀ の真直度	0.0013	0.0022	0.1
データム軸直線Cに対する Tb-Rb二面幅の中心面の対称度	0.0646	0.1018	
データム軸直線Cに対する Sb-Qb二面幅の中心面の対称度	0.012	0.0072	0.1
データム平面Bに対する 側面Q ₀ の直角度	0.0082	0.0369	0.04
データム平面Bに対する 側面S ₀ の直角度	0.0082	0.0369	
データム平面Bに対する 側面R ₀ の平行度	0.0017	0.0062	
データム平面Bに対する 側面T ₀ の平行度	0.0043	0.0029	0.08
データム平面Aに対する 穴Uの一方方向の位置度	0.0144	0.02	
データム平面Aに対する 穴Vの一方方向の位置度	0.0214	0.0306	
データム平面Aに対する 穴Wの一方方向の位置度	0.0021	0.0292	
データム平面Aに対する 穴Xの一方方向の位置度	0.0329	0.0198	
穴Wと穴Uとの軸ずれ	0.1338	0.0578	
穴Xと穴Vとの軸ずれ	0.1974	0.0093	0.06

3. 3. 表面粗さ測定

JIS B 6336-7には規定されていないが、びびり振動による切削面性状への影響を確認するため、製作したM4試験体の側面を表面粗さ測定機（SURFCOM 3000A）で測定した。測定箇所を図16に、測定結果を表2に示す。

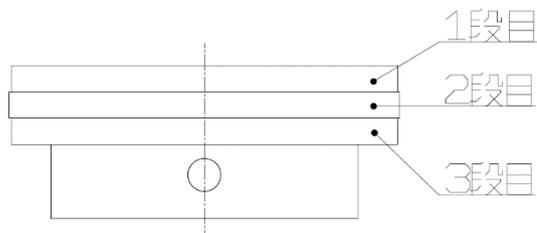


図 16 表面粗さ測定箇所

表 2 表面粗さ測定箇所

測定箇所	最適化治具	
	表面粗さRa測定値[μm]	ベース治具 表面粗さRa測定値[μm]
Q-1段目	0.14206	0.14852
Q-2段目	0.16103	0.15397
Q-3段目	1.78359	3.38743
R-1段目	0.15445	0.15845
R-2段目	0.16116	0.21086
R-3段目	1.75822	2.30282
S-1段目	0.10585	0.17318
S-2段目	0.15821	0.16536
S-3段目	2.09956	2.41526
T-1段目	0.18111	0.15723
T-2段目	0.17623	0.15789
T-3段目	3.95289	3.65534

4. 考察

4. 1. 最適化治具の評価

寸法測定結果と表面粗さ測定結果を比較した結果、ベース治具と最適化治具で有意な差は見られなかった。このことから、最適化治具でもたわみやびびり振動は発生せず、ベース治具と同等の性能を有していることが確認できた。

4. 2. マシニングでの最適化形状の再現性

今回製作した最適化治具の重量はトポロジー最適化で設定した重量 40%削減に届かなかった。理由としては、最適化治具にアンダーカット部やマシニングセンタの工具が入らない箇所があり、切削できない箇所があったためであると考えられる。マシニングによる切削でトポロジー最適化形状を製作する場合は、トポロジー最適化で得られた形状をCADで修正し、切削しやすい形状に手直しすることが望ましいと考えられる。

4. 3. 最適化治具の加工時間

今回製作した最適化治具の加工にかかった所要時間は、約 50 時間であった。トポロジー最適化で得られた形状は STL データで出力されるため、面の数が多く加工パスも複雑になる。その結果、マシニングセンタで加工する際に多くの時間が掛かるため、前述の形状再現性の観点からもトポロジー最適化で得られた形状を CAD で修正し、切削しやすい形状に手直しすることが望ましい。

5. 結言

- ・トポロジー最適化を用いることで、ベース治具から重量を約 35%削減することができた。
- ・軽量化した治具にワークを取り付けて切削実験を行った結果、切削物の寸法精度と表面粗さは既存治具と同等であり、軽量化してもたわみやびびり振動は発生していないことが確認できた。
- ・最適化形状にアンダーカットや工具先端 R よりも小さい形状が含まれていると、マシニングによる切削では最適化形状を完全に再現することは難しく、目標重量未達となる可能性がある。
- ・マシニングによる切削でトポロジー最適化形状を製作する際は、得られた最適化形状に CAD で手を加えて切削しやすい形状に手直しすることが望ましい。