



# 入門講座

## 電磁鋼板入門－4

# モータに要求される電磁鋼板の特性とその選定

## Characteristics and Selection of Electromagnetic Steel Sheets for Electric Machines

深山義浩

Yoshihiro Miyama

三菱電機（株）

先端技術総合研究所

専任

## 1 はじめに

無方向性電磁鋼板は主としてモータや発電機などの回転電機や、変圧器などの静止器のコアとして利用される<sup>1)</sup>。モータや発電機は電気エネルギーと機械エネルギーを相互に変換する主要な機器であり、エアコンや冷蔵庫などの家電、電鉄や自動車などの交通、加工機や搬送機などの産業機器など、我々の生活のあらゆる面で欠かせない機器である。モータを構成する主たる材料は、銅、鉄、磁石（永久磁石モータの場合）、アルミであるが、鉄はコアとして使用され、モータでは回転に伴ってコア内を通過する磁束の向きが変わるため等方性材料が望ましく、主として無方向性電磁鋼板が用いられている。

モータには様々な用途があるため、用途ごとにモータの要求性能が異なり、それに応じて電磁鋼板に要求される特性も

異なる。また、同じ用途のモータであっても、固定子コアと回転子コアでは要求される特性が異なる。そこで本稿では、2章でモータの性能に対する、固定子コアと回転子コアに用いる無方向性電磁鋼板に求められる特性をまとめる。そして3章では、異なる特性の無方向性電磁鋼板を適用した場合にどのようにモータ性能の差が現れるかを示し、モータに求められる性能に対していかに無方向性電磁鋼板が選定されるかの例を紹介する。

## 2 モータと電磁鋼板に要求される特性

モータは様々な用途に用いられており、それぞれの用途に応じて必要とされる性能とその重要度が異なる。下記にモータに要求される主要な性能と、その性能に関連する電磁鋼板の特性を示す。また、表1には、下記で述べるモータの特性

表1 モータに要求される性能と電磁鋼板に要求される特性の関係

|             |       |          | モータの性能     |    |                 |     |
|-------------|-------|----------|------------|----|-----------------|-----|
|             |       |          | トルク密度・出力密度 | 効率 | トルクリップル・コギングトルク | コスト |
| 無方向性電磁鋼板の特性 | 固定子コア | 比透磁率     |            | ○  |                 |     |
|             |       | 飽和磁束密度   | ○          |    | ○               |     |
|             |       | ヒステリシス損失 |            | ○  |                 |     |
|             |       | うず電流損失   |            | ○  |                 |     |
|             |       | 応力劣化     | ○          | ○  | ○               |     |
|             |       | 磁気異方性    |            |    | ○               |     |
|             |       | 引張強度     |            |    |                 |     |
|             |       | コスト      |            |    |                 | ○   |
|             | 回転子コア | 比透磁率     |            | ○  |                 |     |
|             |       | 飽和磁束密度   | ○          |    |                 |     |
|             |       | ヒステリシス損失 |            | ○  |                 |     |
|             |       | うず電流損失   |            | ○  |                 |     |
|             |       | 応力劣化     | ○          | ○  |                 |     |
|             |       | 磁気異方性    |            |    |                 |     |
|             |       | 引張強度     | ○          |    |                 | ○   |
|             |       | コスト      |            |    |                 | ○   |

と、固定子コアと回転子コアにそれぞれ要求される無方向性電磁鋼板の特性の関係を示す。

## 2.1 トルク密度・出力密度

小型化や軽量化のために、モータには高トルク密度や高出力密度が要求されることが多い。モータの体格は最大トルクもしくは最大出力で決まるため、特に電磁鋼板の飽和磁束密度が高ければ、小さい体格でトルクを出すことができる<sup>2)</sup>。また、回転子コアに用いられる電磁鋼板では、回転子の回転に伴って遠心力が発生し、それによって回転子コアが破損することを防ぐ必要があることから、十分な強度が要求される。例えば、図1に軸に垂直な断面の1極分の扇形部分を示すように、埋込磁石同期モータでは回転子コアによって永久磁石を保持する必要があるが、保持構造部は磁気回路としては永久磁石の磁束のムダである漏れ磁束をつくる部分となる。このため、強度を得るために保持構造部の幅を広くするとトルクの低下を招く。したがって、回転子コアに使用する電磁鋼板には、引張強度が高いことが要求される。

## 2.2 効率

モータで消費される電力は、2006年には世界の電力のうちの約46%にのぼると報告されており<sup>3)</sup>、モータを高効率化することは世界の電力使用量を削減するためにも重要である。家電や電気自動車などでは、消費電力が低いことが商品価値の1つにもなる。また、設置スペースや重量を低減するために高トルク密度化、高出力密度化していくと、発熱密度が上昇するため、損失を低減して熱成立させるという面でも重要である。

モータで発生する損失の内、鉄損は大きく2つに分けら

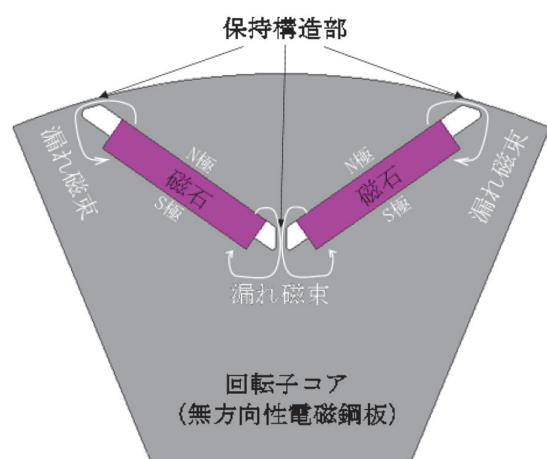


図1 埋込磁石同期モータにおける電磁鋼板による磁石保持構造と永久磁石の漏れ磁束 (Online version in color.)

れる。1つは交番磁場を印加した際の磁気特性のヒステリシスによって生じるヒステリシス損失 (ヒス損)、もう1つは交番磁場によるうず電流で生じるジュール熱であるうず電流損失 (うず損) である。

ヒス損は電磁鋼板をコア形状に打抜く際に発生する残留ひずみや、フレーム等に圧入・焼嵌めする際に発生する圧縮応力などによって電磁鋼板単体の特性よりも悪化することが知られている<sup>4)</sup>。打抜きによる加工劣化に関しては焼鈍により特性を改善することができる<sup>5,6)</sup>。圧縮応力はフレーム等が存在するため焼鈍等では改善できないが、6.5%シリコン材などを使用することで劣化を低減することができることが知られている<sup>7)</sup>。焼鈍は追加の加工となるためモータのコスト増大要因になる。また、6.5%シリコン材は打抜き性の課題などがあり、ヒス損を低減するために電磁鋼板には応力に対する劣化の少なさと、加工のしやすさの両立が求められる。

うず損は周波数の2乗に比例するため、回転数が高くなるに従い加速的に増加していく。うず損を低減するためには、うず損の小さい電磁鋼板を使うことが有効でありその手法の一つが薄板化である。実際、近年の自動車主機用などでは、板厚0.3 mm以下の電磁鋼板を使用するなど、薄板化が進んでいる。しかしながら、板厚が薄くなるにつれてカシメによる締結が難しくなったり、鉄の占積率が低下しトルク密度が低下したり、電磁鋼板のコストアップや積層枚数の増加による加工コストの上昇などが発生する。薄板材の低コスト化や加工技術の進化が必要になる。

## 2.3 トルクリップル・コギングトルク

振動・騒音の低減や、位置決め精度の向上のために、モータにはトルクリップルやコギングトルクが小さいことが要求される。

モータは円環状の固定子・回転子を持つため、特性が回転対称になるように無方向性電磁鋼板が用いられることが多い。しかし、無方向性電磁鋼板にもある程度の異方性が存在するために、モータコアの周方向の特性の不均一性につながり、結果としてトルクリップルやコギングトルクを増大させることが知られている。文献8では、完全な等方性である場合に対して2次元磁気異方性を考慮すると、コギングトルクが48倍にも増加することが解析にて示されており、実測においてもコアを平行積みにした場合と回し積みにした場合の比較により、電磁鋼板の2次元磁気異方性によってコギングトルクの2次成分が20倍に増加することが示されている。トルクリップルやコギングトルクを低減するためには、無方向性電磁鋼板の等方性の向上が有効になる。

## 2.4 コスト

電磁鋼板はモータの主要構成材料であるため、モータコストに占める割合も高い。実際にモータに使用される電磁鋼板以外にも、円環状の固定子コアと回転子コアを製造するためには、余白となる電磁鋼板も存在し、歩留まりとして現れる。電磁鋼板のコスト自体を低減することも求められるが、歩留まり向上のために分割コア<sup>9)</sup>やポキポキモータ<sup>10)</sup>などが提案されている。

また、埋込磁石モータでは、永久磁石がモータコストに占める割合が高くなるが、2.1節で記載したように、保持構造部が磁石磁束のムダを発生させる。そのため、引張強度の強い電磁鋼板を用いて保持構造部でムダとなる磁石磁束を減らすことで、永久磁石の使用量を低減することができるため、コストメリットとなり得る。

## 3 電磁鋼板の選定事例

ここでは、モータの要求性能に対する電磁鋼板の選定の一例を示す。表2のモータ諸元に示すように、検討の題材とするモータの固定子外径は $\Phi 200$  mm、コア軸長100 mmの8極48スロット分布巻モータである。また、永久磁

表2 検討モータの諸元

| モータ形式       | 埋込磁石同期モータ            |
|-------------|----------------------|
| 相電流         | 400 Arms             |
| 固定子直径       | $\Phi 200$ mm        |
| コア軸長        | 100 mm               |
| 極数スロット数     | 8極48スロット             |
| 巻線形式        | 全節分布巻                |
| 1スロット導体数    | 8本                   |
| 結線          | Y結線2並列               |
| 回転子磁石配置     | 2重V字配置               |
| 1極あたりの磁石断面積 | $141.7 \text{ mm}^2$ |
| 固定子・回転子コア材料 | 表3記載                 |

表3 検討電磁鋼板の諸元

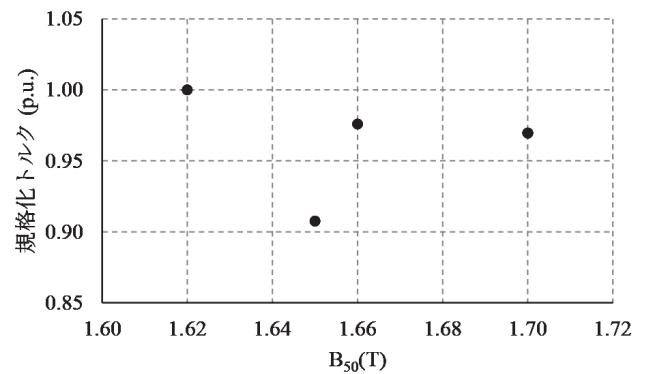
|                         | A    | B    | C    | D    |
|-------------------------|------|------|------|------|
| 厚さ (mm)                 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| 磁束密度 $B_{50}$ (T)       | 1.62 | 1.65 | 1.66 | 1.70 |
| 鉄損 $W_{15/60}$ (W/kg)   | 2.10 | 4.40 | 2.30 | 4.40 |
| 密度 ( $\text{kg/dm}^3$ ) | 7.60 | 7.70 | 7.65 | 7.75 |
| 降伏強度 (MPa)              | 432  | 278  | 398  | 296  |

石が回転子コアに埋め込まれた埋込磁石同期モータであり、磁石は2重のV字に配置されている<sup>11)</sup>。このモータにおいて、固定子外径、コア軸長、磁石量を一定とし、固定子コアおよび回転子コアに表3記載の4種類の電磁鋼板を用いた場合に、回転子強度が成立する条件のもとでトルクを最大化するようにモータ断面寸法の形状最適化を行った。なお、表3に示す4種類の電磁鋼板はいずれも板厚0.35mmでグレード違いにより、磁束密度 $B_{50}$ 、鉄損 $W_{15/60}$ 、降伏強度が異なる。

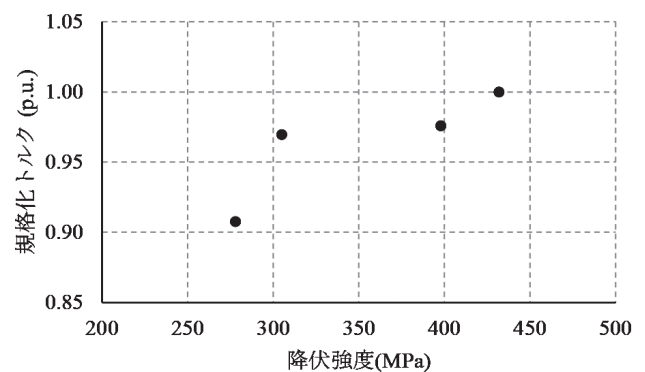
表4に固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を使う前提で形状最適化を行った際の規格化トルクと最高効率の解析結果を示す。また、図2に、規格化トルクの解析結果と $B_{50}$ および降伏強度の関係を示す。なお、規格化トルクは電磁鋼板Aを使用したときの最大トルクで各電磁鋼板を使用した際の最大トルクを規格化したものであり、効率は正弦

表4 固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いた場合の解析結果

| 電磁鋼板   | A     | B     | C     | D     |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 規格化トルク | 1.00  | 0.91  | 0.98  | 0.97  |
| 効率     | 98.1% | 97.3% | 98.0% | 97.8% |



(a) 規格化トルクと  $B_{50}$  の関係



(b) 規格化トルクと降伏強度の関係

図2 固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いた場合の規格化トルクの解析結果の傾向

波電流を通電した場合のものである。表4から電磁鋼板Aを用いた場合が最もトルクが高く効率も高いことがわかる。図2から、規格化トルクの大きさは電磁鋼板の磁束密度 $B_{50}$ の増加に応じて高くなり降伏強度に応じて向上していることがわかる。これは、図3と図4にそれぞれ示した保持構造部の幅に対する降伏強度と規格化トルクの関係のように、降伏強度の高い電磁鋼板を用いた場合には保持構造部の幅が小さくなり、2.1節で説明したように本検討のような磁石量を一定とした場合には保持構造部の幅が減少すると回転子コア内で短絡する磁石の磁束が減少し、固定子に鎖交して有効に用いられる磁石磁束が増加するためである。

図5に示すように、効率は電磁鋼板の鉄損 $W_{15/60}$ と相関が高いことが確認できる。完全に比例はしていないが、これは形状最適化後の磁石の位置によって、モータに発生する磁束の高調波分布が変わり、損失が変化したためである。

次に表5に回転子コアに電磁鋼板Aを用いた場合に固定子コアに用いる電磁鋼板を変えて形状最適化を行った際のトルクと最高効率の解析結果を示す。また、図6に、規格化トルクの解析結果と $B_{50}$ の関係を示す。なお、規格化トルクは電磁

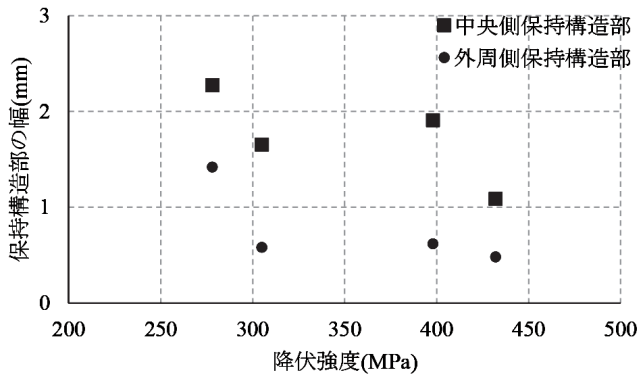


図3 固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いた場合の降伏強度と保持構造部の幅の関係

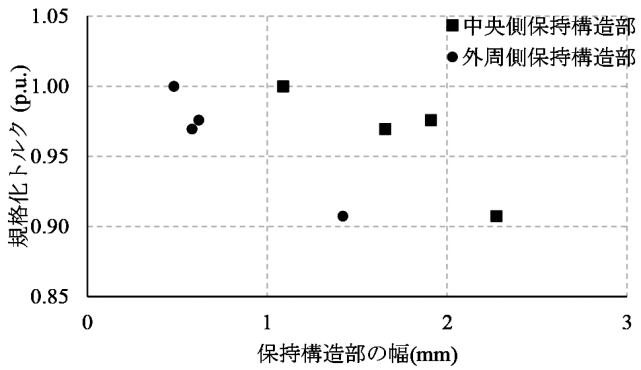


図4 固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いた場合の規格化トルクと保持構造部の幅の関係

鋼板Aを使用したときの最大トルクで各電磁鋼板を使用した際の最大トルクを規格化したものであり、効率は正弦波電流を通電した場合のものである。この場合では固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いた場合の結果 (図2 (a)) とは異なり、固定子コアに電磁鋼板Aを用いた場合が最も規格化トルクが小さくなっており、規格化トルクの大きさは電磁鋼板の磁束密度 $B_{50}$ の増加に応じて高くなっていることが確認できる。これは回転子コアを電磁鋼板Aで一定としたため得られる磁石磁力が等しくなったことで、固定子コアの電磁鋼板の磁束密度の影響が大きくなったためである。図7に示すように、効率は固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いた場合の検討結果 (図5) と同様に、固定子コアの鉄損との関係が高くなっている。

これらの検討結果をもとに電磁鋼板の選定について説明す

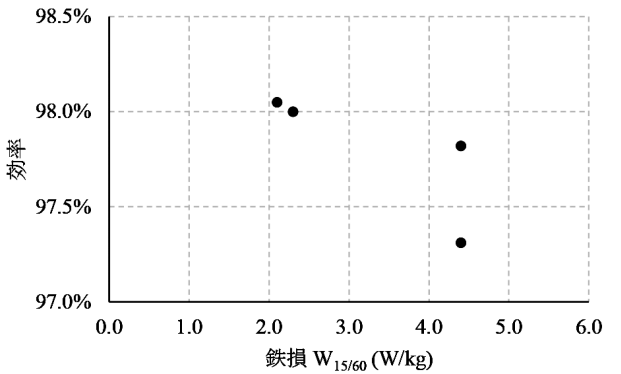


図5 固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いた場合の鉄損 $W_{15/60}$ と効率の関係

表5 回転子コアに電磁鋼板Aを用いた場合の解析結果

| 電磁鋼板   | A     | B     | C     | D     |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 規格化トルク | 1.00  | 1.02  | 1.02  | 1.03  |
| 効率     | 98.1% | 97.8% | 98.1% | 97.9% |

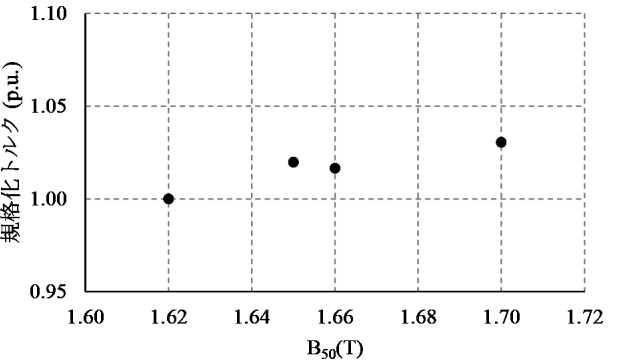


図6 固定子コアと回転子コアに異なる電磁鋼板を用いた場合の規格化トルクの解析結果と $B_{50}$ の関係



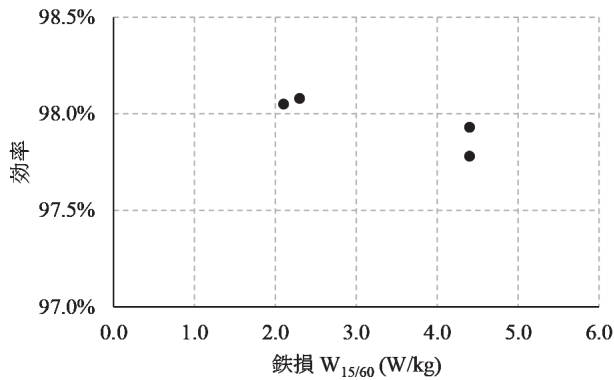


図7 固定子コアと回転子コアに異なる電磁鋼板を用いた場合の鉄損  $W_{15/60}$  と効率の関係

る。まず、固定子コアと回転子コアに同じ電磁鋼板を用いるか別の電磁鋼板を用いるかについては、同じ電磁鋼板が使用されることが多い。これは、別々の材料を使用する場合、固定子コアの円環内側の材料を捨てることになり、材料歩留が悪化し、コストアップになることが多いからである。これを防ぐために、固定子コアと回転子コアを同じ電磁鋼板から打ち抜く、共取りが行われることが多い。

これに対して、歩留悪化に対するメリットがある場合や分割コア<sup>9)</sup>などにより歩留悪化を防ぐことができる場合には、別々の電磁鋼板が使用される場合がある。回転子コア材料には強度が求められるものの、効率への寄与が固定子コアに比べて低い場合、回転子コアに板厚の厚い電磁鋼板など、固定子コアに比べて低グレードの材料を適用してコストメリットを出すことがある。しかしながら回転子コアに強度の低い材料を適用する場合、表4と図2 (b) に示すように最大トルクが低下してしまう。これを防ぐにはモータの体格を大きくするか、磁石量を増やすかが考えられるが、どちらの方法もコスト面でデメリットになり得る。

固定子コアに用いる電磁鋼板の特性はモータの特性に直接的に影響しやすい。表5に示したように、飽和磁束密度の高い電磁鋼板を選択することで数パーセントトルクが向上する。したがって体格の要求が厳しい場合には飽和磁束密度の高い電磁鋼板を選択することで設計が有利になりやすい。一方で、効率に関しても0.3%程度の影響があることが確認できる。効率要求が厳しい場合には低損失な電磁鋼板を選択することが考えられる。低損失な電磁鋼板はコストアップする方向であるので、他の効率向上手段（電磁気設計変更、焼鈍、体格アップ等）を採用した場合と比較して最も費用対効果の高い方法を採用することになる。

## 4 おわりに

モータに要求される電磁鋼板の特性とその選定と題し、モータと電磁鋼板に要求される性能の種類と関係性および、電磁鋼板の選定事例について解説した。モータに要求される特性と電磁鋼板に要求される特性は密接に関係しており、いくつかの特性は設計技術や製造技術で代替できるものの、電磁鋼板の特性が底上げされることでモータの特性も底上げされる。近年の電動化の流れの中でモータの需要が増加するとともに、モータに要求される性能も非常に高くなってきている。電磁鋼板の性能向上は、モータ性能をトレードオフ設計に陥らずに向上できるキーとなる技術であるので、今後もモータに要求される性能に適した電磁鋼板の進化に期待したい。

### 参考文献

- 1) JFE スチール (株) カタログ, JFE の電磁鋼帯 JFE G-コア, JFE N-コア.
- 2) JFE スチール (株) 編: JFE 技報, 47 (2021), 82.
- 3) P.Waide and C.U.Brunner: Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, International Energy Agency Working Paper, (2011).
- 4) 山本健一, 霜村英二, 山田一夫, 佐々木堂: 電気学会論文誌A, 117 (1997) 3, 311.
- 5) A.Boglietti, A.Cavagnino, L.Ferraris and M.Lazzari: IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2003, (2003) 1, 503.
- 6) M.Oka, T.Ogasawara, N.Kawano and M.Enokizono: IEEE Trans. Magn., 50 (2014) 11, 1.
- 7) 尾田善彦, 平谷多津彦, 笠井勝司, 大久保智幸, 千田邦浩, 千葉明: 電気学会論文誌D, 135 (2015) 12, 1199.
- 8) 大穀晃裕, 山口信一, 都出結花利: 電気学会論文誌D, 126 (2006) 12, 1712.
- 9) M.Inoue, J.Kitao, Y.Miyama, M.Hazeyama, H.Isoda, H.Arita, K.Nishizawa, T.Nishimura and M.Nakano: IEEE Journal of Industry Applications, 11 (2022) 3, 388.
- 10) 中原祐治: パワーエレクトロニクス研究会論文誌, 28 (2003), 2.
- 11) F.Momen, K.Rahman and Y.Son: IEEE Transactions on Industry Applications, 55 (2019) 1, 376.

(2022年12月21日受付)