

白色発光ダイオードの基礎と応用

—— 外科手術用白色 LED ゴーグルとベンチャー起業 ——

島田 順一*・川上 養一**

The Innovations with the Medical White LED Goggles and the Breakthrough for New Business

Junichi SHIMADA* and Youichi KAWAKAMI**

We conducted the world's first surgery with LED lighting using these goggles on September 11, 2000 at the Kyoto Prefectural Yosanoumi Hospital. The procedure was to create an internal shunt for a patient with chronic renal failure. The distance between the surgeon's eyes and the surgical field was only about 30 cm, and it was necessary for the surgeon to stay very close in order to use the LED, which was not very bright at that time. Around the same time, this idea was accepted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology's Year 2002 University Venture Generation Support System. The idea was published in a report entitled: "The development of power white LED modules: The evolution of lighting in the 21st century". The next is "lighting at the diva status at diva gate" and the "innermost sanctuary in the main hall" at "Kiyomizudera in Kyoto". YANCHERS Corporation was founded on 25th March, 2005.

Key words: LED, surgery, goggles, Kiyomizudera, YANCHERS

窒化物半導体系の可視短波長発光ダイオード (LED: light emitting diode) の波長域の拡大, 高輝度化, 高効率化等の性能向上は近年めざましいものがある。それを用いた白色 LED も開発され, 従来の電球や蛍光灯をこれら固体発光素子で置き換えていこうという照明革命が始まるとうとしている。しかしながら, 1999 年当時, 白色 LED の効率は, 市販のもので 30 lm/W, 実験室レベルのトップデータで 60 lm/W 程度であり, 電球の効率は凌駕しているものの, 蛍光灯の効率 (100 lm/W 程度) には及ばず, 効率向上へ向けた研究が重要な課題となっていた。しかも, 1 lm あたりのコストは, 旧来のガラス管タイプのランプ光源のほうが圧倒的に安価であり, 現状では白色 LED が一般照明に参入していくには価格的には時期尚早の段階にあった。2006 年時点でも, 大光量の LED 照明装置はまだまだ高価である。あたらしい固体照明デバイスでしかなし得ない高付加価値のニッチの市場における経験を集積しつ

つ前に進むという, 挑戦的な創造なしには LED 照明の実用の世界は開けないと考えている。本稿では, 現状をふまえつつ, 1) 白色 LED を用いたゴーグルライトの開発, 2) 内視鏡手術への応用, 3) 特殊照明用途への挑戦とベンチャー企業創業へ, と今までの歩みを整理してみたい。

1. 白色 LED を用いたゴーグルライトの開発

ことのはじまりは, 1999 年の京都大学ベンチャービジネスラボラトリーの忘年会における京都大学の川上養一・藤田茂夫両先生との出会いであった。筆者は外科医として, 体の奥のほうを見る必要があるときに, 手術室の天井のライトだけではなかなか十分な光が得られず, 手術対象が確認しにくいことを感じていた。このことを両先生に話すと「白色 LED という明るい電球みたいなものがあって…まあ, 21 世紀の照明革命や」と教わったことから, 筆者の LED 人生が始まった。

* YANCHERS(株); 京都府立医科大学心臓血管呼吸器制御外科学 (〒602-8566 京都市上京区河原町広小路梶井町 465 番地)
E-mail: shimajun@beige.plala.or.jp

** YANCHERS(株); 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8245 京都市西京区御陵大原 1-36)

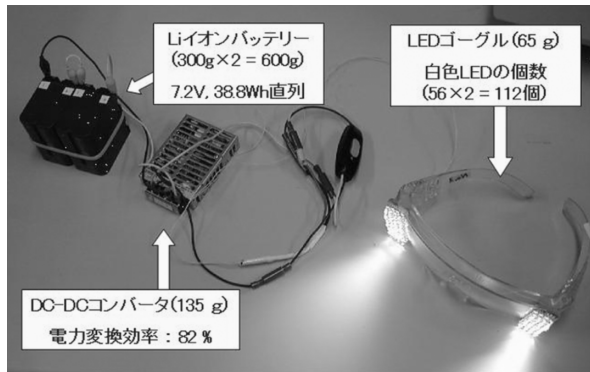


図1 初代の白色LEDゴーグル照明装置。

2. 白色LEDゴーグルライトの誕生

さて、実際にLEDを装備したゴーグルを誰が作れるのか、と話していたところ、京都大学の川上養一先生が3mm径の白色LEDをホビーセンターで購入したプラスチックゴーグルの両サイドにびっしり実装して、初代のLEDゴーグルは誕生した(図1)。実際の手術時の光の問題を解決するには、プラスチックゴーグルの両端にコンパクトな発光体を取り付け、しかもその発光体からの光束方向を人間の視線方向と一致するように制御する機構を付加すれば大変便利であろうと発想し、この装置を開発するに至った。透明なプラスチックゴーグルの両端に、各56個(総数112個)の白色LEDが実装されている。用いた白色LEDは、InGaNを活性層とする青色LEDの上にYAG系の蛍光体を塗布したタイプの素子(日亜化学製NSPW310AS)を用いた。この素子の発光効率、定格駆動(3.5V, 20mA)時に約15lm/Wであり、光束の広がり角は60°である。LEDの駆動には、商用電源をAC/DC変換して用いることも可能であるが、持ち運びができるよう充電可能なLiイオン電池(SONY製, NP-F960)を用いて試作した。LEDに常に一定の電力を供給するために、DC/DCコンバーター(ETA製, SVM-15SC12)を用いて光出力を設定した¹⁻⁴⁾。

このゴーグル装置を用いた世界初のLED照明のみでの外科手術を、2000年9月11日に京都府立与謝の海病院にて行った。図2はそのときの手術の様子である。手術の内容は、慢性腎不全患者に対する内シャント造成術とよばれるものであり、腎臓透析が必要な患者が十分な血流を得るために、左上腕部の動脈と静脈をバイパスさせる手術であった。手術時間は2時間20秒であった。電力供給は、すべてLiイオン電池により行い、商用電源を用いなかった。このときの手術は外科医が座って行う形式の手術で、外科医の目の位置と、手術として注目しなくてはならない領域



図2 初のLED照明のみでの外科手術。(2000年9月11日、京都府立与謝の海病院にて)

との距離が30cm程度と短く、まだ十分な光の照度をもたないLEDを用いるにはこの距離ができるだけ近いことが重要な要件であった。

しかしながら、2000年当時の白色LEDを用いた外科手術では、通常の光源を用いた場合と比較して、動脈と静脈の演色性について課題が明らかとなった¹⁻⁴⁾。筆者と第一助手をつとめた天池寿医師の両名とも、手術野が全体に青暗い感じの色調となっており、見えているものが平板に感じられたと、手術に立ち会った川上先生になにげなく話したのであった。実際、内シャントのときに扱う動脈と静脈の色合い自体がわかりにくかった。本来、動脈は血液に含まれるヘモグロビン(鉄錯体分子)中への酸素の過飽和度が高く、鮮やかな明るい赤色で、静脈はそれとは反対に暗い赤色で認識される。しかしながら、実際の手術では動脈が赤黒く見えてしまい、動脈と静脈がやや見分けにくかった点が指摘されたのであった。

このことは、実際の医療の現場に工学者が足を運んだため、問題点が医学側のみならず工学側でもしっかりと認識されて、次への展開を生むことになった。これは「演色性」とよばれる要件であり、対象物の色合いが光反射率の波長特性(分光反射率)により生じる問題である。白色LEDの平均演色評価指数(Ra)は80であり、比較的良好である。しかしながら、赤色(R9)、緑色(R11)および青紫色(R12)の特殊演色評価数はそれぞれ、33、63および49と低い値となっている。これは、白色LEDのスペクトル強度がD65と比較して弱いスペクトル領域の色に対応していることによる。特に医療応用では、肌色から赤色域の演色性が重要であるが、本研究で用いた白色LEDでは赤色のスペクトル成分(600~780nm)が不足

しているために、演色性に改善の余地があることが明らかとなった。

そのため、医療応用のための発光スペクトル制御としては、黒体輻射に近い連続スペクトルを固体光源で実現することがまず重要な課題である。それとともに、病変部を正確に認識するために、さまざまな生体の色情報を分光反射率としてデータベース化し、微妙な色合いの差をもたらしている波長域において、発光スペクトルを増強させることが有効である。すなわち、目的に応じたオーダーメイド型の高品位照明装置への重要な設計指針となる。近年、青色に光吸収帯をもち赤色域で効率よく発光する蛍光体が開発されつつあり、近い将来これら演色性の問題も改善されるものと期待されている。

3. 大学等発ベンチャー創出支援制度への採用

さて、時代は流れ、LEDの発光効率も向上し、携帯電話への普及もあり、2001年以降、白色LEDは急速に社会に浸透してきた。さらに一般照明への普及をめざして、一粒でおおきな光を出せる大玉の白色LEDが製品化される時代がやってきた。とはいえ、大きな粒を毎回加工して配線するのは面倒だと考え、複数個の大玉LEDが実装された「パワーLEDモジュール」を作ってみてはどうかと考えていた。ちょうどそのころ幸運にも、文部科学省の平成14年度大学等発ベンチャー創出支援制度に「パワー白色発光ダイオードモジュールの開発：21世紀の照明革命」というタイトルで採用され、予算を得て、実際にLEDモジュールの試験的な試作を重ねることになった。もともと、LEDを照明として用いるためには、光を集める、つまりコントロールすることが必須である。手術のことを念頭に、「50センチ先で、直径15センチの円内を、均一の照度を確保できるLED照明デバイス開発」が、一番はじめの開発目標となった。そのためには、非対称非球面レンズの開発も含めて「LEDモジュール」として完成させることが必要となった。

4. 第3世代ゴーグルライト：デザイナーデザイン

平成14年度に文部科学省の大学等発ベンチャー創成研究補助金を得て、実際に市場への投入を見据えたLEDゴーグルライト開発に着手した。第3世代LEDゴーグルライトとして、デザインを日本の若手デザイナーに依頼したが、実用的ではなかった。材質を変えても、強度が不足して折れてしまう。この点を改善するために、第4世代のLEDゴーグルライトは、実際の着脱や持ち運びの際に必要な堅牢さを構造に盛りこみ、ABS樹脂成形で試作製作

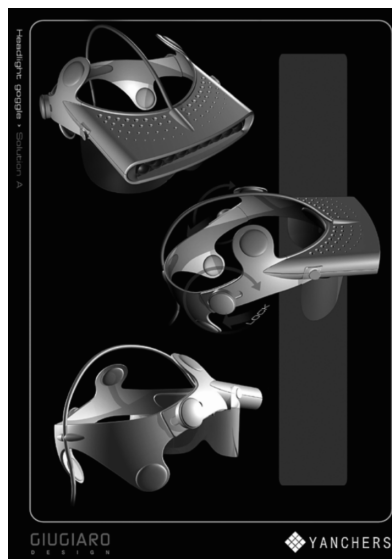


図3 現在デザイン中の第5世代LEDゴーグルライト。

を行った。合計3台の第4世代LEDゴーグルライトが、平成15年9月10日に完成した。携帯型の電源回路も完成し、携帯可能な大光量照明装置「LED Walkman」が可能となった。以上のようなプロセスを経て、現在第5世代LEDゴーグルライトのデザイン修正・監修を、トリノオリンピック2006の公式デザイナーであったイタリアのジウジアロデザインの元ですすめており、未来的なデザインをとりこむために、光造形と手による削り込みを繰り返して作り込みを行っている(図3)。

5. 内視鏡手術への応用

5.1 内視鏡手術の現状

LED照明の演色性について検討を重ねるにつれて、さらに局所のLED照明を思い立った。呼吸器外科領域では現在、内視鏡を使用する手術が増えている。この内視鏡を用いた手術では、実際に患者さんの手術の部位を外科医がじかに観察することに代わり、内視鏡カメラの平面の画像に頼って手術操作判断を行うことが多い。このときに、直視下での手術操作を行う開創部は小さく、それゆえ、天井の无影灯により目的の部位を照明することは非常に難しい。現実には、内視鏡カメラの光源の光を、この胸腔内の照明として頼りにしているのが実情である。しかしながら、この内視鏡光源はハロゲンの光源を導くものであり、光自体が熱を帯びていて、照らし出される臓器の表面が光の熱により「乾燥する」こともある。このように狭い胸腔内をまんべんなく明るくできる方法はないかと考え、創部を開く開創器の内側にLEDを実装する方法を考えた。

さらに 明るく 超局所 LED手術照明

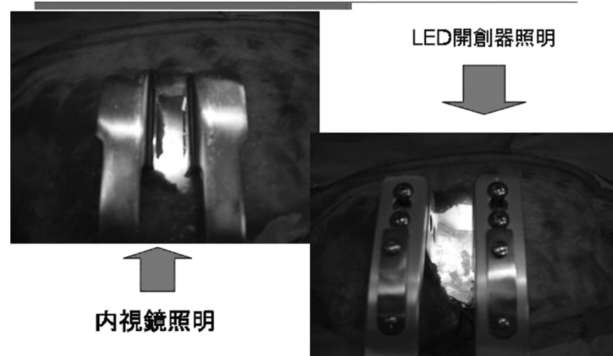


図4 LED開創器による照明。内視鏡による照明に比べ胸腔内全体が明るい。

5.2 究極のLED超局所照明

手術対象の臓器の表面までは4~5cm程度の距離であるため、「究極のLED超局所照明」となると考えている。ブタの実験において開創器の先端にLEDモジュールを装置してみると、内視鏡による照明に比べて胸腔内全体が明るく照らし出されていた(図4)。内視鏡照明は内視鏡の細い円柱状のカメラ部位から光が注がれるので、どうしても一方向からの光になり、胸部の創部からの操作時に手術器具自体の影ができてしまう。この点、LED開創器照明では、胸腔内に十分な光が行き渡っていた(図5)。光の質の適正化や、LEDモジュール自体に発生する熱量と創部の温度障害との関連など、慎重にクリアすべき点もあるが、LEDの性能の上昇を確定的な現実と考えると、遠くない将来には臨床応用に用いられ、明るい術野で安全に手術をするときの光源として「医療用白色LED」が大きく寄与する日が来ると確信している。現在、臨床研究の許可をとり、鋭意最終準備中である。

6. あたらしい照明への挑戦からベンチャー起業へ

6.1 白色LED照明によるお花見

LEDゴーグルの実現のために、大型の白色LED17個を実装したLEDモジュールを提言して試作を重ねるにつれて、LEDモジュールが手元に集まってきた。そこで、このLEDモジュールの集合パネルを集積すれば野外照明も可能になると考え、実際に「世界初の白色LED照明のみでの桜のお花見」と称して花見を企画することになった。2004年3月30日、京都市山科区の「安兵衛」という京都料理店の庭のソメイヨシノの銘木を、2階の窓からLED照明を施し愛でることにした。1枚に17個のLEDを50個実装した白色LEDモジュールを、2枚のパネル状投光器として構成した。合計100モジュールのLEDで照

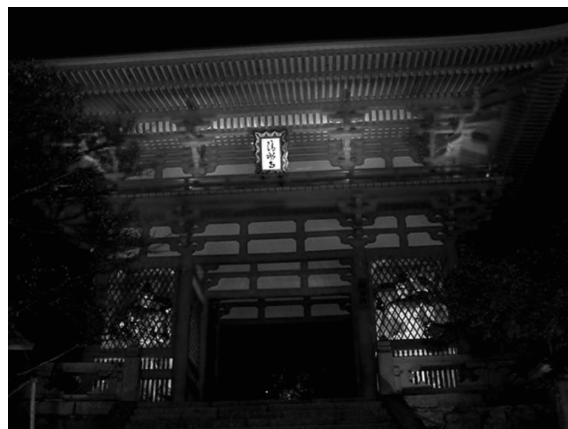


図5 清水寺仁王門の両仁王像。

らし出されたソメイヨシノの花は、八分咲きであったが、桜の花の薄いピンク色と木肌の苔の緑色が実に美しかった。桜の花を照明できるだけの明るさがすでに達成されていることを確認することができ、さらなる大規模化と集積化を果たせば、野外照明にも展開していけると確信できた21世紀照明での花見であった。

6.2 京都祇園祭山鉾ライトアップへのLED照明の応用

2004年夏、京都の夏を代表する約千二百年の歴史をもつ祇園祭に、「文化財を光の熱で傷めない照明デバイス」という認知のもと、歴史上初めてLED照明がライトアップのデバイスとして参加を許された。パワー白色LEDモジュール開発の途上で約600個の白色LEDモジュールを照明装置として作り込み、この高さ26メートルの美しい菊花鉾のライトアップを固体照明の光で達成した。

6.3 寺社照明への展開

LED照明のみによる花見や、京都の伝統ある祇園祭への固体照明を2004年夏に無事に終えて、秋になった。秋の紅葉は実に艶やかな赤色を呈する錦秋の京都であり、はじめはつてのあった紅葉の名所に「紅葉のLED照明を試験的にやってみたいが、どうでしょう?」とお願いしたところ、「清水寺に頼んであげるから、待っていて」とのことであった。何週間かして突然清水寺から連絡があり、LED固体照明の清水寺夜間拝観への挑戦について、話を聞いていただけることになった。

LEDの光は原理的に紫外線と赤外線を含まないこと、実際の仏像照明において必要な光量ではLEDモジュール基板の温度上昇が小さく、連続点灯時でも秋には37°Cくらいにしかならないので、旧来のハロゲン電球などのソケット部分が200°C近くまで温度が上昇することに比べて、火災の面で安全であること、などを理解していただき、

(1) 清水寺の玄関にあたる仁王門の両仁王像(図5)、



図6 清水寺の国宝二十八羅漢像。

(2) 清水寺の国宝、本堂の深奥にある内々陣の千手十一面観音像をはじめとする二十八羅漢像を優しく照明する装置(図6)として、試験採用のうえ、2005年度から本式に採用になった。清水寺の仁王門は応仁の乱の時代に造営され、仁王門の両仁王像もまたその時代の作で、約400年の歴史をもつ重要文化財である。このため、火災や強い光でかけがえのない木像が損傷をおこさないように、2003年までは仁王像を明るく照らし出そうとの試みはなかった。2005年以降は、清水寺の秋の夜間拝観の際に、見事なコントラストをなす仁王門をデジタルカメラや携帯カメラに収めて、思い出に持ち帰る人が後をたたない。

これに比べて、知る人ぞ知るのが内々陣のLED照明である。清水の舞台やそこからの京都の街の景色はとても有名であり、ここからの京都の夜景が見事に絵になるのは確かなのだが、清水寺の拝観の中心は本堂の十一面千手観音像を擁する内々陣である。内陣と、さらにその外側に外陣、そして、清水の舞台が本堂を構成している。この内陣と内々陣の境界を形成している敷居の部分の最上部が国宝の保護の要件をはずれた構造物であることに目をつけて、この部分にLEDモジュールを設置し、秘仏を優しく照らし出すように光の角度を工夫した。LEDの照明装置の設置に際しては、国宝の本堂の部材に触れないように十分に注意した。この2004年秋の夜間拝観期間に約40万人の人々が、そうとは知らずに「LEDの光で照らし出された木像や空間」を愉しんで拝観された。

6.4 清水寺の三重の塔のLED照明(図7)

2005年秋、清水寺から新たなミッションがふってきた。京都市内からも望むことのできる、清水寺の三重の塔の照明についての相談であった。重要文化財の三重の塔は、江戸初期に再建されたものだが、実は平安初期847年の創建である。高さ31m弱で日本一の高さを誇る三重の塔であり、総丹塗りの上、各重の横木に桃山様式の極彩色文様を



図7 LED照明で夜空に映える清水寺。

施す。一重内部に大日如来像を祀り、四周の壁に真言八祖像、天井・柱などに密教仏画や飛天・竜が描かれている。このような重要文化財であるので、塔への電力の供給量は最大1500Wの上限があった。また、塔の外側のサーチライトシステムによる照明では、三重の塔の伽藍の細部の影が一方方向のみになってしまうので、実際に肉眼でつぶさに見た印象よりも平板に見えた。この点、LEDモジュールは、それぞれの光の強さが可変である上に、光源のLEDモジュールがコンパクトなサイズであり、塔の欄干をうまく利用し、参拝者からの死角に光源を隠すことができた。特に三重の塔の3重目は、地上からは各重の部分は見えないので、横木の鮮やかな緑と伽藍の細部の朱色に合わせて照明用のLEDの色温度や波長の構成を変更して、三重の塔の照明の光の質を細かくコントロールし、清水寺の指示に合わせて光の方向に微妙に変化をつけた結果、三重の塔全体に、彫りの深い光と影が夜空に映える世界をつくることができた。

「LEDを見るLED照明?」から「LEDの光で対象物を魅せるLED照明!」へという時代の流れのなかで、特殊な用途である重要文化財に視点をのこした寺社へのLED照明のパイオニアはわれわれであると自負している。

文部科学省の大学等発ベンチャー創出支援制度の研究開発で着手したパワーLEDモジュールには、大型LEDが17個実装されている。パワーLEDモジュール照明はまだその開発が始まったばかりであり、単価が高いためビジネスとしては揺籃期にある。今後は白色LEDの高出力化とともに発光効率の向上と放熱パッケージの開発が進められていくが、いずれにせよ既存の照明にはない視点での高付加価値の照明として育てていくことが、ゆりかごから出るのにきわめて重要である。すなわち、パワー白色LEDモジュールを新たなビジネスチャンスと位置づけ展開させる

ためには、一般照明への展開のビジョンをもちつつも、現状でのLEDの特性を十分に生かしたニッチ市場、特に高付加価値の領域を開拓していくことが、LED実用照明のビジネス開拓のためには必須といえる。もちろん、医療応用も範囲は広いと思うが、その認可などを見据えると、ビジネスとしての採算性は厳しい。LED照明もハード面の高価格が目がいくが、そのソフト面での付加価値を生かしてビジネスモデルをどのように確立できるかが重要になる。

こうしてYANCHERS(株)を2005年3月25日に京都で設立したのであるが、起業の決め手となったのは、1) 大学発ベンチャー創出支援制度の趣旨に忠実にがんばること、2) 顧客から、会社にしてやってみては、との声を受けたことが大きい。大学発ベンチャー企業だからといって小企業であることには変わりなく、高い利益率を保持していくためには、YANCHERS株式会社もLED照明アプリケーションについてのハード販売のみではなく、ソフト面での価値創出を念頭に展開する必要がある。実戦的応用にはLEDのもつ能力を十分に引き出す応用技術への経験と技術集積を行うことが不可欠であり、それが日本発の技術としての白色LEDモジュールの世界を大きくし、21世紀の照明革命につながる堅実なビジネストrendを日本から生み出す端緒となるのではないかと考えている。ベンチャー企業の成功事例は1500社に1社であることを熟知しつつ、ROE 10%、無借金を念頭に、株式会社経営の根幹を

体感じつつ、こつこつがんばっていきたい。

YANCHERS 株式会社 URL <http://www.yanchers.jp/>

文 献

- 1) J. Shimada, Y. Kawakami and S. Fujita: "Medical lighting composed of LED arrays for surgical operation," Proc. SPIE, **4278** (2001) 165-172.
- 2) J. Shimada, Y. Kawakami and S. Fujita: "Surgical operation using lighting goggle composed of white LED arrays," Proc. SPIE, **4445** (2001) 13-22.
- 3) Y. Kawakami, J. Shimada and S. Fujita: "Fabrication of LED lighting goggle for surgical operation and approach toward high-color rendering performance," Proc. SPIE, **4445** (2001) 156-164.
- 4) 川上養一, 島田順一, 藤田茂夫: "白色発光素子を用いた外科手術用照明ゴーグルの開発", 応用物理, **71** (2002) 1381-1385.
- 5) M. Yamada, T. Naitou, K. Izuno, H. Tamaki, Y. Murazaki, M. Kameshima and T. Mukai: "red-enhanced white-light-emitting diode using a new red phosphor," Jpn. J. Appl. Phys., **42** (2003) L20-L23.
- 6) A. Zukauskas, F. Ivananskas, R. Vaicekauskas, M. S. Shur and R. Gaska: "Optimization of multichip white solid state lighting source with four or more LEDs," Proc. SPIE, **4445** (2001) 148-155.
- 7) K. Bando, K. Sakano, Y. Noguchi and Y. Shimizu: "Development of high-bright and pure-white LED lamps," J. Light Vis. Environ., **22** (1998) 2-5.
- 8) 向井孝志, 中村修二: "白色および紫外LED", 応用物理, **68** (1998) 152-155.
- 9) S. Yanagida, Y. Hasegawa, K. Murakoshi, Y. Wada, N. Nakashima and T. Yamanaka: "Strategies for enhancing photoluminescence of Nd³⁺ in liquid media," Coordination Chem. Rev., **171** (1998) 461-480.

(2006年10月5日受理)