

1. はじめに

高温超電導体のマイクロ波デバイスは、高温超電導体が発見された当時からその実用化の研究が活発に行われていた。いくつかのデバイスは実際に実用化されたものもあるが、途中で姿を消したものもあり、また現在まで市場に残って稼働しているものもある。超電導体のマイクロ波デバイスの実用化と課題と題して、ここでは

1. 高性能な超電導マイクロ波デバイスを実現するためには。
2. 実用化研究された主な超電導マイクロ波デバイスとその時の課題。
3. 今後実用化が期待される超電導マイクロ波デバイス。

について記述する。過去の状況を知ることが今後の実用化研究の参考になると思うので。

2. 高性能なマイクロ波超電導デバイスを実現するためには

デバイスを大きく分けると、パッシブデバイスとアクティブデバイスに大別される。超電導マイクロ波デバイスはほとんどパッシブデバイスに属する。そのパッシブデバイスの効率を上げるには、素子の抵抗（マイクロ波表面抵抗）を小さくする必要がある。表面抵抗( $R_s$ )は、通常のオームの法則で求められる抵抗とは異なり、導体に侵入するマイクロ波電界( $E$ )とマイクロ波磁界( $H$ )の比で定義される。

$$R_s = E/H \quad (1)$$

超電導体に侵入する電界は小さいので、 $R_s$ は小さくなる。我々の実験では、高温超電導薄膜の表面抵抗は、臨界電流密度に反比例することが明らかとなっている<sup>1)</sup>。また理論的にも次式で示されるように  $R_s$  は  $J_c$  に反比例することが示されている<sup>2)</sup>。

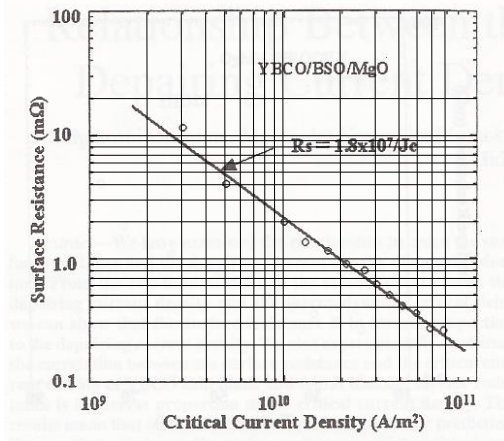


図1 YBCO 薄膜の  $R_s$  と  $J_c$  の関係

$$R_s = \frac{\mu_0 \sigma \omega^2 \lambda^3}{2} = \frac{\mu_0 \sigma \omega^2}{2} \frac{\kappa \Phi_0}{2\sqrt{2}\pi J_{\text{depair}}} \approx A \frac{1}{J_c} \quad (2)$$

高温超電導体の  $R_s$  を小さくするには、薄膜の  $J_c$  を大きくすればよい。ただし、(2)式は、膜がクリーンなとき（強いピンが入っていない膜）に成立するものであり、人工ピンを導入して  $J_c$  を大きくした薄膜では必ずしも成立しない。

高性能なデバイスを作製するためには、粒界の無い、単結晶膜を用いることが理想ではあるが、2軸配向した薄膜でも十分である。

2. 実用化研究された主な超電導マイクロ波デバイスとその時の課題

実用化研究された超電導マイクロ波デバイスは多数あるが、その代表的なものはアンテナとフィルタであろう。以下に何故2つのマイクロ波デバイスの実用化研究が検討されたのかを述べる。

2.1 超電導アンテナ

効率の高いアンテナは八木・宇田アンテナに代表されるように、2分の1波長のサイズとなる。したがって、効率を下げない小型アンテナの実現は研究者の夢である。超電導体でアンテナを作製すると、導体損が小さいので、アンテナサイズを小さくしても効率が下がらない。低温超電導体で作製した電気的小型アンテナはサイズを小さくても高効率・高指向性を示すことが報告されている<sup>3)</sup>。しかし、そのアンテナは、液体ヘリウムで冷却する必要があり、実用化には不向きであった。高温超電導体が発見されると、小型超電導アンテナが再認識され、世界中で研究が始まった。NTTのグループは1/16波長のヘリカルアンテナで高効率を実証した<sup>4)</sup>。しかし、そのアンテナは液体窒素で冷却する必要があり、実用化には不向きであった。一方、海外の研究者は冷凍機で冷却できるパッチアンテナに注目し、その実用化を検討した。図2にカナダワータールロー大学の Mansoure

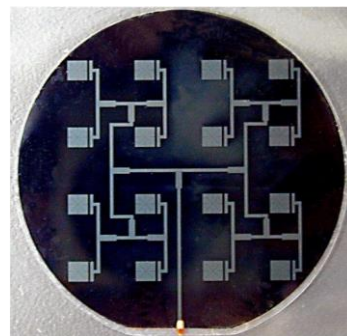


図2 超電導マッチアレーアンテナの概観

教授グループが報告したパッチアレーアンテナの外観図を示す<sup>5)</sup>。彼らは人工衛星に搭載するアンテナの研究に力を注いでいた。それは、人工衛星の存在する空間温度は70K以下であり、冷凍機無しで超伝導アンテナを動作できるからである。また、ドイツのブッパートル大学のChaloupka教授のグループも同様な研究を行っていた<sup>6)</sup>。我々は、パッチアンテナの研究と長時間排気を必要としない高気密アンテナ用チャンバーを研究していた<sup>7)</sup>。超伝導アンテナを実用化するためには、排気系の無いチャンバーで長時間アンテナを稼働させる必要がある。そのための高気密型のアンテナ用真空チャンバーとその冷凍システムを企業と共同開発し、超伝導アンテナを長期間駆動できることを明らかにした<sup>7)</sup>。

しかし、残念ながらパッチアンテナは、地上でも、衛星でも実用化はできなかった。その主な理由は、(1) Only one のデバイスでは無いこと(2) コストパフォーマンスを十分発揮できなかったこと等であった。

## 2.2 超伝導フィルタ

超伝導フィルタは(1)高い周波数選択性 (2) 大きな帯域外遮断特性 (3)小さい挿入損失 等の性能を持ち、ほぼ理想的なバンドパス特性を示す。代表的な特性を図3に示す。超伝導フィルタは実際に実用化された数少ないデバイスである。

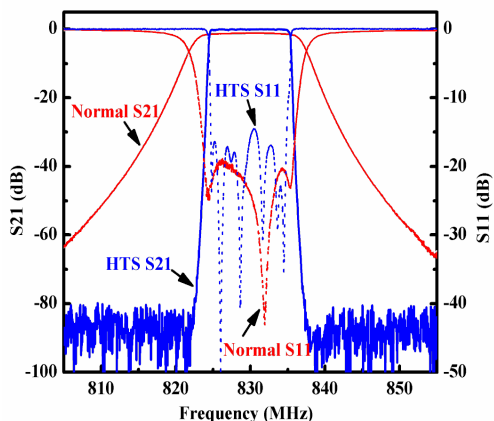


図3 代表的な超伝導バンドパスフィルタの特性

### A: 携帯電話基地局の受信バンドパスフィルタ

1995年当時、米国の携帯電話業界では深刻な問題を抱えていた。それはA社、B社のユーザー間で混信・遮断が頻発に起きていたことである。それを解決できた唯一の手法は、超伝導バンドパスフィルタを基地局の受信システムに導入することであった<sup>8)</sup>。超伝導バンドパスフィルタはA社・B社の信号を確実に区別できるものであり、Only one のデバイスとして登場した。2005年ごろまでには、超伝導バンドパスフィルタを導入した基地局が5,000基以上存在した。導入当時一番問題になったのは、小型冷凍機のメンテナンスフ

リー期間の保証である。第2.3節で記述するように平均故障間隔(Mean Time Between Failures, MTBF)の測定により、小型冷凍機の故障間隔を80,000時間以上あることを示し、実用化にこぎつけた。中国でも携帯電話の基地局用超伝導バンドパスフィルタが実用化された<sup>9)</sup>。中国では、携帯電話の混信を防ぐよりは、超伝導フィルタを利用することにより基地局数の低減を図ることに重点が置かれた。その利点が明らかになり、北京市内に実際に使用された。

超伝導フィルタを導入した携帯電話の基地局は2005年をピークにその後、徐々に減少し、現在ではほとんど存在していない。それは、第4、5世代の携帯電話では、通信周波数の割り当てが整備され、超伝導フィルタの高い周波数選択性を必要としなくなったことと、超伝導フィルタシステムの高価格により、コストパフォーマンスを主張できなくなったからである。

### B: 気象レーダ用狭帯域バンドパスフィルタ

日本では、ゲリラ豪雨による被害が続発し、雨雲の進路予測・雨量予測等を的確に診断する必要が出てきた。そのために気象庁は全国に雨雲を観測する気象レーダを設置している。従来の気象レーダでは十分帯域の広い電波レーダシステムを使用していたが、無線通信が発達してくるとその周波数帯を狭める必要が出てきた。そのために狭帯域のバンドパスフィルタが必要になった。通常の導体・セラミックスフィルタでは狭帯域にすると挿入損失が大きくなり、良好なバンドパスフィルタ特性を示さなくなる。超伝導フィルタは狭帯域にしても挿入損失は大きくならず、ほぼ理想的なバンドパスフィルタ特性を示す。ただし、気象レーダーのバンドパスフィルタは、送信電力が1kW以上、受信電力がmW以下という条件を満たす必要がある。東芝の加屋野らは、その要求に答えられる超伝導バンドパスフィルタシステムを構築し、気象レーダに設置することに成功した<sup>10)</sup>。しかしそのシステムも広く利用されることはなかった。その原因は、コストパフォーマンスに合致しなかったためである。

### C: 市中電波望遠鏡の雑音除去フィルタ

日本では、宇宙電波を計測する電波望遠鏡を市中に設置することが多い。鹿島にある34mの電波望遠鏡もその一つである。2000年初頭になると、宇宙からくる微弱な電波を突然受信できなくなった。その原因を調べると、基地の周囲に乱立された携帯電話基地局からのIF信号が雑音としてパラボラアンテナに侵入していることが分かった。通常バンドパスフィルタではそれを除去することができず、帯域外遮断特性の優れた広帯域のバンドパスフィルタが必要となり、超伝導バンドパスフィルタに白羽の矢が当たった。クライオデバイス社がそれを受け持ち、見事に雑音の除去

に成功した<sup>11)</sup>。2011年になるとまた新たな雑音侵入が生じた。調査をすると、近くに設置されたセルラーのIF信号であることがわかり、それを除去する必要が出てきた。クライオデバイス社は既に解散しており、東芝が超電導フィルタの設置を受け持つことになった。東芝製の超電導バンドパスフィルタの設置により、鹿島の34m電波望遠鏡の侵入雑音は見事に除去され、通常の業務に復帰することができた<sup>12)</sup>。鹿島の34m電波望遠鏡は残念ながら2019年の台風被害により破損し、現在では稼働していない。

市中の電波望遠鏡に侵入する雑音電波の除去用超電導フィルタは世界中で実用化されている。中国のCao教授グループもその超電導フィルタシステムを開発している。図4に、彼らのデータ

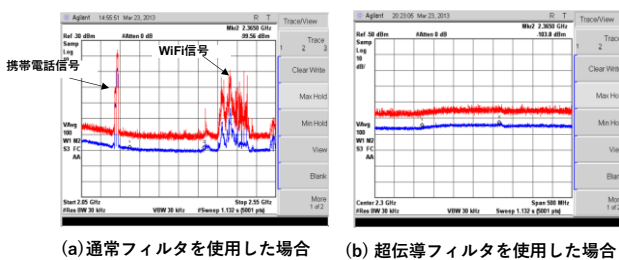


図4 市中電波望遠鏡の信号強度

を示す。超電導フィルタを導入した時と導入して無ときの受信電波信号の結果である。超電導フィルタの導入で雑音が見事に除去されているのが分かる。

超電導バンドパスフィルタの高い周波数選択性は他種の電波望遠鏡にも設置されている。長野県の山奥にある臼田宇宙観測所にある64m電波望遠鏡にも超電導フィルタが設置されている。この電波望遠鏡は、宇宙から飛来する微弱な電波を観測する機器であり、あの「ハヤブサ2号」との交信をしたところである。山梨大学の関谷准教授はJAXAと共同でX帯(9GHz帯)の超電導バンドパスフィルタを開発し、ハヤブサとの交信に貢献した<sup>13)</sup>。

### 2.3 超電導マイクロ波デバイス実用化時の課題

新しいデバイスを実用化するときは、

- (1) Only one デバイスであるか
- (2) コストパフォーマンスをクリアできるか
- (3) 信頼性・耐久性は十分か

等を検討しなければならない。超電導フィルタを実用化するとき特に(3)の耐久性・信頼性が問われた。超電導デバイスは冷凍機による冷却が不可欠であり、冷凍機の耐久性が問われた。当時のユーザーが冷凍機の仕様要求したのは50,000時間以上(5.7年以上)でメンテナンスフリーの状態で作動することであった。これは厳しい条件であり、当時の冷凍機メーカー、特に日本のメーカーはこれに対応できる実験結果を出せなかった。米国

の冷凍機メーカーはこれに対抗する条件として、平均故障間隔(Mean Time Between Failures, MTBF)が80,000時間以上あることを示した。また、利用度(Availability)も99%以上であることを示し、超電導フィルタ用の冷凍機の耐久性・安全性を保証したのである。その結果、米国では携帯電話基地局に超電導バンドパスフィルタを導入することができた。私も、当時いくつかの日本の冷凍機メーカーに、50,000時間以上のメンテナンスフリー、(あるいは80,000時間以上のMTBF)を保証できるかどうか尋ねたが、どの企業も明確な回答を出せなかった。超電導デバイスを実用化する場合、冷凍機企業の対応も重要であることがわかる。

### 3. 今後期待される超電導マイクロ波デバイス

#### 3.1 2帯域通過バンドパスフィルタ

超電導フィルタは幾つかの帯域を通過させることができるマルチバンドパスフィルタとしても機能する<sup>14)</sup>。特に、2帯域通過バンドパスフィルタは目的に応じた2つの周波数帯域を選別することができるので、広く応用が期待されている。その一つの例として、大気観測用電波フィルタが検討されている<sup>15)</sup>。通常システムでは、2つの受信信号を分離し、バンドパスフィルタを通して信号処理を行うが、超電導マルチフィルタを用いると、図5のように一つのシステムで信号を処理することができ、システムの小型化が図れる。現在、実用化を目指した研究がおこなわれている。

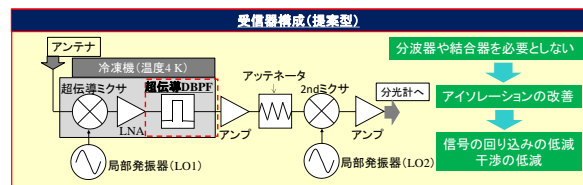


図5 超電導2バンドパスフィルタを取り入れたシステムのモデル図

#### 3.2 NMRの超電導検出コイル

NMRの感度(S/N)は印加磁場(B<sub>0</sub>)、資料にかかる高周波磁場(B<sub>1</sub>)、サンプルの体積、コイルの感度等に影響を受ける。コイルの感度は次式で示されるようにコイルのQの1/2乗に比例する<sup>16)</sup>。コイルのQはコイル材の表面抵抗に反比例するの

$$S/N \propto \sqrt{\frac{\eta Q}{T_c + T_a}}, \quad (2)$$

でコイルの感度を向上させるにはコイル材の表面抵抗を小さくする必要がある。超電導体の表面抵抗は銅と比較すると1/1000以下であるので、超電導検出コイルを用いたNMRシステムは従来の銅コイルを用いたシステムよりも高感度が期待される。フロリダ大学のBrey教授のグループは、YBCO膜を用いた特殊なコイルを作製し、高感度なNMRシステムを報告している<sup>17)</sup>。我々も、日本電子、理研と共同研究を実施し、超電導コイル

ルが NMR 感度の向上に有効であることを明らかにしている<sup>18,19)</sup>。

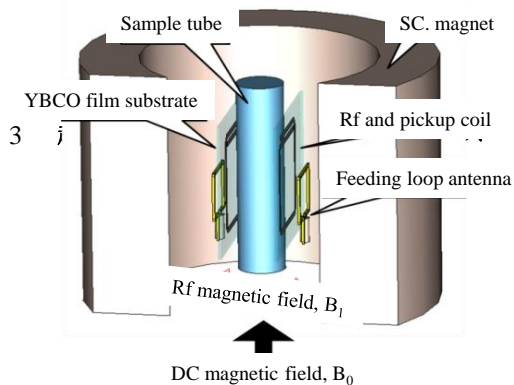


図6 H<sup>1</sup>NMR 信号検出用超電導コイルの模式図

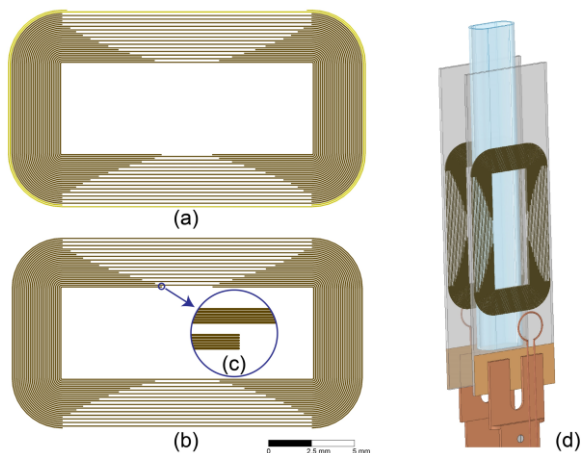


図7 Brey らが報告している C<sup>13</sup>NMR 信号検出用超電導コイルの概観図

### 3.3 超電導整流効果を利用したマイクロ波デバイス

最近、超電導層・絶縁層の界面で超電導ダイオード効果が見いだされたり<sup>20)</sup>、非対称構造を持つ超電導人工格子で整流効果が発見されたりしており、超電導層の整流効果が注目をされている。この超電導整流効果を利用した新たなマイクロ波デバイスの研究が検討され始めている。しかし実用化には、高温超電導体の整流効果を利用することが必要であろう。幸い、高温超電導体でも整流特性があることが見出されている<sup>21)</sup>。最初は、高温超電導非対称ナノブリッジでの非対称  $I_c$  の発見である<sup>22)</sup>。非対称ナノブリッジに流れる臨界電流が流れる方向により異なることの発見である。その原因は、磁束量子の侵入し易さが方向によって差が出るためと解釈されたが、はっきりした原因は明らかにされなかった。その後、通常の YBCO 薄膜でも整流効果が研究見出された<sup>23)</sup>。名古屋大学の土屋グループは図8に示されるよ

うに、薄膜に平行に磁場を印加した状態で臨界電流を測定すると、流れる方向により差が出ることを見出した。膜面に垂直に磁場を印加した時にはその差が表れない。その機構は未だはっきりしていないが、磁束量子の動きの非対称性が絡んでいるのではないかと述べている。また、YBCO 薄膜の整流特性を利用してマイクロ波大電流整流素子の開発しを検討している。

超電導整流素子は未だ研究がはじめられたばかりであり、どのような応用が適しているかははっきりしていないが、新たな応用分野を開拓できるものとして期待されている。

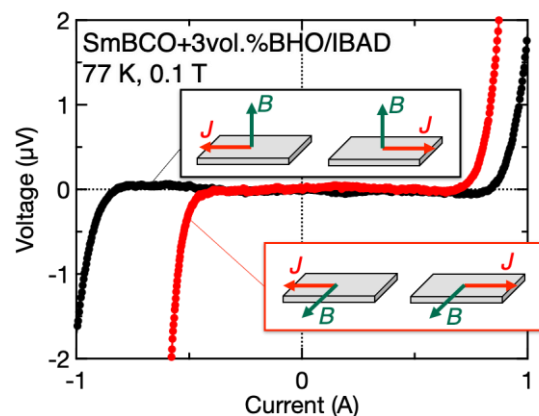


図8 SmBCO 薄膜の非対称  $J_c$

### 4 まとめ

超電導マイクロ波デバイスは実際に市場に出て実用化された数少ないデバイスである。実用化に近づいたが、コストパフォーマンスを明確に示すことができず市場に出なかったデバイスも数多くある。実際に実用化するのには、Only one デバイス、コストパフォーマンス、安定性・耐久性等の問題を確実にクリアする必要がある。それは決して新しい命題では無い。しかし、実用化デバイスを誕生させるのにはこの検討を避けて通ることはできない。これをクリアし、新たな用途の超電導マイクロ波デバイスが登場することを願っている。

### 参考文献

1. S. Ohshima et al, "The correlation of the critical current density and surface resistance of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> thin films" Physica C 372-376 (2002) 671-674.
2. S. Ohshima et al "Relationship Between the Surface Resistance and Depairing Current Density of Superconductors" IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol.13 No.2, (2000) pp. 3578- 3580.
3. 安達三郎等「超伝導ダイポールアンテナ」電情通学会論文誌 B vol.J36B (1980) pp.916-923.
4. K. Itoh et al, Small helical antenna made of high-temperature superconducting thick film" J.

- Superconductivity, vol.5, (1991) 485-490.
5. J.S.Herd et al., "20GHz Broadband Microstrip Array with Electromagnetically Coupled High-Tc Superconducting Feed Network" IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol.44 (1996) 1384-1389.
  6. H. Chaloupka et al., "Miniaturized high-temperature superconductor microstrip patch antenna" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.39 (1991) 1513-1521.
  7. K. Ehata et al., "Miniaturized Cooling System for HTS Antenna" IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol.11, (2001) pp. 111-114.
  8. B. Willemsen et al., "HTS Filter Systems for Wireless Telecommunications" IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol.11 (2001) pp. 60-67.
  9. B.S. Cao, "Investigation of HTS Filter Sub-Systems for Mobil Communication in China" 7<sup>th</sup> Symposium on High-Temperature Superconductors in High-Frequency Field (HTSHFF2002)
  10. 塩川教次等「気象レーダー用超伝導フィルタの開発」電情通学会信学技報 108(12)号 (2008) pp. 75-80.
  11. 川合栄治 「新型フィルタによる周波数有効利用」CR News No336/2004. March.
  12. 河口民雄「鹿島 34m 電波望遠鏡向け超伝導フィルタの開発」2019 年度 VLBI 懇談会シンポジウム (2019.11.23) 大妻女子大学 千代田キャンパス.
  13. N. Sekiya et al., "Development of Superconducting Filter for Deep Space Exploration Ground Station Receiving System" 32<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity(2019)
  14. X.Lu et al., "Design of a high-order dual-band superconducting filter with controllable frequencies and bandwidths" IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol.24, (2014) pp. 3-7.
  15. 關谷尚人等「超伝導フィルタによる多輝線同時観測受信機 IF 系の小型化の検討」日本天文学会春季年会 vol.24B (2019) 3/14~17 (法政大学)
  16. 山本裕之「MgB<sub>2</sub> および Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> を用いた超伝導 NMR プロブコイルに関する研究」群馬大学博士論文 (平成 21 年度)
  17. V. Ramaswamy et al., "Development of a C-13-optimized 1.5-mm high temperature superconducting NMR probe" J. Magnetic Resonance, vol.235, (2013) 58-65.
  18. 末松浩人等「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」低温工学 48 巻 1 号 (2013) pp.31-38.
  19. S. Ohshima et al., "Examination of high-Q NMR Transmit/Receiver Pickup Coils Made by YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> Thin Films" IEEE Trans. Applied Superconductivity vol.29, (2019).
  20. K. Yasuda et al., "Nonreciprocal charge transport at topological insulator/superconductor interface" Nature communications, vol.10 (2019) 記事番号 2734.
  21. T. Ideue et al., "One-way supercurrent achieved in an electrically polar film" Nature (2020-08-20) doi. 10.1038/d41586-020-02380-8.
  22. 梶野顕明「高温超伝導ナノブリッジに関する研究」名古屋大学博士論文 (平成 24 年)
  23. Y. Tsuchiya et al., "In-Field Transport Properties at Grain Boundaries in BaHfO<sub>3</sub>-doped SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> Bicrystal Films at Low Temperatures" IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol.28, (2019) doi: 10.1109/TASC.2019.2903469