

(1) 情報通信機器と消費エネルギーについて

「環境エネルギーネットワーク 21」理事・主任研究員
作井 正人

1. はじめに

1995年にインターネット及びWindows95が同時期に世の中に登場してから、20年が経過した。当時としては考えられないスピードで情報量とストレージ量が増加している。この情報流通量（情報トラフィック）の拡大はスマートフォン、クラウドサービスが爆発的に普及したことも大きな要因である。

図1に示すようにIT機器の使用電力は2006年と比較して2025年には190倍、2006年の国内総発電量の約5%であった470億kWhから、5.2倍にあたる2,400億kWhとなり、これは総電力の20%にあたる膨大な消費となると予想されている。ちなみに2015年では1,000億kWhになると、グリーンITイニシアティブの資料(2)(3)に記述されている。この資料によると2015年では総電力の10%がIT機器の消費電力となっている。この資料は2008年に経済産業省／グリーンIT推進協議会で試算されたものであり、7年経過した今年の2015年での状況とは多少とも異なるかもしれないが、いずれにしても、ここ数年でのス

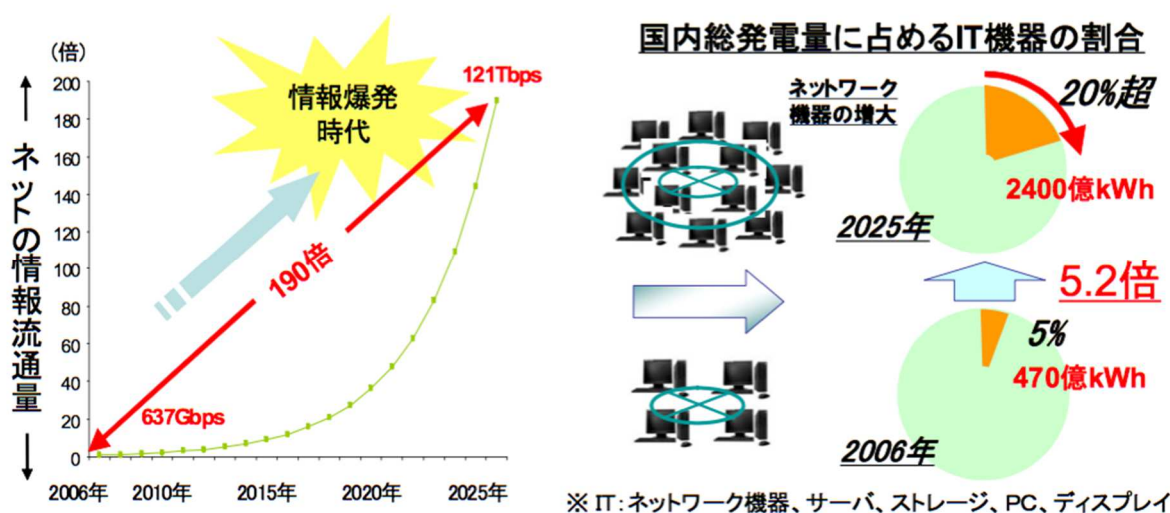


図1. IT機器の使用電力と情報流通量 出展:「グリーンIT」新時代を作る情報政策と今後の方向
平成20年6月 経産省 情報通信機器課 星野岳穂

スマートフォン、クラウドサービスの伸張は 2008 年当時の想定よりも遙かに増えている可能性はあり得る。

2. 半導体の集積度と発熱

1965 年に米インテル社の創業者のひとりであるゴードン・ムーアが論文にて提唱した有名な「ムーアの法則」がある。現在の日進月歩で進化している半導体の集積度においては、いまだにその法則の公式（図 2）の線上にある。その公式とは、

$$p=2^{n/1.5}$$

P：集積回路上のトランジスタ数の倍率

n：年

すなわち、集積回路上のトランジスタ数は「18 ヶ月（＝1.5 年）」ごとに倍になる。1970 年から現在の集積度を比較するとすでに 100 万倍以上となっている。

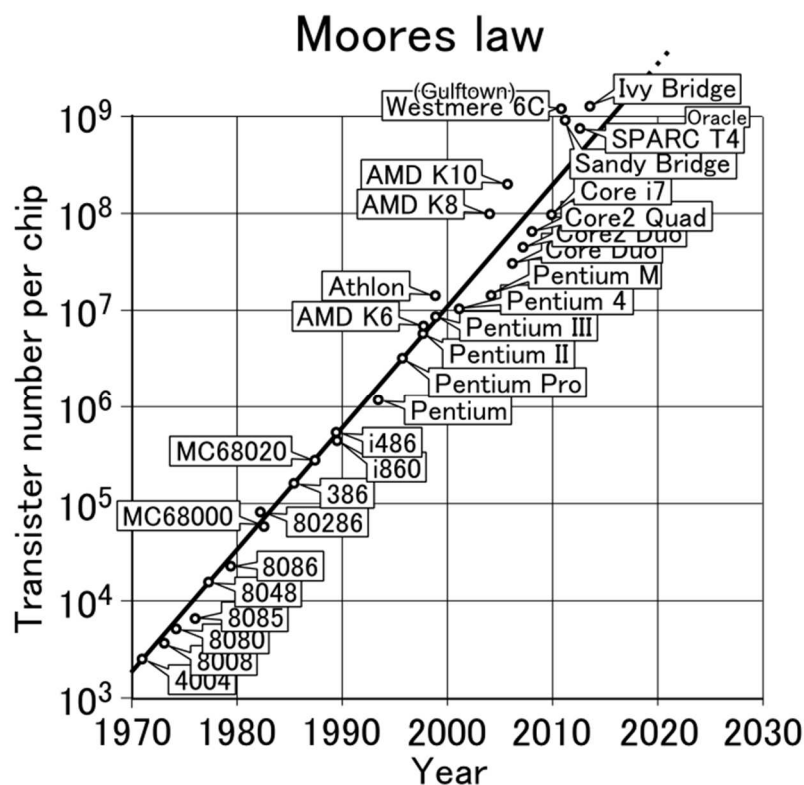


図 2. ムーアの法則 出典：文献(4)

例えばアップルの iPhone を例にとると、第一世代が発売されたのが 2007 年の 6 月、現在は第 8 世代である iPhone 6 s が 2015 年 9 月に発売された。最新の iPhone のパフォーマンスは初代の 300 倍とも言われ、初代に搭載の CPU のプロセスルールは 90nm から 14nm と集積度は遙かに高くなった、CPU も 32bit から 64bit、クロック周波数は 412MHz から

1.85GHz と性能は格段に向上している。一方、集積度が上がり情報トラフィックが増大すると、当然のことながら熱の発生が課題となる。 パソコンやデータセンターにおけるサーバに使用されている、最新のインテルのプロセッサ Intel® Core™ i7-4930MX（コード名 Haswell）では総トランジスタ数が 14 億個以上にもなる。プロセッサはそれぞれのトランジスタがプログラムに沿って ON-OFF の動作を繰り返してデータ演算を行っている。トランジスタ個々の消費電力は非常に小さいとはいえ、発生する熱量の合計は、これら 14 億個の総数の乗算となり熱設計電力はカタログスペックで 57W となっている。このプロセッサのダイサイズは 1.77 cm²であり、発熱密度は 32.2W/cm²となり単位面積あたりの熱量の膨大なことは想像ができるだろう。

このため、半導体を正常に作動させることも必要であるが、これほどまでの熱量に対しては、何らかの放熱の手段がないと半導体としての機能確保、信頼性以前にメルtdownをおこしてしまうことになる。

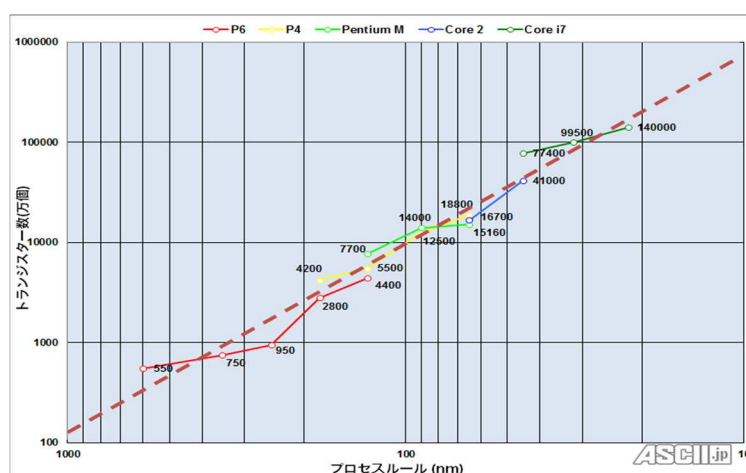


図 3. プロセッサのトランジスタ数とプロセスルール 出典：文献(7)

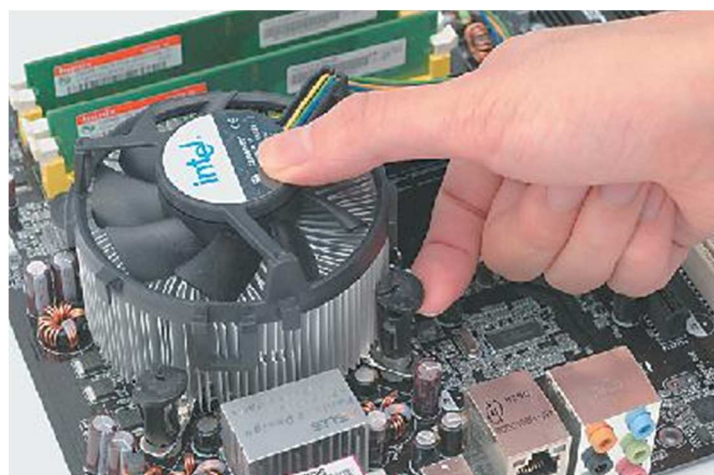


図 4. プロセッサの放熱ファン

したがって、プロセッサチップに対しては図4のような放熱対策が必要となっている。また、データセンターの一つのラックの中には、このようなプロセッサを搭載したボードサーバが20枚以上搭載されており、ボードあたりの熱量は300W～400Wともなり、UPS電源などの装置の熱量を考えると、一つのラックあたり6,000W以上となる。データセンターにはこのようなラックが多数格納されているため、データセンター全体の冷却が不可欠となる。今後の集積化と発生熱量の関係を下記の富士通株式会社：久保秀雄氏の日本冷凍空調学会 2013年2月データセンター冷却技術セミナー「スーパーコンピュータ『京』支える冷凍技術」(6) で発表された資料より図5と文を引用する。

CPUの演算性能は、この10年で20倍に増加し、その一方で発熱量も4倍に増加した。
CPUの発熱密度の推移を図3に示す。2000年に20W/cm²程だった発熱密度は、2012年には50W/cm²を越え、数年後には70～80W/cm²に達する。この領域では冷却しなければ、計算上CPU温度は3分で1,000℃まで上昇してしまう。さらに近い将来、原子炉の被覆管表面の発熱密度の約半分にあたる100W/cm²レベルも視野に入ってきている。

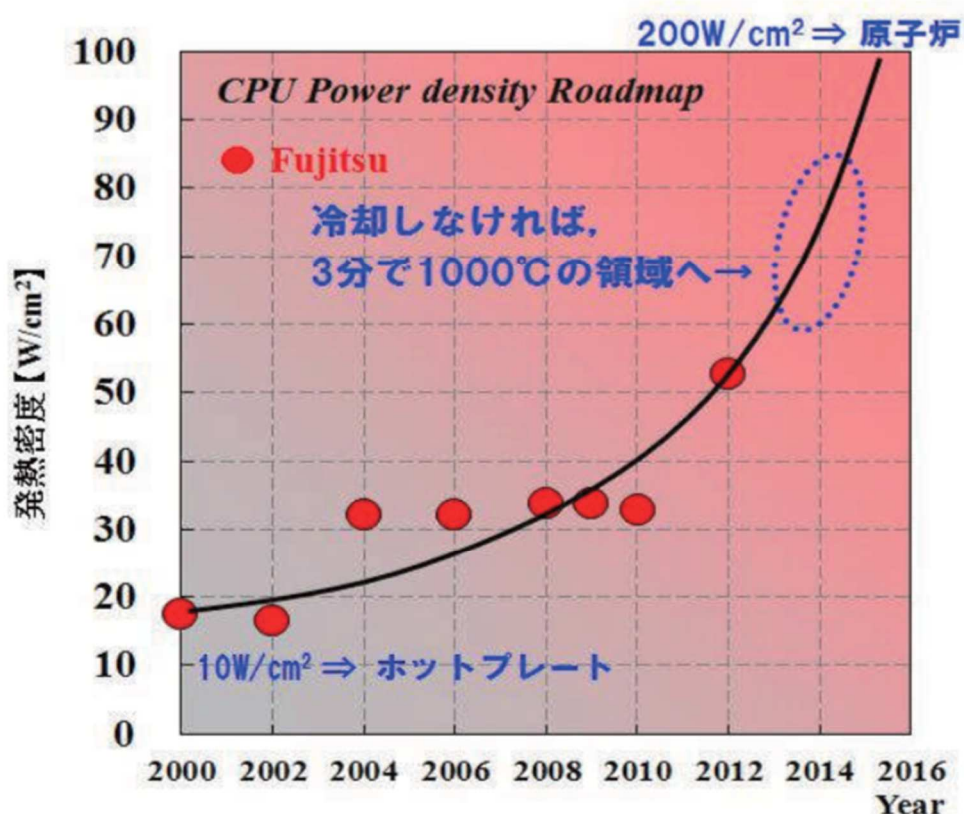


図5. CPU 発熱密度の推移 出典：文献(6)

3. 「京」コンピュータ



図6. 「京」コンピュータ 出典：理化学研究所資料

2011年6月に世界最速の1秒間に1京回の計算を越える性能に達し、国際的な速度評価TOP500のリストで1位となったことは記憶に新しい。この世界での技術の日進月歩は激しく、2015年では中国、米国のスパコンに追い抜かれ浮動小数点演算速度では4位にランクダウンとなった。一方、本来「京」コンピュータの効率よくCPUを稼働させる設計思想から、2015年7月14日にはビッグデータ処理（大規模グラフ解析）に関する、スーパーコンピュータの国際的な性能ランキングである「Graph500」において、世界1となった。「京」コンピュータは、中国が力技で米国製パソコンの汎用チップを膨大に使って、浮動小数点演算の速度だけを競ってランクアップした機器とは本来違うものだとは言われてきたものだったが、このことで「京」コンピュータの本来の実力が発揮されたと言える。

ハードウェア構成

- ・ CPU数： 88,128個、58W、水冷冷却方式
- ・ ラック数： 864ラック
- ・ 総電力： 約16MW（受電12MW、発電4MW）
- ・ 受電設備： 70kV高圧受電
- ・ 冷却設備
 - 1) 吸収式冷凍機（コジェネの廃熱利用）
 - 2) インバータターボ冷凍機

「京」コンピュータの通常の消費電力は約10MWであり、一般家庭3万～4万世帯分の消費電力にあたる。

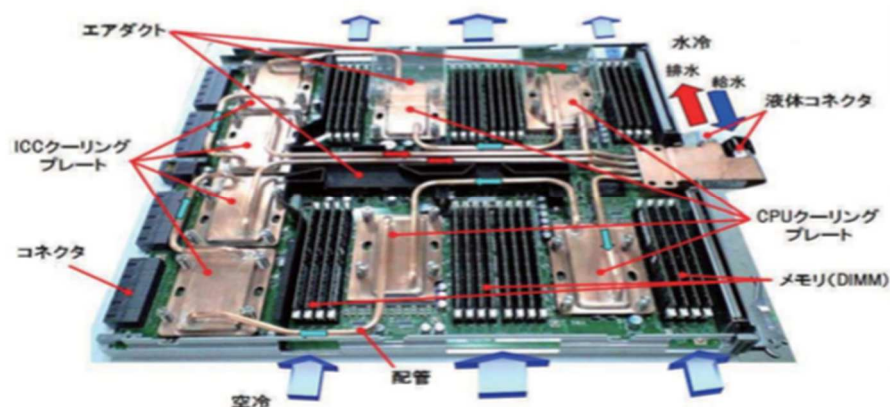


図7. 「京」コンピュータの基板 出典：文献(6)

「京」では CPU を直接水で冷やす方式（水冷システム）と空冷システムを組み合わせた冷却方式をとっている。水の比熱は空気の 4 倍あり、水冷の熱伝導は空冷よりも 2 桁高いことからクーリングプレートなどの放熱部品（図 7）をコンパクト化できたとのことである。さらに「京」では $PUE=1.34$ （後出）となっており、冷却の電力が総電力の約 30% となっていることである。この水冷・空冷システムにより富士通株式会社 久保秀雄氏の発表(6)によると、主要な電子部品である、CPU と ICC（インターコネクトコントローラ）の LSI ではジャンクション温度を目標値の 30°C 以内、パッケージ表面温度を 60°C 以内に納めることができたとのことで、スーパーコンピュータとしての信頼性、性能を確保している。

4. 半導体使用温度範囲

現在の半導体は主に Si(シリコン系)の半導体であり、シリコンで形成された P 型、N 型半導体の接合部（ジャンクション）よりトランジスタを構成している。この接合部温度（ジャンクション温度）の最大値 (T_{jmax}) は一般的に 150°C とされている。信頼性の維持のため、実使用条件はその 60～70% 以下の温度帯で使用しているのが現実である。ちなみに、ジャンクション温度を 60% 以下と設計すると、半導体の表面温度は、半導体ケース (T_c) とジャンクション (T_j) までの熱抵抗によるが、 40°C 以下としなくてはならないだろう。半導体のケース温度 (T_c) とラック筐体の雰囲気温度 (T_a : データセンターの部屋温度) の間にはやはり熱抵抗があるため、半導体中を流れる電力に比例するものではあるが、逆算すると T_a は 25°C 以下にしなくてはならないだろう。

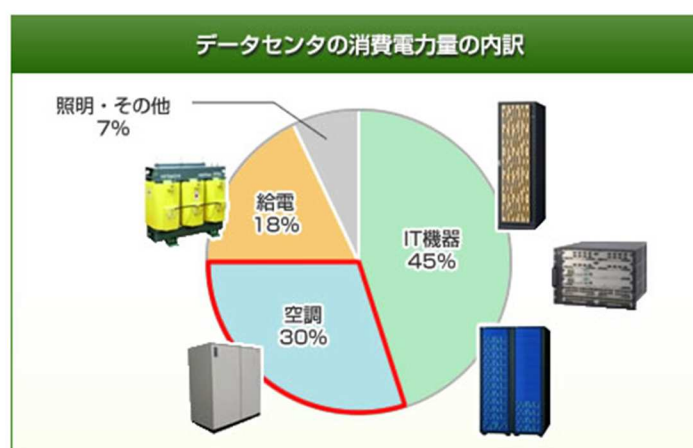
シリコン系半導体を T_{jmax} である 150°C を越えて使用すると、その半導体は機能しなくなり、温度が T_{jmax} に近づくほど信頼性は極端に悪くなる。そればかりではなく、誤動作などによるデータエラーなどが発生し、情報処理機能は維持できなくなる。

一般的には室温を 1°C 下げることにより、パフォーマンスは 0.2% 向上するとも言われ、

単純計算で 50℃さげることができれば 10%のパフォーマンス向上が期待できる(14)。したがって、データセンターの温度管理は大変重要なことである。

半導体を正常に駆動するためには、この熱をいかに取り除いて、ジャンクションの温度を下げるのが大きな課題であった。最近になって電力制御系にパワー半導体として使われ始めている SiC（炭化シリコン系）では、 T_{jmax} が 250℃であり、従来のシリコン系に対して、冷却に対する要求が低いため新しい半導体として使われ始めている。そして、その冷却に対する要求度が低いこととは、コスト削減、装置の小型化、アプリケーションの拡大など重要なポイントである。ただし、現在この SiC はまだまだ高価であり、使用はエネルギーをスイッチングするパワー領域に限られている。同様にパワー半導体として、GaN（窒化ガリウム）も T_{jmax} を高温で使用する事ができる。また、SiC、GaN とともに Si 系に比べ遙かに ON 抵抗が低いため、大電流による温度上昇は少ないメリットがある。シリコン系とこれらの新しい半導体の差は物性的なバンドギャップ（禁制帯幅）の違いによるものであり、シリコン系に比べて、これらの半導体はその値が大きいことにより、高温での特性が確保できるものである。半導体の T_{jmax} が規定されているということは、バンドギャップ及びドーパント濃度に依存するある温度以上になると、半導体 P 型と N 型の相違が小さくなり PN 接合部の機能がなくなり、トランジスタではなくなってしまうからである。

5. データセンターのエネルギー効率



* 出典：(社) 電子情報技術産業協会『IT化トレンドに関する調査報告書』
(2010年6月)

図 8. データセンターの消費電力内訳 出典：文献(11)

データセンターへ供給される全ての電力がサーバやストレージに供給されれば理想的ではあるが、実際には総供給電力の 50%～30%が機器の冷却や電圧変換におけるロスとなっ

てしまっているのが現実である。

半導体側として処理負荷に応じてクロック周波数や電圧の動的制御、リーク電流の削減、マルチコアなどのプロセッサの省電力化すなわち熱発生を抑える方向に技術革新がされている。しかしながら、さらなるパフォーマンス向上のための高集積化、プロセスルールの最小化、クロックの高速化などにより 2 項で述べたように、発熱密度は今後さらに高くなることは明白であり、放熱と冷却の技術が必要である。

データセンターのエネルギー効率を表す指標に PUE (Power Usage Effectiveness) と DCiE (Data Center infrastructure Efficiency) がある。

$$\text{PUE} = \text{データセンター全体の消費電力} / \text{IT 機器の消費電力}$$

PUE が小さいほど、データセンターのエネルギー効率がよい。

$$\text{DCiE} = 1 / \text{PUE} = \text{IT 機器の消費電力} / \text{データセンター全体の消費電力}$$

PUE と DCiE は逆数の関係にあることから、DCiE が大きいほどデータセンターのエネルギー効率が良いことになる。

PUE=1.0 とはデータセンター全体の電力は全て IT 機器で消費されていることで理想的ではあるが、実際には冷却のための空調電力、UPS や給電における変換ロスなど IT 機器以外での消費が大きくなっている。

多くのデータセンターの PUE は 3.0 以上ではあるが、前出の「京」コンピュータでは PUE=1.34 を達成し、「京」コンピュータがいかに効率よく設計されているとも言える。

図 8 で示すように、空調エネルギーの消費量が非常に多く、この空調エネルギーを削減することが PUE 低減のためには必要である。従来、データセンターを冷却するために、部屋全体を冷やすことが一般的に行われてきた。ただし、ラックの配列などにより、サーバの排熱が空調機に至るまでの経路が長く、「ホットアイル（熱だまり）」が発生し、この対策として部屋全体を過剰に冷却する傾向などが PUE を悪化させる原因となっていた。対策としては、冷やしすぎをなくし、必要な部分だけを冷却することである。具体的には部屋全体の冷却に加えて、「局所冷却」を取り入れることが一般化してきた。その「局所冷却」の一例として冷媒自然循環システム、「京」コンピュータが採用している水冷方式の併用などがある。最近では、米国においてデータセンター自体を寒冷地に設置して、冷却のエネルギーを削減している例がある（図 9）。国内ではさくらインターネット株式会社が 2011 年 11 月に北海道石狩市に東京ドームの約 1.1 倍の敷地に 8 棟 : 4,000 ラックの「石狩データセンター」を設置した。さらに、青森県の六ヶ所村などにデータセンターを設置する動きがある。

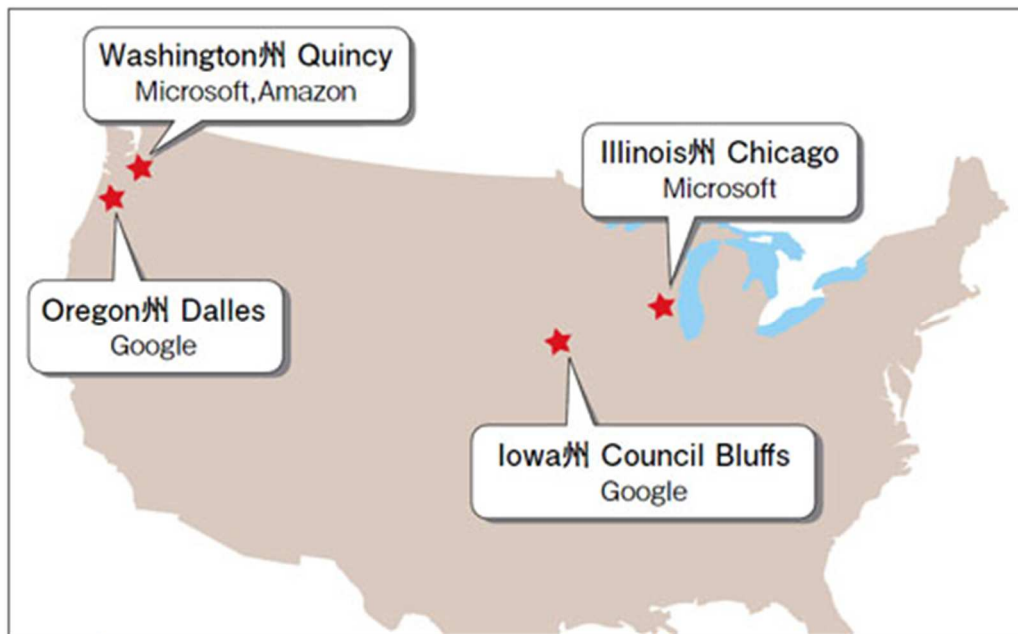


図 9. 米国の寒冷地設置データセンター 出典：文献(12)

6. 最後に

情報通信は今や我々の生活に欠かせないものとなっていて、データセンターの需要は今後さらに加速され、新たに多くが新設されると予想している。またそれぞれの規模はより大型のものになる傾向にあり、今後のデータセンターはその規模の大きさから排出される熱量は膨大となることが容易に予想される。その結果、冷却用の機器で消費される電力エネルギーは年々うなぎ上りに増加し、エネルギー起源のCO₂排出量も増えていくことが大きな問題となっている。パリで開催されたCOP21でも今後の温暖化の枠組みについて話し合われているが、各国の政治的な利害が対立し目の前に危機が迫っているにもかかわらず、今まで有効な解決策の合意は困難になっていたが、今回のパリ会議で最終的には途上国と先進国との間である程度の合意ができたことは画期的なことである。

エネルギー消費を少しでも減らしエネルギー期限のCO₂を少しでも減らすためには、電力エネルギーの20%以上消費されている情報通信機器の冷却に関わる電力の削減も今後の大きな課題である。

冷凍空調機器のエネルギー効率は近年技術開発が進み飛躍的に向上してきたが、今後もより一層の技術開発が求められる。

現在は、その熱処理などの研究の多くがIEEE、電子通信学会などで行われており、産業界でも電子情報技術産業協会（JAITA）等が中心的となっているが、冷凍空調の業界とは異なっていて本格的な連携は取れていないように思う。

エネルギー消費の削減というこれらの課題を解決するためにはデータセンター等の情

報通信業界と冷凍空調業界の今以上の連携が求められるのではないかと。

7. 電力使用機器の消費電力に関する現状のデータ

面白いデータがあったので、付録とする。財団法人新機能素子研究開発協会が 2009 年 3 月 23 日にまとめた「電力使用機器の消費電力に関する現状と近未来の動向調査」によると、国内の総消費電力約 1 兆 kWh において、「モータ」が最も消費電力の割合が多く 57.3%である。その中で、冷凍空調に使われるコンプレッサ駆動の「モータ」の消費電力は家庭・業務用を合わせて 24.4%となっている。GHP などの消費エネルギーを無視したとすると、全電力の 24.4%が冷凍空調で消費される電力ともいえる。モータの改善、インバータの改善、負荷となるコンプレッサ、熱交換器などのさらなる改善が重要である。

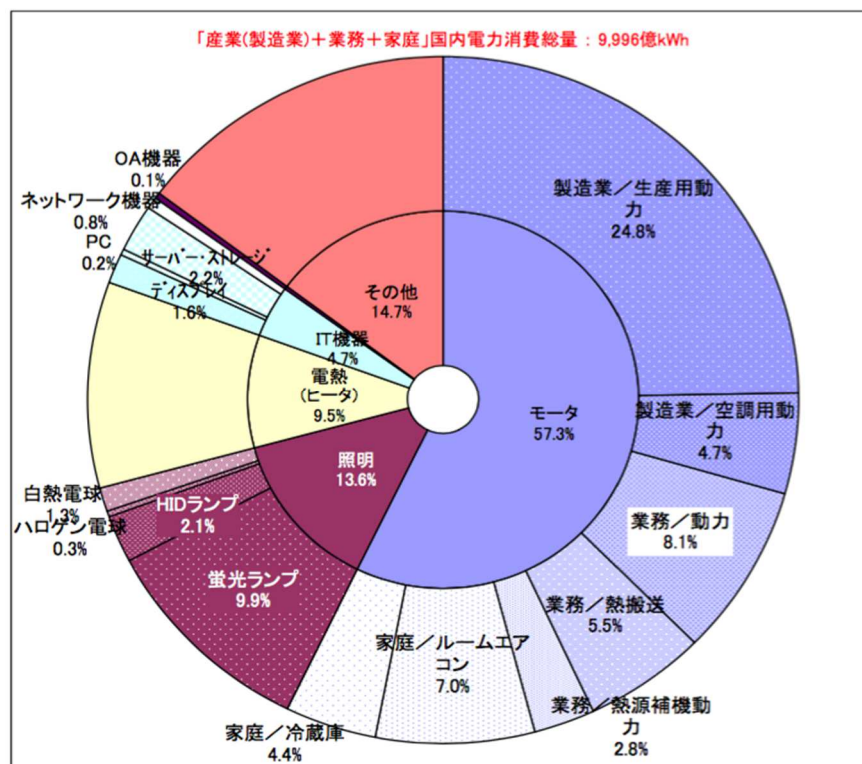


図 10. 電力消費内訳 出典：文献(13)

参考・引用文献

- (1) 平成 24 年度「我が国情報経済社会における基盤整備」(IT 機器のエネルギー消費量に係わる調査事業) 報告書 2013 年 2 月株式会社 NTT データ経営研究所
- (2) 「グリーン IT」新時代を作る情報政策と今後の方向 平成 20 年 6 月 経産省 情報通信機器課 星野岳穂

- (3) グリーン IT イニシアティブ (第 2 回) 平成 20 年 5 月 経済産業省 商務情報政策局
- (4) ウィキペディア「ムーアの法則」: <https://ja.wikipedia.org/wiki/ムーアの法則>
- (5) ウィキペディア「iPhone」: <https://ja.wikipedia.org/wiki/IPhone>
- (6) 日本冷凍空調学会 2013 年 2 月データセンター冷却技術セミナー「スーパーコンピュータ『京』支える冷凍技術」 富士通株式会社 久保秀雄
- (7) グラフで見るインテル CPU アーキテクチャーとプロセスの進化 :
<http://ascii.jp/elem/000/000/710/710636/>
- (8) Intel CPU の大きなマイルストーンとなる「Haswell」が遂に登場 :
http://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/kaigai/20130602_601851.html
- (9) 計算科学研究機構の施設と設備 —「京」の安定運用を支える基盤—理化学研究所
- (10) グリーン IT の本質とは企業価値を向上させる取り組みを目指して株式会社テックバイザー ジェイピー 代表 栗原 潔 Kiyoshi Kurihara :
<http://www.hitachi.co.jp/Prod/comp/soft1/open/report/omr/vol43/011.html>
- (11) 局 所 冷 却 空 調 シ ス テ ム 「 Ref Assist 」 (レ フ ア シ ス ト) :
http://www.hitachi.co.jp/environment/showcase/solution/it/ref_assist.html
- (12) 日経 IT pro [データセンター] コスト削減のため寒冷地に建設 :
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20081020/317291/>
- (13) 「電力使用機器の消費電力に関する現状と近未来の動向調査」2009 年 3 月 23 日・・・財団法人新機能素子研究開発協会
- (14) 日経新聞 Web 版スパコン「京」で復活した「忘れかけられた技術」
スパコンは再び「水冷」へ (1)
http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2000L_Q2A720C1000000/