

最終報告書

実験タイトル 計算パーツの熱に関する実験

チーム名 #342_atsukan (読み方: さんよんに あつかん)

代表者 大友広幸

所属 東京工業大学 情報理工学院 横田理央研究室 修士2年

ざっくり言うと

スーパーコンピュータなどの大きなコンピュータはもちろん、私達が普段使っているコンピュータは熱を出しながら動いています。普通はコンピュータを冷やすためにこの熱をいかに効率的に取り除いて捨てるかを考えるのですが、取り除かれる熱を再利用できないか検討するのがこの実験の目的です。おおよそ 60℃ くらいにものを加熱できそうなことは分かっていったため、今回は冬の大人のお供「熱燗」をこの熱で作ってみました。

1 背景

近年物理現象のシミュレーションや人工知能の開発など、多くの分野でスーパーコンピュータが用いられている。スーパーコンピュータの性能評価ではその絶対的な性能だけではなく消費電力あたりの性能も測られており、より消費電力あたりの性能の高いスーパーコンピュータの開発が期待されている。この対消費電力性能は

$$\text{対消費電力性能} = \frac{\text{計算性能 [Flop/s]}}{\text{消費電力 [W]}}$$

と計算される。年々スーパーコンピュータでのこの指標における性能は CPU (Central Processing Unit; 図 1) や GPU (Graphics Processing Unit; 図 2) などのプロセッサ技術や水冷や液浸冷却などの冷却技術の発達により向上している。このような対消費電力性能の国際的なランキングである Green 500 では、現在最新の 2019 年 11 月版で 1 位に理化学研究所の富岳 (プロトタイプ)、2 位に PEZY Computing の NA-1 がランクインするなど、国内でも活発に研究開発が行われている。これらの研究開発はいかに熱を出さないプロセッサを設計し、いかにその熱を効率的に回収するかに注力している。この場合の熱は期待されないものである。



図 1: CPU. コンピュータの頭脳にあたる部品であり、ほぼすべてのパソコンに搭載されている。GPU に比べて複雑な計算を行うことができる。



図 2: グラフィックボード. この中に GPU が搭載されている。3D ゲームなどの高度な描画に使われる単純な計算を高速に行え、近年では汎用的な計算にも使われている。

期待されない熱の発生は至るところに存在し、これを再利用するすべが多く考案されてきた。発生する熱の再利用を行っている例として、ごみ焼却施設における火力発電や液化天然ガスの再ガス化時の冷熱発電などが挙げ

られる。また理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」において発電のためのガスタービンで発生した蒸気をスーパーコンピュータの冷却に用いていた事例もある¹。このようにエネルギーの再利用は様々な分野において行われている。

このような状況の中、個人で所有されるパソコン等で行われている熱の利用法として目玉焼き²、ホットケーキ³、焼き肉⁴等がある。しかし、これらのプロセッサは冷却を行っておらず、一般にプロセッサは冷却を行わずに動作させると一時的もしくは永久に故障する。このため冷却を行わないプロセッサの熱の利用はプロセッサをただの熱源としかみなしておらず、その能力を十分に活かすことはできていない。これに対し著者は昨年 GPU を用い冷却を行った上での熱燗づくり⁵を行っている（図 3,4）。この実験では GPU の冷却を行いつつ熱燗を作ったが、熱の回収効率に課題が残った。



図 3: GPU の上に冷却台を置き、ファンで熱を逃しながら熱燗を作る



図 4: 温度を測定をしている様子

ところで、お酒の楽しみ方は数多く存在するが、冬のお酒の楽しみ方としてホットワイン、ホットウィスキーなど加熱して楽しむ文化が世界的に存在する。日本には日本酒を温める燗酒と呼ばれる文化がある。燗酒はおおよそ 30 度から 55 度のうち 5 度刻み程度の温度帯により様々な名称があり、人により好きな温度帯はまちまちである。本実験では GPU で発生する熱の再利用を通して電力効率の高いコンピュータ開発への貢献を目指す。

¹<https://www.khi.co.jp/rd/magazine/173/nj173ts03.html>

²<https://weekly.ascii.jp/ele/000/000/289/289560/>

³<https://www.youtube.com/watch?v=Q2a5nj7wwdQ>

⁴https://www.youtube.com/watch?v=wrmu_8LH88U

⁵<https://x.momo86.net/?p=59>

2 実験概要と環境構成

本実験では GPU を用いた計算クラスタを構築し、GPU で発生した熱を利用して飲み物を温める。本実験は次の 2 点を同時に満たす事ができるかの検証を行うことを目的とする。

1. GPU が十分な性能を出せる程度の冷却が行える
2. 日本酒をいい具合に温められる (50 °C が目安)

2.1 計算クラスタ構成

実験に用いる計算クラスタ (ATSUKAN-Cluster; 図 5) は 4 台の計算ノード (ATSUKAN-Node) と作業用ノード (ログインノード)、ルータから構成される。

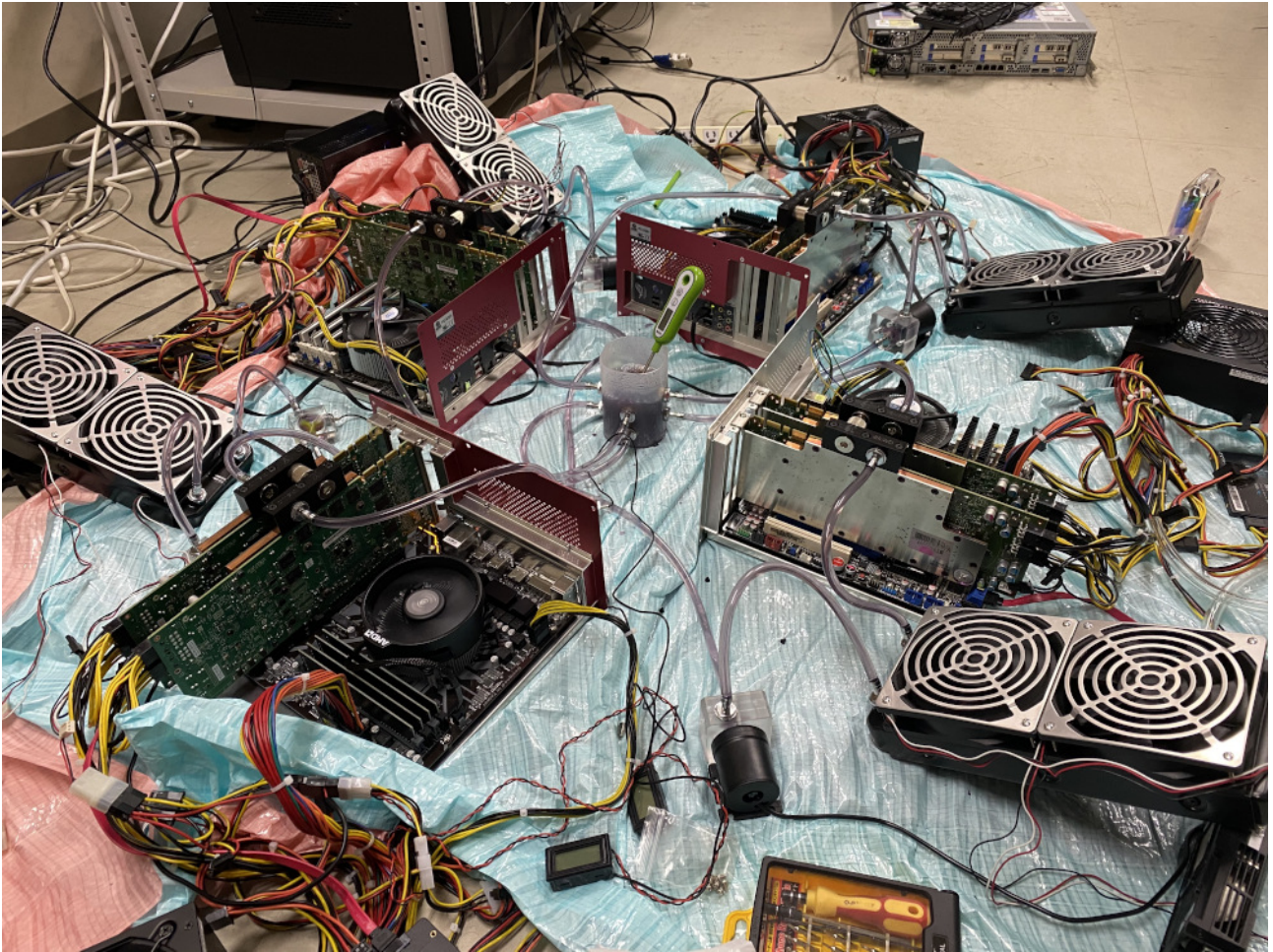


図 5: 稼働中の ATSUKAN-Cluster. 写真中央に冷却タンクがあり、ホースで各 ATSUKAN-Node と接続されている。

2.1.1 ATSUKAN-Node

ATSUKAN-Node は 2 枚のグラフィックボードを持ち、搭載されている GPU は NVIDIA Tesla K20 である。GPU を制御するホスト計算機の構成は古い計算機を再利用したためそれぞれ異なる (表 1)。

GPU の冷却には水冷と呼ばれる冷却手法を用いる。この手法ではプロセッサで発生した熱を熱交換モジュールを用いて循環する冷却液に移しプロセッサから熱を取り除く。一般にファンを用いた空冷と比較してプロセッサの温度を低くすることができる。本実験でもそれぞれの ATSUKAN-Node のグラフィックカードに水冷用の熱交換モジュールを取り付け、冷却液を流すことにより GPU の冷却を行う (図 6,7)。

名称	AN-1	AN-2	AN-3	AN-4
CPU	AMD Ryzen 3 3200G	Intel Core i7 950	Intel Core i7 950	Intel Core i7 960
メモリ	DDM4 8GB	DDR3 6GB	DDR3 6GB	DDR3 6GB

表 1: 4 台の ATSUKAN-Node (AN-0,1,2,3) で使用した部品.

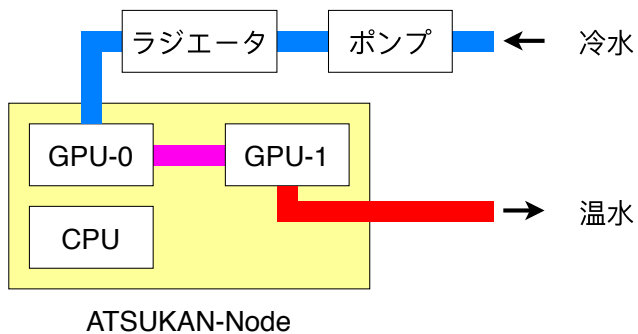


図 6: ATSUKAN-Node 冷却模式図



図 7: 熱交換モジュールをつける前のグラフィックボード（上）とつけた後のグラフィックボード（下）

2.1.2 ATSUKAN-Cluster

ATSUKAN-Node を 4 台組み合わせることで ATSUKAN-Cluster を構成する。ATSUKAN-Cluster では冷却液を中央の冷却液タンク（図 9）に貯蓄し、各 ATSUKAN-Node へ循環させることで GPU から発生する熱を回収する（図 10）。加熱する飲み物は平底フラスコに入れ冷却液タンクに入れることで加熱する。冷却液タンクはプラスチック製のペン立てをもとに作成した。



図 8: 冷却水の冷却を行うラジエータ。ファンが2つあり、片方のみ止めることも可能。



図 9: 冷却液タンク

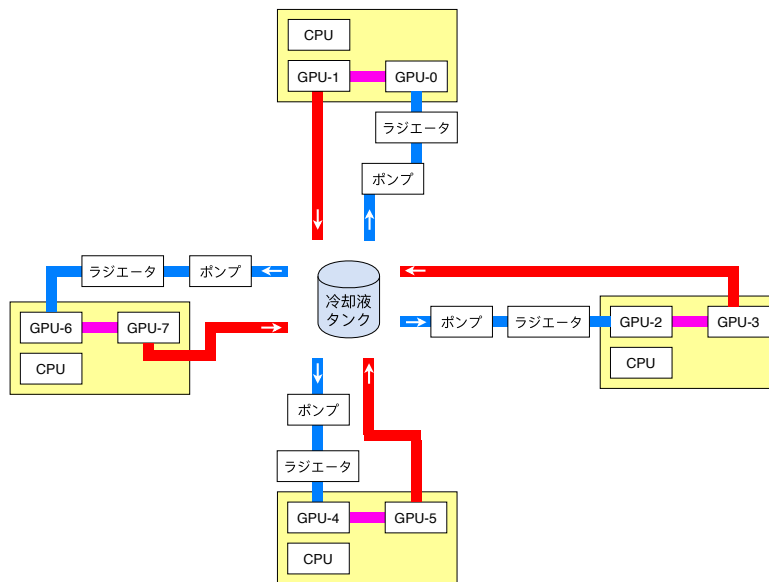


図 10: ATSUKAN-Cluster 模式図

2.2 ソフトウェア

ATSUKAN-Node のオペレーティングシステム（OS）には CentOS 7 を採用した。その他のソフトウェア/プラットフォームとそのバージョンは表 2 に示す。

ソフトウェア/プラットフォーム	目的	バージョン
GCC	ソフトウェアの作成（プログラムのコンパイル）	6.4.0
CUDA	GPU 計算用のソフトウェアを作る	9.0
NVIDIA Driver	GPU の動作制御	390.129
Open MPI	複数のノードを協調動作させる（分散計算）	4.0.1

表 2: 使用したソフトウェア/プラットフォームの目的とバージョン

2.2.1 計算プログラム

GPU を温めるために実行するプログラムとして行列行列積（GEMM; GEneral Matrix Multiply）を計算するプログラムを作成した。行列行列積は多くの物理シミュレーションなどに使われている他、近年盛んに研究が行われている人工知能の分野でも非常に多く使われている計算である。

2.2.2 GPU 監視プログラム

GPU の温度を監視するためのプログラムを作成した。GPU の温度の取得には CUDA で提供されている NVML を用いた。これを用いることで GPU 内部の温度センサーにより GPU の温度を取得することができる（図 11）。

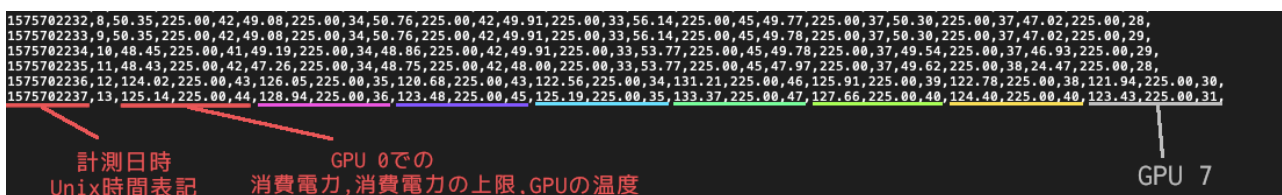


図 11: GPU 監視プログラムの出力例

2.3 補助実験

実験はすべて研究室のサーバ室で行い、室温はエアコンにより 19 度に設定されている。

2.3.1 空冷実験

水冷を行う前に空冷 (図 15) による温度上昇傾向と消費電力の調査を行った (図 12,13)。実験は GPU をアイドル状態で十分放置した後に行った。実験では温度測定の開始 10 秒後から GEMM 計算を開始し、3600 秒の後 GEMM 計算を停止した。すなわちはじめの 10 秒がアイドル状態の温度、10 秒-3610 秒が加熱時の温度、3610 秒以降がアイドル状態で冷却を行っている状態である。実験は 3 回行いその平均をプロットした。GPU-{0,1}, GPU-{2,3}, GPU-{4,5}, GPU-{6,7}, はそれぞれ ATSUKAN-Node AN-1, AN-2, AN-3, AN-4 に搭載されている GPU である。

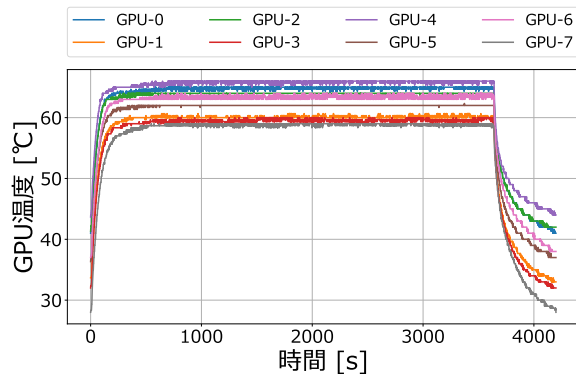


図 12: 空冷による GPU の温度上昇傾向

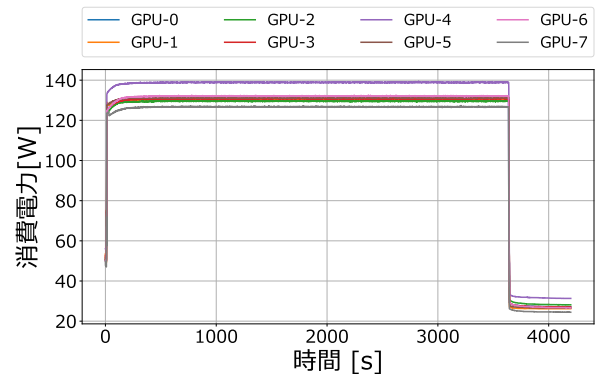


図 13: 空冷による GPU の消費電力傾向

図 12 より GPU によって到達する最高温度にばらつきがあることがわかる。加えて 10 秒目までと加熱後の冷却を行っている 4000 秒目でも GPU 温度にばらつきが見られる。そこで 0 秒目の温度を基準とした温度上昇度をプロットしたものが図 14 である。

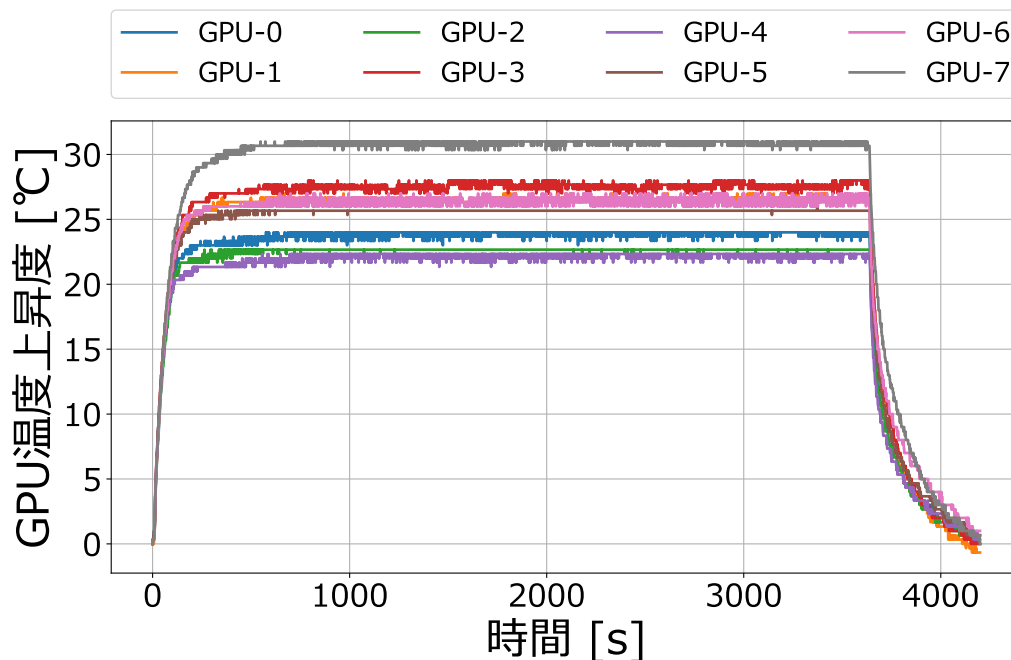


図 14: 空冷による GPU の温度上昇度 (0 秒目を基準)

図 14 では図 12 で最高到達温度の低かった GPU ほど温度上昇が高い傾向にあることがわかる。グラフィックボードのファンは GPU の温度が高いほど高速に回転し冷却能力を高めるよう制御されている。このため GPU 温度が高いものほどファンが強く冷却し温度上昇度合いは低いと考えられる。

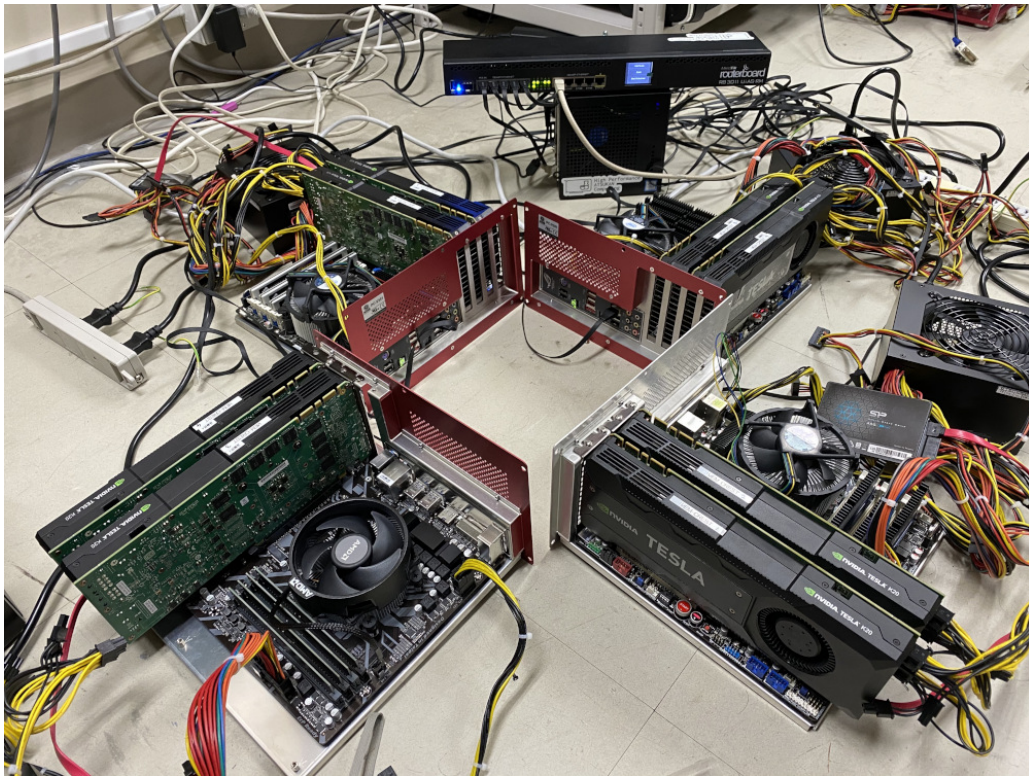


図 15: 空冷状態の ASTUKAN-Cluster. 冷却液タンクはなく、各グラフィックボードにファンが付いている。

また、各 GPU の最高温度と最高消費電力の相関係数を計算したところ $+0.68$ であったため、これらの間には正の相関があることが認められる。

3 実験

実験は全部で5つ行った。

1. 高温水冷化による計算性能への影響の調査

ATSUKAN-Cluster では日本酒を温めるため通常の水冷よりも高温の冷却水を用いて GPU の冷却を行う。このことが計算性能へ与える影響の調査を行った。

2. GPU 温度と冷却水温度の関係の調査

GPU 温度と冷却水温度の関係を調査し、高温冷却水にどれほどの冷却能力があるかの調査を行った。

3. ラジエータあたりのファンの個数による GPU 温度への影響の調査

各 ATSUKAN-Node のラジエータには最大2つのファンを取り付けられるが、このファンの個数による GPU 温度への影響の調査を行った。これは温めるお酒の温度調整をファンの数によって可能かどうかを調べる目的である。

4. 稼働ノード数の GPU 温度への影響の調査

ATSUKAN-Node の稼働数を1台、2台、4台とした場合の GPU 温度へ与える影響の調査を行った。これは温めるお酒が稼働ノード数によって可能かどうかを調べる目的である。

5. 熱燗づくり

実際に美味しい燗酒を作れるかどうか調査を行った。作った燗酒を第三者に飲んでもらい感想を言ってもらった。

3.1 高温水冷化による計算性能への影響の調査

水冷を行うことで GPU の計算性能にどれほど影響を与えるかの調査を行った。通常水冷は空冷と比較して冷却能力が高いが、ATSUKAN-Cluster では通常より冷却液を高温状態で循環させることとなる。この高温冷却水による冷却能力を調査するため、次の3つの状態での計算性能の比較を行った。

1. 空冷の状態での性能
2. 冷却液の温度が低い状態での性能
3. 冷却液の温度が高い状態での性能

計算性能の指標として GEMM 計算による Flop/s を用いた。Flop/s は計算性能を測る指標の一つで、1秒間に何回計算を行えたかを表すものである。この値が高いほどより計算性能が高いということとなる。

実験では4台の ATSUKAN-Node のうち1台 (AN-1) のみを用いて性能を測定する。4台で実験を行わない理由は、3の冷却水が高温状態での計算性能計測では冷却液を加熱しておく必要があり、この加熱を行う ATSUKAN-Node が必要であるためである。上の3つの場合での計算性能の計測値を表3に示す。

	1. 空冷	2. 水冷（低温冷却水）	3. 水冷（高温冷却水）
2 GPU の合算計算性能 [GFlop/s]	5.02×10^3	5.02×10^3	5.02×10^3
冷却水温度 [°C]	-	29.7	55.8

表 3: 水冷化による計算性能への影響

この実験より冷却液が高温の場合であっても GPU は空冷時や冷却液が低温の場合と同じ程度の性能が出せていることが確認された。

3.2 GPU 温度と冷却水温度の関係の調査

GPU 温度と冷却水の温度の変化について測定を行った (図 17)。各ラジエータにつきファンはを 1 つまたは 2 つ取り付け、4 台すべての ATSUKAN-Node を稼働させ実験を行った。冷却液の温度は冷却液タンクに温度計を差し込み、スマートフォンでアプリを使い 10 秒ごとに撮影することで計測した (図 16)。デジタルデータ化は撮影した写真を見て手動で行う。加熱時間等は 2.3 の補実験と同じである。この実験より冷却液の温度は GPU 温度よ

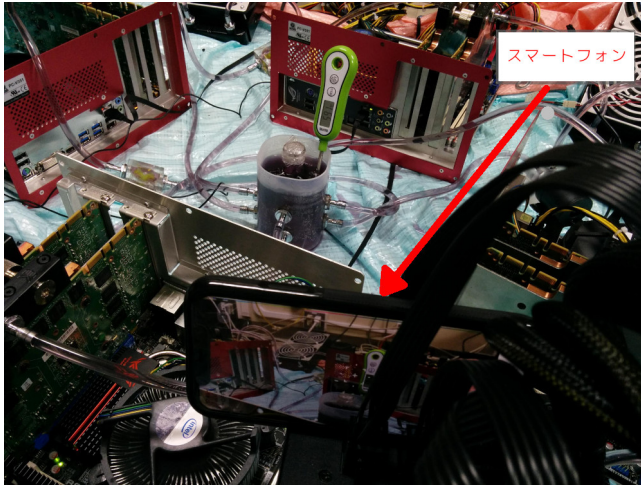


図 16: 温度計とスマートフォンを用いて冷却液タンク内の温度を計測する

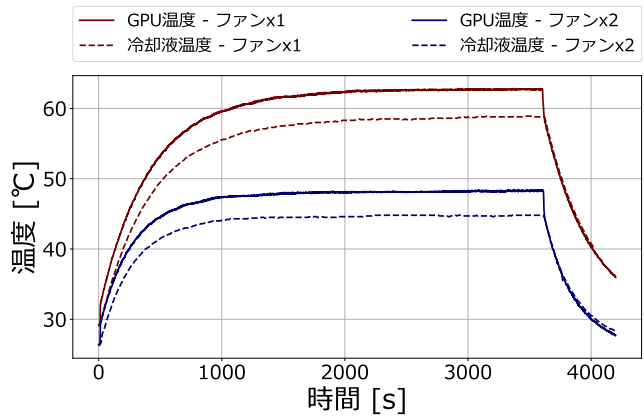


図 17: GPU 温度と冷却液温度の変化

り 4 °C 程度低く、加熱後の冷却の段階では GPU は冷却水温度まで温度を低下させた後、冷却液と同じ温度変化を行うことが確認された。

GPU 温度が頭打ちとなると冷却液温度も大して上昇しないことがわかるため、以降の実験では GPU 温度のみ計測を行う。

3.3 ラジエータあたりのファンの個数による GPU 温度への影響の調査

各 ATSUKAN-Node に接続されているラジエータには 2 つのファンがついており、これを用いて冷却水の冷却を効果的に行う。そこでファンの個数を 1 個もしくは 2 個とした場合の冷却水温度がどう変化するかを調査を行った (図 18,19)。計測は 3 回行い、図はその平均を取ったものである。加熱時間等は 2.3 の補実験と同じである。

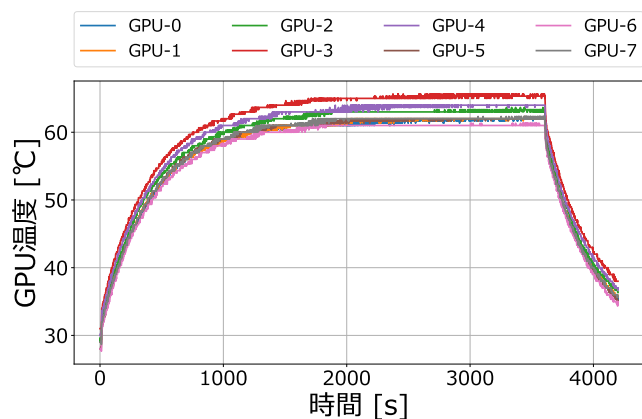


図 18: ラジエータのファンの個数が各 ATSUKAN-Node あたり 1 個の場合の GPU 温度の変化

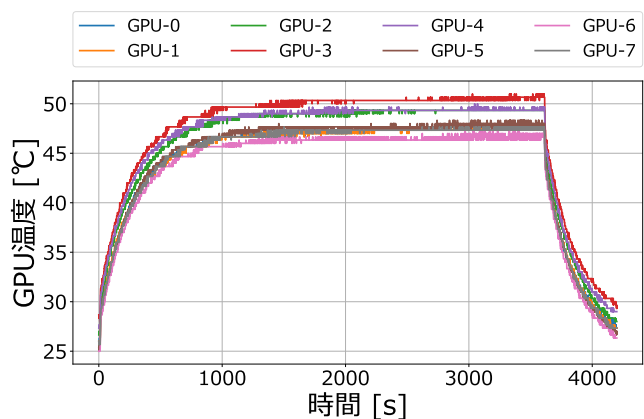


図 19: ラジエータのファンの個数が各 ATSUKAN-Node あたり 2 個の場合の GPU 温度の変化

ファンを多く取り付けることで多く冷却を行い、GPU の温度が下がっていることがわかる。また、補実験の空冷の場合と同様に GPU により最大到達温度にばらつきがあることがわかる。

これらそれぞれの平均をとり、空冷の場合の GPU 温度の変化と比較したものが図 20 である。これより水冷では GPU 温度の上昇速度を抑えられるものの、ファンの個数が各ノード 1 つの場合は空冷と同程度の GPU 温度となることが確認された。この実験よりファンの数により GPU 温度を調整できることが確認され、冷却水及び加熱するお酒の温度も調整できると推測される。

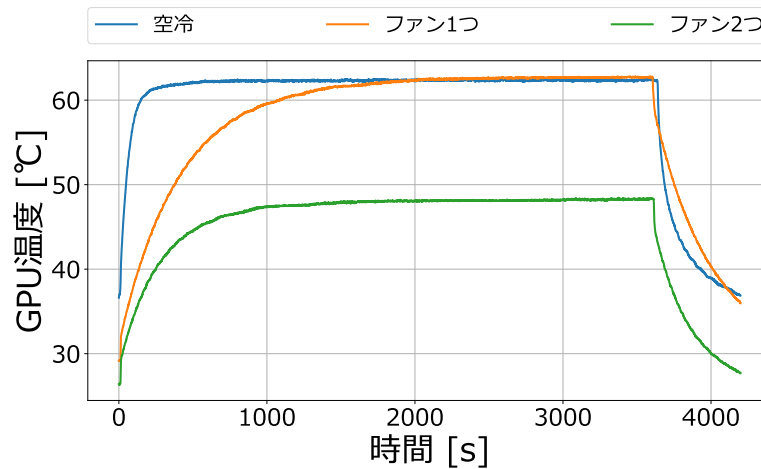


図 20: 空冷と水冷でラジエータのファンの個数が各ノードあたり 1 つ、2 つだった場合の GPU 温度の変化

3.4 稼働ノード数による GPU 温度への影響の調査

ATSUKAN-Cluster 内の ATSUKAN-Node の稼働台数を 1 台、2 台、4 台としたときの各 GPU 温度の調査を行った。稼働台数を 1 台、2 台とした場合の GPU 温度変化が図 21 である。稼働台数が 4 台の場合の温度変化は図 18 である。ラジエータのファンは 1 つとした。計測は 3 回行い、図はその平均を取ったものである。加熱時間等は 2.3 の補実験と同じである。

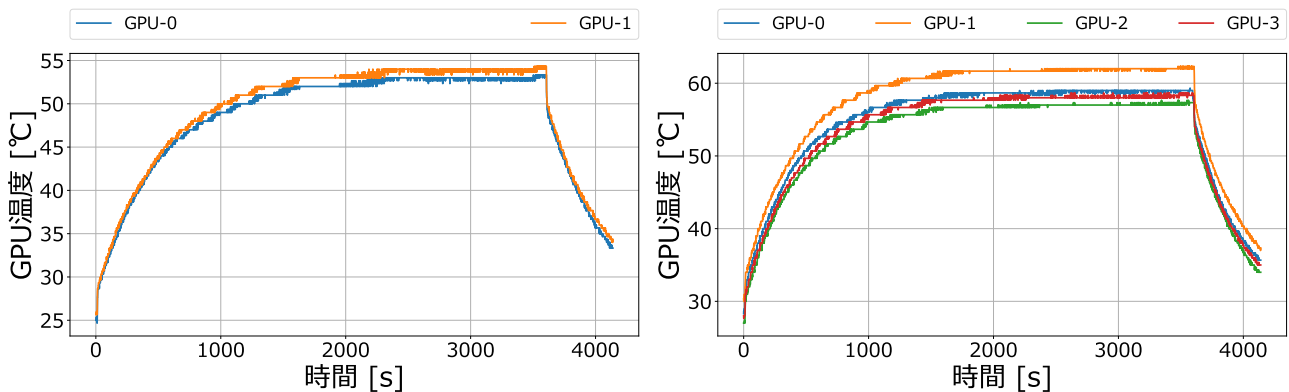


図 21: ノード数が 1 台 (左), 2 台 (右) の場合の GPU 温度変化

どちらの場合も GPU ごとに最高到達温度にばらつきがあることがわかる。そこでノード数が 1 台、2 台、4 台の場合の平均を取りプロットしたものが図 22 である。稼働ノード数により GPU の最高到達温度に差があることがわかる。この実験より稼働ノード数により GPU 温度を調整できることが確認され、冷却水及び加熱するお酒の温度も調整できると推測される。

横軸に稼働ノード数、縦軸に GPU 温度平均が 50 °C になった時間をとったものが図 23 である。ノード数が 1 台から 2 倍の 2 台とした場合は 50 °C となる時間はおおよそ 1/2 となったが、4 倍の 4 台とした場合は 1/4 とはなら

なかった事がわかる．この実験のみからではノード数を仮に 8 台 16 台と増やした場合に GPU 温度の上昇速度が 8 倍 16 倍となるか（強スケーリングするか）を推測することは困難である．

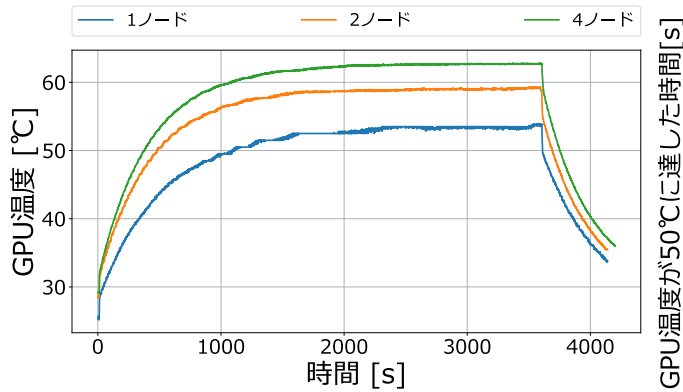


図 22: 異なるノード数での GPU 温度の変化

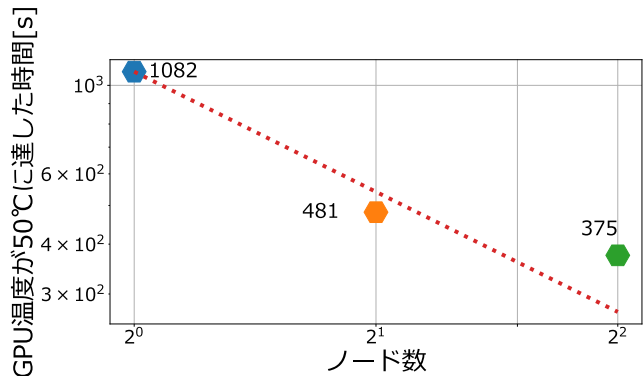


図 23: 稼働ノード数を 1 台, 2 台, 4 台とした場合に GPU 温度が 50 °C に到達するまでの時間. 赤破線はノード数が N 倍になったときに 50 °C に到達する時間が $1/N$ となると仮定した場合の直線である.

3.5 熱燗作り

計算による熱を再利用し日本酒を温める．実験は次の構成で行う．

- 4 台のすべてのノードを使用
- 冷却水は十分に加熱されており，この状態で冷却液タンクに徳利をつける
- ラジエータあたりのファンの数は 1 台の場合と 2 台の場合のどちらも行う

手順は次のとおりである．

1. 加熱プログラムを実行し冷却液を加熱する．
2. 冷却液が十分加熱された後，冷却液タンクにフラスコに入れた日本酒を投入する（図 24,25）．この際気化した冷却液が結露したり，飛び跳ねたりしてフラスコの中に入るのを防止するため，フラスコの口をラップで塞ぐ．ラップで塞ぐことで日本酒の風味を逃さないことにもつながる．
3. お酒を飲むときは何か食べないとアルコールの吸収が速くなり，酔いが回るのが早くなります．お寿司を食べましょう（図 26）．

3.5.1 各ラジエータでファンを 2 つ回した場合

お酒の温度は 42 度程度となった．これを飲んだ研究室の学生 T 氏と N 氏は口を揃えて「ぬるい．作り直し」と言った．

3.5.2 各ラジエータでファンを 1 つのみ回した場合

酒の温度は 52 度程度となった．これを飲んだ研究室の学生 N 氏は「うまい．丁度いい温度．合格」と言った．



図 24: 実験で使った日本酒

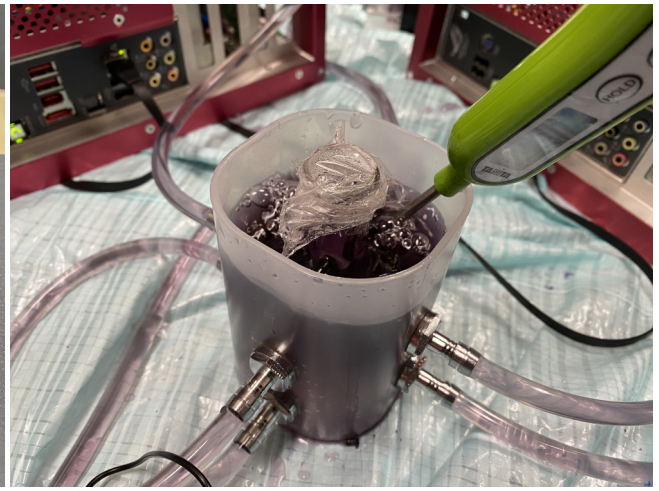


図 25: 爛をつけている様子



図 26: 熱爛と寿司

4 結論と今後の課題

本実験により次のことが確認された。

- 計算により発生する熱を再利用し計算能力を損なうことなしに日本酒を適温に温めることは可能である。
- ファンの個数やノードの稼働数により熱爛の温度を調整可能である。

これによりこの実験の目的は達成された。

今後の課題としては次のものが挙げられる。

- ローストビーフが食べたい
冷却液の温度が 55℃程度となるため、低温調理も可能であると考えられる。著者はローストビーフが食べたい。
- GPU 以外のプロセッサでの熱の再利用の検討
より消費電力の低く発熱の少ないプロセッサや逆に GPU 以上に高温になるプロセッサなど多くの種類のプロセッサがある。これらのプロセッサを用いてそれらに最適な熱の再利用法の考案を行いたい。

謝辞

研究費用を提供してくださった株式会社八光電機様に感謝いたします。また、研究機材を提供してくださった本学学術国際情報センター 遠藤敏夫教授，冷却方法について助言してくださった額田彰准教授に深く感謝致します。加えて，出来上がった燗酒を飲んで感想を言っていただきました横田研究室の学生の皆さんに感謝致します。