

Low Fin Tubeを適用した円筒型リチウムイオン電池 パックの強制空冷性能評価 : Alignedおよび Staggered配置の比較検討

永瀬, 太希
九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7431335>

出版情報 : Kyushu University, 2025, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :



令和7年度

修 士 論 文

Low Fin Tube を適用した円筒型リチウムイオン電池パック
の強制空冷性能評価
—Aligned および Staggered 配置の比較検討—

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻

機械・システム理工学メジャー

熱エネルギー変換システム学研究室

永 瀬 太 希

指導教員 宮 崎 隆 彦

Kyaw Thu

提出年月日 令和8年2月5日

要約

脱炭素化の流れを背景に電気自動車の普及が進み、車載用リチウムイオン電池の高出力化が加速している。これに伴い、充放電時の発熱増大による温度上昇や温度不均一性が顕在化し、性能低下や劣化のばらつきの進行に加えて、局所過熱を起点とする熱暴走リスクが重要な社会課題となっている。特にバッテリーパックでは単セルの異常が周辺セルへ伝播しうるため、温度上昇の抑制と温度均一化を両立する熱管理システムが求められている。一方で、空冷・液冷・PCMなど冷却方式には多様な選択肢があり、重量、体積、消費動力、安全性などの制約とトレードオフを伴うため、最適な冷却方式が定まっている状況ではない。

本研究では新たな空冷システムとして Low Fin Tube に着目する。LFT はフィン構造によって伝熱面積を拡大し、表面近傍の境界層更新を促すことで、対流熱伝達の向上が期待できる。またセルを管状構造で覆うコンセプトは異常時における噴出や飛散の外部への被害を抑制できる可能性があり、冷却性のだけでなく安全性の観点からも検討する価値を有する。

そこで本研究では、COMSOL Multiphysics を用いた数値解析により、円筒型リチウムイオン電池の強制空冷における LFT 適用効果を評価する。熱および流体解析には Heat Transfer in Solids and Fluids と Laminar Flow を連成し、固体内熱伝導と空気の対流熱輸送を統一的に扱った。さらに発熱モデルには、電池内部の反応、物質輸送、電荷輸送を記述する Pseudo-two-dimensional(P2D)電気化学モデルを導入し、SOC や反応状態に応じて変化する発熱をモデルに導入した。

解析はまず単一セル条件で、LFT の有無による最大温度および温度均一性の変化を比較し、圧力損失から算出した必要動力も評価した。これにより LFT の利点と弱点を整理した。次にバッテリーパック条件に拡張し、Aligned および Staggered 配置におけるセル間隔の違いが冷却に及ぼす影響を比較した。温度均一性、熱除去量、必要動力、パッケージ体積といった複数の指標から配置設計の特徴を明らかにする。

目次

記号.....	iv
添字.....	v
表一覧.....	vi
図一覧.....	vi
第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 本論文構成.....	2
第2章 理論的背景.....	3
2.1 リチウムイオン電池の概略.....	3
2.1.1 作動原理と構成材料.....	3
2.1.2 電池形状による比較.....	4
2.2 リチウムイオン電池における熱的課題.....	7
2.2.1 発熱メカニズム.....	7
2.2.2 熱暴走.....	7
2.3 熱管理システム.....	9
2.3.1 空冷方式.....	9
2.3.2 液冷方式.....	9
2.3.3 相変化材料(PCM)冷却方式.....	10
2.4 熱流体の基礎理論.....	10
2.4.1 熱伝導方程式.....	10
2.4.2 空気流れの支配方程式.....	11
第3章 数値計算手法.....	13
3.1 幾何学的モデル.....	13
3.1.1 モデル形状.....	13
3.1.2 各物性値.....	15
3.2 電池モデル.....	17
3.2.1 Bernardi 発熱モデル.....	17
3.2.2 電気化学-熱結合モデル(P2D).....	18
3.1.3 本解析における発熱源と P2D モデルの関係.....	21
3.3 数値シミュレーションの設定.....	21
3.3.1 境界条件および初期条件の設定.....	21
3.3.2 メッシュ依存性試験.....	22
第4章 結果および考察.....	24
4.1 LFT 装着単一円筒型バッテリーにおける熱性能解析.....	24
4.1.1 C レート.....	24
4.1.2 流速.....	26

4.2 電池パックモジュールの設計最適化.....	29
4.2.1 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_y が冷却に与える影響	29
4.2.2 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_y の最適化.....	32
4.2.3 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_x が冷却に与える影響	35
4.2.4 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_x の最適化.....	37
4.2.5 Staggered 配置におけるバッテリー間隔が冷却に与える影響	40
4.2.6 Staggered 配置におけるバッテリー間隔 S_r の最適化	42
4.2.7 Aligned 配置と Staggered 配置の比較.....	45
第5章 結論.....	51
5.1 本研究の総括.....	51
5.2 今後の課題	52
謝辞.....	53
付録.....	54
付録1 空気の粘性係数.....	54
付録2 空気の比熱容量.....	54
付録3 空気の熱伝導率.....	54
参考文献	55

記号

記号	名称	単位
q	熱流束	W/m^2
k	熱伝導率	$W/(m \cdot K)$
T	温度	K
ρ	密度	kg/m^3
C_p	定圧比熱	$J/(kg \cdot K)$
t	時間	s
u	流速	m/s
Q	熱量	W
μ	動粘度係数	$Pa \cdot s$
F	力	$kg \cdot m/s^2$
Re	レイノルズ数	-
D	代表長さ	m
A	面積	m^2
R	気体定数	$J/mol \cdot K$
I	電流	A
V	電圧	V
S	エントロピー	J/K
n	電子数	mol
F	ファラデー定数	C/mol
c	濃度	mol/m^3
D	拡散係数	m^2/s
r	長さ	m
j	電流密度	A/m^2
ϕ	電位	V
σ	電気伝導率	S/m
ε	体積分率	-
t^+	輸率	-
κ	イオン伝導率	S/m
η	過電圧	V
α	移動係数	-
L	長さ	m
ΔT	温度変化量	K
η	効率	-
P_w	必要動力	W
h	熱伝達係数	$W/(m^2 \cdot K)$

添字

添字	名称
h	代表
ocv	開回路
irr	不可逆
rev	可逆
s	活物質
eff	有効
e	電解質
a	負極
c	正極
max	最大
in	入り口
out	出口
ab	吸収

表一覧

表 1 LFT 寸法.....	14
表 2 物性値.....	16

図一覧

図 1 Global electric car sales, 2014-2024	1
図 2 リチウムイオン電池内の反応	4
図 3 角型電池	5
図 4 円筒型電池	6
図 5 パウチ型バッテリー	7
図 6 熱暴走のメカニズム	9
図 7 モデル形状.....	13
図 8 LFT 寸法	14
図 9 単セルモデル形状.....	14
図 10 バッテリーパック (a) Aligned 配置, (b) モデル形状.....	15
図 11 バッテリーパック (a) Staggered 配置, (b) モデル形状.....	15
図 12 電気化学モデル.....	19
図 13 電気化学モデル (P2D) 式	21
図 14 メッシュ依存性.....	22
図 15 最大温度(C-rate).....	25
図 16 温度変化量 ΔT (C-rate)	25
図 17 必要動力 (C-rate)	26
図 18 最大温度 (初期流速)	27
図 19 温度変化量 ΔT (初期流速)	28
図 20 必要動力 (初期流速)	28
図 21 最大温度.....	30
図 22 空気温度(a)28mm, (b)38mm(600s).....	30
図 23 充放電終了時分布図(a) 流線($S_y=28\text{mm}$), (b) 流線($S_y=38\text{mm}$), (c)流速($S_y=28\text{m}$), (d) 流速($S_y=38\text{m}$), (e)有効冷却面積($S_y=28\text{mm}$), (f)有効冷却面積($S_y=38\text{mm}$).....	31
図 24 熱除去量.....	32
図 25 空気平均温度	32
図 26 温度変化量 ΔT ($t=600\text{s}$).....	33
図 27 冷却効率 η , 必要動力 P_w	34
図 28 パッケージ体積.....	35
図 29 最大温度 ($t=600\text{s}$)	36
図 30 空気温度(a) $S_x=28\text{mm}$, (b) $S_x=38\text{mm}$	36
図 31 流速(a) $S_x=28\text{mm}$ (b) $S_x=38\text{mm}$	37

図 32 温度変化量 ΔT	38
図 33 熱除去量.....	38
図 34 冷却効率 η , 必要動力 P_w	39
図 35 圧力損失.....	39
図 36 パッケージ体積.....	40
図 37 最大温度.....	41
図 38 最大流速.....	42
図 39 温度変化量 ΔT	43
図 40 熱除去量.....	43
図 41 冷却効率 η , 必要動力 P_w	44
図 42 圧力損失.....	44
図 43 パッケージ体積.....	45
図 44 温度変化量 ΔT	46
図 45 熱除去量.....	47
図 46 冷却効率 η , 必要動力 P_w	48
図 47 圧力損失.....	48
図 48 バッテリー最大温度.....	49
図 49 パッケージ体積.....	49

第1章 序論

1.1 研究背景

近年,脱炭素化とエネルギー安全保障の観点から輸送部門の電動化が進んでおり,電気自動車 (EV) の普及は世界的な潮流となっている.国際エネルギー機関 (IEA) によると,2024 年の世界の EV 販売台数は約 1,700 万台に達し,新車販売に占める EV 比率は 20%以上まで上昇した.(図 1) この市場拡大に伴い,車載用途の電池需要は急増しており,IEA は近年の電池産業が新たな局面に入ったことを報告している.[1]すなわち,リチウムイオン電池は社会を支える基幹デバイスとなりつつあり,普及の進展と同時に,安全性,信頼性,長寿命化に対する要求もより一層増している.

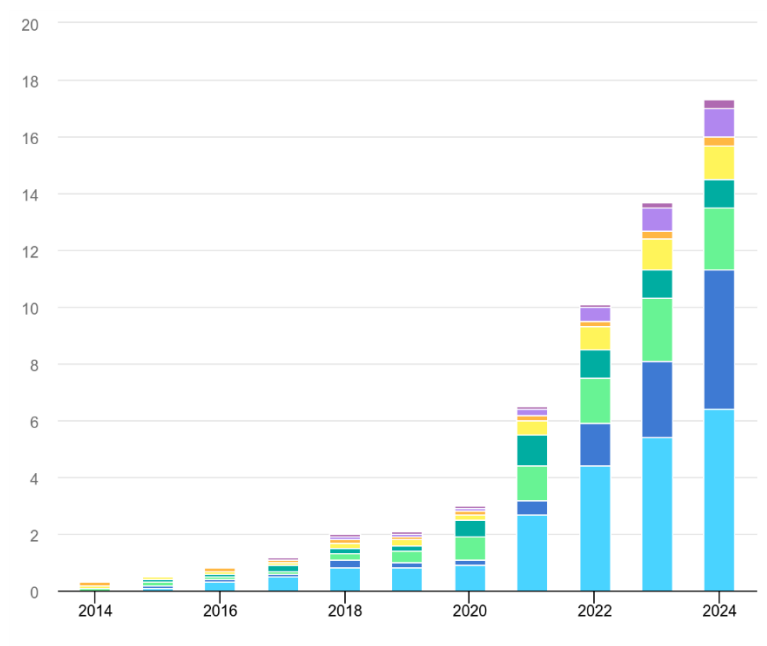


図 1 Global electric car sales, 2014-2024 [2]

一方で,リチウムイオン電池は高エネルギー密度を実現する反面,充放電過程で発熱を伴うエネルギーデバイスである.特に高 C レート充放電により電流が増大すると,内部抵抗に起因する発熱が増加し,セル温度の上昇と温度分布の不均一化が起りやすい.さらには,電池の過度な温度上昇は性能低下に加えて,劣化を加速させ,寿命短縮の原因となる.[3]

安全性の観点からリチウムイオンバッテリーが熱暴走に至り得る点が最大の懸念点である.熱暴走は,発熱速度が放熱能力を上回ることで温度が自己加速的に上昇し,ガス放出や発火などの重大事故に至る現象である.特に,モジュールやバッテリーパックとして多数のセルを集積する際に,単セルの異常が周辺セルに伝播し,発火が拡大する危険性が高まる.そのため,リチウムイオン電池の熱管理は温度を下げることにとどまらず,温度分布を均一化すること,さらに異常時のリスクを抑える観点を含めて議論する必要がある.

この要求に対して,リチウムイオン電池の熱管理手法として空冷,液冷,PCM 冷却など,多様な冷却方式が提案されているが,冷却性能だけでなく,重量,体積,コスト,安全性,必要動力などの制約が同時に設計を支配するため,適用条件に依存して最適解が変化し,現状,最適解が決まっている状況ではない.また円筒型バッテリーのパックでは,セルの配置や間隔によって流れ場や熱の移動,圧力損失を同時に左右し,冷却性能とシス

テム設計の間にトレードオフが発生することが報告されている.[4]そのため,冷却方式の検討は,セル単体の冷却能力のみならず,配置形状とセルの間隔を含むモジュール設計として扱うことが不可欠である.

こうした背景のもと,本研究が着目する Low Fin Tube(LFT)はフィン構造により伝熱面積を拡大し,境界層の更新を促進することで,強制空冷における熱伝達向上が期待できる.一方で,フィンを付けることは流路抵抗の増大を通じて圧力損失を増やしうるため,冷却性能の向上と消費動力増大のトレードオフとして評価する必要がある.また,セルを管状構造に収めるコンセプトは,異常時における噴出や飛散,周辺への直接的な影響を抑制する方向に働く可能性があり,熱設計と安全性設計を同時に考えるうえで,検討する価値があると考えた.以上より,電気自動車用バッテリーパックの熱管理において,冷却性能,温度均一性,必要動力の低減,体積縮小を同時に満たす設計解を探索する必要がある,その候補の一つとして,LFT 適用の位置づけを明確にすることが重要であると考えた.

1.2 研究目的

リチウムイオン電池は高出力化・高 C-rate 化に伴い発熱が増大し,局所過熱によって熱暴走リスクや劣化ばらつきが起り得る.この課題に対し,本研究では円筒型リチウムイオン電池の強制空冷に Low Fin Tube (LFT) を適用し,伝熱面積の拡大と熱伝達促進によって冷却性能を向上できるという仮説を検証することを目的とする.具体的には,まず単一セル条件で LFT 有無による最大温度および温度均一性の変化を定量評価し,併せて圧力損失に起因する必要動力の増加というトレードオフを整理する.次に,LFT 装着セルを複数配置したバッテリーパックを対象に,Aligned/Staggered 配置およびセル間隔が冷却性能とシステム設計指標(温度変化量,熱除去量,必要動力,冷却効率,パッケージ体積)に与える影響を比較し,配置設計の指針を提示する.

1.3 本論文構成

第 1 章ではリチウムイオン電池の高出力化に伴う発熱および安全性の課題を背景として示し,Low Fin Tube(LFT)を用いた強制空冷の着想,本研究の意義および目的を述べる.

第 2 章ではリチウムイオン電池の基本原則と熱的課題,既存の熱管理手法を概説するとともに,本研究で用いる熱流体,伝熱解析の支配方程式を整理する.

第 3 章では解析対象モデルの概要を示し,発熱モデルおよび電気化学モデル(P2D モデル)の取り扱い,材料物性,解析条件をまとめる.

第 4 章では,まず単一セルに対して LFT の有無による冷却挙動の違いを示し,続いて 4 本セルのバッテリーパックを対象として,Aligned 配置および Staggered 配置における冷却性能を比較し,配置,間隔が性能に及ぼす影響を議論する.

第 5 章では第 4 章の結果を総括し,研究の結論および今後の課題を述べる.

第2章 理論的背景

2.1 リチウムイオン電池の概略

リチウムイオン電池は高いエネルギー密度,長いサイクル寿命,低い自己放電率,および優れた充電効率といった多くの利点を有しており,現代の電気自動車やハイブリッド自動車における重要なエネルギー貯蔵減として不可欠な存在となっている.

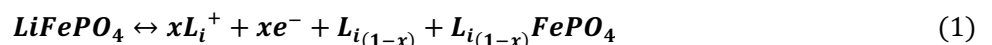
その基本構造は,主に正極,負極,セパレータ,および電解質という四つの主要要素で構成される.正極には一般に LiFePO_4 や LiC_6O_2 などのリチウム金属酸化物が活物質として用いられ,一方で負極には炭素材料であるグラファイトが広く採用されている.これら両電極の間には,物理的な接触による短絡を防ぎつつリチウムイオンの自由な移動を可能にする微多孔膜のセパレータが配置され,全体がリチウム塩を溶解した有機溶媒である電解質によって満たされている.また,発生した電流を外部回路へ効率的に導くための集電体として,正極側にはアルミニウム箔,負極側には銅箔が一般的に使用される.

2.1.1 作動原理と構成材料

リチウムイオン電池の充放電はリチウムイオンと電子の移動によって行われる.具体的には,充電過程において,外部電源から供給される電気エネルギーによって正極活性物質からリチウムイオンが脱離する.脱離したリチウムイオンは,電解質中を拡散してセパレータを通過し,負極のグラファイト層間へと挿入される.この際,電荷の均衡を保つために電子は外部回路を通じて正極から負極へと移動し,システム全体として高い化学ポテンシャルを有するエネルギー蓄積状態が形成される.一方で,放電過程ではこのプロセスが逆転する.負極に保持されていたリチウムイオンが脱離して正極へと回帰し,同時に電子が外部回路を經由して負極から正極へ流れることで電気エネルギーが外部へ取り出される.[5]

これらの充放電反応は,電極材料内におけるリチウムの拡散係数や電解質の導電率といった物性値に強く依存しており,これらは作動時の温度環境によって劇的に変化する.特に,リチウムイオンの物理的な移動や界面での電荷移動反応に伴い,内部抵抗に起因するジュール熱や化学反応に伴う反応熱が発生する.こうした熱的挙動は,電池の電圧プラットフォームや放電容量の安定性に直結するだけでなく,過度の発熱は電解質の分解や熱暴走のリスクを増大させる要因となる.したがって,作動原理におけるイオン輸送と熱発生の相関を理解することは,効率的かつ安全な電池熱管理システムを設計する上で極めて重要な理論的基礎となる.

正極



負極



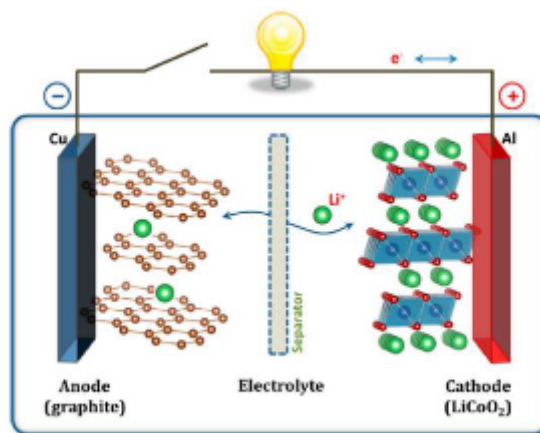


図 2 リチウムイオン電池内の反応 [6]

2.1.2 電池形状による比較

(1) 角型電池

角形電池(Prismatic battery)は、電池外形が長方形または正方形の形状を有するリチウムイオン電池であり、近年、電気自動車や定置用蓄電システムなどの分野で広く採用されているセル形式の一つである。円筒型電池とは異なり、角形電池は平坦な形状を有しているため、限られた空間内において高い体積エネルギー密度を実現しやすいという特徴を持つ。

角形電池では、正極・負極およびセパレータからなる電極シートが積層構造として配置される場合が多く、これらは堅牢な金属ケース内に封入されている。この金属ケースは機械的強度に優れるだけでなく、外部からの衝撃や膨張に対する耐性を高める役割を果たしている。一方で、セル内部構造が比較的複雑になるため、製造プロセスの高度化やコスト増加につながる場合もある。

中でも角形電池の大きな利点の一つは、その優れた空間効率である。平坦な形状を有するため、セル同士を隙間なく配置することが可能であり、バッテリーパック全体としての体積利用効率を高めることができる。この特性は、車載用バッテリーのように限られた設置空間内で高容量化が求められる用途において特に有効である。また、セルを積層して配置しやすい構造であることから、モジュール設計の自由度が高い点も特徴として挙げられる。

さらに、角形電池は熱マネジメントの観点からも一定の利点を有する。平坦な表面積が大きいいため、冷却板や冷却流路との接触面積を確保しやすく、比較的均一な熱放散が可能であるとされている。このため、適切な冷却設計が施された場合には、セル表面温度のばらつきを抑制しやすく、温度管理性能の向上が期待できる。

一方で、内部の温度分布が不均一になりやすいという課題も指摘されている。特に高 C-rate での充放電時には、電極反応や内部抵抗に起因する発熱がセル内部に蓄積し、局所的な温度上昇を引き起こす可能性がある。そのため、角形電池を用いたシステムにおいても、冷却構造や熱設計の最適化は依然として重要な研究課題である。

このように、角形電池は高い空間効率と設計自由度を有する一方で、内部発熱および温度制御の観点から適切な熱マネジメントが不可欠である。本研究で扱う円筒型電池とは形状や構造が異なるものの、いずれのセル形式においても温度管理が電池性能および安全性に大きな影響を与える点は共通しており、冷却技術

の重要性を示す一例といえる。

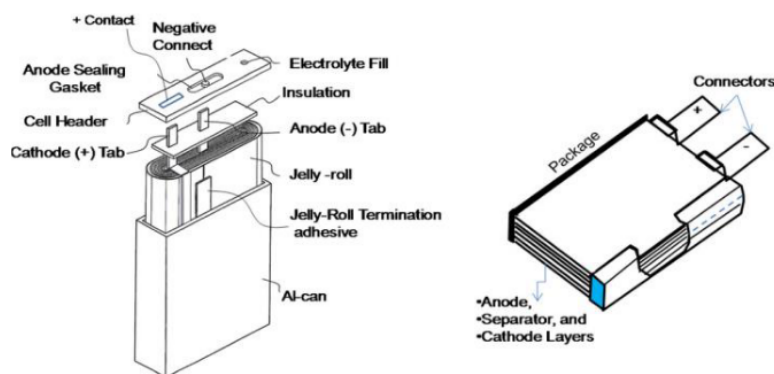


図 3 角型電池 [7]

(2)円筒型電池

円筒型リチウムイオン電池は、円筒形の金属製ケース内に電極および電解質を封入した構造を有する、最も広く普及しているリチウムイオン電池のセル形式の一つである。正極、負極、セパレータを巻き付ける構造として形成し、電解液を含浸させた後、円筒形ケースに収納する構造を特徴とする。

円筒型電池の代表例としては、直径 18 mm、長さ 65 mm の寸法を有する 18650 セルが挙げられる。18650 セルは長年にわたり多様な用途で使用されてきた実績があり、信頼性および安全性の面で高い評価を受けている。また近年では、より高容量・高出力化を目的として、26650 セルや 2170 セルなど、寸法の異なる円筒型セルも開発・実用化されている。

円筒型電池の大きな特長の一つは、その高い信頼性にある。金属製ケースによる堅牢な構造は、外部からの機械的衝撃や内部圧力の上昇に対して優れた耐性を示す。さらに、内部圧力が異常上昇した場合には、安全弁機構によってガスを放出する設計が可能であり、安全性確保の観点からも成熟したセル形式であるといえる。

製造面においても、円筒型電池は優れた特性を有する。巻回構造を基本としたセル設計は自動化・大量生産に適しており、製造プロセスが確立されている。その結果、高い生産性とコスト低減を同時に実現できる点が大きな利点である。このため、円筒型電池は家電製品、電動工具、さらには電気自動車用バッテリーとしても幅広く採用されている。

一方で、幾何学的形状に起因する課題も有している。セルが円筒形であるため、モジュールやパックとして集積する際に空間効率が低下しやすく、体積エネルギー密度の観点では角形電池やパウチ型電池に劣る場合がある。また、セル内部では半径方向および軸方向に温度分布が生じやすく、高出力動作時には局所的な温度上昇（ホットスポット）が形成される可能性がある。

このような背景から、円筒型リチウムイオン電池においては、熱マネジメントが極めて重要な課題となる。特に電気自動車用途では、高 C-rate での充放電が想定されるため、セル温度の上昇抑制および温度分布の均一化が性能および安全性の観点から不可欠である。そのため、円筒型電池の冷却性能向上を目的とした冷却構造や熱交換技術の研究が活発に進められている。

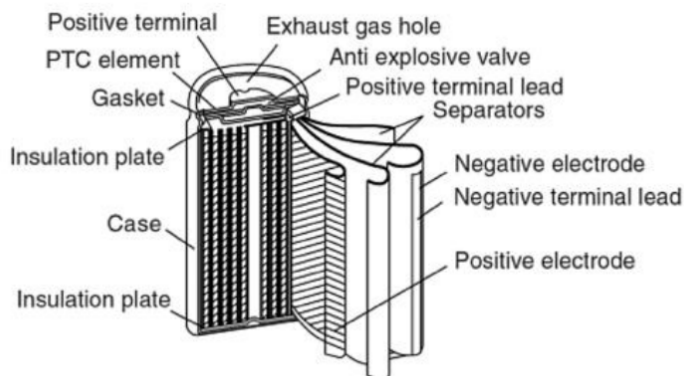


図 4 円筒型電池 [7]

(3) パウチ型バッテリー

パウチ型電池 (Pouch battery) は、柔軟性を有する外装材を用いた平板状のリチウムイオン電池であり、近年、携帯電子機器や電気自動車向けバッテリーとして注目されているセル形式の一つである。円筒型や角形電池とは異なり、パウチ型電池は剛性の高い金属ケースを持たず、電極およびセパレータを積層した構造体を、アルミラミネートフィルムなどの柔軟な外装材で密封する構造を採用している。

パウチ型電池の最大の特徴は、その高い形状自由度にある。外装が柔軟であるため、セル形状を比較的自由に設計することが可能であり、不規則な空間や薄型設計が求められる用途に対して高い適応性を示す。この特性により、デバイス全体の設計自由度を向上させることができ、限られたスペースを有効に活用したバッテリー配置が可能となる。

また、パウチ型電池は軽量化の観点からも優れた特性を有する。金属製ケースを用いない構造であるため、セル全体の質量を低減することができ、重量制約が厳しい用途において有利である。特に車載用途においては、バッテリー重量の低減が航続距離やエネルギー効率に直結するため、この点は重要な利点といえる。

製造面においても、パウチ型電池は比較的簡素な工程で作製可能であるとされている。電極積層体を形成した後、外装材で封止する構造であるため、金属ケースの成形や溶接といった工程を省略でき、製造コストの低減につながる可能性がある。このため、量産性やコストパフォーマンスの観点からも魅力的なセル形式である。

一方で、機械的強度や耐久性の面で課題を有する。外装が柔軟であるがゆえに、内部発熱やガス発生に伴う膨張が生じやすく、これがセル性能や安全性に影響を及ぼす可能性がある。また、外部からの圧力や衝撃に対する耐性が金属ケースを有する電池と比較して低いため、モジュール化やパック化の際には補強構造を含めた設計が必要となる。

さらに、熱マネジメントの観点では、パウチ型電池は平坦な形状を有するため、冷却板や冷却流路との接触面積を確保しやすいという利点を持つ。しかし、内部構造が薄く広がっているため、発熱分布や温度勾配がセル内で不均一となる可能性があり、適切な冷却設計が不可欠である。

以上のように、パウチ型リチウムイオン電池は高い形状自由度と軽量性、ならびにコスト面での利点を有する一方で、機械的強度や熱的安定性の確保が重要な課題となるセル形式である。円筒型および角形電池と同様に、パウチ型電池においても温度管理は性能および安全性を左右する重要な要素であり、冷却技術の最

適化が不可欠である。



図 5 パウチ型バッテリー

2.2 リチウムイオン電池における熱的課題

リチウムイオン電池は高いエネルギー密度および出録を有する一方で、充放電過程において発熱を伴うエネルギーデバイスであり、温度上昇および温度分布の不均一性が性能、安全性、寿命に大きな影響を及ぼす。そのため、電池の熱挙動を適切に把握し、効果的な熱マネジメントを施すことは、特に電気自動車の場合において、極めて重要な課題となる。

電池温度の過度な上昇は内部反応の加速による劣化促進や安全性能低下を引き起こすだけでなく、セル内部の温度分布の偏りは局所的な性能低下やホットスポット形成の原因になる。本節では、リチウムイオン電池における発熱のメカニズムと、それにより起こりうる熱暴走について概説する。

2.2.1 発熱メカニズム

リチウムイオン電池の充放電では、電気エネルギーが化学エネルギーとして出入りする一方で、必ず熱が発生する。発熱は大きく内部抵抗や分極に起因する不可逆的熱、電極に伴うエントロピー変化に起因する可逆熱、さらには主反応以外の副反応や劣化に伴う副反応熱に分類される。特に高 C レートでは電流が増大するため、内部抵抗損失や過電圧損失が増え、不可逆熱が支配的となりやすい。

また、実用セルでは負極表面に形成される SEI(Solid Electrolyte Interphase)層が劣化挙動と熱挙動の両面で重要である。SEI は電解液分解を伴って形成される保護膜であり、通常は電解液のさらなる分解を抑制して電池を安定化させる。その一方で、高温化や過充電、高電流などの条件では SEI の分解や再生成が進行し、副反応の増加や内部抵抗の上昇を通して、不可逆熱を増やす可能性がある。[8]さらに温度が上がると、電解液分解や電極材料の分解など発熱反応が段階的に顕在化し、発熱速度が放熱能力を上回ると、熱暴走へ移行する危険性が高まる。[9]

2.2.2 熱暴走

リチウムイオン電池における熱暴走とは、電池内部で発生した熱が十分に放熱されない場合に、発熱反応が自己加速的に進行し、急激な温度上昇、ガス発生、発火、さらには爆発に至る現象を指す。これはリチウムイ

オン電池の安全性を脅かす最も深刻な現象の一つであり,電池設計および熱マネジメントにおいて重点的に考慮すべき課題である.[10]

熱暴走は単一の要因によって引き起こされるものではなく,電氣的,熱的,機械的な異常(abuse)を起点として,多段階の反応が連鎖的に進行することで発生する.初期段階では外部要因や内部異常によってセル温度が上昇する.この温度上昇が一定以上を超えると,セル内部で発熱を伴う副反応が次々と誘発され,温度上昇が加速される.[11]

熱暴走の誘因は一般に,電氣的異常 (electrical abuse) ,熱的異常 (thermal abuse) ,および 機械的異常 (mechanical abuse) に分類される.電氣的異常には,過充電や内部短絡が含まれ,これらは過大な電流や電位差を引き起こし,内部発熱を急増させる要因となる.[12]熱的異常は,高温環境への曝露や外部からの加熱によってセル温度が上昇する状況を指し,冷却性能が不足している場合に特に問題となる.一方,機械的異常は落下,圧縮,穿刺,振動などの物理的外力によって電池内部構造が損傷することを指す.これにより,正極と負極の局所的な接触やセパレータの破損が生じ,内部短絡が発生する可能性がある.内部短絡は極めて短時間で大電流を発生させるため,局所的な急激な温度上昇を引き起こし,熱暴走の直接的な引き金となることが多い.[13]

温度上昇が進行すると,初めに SEI(Solid Electrolyte Interphase) 層の分解が生じ,発熱を伴ってセル温度がさらに上昇する.次に,電解液の分解反応や電極材料の熱分解が進行し,可燃性ガスが生成される.これらの反応はいずれも発熱反応であるため,熱の発生速度が放熱能力を上回ると,温度は制御不能な状態に陥る.最終的には,セル内圧の急激な上昇,ケースの破裂,発火,あるいは爆発といった重大事故に至る可能性がある.

特にバッテリーパックにおいては,単一セルで発生した熱暴走が隣接セルへと伝播することが大きなリスクとなる.セル間の熱結合が強い場合,あるセルの異常発熱が周囲セルの温度を上昇させ,連鎖的な熱暴走を引き起こす可能性がある.そのため,セル表面温度の上昇抑制および温度分布の均一化は,安全性確保の観点から極めて重要である.

以上のように,熱暴走は電池内部の発熱特性と放熱能力の不均衡によって引き起こされる現象であり,そのリスクは電池構造,運転条件,冷却性能に強く依存する.本研究で対象とする円筒型リチウムイオン電池においても,局所的な温度上昇を抑制し,セル全体の温度を適切な範囲に維持する冷却構造の設計が,熱暴走リスク低減において重要な役割を果たす.

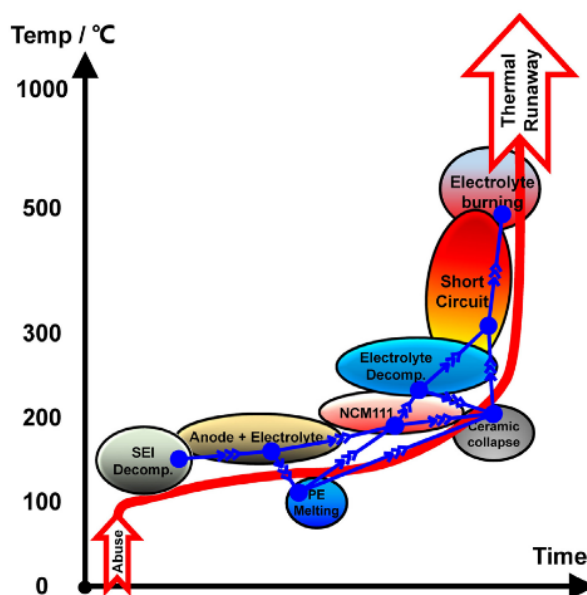


図 6 熱暴走のメカニズム [13]

2.3 熱管理システム

リチウムイオン電池は充放電過程において不可逆的に発熱するため、電池温度を適切な範囲内に制御する熱管理システム(Battery Thermal Management System: BTMS)が不可欠である。BTMS の目的は、電池温度の過度な上昇の抑制、温度分布の均一化、電池寿命および安全性の向上である。現在、リチウムイオン電池に対して広く研究・実用化されている熱管理手法は、空冷 (air cooling) , 液冷 (liquid cooling) 相変化材料冷却(Phase Change Material Cooling: PCM Cooling)の 3 種類に大別される。

2.3.1 空冷方式

空冷方式は、空気を熱媒として用いる最も基本的な熱管理手法であり、構造が単純でコストが低いという利点を有する。空冷はさらに自然空冷と、強制空冷に分類される。

自然空冷はファンなどの補助装置を用いず、自然対流によって熱を放散する方式であり、構造が簡素で信頼性が高い反面、冷却性能は周囲環境条件に大きく依存し、高発熱条件では十分な冷却が困難である。一方、強制空冷ではファンなどを用いて空気流を制御し、対流熱伝達を強化することで冷却性能を向上させる。[14]

近年の研究では、電池配置、流路形状、通風孔の位置などの最適化により空冷性能を改善する試みが数多く報告されている。しかし、空気は比熱および熱伝達係数が小さいため、高容量・高出力化が進む電動車両用電池パックに対しては冷却能力に限界がある。このため、空冷方式は小規模電池システムや補助的冷却手段としての適用が主となっている。

2.3.2 液冷方式

液冷方式は、水や冷却液などの液体を熱媒として利用する熱管理手法であり、空冷と比較して高い冷却能力と温度制御性を有する。液冷は主に、直接冷却 (浸漬冷却) と間接冷却に分類される。

直接冷却は電池を冷却液中に浸漬する方式であり、優れた冷却性能を示すものの、絶縁性や防水性の確保

が困難であるため、実用例は限定的である。現在主流となっているのは液冷プレートを介して熱を助教する間接冷却方式である。

液冷プレートを用いた BTMS では、冷却流路の形状、流路数、流量、流入位置などが冷却性能に大きな影響を及ぼす。近年の研究では、マイクロチャネル構造や蛇行流路などを導入することで、温度均一性および冷却効率の向上が報告されている。

また、高出力運転時でも安定した温度制御が可能であり、電気自動車や定置型エネルギー貯蔵システムにおいて広く採用されている。一方で、システム構成が複雑であり、ポンプ動力や漏洩リスクといった課題も存在する。

2.3.3 相変化材料(PCM)冷却方式

相変化材料 (PCM) 冷却方式は、PCM が相変化時に吸収・放出する潜熱を利用して電池温度上昇を抑制する手法である。PCM 冷却は受動的な冷却方式であり、騒音がなく、構造が比較的簡素であるという利点を有する。PCM は、有機系、無機系、共晶系に分類され、特にパラフィン系 PCM が多く用いられている。PCM 冷却は、電池のピーク温度低減および温度分布の均一化に優れていることが多くの研究で示されている。[15]

一方で、PCM の多くは熱伝導率が低いため、放熱性能が制限されるという問題がある。この課題に対し、金属フィン、金属フォーム、炭素材料を組み合わせた複合 PCM が提案されており、熱伝導率向上および冷却性能改善が報告されている。

2.4 熱流体の基礎理論

円筒型リチウムイオン電池の空冷システムにおいて、LFT (Low Fin Tube) を介した除熱性能を評価するためには、流体挙動と固体・流体間の熱移動現象を物理的に定義する必要がある。本節では、空気の流動および熱輸送を記述する基礎的な理論について述べる。

まず、バッテリー周辺の空気の流れを規定する質量、運動量、およびエネルギーの保存則に基づく支配方程式について整理する。本研究では、低速条件下での強制対流を対象としているため、これらの流体物理学の基本原則が解析の基盤となる。

2.4.1 熱伝導方程式

(1) フーリエの法則

固体内部における熱伝導は、フーリエの法則によって記述される。

フーリエの法則は、単位面積あたりの熱流束 q が温度勾配に比例することを示しており、次式で表される。[16]

$$q = -k\nabla T \quad (3)$$

ここで、 $q[\text{W}/\text{m}^2]$ は単位面積あたりの熱流速を表し、 $k[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 、 $T[\text{K}]$ はそれぞれ熱伝導率と温度を表す。負号は、熱が高温側から低温側へ流れることを意味している。

この関係式とエネルギー保存則を組み合わせることで、固体内の温度分布を支配する熱伝導方程式が得

られる。

(2) 熱伝導方程式の導出

固体要素におけるエネルギー保存を考えると、単位体積あたりの内部エネルギー変化は、熱流束の発散および内部発熱によって与えられる。これを一般的な形で表すと、

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \quad (4)$$

となる.[17]

ここで、 $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$ は密度、 $C_p[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ は定圧比熱、 $\dot{q}[\text{W}/\text{m}^3]$ は単位体積あたりの内部発熱量を表す。

式 (2.14) は、**時間依存熱伝導方程式**であり、電池の過渡的な温度変化を評価する際に用いられる。一方、温度分布が時間的に変化しない定常状態を仮定する場合には、左辺の時間微分項が 0 となり、

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = 0 \quad (5)$$

が得られる。

(3) 流体領域との統一的处理

本研究では、固体領域と流体領域を同一の *Heat Transfer in Solids and Fluids* インターフェースで取り扱っている。流体領域では、前述のエネルギー保存則において移流項 $\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$ が有効となり、固体領域ではこれが消失する。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{\text{ext}} \quad (6)$$

この統一的な定式化により、固体内熱伝導と流体による対流熱輸送を一貫した枠組みで解析することが可能となる。なお、流体との熱授受や境界条件の詳細については、第3章にて述べる。

2.4.2 空気流れの支配方程式

(1) 質量保存則（連続の式）

流体の質量保存は、連続の式によって記述される。一般形は次式で表される.[18]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

ここで、 ρ は流体密度、 \mathbf{u} は流速ベクトルである。

本研究では、空気を非圧縮性流体として扱うため、密度は一定とみなすことができ、上式は次の簡略化された形となる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (8)$$

この式は、流体の体積が保存されることを意味しており、速度場と圧力場を決定するための基本条件である。

(2)運動量保存則(Navier-stokes 方程式)

非圧縮性ニュートン流体における運動量保存則は、次の Navier–Stokes 方程式によって表される.[18]

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (9)$$

ここで、 p は圧力、 μ は動粘性係数、 \mathbf{F} は単位体積あたりの外力（体積力）を表す。

左辺第一項は非定常項であり、流速の時間変化による運動量の変化を示す。第二項は慣性項（移流項）であり、流体の移動に伴う運動量輸送を表している。右辺第一項は圧力勾配による力、第二項は粘性による拡散項であり、流体内部のせん断応力を表す。

第3章 数値計算手法

3.1 幾何学的モデル

3.1.1 モデル形状

本研究で用いる解析モデルは、円筒型リチウムイオンバッテリー、冷却用空気流路、および必要に応じて Low fin tube から構成される三次元モデルである。解析モデルは、冷却構造の有無およびバッテリー配置条件の違いによる冷却特性の差異を明確に比較できるように設計されている。

解析領域は、大きく分けて流体領域および固体領域から構成される。流体領域は冷却用空気が流動する空間を表し、固体領域は Mandrel, Active Material, Can, Cover (PET), Thermal paste, Low fin tube 含む。固体領域と流体領域は幾何学的に接しており、境界面を介して熱の授受が生じる構成となっている。具体的な長さを図7に示す。

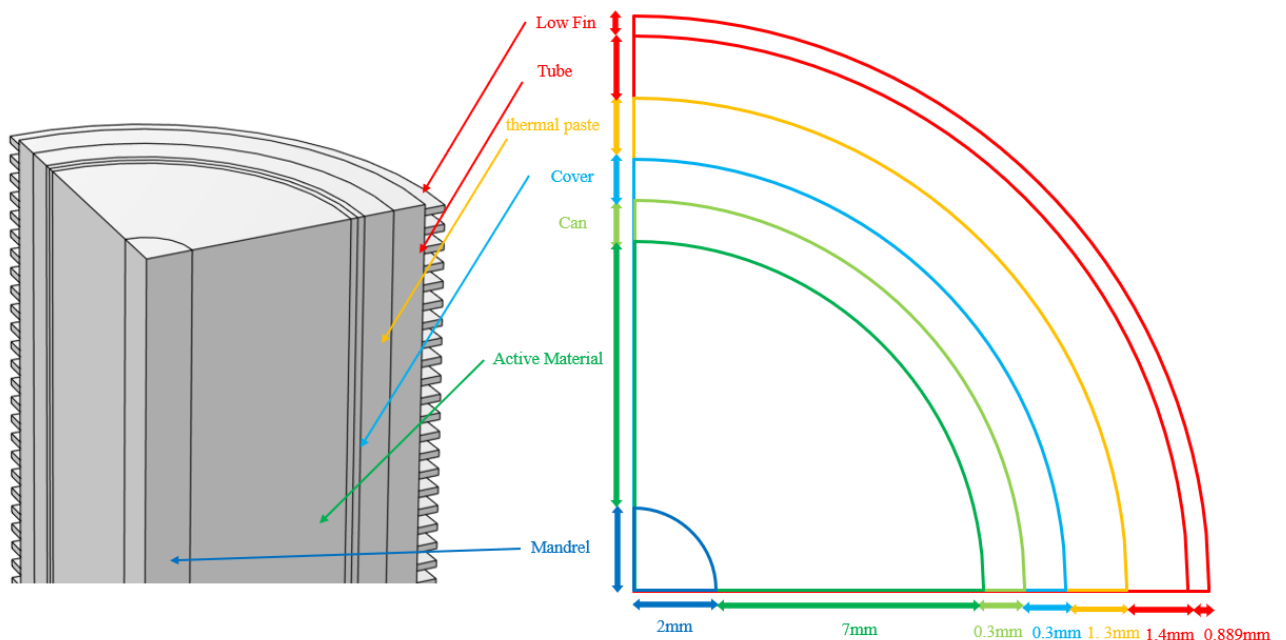


図7 モデル形状

Low fin tube を用いる解析ケースでは、バッテリー表面に沿う形で Low fin tube を配置する。Low fin tube の形状は、管外表面に低背のフィン構造を有する円管としてモデル化されており、フィン高さおよびピッチは一定値とする。Low fin tube とバッテリー表面との間には熱伝導層を設け、両者が熱的に結合された状態を表現している。これにより、実際の冷却構造に近い熱伝達経路を再現する。その Low fin tube の具体的な寸法を図8に示す。[19]

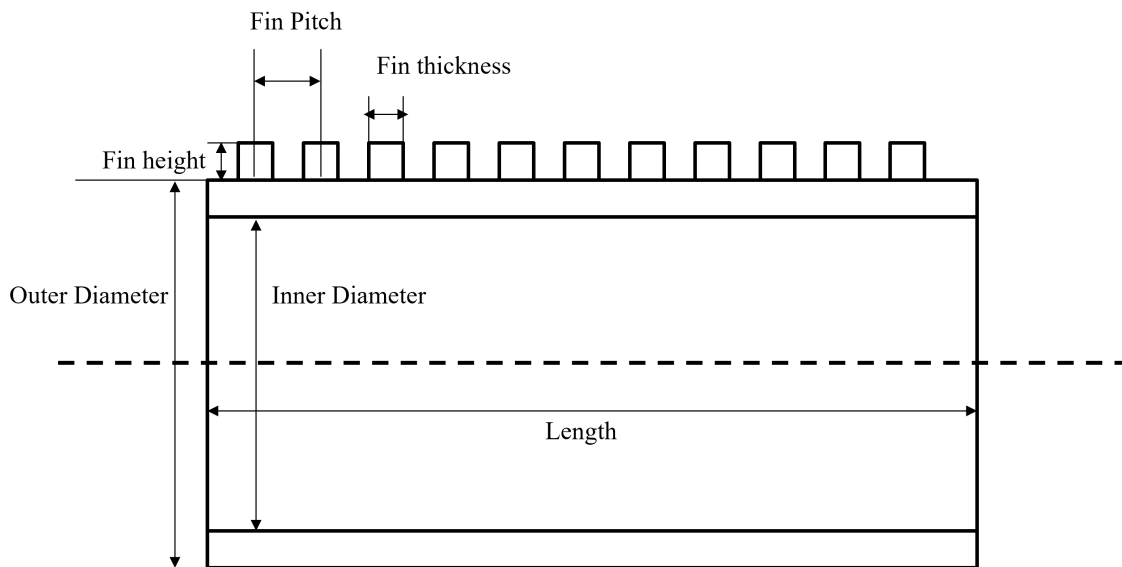


図 8 LFT 寸法

表 1 LFT 寸法

FPI	Outer Diameter (mm)	Inner Diameter (mm)	Fin height (mm)	Fin Pitch (mm)	Fin thickness (mm)	Area ratio A_{total}/A_{bare}
28	24.6	21.8	0.889	0.838	0.305	3.004

さらに,本研究では Low Fin Tube の有無が円筒型リチウムイオン電池の強制空冷の冷却挙動に及ぼす影響を明確にするため,解析対象を単一セルモデルと,バッテリーパックモデルの 2 段階に分けて解析した.各モデルの形状を以下に示す.

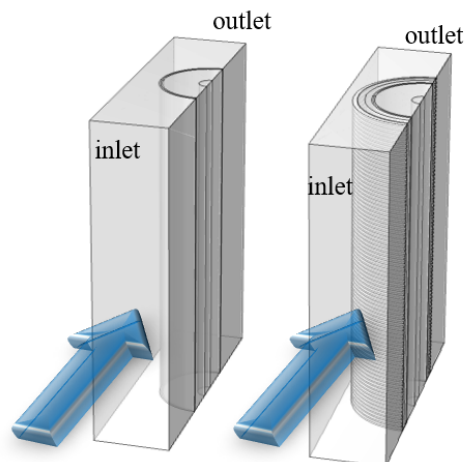


図 9 単セルモデル形状

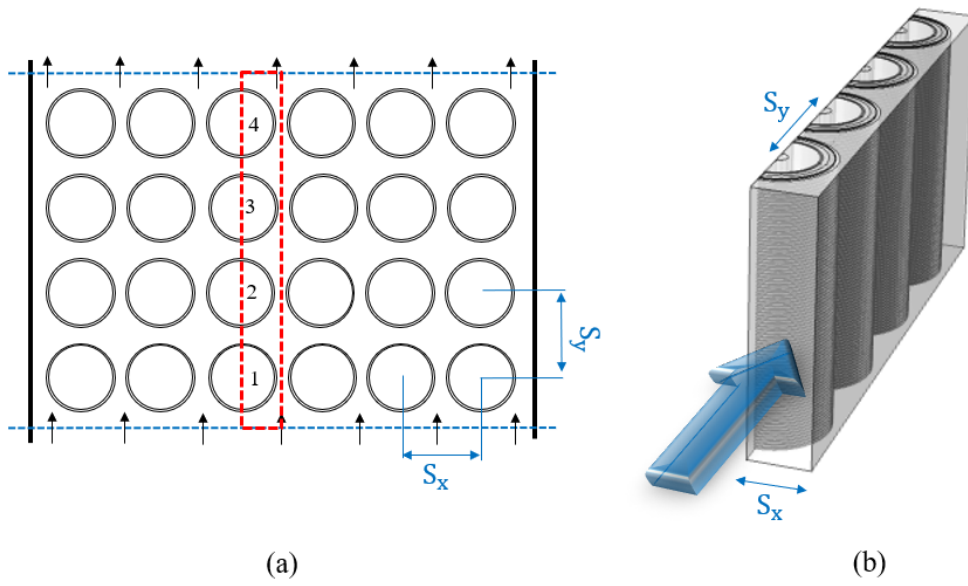


図 10 バッテリーパック (a) Aligned 配置, (b) モデル形状

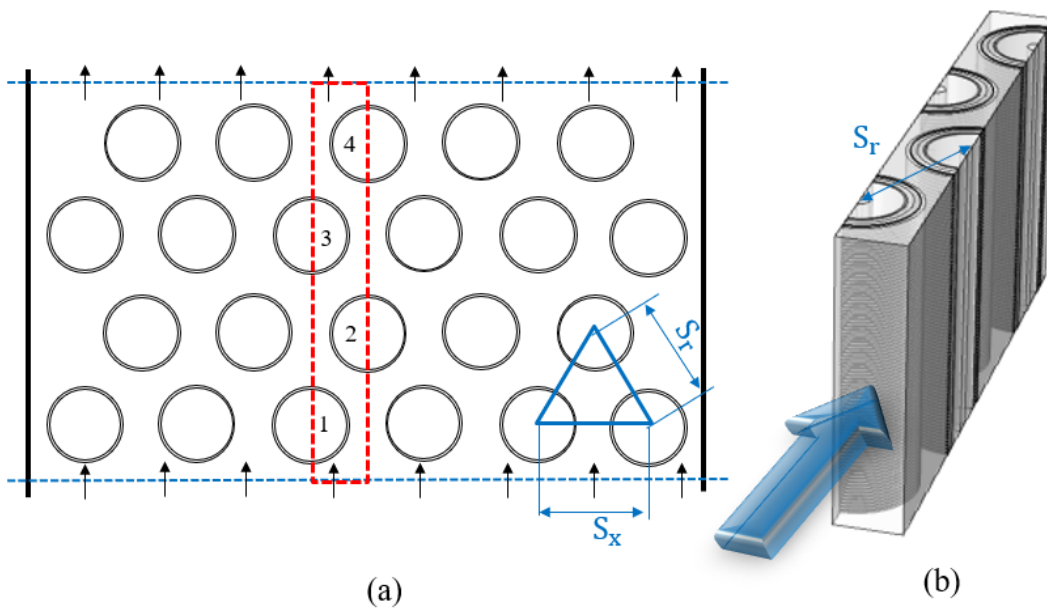


図 11 バッテリーパック (a) Staggered 配置, (b) モデル形状

3.1.2 各物性値

さらに,各物質の物性値を表に示す.特に空気,Cover ドメインの物性値に関しては,温度依存性があるため,別に記載する.

表 2 物性値

Name	Material	Property	Value	Reference	
Mandrel	Nyron	Heat Capacity	1700 J/kg·K	COMSOL material library	
		Density	1150 kg/m ³		
		Thermal conductivity	0.26 W/m·K		
Active Material	-	Heat Capacity	1399 J/kg·K	[20]	
		Density	2055 kg/m ³		
		Thermal conductivity	kr=0.9		
					kθ =30
			kz=30		
Can	Steel	Heat Capacity	475 J/kg·K	COMSOL material library	
		Density	7850 kg/m ³		
		Thermal conductivity	44.5 W/m·K		
Cover	PET	Heat Capacity	900 J/kg·K	COMSOL material library	
		Density	1400 kg/m ³		
		Thermal conductivity	0.17 W/m·K		
Thermal Paste	Thermal grease	Heat Capacity	1200 J/kg·K	[21]	
		Density	2600 kg/m ³		
		Thermal conductivity	3 W/m·K		
LFT	Aluminum	Heat Capacity	900 J/kg·K	COMSOL material library	
		Density	2700 kg/m ³		
		Thermal conductivity	238 W/m·K		

(1)空気の温度依存物性値

空気の物性値として,比熱容量 C_p , 密度 ρ , 熱伝導率 k および粘性係数 η を考慮した. これらの物性値は COMSOL Multiphysics の Material Library に収録されている Air Ideal Gas Model を基に設定しており, NIST REFPROP データベースに基づく近似式が用いられている.

空気の密度は, 理想気体の状態方程式に基づき, 以下の式で与えられる.

$$\rho(T) = \frac{p_A M}{RT} \quad (10)$$

ここで, p_A は絶対圧力, M は空気のもル質量, R は気体定数, T は絶対温度である. 本研究では圧力を

大気圧一定とし、温度変化に伴う密度変化のみを考慮した。

比熱容量,熱伝導率および粘性係数については,いずれも温度の関数として定義し,解析中の温度場と連成して更新されるモデルを用いた.これにより,温度上昇に伴う空気の熱輸送特性および流動特性の変化を反映した解析が可能となる.

空気の各物性値に関する具体的な温度依存式は付録 A に示す.

3.2 電池モデル

2.2 章で述べたようにリチウムイオン電池は,充放電時に熱を発生する.この発熱はセル温度の上昇を通じて寿命低下や劣化,熱暴走のリスクを高める一方で,低温条件では,内部抵抗の低減に寄与するなど,電池の性能安全性に密接にかかわる.したがって,バッテリー冷却システムを設計,評価するためには,電池内部でどのようなメカニズムにより,熱が生成されているかを定量的に理解することが不可欠である.

本節では,Bernardi らによって提案された電池系の一般的なエネルギーバランス式に基づき,リチウムイオン電池の発熱メカニズムを整理する.[22]特に,発熱を不可逆熱と可逆熱に分けて,説明し,後節の P2D モデル及び数値解析において用いる体積発熱源項との対応関係を明らかにする.

3.2.1 Bernardi 発熱モデル

Bernardi らは,電池全体のエネルギーバランスを整理して,電池が外部から見かけ上消費,発生する電力と,内部で生成される熱との関係を次式のようにあらわした.

$$\dot{Q} = I(V - U_{ocv}) - IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (11)$$

ここで, \dot{Q} は電池内で発生する熱量[W], I [A], V [V], T [K] はそれぞれ,電流,端子電圧,電池温度を表す.[23] さらに U_{ocv} , $\partial U_{ocv} / \partial T$ はそれぞれ,開回路電圧[V],開回路電圧[V/K]の温度偏微分である

式 (2.1) の右辺第 1 項は,電池が外部回路に供給する電力 IV と,熱力学的な自由エネルギー変化に対応する理想的な電力 IU_{ocv} の差に相当する.これは内部抵抗や各種極化に起因する不可逆な損失であり,その全てが熱として発生する.一方,第 2 項は,反応のエントロピー変化に起因する可逆熱であり,反応が吸熱か発熱かによって符号が変化する.[24]

さらに式 (2.1) は,電池の発熱を 不可逆熱 \dot{Q}_{irr} と 可逆熱 \dot{Q}_{rev} の和として

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{irr} + \dot{Q}_{rev} \quad (12)$$

と分解して考えることができる.

まず,不可逆熱は

$$\dot{Q}_{irr} = I(V - U_{ocv}) \quad (13)$$

と表される.

ここで $V - U_{ocv}$ は,開回路電圧からの差,すなわち過電圧に相当し,内部抵抗による オーム損失,電荷移動抵抗,濃度分極など,様々な不可逆要因を含んでいる.したがって,式 (2.4) は,電池が理想的な可逆セル

であった場合に外部へ供給し得た仕事と、実際に供給された仕事との差が、全て熱として失われることを意味する。通常の電気機器における I^2R 損失の一般化とみなすこともできる。

一方、可逆熱は

$$\dot{Q}_{\text{rev}} = -IT \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T} \quad (14)$$

で定義される。

この項は、電池反応のエントロピー変化 ΔS に対応しており、熱力学の関係式

$$\Delta S = -nF \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T} \quad (15)$$

を用いることで導かれる。ここで n は反応に関与する電子数、 F はファラデー定数である。 $\partial U_{\text{ocv}} / \partial T > 0$ の場合、式 (2.5) は負となり、電池は吸熱的に振る舞う。これは、充放電に伴って外部から熱を取り込むことを意味し、低温環境下での電池温度低下の一因となる。一方、 $\partial U_{\text{ocv}} / \partial T < 0$ の場合には正となり、電池は発熱的となる。

リチウムイオン電池では、多くの運転条件において不可逆熱 \dot{Q}_{irr} が支配的であるが、高 SOC 領域や低 C-rate の条件では可逆熱の寄与も無視できないと報告されている。そのため、安全性評価や熱暴走解析のみならず、高効率な冷却システム設計においても、可逆熱と不可逆熱の両方を適切に評価することが重要である。

3.2.2 電気化学-熱結合モデル(P2D)

リチウムイオン電池の発熱量は電流の値や抵抗値のみで決定されるものではなく、電極内部におけるリチウムイオン濃度分布、電位分布、及び反応速度に強く依存する。そのため、バッテリー冷却システムを正確に評価するためには、電池内部の電気化学現象を適切に記述したモデルに基づいて発熱量を算出する必要がある。

本研究では Doyle–Fuller–Newman (DFN) モデルとして知られる P2D (Pseudo-2D) モデルを用いて、電池内部電気化学反応および発熱挙動を評価する。P2D モデルは、電極厚さ方向を 1 次元で扱いながら、各電極粒子内部のリチウム拡散をさらに別次元で考慮することで、現実的かつ計算効率の高い電池モデルを実現している。

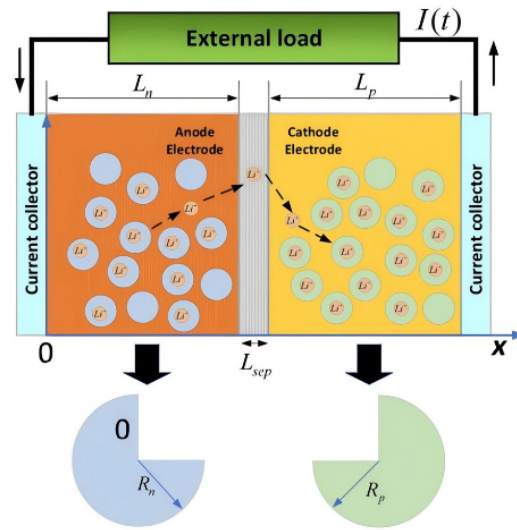


図 12 電気化学モデル[25]

(1) 固相内リチウムイオン拡散方程式

電極内の活物質粒子は球形と仮定され、各粒子内部ではリチウムが濃度勾配により拡散する。この固相内リチウム濃度 c_s は、球座標系における Fick の第二法則により次式で表される。[26]

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (16)$$

ここで、 D_s は固相中のリチウム拡散係数であり、一定値あることを前提としている。

条件として、粒子中心では対称性より濃度勾配がゼロとなり、粒子表面では電極-電解質界面での反応フラックスにより次式が与えられる。

$$-D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big|_{r=R} = j, \quad \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (17)$$

この式により、電極粒子内部の濃度分布と反応電流密度との関係が表現される。

(2) 固相の電荷保存方程式

固相中を流れる電子の輸送は、拡張オームの法則に基づいて記述される。固相電位 ϕ_s に対する支配方程式は以下の通りである。[25]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_s^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) = j \quad (18)$$

ここで、 σ_s は固相の電気伝導率である。体積分率 ε_s とブルグマン関係式を用いて補正される。[25]

$$\sigma_s^{eff} = \varepsilon_s^{1.5} \sigma_s \quad (19)$$

この式は、電極内で発生する電気化学反応によって電子電流が消費または生成されることを示している。

(3) 電解質相におけるリチウムイオン拡散方程式

電解質中では、リチウムイオンが濃度勾配および電位勾配により移動する.P2D モデルでは、濃厚溶液理論を用いて電解質中のリチウムイオン濃度および電位を記述する。

電解質中リチウム濃度 c_e の保存則は次式で与えられる.[25]

$$\varepsilon_e \frac{\partial c_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + \frac{1-t^+}{F} j \quad (20)$$

また、電解質電位 ϕ_e に関する電荷保存則は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{\text{eff}} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} + \kappa_D^{\text{eff}} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} \right) = -j \quad (21)$$

と表される。

これらの式により、電解質中のイオン輸送と反応電流との相互作用が記述される。

(4) 電解質相の電荷保存方程式

電解質中ではリチウムイオンが電位勾配による移動と、濃度勾配に起因する拡散の両方によって輸送される.本モデルでは、電解質相の電位 ϕ_e と濃度 c_e を連成させて電荷輸送を記述する。

$$j_l = -K_e^{\text{eff}} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} + \left(\frac{2K_e^{\text{eff}} RT}{F} \right) (1-t^+) \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} \quad (22)$$

ここで K_e^{eff} は電解質相の有効イオン伝導率, R は気体定数, T は温度, F はファラデー定数, t^+ はリチウムイオンの輸率である.右辺第一項は電位勾配により生じるイオン電導電流を表し,第二項は濃度勾配によって生じる拡散起電力による寄与をあらわす

(5) 電極界面反応と発熱への関与

電極-電解質界面における電気化学反応は、Butler-Volmer 式により表される.[25]

$$j = j_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta \right) - \exp \left(-\frac{\alpha_c F}{RT} \eta \right) \right] \quad (23)$$

この反応電流密度は、過電圧および温度に依存し、電池内部での不可逆発熱（ジュール熱、反応熱）および可逆熱（エントロピー変化）を決定する主要因となる。

本研究では、P2D モデルによって算出される反応電流および電位分布に基づき、発熱量を評価し、次節以降で述べる熱伝導・対流解析に連成する。

Location	Substep	Control Equation
External circuit	Electron transport	Ohm's Law: $E=U\cdot R$
Negative electrode	Solid-phase diffusion of Li	Fick's First Law: $J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$
	Li loses electrons	Butler-Volmer Equation: $j=j^0 \left[\exp\left(-\frac{\alpha F}{RT} \Delta\varphi\right) - \left(\frac{\beta F}{RT} \Delta\varphi\right) \right]$
Electrolyte	Li ⁺ solvation	There is no description of the relevant equations in the literature.
	Li ⁺ transport	Nernst-Planck Equation: $J(x) = -D \cdot \frac{\partial c(x)}{\partial x} - \frac{F}{RT} \cdot D \cdot c \cdot \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}$
Positive electrode	Li ⁺ desolvation	There is no description of the relevant equations in the literature.
	Li ⁺ receives electrons	Butler-Volmer Equation: $j=j^0 \left[\exp\left(-\frac{\alpha F}{RT} \Delta\varphi\right) - \left(\frac{\beta F}{RT} \Delta\varphi\right) \right]$
	Solid-phase diffusion of Li	Fick's First Law: $J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$

図 13 電気化学モデル (P2D) 式 [27]

3.1.3 本解析における発熱源と P2D モデルの関係

本研究で用いる COMSOL Multiphysics のリチウムイオン電池モデルでは, Doyle–Fuller–Newman (DFN) 型の P2D モデルに基づいて, 電極厚さ方向の 1 次元問題として電気化学反応が解かれている. この 1 次元モデルから得られる局所電流密度や過電圧, 開回路電圧の温度依存性を用いて, 電極内の体積発熱源項が計算される.

その一次元計算で得られた発熱量 $Q_{h,1D}$ を三次元発熱量 $Q_{h,3D}$ 補正するために以下の計算を行う.[20]

$$Q_{h,3D} = Q_{h,1D} \frac{L_{neg} + L_{sep} + L_{pos}}{L_{batt}} \frac{((r_{batt} - d_{can})^2 - r_{mandrel}^2)}{(r_{batt}^2 - r_{mandrel}^2)} \quad (24)$$

最初の係数は一次元モデル全体のうち,実際に発熱が生じる部分の割合である.さらに二つ目の係数はセル全体の体積から,マンドレル体積および Can 体積を差し引いたものである.

3.3 数値シミュレーションの設定

3.3.1 境界条件および初期条件の設定

本研究では,流体および熱輸送を連成した数値解析を行うため,COMSOL Multiphysics における Lamir Flow および Heat Transfer in Solids and Fluids インターフェースを用いて解析条件を設定した.本節では解析に用いた初期条件および境界条件について述べる.

(1) 流体流れに関する初期条件および境界条件

流体領域には空気を作動流体として用い、層流モデルを適用した。

解析開始時における流体の初期条件として、流速は全流体領域において 0 m/s とし、静止状態から流れが発達する過程を解析した。

また初期温度は入口温度と同一の 25°C に設定した。

境界条件として、入口境界には一定流速条件を設定し、流速は解析ごとに 0.1m/s, 0.3m/s, 0.5m/s と変化させた。入口空気温度は全ての条件において 25°C とした。出口境界には圧力境界条件を適用し、ゲージ圧 0Pa を指定した。

流体が接する壁面には Np-slip 条件を適用し、壁面における流速は 0m/s とした。また解析領域の対称面には対象境界条件を適用し、法線方向の速度成分および速度勾配がゼロになるよう設定した。

(2) 熱輸送に関する初期条件および境界条件

熱輸送解析には Heat Transfer in Solids and Fluids インターフェースを用い、個体領域と流体領域を統一的に扱った。解析開始時の初期温度はすべて固体および流体領域において 25°C とした。

境界条件として、対称面を除く全ての外部境界に対して断熱条件 Thermal insulation を適用し、外部環境との熱授受は考慮しないものとした。これにより流体による強制対流冷却のみがバッテリー温度挙動に影響する条件となっている。

3.3.2 メッシュ依存性試験

数値解析結果の信頼性を担保するために、本研究ではメッシュ分割数に対する解の依存性を検証するメッシュ依存性試験を行った。対象としたモデルは Low Fin Tube(LFT)を装着した単一円筒型リチウムイオンバッテリーの空冷モデルであり、三次元解析を行った。

評価指標として、計算開始から 1500s 経過時点におけるバッテリー内部の平均温度変化量を採用した。

メッシュ分割数は約 $1.0 \times 10^5 \sim 7.5 \times 10^5$ の範囲で段階的に増加させ、それぞれ同一の境界条件および物性値のもと数値計算を実施した。図 14 にメッシュ数と解析終了後のバッテリーの平均温度の関係を示す。

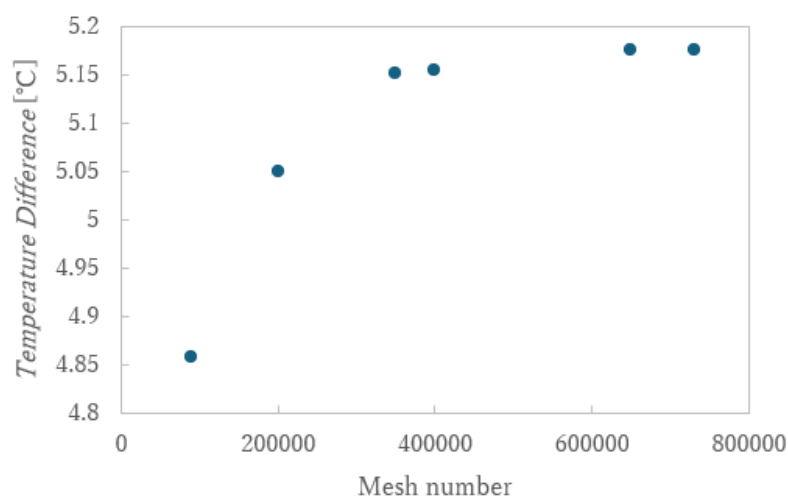


図 14 メッシュ依存性

図より,メッシュ数が 3.5×10^5 を超えると,平均温度の変化量の変動は非常に小さくなり,それ以降のメッシュ細分化による結果の変化は0.4%未満であることが確認できる.このことから解析結果は十分にメッシュ独立性を満たしていると判断した.

以上を踏まえて,本研究における以降の解析では,計算精度と計算負荷のバランスを考慮して, 3.5×10^5 要素のメッシュを標準メッシュとして採用した.

第4章 結果および考察

本研究の解析は、大きく分けて二つの段階で構成される。4.1 章では、単体セルを対象として、従来の平滑な表面を持つ電池（直接冷却方式）と LFT を装着した電池の熱流体挙動を比較した。ここでは、LFT による伝熱面積の拡大が、充放電終了時の最大温度抑制およびセル内の温度均一性に及ぼす影響を定量的に評価し、同時に懸念される圧力損失の増大と必要動力の相関について明らかにする。

続く 4.2 章では、実用的なバッテリーパックへの応用を想定し、複数のセルを集積したモジュールレベルでの解析を実施した。先行研究において空冷システムの性能を左右する重要な因子として指摘されているセル配列（Aligned 配置および Staggered 配置）に着目し、特に低速層流条件下における LFT 特有の流場干渉と冷却効果の関係を考察する。

以上の解析を通じて、次世代の電池熱管理システムにおける LFT 冷却の有用性を多角的な視点から論じる。

4.1 LFT 装着単一円筒型バッテリーにおける熱性能解析

本節では、4.2 章におけるバッテリーパックの配置評価に先立ち、単一円筒セルを対象とした空冷シミュレーションを実施し、提案する Low Fin Tube の有無が冷却性能および設計指針に及ぼす影響を整理する。単一セル条件とすることで、セル同士の後流干渉や流量偏りを排除し、発熱量（C-rate）および入り口流速といった基本因子に対する温度応答を明確に比較できる。

解析は LFT の有無で同一条件下に実施した。入り口空気温度および初期温度は 25°C 、出口圧力は 0Pa とし、流れは層流、非圧縮、重力無しとした。外壁は no-slip 条件に設定した。評価指標はセル領域の最大温度 T_{max} 、セル内温度差 ΔT 、圧力損失に基づく必要動力 P_w とする。

本節ではまず、入り口流速を 0.1m/s に固定し、C-rate を 3C/4C/5C に変化させたケースを示す。なお C-rate に応じて 1 cycle（充電+放電）の総時間を 3C : 1800 s, 4C : 1000 s, 5C : 700 s とし、いずれも充電・放電を同時間ずつ行った。続いて、C-rate を 3C に固定し、入口流速を $0.1/0.3/0.5\text{ m/s}$ に変化させたケース(1800s)を示し、冷却改善と必要動力のトレードオフを LFT の有無で比較する。

4.1.1 C レート

(a) C-rate の影響

図 15 に示す単セルの最大温度より、C-rate を 3C→4C→5C と増加させると、充放電終了時(3C: 1800 s, 4C: 1000 s, 5C: 700 s)の最大温度は単調に上昇する。これは、C-rate の増加に伴い電流が増大し、主として不可逆発熱（ジュール発熱）が I^2R に比例して増えるためである。加えて、本解析ではセル発熱が時間依存で与えられており、充電/放電の進行に応じて発熱が変動するため、温度履歴には途中で緩やかな増減が現れる。しかし、総じて短時間であるほど冷えるのではなく、単位時間当たりの発熱が大きいほど温度が上がるという熱収支が支配的となり、高 C-rate ほど高温化する傾向が確認できる。

LFT の有無を比較すると、いずれの C-rate においても LFT 付加により最大温度が明確に低下する。図から読み取れる充放電終了時の最大温度は、3C で LFT なし約 33.0°C → LFT あり約 30.0°C 、4C で約 35.5°C → 約 31.8°C 、5C で約 37.7°C → 約 33.4°C である。LFT の追加は C-rate が変化しても概ね 3~4 $^{\circ}\text{C}$ の最大温度低減を一貫して示す。

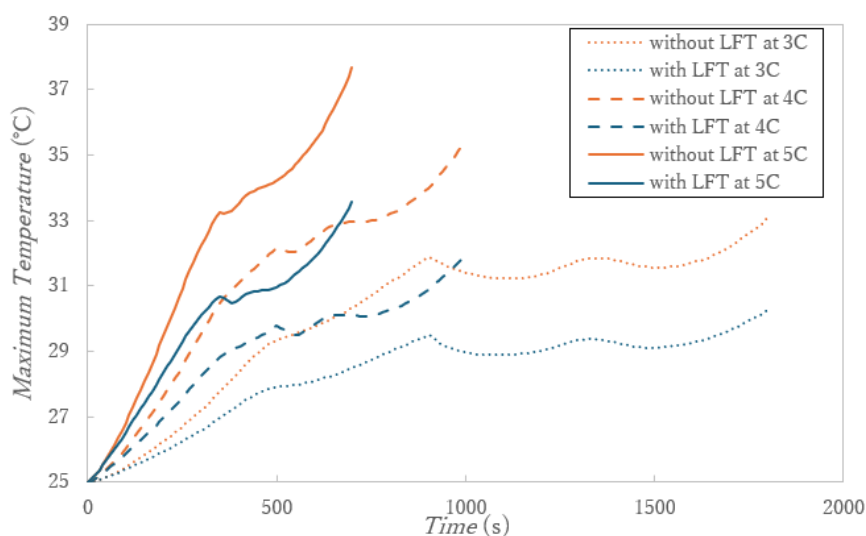


図 15 最大温度(C-rate)

図 16 に示すように,初期温度 25 °Cからの上昇量 (ΔT) で見ると, 3C は 8.0 °C \rightarrow 5.0 °C (上昇量を約 37.5% 低減), 4C では,10.5 °C \rightarrow 6.8 °C (約 35%低減), 5C では 12.7 °C \rightarrow 8.4 °C (約 34%低減) となり,温度均一性の観点でも優位性を示す.

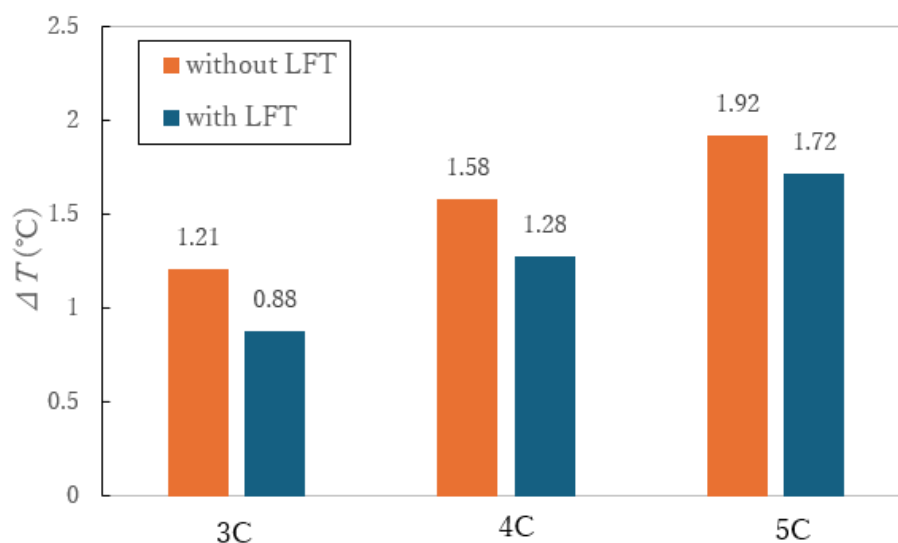


図 16 温度変化量 ΔT (C-rate)

この低温化の機構は,対流熱伝達 $Q = hA(T_s - T_\infty)$ の観点から説明できる.LFTの付加により (i) 空気と接する有効伝熱面積 A が増加し, (ii) フィン近傍で速度勾配が形成されやすく,境界層が薄くなることで局所的な熱伝達率 h が増加する.結果として,同一の入口流速 (0.1 m/s) でも外部への放熱能力が高まり,セル表面温度が下がる.さらに,表面温度の低下はセル内部の熱伝導駆動力を増やし (内部で発生した熱が表面へ逃げやすくなる),最大温度を下げる方向に働く.特に高 C-rate では発熱密度が大きく,外部への放熱が顕著になりやすいため, LFT による A と h の増強効果が最大温度差としてはっきり現れたと解釈できる.

また,温度均一性 ΔT の向上に関しては,LFT の構造が空気の流れに影響を与えたことが原因と考えられ

る.LFT の細かい構造により,空気流れが分断され,セル付近に形成される低速領域や滞留領域が生成されづらくなったことで,局所的な熱伝達係数の偏りが抑制されたと推察できる.そのため,LFT の追加により,いずれの C-rate 条件下においても,優位性を示した.

一方で, LFT の導入は流体抵抗の増加を伴い,必要動力(ファン動力)にも影響する.図 17 に示すように,入口流速 0.1m/s 条件における必要動力は LFT なしで $3.61 \times 10^{-6}W$ に対し,LFT ありで $3.65 \times 10^{-5}W$ と評価され,約 10 倍増加した.これはフィンによって流路の有効断面が狭まり,さらに表面凹凸によってせん断(粘性散逸)が増えることで圧力損失が増加するためである.すなわち,本節の範囲では LFT は最大温度を 3–4℃低下させるという冷却面の利点を有する一方,圧力損失増に起因する必要動力の増大を同時に生む.

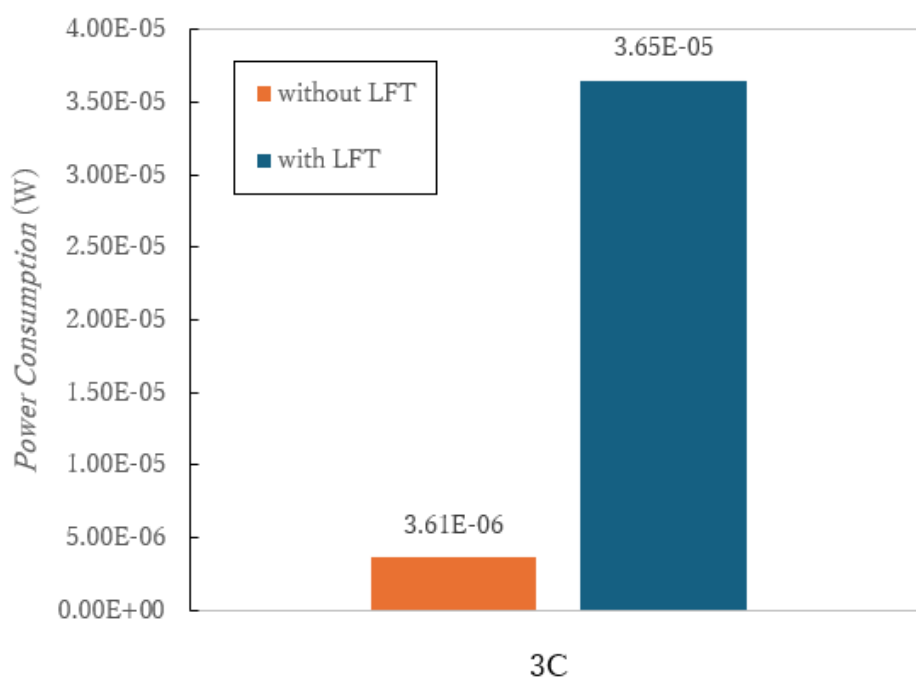


図 17 必要動力 (C-rate)

4.1.2 流速

(b) 流速の影響

以下では, C-rate を 3C に固定したうえで入口流速 $V_{in}=0.1, 0.3, 0.5m/s$ を変化させ,LFT (Low Fin Tube) 有無が単一円筒セルの冷却挙動に与える影響を整理する.評価指標は,時系列の最大温度 T_{max} ,セル内部温度差 ΔT (均一性指標),および必要動力 P_w とした.

まず図 18 より最大温度の時間変化を見ると,流速増加により T_{max} が全体として低下し,温度変動の振幅も小さくなる.これは流速上昇によって対流熱伝達が強化され,セル表面の温度境界層が薄くなることで,表面熱流束が増加するためである.すなわち,外部流れが速いほど,表面近傍の熱抵抗(境界層支配)が低下し,発熱に対して放熱が追従しやすくなる.実際, LFT 無しでは $V_{in}=0.1m/s$ の終盤で T_{max} が約 33℃まで上昇する一方で,0.3m/s では約 29.5℃,0.5m/s では約 28.5℃へと抑制されている.したがって,本条件範囲では流速増加が境界層の薄化と洗い流しの強化をもたらし,最大温度が直接的に低下する.

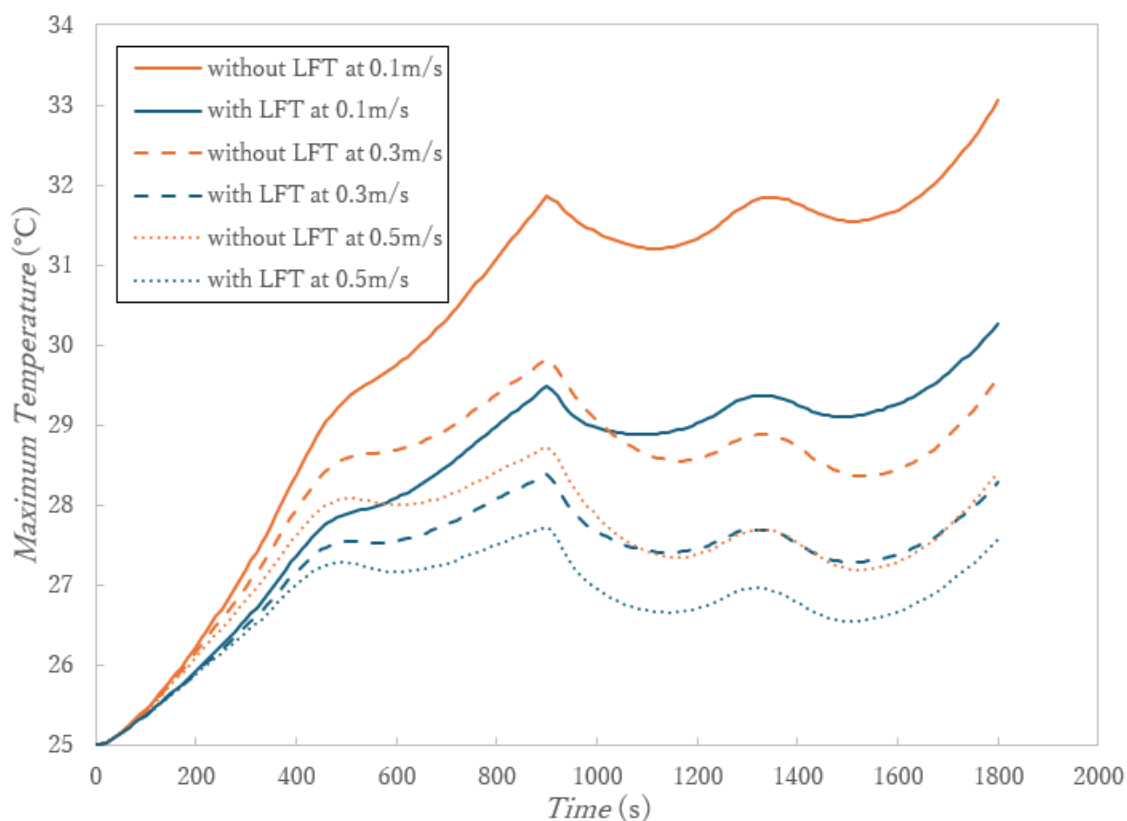


図 18 最大温度 (初期流速)

次に LFT の効果である T_{\max} の曲線を同一流速で比較すると、いずれの流速でも LFT ありは LFT なしより低温側に位置し、ピーク温度の上昇が抑えられている。これは、LFT により (i) 外表面積が増加すること、(ii) フィンによる流れのかく乱で表面近傍の混合が促進され境界層が更新されること、の二点が支配的である。幾何学的には、滑らかな円筒表面のみの場合、表面沿いに形成される速度・温度境界層が比較的安定に発達しやすいのに対し、LFT の微細な凸部は近傍のせん断と局所渦を生み、低速域 (停滞・剥離に伴う熱がこもりやすい領域) を分断しながら境界層の再生を繰り返させる。このため、とくに低流速域 (0.1 m/s) のように本来は境界層が厚くなりやすい条件ほど、LFT 追加の恩恵が相対的に大きく現れる。

温度均一性 (ΔT) については、図 19 の棒グラフが示す通り、LFT により全流速で一貫して ΔT が低下した。具体的には、 $V_{in}=0.1\text{m/s}$ で ΔT は 1.266°C (LFT なし) から 0.879°C (LFT あり) へ低下し、約 30.6% 改善した。0.3m/s では 1.457°C (LFT なし) から 0.970°C (LFT あり) へ低下し、約 33.4% 改善した。0.5m/s では 1.482°C (LFT なし) から 1.008°C (LFT あり) へ低下し、約 32.0% 改善した。ここで重要なのは、本条件では流速を上げても ΔT が単調に小さくなるわけではなく、むしろ高流速側で ΔT がやや大きい点である。これは流速増加により外部対流が強まる一方で、セル内部の熱伝導による均熱化が追従しにくくなるためと解釈できる。すなわち、外部熱伝達が過度に強くなると、外表面の冷却が先行して表面温度分布の勾配が増し、内部の熱拡散が相対的に支配的となる。その結果、最大温度そのものは下がっても、内部温度差は必ずしも最小化されない。また LFT は表面積増加と混合促進により全体の放熱量を増やすだけでなく、表面の局所的な低速域、停滞域を抑えるため、 ΔT の低減に直接寄与したと考えられる。

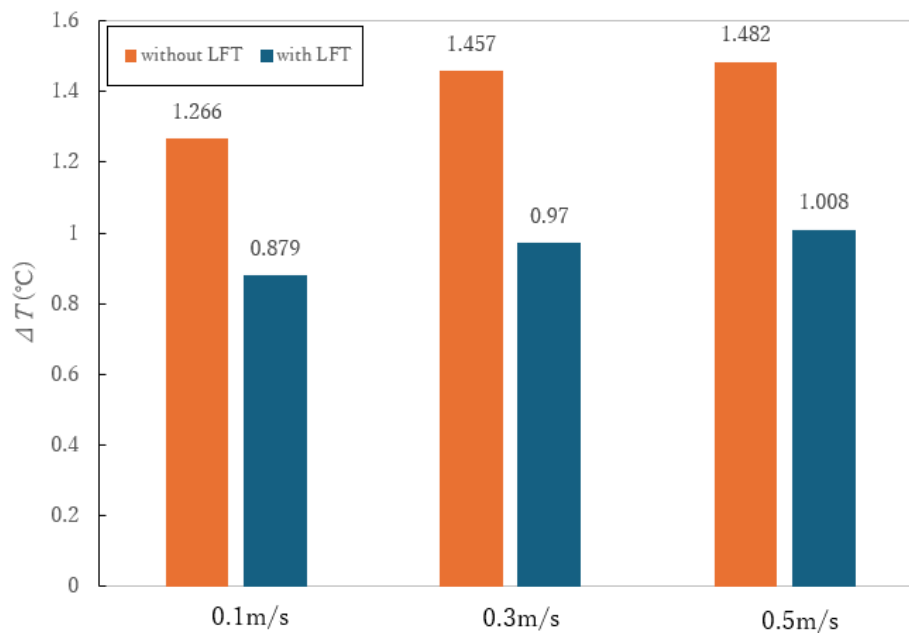


図 19 温度変化量 ΔT (初期流速)

一方で、必要動力 P_w は LFT の有無で支配的に変化した。具体的には、 $V_{in}=0.1\text{m/s}$ で $2.32 \times 10^{-6}\text{W}$ (LFT なし) に対し、 $3.78 \times 10^{-6}\text{W}$ (LFT あり) で約 16 倍、 $V_{in}=0.3\text{m/s}$ で $1.02 \times 10^{-4}\text{W}$ (LFT なし) に対し、 $1.00 \times 10^{-3}\text{W}$ (LFT あり) で約 9.8 倍、 $V_{in}=0.5\text{m/s}$ で $4.89 \times 10^{-4}\text{W}$ (LFT なし) に対し、 $4.72 \times 10^{-3}\text{W}$ (LFT あり) で約 9.7 倍である。これは LFT が流路の実効粗さと濡れ面積を増やし、フィン根元での局所剥離や渦生成を通じて損失 (圧力損失) を増大させるためである。すなわち LFT は熱的には有利だが、必要動力の観点では不利という典型的なトレードオフを示す。

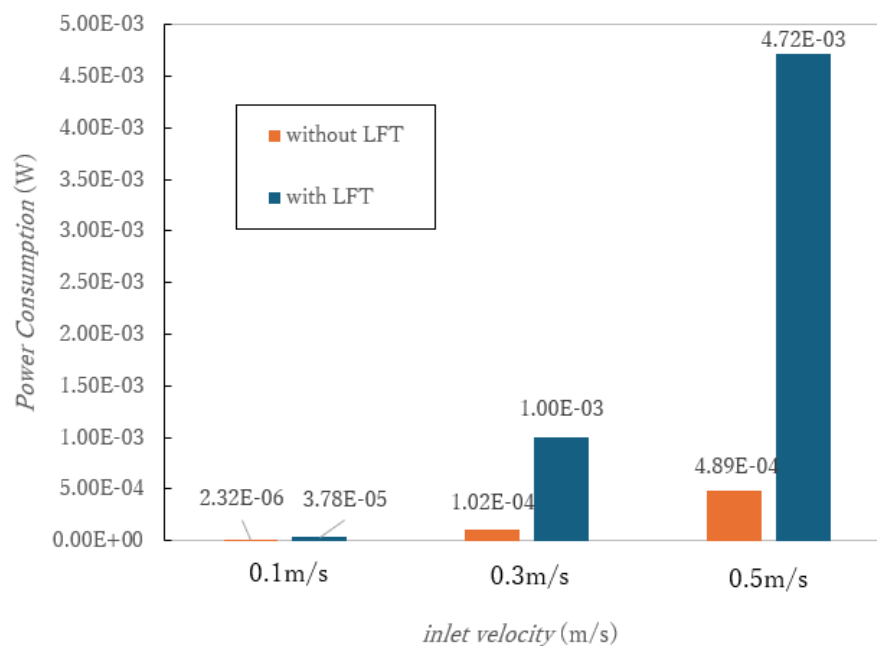


図 20 必要動力 (初期流速)

4.2 電池パックモジュールの設計最適化

本章では,Low Fin Tube (LFT) を適用した円筒型リチウムイオン電池パックを対象に,バッテリー間隔とセル配置 (Aligned / Staggered) が冷却性能およびシステム設計要件に与える影響を整理し,最適条件を決定する.評価は,最大温度の抑制だけでなく,温度均一性,空気の熱除去量,必要動力・冷却効率,ならびにパッケージ体積を含む複数指標のトレードオフに基づいて行う.

まず Aligned 配置について,縦方向間隔 S_y が冷却挙動に与える影響を示した上で (4.2.1),複数指標の総合評価により S_y の最適値を決定する (4.2.2).次に S_y を固定し,横方向間隔 S_x が温度分布と流路抵抗に与える影響を評価し (4.2.3),同様に最適 S_x を決定する (4.2.4).

続いて Staggered 配置について,間隔 S_r が縦・横方向の実質間隔を同時に変化させる点に着目し,冷却性能と設計制約への影響を整理する (4.2.5).その後,Aligned 配置と同一の評価指標を用いて最適 S_r を決定する (4.2.6).最後に,Aligned および Staggered それぞれの最適条件同士を同一運転条件で比較し,配置形状の違いが冷却特性と設計上の利点・欠点に与える本質的な差を明らかにする (4.2.7).

4.2.1 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_y が冷却に与える影響

横方向のバッテリー間隔 S_x を 30mm に固定して,縦方向のバッテリー間隔 S_y を 28mm~38mm, 2mm おきに変えたことによる冷却への影響を調べる.入り口流速は 5.75×10^{-4} [kg/s]で一定値とした.

グラフ 21 は異なる間隔 S_y でバッテリー4本を Aligned に配置したバッテリーパックにおける,充放電終了時 (600s) の最大温度を示している.

(1) 下流バッテリーほど最大温度が上昇する要因

図 21 に示すように,すべての S_y 条件において,バッテリー番号 1~4 へと下流に進むにつれて,最大温度が単調的に増加する傾向が確認された.この挙動は主に,空気バルク温度の上昇および上流下流バッテリー間の熱的,流動的干渉によって説明できる.

入り口から流入した冷却空気は Battery1 において加熱され,その後バッテリー2,3,4 に到達するまでに徐々に温度が上昇する.これは図 22 に示す空気の温度分布からも,バッテリー2,3,4 付近にかけて冷却空気の温度が高くなっていることが見て取れる.その結果,下流に行くほど,バッテリー表面と冷却空気との温度差が減少し,対流による熱除去能力が低下する.

さらに,本解析では層流条件を仮定している.そのため,上流バッテリー後方に形成される温度境界層および低速後流が十分に再発達,混合されないまま,後続のバッテリーに到達している可能性がある.これらにより,下流のバッテリーはすでに温められた,かつバッテリー前面には,流速の低下した空気によって冷却されることとなり,熱伝達性能が低下することが原因と考えられる.

以上の要因により,縦方向間隔 S_y の違いにかかわらず,Aligned 配置では下流に位置するバッテリーほど,最大温度が上昇する傾向が現れた.

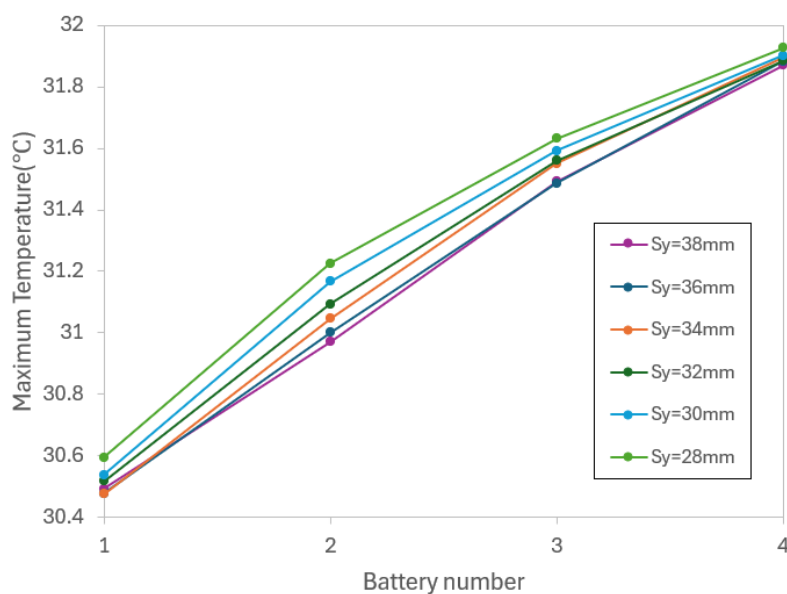


図 21 最大温度

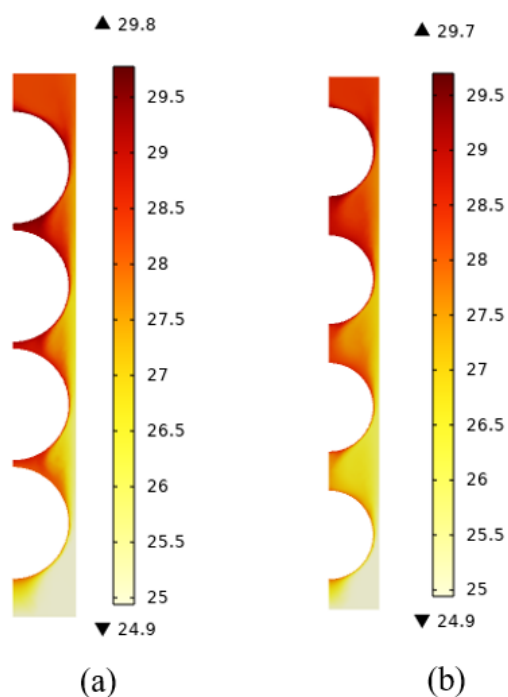


図 22 空気温度(a)28mm, (b)38mm(600s)

(2) バッテリー間隔 S_y が最大温度に与える影響

図 21 をもとに,同一バッテリーで最大温度を比較すると,バッテリー間隔 S_y が小さい条件ほど,温度は高く,間隔を広げることで最大温度が低下する傾向が確認された.しかし,本研究で扱った S_y の範囲ではその差は $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 程度と比較的小さく,最大温度に対する影響は限定的であることも確認された.

この傾向はバッテリー間における流れの回復距離の違いにある. S_y が小さい場合,上流バッテリー背後で形成された低速域や温度境界層が十分に回復また,混合されないまま,直後のバッテリーへ到達しやすく,バ

バッテリー間に低速また滞留域が残ってしまう。その結果、バッテリー表面均分の速度勾配が弱まり、局所的な熱伝達が小さくなる。そのため、 S_y を広げると冷却空気がバッテリー冷却に作用する領域（先行研究でいう scour area）すなわち有効冷却面積を相対的に増加させると解釈できる。これは図 23 に示すように、 S_y の拡大により、バッテリー表面における低速領域が縮小していることから、表面のうち、十分な流速を伴って冷却に寄与する面積が増え（図 23 赤線）、熱除去量がわずかに向上したと考えられる。

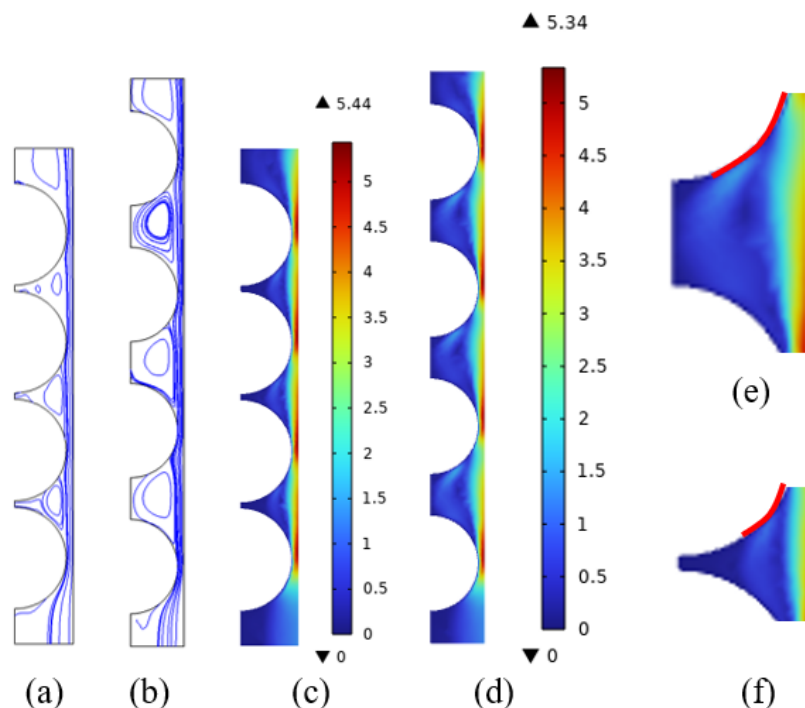


図 23 充放電終了時分布図(a) 流線($S_y=28\text{mm}$), (b) 流線($S_y=38\text{mm}$), (c)流速($S_y=28\text{mm}$), (d) 流速($S_y=38\text{mm}$), (e)有効冷却面積($S_y=28\text{mm}$), (f)有効冷却面積($S_y=38\text{mm}$)

(3) S_y の影響が限定的である理由

本解析では、 S_y を $28\text{mm}\sim 38\text{mm}$ へ 10mm 変化させても、最大温度は $0.1\sim 0.3^\circ\text{C}$ 程度の違いに留まった。このことは冷却性能が単純にバッテリーの縦方向間隔のみで支配されていないことを示唆している。また空気熱除去量（600s 間）がバッテリー間隔 S_y の拡大により 630J から 660J に上昇するにとどまり（図 24）、増加幅は全体の 4.5% ほどである。これは S_y の増加によって局所の滞留が抑制されるものの、流路が狭く層流条件であるため、混合が限定的であり、さらに下流に進むほど空気のパルク温度が上昇して、対流駆動力が低下することから、徐熱の改善量に上限が生じるためと解釈できる。これは、図 25 において、縦方向のバッテリー間隔を変えても、空気側の時間ごとの平均の温度が変わらないことから説明ができる。

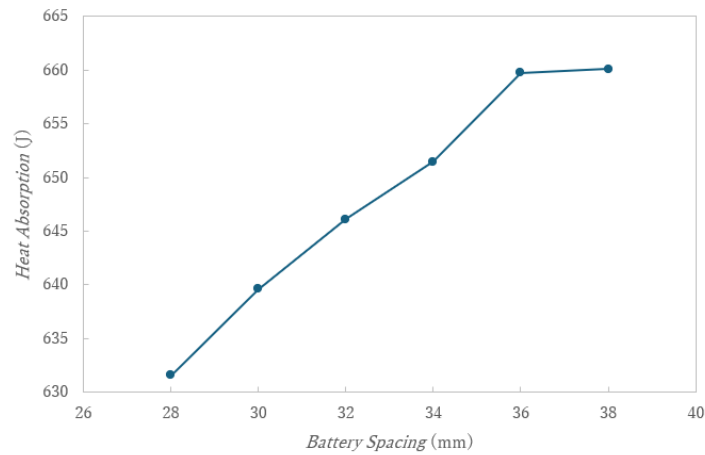


図 24 熱除去量

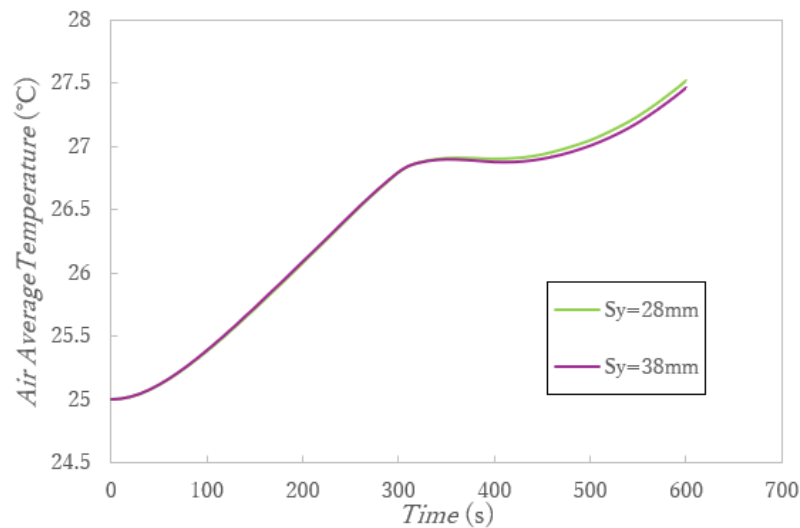


図 25 空気平均温度

4.2.2 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_y の最適化

Aligned 配置における流れ方向バッテリー間隔 S_y を 28~38mm の範囲で変更し、冷却性能とパッケージ性の観点から最適値を検討した。評価指標は(i)バッテリー温度均一性 ΔT , (ii)空気の熱除去量,(iii)必要動力 P_w と冷却効率 η , (iv)パッケージ体積とした。

空気を流すために必要な動力 P_w を以下の式で表す.[4]

$$P_w = \left(\bar{P}_{in} + \frac{\rho_{in} U_{in}^2}{2} \right) \cdot \dot{Q}_{vin} \quad (25)$$

このとき、 \dot{Q}_{vin} はバッテリーパックの入り口における空気の体積流量 [m^3/s], \bar{P}_{in} , ρ_{in} , U_{in} はそれぞれ、入り口における圧力 [Pa], 密度 [kg/m^3], 流速 [m/s] を表す。

また、もう一つの指標として冷却効率を定義する。冷却効率は空冷によって除去された熱量と冷却に必要な

となった消費動力の比で表す.

これは,バッテリー冷却の効率を表す指標となる.以下にその式を示す.

$$\eta = \frac{Q_{ab}(J)}{\int Pwdt(J)} \quad (26)$$

このとき, Q_{ab} は空冷が 600 秒間で吸収した熱量[J]を表す.

$$Q_{ab} = \int c_p \cdot \dot{m} \cdot (T_{out} - T_0) dt \quad (27)$$

(i)温度均一性 ΔT

図 26 において ΔT は $Sy=34mm$ で最大値を示すが,変化幅は約 $0.1^\circ C$ 程度であり,均一性の差は全体として小さい.したがって, ΔT のみを強い決定因子として最適値を定めることは難しく,他指標と合わせた判断が必要である.加えて, $34mm$ 近傍のピークは小さく,数値誤差や局所流動の微小な遷移で生じうるレンジにあるため, $34mm$ が物理的に不適切だと断定する根拠は現時点でのデータでは十分ではない.

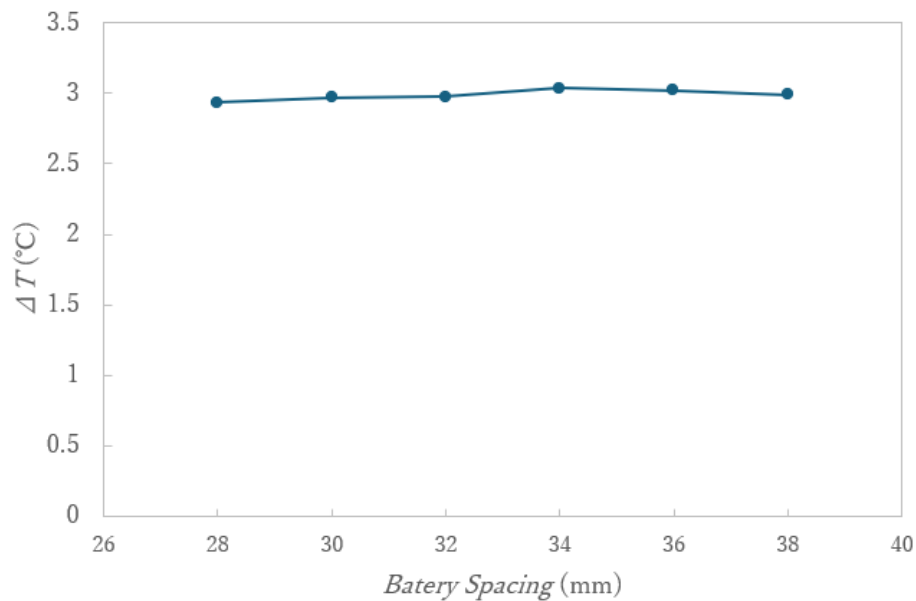


図 26 温度変化量 $\Delta T(t=600s)$

(ii)空気の熱除去量

バッテリー間隔 Sy を拡大することで,冷却空気の熱除去量は大きくなり, $36mm$ で頭打ちとなる傾向が見て取れる.これは 4.2.1 節で述べたように,バッテリー間隔を広げることで,上流バッテリーの背後の低速域が緩和され,後流セルの冷却における有効冷却面積が拡大することが原因と考えられる.

また,4.2.1(3)で前述したように Sy を拡大しても熱除去量の増加が限定的であることも確認できる.

(iii)冷却効率,必要動力

Aligned 配置における縦方向バッテリー間隔 Sy は,冷却性能と送風に要する消費動力の両者に影響する

設計パラメータである。そこで $S_y=28\text{--}38\text{ mm}$ の範囲で S_y を変化させ、冷却効率 η と必要動力 P_w の関係を整理した結果を図 27 に示す。図 27 より、 S_y の増加に伴い冷却効率 η は単調に低下し、同時に必要動力 P_w は単調に増加する傾向が確認できる。すなわち、 S_y を大きくすることは冷却性能の改善と動力低減を同時に満たす方向ではなく、両者のトレードオフを設計上どこで折り合いをつけるかが重要となる。

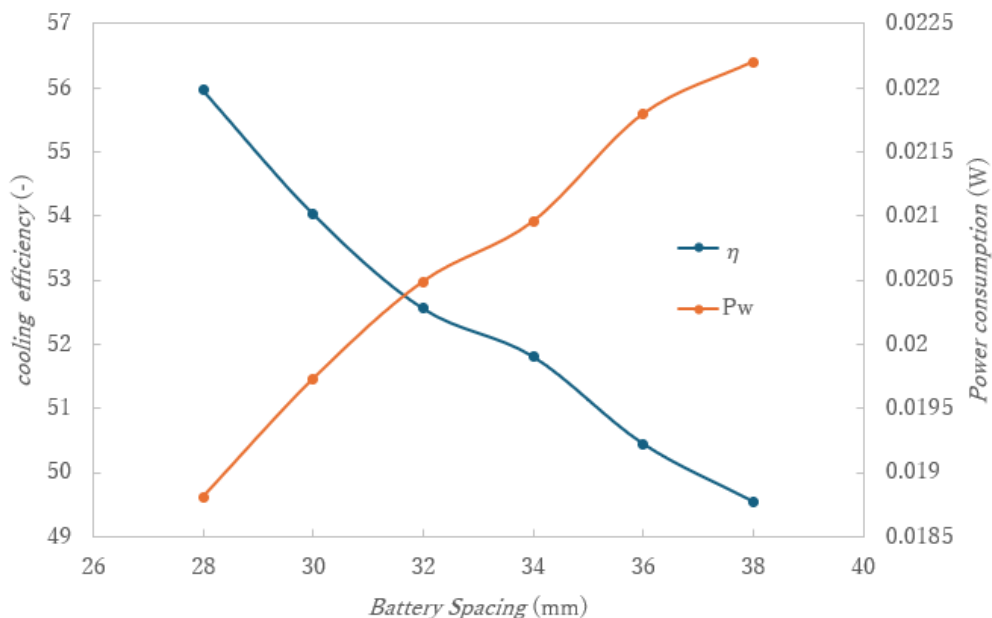


図 27 冷却効率 η ，必要動力 P_w

(iv) パッケージ体積

パッケージ体積は、本解析のようなモジュールレベルでは温度や熱除去量の変化に比べて差が小さく見える場合がある。しかし実際のバッテリーパック設計ではセル数が増加し、同一コンセプトを多段に拡張するため、セル間隔に起因する寸法増加が直線的に累積する。すなわち、 S_y のわずかな増加であっても、セル列数・段数が増えるにつれて全長・全体積の増加として顕在化し、車載搭載性（設置スペース）、モジュールの体積エネルギー密度、周辺構造材・筐体重量などに影響を与える。したがって、 S_y を大きく設定して得られる冷却性能の利得が限定的である場合には、設計上はより小さい体積を優先することに合理性がある。本研究においても、 S_y を拡大するほど体積は増加するため、熱的性能が同等となる範囲では、体積増加を抑えることができる小さい S_y が有利な設計といえる。

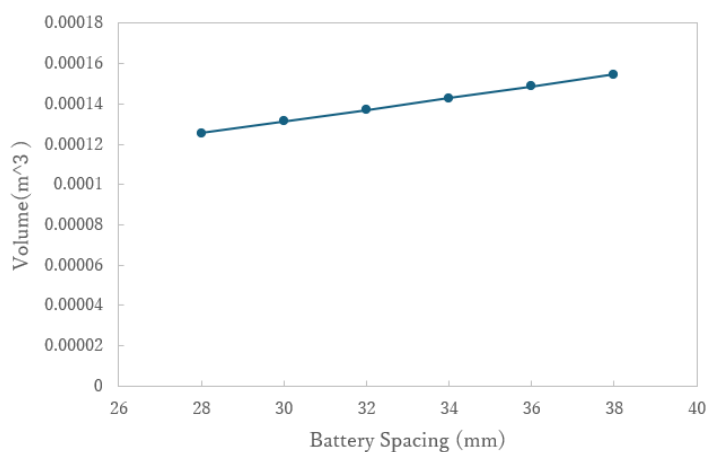


図 28 パッケージ体積

以上の結果を総合すると, S_y の最適化は単一指標の最大化ではなく,熱的優位性と動力,体積のトレードオフとして決定する必要がある。

本研究では,熱除去量の改善が得られつつ,動力増加と効率低下が過度にならず,かつ体積増加を抑えることができる, $S_y=31\text{mm}$ を代表最適値として採用する。

4.2.3 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_x が冷却に与える影響

本節では,前節で最適値として決定した $S_y=31\text{mm}$ を固定し,横方向バッテリー間隔 S_x を変更した場合の温度特性を整理する. 入り口流速は $5.75 \times 10^{-4}[\text{kg/s}]$ で一定値とした.図 29 は各 S_x 条件におけるバッテリー番号ごとの最大温度を示したものである。

(1)下流ほど最大温度が上昇する要因

すべての S_x 条件に共通して,Battery1 から Battery4 にかけて最大温度が増加している.この傾向はこれまでの S_y を変更したときと同様に,空気が下流に進むにつれて加熱され,冷却に利用可能な温度差が減少することが要因と考えられる.図 30 に示すように, $S_x=28\text{mm}, 36\text{mm}$ とともに,下流で空気温度が高くなることが確認できる。

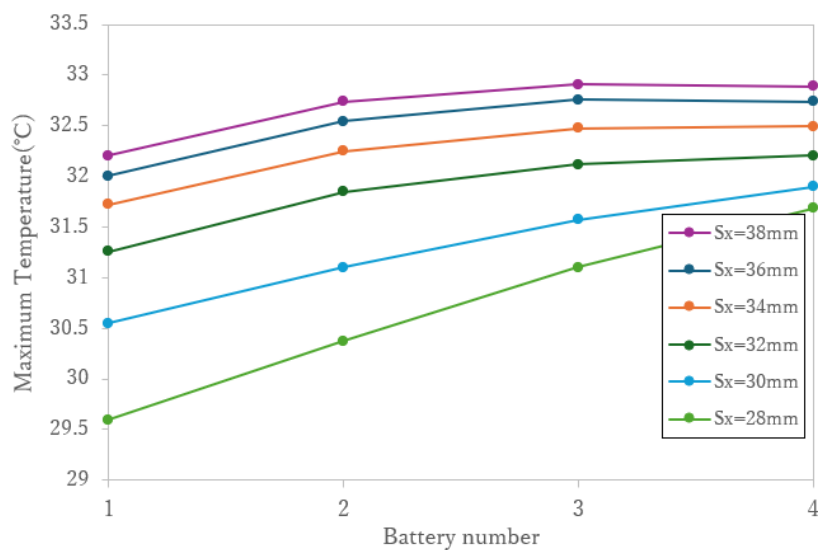


図 29 最大温度 (t=600s)

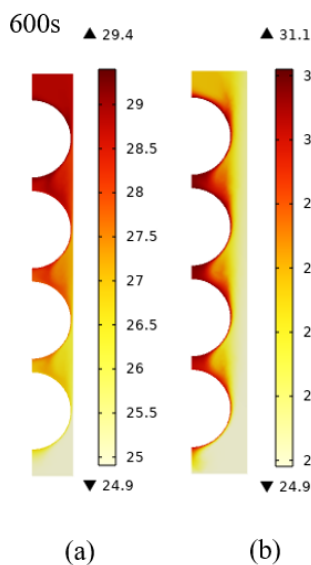


図 30 空気温度(a)Sx=28mm, (b)Sx=38mm

(2) バッテリー間隔 S_x が最大温度に与える影響

図 29 より, S_x を 28mm から 38mm に拡大するにつれて, いずれのバッテリー番号において最大温度が上昇する傾向が確認できる. これは横方向間隔の拡大が流路の取りやすさを増大する一方で, バッテリー表面近傍を通過する有効流れを相対的に弱め, 対流熱伝達を低下させたためと解釈できる.

一般に, 強制対流の熱伝達は表面近傍の流速や速度勾配に強く依存する. S_x を拡大すると, バッテリーの周囲に横方向の空間が増え, 流体は圧力損失の小さい経路へ分配されやすくなる. 図 31 が示すように, S_x の拡大により, 流速が大幅に減速していることも確認できる. その結果, 流れがバッテリー表面に近接して通過せずとも下流へ到達できるようになり, 表面近傍の流速低下および速度境界層の発達が進められる. そのため, 局所的な熱伝達能力が低下する. したがって, 同一の発熱条件下においてバッテリーから空気へ放散される熱量が減少し, 最大温度が上昇したと考えられる.

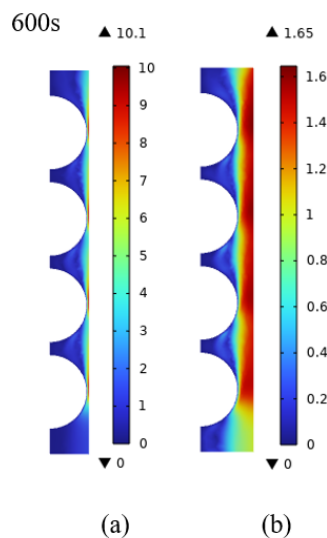


図 31 流速(a) $S_x=28\text{mm}$ (b) $S_x=38\text{mm}$

4.2.4 Aligned 配置におけるバッテリー間隔 S_x の最適化

本節では,前節で決定した $S_y=31\text{mm}$ を固定し,横方向間隔 S_x を $28\sim 38\text{mm}$ の範囲で変化させ,冷却性能とシステム設計上のバランスから最適値を決定する.評価指標は(i)バッテリー温度均一性 ΔT , (ii)空気の熱除去量,(iii)必要動力 P_w ,冷却効率 η , (iv)パッケージ体積とした.

なお必要動力は前節同様に入り口圧力と体積流量,流速を用いて定義した.

(i) 温度均一性 ΔT

図 32 より, S_x を拡大すると,バッテリー内の温度を表す $\Delta T(T_{\text{max}}-T_{\text{min}})$ が減少し,温度均一性が向上する.この挙動は狭い S_x 条件では局所的な流動場の偏りが増幅されやすいことに起因すると解釈できる. S_x が小さい場合,バッテリー近傍の流路が強く拘束されるため,バッテリー表面を沿う流れが加速する領域と,バッテリー背後の低速領域が形成される領域が明確に分かれやすい.その結果,熱伝達係数が高い領域と低い領域が同一セル内に共存し,ホットスポットの形成が助長されて ΔT が増大する.一方, S_x を拡大すると,流路断面に余裕が生まれて流れの回り込みや圧力回復が進み,セル近傍の極端な低速領域や滞留領域が相対的に緩和されるため,冷却の空間的な偏りが小さくなり, ΔT が低下したと考えられる.

特に 32mm 以降の範囲で,改善幅が小さくなる.つまり, S_x 拡大による温度均一化の効果には漸近的な上限が存在する.これは,ある一定以上 S_x を大きくすると,局所的な滞留抑制の改善幅が小さくなり,温度分布の支配的要因が S_x 以外に移行するためと考えられる.

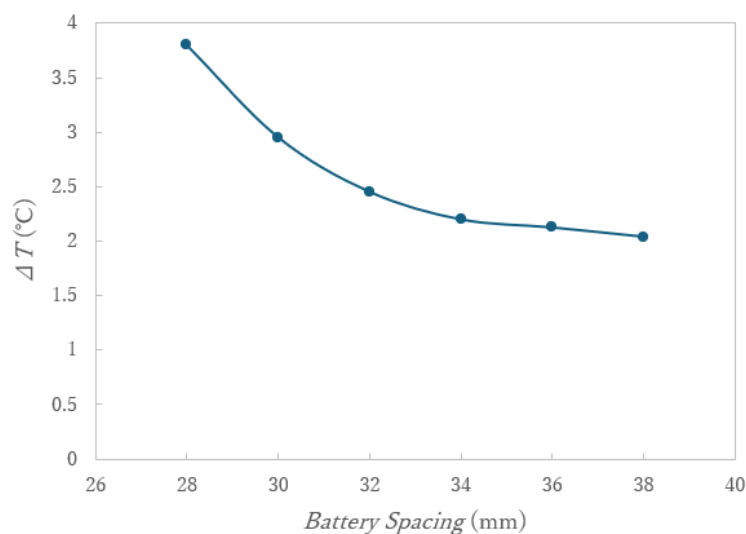


図 32 温度変化量 ΔT

(ii) 熱除去量

図 33 より, S_x の増加に伴い, 充放電終了時 (600s) までに空気が持ち去った熱除去量は減少する傾向を示す。これは前節で前述通り, 横方向の間隔の拡大により, 空気がセルから熱を奪う有効冷却流量が減少したためと解釈できる。

また, $S_x=32\text{mm}$ 以降で熱除去量の低下が緩やかになっている。これは S_x の増加による流れの分散が一定以上進むとそれ以上の S_x 拡大によって新たに増えるバイパス流れの割合が相対的に小さくなり, 熱除去量の変化が飽和に達するためである。

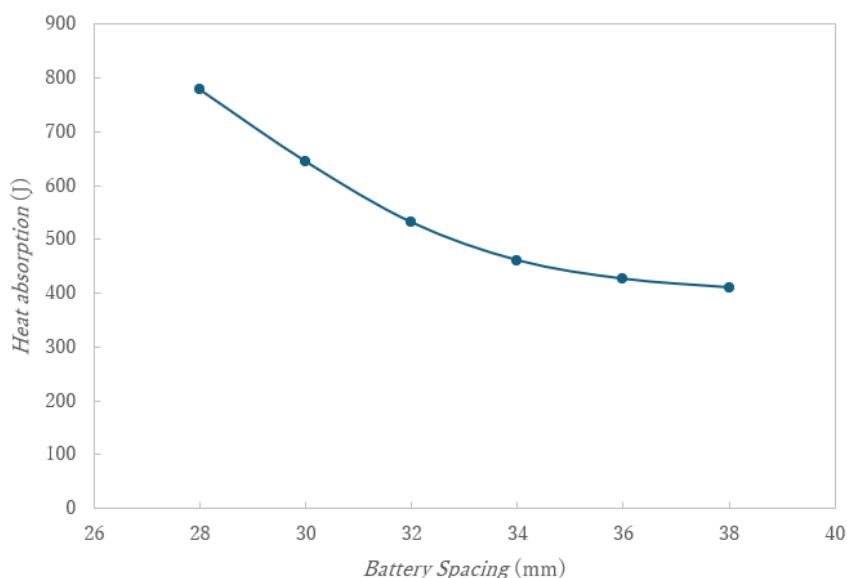


図 33 熱除去量

(iii) 必要動力 P_w , 冷却効率 η

図 34 に, S_x を増大させた際の必要動力 P_w および冷却効率 η の変化を示す。まず必要動力 P_w は S_x が小さいほど大きく, S_x の拡大に伴い急激に低下した。これは S_x が狭い条件では流路断面が拘束されるため, 圧力損失 Δp が増大し, 送風に要する仕事量が増加したためである。(図 35) 特に $S_x=28\text{mm}$ では他条件と比べて

P_w が顕著に大きく、横方向の S_x がシステム負荷を支配していることが示唆される。一方で S_x を 30mm 以上拡大すると、圧力損失が大幅に緩和され、 P_w は小さい値に収束する傾向を示す。

次に冷却効率 η は S_x の拡大に伴い単調増加した。これは(ii)で説明したように S_x の拡大により熱除去量は低下するものの、必要動力 P_w の低下幅がそれを上回るため、結果として η が改善されたと解釈できる。

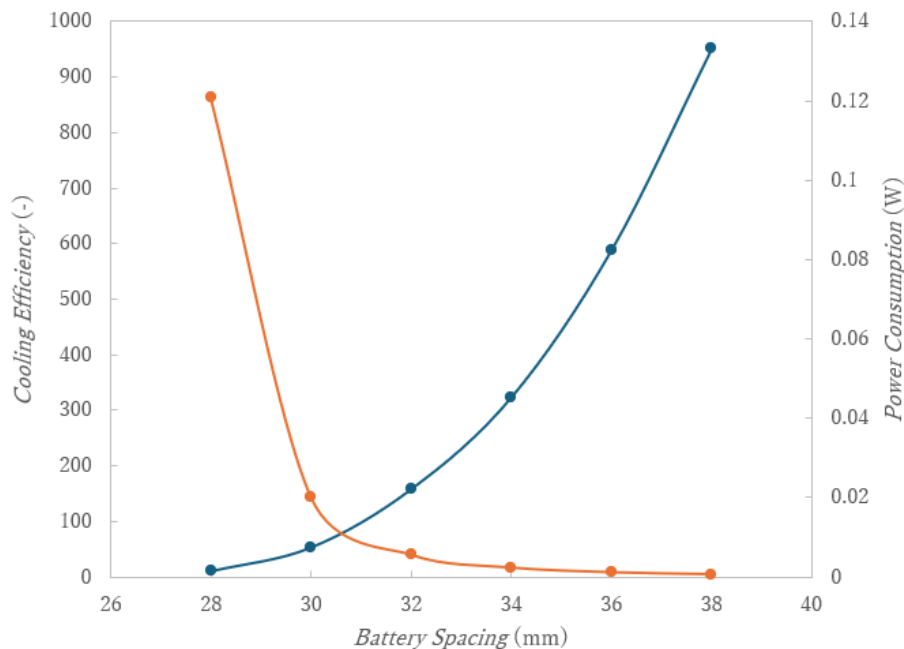


図 34 冷却効率 η , 必要動力 P_w

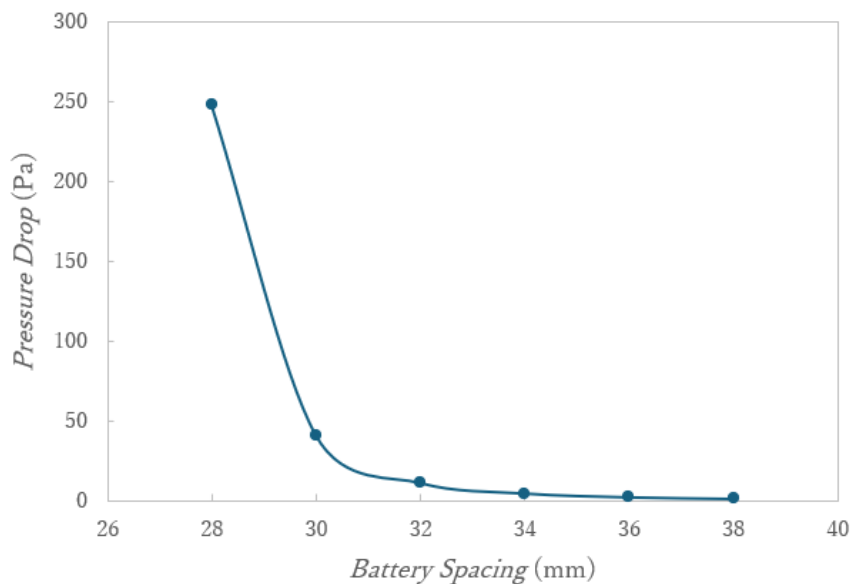


図 35 圧力損失

(iv) パッケージ体積

S_x の拡大は冷却通路の余裕を増大し圧力損失を低減する一方で、パッケージ体積を増加させる。前述通り、 S_x の選定には冷却性能、エネルギー効率の改善だけでなく、パッケージ体積の縮小の両立が求められる。

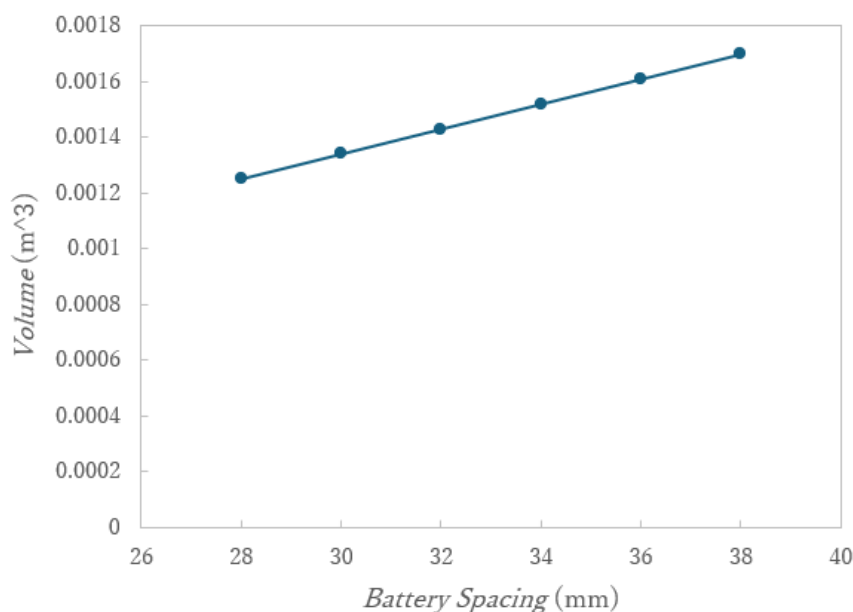


図 36 パッケージ体積

以上の結果を総合すると,本研究では $S_x=30\text{mm}$ を Aligned 配置におけるバッテリー横方向間隔の最適値として採用する.いかにその理由を述べる.

特に $S_x=28\text{mm}$ では流路を狭くしたことによる圧力損失増大による必要動力が顕著に大きく,エネルギー効率の観点から不利であると示された.一方, S_x を 32mm 以上拡大すると,必要動力の改善が漸近的となり追加の利得が限定的と考えられる.

また, S_x が小さい範囲では熱除去量の高さによるバッテリー最大温度の低下,またパッケージ体積の縮小にもつながる.

したがって, $S_x=30\text{mm}$ は冷却性とエネルギー消費,さらにパッケージ体積の観点でバランスが最も良い設計点であると判断した.

4.2.5 Staggered 配置におけるバッテリー間隔が冷却に与える影響

本節では,Staggered 配置におけるバッテリー間隔 S_r が冷却特性に及ぼす影響を検討する.Staggered 配置では図 37 に示すように三つのバッテリーを正三角形上に配置し,その中心間距離を S_r と定義した.このため,Aligned 配置とは異なり, S_r を拡大することで,横方向および縦方向のバッテリー間隔を同時に拡大することを意味する.

(1) バッテリー最大温度に関して Battery 2 が最低温度を示す理由

図 37 は $28\text{mm}\sim 38\text{mm}$ の異なるバッテリー間隔 S_r における充放電終了後のバッテリーの最大温度である. Staggered 配置では,入り口に最も近い Battery1 が必ずしも最も低温とはならず,Battery2 の方が低い温度を示す.この挙動は Aligned 配置とは本質的に異なるものであり,Staggered 配置特有の幾何学的配置に起因する.

Staggered 配置では,Battery1 は流路中央から横方向にずれた位置に配置されており,空気の主流が Battery1

に正面から衝突するのではなく、その周囲を回りこむように流れる。その結果、主流の一部が Battery1 表面を十分に洗わず通過する。このような幾何学的遮蔽効果により、Battery1 表面近傍の流速は必ずしも高くなり、境界層が比較的熱く形成される。そのため入り口空気に最初に接触するにもかかわらず、Battery1 の冷却性能とは限定的となり、最大温度が低下しづらい。さらに配置の関係上、Battery2 の直前の流路が入り口面積よりも小さくなることで、流速が高まり、Battery2 の冷却効果が高まることも要因の一つと考えられる。

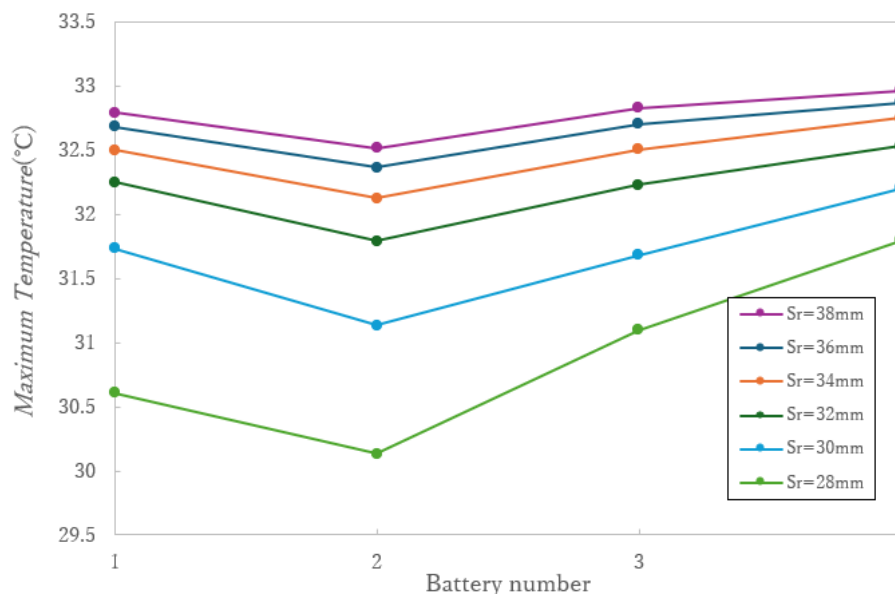


図 37 最大温度

(2) バッテリー間隔 S_y が最大温度に与える影響

同一バッテリー番号に着目すると、 S_r の増加に伴い、最大温度は全体として上昇する傾向を示す。この挙動は Staggered 配置における流れの分岐と偏向特性と密接に関係している。

たとえば、 $S_r=28\text{mm}$ と間隔が狭い場合、Staggered 配置特有の幾何学的効果により、流れはバッテリー間を縫うように強制的に偏向される。この結果、流れが直進せず、バッテリー表面に衝突、近接する。また、表面近傍の流速および速度勾配が大きくなる。さらに、境界層が薄く維持されることで、対流熱伝達係数が向上する。これらの効果から、 S_r が小さい範囲では、下流バッテリーを含め、比較的低い最大温度が実現される。

一方で、 $S_r=38\text{mm}$ とバッテリー間隔を拡大すると、バッテリー間の空間が広がり、流れは抵抗の小さい経路を選択して、直進化する傾向が強まる。

これにより、流れの偏向が弱まり、バッテリー表面近傍を通過する有効流れが減少する。さらには、バッテリー表面近傍の流速が低下し、熱伝達係数が減少する。

特に Staggered 配置では、配置自体が流れを乱すことで冷却性能を高めているため、 S_r 拡大による流れの直進化は配置の利点を弱める方向に作用すると考えられる。

また、バッテリー間隔を広げていくと、その最大温度上昇幅は徐々に小さくなる。これはバッテリー間隔が広がることで流れの幾何学的拘束が弱まることが原因と考えられる。 S_r を 34mm 以上広げると、流れの加速が緩和されることでバッテリー間隔が狭いことによる流速向上の冷却効果の恩恵を受けづらくなる。

る.それは,図 38 のバッテリー間隔ごとの最大流速の推移をみても, $Sr=34\text{mm}$ 以降の流速の減少幅が小さいことから, $Sr>34\text{mm}$ の領域において,バッテリー間隔 Sr が冷却に及ぼす影響も小さくなることが分かる.

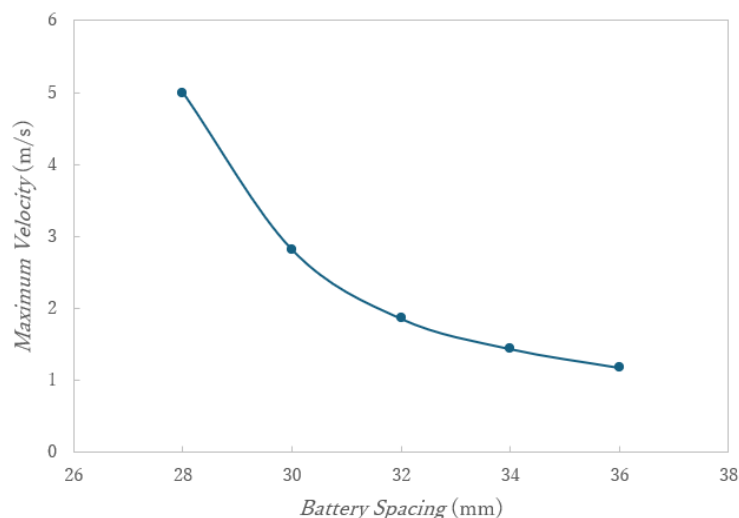


図 38 最大流速

以上より,Staggered 配置における最大温度分布は流れ方向だけでなく,バッテリーの幾何学的配置が作り出す流路構造に強く支配される.

4.2.6 Staggered 配置におけるバッテリー間隔 Sr の最適化

Staggered 配置では, Sr の変更により横方向および縦方向の間隔を同時に変化させるため,冷却性能だけでなく,流路抵抗および温度均一性にも大きな影響を及ぼす.そこで本節では

指標として,(i) 温度均一性,(ii)空気の熱除去量,(iii) 必要動力および冷却効率,(iv)パッケージ体積を置き, Sr が流れ場へ与える本質的な影響を示し,次に各指標のトレードオフを整理して,最適な Sr を定義する.

(i)温度均一性

図 39 に Staggered 配置におけるバッテリー間隔 Sr と温度均一性を表す ΔT の関係を示す. ΔT は $Sr=28\text{mm}$ で最大となり,その後 Sr を拡大するにつれて低下した.一方で, $Sr=32\sim 36\text{mm}$ の範囲では, ΔT の変化は比較的小さく,均一性の改善が緩やかになる傾向が確認された.

これは,バッテリー間隔が極端に狭いと,高速で空気が流れる領域と,低速で滞留する流路が同時に発生しやすくなる.これにより,バッテリー表面の局所熱伝達係数に強い偏りが出る.結果として冷えるセルと,冷えにくいセルの差が拡大し, ΔT が増大する.しかし, Sr をさらに拡大させても ΔT の改善が限定的になるのは,流路が十分に解放されていることで,流れ場の非一様性が既に緩和されているからと解釈できる.以上より,温度均一性の観点からは,過度に Sr を拡大するよりも ΔT の低下が頭打ちとなる領域を踏まえた合理的な

間隔設定が重要である。

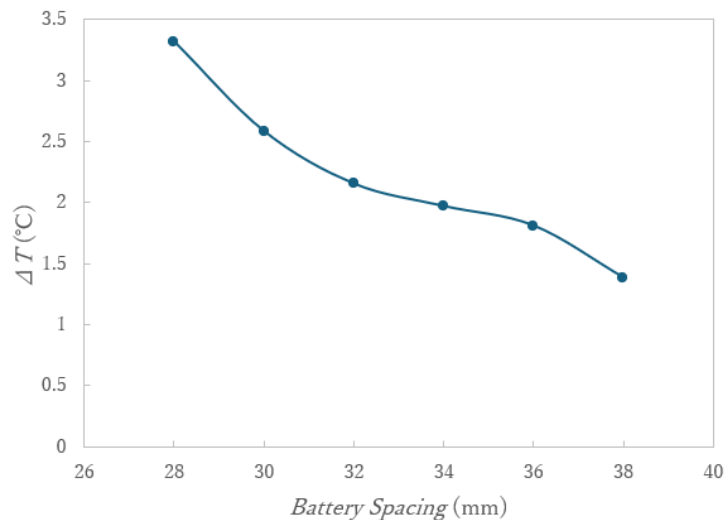


図 39 温度変化量 ΔT

(ii) 熱除去量

図 40 に Staggered 配置におけるバッテリー間隔 S_r と空気の熱除去量の関係を示す。図 40 より、熱除去量は S_r の増加とともに減少している。しかし、一定以上のバッテリー間隔をとっても、熱除去量に大きな変化が見られない。これは Staggered 配置において間隔を広げるほど、流れが狭い流路から開放的な流路に変化するが、一定以上ひろげると、バッテリー表面近傍の流れの当たり方が大きく改善されにくいいためである。

以上より、 S_r を過度に拡大しても熱除去量は大きく改善せず、むしろパッケージ体積の増大を招く。したがって、熱除去量の改善が頭打ちとなる領域以上に S_r を広げる設計は合理性が低く、必要最低限の間隔にとどめることが望ましい。

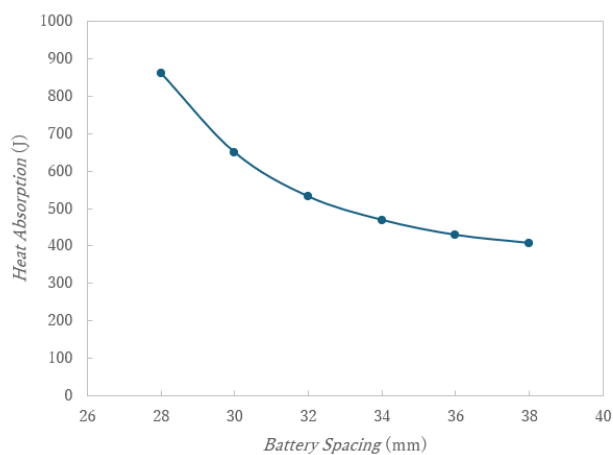


図 40 熱除去量

(iii) 必要動力

図 41 より、 $S_r=28\text{mm}$ では P_w が他条件に比べて圧倒的に大きい。これは流路が狭くなることで平均流速の増加、表面摩擦の増大、さらには隙間や背面における剥離および再循環による局所的な損失が増大すること

で、圧力損失が急増したためと解釈できる。(図 42)したがって、 $Sr=28\text{mm}$ は温度抑制効果が大きい一方で、送風エネルギー要求が過大であるため、最適候補からは外れる。

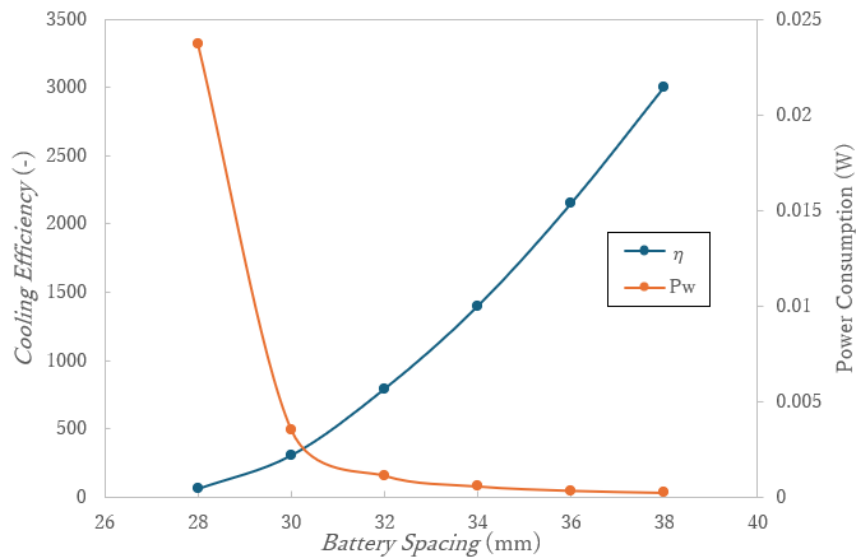


図 41 冷却効率 η , 必要動力 P_w

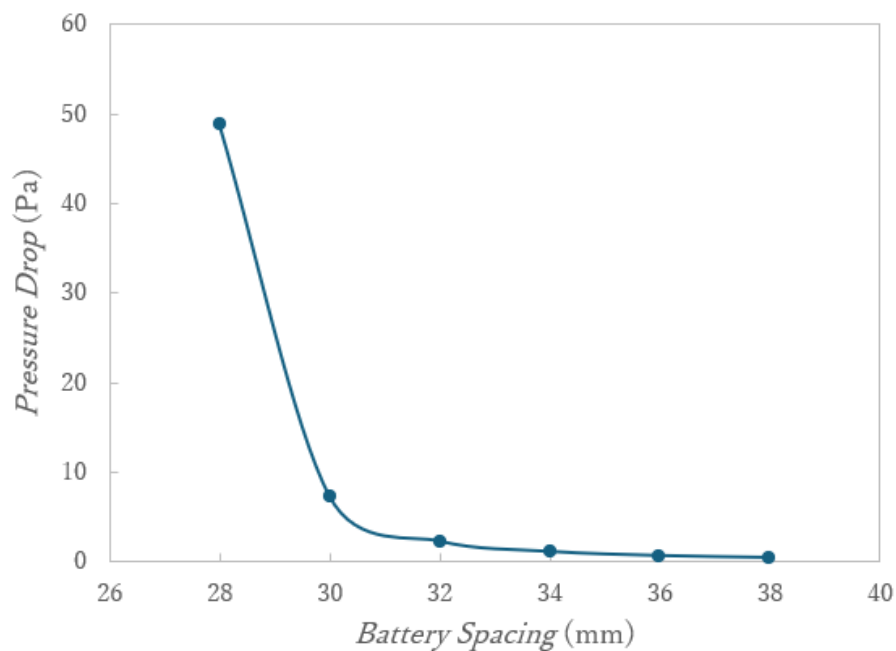


図 42 圧力損失

(iv) パッケージ体積

Sr の拡大は冷却通路の余裕を増大し圧力損失を低減する一方で、パッケージ体積を増加させる。4.2.2, 4.2.4 章で前述したように、 Sr の選定には冷却性能、エネルギー効率の改善だけでなく、パッケージ体積の縮小の両立が求められる。

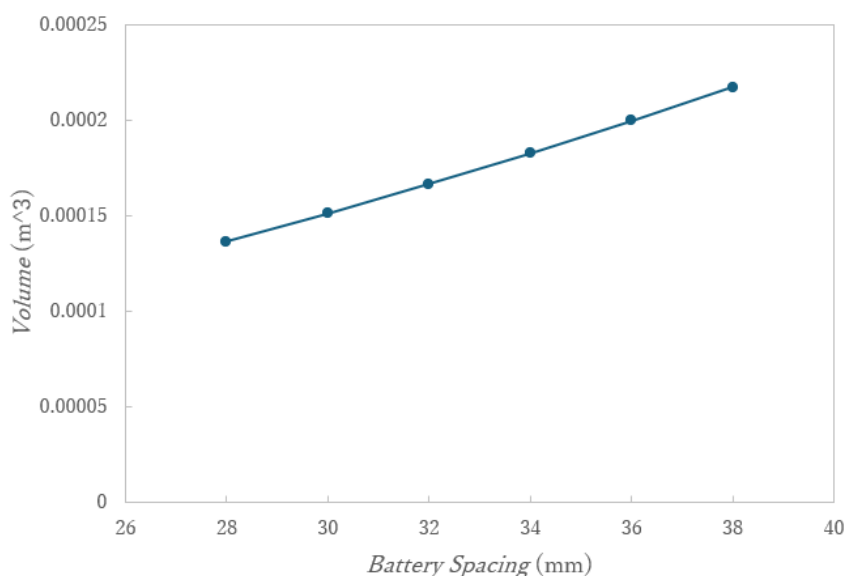


図 43 パッケージ体積

以上より, Staggered 配置におけるバッテリー間隔 S_r は冷却性能のみならず, 温度均一性, 流路抵抗, ならびにパッケージ体積に対して相反する影響を及ぼすことが示された. これらのトレードオフを踏まえて, 本研究では $S_r=30\text{mm}$ を Staggered 配置における最適値として採用した. $S_r=30\text{mm}$ は狭すぎる条件 ($S_r=28\text{mm}$) で顕在化する冷却の偏りを抑制しつつ, 熱除去量の低下を必要以上に招かないバランス点に位置する. また, 必要動力が大幅に減少する点でもありつつ, パッケージ体積の観点からも, 間隔拡大における体積増加を最小限にとどめられるため, 将来的なセル数増加をともなうパック設計に対しても整合的である. 以上より, 冷却性能とシステム設計上の制約を総合指摘に考慮した結果として, $S_r=30\text{mm}$ を Staggered 配置における最適値として採用する.

4.2.7 Aligned 配置と Staggered 配置の比較

前節までの検討により, Aligned 配置および Staggered 配置それぞれについて, 冷却性能とシステム設計上の制約 (圧力損失・消費動力・体積) を総合的に考慮した最適なバッテリー間隔条件を決定した. 本節では, これら最適条件同士を同一の運転条件 (入口温度・流速条件, 充放電条件, 境界条件等) で比較し, 配置形状そのものが冷却挙動に与える本質的な影響を明らかにすることを目的とする.

ただし, 本研究は数値解析に基づく相対比較であり, 現時点で実験による妥当性確認は完了していない. したがって, 特定の配置を「最良」と断定するのではなく, 各配置が持つ利点・弱点を, 複数の評価指標から整理する. 具体的には, (i) 温度均一性, (ii) 空気の熱除去量, (iii) バッテリー最大温度, (iv) 必要動力および冷却効率, (v) バッテリー最大温度, (V) パッケージ体積の 5 項目を用い, Aligned と Staggered の最適配置を同一スケールで比較する. 以上の比較を通じて, 本研究で提案する Low Fin Tube 適用バッテリーパックにおける配置選定の指針を整理し, 今後のバッテリーパック設計への展開に資する基礎知見として提示する.

(i) 温度均一性

図 44 に Aligned 配置および Staggered 配置の最適条件における温度均一性指標の ΔT を示す。Aligned 配置では $\Delta T = 2.972\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、Staggered 配置では $\Delta T = 1.809\text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、Staggered 配置の方が、温度分布がより均一であることが確認された。すなわち、最適条件同士の比較において、Staggered 配置は Aligned 配置に対して ΔT を約 39% 低減しており、バッテリー間の熱的偏りを抑制する配置であると解釈できる。

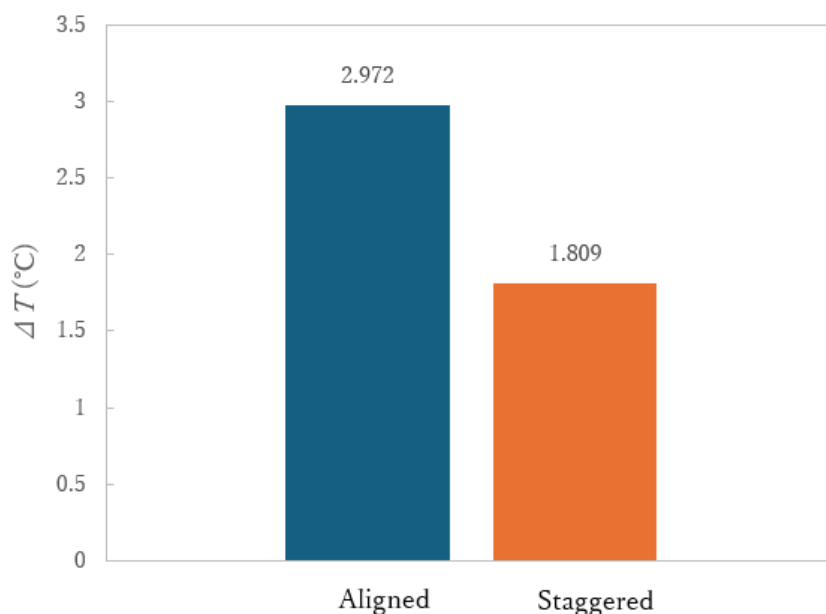


図 44 温度変化量 ΔT

この差が生じる要因は、両配置における構造の違いが、バッテリーセル周囲の流速分布と熱伝達の空間的な偏りを変化させる点にある。Aligned 配置ではバッテリーが流れ方向に直進的に並ぶことで、上流セル背後に形成される低速後流や温度境界層の影響が下流側へ連続的に引き継がれやすい。その結果、セル表面近傍の流速が局所的に低下する領域と、比較的流れが通過しやすい領域が明確に分離し、セル間および同一セル上での熱伝達係数のばらつきが増大する。これにより、冷却が効くセルと効きにくいセルが同時に生じ、最大温度と最小温度の差が拡大しやすい。

一方で、Staggered 配置では、セルの配置が千鳥状となることで、流れが直進するだけでなく横方向にも偏向しやすく、流れの分岐や再分配が起こりやすい。これらはセルの特定部分への流量集中や特定領域での対流を緩和して、結果としてセル表面の対流熱伝達の偏りを抑えることができる。

以上より、温度均一性の観点では、Staggered 配置が Aligned 配置より優位であり、バッテリーパック全体としてホットスポットの発生を抑制できる可能性が示された。特に、温度不均一性はセル劣化のばらつきや局所的なリスク増大に繋がり得るため、本研究の条件範囲内では、Staggered 配置がより安定した熱環境を形成する配置であると位置づけられる。

(ii) 空気の熱除去量

図 45 に、Aligned 配置および Staggered 配置の最適条件における空気の熱除去量 Q_{ab} を示す。Aligned 配置では $Q_{ab} = 644.36\text{ J}$ 、Staggered 配置では $Q_{ab} = 649.83\text{ J}$ となり、Staggered 配置のほうがわずかに大きい値を示した。しかし、両者の差は 5.47 J (約 0.85%) にとどまり、熱除去量の観点では両者の配置の性能はほぼ同等といえる。

この結果は、配置形状が異なっても、解析条件下では系全体として空気が吸収する熱量がほぼ同程度に収束することを意味する。すなわち、(i)温度均一性の観点と総合すると、配列の優劣は、全体の熱除去量の差よりも、どのセルの表面部分でどれだけ熱が奪われたかという局所熱伝達の違いとして現れる。

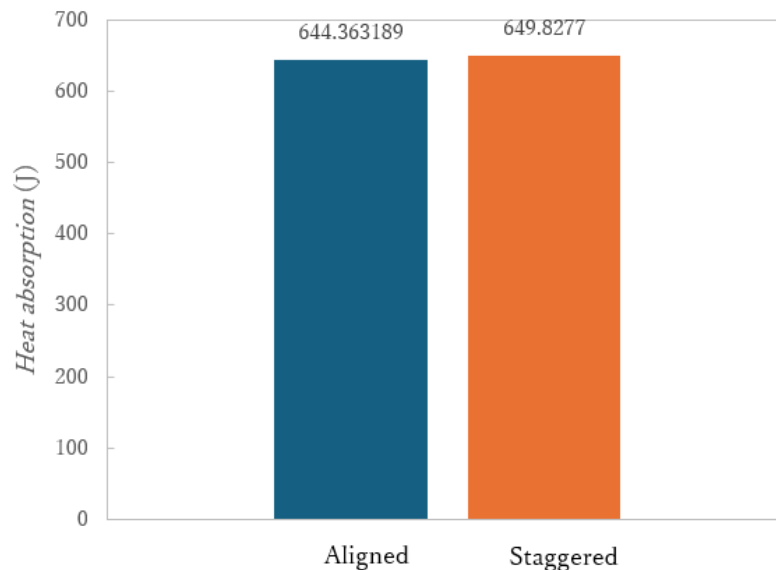


図 45 熱除去量

以上より、空気の熱除去量に関しては Aligned と Staggered の最適条件間で顕著な差は見られず、両者の性能差は主として温度分布の均一化や流れの偏りの低減といった熱の除去のされ方の違いに現れると結論付ける。

(iii)必要動力および冷却効率

図 46 に、Aligned 配置および Staggered 配置の最適条件における必要動力 P_w と冷却効率 η を示す。必要動力 P_w は Staggered 配置の方が大きく、Aligned 配置に比べて送風機負荷（圧力損失）を要することが分かる。(図 47) 一方で、冷却効率 η は Staggered 配置が Aligned 配置を大きく上回った。前述通り、Aligned と Staggered の間で空気の熱除去量 Q_{ab} はほぼ同等であるため、本比較における冷却性能は主に、流路抵抗、つまり圧力損失の違いに起因する必要動力 P_w の差として現れる。

本解析結果では、Staggered 配置の必要動力は $P_w=3.54 \times 10^{-3}W$ にたいして、Aligned 配置では $P_w=2.15 \times 10^{-2}W$ を要する。すなわち、Staggered 配置は Aligned 配置に対して必要動力を約 83.5%（約 6 分の 1）低減できており、流路抵抗が大幅に抑制されていることを示す。同様に、効率は Aligned 配置で $\eta=50$ 、Staggered 配置で $\eta=306$ と、Staggered 配置が Aligned 配置に比べて冷却効率を約 6 倍向上させたことを意味する。

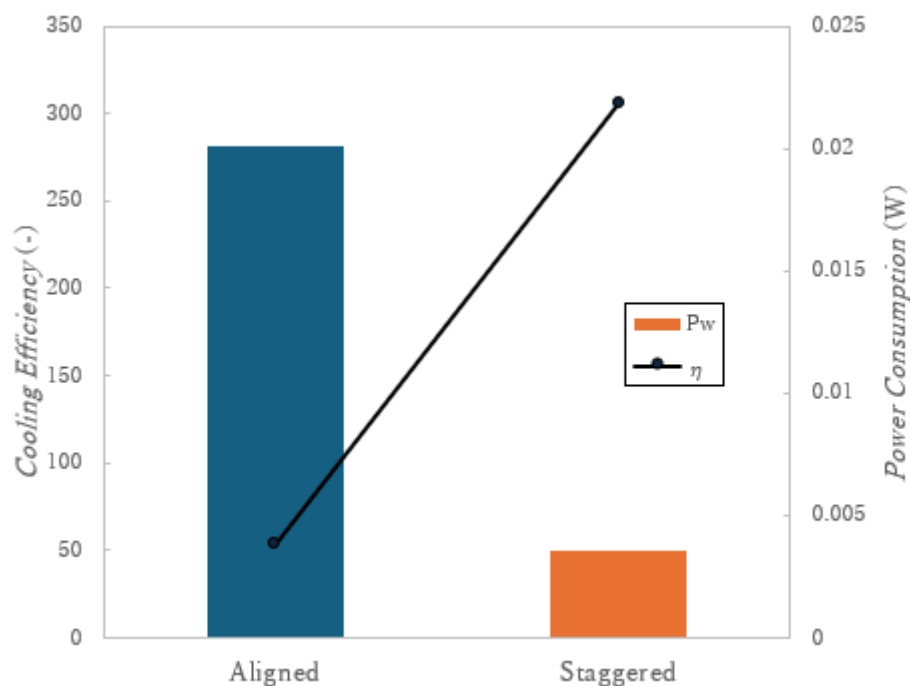


図 46 冷却効率 η , 必要動力 P_w

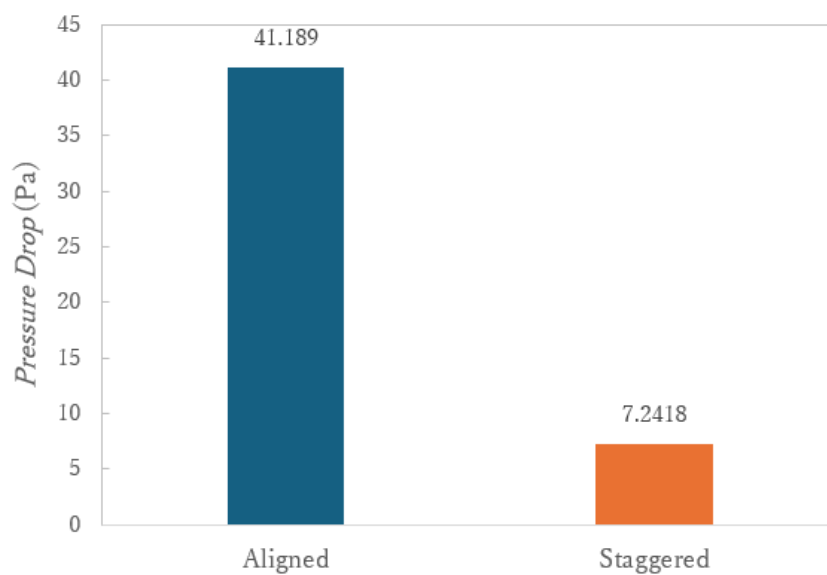


図 47 圧力損失

(iv) バッテリー最大温度

図 48 に、各最適条件 (Aligned : $S_x = 30\text{mm}$, $S_y = 31\text{mm}$, Staggered: $S_r=30\text{mm}$) におけるバッテリー1~4の最大温度を示す. Aligned では下流に進むにつれて最大温度が単調に上昇し、典型的な上流で加熱された空気が下流に供給される温度分布になっている. 一方, Staggered ではバッテリー1~2 付近で一度最大温度が低下し、その後バッテリー3~4 で上昇する非単調な分布となった. これは配置の違いにより、各セル近傍の流れが再配分され、局所的な熱伝達が変化したことを示唆する. 系全体としては, Staggered 配置の最大温度が Aligned 配置よりもわずかに高いことが確認できる.

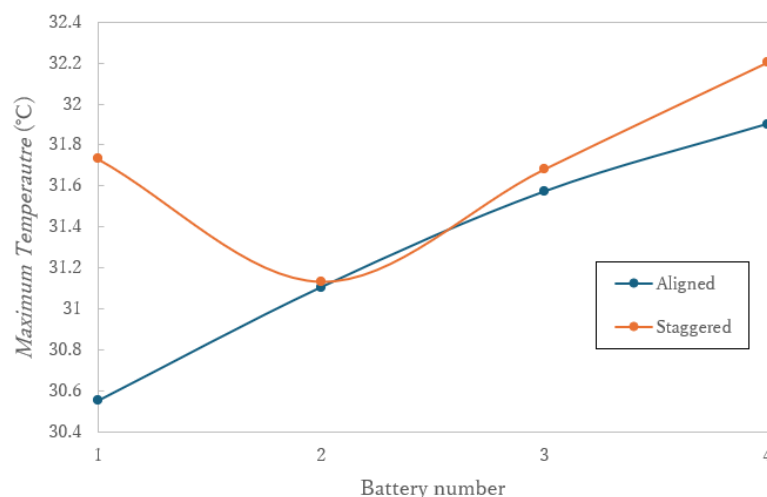


図 48 バッテリー最大温度

ここで重要なのは、(ii) 空気の熱除去量がほとんど同じでも、各セルの最大温度には差が生まれた点である。熱除去量は出口断面の平均温度上昇に対応する、系全体のエネルギー収支であり、主として、600s 間で空気がどれだけ熱を受け取ったかを表す。一方で最大温度は各セル表面近傍の局所熱伝達係数と局所温度差に依存する。すなわち、両者の配置における熱除去量が同等であっても、流れの衝突位置や滞留域の形成、バイパス流れの発生といった流れの空間分布が異なれば、セル表面ごとの局所熱伝達係数が変化し、結果として各セルの最大温度がわずかにずれる。

以上より、流れの構造の違いにより、Aligned 配置のほうが Staggered 配置に比べて、バッテリーの最大温度の点ではわずかに有利であることが確認できる。

(V) パッケージ体積

図 49 に Aligned と Staggered 配置のパッケージ体積を示す。Staggered 配置は Aligned 配置に比べて約 9.1% 大きい。したがって、パッケージの小型化を重視する観点では Aligned が有利である。

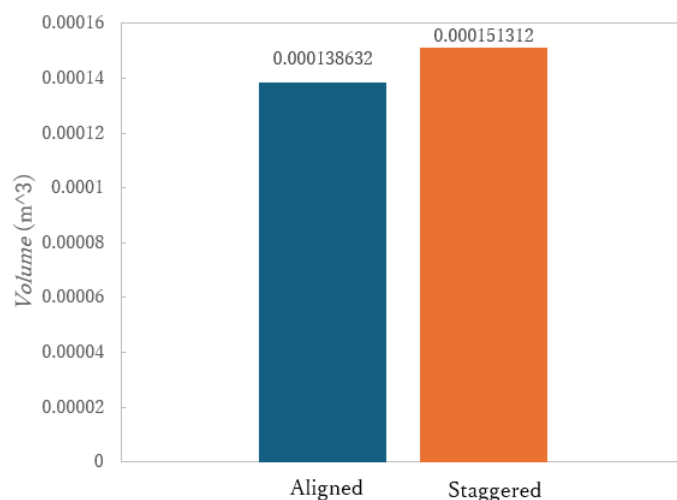


図 49 パッケージ体積

以上の結果を(i)温度均一性 ΔT , (ii)空気の熱除去量, (iii)バッテリー最大温度 T_{\max} , (iv)必要動力 P_w および冷却効率 η , (V)パッケージ体積の 5 項目で比較すると,Staggered 配置は Aligned 配置に対して温度均一性が大きく改善され,さらに熱除去量が同等であるにもかかわらず,必要動力が小さく,冷却効率が高いという利点を示した.一方で,系全体の最大温度は Staggered のほうがわずかに高く,加えてパッケージ体積もわずかに増加すると言うトレードオフが存在する.

しかしながら,バッテリーパックの実際の運用ではセル間の温度のばらつきは劣化の不均一性や寿命低下を招きやすく,また必要動力の増加はシステム効率を悪化させる.これらを踏まえると,本研究で得られた Staggered 配置の高い温度均一性および低い必要動力(高冷却効率)の改善効果は体積増加と最大温度のわずかな上昇を上回る重要性を持つと考える.本研究では以上の総合比較に基づき,Staggered 配置($S_r=30\text{mm}$)を最適配置として採用する.

第5章 結論

5.1 本研究の総括

本研究では、円筒型リチウムイオン電池を対象に、Low Fin Tube (LFT) を適用した強制空冷システムの冷却性能を数値解析により評価した。解析では、まず単一セルに対して LFT の有無による冷却特性の差を明確化し (4.1 章)、次に電池パックを想定して Aligned および Staggered 配置におけるセル間隔最適化と配置比較を行った (4.2 章)。評価指標として、バッテリー最大温度、温度均一性 ΔT 、空気の熱除去量 Q_{ab} 、必要動力 P_w 、冷却効率 η 、ならびにパッケージ体積を用い、冷却性能とシステム設計制約のトレードオフを定量的に整理した。

4.1 章では、バッテリーパック解析 (4.2 章) に先立ち、単一円筒セルを対象として LFT 有無の強制空冷性能を比較し、C-rate と入口流速に対する温度応答を整理した。C-rate を 3C→5C と増加させると不可逆発熱の増大により最大温度は上昇するが、LFT 付加により各 C-rate で最大温度上昇が概ね 3-4°C 低減し、冷却効果が一貫して確認された。一方で LFT は流路抵抗を増加させ、必要動力は 0.1 m/s 条件で約 10 倍に増大するなど、冷却性能と動力の明確なトレードオフが現れた。流速を 0.1→0.5 m/s へ増加させると対流熱伝達の強化により最大温度は低下し、LFT は全流速で温度均一性 ΔT も約 30% 程度改善した。以上より、LFT は単セル冷却において最大温度低減と均一化に有効である一方、圧力損失増に伴う動力増大が設計上の制約となることを示した。

4.2 章の電池パック解析では、Aligned 配置において縦方向間隔 S_y と横方向間隔 S_x を段階的に変化させ、冷却性能とシステム負荷の最適バランスを探索した。まず S_y を変化させた結果、最大温度の低下効果は限定的であり、間隔拡大による改善が一定以上で飽和する傾向が確認された。一方で、送風動力や体積制約も考慮すると、 $S_y = 31\text{mm}$ が総合的に最適な条件として選定された。続いて S_y を固定し S_x を検討した結果、 S_x は圧力損失 (必要動力) に対して感度が高く、過度に狭い条件では動力負荷が増大することが分かった。複数指標のトレードオフから、Aligned 配置の最適条件は $S_y=31\text{mm}$, $S_x=30\text{mm}$ と結論付けた。

Staggered 配置では、間隔 S_r が縦・横方向の実質間隔を同時に変化させる点に着目し、温度均一性、熱除去量、必要動力、体積の総合評価から最適条件を検討した。その結果、狭い間隔では流れの偏りや滞留により温度均一性が悪化しやすい一方、間隔を広げても熱除去量の改善は頭打ちとなるため、過度な拡大は体積増加の観点から合理性が低いことを確認した。これらのトレードオフを踏まえ、本研究では Staggered 配置の最適条件を $S_r=30\text{mm}$ とした。

最後に、Aligned と Staggered の最適条件同士を比較した結果、温度均一性は Staggered が大幅に優れており、Aligned の $\Delta T = 2.972^\circ\text{C}$ に対して Staggered は $\Delta T = 1.809^\circ\text{C}$ と、約 39% 低減した。一方、空気の熱除去量は両配置でほぼ同等であり、Aligned が $Q_{ab} = 644.36\text{J}$ 、Staggered が $Q_{ab} = 649.83\text{J}$ と差は約 0.85% に留まった。にもかかわらず、必要動力は Staggered の方が小さく、 $P_w = 3.54 \times 10^{-3}\text{W}$ を示し、Aligned (約 $2.15 \times 10^{-2}\text{W}$) に対して約 83.5% 低減した。これに伴い、冷却効率 η も Staggered が高く、総合的には同程度の熱除去量をより小さな動力で達成しつつ、温度分布のばらつきを抑える配置であることが示された。一

方で、パッケージ体積は Staggered の方が大きく、Aligned の $1.38 \times 10^{-4} m^3$ に対して Staggered 配置は $1.51 \times 10^{-4} m^3$ と約 9.1%増加し、省スペース性では不利である。また系全体の最大温度は Staggered の方がわずかに高い傾向も確認され、これは総熱除去量が同等であっても局所熱伝達の分配が異なることでホットスポットが形成され得ることを示唆する。以上より、本研究の範囲内では、Staggered 配置の高い温度均一性および低い必要動力（高冷却効率）の改善効果は体積増加と最大温度のわずかな上昇を上回る重要性を持つと考え、Staggered 配置(Sr=30mm)を最適配置として採用した。

5.2 今後の課題

本研究では、層流仮定に基づく数値解析により、LFT を用いた円筒型リチウムイオン電池の空冷特性および配置効果を定量的に評価した。一方で、実際の EV 用空冷条件では、流速の増加やフィン構造によって局所的な乱流遷移が生じる可能性が高く、乱流モデルを考慮した解析が今後の重要な課題である。また、高流速条件における冷却性能と圧力損失のトレードオフ、ならびに異常発熱時における LFT の熱伝播抑制効果については未検討である。さらに、重力・放射・自然対流の影響や実験的検証を通じたモデル妥当性の確認が、実装に向けた今後の課題として挙げられる。

謝辞

九州大学大学院総合理工学研究院 宮崎 隆彦 教授には、多くの助言や熱心なご鞭撻を賜り、研究の遂行に大きくご貢献をして頂きました。深く感謝の意を表し、心から御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学研究院 Kyaw Thu 教授には、本研究の遂行に当たり、的確な助言に加え、丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。また、本論文を執筆するにあたっても多くのご指導、ご鞭撻を賜りました。深く感謝の意を表し、心から深く御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府 高田 信夫 技術専門職員、高橋史明 技術専門職員のサポートにより、ここに深く感謝の意を表し、心から深く御礼申し上げます。

共同研究者である Jiang Ziqi さんと板本 力哉さんには研究を遂行する上で多数のご助言、シミュレーション構築のサポートなど大変お世話になりました。深く感謝の意を表し、心より御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻宮崎研究室に所属する、研究員 Chairunnisa さん、柴 甲子 さん、Zhao Peng さん、Wu Yitong さん、Alaa Itaiwi さん、周 盈辛 さん、Isha Sameen さん、早瀬 岳 さん、Jiang Ziqi さん、Goo Sangdon さん、Sua Kim さん、Minho Lee さん、Rui-chen Lin さん、加門 巧次 さん、強 立 さん、田中 佑弥 さん、今村 太郎 さん、大城 李桜 さん、張 禹 さん、筒井 祥太 さん、Zhang Yi さん、永尾 知晴 さん、宮田 悠綺 さん、Feng Hao さんには、多大なるご助言及びご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

研究室秘書大和 裕里さんには事務手続き等で大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

最後に、遠く離れた場所から著者の学生生活を温かく見守り、支え続けてくれた家族に心から感謝いたします。

付録

本研究で用いた空気の物性値は COMSOL Multiphysics の Material Library に収録されている Air に基づいて設定した。これらの物性値は、NISTREFPROP データベース (Version 10.0) に基づく温度依存の近似式として与えられている。本付録では、数値解析に用いた空気物性値の具体的な定義式を示す。

付録1 空気の粘性係数

空気の動粘性係数 η は、温度 T の多項式関数として以下のように定義した。

$$\eta(T) = -8.38278 \times 10^{-7} + 8.35717342 \times 10^{-8}T - 7.69429583 \times 10^{-11}T^2 + 4.6437266 \times 10^{-14}T^3 - 1.06585607 \times 10^{-17}T^4$$

単位は $\text{Pa} \cdot \text{s}$ である。

付録2 空気の比熱容量

空気の定圧比熱容量 C_p は、温度依存の多項式近似として以下の式で与えた。

$$C_p(T) = 1047.63657 - 0.372589265T + 9.45304214 \times 10^{-4}T^2 - 6.02409443 \times 10^{-7}T^3 + 1.2858961 \times 10^{-10}T^4$$

単位は $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ である。

付録3 空気の熱伝導率

空気の熱伝導率 k は、温度依存の多項式関数として以下の式を用いた。

$$k(T) = -0.00227583562 + 1.15480022 \times 10^{-4}T - 7.90252856 \times 10^{-8}T^2 + 4.11702505 \times 10^{-11}T^3 - 7.43864331 \times 10^{-15}T^4$$

単位は $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ である。

参考文献

- [1] 'The battery industry has entered a new phase – Analysis', IEA. Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available: <https://www.iea.org/commentaries/the-battery-industry-has-entered-a-new-phase>
- [2] 'Global EV Outlook 2025 – Analysis', IEA. Accessed: Feb. 01, 2026. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [3] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, 'Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review', *Energy Storage Mater.*, vol. 10, pp. 246–267, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
- [4] N. Yang, X. Zhang, G. Li, and D. Hua, 'Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 80, pp. 55–65, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.049.
- [5] S. H. Finkelstein, M. Ricci, T. Böttcher, and K. Schmidt-Rohr, 'How lithium-ion batteries work conceptually: thermodynamics of Li bonding in idealized electrodes', *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 26, no. 36, pp. 24157–24171, 2024, doi: 10.1039/D4CP00818A.
- [6] Pierluca Pacolla 'Enhancement of PCM materials using metal fins in a battery thermal management system', 2022.
- [7] O. Bakar, 'NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LIQUID COOLING OF LITHIUM ION BATTERIES IN AN ENERGY STORAGE SYSTEM', 2024.
- [8] R. Spotnitz and J. Franklin, 'Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells', *J. Power Sources*, vol. 113, no. 1, pp. 81–100, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00488-3.
- [9] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, 'Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review', *Energy Storage Mater.*, vol. 10, pp. 246–267, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
- [10] Y. Dai and A. Panahi, 'Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review', *Energy*, vol. 6, p. 100186, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.nxener.2024.100186.
- [11] 'Battery Thermal Runaway - Battery Design'. Accessed: Jan. 23, 2026. [Online]. Available: <https://www.batterydesign.net/thermal-runaway/>
- [12] 'バッテリーのリスク&ハザードの予測と抑制', IDAJ-BLOG. Accessed: Jan. 23, 2026. [Online]. Available: <https://www.idaj.co.jp/blog/software/converge/battery-risk-hazard-220225>
- [13] H.-D. Li, Q.-W. Shen, Z.-Y. Zhang, X.-Y. Zhao, Y. Wei, and S.-A. Li, 'Research Progress on Thermal Management of Lithium-Ion Batteries', *J. Electrochem.*, vol. 31, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.61558/2993-074X.3526.
- [14] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, and H. Zhang, 'A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles', *J. Power Sources*, vol. 501, p. 230001, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230001.
- [15] Z. Ling, F. Wang, X. Fang, X. Gao, and Z. Zhang, 'A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling', *Appl. Energy*, vol.

148, pp. 403–409, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.080.

[16] R. H. S. Winterton, ‘Early Study of Heat Transfer: Newton and Fourier’.

[17] ‘HEAT CONDUCTION EQUATION’. Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://cecs.wright.edu/~sthomas/htchapter02.pdf>

[18] ‘R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot - Transport Phenomena, 2nd Edition-Wiley (2001).pdf’. Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/R.%20Byron%20Bird,%20Warren%20E.%20Stewart,%20Edwin%20N.%20Lightfoot%20-%20Transport%20Phenomena,%202nd%20Edition-Wiley%20\(2001\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/R.%20Byron%20Bird,%20Warren%20E.%20Stewart,%20Edwin%20N.%20Lightfoot%20-%20Transport%20Phenomena,%202nd%20Edition-Wiley%20(2001).pdf)

[19] ‘Low Finned Titanium Tube - grandfintube.com’, grandfintube.com -. Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.granfintube.com/product/low-finned-titanium-tube/>

[20] ‘Thermal Modeling of a Cylindrical Lithium-Ion Battery in 3D’. Accessed: Jan 05 [Online]. Available: <https://www.comsol.jp/model/thermal-modeling-of-a-cylindrical-lithium-ion-battery-in-3d-10224.pdf>

[21] ‘Thermal Gap Filling Potting Gel for Cylindrical Cell Packing - AI Technology, Inc.’ Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.aitechnology.com/thermal-gap-filling-potting-gel-for-cylindrical-cell-packing/>

[22] D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, ‘A General Energy Balance for Battery Systems’, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 132, no. 1, pp. 5–12, Jan. 1985, doi: 10.1149/1.2113792.

[23] E. Paccha-Herrera, W. R. Calderón-Muñoz, M. Orchard, F. Jaramillo, and K. Medjaher, ‘Thermal Modeling Approaches for a LiCoO₂ Lithium-ion Battery—A Comparative Study with Experimental Validation’, *Batteries*, vol. 6, no. 3, p. 40, Aug. 2020, doi: 10.3390/batteries6030040.

[24] P. Jindal, R. Katiyar, and J. Bhattacharya, ‘Evaluation of accuracy for Bernardi equation in estimating heat generation rate for continuous and pulse-discharge protocols in LFP and NMC based Li-ion batteries’, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 201, p. 117794, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117794.

[25] X. Hu, H. Xu, C. Ding, Y. Tian, and K. Yang, ‘Numerical Study on the Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries Based on an Electrochemical–Thermal Coupling Model’, *Batteries*, vol. 11, no. 7, p. 280, Jul. 2025, doi: 10.3390/batteries11070280.

[26] ‘電気化学モデル’. Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/jp/learning/mpscholar/battery-management-systems/battery-modeling/electrochemical-models?srsid=AfmBOorQkWqosBZR65SYseVGDnEY6XB6r05QUKTrnPHQj5giOXGCx6m>

[27] B. Zheng *et al.*, ‘A comprehensive review of lithium-ion battery modelling research and prospects: in-depth analysis of current research and future directions’, *Appl. Energy*, vol. 401, p. 126688, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.126688.