

実用電気スクータの開発

Development of Electric Scooter for Practical Use

中 澤 祥 浩* 熊 谷 千 昭*
Yoshihiro Nakazawa Chiaki Kumagai

要 旨

ガソリンスクータに匹敵する動力性能と実用上十分な航続距離を有する第一種原動機付自転車に適合した電気スクータを開発した。同様とする性能を達成するために、高性能 NiCd バッテリ、DC ブラシレスモータ、ベルトコンバータ、低転がり抵抗タイヤ等の個々の部品に対する効率追求および最適融合を試みた。

その結果、動力性能は 0-200m 加速 17.3s、航続距離は市街地走行モードで 35km を達成した。

また、バッテリーの充放電寿命は、スクータの生涯走行距離に見合う 300 サイクルを超えることが確認できた。

ABSTRACT

Electric scooter has been developed which has acceleration and maximum speed matching gasoline engine scooter and sufficient driving distance per charge for practical use, and conforms to the regulations of motorcycles with cylinder capacity of 50cm³ or less. To achieve these performances, requirements were set out for high efficiency of individual components such as the high performance NiCd battery, DC brushless motor, belt torque converter and low rolling resistance tire while their optimum combination was pursued.

As a result, acceleration from 0 to 200m in 17.3sec. and the driving distance of 35km in the urban area driving mode have been achieved. The charge and discharge cycle life of the battery has exceeded 300, which correspond to an estimated life traveling distance of the conventional scooter.

1. ま え が き

米国のロウエミッション規制に代表される地球規模的な環境問題の高まりに応じ、近年電動車の開発が各分野で行われている。ガソリン車に代替できる高性能電動車には、十分な動力性能と航続距離の両立が要求される。しかし、バッテリーのエネルギー密度 (Wh/kg) がガソリンの約 1/300 と小さいことが、電動車実用化の障壁となっている。その対応として高性能バッテリーや急速充電システムの開発、充電スタンドの設置など、幅広い検討が進められている。

一方、車両の開発においてはモータの高効率化を始め、電動車に最適な駆動系の構成、タイヤの開発などエネルギー損失を最小とすることが重要な課題である。更に二輪車の電動化では、四輪車と異なった特有の使い方やスペース面での制約などからくる独自の課題があり、第一種原動機付自転車ではモータ定格出力が 0.6kW 以下という法規制にも適合する必要がある。

本稿では、これらの課題に取り組み 1994 年春に生

産、販売を開始した電気スクータ (CUV ES: Clean Urban Vehicle Electric Scooter) の構成要素の中から、主として駆動系、バッテリーおよび充放電制御系の技術ポイントについて述べる (Fig. 1)。



Fig. 1 External View of CUV ES

* 朝霞研究所

Table 1 Specifications of CUV ES and Gasoline Engine Scooter “Dio”

		CUV ES	Dio
Overall Length (m)		1.785	1.640
Overall Width (m)		0.615	0.615
Overall Height (m)		1.035	0.995
Wheel Base (m)		1.265	1.145
Displacement (cm ³)		—	49
Rated Power (kW)		0.58	—
Vehicle Curb Mass (kg)		130	68
Tire Size	Front	80/100-10 46J	3.00-10 42J
	Rear	90/90-10 50J	↑
Tire Air Pressure (kPa)	Front	150	125
	Rear	225	200
Fuel Consumption (km/ℓ at 30km/h)		—	48.5
Energy Consumption (km/kWh at 30km/h)		46.2	—
Turning Radius (m)		1.9	1.8
Maximum Power (kW/rpm)		3.25/3600	5.0/7000
Fuel Capacity (ℓ)		—	5.0
Main Battery (V-Ah)		86.4/20	—

2. CUV ES の概要

CUV ES は、静粛・低振動で市街地使用に適した実用電気スクータを目指して開発された。ベース車は市販ガソリンスクータのディオであり、スクータの有用性を維持するためにヘルメット収納ボックスとフラットフロアはそのまま採用している。

CUV ES とディオの主要諸元を Table 1 に示す。バッテリーの搭載により、全長で 145mm、質量で 62kg、CUV ES の方が大きな値になっている。

Fig. 2 に主要部品の取り付け位置、Fig. 3 にシステム構成を示す。

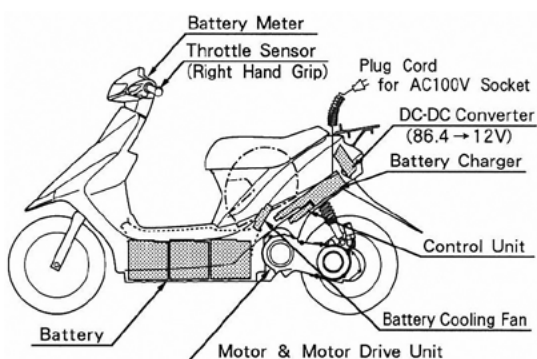


Fig. 2 Layout of Components

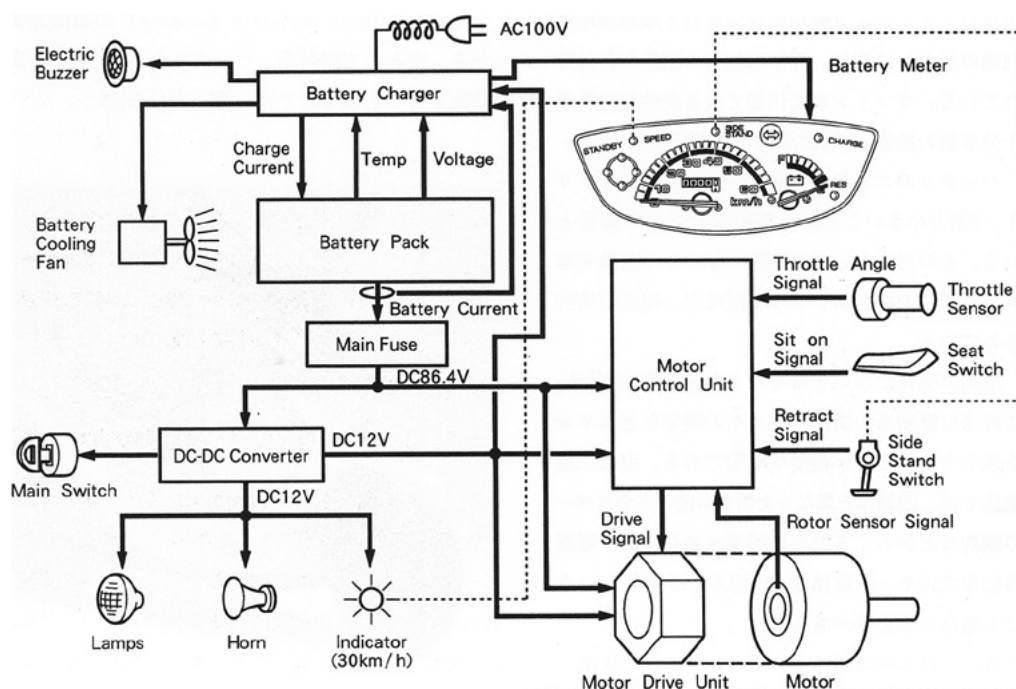


Fig. 3 System Diagram

2.1 駆動システム

駆動システムの機構部を Fig. 4 に示す。モータはベルトコンバータケース前方にあり、駆動力はガソリンスクータと同様、ベルトコンバータ、クラッチ、リダクションギヤ、後輪へと伝達される。

モータドライブユニットはモータ側面にあり、バッテリーからの電力供給とモータコントロールユニットからの駆動信号を受けてモータのロータ回転角度に合わせた通電を行う。駆動信号は、スロットル操作角およびモータ回転数をもとに内蔵マップデータから検索され、バッテリー電圧補正を受けて出力される。同様に減速時の回生制動信号もマップ検索された値に従って出力される。

なお、モータ軸上に設けられた冷却ファンは、モータおよびモータドライブユニットを一括冷却する。

2.2 バッテリマネジメントシステム

72本の単バッテリーは、6パックに12本ずつ収納され、充電器により一括制御される。充電開始および充電終了は全パックのバッテリー温度と電圧に応じて自動的に行う。またバッテリー高温時は冷却ファンを作動させる。

走行中、充電器はバッテリーの放電量を積算し残量計

の制御を行う。RES(Reserve)到達時には、RESインジケータを点灯し電子ブザーによる間欠警告音を発生させる。E(Empty)到達時にはモータコントロールユニットに信号を送り、モータ駆動出力をスロットル操作角の1/3相当に下げ、「ガス欠」と同様の車体挙動を演出し運転者にモータ停止の予兆を与える。

2.3 補機

灯火器を始めとする補機類は、ガソリン車と同じく12V仕様を採用している。メータとインジケータ類には、速度計、RES 警報機能を持つ残量計、サイドスタンドインジケータ、充電インジケータおよびスタンバイインジケータがある。充電インジケータは充電待機中は点滅、充電中は点灯、充電終了で消灯する。スタンバイインジケータは4灯LEDで構成され、サイドスタンド格納および着座を検出すると発進許可状態と判断し、順次回転点滅する。モータ回転中は消灯する。

3. 性能目標

第一種原動機付自転車に適合することを前提に、以下の性能目標を設定した。

(1) 動力性能

市販ガソリンスクータと同等の加速性能である0-200m、17.8sを達成すること。

(2) 航続距離

1充電あたり、スクータ1日の走行距離として十分な35km(市街地走行モード)を達成すること。

(3) バッテリ寿命

スクータの生涯走行距離に相当する300充放電サイクルを達成すること。これはスクータの使用実態を考慮して生涯走行距離を10000kmと設定し、これを航続距離35kmで除してサイクル数を決定した。

4. 動力性能と航続距離の両立

電動車は搭載できるエネルギー量が極めて少なく、動力性能を満足しながら目標航続距離を達成するためには、モータの効率を高め、車体駆動に係わるエネルギー損失を極力低減することが重要である。以下にエネルギー効率を高めた駆動系構成仕様と必要エネルギー量を確保するためのバッテリー構成について述べる。

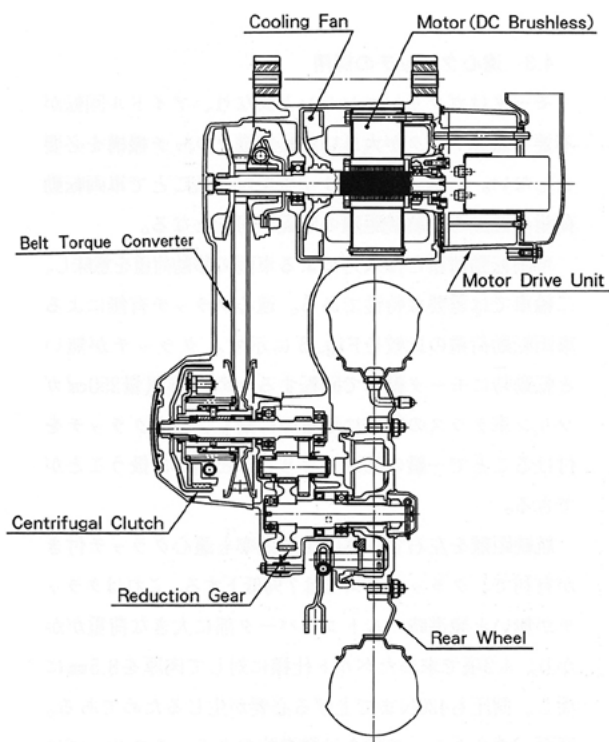


Fig. 4 Cross Section of Propulsion Unit

4.1 モータの選定

モータはロータを4極、ステータを12スロットで構成した三相(U.V.W.)駆動DCブラシレス方式を採用した。希土類磁石をロータマグネットに採用し、通電開始角を電気角で8deg進角すること等によって最高90%の効率(モータドライブユニット含む)を達成した(Fig. 5, 6)。

最高出力は、目標に示した動力性能および登坂性能12degを得るため3.25kWとした。ベルトコンバータ変速特性が変化しても、加速性能への影響を最小とするために出力特性にフラットゾーンを設けた。

4.2 ベルトコンバータの効率改善

モータの効率の良いゾーンを使い続けるために、変速機としては現行スクータ同様、ベルトコンバータ式を採用した。電動車は、ベルトにかかるトルク変動が内燃機関に比べ平準化されており、ベルトの周囲温度も低いことから、登坂時等の荷重対応と耐久性について有利で

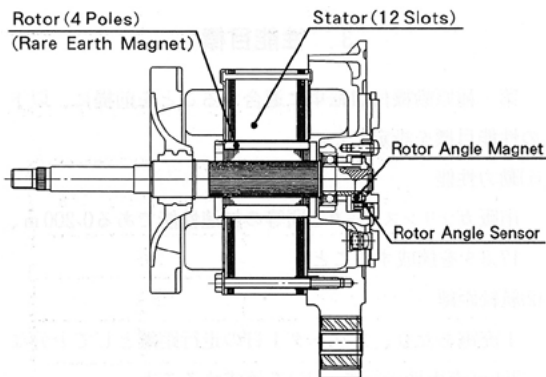


Fig. 5 Cross Section of Motor

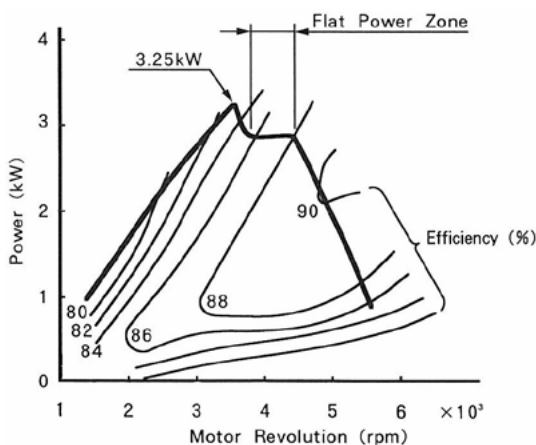


Fig. 6 Power and Efficiency of Motor

	A	B
	CUV ES	Gasoline Engine Scooter Type
Belt Thickness (mm)	7.5	8.5
Belt Side Force (N)	200	350

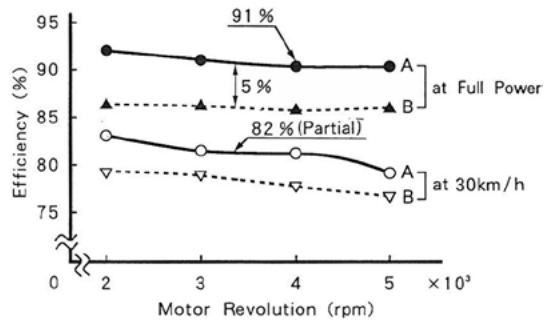


Fig. 7 Belt Torque Converter Efficiency

ある。

これらに着目してベルトの側方荷重(側圧)と肉厚を検討した。

その結果、ガソリンエンジン車に対し、ベルトの側圧を350Nから200N、ベルト肉厚を8.5mmから7.5mmに下げることができ、伝達効率も全域で約5%向上し全開時で91%、パースシャル30km/h時で82%を得た(Fig. 7)。

4.3 遠心クラッチの採用

モータはガソリンエンジンと異なり、アイドル回転が不要で低速トルクが大きいいため発進クラッチ機構を必要としない。しかし遠心クラッチを付けることで車両転動荷重の低減と、航続距離の延長が可能となる。

車両転動荷重とは人力による車両の移動荷重を意味し、二輪車では重要な特性である。遠心クラッチ有無による車両転動荷重の比較をFig. 8に示す。クラッチが無いと転動時にモータ軸まで回転するため、排気量250cm³ガソリン車クラスの荷重になるのに対し、遠心クラッチを付けることで一般の50cm³ガソリン車と同等に扱うことができる。

航続距離を左右する駆動伝達効率も遠心クラッチ付きが有利で、クラッチレスでは7%低下する。これはクラッチが無いと発進時ベルトコンバータ部に大きな荷重がかかり、4.2項で求めたベルト仕様に対して肉厚を8.5mmに戻し、側圧も420Nまで上げる必要が生じるためである。反面、遠心クラッチ付きは発進時のクラッチスリップによる損失が発生するが、モータの低速トルクが大きい

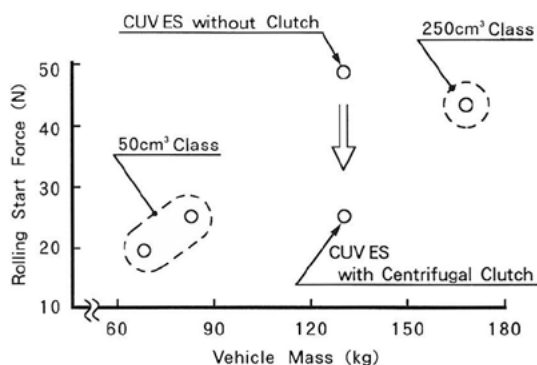


Fig. 8 Comparison of Rolling Start Force

ことを活かし、断続時のストール回転数を下げることで低減できる (Table 2)。また、57回の発進を含んだ市街地走行モードでも全使用エネルギーに占める発進エネルギーの割合は小さく、遠心クラッチ付きの方が航続距離にして2.1km多く走行できることが判った (Table 3)。

以上より CUV ES ではストール回転数を 3000rpm まで下げて発進時のクラッチスリップによる損失を低減した遠心クラッチを採用した。

4.4 低転がり抵抗タイヤの採用

駆動系に関わるエネルギー損失の要因として、タイヤの転がり抵抗がある。CUV ES ではタイヤコンパウンドの組成を変更し、転がり抵抗を低減している。

今回開発した低転がり抵抗タイヤと従来品との完成車

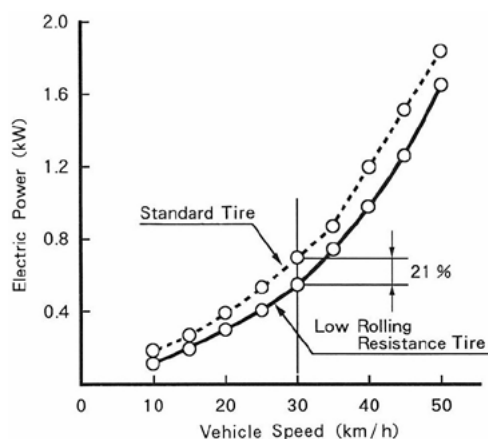


Fig. 9 Effect of Low Rolling Resistance Tire

Table 2 Comparison of Energy Consumption at Starting

Type	Energy (kWs)	Ratio(%)
Without Clutch	1.5	100
Centrifugal Clutch with 3000rpm Stall	1.78	119
Centrifugal Clutch with 3800rpm Stall	2.55	170

Table 3 Comparison of Driving Range (Including 57 Times Start Action)

Type	Belt Side Force(N)	Range (km)
Without Clutch	420	32.9
Centrifugal Clutch with 3000rpm Stall	200	35
Centrifugal Clutch with 3800rpm Stall	200	34.7

Table 4 Total Energy Efficiency of Propulsion Unit

Device	Efficiency (%)
Motor	88
Belt Converter	91
Reduction Gear	97
Tire	89
Total	69

における消費電力比較を Fig. 9 に示す。開発品は従来品比較で 30km/h 時の消費電力を 21% 減少した。なおタイヤ空気圧を高くすることによっても転がり抵抗を低減できるが、乗り心地も配慮し車両質量に見合う、フロント 150kPa、リヤ 225kPa に設定している。

4.5 トータルエネルギー効率

駆動系のエネルギー効率をまとめて Table 4 に示す。モータおよびベルトコンバータの高効率化に加えて、リダクションギヤのオイルシール部グリス変更および低転がり抵抗タイヤの採用により、トータルで 69% のエネルギー効率を得ている。

4.6 必要エネルギー量

航続距離要件 35km を満足させるためのバッテリーエネルギー量は、台上試験のデータより 1320Wh 必要であるため、式 (1) よりバッテリーは直列 72 本と決定した。なお、バッテリーの定格容量 E_{NOM} は 20Ah を選定、平均電池電圧 V_{AVR} はモード走行中の単バッテリーあたりの平均電圧 1.15V である。放電深度 (DOD: Depth of Discharge) はバッテリー寿命の観点から 80% と設定した。

$$N_{\text{BAT}} = \frac{P_{\text{BAT}}}{V_{\text{AVR}} \cdot E_{\text{NOM}} \cdot \frac{\text{DOD}}{100}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- N_{BAT} : 必要バッテリー数
- P_{BAT} : バッテリーエネルギー量 (Wh)
- DOD : 放電深度 (%)
- E_{NOM} : 定格容量 (Ah)
- V_{AVR} : 平均電池電圧 (V)

5. バッテリーの充放電サイクル寿命

CUV ES に採用した円筒密閉型 NiCd バッテリーは、充電時に正極で発生する O_2 ガスを負極で完全吸収し、電解液にイオンの形で戻すことで、正負極の充電量バランスと電解液濃度を維持できる。しかし、規定の温度範囲と電流値を外れた充電はバッテリー劣化を招くため、冷却を含めた充電開始条件と充電方式を検討した。また、毎回の安定した放電性能を維持するための充放電量の設定と制御についても検討した。

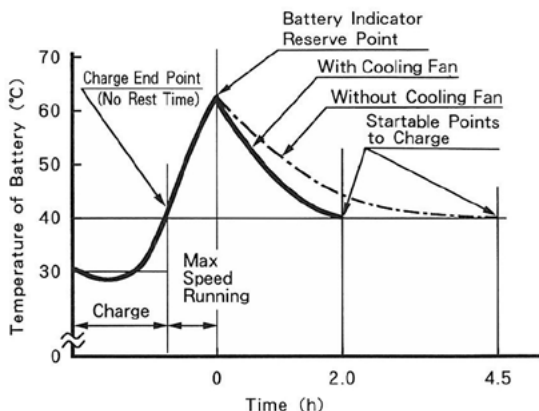


Fig. 10 Consumption of Battery Cool Down Time With and Without Cooling Fan

5.1 充電開始条件の設定

NiCd バッテリーは、氷点下における充電ではバッテリー電圧上昇に伴う電気分解により、電解液がガス化して圧力バルブから放出される。このため、電解液不足(濃度上昇)を招き内部抵抗増大により性能が低下する。逆に高温充電では負極の結晶成長、進展による内部微細ショートおよびバッテリー内部に使われている樹脂の化学的分解による電解液劣化が発生する。

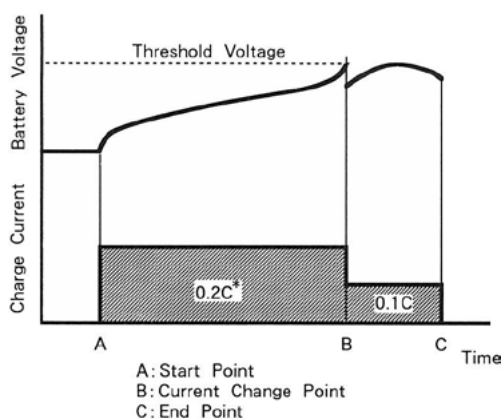
これらを防止するため、充電開始温度を 0~40℃ と設定し、バッテリー冷却ファンを装備した。冷却ファンは高負荷走行後のバッテリー高温時でも、いち早く充電が開始できるよう配慮したもので、30℃ 環境下での連続最高速走行後、2 時間以内での充電開始を可能としている (Fig. 10)。

5.2 充電方式と充放電量の設定・制御

バッテリーの放電性能を維持するためには、必要十分な充電量を与えて活性化させる一方、構成する複数バッテリーの充電状態を揃える必要がある。個々の単バッテリーは温度、容量および充電量が異なるため、一部のバッテリーを中心に充電量を制御した場合、他のバッテリーは過剰充電または充電不足になる。これらが進展すると動力性能、航続距離の低下やバッテリーの性能劣化の原因となる。CUV ES では、全ての単バッテリーを活性化させ充電状態の均衡を図るために、適量の過充電を行っている。充電パターンは充電末期領域での昇温による劣化を防止するため、二段定電流充電方式とし、一段目 0.2C、二段目 0.1C とした (Fig. 11)。一段目から二段目への切り替えは、バッテリーが容量 100% 相当電圧に到達した時点をつまて行う。なお、容量 100% 相当電圧はバッテリー温度により変化するため、温度パラメータの演算式より求めている。

一方、バッテリーエネルギーの放出量を決定する放電深度は、航続距離の観点からは深い方が良いが、複数バッテリー構成では各バッテリーの充電状態および容量のばらつきを考慮し、放電末期に特定のバッテリーが過放電を受けて機能喪失しないように定める必要がある。CUV ES では放電深度を 80% に設定、電力量換算値 1320Wh 放電にて放電制限モード (残量計 E 到達時のモータ駆動出力制限モード) に移行した後、放電停止する仕様を採用することで、航続距離とバッテリー寿命の両立を図った。

放電量を管理する上では、バッテリー内部で発生する自



- C^* = Charge Current Rate relating to Nominal Capacity
ex. $0.2C = 0.2 \times 20 \text{ (Ah)} = 4\text{A}$
- Threshold Voltage Controlled with Battery Temperature

Fig. 11 Characteristics of Battery Charge Current and Voltage

已放電も考慮する必要がある。例えば自己放電が放電深度 20% に達したものに、実使用による放電深度 80% が加わった場合、放電深度が 100% になり、バッテリーのぼらつきによって一部が逆充電のダメージを受ける。これを防止するために、放置期間に応じた自己放電量をバッテリーエネルギー量から減算補正することにより、放電深度は 80% に制限される。具体的にはメインスイッチ OFF 後の時間をカウントし、メインスイッチ ON 時にカウント量に応じて残量計指示の補正を行っている。

5.3 バッテリー寿命確認の実走耐久試験

バッテリーの充放電寿命 300 サイクルの目標値をプロトタイプの車両を用いた実走耐久試験にて確認した。走行条件は市街地走行モードを用い、充電時の雰囲気温度は NiCd バッテリー寿命の温度依存性を考慮し、気温の高めな九州を代表地域とし、車両の実使用地域と想定した福岡の年間気温平年値データ¹⁾から充電温度モードを設定した (Table 5)。

試験の結果は目標値を上回り、400 サイクルを超える充放電寿命を確認した。

Table 5 Temperature Mode of Charge Condition

Temp (°C)	Cycle Number
40	50
35	50
30	50
25	150
Total	300

6. まとめ

電気スクータ CUV ES は駆動系のエネルギー効率を最大に高め、バッテリー充放電マネジメントを徹底することによって、動力性能、航続距離およびバッテリー寿命に対する目標に適合し、実用に供することができた。

- (1) モーターについては、ロータマグネットに希土類磁石を採用し、通電開始角を進角させることにより効率を向上させた。
- (2) ベルトコンバータについては、ベルトの側圧および肉厚を低減することにより効率を向上させた。
- (3) 遠心クラッチの採用により、クラッチ無し仕様より軽い転動荷重と長い航続距離が得られた。
- (4) タイヤについては、低転がり抵抗タイヤを採用することにより消費電力を低くおさえられた。
- (5) 72 本の NiCd バッテリーは、適量な過充電と充電時の温度条件、充電電流値、放電深度の設定などにより長寿命を図った。

参考文献

- 1) 気象庁平年気温データ (福岡) 1961~1991 年

著者



中澤 祥浩



熊谷 千昭